



Desarrollo de metodología para la selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, junto con sus cajas de unión descargadoras (*Link boxes*).

César Augusto Araque Giraldo

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesores

Interno

Javier Alejandro Jaramillo Arango, Ingeniero químico.

Externo

Juan José Rodríguez Vásquez, Ingeniero electricista.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

Cita	Araque Giraldo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] C. Araque Giraldo, “Desarrollo de metodología para la selección de cables aislados de media y alta tensión, junto con sus cajas de unión descargadoras (Link boxes)”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. OBJETIVOS	11
A. Objetivo general	11
B. Objetivos específicos	11
III. MARCO TEÓRICO	12
A. Aislante eléctrico	12
B. Ampacidad.....	12
C. Alta tensión.....	12
D. Campo eléctrico.....	12
E. Cable	12
F. Cable apantallado.....	13
G. Caída de tensión	13
H. Cajas de enlace o unión	13
I. Dimensión de los cables.....	13
J. Inducción magnética	13
K. Instalación eléctrica.....	14
L. Media tensión.....	14
M. Pantalla eléctrica.....	14
N. Regulación de tensión	14
Ñ. Tipos de cables aislados	14
IV. METODOLOGÍA	15
V. RESULTADOS.....	16

A. Procedimiento de selección de cable media tensión aislado AC.....	16
B. Pasos técnicos	18
1) Determinación corriente nominal.....	18
2) Preselección conductor.....	18
3) Verificar capacidad de transporte mediante la corriente de corto circuito.....	18
4) Corrección por temperatura.....	19
5) Corrección por profundidad de enterramiento	19
6) Verificar regulación de tensión	20
7) Corrección por agrupamiento.....	21
8) Verificación de calibre mínimo.....	21
C. Procedimiento selección de cable alta tensión aislado AC.....	22
1) Verificación de campo eléctrico y magnético	22
D. Disposición de los conductores	23
E. Análisis para la ubicación de las cajas descargadores (Link boxes).....	23
1) Unión de un solo punto	24
2) Múltiples distancias.....	25
3) Conductor a tierra continuo paralelo	25
4) Cross bonding.....	26
F. Análisis de voltajes inducidos en las chaquetas.....	28
G. Limitadores de sobretensión de las pantallas	29
VI. CONCLUSIONES	31
VII. REFERENCIAS	32
ANEXOS.....	33
A. Anexo 1	33
B. Anexo 2.....	38

LISTA DE TABLAS

TABLA I REQUISITOS MÍNIMOS DE PROFUNDIDAD DE LOS CABLES ENTERRADOS (EN cm).....	20
TABLA II CORRECCIÓN POR ENTERRAMIENTO CON BASE EN EL NÚMERO DE CONDUCTORES PORTADORES DE CORRIENTE	21
TABLA III CALIBRE MINIMO CON BASE A LA TENSIÓN NOMINAL DEL CONDUCTOR	21
TABLA IV NIVELES MAXIMOS DE EXPOSICIÓN A COMPO ELECTRICO Y MAGENTICO	22
TABLA V NIVELES MAXIMOS DE EXPOSICIÓN A COMPO ELECTRICO Y MAGENTICO	42

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Pasos para la selección conductor aislado media tensión. Elaboración propia adaptada de [10],[9],[4].	17
Fig. 2. Disposición de conductores con su cable a tierra en paralelo [8].	25
Fig. 3. Transposición de conductor a tierra paralelo [8].	26
Fig. 4. Unión cruzada de cables, sin transposición [8].	26
Fig. 5. Unión cruzada de cables con transposición [8].	27
Fig. 6. Diagramas de unión de un solo punto para circuitos compuestos por una sola longitud de cable [8].	27
Fig. 7. Diagrama de unión de un solo punto para un circuito compuesto por tres longitudes de cable [8].	27
Fig. 8. Simulación campo magnético, circuito 110 kV, configuración plana.	41

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AC: *Alternating Current* (Corriente alterna).

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC: *International Electrotechnical Commission*

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

NTC 2050: Norma Técnica Colombiana 2050.

UdeA: Universidad de Antioquia

RESUMEN

Durante la práctica académica se desarrolló la metodología sobre la selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, además de la utilización de cajas de unión (link boxes) y la determinación de cuándo se requiere que en ellas se instalen descargadores de sobre tensión. Mediante esta metodología, se pudieron establecer procedimientos acertados para el diseño que contemple cables aislados de media y alta tensión en AC, permitiendo disminuir tiempos en su selección y cumpliendo ésta ante condiciones de sobre tensiones en las pantallas.

La información recolectada pudo ser implementada en diferentes proyectos realizados en la empresa, estos a niveles de tensión de media y alta en AC, en los cuales, mediante la metodología descrita, se pudo confirmar la selección de cable aislado 1000 kcmil XLPE y la forma en que se manejarán las sobretensiones inducidas en las pantallas de los cables por medio del aterrizaje en un punto.

Todos los pasos descritos en la metodología, están basados en el RETIE, la NTC 2050 segunda actualización, la IEEE 575 y la IEC 60949, con sus cálculos respectivos y simulaciones de campo magnético realizadas en el programa FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*), garantizando que los resultados de la selección de cable de media tensión y de alta tensión en AC y la selección del método de alivio de sobretensiones en las pantallas del mismo, son fiables y cumplen con la normativa existente.

Palabras clave — Cable aislado, caja descargadora, media tensión, alta tensión.

ABSTRACT

During the internship, the methodology on the selection of medium and high voltage insulated cables in AC, was developed in addition to the use of junction boxes (link boxes), determining when it is required that surge arresters be installed. Through this research, certified procedures were established for the design which contemplates insulated cables of medium and high voltage in AC, allowing to reduce time in their selection and complying with overvoltage events in the cable's screens.

The information collected got implemented in a different medium and high AC voltage level projects, carried out by the company in which, through the methodology described, the conductor to be used, and the handling method for the induced surges in the cable's screens, were selected.

All the steps described in the methodology are based in the RETIE, the NTC 2050 second update, the IEEE 575 and the IEC 60949, with their respective calculations and simulations carried out in the FEMM 4.2 program (Finite Element Method Magnetics Magnetics), guaranteeing that the results of the selection of medium-voltage and high-voltage cables in AC and the selection of the method of overvoltage relief in the screens thereof, are reliable and complying with existing regulations.

***Keywords* - Insulated cable, arrester box, medium voltage, high voltage.**

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio de las tecnologías y demandas energéticas, llevan consigo una gran responsabilidad, pues constantemente se debe estar modernizando tanto la infraestructura que ayuda a transportar la energía, como también estar creando plantas generadoras para suplir esta necesidad. Situación que requiere de la creación de subestaciones, ya sean de maniobra, transformación o generación, pues estas tienen un papel fundamental en la distribución de la energía, de su calidad y además aporta seguridad al sistema [1]. Asociado a estas instalaciones eléctricas están los conductores para la conexión entre equipos o entre nodos del sistema de potencia, razón por la cual es de vital importancia tener una buena selección de cables en AC, para nuestro caso de media y alta tensión aislados, pues de ellos depende en gran parte el correcto flujo de la energía. El transporte de ésta, cuando se hace de forma subterránea o mediante medios sólidos o líquidos, requiere del uso de cables aislados para evitar daños en el cable y de cajas unión, estas últimas permiten el acople de las secciones de cables y también ayudan a disminuir los campos o tensiones inducidas en las pantallas del cable, que se dan a través del recorrido de las secciones de este, mediante la conexión a tierra estas. Por ello se requiere identificar los criterios para saber cuál es la adecuada selección y ubicación de estas cajas, al igual que para la selección de los conductores.

