



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CABLES AISLADOS PARA DISTRIBUCION SUBTERRANEA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA AREA ELECTRICA-ELECTRONICA

PRESENTA:

BLANCA ESTELA DEL ROSARIO LUNA ARROYO

DIRECTOR DE TESIS:

ING. MARCO ANTONIO MANUEL MACIAS HERRERA



284901

MEXICO, D. F.

NOVIEMBRE 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi Guagüe:

Por tu gran amor, y fortaleza que es un estímulo para seguir adelante, siempre estarás en mi corazón.

A mis Padres:

Por su apoyo, amor y dedicación logramos juntos este objetivo que tanto anhelábamos, gracias por creer en mí.

A mis Hermanos:

Quienes con sus logros obtenidos y apoyo incondicional me impulsaron para lograr esta meta.

A Carlos:

Por tu confianza, motivación y apoyo a lo largo de la carrera, pero principalmente por tu gran amor.

A Momo, Pita y Jorge:

Por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida.

A Juan Salvador:

Por tu cariño y deseando ver superado por ti mi esfuerzo.



INDICE

TEMA	PAGINA
INTRODUCCION.	3
I. HISTORIA DE LOS CABLES AISLADOS	6
II. FUNDAMENTOS.	
II.1 Componentes de los cables aislados.	9
II.2 Conceptos generales.	20
III. DISEÑO DE CABLES.	
III.1 Conductores.	32
III.2 Pantallas	41
III.3 Aislamientos.	44
III.4 Cubiertas.	53
IV. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
IV.1 Resistencia a la Corriente Directa (C.D.)	68
IV.2 Resistencia a la Corriente Alterna (C.A.)	69
IV.3 Reactancia Inductiva.	72
IV.4 Reactancia Capacitiva.	75
IV.5 Impedancia.	78
IV.6 Impedancia de secuencia cero.	82

INDICE

TEMA	PAGINA
V. COMPORTAMIENTO DE LOS CABLES AISLADOS	
V.1 Caída de tensión y regulación.	90
V.2 Pérdidas en el conductor.	93
V.3 Pérdidas en los dieléctricos	94
V.4 Tensiones inducidas en las pantallas.	96
V.5 Ampacidad.	100
V.6 Análisis de cortocircuito en cables.	115
V.7 Pérdidas en las pantallas o cubiertas metálicas	126

INTRODUCCIÓN.

“El uso de Cables Subterráneos para distribución de energía está creciendo rápidamente y tiende a crecer más en el futuro. Sus ventajas para distritos congestionados son obvias y con el crecimiento de ciudades medianas y aún pequeñas se está superando la única desventaja: el alto costo. Es interesante comparar en cualquier gran ciudad, la inversión representada por el sistema subterráneo de energía eléctrica con el del sistema de generación. Sería instructivo para los ejecutivos de la industria, determinar si el cuidado y atención que se pone en la selección y mantenimiento de estos dos sistemas, está en relación con las inversiones que se realizan”.

No hace mucho tiempo que muchos Ingenieros estaban convencidos que la distribución subterránea estaba limitada por las características de los materiales, a no más de 25,000 Volts. El aumento de este límite a 33,000 Volts y posteriormente a 44,000 Volts amplió su imaginación. Los conservadores difícilmente se han recobrado de la sorpresa más reciente: la exitosa instalación de un cable de 66,000 Volts y antes de que se repusieran volvieron a admirarse con la instalación de varias millas de un cable de 132,000 Volts.

El uso de tensiones mayores no debe causar sorpresa, ya que esto se debe a una necesidad cada vez mayor. Lo relevante es su posibilidad comercial para alimentar cargas cuya confiabilidad es de importancia suprema.

¿Quién dice que no hay romance en la Ingeniería? Cuando los proyectos de un año son las realidades del siguiente. Y los resultados han sido posibles únicamente por el cuidadoso y esmerado análisis llevado a cabo por muchos ingenieros (muchos de ellos desconocidos por la fama) en diferentes laboratorios, pero siempre con una meta común.

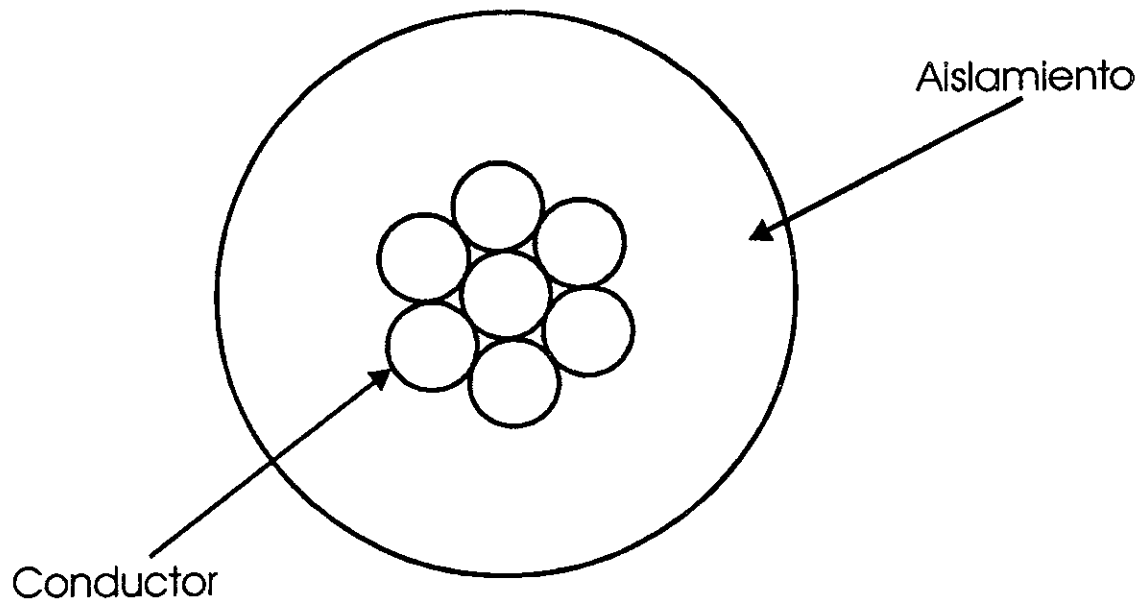
El diseño de cables de alta tensión es de interés principal para los fabricantes. La aplicación e instalación no es importante únicamente para los cables de alta tensión sino también para los de distribución. Muchos ingenieros han estudiado cuidadosamente el problema, muchos otros aún no. El problema no es fácil en sí; muchos artículos técnicos han sido editados y algunas partes de este tema no han sido tratadas adecuadamente. Pocas escuelas de ingeniería han dado el tema de Cables Aislados, algo más que un ligero bosquejo y la mayoría de los ingenieros han profundizado en el tema tan sólo un poco más”.

Los párrafos anteriores de esta introducción son una parte del editorial de la revista técnica: “The Electric Journal” de agosto de 1925. Como se puede apreciar, la importancia de los cables aislados no es algo nuevo y ya desde el comienzo de la distribución se pensó que los cables aislados jugaban un papel importante en esta rama de la Ingeniería Eléctrica.

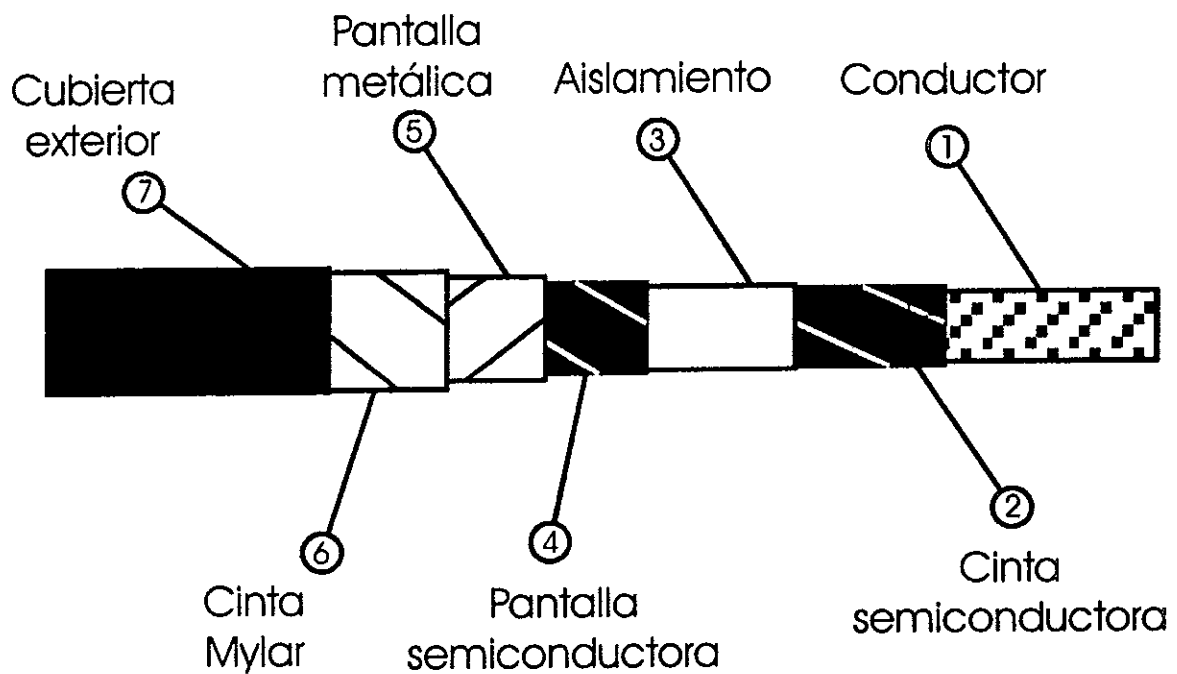
Para llevar a cabo la distribución subterránea de energía eléctrica, es necesario disponer de cables aislados de baja y de mediana tensión. Los cables empleados para llevar a cabo esta función deben ser lo suficientemente confiables para evitar que se lleven a cabo trabajos innecesarios de mantenimiento. Es por esto que todos y cada uno de los elementos que constituyen un cable tienen una función que cumplir y continuamente se hacen esfuerzos por mejorar sus características inherentes.

La estructura de un cable de baja tensión es muy diferente que la de un cable de mediana tensión. Esta diferencia se debe fundamentalmente a la tensión de operación de ambos cables. En un cable de baja tensión de aislamiento sólido el número de componentes es relativamente pequeño: conductor y aislamiento. Uno de mediana tensión, tiene más elementos: conductor, aislamiento, pantallas y cubierta protectora. Ver figura 1.

En los temas siguientes, se explican las principales funciones de los elementos que constituyen los cables aislados haciendo referencia a sus propiedades que influyen en el comportamiento del cable.



Cable baja tensión



Elementos que constituyen un cable de 5-69 kV con aislamiento sólido.
Figura 1. Cables de baja y mediana tensión.

I. HISTORIA DE LOS CABLES AISLADOS.

La historia de los cables aislados está llena de nombres de personas que en su afán por mejorar la situación de la tecnología que prevalecía en su tiempo, se dieron a la tarea de tratar de mejorar las condiciones de vida, llevando a cabo una serie de experimentos e investigaciones. El caso más antiguo de un cable aislado, que se tiene noticia, es el que fabricó el Barón Chilling en 1812 para una mina en Inglaterra, este cable estaba formado por conductores de cobre y aislamiento de hule de la India.

Uno de los primeros ejemplos de una instalación subterránea, lo representa el sistema de telégrafos en Hammersmith, Inglaterra (1816), en el que los cables consistían de conductores sólidos de cobre instalados en gruesos tubos de vidrio. Toda la unidad se protegió con madera tratada con material bituminoso. Muchos de los intentos iniciales empleados para llevar a cabo instalaciones subterráneas de energía eléctrica, fueron infructuosos; sin embargo, algunas de estas ideas han sido modificadas y adoptadas para usarse en los sistemas actuales. Uno de los primeros cables aislados que originó una tecnología que habría de durar por muchos años, lo presenta el que fue fabricado por Young y Menair en 1845; en este cable el aislamiento consistía de una mezcla de asfalto, brea y resina que se aplicaba al conductor, al sumergirlo en una tina con la mezcla aislante fundida y posteriormente se pasaba a través de un hueco circular para proporcionar un espesor uniforme al aislamiento. Finalmente el conductor y el aislamiento eran introducidos en un tubo en donde se vertía plomo fundido para formar una cubierta metálica sobre el aislamiento.

Dentro de los materiales empleados en la elaboración de los cables aislados, está la Guta Percha (Gutta Percha en Inglés) y el hule de la India, el cual debido al escaso conocimiento que se tenía en esos tiempos, de los métodos de aplicación, no resultó en un elemento aislante que ofreciera fuertes deseos de empleo.

El primer aislamiento de hule no era vulcanizado y tenía muy corta vida, se logró una mejora cuando se mezcló el hule con un aceite vegetal vulcanizado y aunque Goodyear había patentado el hule vulcanizado en 1844, no fue sino hasta 1860 cuando el uso de hule vulcanizado se generalizó en sistemas telegráficos y hasta 1880 para cables de alumbrado eléctrico. Durante esos años se desarrolló un aislamiento de hule bajo el nombre comercial de Kerite, el cual fue el antecesor de los posteriores cables con aislamiento de hule. En 1897 se instaló un cable de papel de 11 kV para la Compañía Cataract Power and Conduit Co. de Buffalo N.Y., el último de estos cables se retiró en 1928. En 1900 Henry Floyd instaló un cable de hule de 25,000 Volts, en St. Paul y Minneapolis, pudiéndose decir que ésta fue una de las últimas instalaciones con este elemento como aislamiento de cables para instalaciones subterráneas.