Por consiguiente, este trabajo está enfocado en realizar el análisis de la selección de los conductores aislados para media y alta tensión en AC, de forma que sea posible evaluar las condiciones y variables más importantes que afectan en el funcionamiento del cable, y con base en ellas poder tener una selección que cumpla todos los criterios y normas que apliquen. Además, se analizó la selección de las cajas de unión, y se concretaron pautas para la ubicación y el método para aliviar las tensiones inducidas en las pantallas. Con esto se puede tener un proceso detallado que sirve para la selección de cada uno de ellos y además garantiza una transmisión de la energía de manera eficiente, dejando así, una metodología clara y detallada, que permite que este proceso sea acorde con todos los requerimientos que las normas pertinentes exigen, y al mismo tiempo que esta correcta selección, ayude a alargar la vida útil de los cables, a mejorar la confiabilidad en las subestaciones eléctricas, a contribuir a una mejor transmisión de energía y disminuir los tiempos en procesos de diseño con base en la claridad que la metodología brinda.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar una metodología con sus cálculos técnicos, mediante el estudio detallado sobre la selección de cables aislados de media y alta tensión, así como también las cajas de unión y su función descargadora, con el fin de estandarizar el correcto uso y selección de éstos.

B. Objetivos específicos

- Consultar y analizar, mediante una revisión bibliográfica, el método y las normas de selección de cables de media y alta tensión aislados y las cajas de unión.
- Sistematizar la correcta selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, teniendo en cuenta las variables que influyen en su funcionamiento
- Analizar el uso de las cajas de unión y su función descargadora de tensiones inducidas.
- Desarrollar una metodología para la correcta selección y especificaciones de las cajas de unión.

III. MARCO TEÓRICO

La selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, como también las cajas de unión (*link boxes*), comprenden aspectos técnicos que deben de ser aclarados para poder entender la información contenida en este informe de práctica. A continuación, se detalla cada uno de los conceptos necesarios para el entendimiento del documento presente.

A. Aislante eléctrico

“Material de baja conductividad eléctrica que puede ser tomado como no conductor o aislador. Equivale a dieléctrico” [2].

B. Ampacidad

La capacidad de corriente o también conocida como ampacidad, según [4] define como: *“la corriente máxima que puede transportar continuamente un conductor en las condiciones de uso, sin superar su régimen la temperatura nominal de servicio”*.

C. Alta tensión

Con base en el RETIE [4], la Alta tensión se define como las tensiones mayores o iguales a 57,5 kV y menores o iguales a 230 kV.

D. Campo eléctrico

Un campo eléctrico es una región del espacio en la cual existe una modificación dada por una fuerza eléctrica que actúa sobre una carga eléctrica. Este puede ser producido por uno o más cargas que interactúen en el espacio, y puede ser uniforme o puede variar, tanto en su magnitud, como en su dirección de un lugar a otro, además su dirección es radial saliendo de cargas positivas y para cargas negativas es radial entrando a la carga [2].

E. Cable

“Conjunto de alambres sin aislamiento entre sí y entorchado por medio de capas concéntricas” [4].

F. Cable apantallado

“Es un cable con una envoltura conductora alrededor del aislamiento que le sirve como protección electromecánica, también es conocido como cable blindado” [4].

Estos cables vienen siendo usados desde 1881, cuando Ferranti fabricó su primer cable subterráneo para redes de distribución, traen consigo varios beneficios como lo son, una menor interrupción por fallas, menor exposición de riegos al público, no genera los problemas que una línea aérea que cruza una calle pueda tener en momentos de falla y, además, ayuda a mantener una estética visual y conservar el medio ambiente [5].

G. Caída de tensión

Expresa la pérdida de tensión que se tiene en un circuito en función de la corriente de carga, del factor de potencia, de la resistencia y de la reactancia de los conductores [7].

H. Cajas de enlace o unión

Las cajas de enlace, es un accesorio utilizado para la unión de los cables aislados, además prestan la función de punto de descargue para las pantallas internas de estos, ayudando así a que no se generen sobre voltajes inducidos en los cables y aumentar el rendimiento y la vida útil de estos, además de permitir tener puntos intermedios para la revisión e intervención de los mismos [6].

I. Dimensión de los cables

Las dimensiones en los cables están dadas por dos sistemas de unidades, AWG (American Wire Gauge) y kcmil (Circular mil), ambos indican el área transversal del cable, es importante tener claro que para cada uno de los sistemas de unidades, existen interpretaciones diferentes, para el sistema AWG, a medida que se aumenta el número de este, el conductor es de un área menor, por lo tanto un conductor #14 AWG tendrá menor área transversal que un conductor #10 AWG, mientras que para el sistema de unidades kcmil, a medida que aumenta su número, de igual manera lo hace su diámetro.

J. Inducción magnética

La inducción magnética es el proceso mediante el cual por acción de campos magnéticos se generan campos eléctricos. Cuando esto ocurre en un conductor, se tendrán fuerzas que actúan sobre las cargas y con ello se inducirá una corriente eléctrica en él [3].

K. Instalación eléctrica

“Conjunto de aparatos eléctricos, conductores y circuitos asociados, previstos para un fin particular: Generación, transmisión, transformación, conversión, distribución o uso final de la energía eléctrica” [4].

L. Media tensión

Con base en el RETIE [4], se define la media tensión como las tensiones nominales superiores a 1 kV e inferiores a 57,5 kV.

M. Pantalla eléctrica

La pantalla eléctrica en los conductores aislados de media y alta tensión en AC, sirve para confinar el campo eléctrico generado por el cable y de esta manera, proteger a las personas u animales que puedan estar de manera cercana, además de proteger el circuito mismo de condiciones extremas que puedan genera algún accidente [8].

N. Regulación de tensión

“El porcentaje de caída de tensión o regulación de tensión es la relación entre la caída de tensión en un circuito y la tensión entregada por el circuito, multiplicado por 100 para convertir a porcentaje” [7].

Ñ. Tipos de cables aislados

Los cables aislados consisten básicamente en una disposición física formada por un núcleo conductor de energía, de material acero, cobre o fibra óptica, que contiene sobre él una capa de material dieléctrico, la variación de estos en cuanto a materiales y espesor, está supeditada al requerimiento que el cable tenga, ya sea por condiciones ambientales o por condiciones de carga.

Existen varios tipos de cables aislados, cada uno especificado para cierto tipo de condiciones de funcionamiento. Actualmente los materiales más usados para el aislamiento del cable son el papel impregnado, caucho de Etileno Propileno (EPR) y el Polietileno reticulado (XLPE).

IV. METODOLOGÍA

Para la selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, y el uso de las cajas de unión (*link boxes*), se realizaron las siguientes actividades con el fin de poder entender la problemática y posterior a esto, dar solución con base en las normativas pertinentes y los estudios que se hayan realizado. A continuación, se listan las actividades realizadas.

- A. Recopilación de artículos científicos, informes, normas nacionales e internacionales, mediante la revisión bibliográfica en bases de datos como son la *IEEE*, *Access Engineering*, *Science Direct*, etc, que contienen información sobre la selección de cables aislados de media y alta tensión e información sobre las cajas de unión (*Link Boxes*).
- B. Clasificación de los informes y artículos científicos encontrados en el paso anterior, identificando los métodos que se utilizan para la selección de cables de alta y media tensión, de igual forma clasificar la información recolectada sobre las cajas de unión.
- C. Resaltado de puntos claves necesarios para la selección de cables aislados de alta y media tensión, como lo son el tipo de materiales, capacidad de corriente, etc.
- D. Con base a la teoría encontrada, se desarrolla una metodología que permita tener un paso a paso para la correcta selección de los cables aislados de media y alta tensión.
- E. Documentación de la metodología, con sus respectivos cálculos para la selección de cables de media y alta tensión desarrollada, de forma que pueda ser utilizada por cualquier persona que lo requiera.
- F. Resaltado de las variables y condiciones, como son la ubicación de las cajas de unión, configuración de estas y demás aspectos necesarios para el correcto funcionamiento de las cajas de unión
- G. Desarrollo de metodología con sus respectivos cálculos que permita la selección adecuada y detallada de las cajas de unión, permitiendo tener un procedimiento acorde a las normas.
- H. Documentación de pautas para el proceso de selección de cables aislados de media y alta tensión y de cajas de unión.
- I. Conclusiones de las metodologías desarrolladas.