El cable con aislamiento de papel que daría lugar a una tecnología que había de imperar por muchos años, fue elaborado en 1872 por John H. Wortendyhe, fabricante de papel de Richmond Virginia. Aparentemente Wortendyhe no hizo ningún intento para comercializar su cable a pesar de que era el inventor de una rudimentaria máquina para encintar el aislamiento de papel sobre el conductor. Fue hasta 1884 cuando Edwin D. McCracken solicitó una patente que cubría: "Un alambre eléctrico con una cubierta consistente de una cinta de papel enrollada a lo largo del conductor, en la que el papel de fibra vegetal hace las veces del aislamiento del cable".

El primer cable de papel impregnado en aceite con una cubierta de plomo extruida, fue un cable telefónico diseñado por John A. Barret de la American Telephone and Telegraph Co. La impregnación de este cable se efectuó por inmersión en aceite caliente con la idea de que el calor sacaría la humedad por evaporación y el aire por la expansión. Fue J.T. Jacques de Boston, Mas., entonces asociado con la Faraday Electric Cable Co. quien patentó en 1885 un proceso para combinar el secado en vacío con la impregnación en caliente a presión. El año de 1895, marcó el comienzo del cable de papel impregnado; cuando varias compañías iniciaron su fabricación. El primer cable aislado de papel de 13 kV fue fabricado por la National Conduit and Cable Co. en 1897 e instalado en Minneapolis y St. Paul, Minn. Este desarrollo representó un cambio en la construcción de cables con conductores sólidos previamente empleados por Ferranti en Inglaterra. Tal fue el progreso del cable de papel que en diciembre de 1898 en la revista técnica Engineering News se escribió: "Las prácticas actuales de alumbrado eléctrico están divididas entre el uso de cables con aislamiento de papel y cables con aislamiento de hule, ambos con cubierta de plomo".

La incertidumbre acerca de la confiabilidad del cable con aislamiento de papel persistía en 1899, año en que se proyectó un sistema de 25 kV para St. Paul y Minneapolis, ya que se decidió instalar cables con aislamiento de hule así como de papel. Es interesante hacer notar que el cable de papel seguía en operación hasta que se rediseñó la línea en 1928. Para el año de 1902 el aislamiento de papel estaba completamente establecido como un elemento de uso corriente en la elaboración de cables aislados. Los primeros cables se impregnaron con una mezcla de aceite con brea seca y madera. Este impregnante fue reemplazado después de la primera guerra mundial por una mezcla de resina y petróleo, bien seca. Finalmente a mediados de la década de 1920 se empleó el aceite mineral como impregnante.

Por último, en la década de los cincuentas se introdujeron en el mercado los cables con aislamiento de polietileno, los que tuvieron una aceptación muy modesta y no fue sino hasta fines de la siguiente década cuando se empezaron a emplear los cables de polietileno de cadena cruzada y posteriormente los de etileno propileno.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la evolución de los cables ha sido muy grande y de ninguna manera se puede decir que ya se ha dicho la última palabra, sino todo lo contrario. Ya que con el continuo avance de la tecnología y de las necesidades, seguramente que el futuro nos ha de dar la oportunidad de ver nuevos adelantos en este campo.

II. FUNDAMENTOS.

Enseguida se explican las características fundamentales y las funciones principales de los elementos que constituyen los cables aislados, haciendo referencia a las propiedades que influyen en el comportamiento del cable.

II.1 COMPONENTES DE LOS CABLES AISLADOS.

Los componentes principales de los cables aislados, son:

- a) Conductores
- b) Aislamientos
- c) Pantallas
- d) Cubiertas protectoras

II.1.1. Conductores de cables aislados.

En la historia de la distribución de energía eléctrica, dos elementos han ocupado el plano más importante de la fabricación de cables de distribución, ellos son el cobre y el aluminio. Los cables de cobre fueron los primeros en emplearse en la industria eléctrica, este elemento ofrece las mejores características eléctricas y mecánicas que puede requerir un cable de energía para instalaciones subterráneas. Durante muchos años prevaleció el cobre como el elemento conductor más empleado en la fabricación de cables aislados, hasta que en la época de los sesentas el precio del cobre subió a alturas insospechadas y convenció a muchas compañías eléctricas que debían cambiar al aluminio, especialmente en los países en que se lograban ahorros considerables en el precio del producto terminado y en los que la fabricación dependía de la facilidad para lograr el abastecimiento del cobre.

El aluminio ha reemplazado al cobre y al plomo en conductores y pantallas. Las pantallas de aluminio se introdujeron durante la década de los cuarentas, cuando se presentó una escasez de plomo. Sin embargo, a pesar de esto, actualmente se emplea mucho cable de cobre en aplicaciones industriales. Para cada calibre de aluminio hay un cable de cobre cuyo calibre es equivalente (por lo que se refiere a capacidad de conducción), por ejemplo: un cable de aluminio de 300 mm² es equivalente a 185 mm² de cobre; sin embargo esta regla es aproximada y además existe la circunstancia de que un cable de aluminio requiere más aislamiento, pantalla, armado y cubierta, que uno de cobre de similar capacidad de conducción, siendo la diferencia menor a medida que se incrementa la tensión a que ha de trabajar el cable.

Además del aluminio y el cobre, también se ha empleado el sodio como conductor eléctrico en los cables de distribución.

II.1.2. Aislamientos.

Los materiales empleados en la fabricación de aislamientos para cables de distribución han sido muy diversos. Los avances de la Química han ayudado a producir una serie de aislamientos plásticos que han desplazado paulatinamente al principal aislamiento empleado durante muchos años: el papel. A pesar de esto el aislamiento de papel es de reconocida confiabilidad y solamente se justifica un cambio a un cable de aislamiento plástico, cuando se garantice un ahorro en el plano económico y una operación igualmente confiable que la que ofrece el aislamiento de papel.. Los materiales aislantes de tipo seco más comunes son: el polietileno, el XLPE, el EPR, el PVC y el hule butilo. Estos aislamientos tienen diferentes características con respecto a su temperatura máxima de operación, resistencia al calor, resistencia a la humedad, resistencia a las descargas por efecto corona, rigidez, dieléctrica, flexibilidad y espesor de aislamiento requerido.

Durante la década de los cincuentas, se empezaron a emplear cables con aislamiento de polietileno en instalaciones de distribución de mediana tensión, estos cables encontraron una modesta aceptación debido a sus limitaciones térmicas principalmente. A principio de la década de los sesentas se introdujo un método que mejoró el comportamiento del polietileno. Este proceso obtuvo una reunión química entre las moléculas aisladas de polietileno, dando lugar al polietileno de cadena cruzada. El aislamiento de cadena cruzada permanece en estado sólido, arriba del punto de fusión del polietileno ordinario y normalmente puede operarse a 90 °C.

El compuesto más pesado de la familia de los hidrocarburos, después del etileno es el propileno, este elemento cuando se polimeriza (polipropileno) se hace muy duro, con una temperatura de fusión cercana a los 170 °C. Su excesiva dureza lo hace poco adecuado para aislamiento de cables, pero cuando el etileno y el propileno se polimerizan juntos se obtiene un material flexible que combina muchas de las propiedades deseables del polietileno y el polipropileno. Este aislamiento recibe el nombre de polietileno propileno, pero comúnmente se le conoce como etileno-propileno, o EPR. Al igual que el polietileno, las moléculas del EPR se pueden unir de tal forma que se tenga un compuesto termofijo con una alta temperatura de fusión. Su temperatura nominal de operación es de 90°C.

Todos los aislamientos basados en el polietileno o el etileno-propileno se han encontrado tan satisfactorios, que el espesor del aislamiento se redujo a casi el 50% en comparación con los primeros cables de hule a igualdad de condiciones.

La tabla II.1, muestra las principales características de los cuatro aislamientos sólidos más populares actualmente, y del papel. El polietileno natural y el cloruro de polivinilo son materiales termoplásticos, los que se han aplicado ampliamente en la industria eléctrica; además son relativamente baratos y en la elaboración del cable, se aplican fácilmente por un proceso de extrusión. Debido a que estos aislamientos tienen una estructura molecular lineal, que comprende grandes cadenas de átomos, éstos se pueden mover libremente, incrementándose el movimiento a medida que aumenta la temperatura. Esto origina que la resistencia mecánica de los materiales termoplásticos disminuya a altas temperaturas y que arriba de los 100 °C la deformación resultante sea mayor. Esto se ilustra en la figura II.1, en la que se muestra la variación de la resistencia mecánica de los aislamientos con la de la temperatura. Esta desventaja claramente fija límites, relativamente bajos, del comportamiento térmico de cables aislados con PVC y polietileno. Esta es la razón por la que estos aislamientos se han limitado a aplicaciones en donde el riesgo de excesivas sobrecargas térmicas es pequeño.

TABLA II.1

**PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLAMIENTOS
PARA CABLES DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

CARACTERISTICA	ASILAMIENTO				
	PVC	PE	XLPE	EPR	PAPEL
Peso específico.	1.4	0.9	0.9	1.2	0.9
Resistividad térmica (°C-cm/W)	600	350	350	500	600
Resistividad volumétrica (Ω -cm ³).	10 ¹³	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ¹²
Constante dieléctrica	8.0	2.3	2.3	3.0	3.5
Factor de potencia (cos ϕ) a 90°C.	9%	0.02%	0.02%	0.5-1%	0.25-0.4%
Temperatura máxima de operación (°C).	70	70	90	90	65-80
Temperatura máxima de cortocircuito (°C).	150-160	130	250	250	160-250

Para tensiones mayores de 6.6 kV el uso de cables con PVC ha sido muy restringido, y solamente algunas compañías lo han empleado en sus redes de distribución. Esto se debe a su alto factor de pérdidas y gran permitividad.

Debido a la rígida estructura, inherente al XLPE y al EPR, su resistencia a la deformación a elevadas temperaturas y su resistencia mecánica, son superiores a

las del PVC y el polietileno. Aunque el XLPE y el EPR tienen similares características eléctricas y térmicas, el XLPE es considerablemente más barato y ha sido la selección preferente.

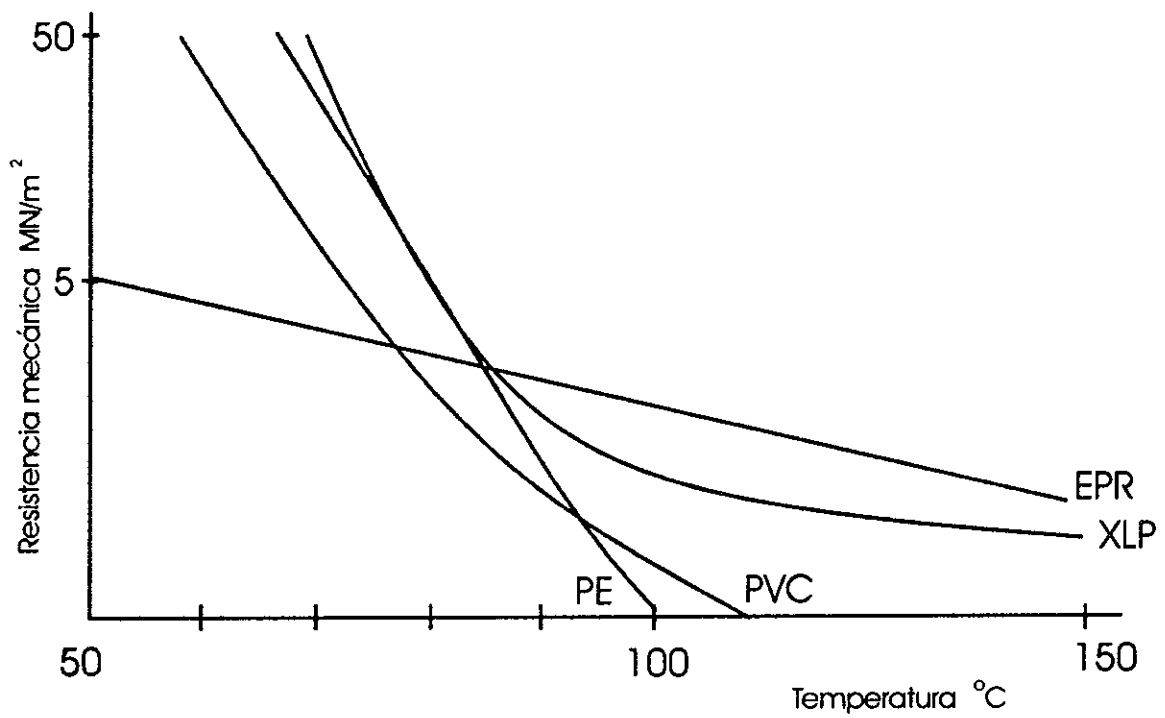


Figura II.1 Comportamiento térmico de los aislamientos sintéticos.

II.1.3 Pantallas.

La historia de las pantallas para cables de energía eléctrica se remonta al año de 1883, cuando George F. Baker de los Estados Unidos obtuvo una patente para instalar una capa conductora alrededor de los conductores aislados. El propósito de esta pantalla era el de prever una protección contra tensiones inducidas de cables adyacentes y no para controlar los esfuerzos eléctricos dentro del aislamiento del cable.

La instalación de pantallas en cables de energía eléctrica para el expreso propósito de confinar el campo eléctrico en el dieléctrico, generalmente se le ha acreditado a Martin Hochstader quien obtuvo una patente en Alemania en 1913 y otra en Estados Unidos en 1916. En ese tiempo los cables eran tripolares con aislamiento de cambray barnizado o con aislamiento de papel y del tipo "encintado" (en este caso "encintado" significa que a los tres cables monopolares se les aplicaba una cinta aislante para formar un cable tripolar). Con la aceptación de la idea de Hochstader, la cinta adicional fue omitida en los cables tripolares.

La construcción de los cables monopolares, por lo que se refiere a la pantalla, consistía de una cubierta trenzada la que protegía una delgada cubierta metálica que evolucionó hasta llegar a ser un forro de plomo. En Europa el sistema Hochstader empleaba una fina cubierta protectora, la que servía únicamente como una pantalla electrostática, mientras que en Estados Unidos se empleaba una cinta de cobre comparativamente más gruesa, la que servía para transportar la corriente de carga, la corriente neutra y la corriente de falla.

Como un refinamiento posterior de la idea de Hochstader, P.H. Chase patentó en 1917 un cable que consistía de una cinta de cobre perforada, aplicada alrededor de los conductores, que restringía las corrientes de Eddy y mejoraba la disipación de calor. En 1925 la mayoría de los cables de papel impregnado en aceite eran fabricados con una pantalla, siendo este el diseño preferido para cables de alta tensión mientras tanto los cables de cambray barnizado se fabrican sin la pantalla para tensiones de 5,000 y 8,000 Volts; siendo esta la razón por la que estos cables tuvieron un pobre desempeño.

Actualmente se emplean pantallas metálicas (generalmente cintas o hilos de cobre) y pantallas de material aislante denominadas pantallas de material semiconductor ya que no conducen en la misma forma que las pantallas metálicas. La pantalla semiconductor instalada sobre el aislamiento nunca se emplea sola, sino se utiliza con la pantalla metálica, las que están en íntimo contacto.

Debido a la presencia de huecos en la superficie exterior del aislamiento, los que pueden ser tan nocivos como los que se encuentran dentro del aislamiento,

es práctica usual que la pantalla semiconductor se instale en íntimo contacto con el aislamiento. Esta pantalla se ha aplicado en dos formas: inicialmente se empleo una cinta aislante que se enrollaba alrededor del aislamiento, pero debido a que la cinta permitía que quedaran pequeños huecos en los puntos en los que se traslapaba la cinta, creando zonas en donde los esfuerzos se concentraban, se decidió extruir la cinta sobre el aislamiento.

La aplicación de la pantalla satisface las siguientes funciones:

- 1.- Confina el campo eléctrico dentro del aislamiento.
- 2.- Crea una distribución radial simétrica de la tensión dentro del dieléctrico, eliminando los esfuerzos de tensión.
- 3.- Protege el cable de tensiones inducidas por circuitos eléctricos cercanos.
- 4.- Elimina los puntos de alto esfuerzo eléctrico en el aislamiento.
- 5.- Reduce el peligro de shock eléctrico en la superficie exterior del cable.
- 6.- Limita la radio-interferencia.
- 7.- Conduce las corrientes de carga, las de cargas desbalanceadas y las de cortocircuito.
- 8.- Proporciona una protección mecánica para el aislamiento y dependiendo del tipo, puede proporcionar una protección plena contra los contaminantes externos (como ejemplo de esto, es la función que realiza la cubierta de plomo).
- 9.- Previene la ignición de gases volátiles.

La componente metálica de la pantalla puede ser de:

- 1.- Cintas de cobre aplicadas helicoidalmente con un traslape.
- 2.- Hilos de cobre concéntricos aplicados helicoidalmente y uniformemente separados entre sí.
- 3.- Combinación de alambres y cintas.
- 4.- Tiras de cobre concéntricas aplicadas helicoidalmente y sin traslape.
- 5.- Cinta corrugada de cobre aplicada longitudinalmente y con traslape.
- 6.- Cinta trenzada de cobre.
- 7.- Pantalla de plomo.
- 8.- Materiales conductores no magnéticos.

Todas las pantallas metálicas están hechas de materiales no ferrosos, para evitar pérdidas magnéticas, las que pueden ser de consideración cuando se trate de cables monoplares.

La componente no metálica de la pantalla puede ser de cualquiera de los materiales siguientes:

- 1.- Un polímero termoplástico semiconductor extruído.
- 2.- Un polímero termofijo semiconductor extruído.
- 3.- Una cinta tejida semiconductor.

4.- Un polímero termoplástico o termofijo extruído de alta constante dieléctrica.

Al seleccionar el componente metálico de la pantalla, el usuario debe considerar si ésta es únicamente para propósitos electrostáticos, para llevar la corriente de desbalance y/o para conducir la corriente de falla. La pantalla para esfuerzos electrostáticos requiere un mínimo de cobre; si se trata de cinta de cobre, se requiere de una cinta de 2.5 milésimas de espesor como mínimo y si es de alambres de cobre, 5,000 por pulgada de diámetro de cable. Mayor área de la pantalla será necesaria para satisfacer las necesidades cuando se requiere que la pantalla conduzca corrientes por el neutro o corrientes de falla. Cuando los cables se emplean en circuitos monofásicos, se requiere una pantalla metálica para proporcionar una trayectoria de regreso a la corriente. En los circuitos trifásicos, la pantalla en los cables es necesaria para conducir la resultante de las corrientes trifásicas y para proporcionar una conexión a tierra.

Una de las mejores maneras para describir la necesidad de que una cable de más de 2,000 Volts tenga una pantalla, es comparando la distribución de tensión dentro del dieléctrico del cable para uno con pantalla y otro sin pantalla.

La figura II.2, ilustra la posición de las líneas de fuerza y la distribución de la tensión representada por anillos equipotenciales, en un cable con pantalla y en uno sin pantalla. La distribución de la tensión en el dieléctrico es uniforme y el campo eléctrico se confina enteramente dentro del dieléctrico. Es obvio que no pueda haber esfuerzos tangenciales o longitudinales en la superficie del cable en este caso. Para el cable sin pantalla, las líneas equipotenciales están confinadas dentro del aislamiento solamente en el punto donde el cable descansa sobre la tierra, estas líneas salen del dieléctrico e imponen esfuerzos tangenciales al dieléctrico. En un cable tripolar sin pantalla, las líneas de fuerza y las líneas equipotenciales se sobreponen unas sobre otras debido a su relación trifásica, minimizando el esfuerzo tangencial.

Los esfuerzos longitudinales se presentan cuando un cable sin pantalla esta en contacto con el suelo en algunos puntos y en otros está despegado del suelo, o cuando el cable pase de tierra húmeda a seca o de tierra seca a un tubo. En cada caso el campo eléctrico no se hace cero en la superficie exterior del aislamiento; y, si debido a contaminantes, agua, suciedad, etc., la resistencia superficial decrece, viajan entonces corrientes de carga a tierra y producen erosión superficial conocida como "tracking". Con el tiempo el "tracking" puede causar una ruptura al aislamiento. Por esta razón muchos ingenieros consideran que es una buena práctica usar pantallas en cables de más de 2,000 Volts entre fases.

Las pantallas son requeridas por el Código Nacional Eléctrico de los Estados Unidos y por las Normas ICEA. Estas últimas establecen, que los cables de aislamiento sólido monopolares que operen arriba de los 2,000 Volts en instalaciones permanentes deben ser resistentes a las descargas y deben ser

construidos con pantallas, bien se trate de cables monopolares o tripolares con pantallas metálicas o con armado, se considera que hasta 5 kV no es necesario proveerlos de una pantalla semiconductor entre el aislamiento y la pantalla metálica o el armado. Arriba de 5 kV es necesaria esta pantalla.

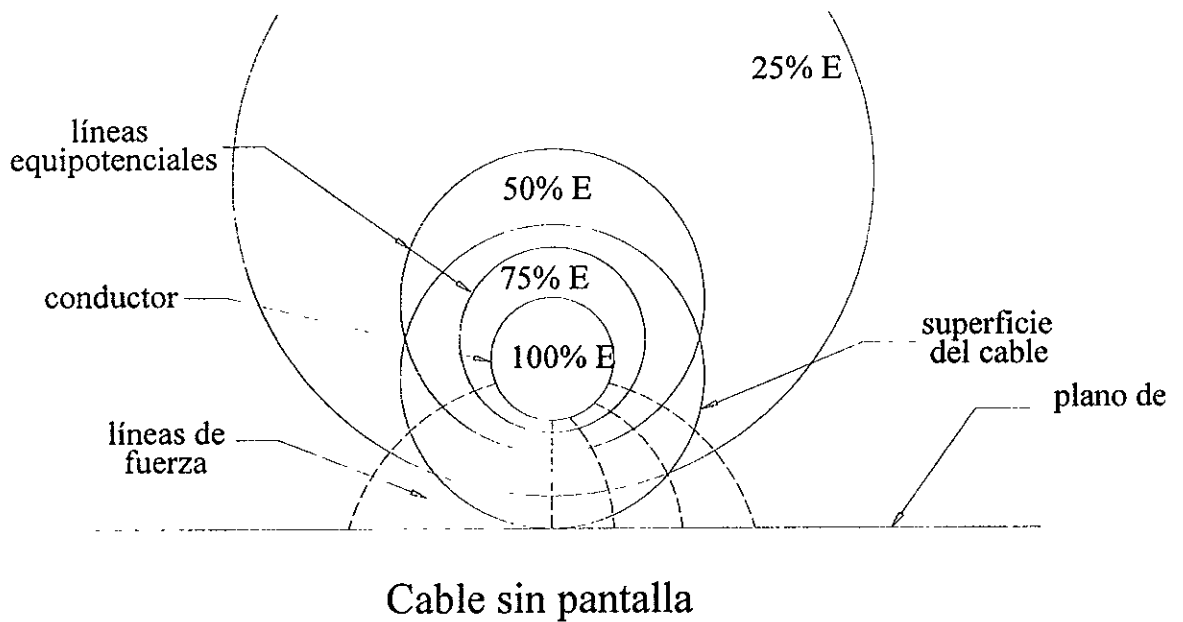
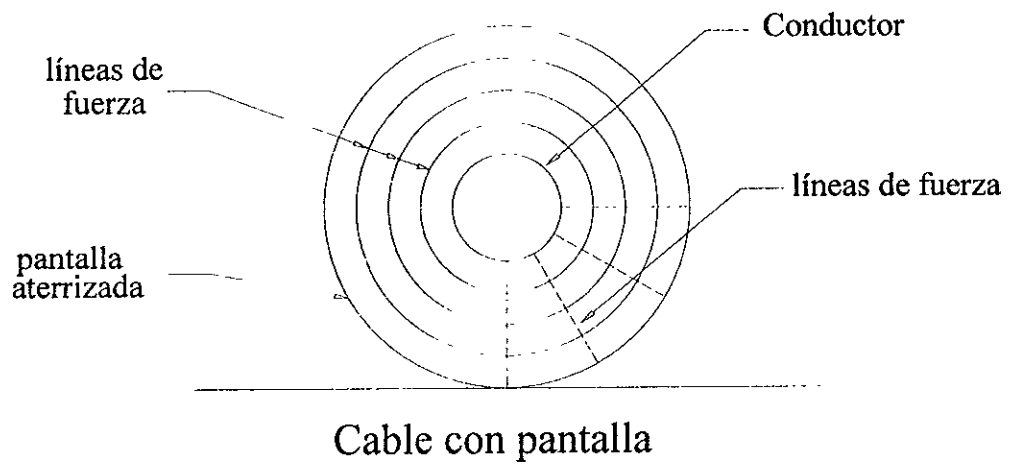


Figura 11.2 Distribución del Campo Eléctrico en cables con y sin pantalla

II.1.4 Cubiertas protectoras.

Las cubiertas protectoras para cables se emplean para proporcionar protección mecánica, protección contra la humedad y agentes químicos que puedan atacar el aislamiento. Las cubiertas no metálicas generalmente están hechas de: neopreno, cloruro de polivinilo y polietileno. En realidad la única barrera para evitar la humedad en cables de energía la proporcionan las pantallas metálicas. Muchos de los compuestos usados como cubiertas no metálicas son afectados relativamente poco por la humedad y pueden tener muy bajas propiedades como elementos ávidos de humedad.

Si el aislamiento es un material que se degrada por la humedad, como lo es el papel impregnado en aceite, entonces es necesaria una cubierta metálica para protegerlo contra agentes externos. Para cables que se han de instalar en lugares secos, se pueden emplear cables con cubiertas no metálicas, por el contrario para cables que se han de instalar en ambientes húmedos, como por ejemplo en ductos o directamente enterrados, entonces puede usarse una cubierta metálica. Hasta ahora, el plomo es uno de los materiales más comúnmente empleados para cubiertas metálicas, cuando se requiere preservar el aislamiento contra la humedad; sin embargo, en lugares en donde la corrosión del plomo puede llegar a ser un problema se puede emplear una cubierta no metálica para mejorar su comportamiento.

La mayoría de los aislamientos termoplásticos y termofijos son razonablemente resistentes a la humedad. Cuando las cubiertas se usan con estos compuestos, ofrecen un buen número de ventajas, algunas de las cuales son: poco peso, resistencia a la corrosión y facilidad para elaborar empalmes y terminales. Como se mencionó anteriormente, uno de los propósitos de las cubiertas es proporcionar una protección mecánica para el cable, esta es la función principal de una cubierta no metálica, las otras son secundarias. Sin embargo, las cubiertas deben ser capaces de soportar el medio ambiente en el que van a operar. Con esta idea en mente consideramos cada uno de los tres materiales más empleados para cubiertas: el neopreno, el cloruro de polivinilo y el polietileno.

Cubiertas de neopreno. Hay más de 2,000 compuestos de neopreno reconocidos en la industria y es posible producir un compuesto con casi cualquier característica deseada, claro está que esto trae como resultado que otras propiedades se vean disminuidas. Hasta ahora no ha sido posible fabricar un compuesto en que todas las propiedades sean sobresalientes. Lo que se necesita es un compuesto balanceado que puede no ser el mejor en alguna propiedad especial, pero que sea lo suficientemente bueno para proporcionar el mejor servicio como cubierta de cable.