V. RESULTADOS

Luego de recopilar y revisar la información contenida en bases de datos como la IEEE, también artículos y normas que están orientadas al tema, se condensó la siguiente información, permitiendo reducir de forma concisa los datos necesarios para estas selecciones de cables aislados de media y alta tensión AC y las cajas de unión (*link boxes*) con su función descargadora, logrando disminuir los tiempos en los procesos técnicos relacionados a la determinación de estos aspectos.

A. Procedimiento de selección de cable media tensión aislado AC.

El procedimiento para la selección del cable en media tensión aislado AC, será regido por el RETIE [4] (25.8.3 conductores subterráneos), la NTC 2050 [9], y la norma internacional IEC 60949 [10], conforme a sus lineamientos y anexando procedimientos para que la selección sea más acotada a las necesidades que se tienen, los pasos a seguir se muestran en la Fig. 1, se debe tener en cuenta, que este es un proceso iterativo, en el cual, si alguno de los aspectos difiere de las condiciones a cumplir, se deberá regresar al paso correspondiente que la figura mencione y tomar un calibre de cable mayor.



Fig. 1. Pasos para la selección conductor aislado media tensión. Elaboración propia adaptada de [10],[9],[4].

Inicialmente se tomarán datos eléctricos y ambientales para el dimensionamiento de los conductores, estos datos permitirán la correcta selección. Los datos necesarios para el uso de las fórmulas que se presentan a continuación, son los siguientes:

- Tensión del sistema
- Potencia del sistema
- Longitud del conductor
- Disposición del circuito (plano o trébol)
- Frecuencia
- Altura sobre el nivel del mar
- Temperatura ambiente promedio
- Material del conductor
- Temperatura del conductor
- Tiempo de duración de falla

B. Pasos técnicos

1) Determinación corriente nominal

Si la corriente nominal monofásica que debe llevar el conductor no es un dato de entrada, se procede a su cálculo, utilizando la ecuación (1).

$$I_{nominal} = \frac{\text{Potencia nominal trifasica}}{\sqrt{3} * \text{Tension nominal}}, [A] \quad (1)$$

2) Preselección conductor

Con base en la corriente nominal monofásica y la tabla 310.16 a 310.19 para tensiones de 0 a 2000V y de 310.67 a 310.86 para tensiones de 2001 a 35000V (dependiendo del caso de configuración) de la NTC 2050 [9], se preselecciona el calibre del conductor.

3) Verificar capacidad de transporte mediante la corriente de corto circuito

Según la norma IEC 60949 [10], el cálculo de la corriente de cortocircuito se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$I_{cc} = A * K * \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{T_2 + \beta}{T_1 + \beta}\right)}{t}} \quad (2)$$

Donde:

- A : Área del conductor [mm^2]
- I_{cc} : Corriente de cortocircuito [A]
- k : Constante que depende del material [$A * s^{\frac{1}{2}}/mm^2$] (226 para el cobre y 148 para aluminio)
- T_1 : Temperatura de operación del conductor [$^{\circ}C$]
- T_2 : Temperatura máxima permisible en estado de falla [$^{\circ}C$]
- β : Es la temperatura de resistencia cero [$^{\circ}C$] (234.5 para cobre y 228 para el aluminio)
- t : Tiempo de duración de la falla [s]

4) Corrección por temperatura

La corrección por temperatura es un procedimiento que nos permite, llevar a los valores estándar, condiciones que están por fuera de estos. En este caso se lleva a valores normalizados la corriente final, teniendo en cuenta que la temperatura real del cable difiere a la que presentan las tablas de la NTC 2050 [9]. A continuación, se presenta la ecuación (3) brindada por la misma para esta corrección:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{TC - TA_2 - \Delta TD}{TC - TA_1 - \Delta TD}} \quad (3)$$

Donde:

- I_2 : Capacidad de corriente final, [A]
- I_1 : Capacidad de corriente según las tablas presentadas por la NTC 2050[9], [A]
- Tc : Temperatura del conductor, [$^{\circ}C$]
- TA_1 : Temperatura ambiente, dada por tablas presentadas en la NTC 2050 [9], [$^{\circ}C$]
- TA_2 : Temperatura ambiente deseada, [$^{\circ}C$]
- ΔTD : Aumento de temperatura por pérdidas del dieléctrico, [$^{\circ}C$]

5) Corrección por profundidad de enterramiento

Con base en la NTC 2050 [9], en sus notas para las tablas 310-69 a 310-86, en el punto 3, si la profundidad de enterramiento de los conductos supera los 0.8 m o la profundidad de los cables

supera los 0.9 m, se deberá aplicar un factor de corrección del 6% por cada 0,3 m de aumento de profundidad.

Si dado el caso se aumenta la profundidad en un segmento o en varios del conductor eléctrico, no es necesario reducir la capacidad de conducción, siempre que esta distancia que varía la profundidad sea inferior al 25% de la distancia total de instalación del cable.

La profundidad de enterramiento de los cables o la tubería que llevara los cables, está dada por la tabla 710-4. b de la NTC 2050 [9], a continuación, se presenta un resumen de esta:

TABLA I
REQUISITOS MÍNIMOS DE PROFUNDIDAD DE LOS CABLES ENTERRADOS (EN cm)

Tensión del circuito	Cables directamente enterrados	Tubería rígida no metálica aprobada para enterrarla directamente	Tubería metálica rígida y tubería metálica intermedia
De más de 600 V hasta 22 kV	75	45	15
De más de 22 kV hasta 40 kV	90	60	15
De más de 40 kV	100	75	15

6) Verificar regulación de tensión

Con base en el RETIE [4], para baja tensión se acepta una caída de tensión del +5% y -10%, para equipos de media tensión, la caída permitida no debe de ser mayor al 3% o la que esté definida por el operador de red en el punto de conexión.

El cálculo de caída de tensión, se realiza con la siguiente ecuación:

$$\Delta U = K * Z * In * L , [V] \tag{4}$$

K: como coeficiente igual a 2 para sistemas monofásicos y bifásicos y $\sqrt{3}$ para sistemas trifásicos.

Z: Impedancia del cable. [Ω]

L: Longitud del conductor, [km]

In: Corriente nominal monofásica, [A]

Para el porcentaje de regulación, se divide la caída de tensión por el voltaje nominal.

7) Corrección por agrupamiento

Según la NTC 2050 [9], en su capítulo 3, cuando se tiene un cable o canalización que supere los 3 conductores, se debe realizar un ajuste en su capacidad de conducción, a continuación, se presenta la relación entre número de conductores portadores de corriente y el porcentaje de ajuste para la capacidad conductora en la TABLA II.

TABLA II
CORRECCIÓN POR ENTERRAMIENTO CON BASE EN EL NÚMERO DE CONDUCTORES PORTADORES DE CORRIENTE

Número de conductores portadores de corriente	Porcentaje del valor de las tablas, ajustado para la temperatura ambiente si fuera necesario
De 4 a 6	80
De 7 a 9	70
De 10 a 20	50
De 21 a 30	45
De 31 a 40	40
41 y más	35

8) Verificación de calibre mínimo

Luego de realizar los pasos anteriores y teniendo el calibre de cable seleccionado, se debe verificar que el calibre cumpla con el mínimo para los conductores de 0 a 35 kV, esto con base en la tabla 310-5 de la NTC 2050 [9], mostrada a continuación en la TABLA III.

TABLA III
CALIBRE MINIMO CON BASE A LA TENSIÓN NOMINAL DEL CONDUCTOR

Tensión nominal del conductor (V)	Sección transversal mínima del conductor	
	mm*	AWG
De 0 a 2000	2,08	14 cobre
	3,3	12 aluminio o aluminio recubierto de cobre
De 2001 a 8000	8,36	8
De 8001 a 15000	33,62	2
De 15001 a 28000	42,2	1
De 28001 a 35000	53,5	1/0

Para tensiones superiores el calibre no está especificado, se deberá revisar otros aspectos como son los campos magnéticos y tensiones inducidas.

C. Procedimiento selección de cable alta tensión aislado AC.

Para el procedimiento de selección de cable de alta tensión aislado AC, se deben seguir los mismos pasos expuestos en la selección de cable aislado para media tensión aislado AC, pero al final se debe anexar la siguiente validación.