Una cubierta de neopreno debe tener una aceptable alta resistencia mecánica. No es necesaria una extra alta resistencia mecánica, ya que la naturaleza de la aplicación no lo requiere. Más importante es tener una cubierta resistente a la compresión y al corte.

Uno de los criterios más comúnmente empleados pero menos válidos, es que para mejorar la calidad de la cubierta es necesario aumentar el porcentaje de neopreno en el compuesto. Generalmente, a mayor cantidad de neopreno mayor resistencia mecánica. Sin embargo, como anteriormente se estableció, esto no tiene importancia para la cubierta de un cable, ya que no va a estar sometido a altos esfuerzos mecánicos, además una cubierta con alto porcentaje de neopreno tiene una baja resistencia al aceite y una tendencia a tener un envejecimiento rápido.

El porcentaje de neopreno en un compuesto no es un criterio de la calidad de la cubierta o del comportamiento esperado de ella. De hecho no puede usarse una sola propiedad como la medida de calidad, el ingeniero de distribución necesita tener un balance de las propiedades necesarias para la aplicación dada. Y también es responsabilidad del fabricante diseñar una cubierta que se adapte satisfactoriamente a las condiciones de operación del cable.

Cubiertas de cloruro de polivinilo son muy similares a las de neopreno, la principal diferencia es que el cloruro de polivinilo es un material termoplástico y funde a altas temperaturas. Para algunas aplicaciones tiene ventajas definitivas, una de ellas es su uso para cubierta para cables sin pantalla de 5 kV, ya que el cloruro de polivinilo tiene una muy alta resistencia a las descargas eléctricas, las que se presentan cuando el cable sin pantalla está en contacto intermitente con un ducto o un tubo.

Otra aplicación en la que el cloruro de polivinilo ofrece una ventaja es cuando el cable está expuesto al aceite, debido a su alta resistencia a la mayoría de los aceites. Una ventaja adicional del cloruro de polivinilo es que los colorantes empleados para identificar al cable no reducen ninguna de sus propiedades. Esta característica no la tiene ni el neopreno ni el polietileno.

Cubiertas de polietileno. Por lo que al polietileno se refiere, como elemento empleado para cubiertas protectoras de cables, el tipo que más comúnmente se emplea es el polietileno de alto peso molecular. Este material tiene buena resistencia a los agentes externos, es casi igual al neopreno cuando se comparan sus propiedades físicas y tiene la ventaja de presentar una resistencia superior a los agentes químicos; tiene un bajo coeficiente de fricción, lo que se traduce en una fácil forma de jalarlo en ductos y tubos de acero. Sin embargo, tiene una muy pobre resistencia a las descargas eléctricas y por esta razón no se recomienda emplearlo en cables sin pantalla mayores de 5 kV.

II.2 CONCEPTOS GENERALES.

Un cable aislado desde el punto de vista electrostático es un capacitor, en el que el conductor central y la pantalla son las placas y el aislamiento del cable el dieléctrico del capacitor. Los parámetros distribuidos de un cable se pueden representar por un circuito equivalente como el de la figura II.3. Desde el punto de vista electromagnético es un transformador con el conductor como primario y la pantalla trabajando como secundario al cortar las líneas magnéticas producidas por la corriente que transporta el conductor. Este aspecto de los cables se tratará en el tema de tensiones inducidas en pantallas.

II.2.1. Esfuerzos electrostáticos en cables aislados.

Para seleccionar el material correcto y el espesor adecuado de un cable aislado, es necesario tomar en cuenta las condiciones bajo las que el material va a trabajar, tales como esfuerzos electrostáticos y temperatura. El esfuerzo eléctrico es función de la tensión aplicada, calibre del conductor y espesor del aislamiento; es máximo, en la superficie del conductor y disminuye a un mínimo en la superficie exterior del aislamiento.

La deducción de la ecuación que relaciona el esfuerzo eléctrico con la tensión de operación, el radio del conductor y el radio del aislamiento se lleva a cabo con ayuda de la siguiente figura II.4. En esta figura, r es el radio del conductor, R el radio del aislamiento y x el radio de un círculo comprendido entre r y R .

Ya que por definición, el gradiente de tensión g , está dado por:

$$g = \frac{dE}{dx} \quad \text{II.1}$$

E = Potencial del conductor con respecto a tierra.

$$dE = g \, dx \quad \text{II.2}$$

pero:

$$g = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon x} \quad \text{II.3}$$

en donde:

g = Gradiente de tensión en un radio x .

q = Carga de Coulombs por metro de longitud axial.

ϵ = Permitividad relativa del dieléctrico.

ϵ_0 = Permitividad del aire.

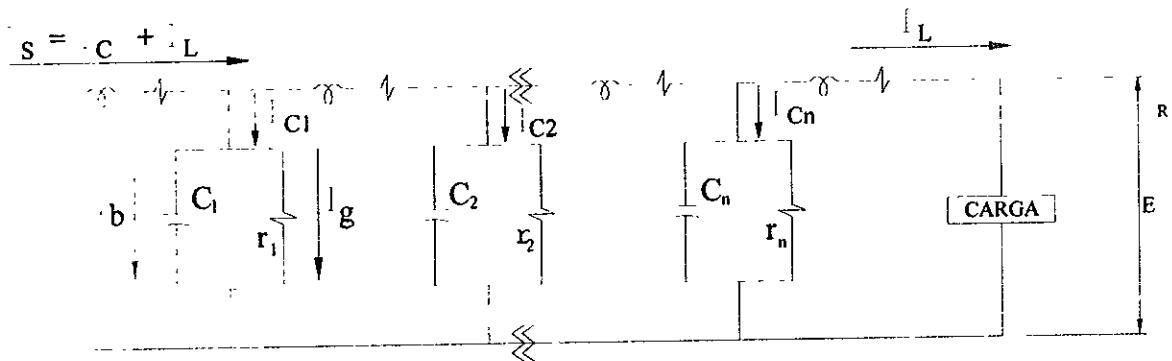


Figura 11.3 Circuito eléctrico de un cable aislado.

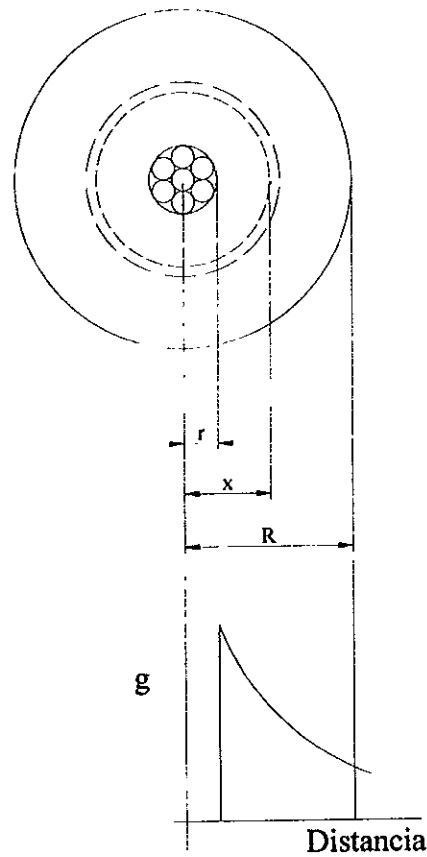


Figura 11.4 Gradiente de tensión en un cable aislado.

Al sustituir la ecuación II.3 en II.2 e integrando:

$$E = \int g \, dx = \int^R \frac{q \, dx}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon x} = \frac{q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \int^R \frac{dx}{x}$$

$$E = \frac{q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon x} \ln \frac{R}{r} \quad \text{II.4}$$

Al despejar a q en la ecuación II.4, se tiene:

$$q = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon E}{\ln \frac{R}{r}} \quad \text{II.5}$$

Al sustituir el valor de q (ecuación [II.5]) en la ecuación II.3:

$$g = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \frac{E}{x \ln \frac{R}{r}} = \frac{E}{x \ln \frac{R}{r}} \quad \text{II.6}$$

que es la ecuación buscada.

El máximo gradiente de tensión ocurre cuando x tiene su mínimo valor posible, es decir, cuando $x = r$, en este caso:

$$g_{\max} = \frac{E}{r \ln \frac{R}{r}} \quad \text{II.7}$$

El mínimo valor del gradiente ocurre cuando $x = R$, o sea:

$$g_{\min} = \frac{E}{R \ln \frac{R}{r}} \quad \text{II.8}$$

Las ecuaciones del gradiente de potencial se obtuvieron considerando que el conductor es un círculo perfecto, pero en la realidad la superficie irregular del cable incrementa el valor del gradiente máximo, en 20%. Esto se elimina en la práctica, al cubrir el conductor con una fina pantalla semiconductor. Para valores dados de E y R hay un cierto valor del radio r que da un mínimo gradiente de

potencial en la superficie del conductor. La expresión de g_{\max} tiene un valor mínimo cuando $r \ln R/r$ es máximo.

Esto ocurre cuando $\ln R/r$ es igual a la unidad, o cuando la relación R/r es igual a 2.7181, que es el número e .

EJEMPLO:

En un cable monopolar con aislamiento de polietileno de cadena cruzada (XLPE), de 4 mm de radio interno y 14 mm de radio externo, diseñado para trabajarse en un sistema de 23 kV, se desea determinar:

a) El máximo y mínimo gradiente de tensión a que trabaja el cable. b) El valor del radio interno r , que produce el mínimo valor del gradiente máximo, cuando el radio R es igual a 14 mm. c) Manteniendo $r = 4$ varíe R y determine g_{\max} . Grafique los resultados.

SOLUCION:

a) El gradiente máximo de tensión:

$$g_{\max} = -\frac{E}{r \ln R/r} = -\frac{23/\sqrt{3}}{4 \ln 14/4} = 2.65 \text{ [kV/mm]}$$

El gradiente mínimo de tensión:

$$g_{\min} = \frac{E}{R \ln R/r} = \frac{23/\sqrt{3}}{14 \ln 14/4} = 0.757 \text{ [kV/mm]}$$

b) El valor de r , que da lugar al mínimo de g_{\max} , cuando R es igual a 14 mm:

Dado que la relación de los radios debe ser igual al número e , se tiene:

$$R/r = e$$

al despejar el valor de r y substituirlo en la ecuación de g_{\max} :

$$r = 14/2.7181 = 5.15 \text{ mm}$$

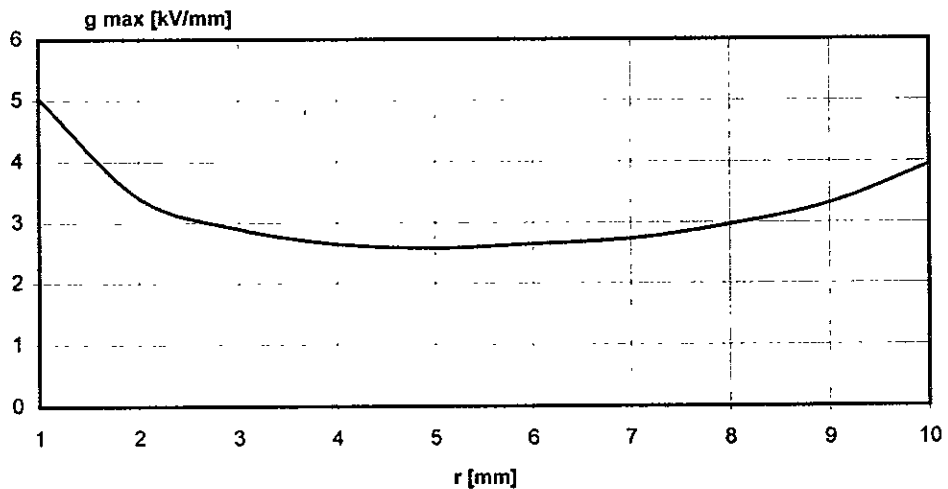
entonces el valor mínimo de g_{\max} es:

$$g_{\max} = \frac{23/\sqrt{3}}{5.15 \ln 14/5.15} = 2.58 \text{ [kV/mm]}$$

Como una comprobación de este resultado se pueden tomar distintos valores de r , mantener R y E constantes y calcular los correspondientes de g_{\max} .

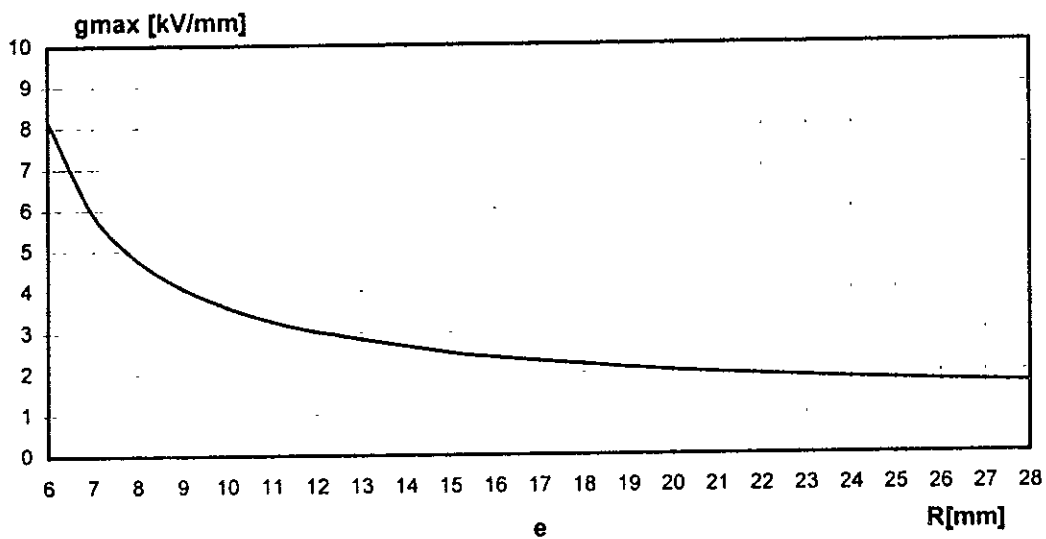
R (mm)	r (mm)	R/r	g_{\max} (kV/mm)
14	1	14.0	5.03
14	2	7.0	3.41
14	3	4.6	2.90
14	4	3.5	2.65
14	5	2.8	2.58
14	6	2.3	2.65
14	7	2.0	2.73
14	8	1.7	2.96
14	9	1.5	3.31
14	10	1.4	3.94

Al graficar estos resultados, se obtiene la curva siguiente:



c) al mantener r y E constantes se calcula g_{max} y se grafica.

r (mm)	R (mm)	R/r	g_{max} (kV/mm)
4	6	1.50	8.19
4	7	1.75	5.93
4	8	2.00	4.79
4	9	2.25	4.09
4	10	2.50	3.62
4	10.87	e	3.32
4	12	3.00	3.02
4	15	3.75	2.51
4	16	4.00	2.39
4	20	5.00	2.05
4	24	6.00	1.84
4	28	7.00	1.70



II.2.2. Capacitancia de cables aislados.

La capacitancia de un cable unipolar, en donde la pantalla es concéntrica, está dada por la ecuación siguiente:

$$C = \frac{0.02414 \text{ SIC}}{\log \frac{R}{r}} \quad [\mu\text{F/km}] \quad \text{II.9}$$

en donde SIC es la constante dieléctrica (permeabilidad relativa del aislamiento), r el radio del conductor y R el radio interno de la pantalla. Esta también es la capacitancia de la línea a neutro para el caso de tres cables unipolares con pantallas conectadas a tierra, formando un arreglo trifásico, ya que las líneas de campo eléctrico son radiales entre conductores y pantalla.

Un cable bipolar, en el que los cables no tienen pantallas separadas, tiene dos capacitancias una entre los cables y otra entre los cables y la pantalla común, la que normalmente se aterriza. La figura II.5, muestra estas capacitancias y el circuito equivalente, en donde C_a y C_b son las capacitancias de cada cable a tierra (generalmente son iguales) y C_{ab} es la capacitancia entre conductores. Para este arreglo la capacitancia entre los dos conductores es:

$$C = C_{ab} + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \quad \text{II.10}$$

En un cable tripolar hay seis capacitancias: tres entre cada cable monopolar y la pantalla (C_0) y tres conductores (k), ver figura II.6. Estas tres capacitancias en delta pueden reemplazarse por tres capacitancias C_1 en estrella por medio de una transformación delta – estrella. La transformación delta estrella aplicada a la delta formada por los elementos Z_{12} , Z_{23} y Z_{31} se puede escribir:

$$z_{01} = \frac{z_{12} z_{13}}{z_{12} + z_{23} + z_{31}} \quad \text{II.11}$$

como:

$$z_{12} = z_{23} = z_{31} = \frac{1}{\omega k} \quad \text{II.12}$$

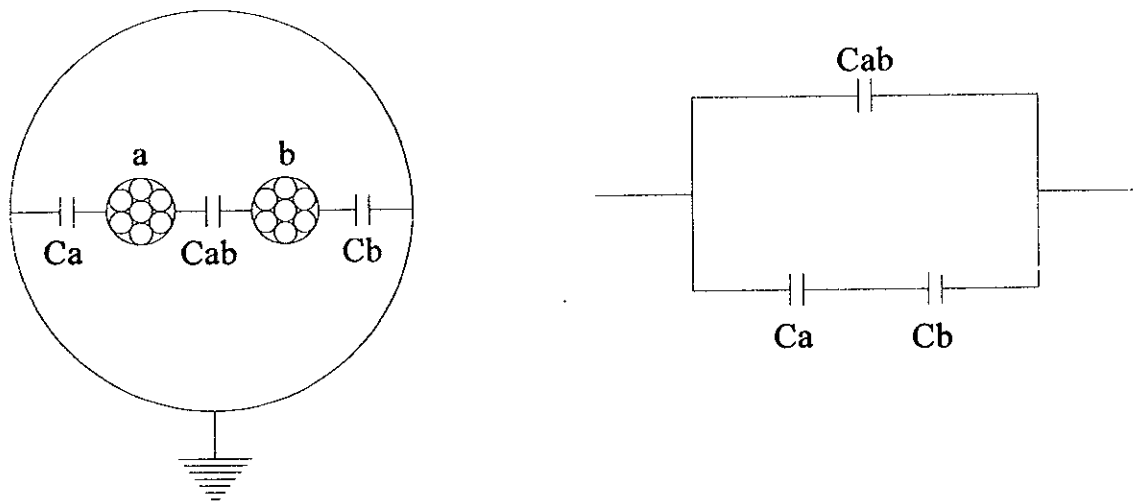


Figura 11.5 Capacitancia en un cable bipolar.

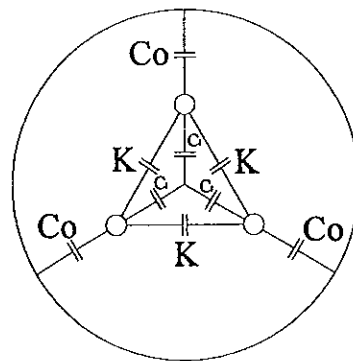


Figura 11.5 Capacitancia en un cable tripolar

haciendo la transformación delta – estrella:

$$\frac{1}{\omega C_1} = \frac{\frac{1}{\omega k} \frac{1}{\omega k}}{\frac{1}{\omega k} + \frac{1}{\omega k} + \frac{1}{\omega k}} = \frac{1}{3\omega k} \quad \text{II.13}$$

$$C_1 = 3k \quad \text{II.14}$$

La capacitancia equivalente en estrella es:

$$C = C_0 + 3k = C_0 + C_1 \quad \text{II.15}$$

Se requieren dos mediciones de capacitancia para determinar las capacitancias C_0 y C_1 , como se muestra en la figura II.7. La capacitancia C_a es la que se tiene entre los tres cables monopoles y la pantalla, así:

$$C_a = 3C_0 \quad \text{II.16}$$

Para la prueba de la figura II.7, dos de los tres cables monopoles se unen entre sí y el tercero se conecta a la pantalla; así del circuito equivalente:

$$C_b = 2C_0 + 2C_1 \quad \text{II.17}$$

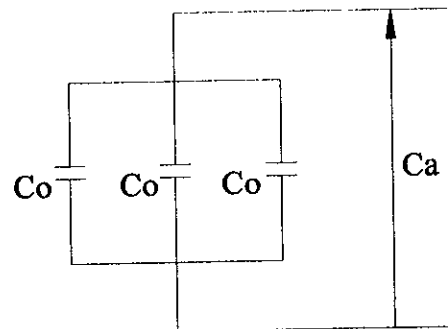
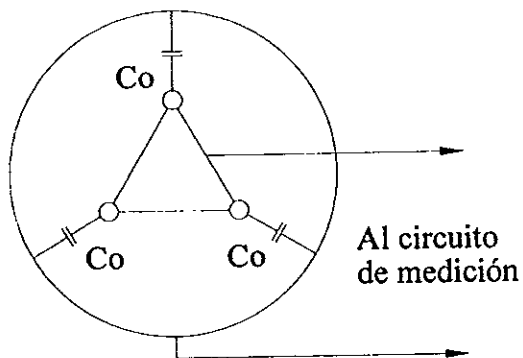
de aquí que la capacitancia total del cable, en términos de la capacitancia medida es:

$$C = C_0 + 3k = \frac{3}{2}C_b - \frac{2}{3}C_a \quad \text{II.18}$$

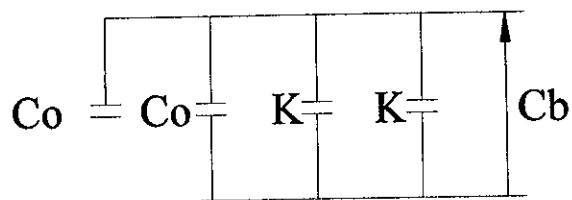
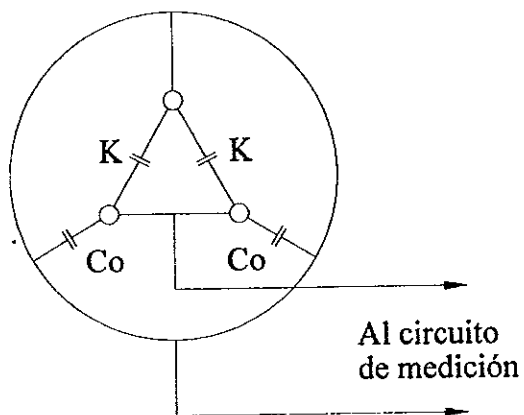
Las conexiones de prueba entre conductores y entre conductores y pantalla se deben hacer en ambos extremos del cable.

Un efecto importante de cables en sistemas de distribución y transmisión es la corriente de carga tomada por cada cable, esta corriente se determina con la ecuación siguiente:

$$I_c = \frac{\omega C V 10^{-3}}{\sqrt{3}} \quad [\text{A/km}] \quad \text{II.19}$$



$$C_a = 3 C_o$$



$$C_b = 2 C_o + 2 K$$

Figura 11.7 Conexiones necesarias para determinar la capacitancia equivalente de un cable tripolar

en donde C es la capacitancia en equivalente en estrella de un cable, en microfaradios por kilómetro y V la tensión entre fases en kilovolts.

EJEMPLO:

Determine la corriente de carga por kilómetro de un cable monopolar con aislamiento de papel de 240 mm² de sección, cuyo diámetro del conductor es de 20 mm y el diámetro sobre el aislamiento es de 38 mm. El cable trabajará en un sistema de 23 kV a una frecuencia de 60 Hz.

SOLUCIÓN:

$$C = \frac{0.02414 S/C}{\log \frac{R}{r}} = \frac{0.02414(3.5)}{\log \frac{19}{10}} = 0.303 \text{ } [\mu\text{F}/\text{km}]$$

la corriente de carga:

$$I_c = \frac{\omega C V 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 2\pi(60)(0.303)(13.29)10^{-3}$$

$$I_c = 1.517 \text{ } [\text{A}/\text{km}]$$

III. DISEÑO DE CABLES.

III.1 CONDUCTOR.

Para el diseño del calibre del conductor es necesario conocer los siguientes parámetros:

- a) Tensión de operación entre fases (nominal y máxima en kV).
- b) Frecuencia (Hz).
- c) Tipo de conductor monofásico o trifásico.
- d) Potencia a transmitir en (kVA).
- e) Longitud.
- f) Regulación.
- g) Temperatura de operación.
- h) Factor de carga.
- i) Material del conductor.
- j) Flexibilidad.
- k) Forma del conductor.
- l) Resistividad térmica del terreno ($^{\circ}\text{C-cm/W}$).
- m) Resistividad térmica de los ductos ($^{\circ}\text{C-cm/W}$).
- n) Resistividad térmica del aislamiento y pantallas ($^{\circ}\text{C-cm/W}$).
- o) En general las características térmicas del conductor, aislamiento, cubierta, etc.

III.1.1 MATERIAL.

Las materias primas más utilizadas en los conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, en la tabla III.1, se dan algunas propiedades de estos metales.

METAL	DENSIDAD gr/cm ³	TEMPERATURA DE FUSIÓN °C	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA %IACS*	ESFUERZO A LA TENSIÓN kg/mm ²	RESISTIVIDAD Ω-mm ² /km
Cobre suave o recocido	8.89	1,083	100	25	17.241
Aluminio	2.703	660	61	10	28.28

Tabla III.1 Algunas propiedades del cobre y del aluminio.

* IACS – International Annealed Copper Standard

De la tabla anterior podemos resumir que el peso del aluminio es el 30% menor al cobre; su conductividad es del 60% menor al cobre, el esfuerzo de tensión a la ruptura es del 60% menor al cobre y su resistividad volumétrica es de 60% mayor a la del cobre.

III.1.2. Flexibilidad.

Hablar de flexibilidad en cables de energía de un mismo calibre es muy relativo ya que la flexibilidad del cable depende también del tipo de aislamiento y la cubierta que se utilice y no nada más del conductor.

Enfocándonos únicamente al conductor y considerando que se utilizará para su construcción del cobre electrolítico suave (100% IACS) ó aluminio del tipo 1350-H-12 (61% IACS) podemos decir que la flexibilidad del conductor está en función del número de alambres que lo forman y del paso de torcido.

La operación de reuniono de varios alambres se le conoce como clase de cableado y es designado por letras normalizadas internacionalmente; por ejemplo: la clase "AA" se utiliza para cables desnudos generalmente para líneas aéreas, la clase "A" se utiliza para cables aislados tipo intemperie ó cables desnudos que

requieren mayor flexibilidad que el cableado clase "AA", la clase "B" para cables aislados de mayor flexibilidad que el clase "A".

En el diseño de cables de energía normalmente se utiliza el cableado clase "B", a menos que el cliente solicite otro cableado.

III.1.3. Formas.

Las formas que pueden adoptar los conductores para el uso en cables de energía son las siguientes:

- a) Redondo.
- b) Concéntrico circular (abierto, compreso y compacto).
- c) Sectorial.
- d) Anular.
- e) Segmental.

En la figura III.1, se muestran las formas de los conductores enunciadas anteriormente.

- a) Redondo.

Está constituido por un solo alambre cuya sección transversal es circular, se utiliza para calibres del 8 AWG y menores.

- b) Concéntrico circular.

- b.1) Abierto.