1) Verificación de campo eléctrico y magnético

Según el RETIE [4], si la instalación cuenta con un nivel de tensión superior a los 57,5 kV, se debe realizar el estudio de campos magnéticos y eléctricos, para así garantizar que a un metro del nivel del piso del lugar donde esté la persona o la residencia, el campo no supere los valores mostrados en la TABLA IV.

TABLA IV
NIVELES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN A COMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)	Densidad de flujo magnético (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas.	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4,16	200

Este análisis se hace mediante simulación, si con la configuración actual del cable no se cumplen las intensidades de campo eléctrico y las densidades de flujo magnético, se deberán tomar medidas correctivas para llegar a estos valores.

Algunas de las medidas correctivas pueden ser:

- Mayor profundidad de enterramiento
- Cambio de configuración de las triadas, de plana a trébol.
- Determinar si el calibre de cable pueda ser variado.

D. Disposición de los conductores

Para la disposición de conductores se cuenta con varias configuraciones, tanto en cantidad de conductores como en la posición en la que se ubicarán, a continuación, se esbozan estas conexiones.

Los conductores pueden ir en forma de triángulo o en disposición plana conocidas también como trébol y flat respectivamente. Para cada una de estas configuraciones, existen métodos de conexión para disminuir los efectos de sobretensión que se presentan en las pantallas de los cables debido a la inducción de tensión por parte de las corrientes que genera campos electromagnéticos y los acoples entre cables [8].

E. Análisis para la ubicación de las cajas descargadores (Link boxes)

Las cajas de unión *link boxes*, son dispositivos que permiten la unión de cable mediante conectores renovables, estas también pueden llevar limitadores de sobre tensión, elemento que sirve para la descarga de sobre tensiones que superen los niveles nominales de soportabilidad del cable, protegiéndolo de daños causados por condiciones inseguras o ineficientes de funcionamiento.

La ubicación adecuada de estas cajas de unión, se da luego de conocer la distancia total de cableado y de haber realizado la selección del conductor. Posterior a esto se procede con el análisis de sobretensión en las pantallas conductoras en condiciones normales y de falla, parámetro que permite determinar si el cable debe ser manipulado para garantizar las tensiones permitidas en la pantalla, esto ayuda a definir el método de conexión de las mismas con el fin de limitar el valor de tensión que llevarán, y con ello proteger y darle una mayor vida al cable. Es importante tener en cuenta que los cables aislados, si bien pueden disponerse en configuraciones en las cuales el espaciamiento entre ellos sea mínimo, también en algunas configuraciones suelen disponerse muy alejados entre ellos. La primera configuración permite que no exista una corriente elevada por efecto de inducción, pero sobrelleva el problema de calentamiento por conducción entre los cables, mientras que la segunda configuración permite tener menos pérdidas por calentamiento al estar separados los cables. Sin embargo, en cuanto a inducción magnética, las pérdidas son mayores pues los campos no logran anularse entre sí y generan una mayor inducción. Las configuraciones a

analizar están marcadas a las inducciones dadas por cables cercanos y con ellos poder analizar y seleccionar adecuadamente la ubicación y el método a utilizar con las cajas de unión, garantizando que el cable tenga su funcionamiento en las mejores condiciones eléctricas y físicas.

Todas las técnicas de unión de pantallas traen consigo las siguientes ventajas [8]:

- Permite la conexión de las pantallas a tierra.
- Limita las tensiones de estado estable a valores aceptables y seguros.
- Reduce significativamente o elimina las pérdidas en las pantallas.
- Limita las sobretensiones transitorias a niveles aceptables en combinación con los dispositivos de protección contra sobretensiones
- Mantiene una corriente de retorno de falla continua, tanto por la pantalla o por el conductor continuo (GCC)

Alguno de esos métodos, según la IEEE 575 [8], son los siguientes:

1) Unión de un solo punto

Para esta configuración, se realiza la conexión a tierra en uno de los extremos del cable, en el extremo sobrante, la terminal del cable se aísla del medio que la rodea. Es la conexión más simple y efectiva por los materiales empleados y su construcción. Se recomienda usar esta configuración en circuitos de hasta 2 km de longitud, y en circuitos donde las sobre tensiones no excedan los 200 V. si la sobretensión generada es mayor a 200 V y el circuito se encuentra en el rango de hasta 2 km, se debe usar descargadores de sobretensión ubicándolos en la punta aislada, extremo opuesto a la punta con unión a tierra, si al verificar esta configuración, se sigue teniendo sobretensiones peligrosas, deberá optarse por otro método de conexionado [8].

Si las sobretensiones esperadas superan el 75% del BIL de la chaqueta o del aislador de la sección de la pantalla, se debe utilizar siempre limitadores de sobretensión [8].

2) Múltiples distancias

Esta configuración es usada cuando al conectar las chaquetas a tierra, la longitud del circuito genera tensiones que superan la capacidad de los cables, por lo que requiere que el cable sea seccionado y así poder mover los puntos de conexión a tierra, de forma que se puedan conseguir menores tensiones entre las secciones. Este método de seccionar el cable para generar varios puntos de aterrizaje de las pantallas solo debe ser aplicado cuando las condiciones permitan su uso y se haya validado que con la configuración de un solo punto con o sin descargador, no cumplen con las tensiones mínimas de las pantallas. Dado que, al seccionar el cable, se pueden generar problemas adversos en el circuito [8].

3) Conductor a tierra continuo paralelo

Se recomienda para las configuraciones de unión en un solo punto y de múltiples distancias, el uso del conductor a tierra continuo paralelo con conexión a tierra en los dos extremos de este, de forma que las corrientes de secuencia cero que son generadas en el momento de la falla, tengan un camino sencillo y controlable, ayudando así a que no se produzcan sobre tensiones que puedan afectar el sistema eléctrico [8]. En la Fig. 2, se muestra la disposición de los cables junto con el conductor a tierra paralelo.

El conductor de tierra continuo paralelo, debe aislado para evitar corrosión o deterioro por exposición a factores externos.

Cuando los conductores no están transpuestos, se recomienda transponer el conductor a tierra continuo como se muestra en la Fig. 3.

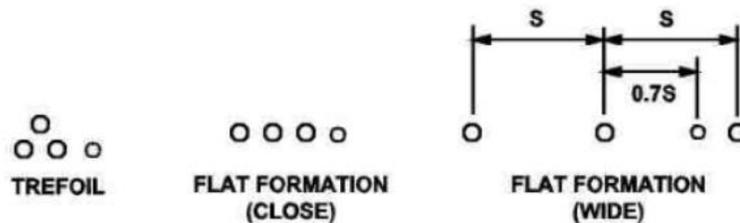


Fig. 2. Disposición de conductores con su cable a tierra en paralelo [8].

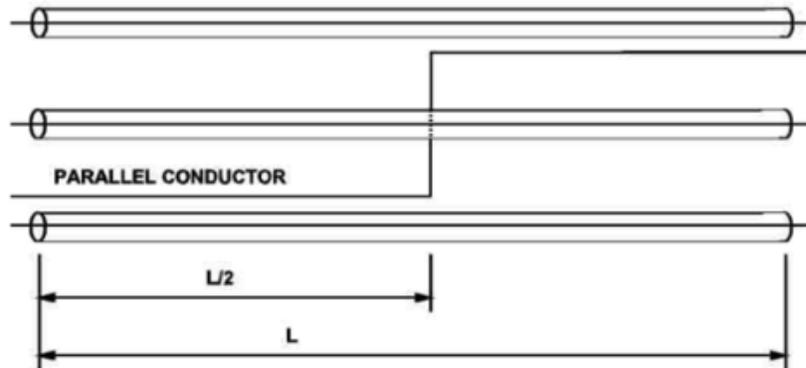


Fig. 3. Transposición de conductor a tierra paralelo [8].

4) *Cross bonding*

La configuración “*Cross bonding*” o uniones cruzadas, consiste en cortar el cable en tramos iguales y en cada corte trasponer las pantallas, buscando que en aproximadamente 3 segmentos se anule totalmente los voltajes inducidos. En este método las pantallas son aterrizadas en ambos extremos finales de los cables, la distancia entre estos extremos es llamada como sección mayor, esta configuración suele utilizarse en circuitos de más de 2 km de largo.