Está constituido de varios alambres del mismo diámetro, y están torcidos helicoidalmente en capas concéntricas sobre el núcleo central. La dirección del torcido de la última capa debe ser en sentido izquierdo y la de las capas internas debe ser alternadas.

Si se desea encontrar el número de alambres que tiene un conductor, conociendo el número de capas, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{No. Alambres} = 3x^2 - 3x + 1$$

donde x = Número de capas incluyendo el alambre del centro.

b.2) Compreso.

Esta forma es similar al abierto, reduciendo únicamente su diámetro exterior del conductor hasta un 3% respecto al abierto. Con esto se logra reducir los espacios entre los alambres (intersticios), sin reducir el área de la sección transversal del conductor, obteniendo un conductor con la superficie exterior más homogénea que nos ayudará a reducir los efectos del campo eléctrico.

b.3) Compacto.

En esta forma se disminuye el diámetro exterior del conductor mayor al 3% hasta el 10% respecto al abierto; obteniendo con esto un conductor prácticamente circular con un mínimo de intersticios que nos darán como resultado las siguientes ventajas:

- Un campo eléctrico homogéneo.
- Facilitar el proceso de extensión con vulcanizado continuo.
- Se reduce la cantidad de material semiconductor a utilizar en el cable.

c) Sectorial.

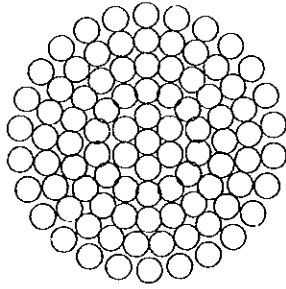
Este tipo de conductores se obtienen comprimiendo un conductor concéntrico circular de manera que su forma sea el sector de un círculo. Aislado cada conductor cuya sección transversal sea el sector de un círculo de 120 °C, se puede obtener un cable trifásico de menor diámetro exterior que el construido con conductores concéntricos, obteniendo con esto menor peso y un costo más bajo.

d) Anular.

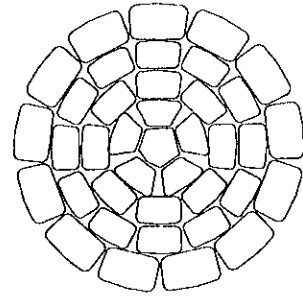
Los conductores anulares consisten, de alambres trenzados helicoidalmente, en capas concéntricas, sobre un núcleo que puede ser de material fibroso o una hélice metálica, con lo cual se disminuye el efecto superficial (skin) y por lo tanto la resistencia a la corriente alterna.

Es frecuente el uso de estos cables para calibres de 1000 kCM a 60 Hz y 1600 kCM a 25 Hz, además tienen una gran ampacidad, debido a que se incrementa el área de disipación de calor.

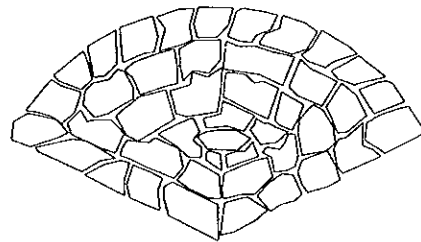
CONCENTRICOS



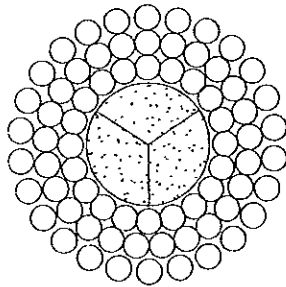
NORMAL



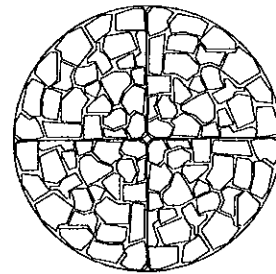
COMPACTO



SECTORIAL
COMPACTO



ANULAR



SEGMENTADO

Figura III.1 Forma de los cables de energía.

e) Segmental.

Este tipo de cables se obtienen a partir de la compactación de un concéntrico circular. Cada conductor está formado por 3 ó 4 conductores sectoriales, separados eléctricamente por medio de cintas de papel y rellenos de yute, al torcerse cada sector varía la posición del conductor segmental total, reduciendo la resistencia a la corriente alterna del cable, con lo cual se tendrían menos pérdidas al conducir altas corrientes.

III.1.4. Dimensiones.

Existen dos escalas de calibres utilizadas en los conductores eléctricos, siendo éstas: AWG (American Wire Gage) y milimétrica.

En las dos escalas se representan los pasos sucesivos del proceso de estirado o trefilado de los alambres.

a) Escala AWG.

En esta escala los números son regresivos, un número mayor representa un alambre de menor diámetro, correspondiente a los pasos de estirado, como se muestra en la tabla III.2. Esta escala se formó, fijando 2 diámetros y estableciendo una ley de progresión geométrica para diámetros intermedios, los diámetros base seleccionados son 0.4600" (calibre 4/0 AWG) y 0.0050" (calibre 36 AWG), existiendo 38 dimensiones entre estos dos calibres; la razón entre un diámetro cualquiera y el diámetro siguiente en la escala AWG, está dada por la relación:

$$\sqrt[39]{\frac{0.4600}{0.0050}} = \sqrt[39]{92} = 1.1229$$

Por lo tanto la relación entre dos diámetros consecutivos en la escala AWG, es constante e igual a 1.1229.

Ejemplo: Conociendo el diámetro exterior de un cable 1/0 (9.47 mm), se desea conocer el diámetro exterior de los calibres 2/0 y 1 AWG.

$$D_{2/0} = (1.1229) (9.47) = 10.63 \text{ [mm]}$$

$$D_1 = \frac{9.47}{1.1229} = 8.43 \text{ [mm]}$$

Para los calibres mayores de 4/0 AWG, el cable se define por su área en "Circular Mil" (CM) o en Mil Circular Mil (MCM), cabe aclarar que de acuerdo a las normas internacionales y nacionales el múltiplo correspondiente a mil, es el kilo (k) por lo tanto la nomenclatura correcta para abreviar MCM es kCM (ver NOM-J-12).

Recordando que un CM, es el área de un círculo cuyo diámetro es de 0.001 pulgadas, podemos obtener las relaciones siguientes:

Tabla III.2 Construcción normal de cables concéntricos.

Designación del conductor		Clase AA		Clase A		Clase B		Clase C		Clase D	
Area de la sección transversal nominal aa²	Calibre AWG O kCM	Nº de alambres	Diámetro De Alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres aa	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa
0.5000	-	-	-	-	-	7	0.302	19	0.183	-	-
0.5191	20	-	-	-	-	7	0.307	19	0.187	-	-
0.7500	-	-	-	-	-	7	0.369	19	0.224	-	-
0.8235	18	-	-	-	-	7	0.387	19	0.235	-	-
1.000	-	-	-	-	-	7	0.426	19	0.259	-	-
1.307	16	-	-	-	-	7	0.488	19	0.296	-	-
1.500	-	-	-	-	-	7	0.522	19	0.317	-	-
1.651	15	-	-	-	-	7	0.548	19	0.333	-	-
2.082	14	-	-	-	-	7	0.615	19	0.374	37	0.268
2.500	-	-	-	-	-	7	0.674	19	0.409	37	0.293
3.307	12	-	-	-	-	7	0.776	19	0.471	37	0.337
4.000	-	-	-	-	-	7	0.853	19	0.518	37	0.371
5.260	10	-	-	-	-	7	0.978	19	0.594	37	0.425
6.000	-	-	-	-	-	7	1.045	19	0.634	37	0.454
8.367	8	-	-	-	-	7	1.234	19	0.749	37	0.537
10.00	-	-	-	-	-	7	1.349	19	0.819	37	0.587
10.55	7	-	-	-	-	7	1.385	19	0.841	37	0.603
13.30	6	-	-	-	-	7	1.555	19	0.944	37	0.677
16.00	-	-	-	-	-	7	1.706	19	1.035	37	0.742
16.76	5	-	-	-	-	7	1.746	19	1.060	37	0.759
21.15	4	3	2.996	7	1.961	7	1.961	19	1.191	37	0.853
25.00	-	3	3.257	7	2.132	7	2.132	19	1.294	37	0.928
26.67	3	3	3.364	7	2.203	7	2.203	19	1.337	37	0.958
33.62	2	3	3.777	7	2.473	7	2.473	19	1.501	37	1.076
35.00	-	3	3.854	7	2.523	7	2.523	19	1.531	37	1.097
42.41	1	3	4.243	7	2.777	19	1.686	37	1.208	61	0.941
50.00	-	7	3.016	7	3.016	19	1.830	37	1.312	61	1.022
53.48	1/0	7	3.119	7	3.119	19	1.893	37	1.357	61	1.057
67.43	2/0	7	3.502	7	3.502	19	2.126	37	1.523	61	1.186
70.00	-	7	3.568	7	3.568	19	2.166	37	1.552	61	1.209
85.01	3/0	7	3.932	7	3.932	19	2.387	37	1.710	61	1.332
95.00	-	7	4.157	7	4.157	19	2.523	37	1.808	61	1.408
107.2	4/0	7	4.416	7	4.416	19	2.680	37	1.921	61	1.496
120.0	-	12	3.568	19	2.836	37	2.032	61	1.583	91	1.296
126.7	250	12	3.667	19	2.914	37	2.088	61	1.626	91	1.331
150.0	-	12	3.989	19	3.170	37	2.272	61	1.769	91	1.449
152.0	300	12	4.016	19	3.192	37	2.287	61	1.781	91	1.458
177.3	350	12	4.337	19	3.447	37	2.470	61	1.924	91	1.575
185.0	-	12	4.430	19	3.521	37	2.523	61	1.965	91	1.609
202.7	400	19	3.686	19	3.686	37	2.641	61	2.057	91	1.684
228.0	450	19	3.909	37	2.801	37	2.801	61	2.182	91	1.786
240.0	-	19	4.010	37	2.874	37	2.874	61	2.238	91	1.832
253.4	500	19	4.121	37	2.953	37	2.953	61	2.300	91	1.883
278.7	550	37	3.097	37	3.097	61	2.412	91	1.975	127	1.672
300.0	-	37	3.213	37	3.213	61	2.502	91	2.049	127	1.734
304.0	600	37	3.234	37	3.234	61	2.519	91	2.062	127	1.746
329.4	650	37	3.367	61	2.622	61	2.622	91	2.147	127	1.817
354.7	700	37	3.494	61	2.721	61	2.721	91	2.228	127	1.886
380.0	750	37	3.616	61	2.816	61	2.816	91	2.306	127	1.952
400.0	-	37	3.710	61	2.889	61	2.889	91	2.366	127	2.003
405.4	800	37	3.735	61	2.909	61	2.909	91	2.382	127	2.016
456.0	900	37	3.961	61	3.085	61	3.085	91	2.526	127	2.138
500.0	-	37	4.148	61	3.231	61	3.231	91	2.645	127	2.239
506.7	1000	37	4.176	61	3.252	61	3.252	91	2.663	127	2.254
557.4	1100	-	-	61	3.411	91	2.793	127	2.364	169	2.049
608.0	1200	-	-	61	3.562	91	2.917	127	2.469	169	2.140

Tabla III.2 (concluye)

Designación del conductor		Clase AA		Clase A		Clase B		Clase C		Clase D	
Area de la sección transversal nominal aa²	Calibre AWG O kCM	Nº de alambres	Diámetro De Alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres aa	Diámetro de alambres aa	Nº de alambres	Diámetro de alambres aa
630.0	-	-	-	61	3.626	91	2.969	127	2.513	169	2.179
633.4	1250	-	-	61	3.636	91	2.977	127	2.520	169	2.184
658.7	1300	-	-	61	3.708	91	3.036	127	2.570	169	2.228
709.4	1400	-	-	61	3.848	91	3.151	127	2.667	169	2.312
760.1	1500	-	-	61	3.983	91	3.261	127	2.761	169	2.393
800.0	-	-	-	91	3.346	127	2.832	169	2.455	217	2.167
810.7	1600	-	-	91	3.368	127	2.851	169	2.471	217	2.181
861.4	1700	-	-	91	3.472	127	2.939	169	2.547	217	2.248
886.7	1750	-	-	91	3.522	127	2.982	169	2.585	217	2.281
912.1	1800	-	-	91	3.572	127	3.024	169	2.621	217	2.313
962.7	1900	-	-	91	3.670	127	3.107	169	2.693	217	2.377
1000	-	-	-	91	3.741	127	3.166	169	2.745	217	2.422
1013	2000	-	-	91	3.765	127	3.187	169	2.763	217	2.438
1250	-	-	-	91	4.182	127	3.540	169	3.069	217	2.708
1267	2500	-	-	91	4.210	127	3.564	169	3.090	217	2.727
1520	3000	-	-	127	3.904	169	3.384	217	2.966	271	2.672
1600	-	-	-	127	4.005	169	3.472	217	3.064	271	2.742
1773	3500	-	-	127	4.216	169	3.655	217	3.225	271	2.886
2000	-	-	-	169	3.882	217	3.426	271	3.065	271	3.065
2027	4000	-	-	169	3.908	217	3.449	271	3.086	271	3.086
2280	4500	-	-	169	4.145	217	3.658	271	3.273	271	3.273
2534	5000	-	-	169	4.369	217	3.856	271	3.450	271	3.450

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi}{4} (0.001)^2 = 7.854 \times 10^{-7} \text{ [pulg}^2\text{]}$$

$$1 \text{ CM} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$1 \text{ kCM} = 0.5067 \text{ [mm}^2\text{]}$$

b) Escala milimétrica.

Esta escala es la más utilizada a nivel mundial, ha sido normalizada por IEC (International Electrotechnical Commission), ésta nos da la medida directa del área de la sección transversal de los calibres, en milímetros cuadrados, tal como se muestra en la tabla III.2.