También puede darse el “*Cross bonding*” con la misma lógica descrita anteriormente, pero anexando la transposición de los cables, esta configuración es preferida en cuanto a buscar eliminar completamente las sobretensiones, pero resulta ser compleja en cables con mucha extensión o de extra alta tensión.

En la Figura mostrada a continuación, dada por la IEEE 575 [8], se muestra las formas de transposición.

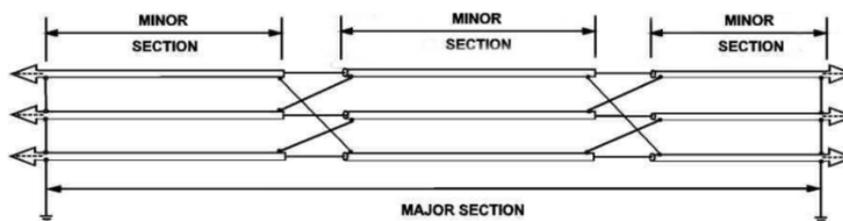


Fig. 4. Unión cruzada de cables, sin transposición [8].

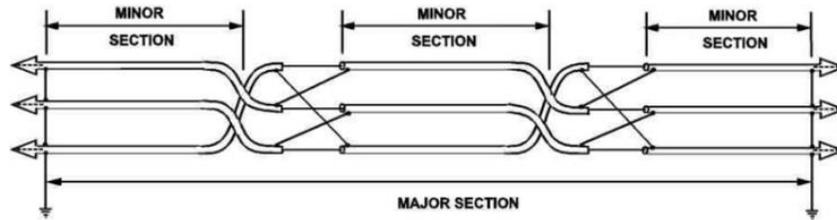
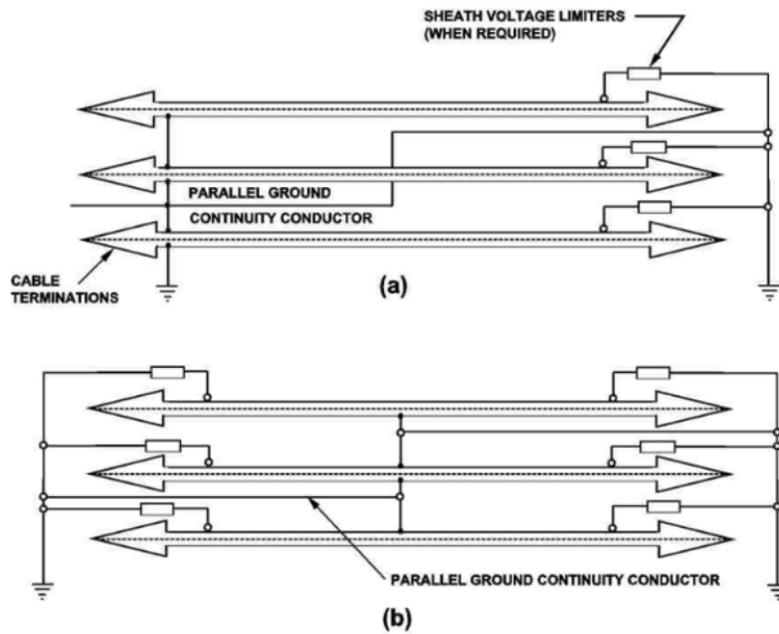


Fig. 5. Unión cruzada de cables con transposición [8].



a) Enlace en punto final

b) Enlace de punto medio

Fig. 6. Diagramas de unión de un solo punto para circuitos compuestos por una sola longitud de cable [8].

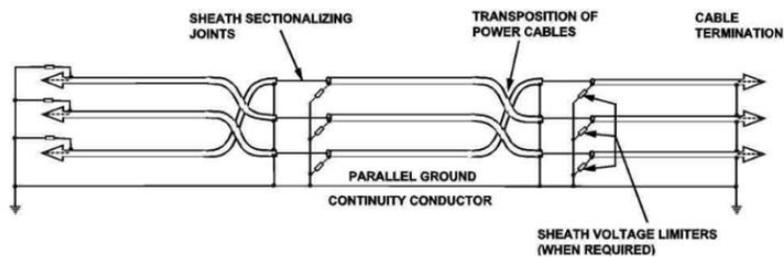


Fig. 7. Diagrama de unión de un solo punto para un circuito compuesto por tres longitudes de cable[8].

F. Análisis de voltajes inducidos en las chaquetas

Las chaquetas de los cables aislados, al estar sometidas a campos eléctricos, inducen en ellas una tensión, esta tensión es calculada mediante las siguientes ecuaciones dadas por la IEEE 575 de 2014 [8], en condiciones normales y de falla, para configuración en trébol y plana, si se requiere otra configuración, se deberá remitir a la norma mencionada:

1) *Configuración trébol*

Considerando que el espaciamiento entre los cables es de igual longitud, según la IEEE 575 [8], se cumple:

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (5)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (6)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (7)$$

2) *Configuración plana*

Para la configuración plana, considerando que el espaciamiento axial entre cables es igual, las sobretensiones de los cables están dadas por las siguientes ecuaciones, según la IEEE 575 [8]:

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{S}{d} \right) + j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4S}{d} \right) \right) [V/m] \quad (8)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (9)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{S}{d} \right) - j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4S}{d} \right) \right) [V/m] \quad (10)$$

G. Limitadores de sobretensión de las pantallas

Cuando los métodos mencionados anteriormente no cumplen con las especificaciones técnicas requeridas, existe una opción que va más allá de la configuración física de los cables y de la unión de sus pantallas, los limitadores de sobretensión o comúnmente conocidos como SVL, son dispositivos que permiten disminuir las sobretensiones presentadas ya sean por eventos tipo rayo, conmutación de contactos o fallas eléctricas, permitiendo disminuir los posibles daños en las pantallas y cuidando la integridad del cable en general.

Existen varios tipos de SVL, algunos de los más utilizados son las resistencias no lineales como los varistores de óxido de metal (MOVs), los bloques de carburo de silicio (SiC) en serie con los interruptores de arco y los interruptores de arco. Todos estos permiten tener un voltaje límite aceptable, el cual, al ser superado, será descargado por medio del SVL a tierra y de esta forma recortar las subidas de tensión al voltaje límite aceptable. Los MOVs, tienen la ventaja de que su accionamiento es muy rápido en comparación de las otras tecnologías, su diseño es compacto y se recupera fácilmente de los eventos de sobretensión, características que permiten desplazar tecnologías antiguas frente a la acción que ofrecen ante los transitorios, teniendo más eficacia en su funcionamiento y permitiendo sustituir a dispositivos como el interruptor de arco, que tienen un funcionamiento de menor velocidad.

Los SVL para cables aislados, deben tener protección ante condiciones ambientales complejas, que cumplan la misma protección a la que el cable está diseñado y además que permita su mantenimiento periódico, esto por la ubicación adversa que pueda tener, por el recorrido que el cable ofrece [8].

Según la IEEE 575 [8], las consideraciones para la selección de los SVL para cables aislados son los siguientes:

- 1) Los limitadores deben de ser apropiados para la operación continua y con voltaje igual al de estado estable de la pantalla, ante condiciones de carga normales o de emergencia.

- 2) Los limitadores de tensiones deben ser diseñados para disipar la energía asociada con la producida por las sobretensiones transitorias.
- 3) Los limitadores y la unión a la pantalla, deben ser apropiados para trabajar en sobretensiones resultantes de fallas a frecuencias de 50 / 60 Hz, incluyendo las fallas externas.
- 4) Para resistencias limitadoras no lineales del tipo MOVs, se debe definir un tiempo máximo para las sobretensiones transitorias en las frecuencias de 50/60 Hz, resultantes de las corrientes de fallas externas al cable. El tiempo típico considerado, es doce veces el tiempo máximo de despeje de falla del sistema.
- 5) Cuando al calcular voltajes a 50/60 Hz, aparecen a través de las pantallas, se debe tener en cuenta los limitadores que están conectados en estrella o triángulo.