III.2 PANTALLA SOBRE EL CONDUCTOR.

Sobre el conductor debe aplicarse un material semiconductor, termofijo, compatible tanto con el conductor como con el aislamiento, capaz de soportar las temperaturas de operación del conductor.

Como se mencionó en la construcción del cable, este material semiconductor debe ser extruido de modo que distribuya el campo eléctrico de manera uniforme.

Por otro lado, la superficie externa del semiconductor debe ser cilíndrica y estar firmemente adherida al aislamiento para evitar los huecos de aire que pudieran generarse en la interfase semiconductor-aislamiento, evitándose la producción de ozono por ionización y el envejecimiento prematuro del aislamiento y semiconductor; así también la formación de arborescencias eléctricas.

III.2.1. Características dimensionales.

Respecto a los espesores, se recomiendan los indicados en tabla III.3, no obstante éstos pueden ser modificados de acuerdo con la fórmula del gradiente de potencial (esfuerzo dieléctrico).

III.2.2. Características físicas.

El material semiconductor deberá cumplir con las características físicas que se indican en la tabla III.4.

III.2.3. Características eléctricas.

El material semiconductor deberá tener una resistividad volumétrica máxima de $1000 \Omega\cdot m$, según las normas AEIC-CS5 y AEIC-CS6, cuando se mida a temperatura ambiente, $90^{\circ}C$ y $130^{\circ}C$ según procedimiento de prueba indicado en las normas NOM-J-204 e ICEA-S-66-524.

Tabla III.3 Espesor de la pantalla semiconductor extruida sobre el conductor.

DESIGNACIÓN DEL CONDUCTOR		E S P E S O R		
mm	AWG o kCM	Mínimo en cualquier punto mm	Mínimo promedio mm	Máximo promedio mm
8.267 a 107.2	8 a 4/0	0.30	0.38	0.42
127.7 a 253.4	250 a 500	0.41	0.51	0.57
304.0 a 506.7	600 a 1000	0.51	0.64	0.71
Mayor de 506.7	Mayor de 1000	0.61	0.76	0.85

Notas:

- 1) La norma UL 1072-1991, especifica que el espesor promedio mínimo es de 0.20 mm (0.008") y el espesor mínimo en cualquier punto es de 0.13 mm (0.005") para todos los calibres.
- 2) Para efectos de tolerancias permitidas en huecos y protuberancias se recomienda usar la norma AEIC CS5-87 parte "C".

Tabla III.4 Características físicas del material semiconductor.

CARACTERÍSTICAS	VALOR DE PRUEBA	MÉTODO DE PRUEBA
Alargamiento a la ruptura después de envejecida en horno a $121 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 168 h.	100% mínimo	NOM-J-186
Fragilidad en frío	-10°C	NOM-J-91
Doblez en frío como cable completo enfriado a $-35 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 1 h	Sin daños	NOM-J-193

Notas:

- 1) El objeto de la prueba de envejecimiento es determinar que el material será compatible con la temperatura de operación del aislamiento.
- 2) Las pruebas de fragilidad y dobléz en frío, tienen relación con las características físico mecánicas que debe cumplir el cable en condiciones extremas de baja temperatura.

III.3. AISLAMIENTO.

III.3.1. Generalidades.

Como se indicó en la construcción del cable, el aislamiento tiene como función principal, confinar la corriente eléctrica dentro del conductor y contener el campo eléctrico dentro de su masa.

Las propiedades eléctricas más importantes a considerar en los aislamientos para cables de energía son:

- a) Rigidez dieléctrica.
- b) Constante dieléctrica.
- c) Resistencia de aislamiento.
- d) Factor de potencia y factor de disipación.
- e) Capacitancia.

- a) Rigidez dieléctrica.

En todos los materiales sólidos, la conducción se origina por la migración de partículas cargadas eléctricamente.

En el caso de los aislantes, al tener muy pocos electrones libres, ocasionan una resistividad alta. Debido a la alta resistividad de los aislamientos, los efectos de polarización determinan el flujo de corriente alterna y transitoria. Sin embargo, cuando se incrementa el esfuerzo eléctrico en un aislamiento a un nivel suficientemente alto, la resistividad cambiará repentinamente de un valor alto a un valor bajo, comparable al de los conductores. Este cambio se le denomina, ruptura dieléctrica y determina la rigidez dieléctrica del aislamiento.

En otros términos, el valor de la rigidez dieléctrica, es la tensión eléctrica que puede soportar un material antes de que se perfore; la unidad de medida normalmente se expresa en kV/mm de espesor de material.

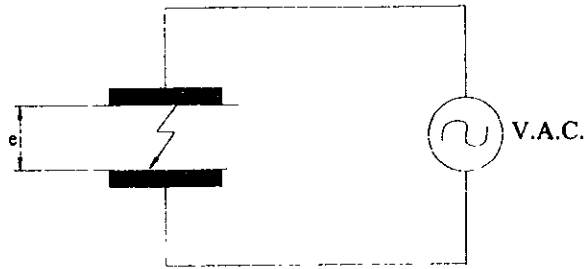


Figura III.2 Prueba de rigidez dieléctrica del aislamiento.

En la figura III.2 se muestra en forma simplificada la prueba de rigidez dieléctrica de un aislamiento con un espesor (e) expresado en mm y una tensión aplicada (V) en kV, por lo tanto:

$$\text{Rigidez Dieléctrica} = \frac{V}{e} \text{ [kV/mm]}$$

b) Constante dieléctrica (ver figura III.3).

La constante dieléctrica de un aislamiento (SIC), es conocida también como permitividad relativa del aislamiento, se puede definir como la relación existente entre la capacitancia de un capacitor cuyo dieléctrico es el material a probar (C_1), y la capacitancia de un capacitor similar cuyo dieléctrico es el aire (C_0), de esta manera tendremos:

$$\text{Constante Dieléctrica} = \frac{C_1}{C_0}$$

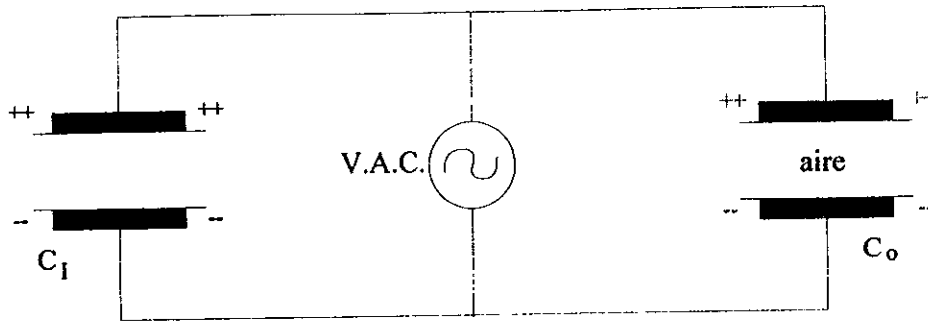


Figura III.3 Constante dieléctrica

La constante dieléctrica SIC, es una propiedad intrínseca de cada material y se determina con valores de tensión y frecuencia normalizados; los valores típicos para cables de potencia, son: 2.3 para XLPE y 2.7 para EPR.

Es importante destacar que la constante dieléctrica no es proporcional a la rigidez dieléctrica en los materiales aislantes, por lo que deben ser analizadas en forma independiente.

c) Resistencia de aislamiento.

Cuando un aislamiento es sometido a una diferencia de potencial de corriente directa, sobre él circulará una pequeña corriente de fuga. La resistencia que se opone al paso de esta corriente se le conoce como resistencia de aislamiento. La fórmula general en que se expresa la resistencia de aislamiento es la siguiente:

$$R_a = K \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) f_T f_L$$

Donde:

- R_a = Resistencia de aislamiento ($M\Omega \cdot km$).
- D = Diámetro sobre el aislamiento (mm).
- d = Diámetro sobre la pantalla del conductor (mm)
- K = Valor constante propio del material, ver tabla III.5.
- f_T = Factor de corrección por temperatura, ver tabla III.6.
- f_L = 1000 m/longitud de la muestra en m.

Aislamiento	K a 15.6°C en MΩ-km
PVC, Bajo voltaje	150
Polietileno (Normal)	15250
Polietileno de cadena cruzada (XLP)	6100
Etileno Propileno (EP)	6100
Papel Impregnado	3000

Tabla III.5 Constante de resistencia de aislamiento (K)

d) Factor de potencia y factor de disipación.

Al someter a un aislamiento a una diferencia de potencial (V) de corriente alterna, circularán por él una corriente capacitiva (I_c) y una corriente resistiva (I_r) como se muestra en la figura III.4.

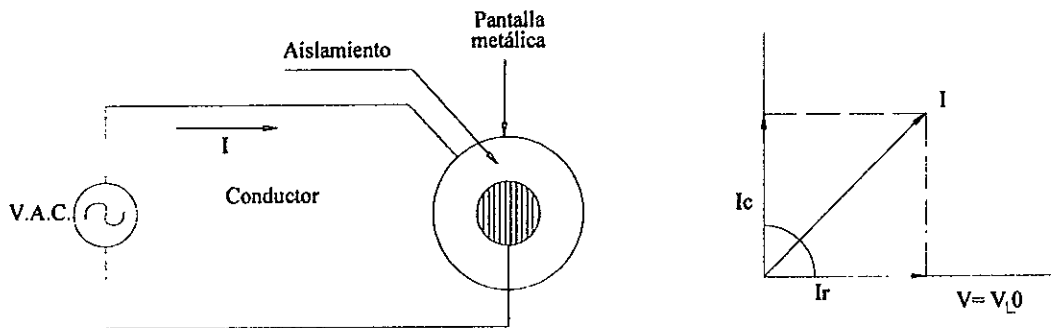


Figura III.4

Del diagrama vectorial de la figura III.4 podemos definir que el factor de potencia es:

$$\cos \phi = \frac{I_r}{I}$$

donde:

$I =$ La suma vectorial de I_r e I_c

Podemos deducir que cuando " I_r " disminuye se tendrá un factor de potencia más bajo y la calidad del aislamiento mejora. Si " I_r " aumenta nos indica presencia de humedad o deterioro del aislamiento y el factor de potencia aumenta.

Tabla III.6 Factores de corrección por temperatura a 15.6°C (60°F) para resistencia de aislamiento.

Temperatura Ambiente		EPR	XLP
		Coeficiente por 0.55°C (1°F)	
°F	°C	1.03	1.05
50	10.0	0.75	0.62
51	10.6	0.77	0.65
52	11.1	0.79	0.68
53	11.7	0.82	0.71
54	12.2	0.84	0.75
55	12.8	0.87	0.78
56	13.3	0.89	0.82
57	13.9	0.92	0.87
58	14.4	0.94	0.91
59	15.0	0.97	0.96
60	15.6	1.00	1.00
61	16.1	1.03	1.05
62	16.7	1.06	1.10
63	17.2	1.09	1.16
64	17.8	1.13	1.22
65	18.3	1.16	1.28
66	18.9	1.20	1.35
67	19.4	1.23	1.41
68	20.0	1.27	1.48
69	20.0	1.31	1.55
70	21.1	1.35	1.63
71	21.7	1.39	1.72
72	22.2	1.43	1.80
73	22.8	1.47	1.89
74	23.3	1.52	1.98
75	23.9	1.56	2.08
76	24.4	1.61	2.19
77	25.0	1.66	2.30
78	25.6	1.71	2.41
79	26.1	1.76	2.53
80	26.7	1.81	2.66
81	27.2	1.87	2.80
82	27.8	1.92	2.94
83	28.3	1.98	3.08
84	28.9	2.04	3.23
85	29.4	2.10	3.40

Con la prueba del factor de potencia se puede determinar el factor de pérdidas, conocido como el factor de disipación, siendo éste el factor que nos indica las pérdidas de energía eléctrica transformada en calor y estará dado por la siguiente relación:

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c}$$

e) Capacitancia.

La capacitancia de un cable con pantalla, es la relación de la carga (q) entre el conductor y la pantalla con respecto a la diferencia de potencial (V) aplicado entre ellos, de tal forma:

$$C = \frac{q}{V}$$

Donde:

C = Capacitancia.

q = Carga entre conductor y pantalla.

V = Diferencia de potencial.

En el caso de capacitores cilíndricos (como el cable), la capacitancia se determina mediante la relación siguiente:

$$C = \frac{0.02413 \text{ SIC}}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)}$$

donde:

C = Capacitancia ($\mu\text{F}/\text{km}$).

SIC = Constante dieléctrica del aislamiento.

D = Diámetro sobre el aislamiento (mm).

d = Diámetro sobre la pantalla del conductor (mm).

0.0241 = Constante para conversión de logaritmos y para obtener la capacitancia en $\mu\text{F}/\text{km}$.

No obstante que los parámetros anteriores nos indiquen buenas características para efectos de seleccionar el material para el diseño del aislamiento, son las pérdidas en el dieléctrico las que nos darán una idea comparativa del costo que implicará operar el cable.

La capacitancia debe ser considerada para el cálculo de las pérdidas en el aislamiento.

Haciendo un resumen de lo dicho anteriormente, es conveniente que los materiales aislantes tengan.

Desde el punto de vista eléctrico:

- Alta rigidez dieléctrica.
- Alta constante de resistencia de aislamiento (K).
- Baja constante dieléctrica (SIC).
- Bajo factor de potencia ($\cos \phi$).

Desde el punto de vista térmico:

- Resistencia a temperatura de operación, sobrecarga y cortocircuito.
- Resistencia a la deformación por calor.
- Resistividad térmica.
- Manejo a baja temperatura.