VI. CONCLUSIONES

Con base en la información recolectada y las normas expuestas, se tiene un procedimiento sencillo y eficiente para la selección de cables de media y de alta tensión.

La selección y correcta ubicación de las cajas de unión (*link boxes*), puede ser determinada de forma práctica con los pasos y las cualidades de cada una de las disposiciones, todo enmarcado a el cuidado del cable con respecto a las sobretensiones que se puedan presentar en la pantalla, cabe anotar que las configuraciones expuestas en el documento no son las únicas y que existen más de ellas, si se requiere una configuración adicional, se deberá recurrir a las respectivas normas.

Con la información recolectada en este documento, a futuro se buscará realizar la automatización del proceso de selección, mediante una aplicación que permita integrar todos los parámetros necesarios para la correcta selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, esta información será almacenada en el repositorio de GitHub [12].

En el medio, no es común hablar sobre los aspectos mencionados en este informe. Es por eso que la información recolectada toma valor, pues permite a la persona que la necesite, tener de forma concreta las bases necesarias para la selección de estos elementos.

Mediante la metodología desarrollada, se pudo poner en práctica y validar la selección de cables aislados de media y alta tensión en AC, como también la selección del método para la descarga de sobretensiones en las pantallas, en diferentes casos de estudio, como los descritos en el documento, Anexo 1, Anexo 2 .

VII. REFERENCIAS

- [1] UPME, “PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN – TRANSMISIÓN 2015 – 2029.” Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 2015.
- [2] Beiser, A. (2009). *Schaum’s Outline of Applied Physics, Fourth Edition (4th ed.)*. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071611572>
- [3] T. Martin y A. Serrano, «Inducción magnética», Universidad politécnica de Madrid, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/induccion.html>. [Accedido: 01-sep-2021].
- [4] Ministerio de Minas y Energía, “Anexo General del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIÉ),” Bogotá D.C. 2013
- [5] Abdel-Salam, M., Anis, H., El-Morshedy, A., & Radwan, R. (2013). *High-Voltage Engineering: Theory and Practice*. In Marcel Dekker Inc (Vol. 53, Issue 9).
- [6] Surya Santoso, Ph.D, Beaty, H. W. (2018). *UNDERGROUND POWER TRANSMISSION (27th edition.)*. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259642586/toc-chapter/chapter5/section/section21>
- [7] Surya Santoso, Ph.D.; H. Wayne Beaty. *Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. CALCULATION OF VOLTAGE REGULATION AND I²R LOSS, Chapter* (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2018). <https://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2612/content/book/9781259642586/toc-chapter/chapter7/section/section5>
- [8] IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, 2014
- [9] INCONTEC, “Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050).” Bogotá, 2020.
- [10] IEC 60949, “Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects”, Edition 1, 1998.
- [11] IEC 60099-4, “Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”, Edition 3, 2014.
- [12] César Araque, https://github.com/cesararaque/Cable_aislado_link_boxes, 2022.

ANEXOS

A. Anexo 1

Caso de estudio de media tensión 13.8kV

Se tiene una subestación ubicada a una altura sobre el nivel del mar de 2 msnm, temperatura promedio de 27,8 °C, longitud de circuito subterráneo de 0.08 km, tensión del sistema de 13.8 kV, 60 Hz, potencia del sistema de 1.2 MW, circuito en configuración trébol con separación de cables de 59.6 mm, temperatura de operación de conductor 90°C, corriente de corto circuito 40 kA, tiempo de duración de falla de 1s, Aumento de temperatura por pérdidas del dieléctrico 2.03°C, impedancia del circuito de 0.1248 Ω. Verificar que para un conductor de cobre aislado XLPE- TR, de 1000 kcmil, se cumple la capacidad de transporte de 600 A.

Para la verificación de este calibre, se procede con los pasos descritos en el punto de selección de conductor de media tensión en AC.

1. Corriente nominal.

La corriente nominal para este problema está dada, son 600 A.

2. Preselección de conductor.

Con base a las características descritas en el problema, se revisa la tabla 310-77 de la NTC 2050 [9], en la cual, para los 600 A, se debe utilizar un conductor con sección de 1000 kcmil o 506,7 mm², el cual tiene una capacidad de corriente de 640 A, mayor a los 600 A pedidos por el problema.

3. Capacidad de corto circuito.

Utilizando la formula (2)

$$I_{cc} = A * K * \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{T_2 + \beta}{T_1 + \beta}\right)}{t}}, [A]$$

$$I_{cc} = 506.7 * 226 * \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{234.5 + 250}{90 + 234.5}\right)}{1}} = 47.874 \text{ kA}$$

Se confirma que la capacidad de corto circuito obtenida es mayor a la requerida por el problema.

I_{cc} obtenida 47.874 kA

I_{cc} requerida 40 kA

4. Corrección por temperatura.

Para la corrección de temperatura, se debe tener en cuenta la temperatura a la cual la tabla de la NTC 2050 está diseñada, y la temperatura ambiente del sistema, en nuestro caso 20°C y 27,8°C.

Lo que hace este procedimiento es llevar el valor estándar de corriente de 20 °C a el valor requerido por la instalación 27.8°C.

Se utiliza la ecuación (3):

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{TC - TA_2 - \Delta TD}{TC - TA_1 - \Delta TD}} \quad 3$$

Con un $\Delta TD = 2.03$ para XLPE

$$I_2 = 640 * \sqrt{\frac{90 - 27.8 - 2.03}{90 - 20 - 2.03}} = 602.159 \text{ A}$$

Se confirma que después de la corrección por temperatura, la capacidad de transporte de corriente sigue siendo superior o igual a los 600 A requeridos.

5. Corrección por enterramiento

Con base en la información suministrada por el problema, el cable estará a una profundidad de 0.8, según la NTC 2050 [9], al no superar la profundidad de 0.8 m, no se hace corrección por enterramiento, por lo tanto, la corriente seguirá siendo de 602.159 A.

6. Regulación de tensión

Para la regulación de tensión, se tiene que el circuito tendrá una distancia de 0.08 km, una impedancia de circuito de 0.1248 Ω y la corriente nominal será de 600 A, utilizamos la ecuación (4) para el cálculo de caída de tensión.

$$\Delta U = K * Z * I_n * L, [V] \quad 4$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * 0.1248 * 600 * 0.08 = 10.3757 [V]$$

Para la regulación de tensión, se divide la caída de tensión por el voltaje nominal 13.8 kV.

$$\%R = \frac{10.3757}{13800} * 100 = 0.07545 \%$$

Con lo que se puede confirmar, que la regulación de tensión, está por debajo del 3% pedido por la norma, por lo tanto, este calibre cumple.

7. Corrección por agrupamiento

Como la configuración del circuito es trébol y no se menciona que sea doble circuito o que se contengan más cables en su trayectoria, no se realiza corrección por agrupamiento, dado a que el número de cables portadores de corriente no superan a 3 unidades.

8. Verificación de calibre mínimo.

Según la tabla 310-5 de la NTC 2050 [9], mostrada a en la TABLA III de este documento, el calibre mínimo para un circuito de 13.8 kV es de 33,62 mm², por lo que nuestro conductor cumple con esta condición.

Luego de esta verificación técnica, se procede a realizar la verificación de las cajas de unión (*link boxes*), seleccionando inicialmente la selección del método de aterrizaje y posteriormente la tensión inducida en la pantalla, si con esto se cumplen los requerimientos se habrá terminado con la selección y disposición del cable.

Teniendo en cuenta que la longitud del cable a instalar, es menor a 2 km, se opta por el método de unión en un solo punto de las chaquetas, con base en la teoría, para este método la inducción en las chaquetas debe de ser menor a 200V y si las sobretensiones superan el 75% del BIL, deberá instalarse descargadores de sobretensiones.

A continuación, se hace el análisis de los voltajes inducidos en las chaquetas:

Para la configuración trébol, tenemos las ecuaciones (5), (6) y (7).

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (5)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (6)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) [V/m] \quad (7)$$

Teniendo la corriente Ia, Ib, e Ic igual a 600 A, una separación de cables de 59.6 mm, un diámetro de la pantalla de 506.7 y una longitud aproximada del circuito de 0.08 km, se tiene:

$$E_a = j\omega * 600 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = 0.0567 + 0.0327j [V/m] \quad (5)$$

$$E_b = j\omega * 600 * (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = 0.0567 + 0.0327j [V/m] \quad (6)$$

$$E_c = j\omega * 600 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = 0.0567 + 0.0327j [V/m] \quad (7)$$

Multiplicando la magnitud del campo por la distancia del circuito, tenemos la tensión inducida en las pantallas a, b y c, en condiciones normales corresponden a:

$$0.06545 * 80 = 5.236 V$$

En condición de falla se debe analizar las tensiones inducidas por la corriente de corto circuito, para nuestro caso de 40000 A.

$$E_a = j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = 3.7797 + 2.1822j [V/m] \quad (5)$$

$$E_b = j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = -0 - 4.3644j [V/m] \quad (6)$$

$$E_c = j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2 * 0.0596}{0.5067} \right) = 1.3864 - 0.8005j [V/m] \quad (7)$$

Multiplicando la magnitud del campo por la distancia del circuito, tenemos la tensión inducida en las pantallas a, b y c, en condiciones de corto corresponden a:

$$Va = 4.3644 * 80 = 349.153 V$$

$$Vb = 4.3664 * 80 = 349.153 V$$

$$Vc = 1.6009 * 80 = 128.073 V$$

Dado a que la tensión inducida en condición de corto, supera a los 200 V dados como límite para la configuración de unión de un solo punto de la pantalla, por la IEEE 575 [8], se debe utilizar descargadores de sobretensión, a continuación, se muestra el procedimiento para su selección.

Para seleccionar los limitadores de tensión, se debe determinar:

- La tensión de operación continua (MCOV).

Para establecer el MCOV es necesario considerar la tensión inducida en las pantallas, ante diversas perturbaciones. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los numerales anteriores, el MCOV del limitador de tensión para el extremo no aterrizado de las pantallas del cable de 506.7 mm², será de 2 kV.

La tensión asignada al descargador (U_r) debe ser escogida como el mayor valor encontrado entre las siguientes ecuaciones:

$$U_{r1min} = 1,25 * MCOV = 1,25 * 2 = 2,5 kV$$

$$U_{r2min} = \frac{TOV}{T_r(pu)} = \frac{1,4*(MCOV)}{T_r(pu)} = \frac{1,4*2}{1,075} = 2,604 kV$$

Donde:

MCOV: Máxima Tensión de operación continua

Factor de fuerza de las sobretensiones temporales (TOV) para el tiempo

T_r : correspondiente al despeje de fallas; corresponde a 1,075 para un tiempo de 10s según la IEC 60099-4[11].

U_s : Tensión máxima del sistema

U_r : Tensión asignada

Por tanto, la tensión asignada será:

$$U_r = 2,6 \text{ kV}$$

Después de hacer la comparación entre los valores obtenidos y seleccionar el mayor entre ellos, se normaliza la tensión asignada, obteniendo como resultado U_r igual a 3 kV.

Con este último paso, se puede confirmar y garantizar, la selección del cable de media tensión y de su disposición con las pantallas aterrizadas a tierra.

B. Anexo 2

Caso de estudio de alta tensión 110 kV

Se tiene una subestación ubicada a una altura sobre el nivel del mar de 99 msnm, temperatura promedio de 28 °C, longitud de circuito subterráneo de 0.4 km, tensión del sistema de 110 kV, 60 Hz, circuito en configuración plana con separación de cables de 169.6 mm, temperatura de operación de conductor 90°C, corriente de corto circuito 40 kA, tiempo de duración de falla de 1s, Aumento de temperatura por pérdidas del dieléctrico 2.03°C, impedancia del circuito de 0.04 Ω . Hallar el calibre del conductor de aluminio aislado XLPE- TR que cumpla la capacidad de transporte de 263 A.

Para la verificación de este calibre, se procede con los pasos descritos en el punto de selección de conductor de alta tensión en AC.

1. Corriente nominal.

La corriente nominal para este problema está dada, son 263A.

2. Preselección de conductor.

Con base a las características descritas en el problema, se revisa la tabla 310-78 de la NTC 2050 [9], en la cual, para los 263 A, se debe utilizar un conductor con sección de 300 kcmil o 177.34 mm², el cual tiene una capacidad de corriente de 305 A, mayor a los 263 A pedidos por el problema.

3. Capacidad de corto circuito.

Utilizando la ecuación (2)

$$I_{cc} = A * K * \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{T_2 + \beta}{T_1 + \beta}\right)}{t}}, [A] \quad 2$$

$$I_{cc} = 177.34 * 148 * \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{228 + 250}{90 + 228}\right)}{1}} = 16.76 \text{ kA}$$

Se confirma que la capacidad de corto circuito obtenida es menor a la requerida por el problema.

Icc obtenida 16.76 kA

Icc requerida 40 kA

Por lo que se debe tomar un calibre mayor para poder cumplir con el requerimiento y repetir los cálculos para verificar que cumpla con la corriente de corto circuito, de esta manera se llega a que con un calibre de 100 kcmil o 506.7 mm² y una corriente portadora de 525 A, muy superior a la pedida de 263A, en donde la corriente de corto circuito, aplicando la ecuación (2), nos da lo siguiente:

Icc obtenida 47.874 kA

Icc requerida 40 kA

Por lo que cumple con la corriente de corto circuito requerida

4. Corrección por temperatura.

Para la corrección de temperatura, se debe tener en cuenta la temperatura a la cual la tabla de la NTC 2050 [9] está diseñada, y la temperatura ambiente del sistema, en nuestro caso 20°C y 28°C.

Lo que hace este procedimiento es llevar el valor estándar de corriente de 20 °C a el valor requerido por la instalación 28°C.

Se utiliza la ecuación (3):

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{TC - TA_2 - \Delta TD}{TC - TA_1 - \Delta TD}} \quad 3$$

Con un $\Delta TD = 2.03$ para XLPE

$$I_2 = 525 * \sqrt{\frac{90 - 28 - 2.03}{90 - 20 - 2.03}} = 493.137 \text{ A}$$

Se confirma que después de la corrección por temperatura, la capacidad de transporte de corriente sigue siendo superior a los 263 A requeridos.

5. Corrección por enterramiento

Con base en la información suministrada por el problema, el cable estará a una profundidad de 0.8, según la NTC 2050 [9], al no superar la profundidad de 0.8 m, no se hace corrección por enterramiento, por lo tanto, la corriente seguirá siendo de 493.137 A.

6. Regulación de tensión

Para la regulación de tensión, se tiene que el circuito tendrá una distancia de 0.4 km, una impedancia de circuito de 0.04Ω y la corriente nominal será de 263 A, utilizamos la ecuación (4) para el cálculo de caída de tensión.

$$\Delta U = K * Z * In * L, [V] \quad 4$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * 0.04 * 263 * 0.4 = 1916.56 [V]$$

Para la regulación de tensión, se divide la caída de tensión por el voltaje nominal 110 kV.

$$\%R = \frac{1916.56}{110000} * 100 = 0.017 \%$$

Con lo que se puede confirmar, que la regulación de tensión, está por debajo del 3% pedido por la norma, por lo tanto, este calibre cumple.

7. Corrección por agrupamiento

Como la configuración del circuito es plana y no se menciona que sea doble circuito o que se contengan más cables en su trayectoria, no se realiza corrección por agrupamiento, dado a que el número de cables portadores de corriente no superan a 3 unidades.

8. Verificación de calibre mínimo.

Para 110 kV no hay un calibre mínimo definido por la NTC 2050 [9], por lo que se tiene que revisar otros aspectos como lo es la disponibilidad de fabricantes, campos magnéticos y tensiones inducidas generadas en el cable, si estos cálculos llegan a superar los límites de esta.

9. Verificación de campo eléctrico y magnético

Se procede a la simulación del circuito mediante el programa FEMM 4.2, para poder determinar el campo magnético del circuito a 1 m del nivel del suelo como se muestra en la Fig. 8:

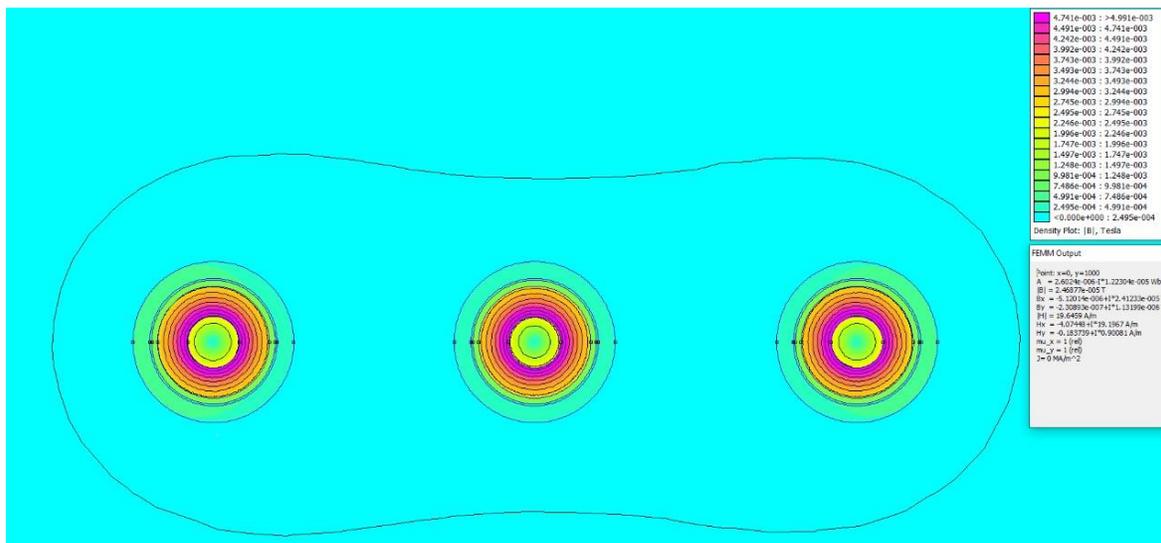


Fig. 8. Simulación campo magnético, circuito 110 kV, configuración plana.

TABLA V
NIVELES MAXIMOS DE EXPOSICIÓN A COMPO ELECTRICO Y MAGENTICO

Características	Unidad	Valores
Máxima corriente a transportar por los circuitos	A	263
Ancho de la servidumbre	m	10
Altura de medición	m	1
Densidad de flujo magnético a 5 m del eje de la línea	μT	0,532
Máxima densidad de flujo magnético (*)	μT	3,832
Límite establecido por RETIE	μT	200

La densidad de flujo magnético obtenido en el caso más crítico de los circuitos subterráneos, bajo condición de plena carga, es de 3,832 μT , la cual es menor que el límite establecido por RETIE [4].

La intensidad del campo eléctrico en un punto depende del nivel de tensión de la instalación y de la distancia a esta, así: a mayor tensión mayor campo eléctrico y a mayor distancia menor intensidad de campo eléctrico. Puesto que la pantalla del cable aislado se debe de conectar a la puesta a tierra, los campos eléctricos quedan atrapados entre el núcleo y la pantalla. Por lo tanto, estos cálculos se obvian.

Luego de esta verificación técnica, se procede a realizar la verificación de las cajas de unión (*link boxes*), seleccionando inicialmente la selección del método de aterrizaje y posteriormente la tensión inducida en la pantalla, si con esto se cumplen los requerimientos se habrá terminado con la selección y disposición del cable.

Teniendo en cuenta que la longitud del cable a instalar, es menor a 2 km, se opta por el método de unión en un solo punto de las chaquetas a tierra, con base en la teoría, para este método la inducción en las chaquetas debe de ser menor a 200V y si las sobretensiones superan el 75% del BIL, deberá instalarse descargadores de sobretensiones.

A continuación, se hace el análisis de los voltajes inducidos en las chaquetas:

Para la configuración plana, tenemos las ecuaciones (8), (9) y (10).

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{S}{d} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4S}{d} \right) \right) [V/m] \quad (8)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \quad (9)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{S}{d} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4S}{d} \right) \right) [V/m] \quad (10)$$

Teniendo la corriente I_a , I_b , e I_c son iguales a 263 A, una separación de cables de 169.6 mm, un diámetro de la pantalla de 66.72 y una longitud aproximada del circuito de 0.4 km, se tiene:

$$\begin{aligned} E_a &= j\omega * 263 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{0.1696}{0.06672} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4 * 0.1696}{0.06672} \right) \right) \\ &= -0.00925 + 0.0398j [V/m] \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_b = j\omega * 263 * (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2 * 0.1696}{0.06672} \right) = 0.03224 [V/m] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_c &= j\omega * 263 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{0.1696}{0.06672} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4 * 0.1696}{0.06672} \right) \right) \\ &= -0.00925 - 0.0398j [V/m] \end{aligned} \quad (10)$$

Multiplicando la magnitud del campo por la distancia del circuito, tenemos la tensión inducida en las pantallas a, b y c, corresponden a:

$$V_a = 0.0409 * 400 = 16.36V$$

$$V_b = 0.03224 * 400 = 12.896 V$$

$$V_c = 0.0409 * 400 = 16.36 V$$

En condición de falla se debe analizar las tensiones inducidas por la corriente de corto circuito, para nuestro caso de 40000 A.

$$\begin{aligned} E_a &= j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{0.1696}{0.06672} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4 * 0.1696}{0.06672} \right) \right) \\ &= -1.4068 + 6.0575j [V/m] \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_b = j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2 * 0.1696}{0.06672} \right) = 4.9042 [V/m] \quad (9)$$

$$E_c = j\omega * 40000 * (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \left(\frac{0.1696}{0.06672} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \left(\frac{4 * 0.1696}{0.06672} \right) \right) \\ = -1.4068 - 6.0575j [V/m] \quad (10)$$

Multiplicando la magnitud del campo por la distancia del circuito, tenemos la tensión inducida en las pantallas a, b y c, en condiciones de corto corresponden a:

$$V_a = 6.2187 * 400 = 2487.48 V$$

$$V_b = 4.9042 * 400 = 1961.68 V$$

$$V_c = 6.2187 * 400 = 2487.48 V$$

Dado a que la tensión inducida en condición de corto, supera a los 200 V dados como límite para la configuración de unión de un solo punto de la pantalla, por la IEEE 575 [8], se debe utilizar descargadores de sobretensión, a continuación, se muestra el procedimiento para su selección.

Para seleccionar los limitadores de tensión, se debe determinar:

- La tensión de operación continua (MCOV).

Para establecer el MCOV es necesario considerar la tensión inducida en las pantallas, ante diversas perturbaciones. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los numerales anteriores, el MCOV del limitador de tensión para el extremo no aterrizado de las pantallas del cable de 506.7 mm², será de 2 kV.

La tensión asignada al descargador (U_r) debe ser escogida como el mayor valor encontrado entre las siguientes ecuaciones:

$$U_{r1min} = 1,25 * MCOV = 1,25 * 2 = 2,5 kV$$

$$U_{r2min} = \frac{TOV}{T_r(pu)} = \frac{1,4*(MCOV)}{T_r(pu)} = \frac{1,4*2}{1,075} = 2,604 kV$$

Donde:

MCOV: Máxima Tensión de operación continua

Factor de fuerza de las sobretensiones temporales (TOV) para el tiempo

T_r : correspondiente al despeje de fallas; corresponde a 1,075 para un tiempo de 10s según la *IEC 60099-4 [11]*.

U_s : Tensión máxima del sistema

U_r : Tensión asignada

Por tanto, la tensión asignada será:

$$U_r = 2,6 \text{ kV}$$

Después de hacer la comparación entre los valores obtenidos y seleccionar el mayor entre ellos, se normaliza la tensión asignada, obteniendo como resultado U_r igual a 3 kV.

Con este último paso, se puede confirmar y garantizar, la selección del cable de alta tensión y de su disposición con las pantallas aterrizadas a tierra en un punto.