Estas propiedades tienen gran incidencia en la capacidad de carga del conductor, ya que éste al conducir una intensidad de corriente tiene pérdidas por efecto Joule (Ri^2) que elevan su temperatura hasta el límite impuesto por la resistencia del aislamiento a alta temperatura. Además es importante la resistividad térmica del aislamiento para que el calor generado por las pérdidas pueda disiparse con facilidad.

Por otro lado, la resistencia a la deformación por calor, tiene gran relevancia cuando el sistema opera con sobrecorriente debida a sobrecarga o cortocircuito.

Respecto de las propiedades de manejo u operación a baja temperatura, es importante considerarlas, cuando el conductor sea instalado en condiciones extremas.

Las propiedades térmicas típicas de algunos aislamientos sólidos, se muestran en la tabla III.7.

Aislamiento	Temperaturas °C			Resistividad térmica °C-cm/W	Resistencia a la deformación	Temp. mín. de instalación
	Operación	Sobrecarga	Cortocircuito			
PE	75	90	150	350	Malo	-40
XLPE	90	130	250	350	Bueno	-40
EPR	90	130	250	500	Excelente	-40

Tabla III.7 Propiedades térmicas típicas de los aislamientos.

Para la mejor selección de los aislamientos, además de tomar en cuenta las propiedades eléctricas y térmicas, debe tomarse en cuenta que estos materiales ofrezcan un balance de propiedades físicas y químicas que garanticen una estabilidad de forma y composición, ya que son determinantes en la vida útil del cable.

Las propiedades físicas principales a considerar, son las siguientes:

- Resistencia al esfuerzo de tensión.
- Baja deformación permanente.
- Resistencia al envejecimiento acelerado.
- Retención de la elongación.
- Retención de la resistencia al esfuerzo de tensión.

Respecto de las propiedades químicas, las más importantes, son:

- Baja absorción de la humedad.
- Alta resistencia al ozono.
- Alta resistencia al efecto corona.
- Alta resistencia a la formación de arborescencias.

III.3.2. Material.

El material a usar como aislante, será del tipo polietileno de cadena cruzada (XLPE) o elastómero de etileno propileno (EPR). Las características físicas y eléctricas se indican en la tabla III.8; aplicado en un proceso de extrusión triple y curado con vapor o con nitrógeno (curado en seco).

III.3.3. Espesores.

Los espesores promedio mínimo y máximo serán los establecidos en la tabla III.9.

En dicha tabla, se muestran dos categorías para el nivel de aislamiento, que corresponden a las clases, 100% y 133%.

Cualquier conductor no contemplado en la tabla III.9, podrá diseñarse de acuerdo con la fórmula de gradiente de potencial, indicada en los conceptos generales (capítulo I).

La categoría III (173%), debe diseñarse con el criterio anterior.

III.4 PANTALLA SOBRE EL AISLAMIENTO.

La pantalla sobre el aislamiento, consta de 2 componentes: un material semiconductor, más un material metálico no magnético.

Las funciones para las que se diseña esta pantalla, se indican en el tema, la construcción del cable.

Nota: Para los niveles de tensión de 5 kV y cuando por razones de instalación no es posible aterrizar la pantalla, el cable a diseñar no debe llevar la pantalla sobre el aislamiento, debido a:

Tabla III.8

Propiedades físicas.

Estas propiedades deben determinarse de acuerdo a lo estipulado en NOM-J-178, NOM-J-186 y NOM-J-191, según corresponda.

	XLP	EPR
- Esfuerzo por tensión a la ruptura. Valor mínimo en MPa (kgf/cm ²).	12.4 (126.4)	4.8 (49)
- Alargamiento por tensión a la ruptura. Valor mínimo en %.	250	250
- Envejecimiento a 121 ± 1°C durante 168 h. Valor mínimo en % de los valores sin envejecer. Retención de esfuerzo por tensión y alargamiento.	75	75
- Alargamiento en caliente y deformación permanente a 150°C ± 2°C Máximo alargamiento en %	175	50
Máxima deformación permanente en %	10	5

Propiedades eléctricas.

Estas propiedades deben determinarse de acuerdo a lo establecido en NOM-J-205, NOM-J-294 y NOM-J-40.

	XLP	EPR
- Constante dieléctrica a 60 Hz y temperatura ambiente. Valor máximo.	3.5	4.0
- Factor de disipación FD a la tensión nominal de fase a tierra 60 Hz y temperatura ambiente.		
- Valor máximo en %	0.1	1.5
- Constante de resistencia al aislamiento K a 15.6°C. Valor mínimo en MΩ-km	6100	6100
- Absorción de humedad método eléctrico. Constante dieléctrica después de 24 h de inmersión en agua a 75°C y determinada a 3150 V/mm 60 Hz.	3.5	4.0
- Incremento en la capacitancia a 75°C y determinada a 3150 V/mm 60 Hz. Valor máximo en %.		
De 1 a 14 días	3.0	3.5
De 7 a 14 días	1.5	1.5
- Factor de ionización después de 14 días a 75°C con tensiones de 3150 V/mm y 1575 V/mm a 60 Hz. Valor máximo en %.	1.0	1.0
- Variación del factor de ionización de 1 a 14 días a 75°C con tensiones de 3150 V/mm y 1575 V/mm a 60 Hz. Valor máximo en %	0.5	0.5

* Solamente requiere cumplir uno de los dos valores, no ambos.

Tabla III.9 Espesores recomendados del aislamiento.

Tensión nominal de fase kV	Designación del conductor		Espesor en mm					
			Categoría I (100% N.A.)			Categoría II (133% N.A.)		
			ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL MM ²	CALIBRE AWG O KCM	MÍNIMO EN UN PUNTO	MÍNIMO PROMEDIO	MÁXIMO PROMEDIO	MÍNIMO EN UN PUNTO
5	de 8.37 a 506.7	de 8 a 1000	2.06	2.29	2.42	2.63	2.92	3.05
	Mayor de 506.7	Mayor de 1000	3.20	3.56	3.69	3.20	3.56	3.69
8	de 13.30 a 506.7	de 6 a 1000	2.63	2.92	3.05	3.20	3.56	3.69
	Mayor de 506.7	Mayor de 1000	4.00	4.45	4.58	4.00	4.45	4.58
15	de 33.62 a 506.7	de 2 a 1000	4.00	4.45	4.58	5.03	5.59	5.72
	Mayor de 506.7	Mayor de 1000	5.03	5.59	5.72	5.03	5.59	5.72
25	de 42.41 a 1013	de 1 a 2000	5.94	6.60	6.73	7.88	8.76	8.89
35	de 53.48 a 1013	de 1/0 a 2000	7.88	8.76	8.89	9.60	10.67	10.80

- En un cable con pantalla sin aterrizar se inducen tensiones en ella que pueden alcanzar hasta la tensión de operación del conductor de fase a tierra (dependiendo de la longitud del conductor).
- Lo anterior provocará ruptura de la cubierta ya que ésta no está diseñada para cumplir como aislamiento eléctrico, lo que podrá atentar contra la vida de las personas y provocar siniestros en ambientes de alto riesgo.

III.4.1 Componente semiconductor.

Sobre el aislamiento, debe aplicarse un material semiconductor, termofijo, extruido, compatible tanto con el aislamiento, como el material metálico; y capaz de soportar las temperaturas máximas de operación de la pantalla metálica. La superficie de contacto entre el semiconductor y el aislamiento deberá de ser continua, uniforme, firmemente unida y libre de burbujas o cavidades e irregularidades, para cumplir con un buen diseño; ya que estas variables afectarán en la vida útil del cable debido a la formación de descargas parciales y arborescencias eléctricas.

a) Características físicas.

Este material debe cumplir con los requerimientos dados en la Tabla III.4. Además debe ser fácilmente desprendible del aislamiento.

b) Características eléctricas.

El material semiconductor debe tener una resistividad volumétrica no superior a $500 \Omega\cdot m$ cuando se mide a temperatura ambiente, $90^{\circ}C$ y $130^{\circ}C$.

c) Características dimensionales.

Respecto de los espesores, se recomienda utilizar los indicados en la tabla III.10.

Diámetro calculado sobre el aislamiento mm	Espesor mm		
	Mínimo en cualquier punto	Mínimo promedio	Máximo promedio
Hasta 25.4	0.76	1.01	1.11
Mayor de 25.4 hasta 38.1	1.02	1.36	1.49
Mayor de 38.1 hasta 50.8	1.40	1.75	1.88
Mayor de 50.8	1.40	1.75	1.88

Tabla III.10 Espesor del componente semiconductor sobre el aislamiento.

III.4.2. Componente metálico.

Como se mencionó anteriormente, la pantalla sobre el aislamiento consta también de un material metálico no magnético, eléctricamente continuo aplicado a todo lo largo del cable sobre el material semiconductor.

Este componente metálico puede estar constituido de alambres y/o cintas lisas de cobre suave, aplicadas helicoidalmente, de tal forma, que el cable pueda ser doblado a su radio de curvatura mínimo, sin afectar o interrumpir su continuidad eléctrica. Existen otros tipos de pantallas metálicas, tales como: alambres de cobre trenzados con fibras textiles, cintas corrugadas, cubiertas metálicas, etc., que cumplen objetivos particulares, como protección mecánica del cable.

El componente metálico se debe diseñar para que cumpla con los siguientes propósitos:

- a) Como pantalla electrostática.
- b) Para conducir corriente de falla.
- c) Como neutro del sistema.

La tabla III.11, establece una comparación en el uso de cintas y alambres para el componente metálico de la pantalla.

a) Pantalla electrostática.

Se deben instalar una o dos cintas de cobre traslapadas o sobrepuestas cuando menos en un 10% de su ancho; y tener un espesor mínimo de 0.064 mm (según normas ICEA-66-524 y NOM-J-142) si el ángulo lo permite; se recomienda aplicar dos cintas para que el sistema de aplicación se mantenga balanceado; manteniendo el espacio entre espiras de una misma cinta, de modo que el traslape siga siendo no inferior al 10% y no superior al 20%.

En el caso de las pantallas compuestas de alambre de cobre, el área de la sección transversal de ésta debe ser de a lo menos 1 mm² por cada centímetro de diámetro sobre el aislamiento (según normas ICEA-66-524 y NOM-J-142).

b) Para conducir corrientes de falla.

Para el cálculo de la pantalla, que deba conducir las corrientes de falla, ver Anexo A.

Es necesario tomar en consideración que la capacidad de cortocircuito del sistema y el tiempo de duración de la falla la debe proporcionar el usuario.

Tabla III.11 Pantalla de cintas v.s. Pantalla de alambres.

TIPO DE PANTALLA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1.- A base de cintas	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una pantalla electrostática adecuada. - Reduce el ingreso de humedad en el aislamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Propiedades eléctricas inconsistentes, debido a que en el manejo se afecta el traslape. - Requiere de radio de curvatura mayores que para cables con pantalla de alambres. - Construcción vulnerable durante la instalación. - En empalmes y terminales se requiere de mayor tiempo y habilidad para ejecutar adecuadamente los cortes.
2.- A base de alambres	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una pantalla electrostática adecuada. - Las características eléctricas de la pantalla son consistentes y controlables. - Fácilmente se incrementa la capacidad modificando el número de alambres. - No requiere de gran destreza para realizar cortes en empalmes y terminales. - Son menos vulnerables durante la instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permite el paso de la humedad libremente. (1). - Requiere precauciones para evitar desplazamientos de los alambres durante la instalación.

Nota:

1) Esta desventaja actualmente es disminuida con el uso de cintas bloqueadoras de agua, que se expanden al contacto con la humedad, bloqueando el ingreso de agua.

c) Como neutro del sistema.

La pantalla metálica sobre el aislamiento, también puede diseñarse para ser utilizada como neutro del sistema, esta pantalla debe estar formada por alambres de cobre aplicados helicoidalmente sobre el componente semiconductor; para eliminar el efecto de corrosión sobre el neutro, los alambres que lo forman pueden ser estañados o encapsulados por la cubierta plástica del cable.

El paso del cableado recomendado de estos alambres, no debe ser menor de 8, ni mayor de 10 veces el diámetro sobre los alambres del neutro.

Para definir el número de alambres de esta pantalla, consultar las normas ICEA-S-66-524 y NOM-J-142.

III.5 CUBIERTA PROTECTORA.

La función principal de la cubierta, es proteger el cable de los efectos mecánicos, físicos y químicos que se encuentran en el medio donde va a ser instalado y que afectan la vida útil del cable. Estas cubiertas pueden ser de los tipos siguientes:

- a) Metálicas.
- b) Termoplásticas.
- c) Termofijas.

a) Cubiertas metálicas.

Normalmente se utiliza el plomo, que además puede cumplir con la función de pantalla metálica.

Este tipo de cubierta se usa en ambientes altamente húmedos y/o químicos, donde los riesgos de daño mecánico son mínimos.

b) Cubiertas termoplásticas.

Los materiales normalmente usados, son compuestos de policloruro de vinilo (PVC) y polietileno negro de alta y baja densidad.

Estas cubiertas deben cumplir con los requisitos mínimos indicados en las normas NOM-J-292, ICEA-S-61-402 y UL-1072.

Respecto de los espesores se recomienda, utilizar los indicados en la tabla III.12.

c) Cubiertas termofijas.

Los materiales normalmente usados, son el neopreno (policloropreno), polietileno clorosulfurado (Hypalon) que deben cumplir con las características mínimas indicadas en la norma NOM-J-43, ICEA-S-68-516 y UL-1072. Los espesores recomendados para este tipo de cubiertas, son los mismos que para las cubiertas termoplásticas.

Diámetro calculado bajo la cubierta mm	Espesor de la cubierta mm ⁽¹⁾		
	Mínimo en cualquier punto	Mínimo promedio	Máximo promedio
De 6.35 a 10.8	0.91	1.14	1.21
De 10.81 a 17.8	1.22	1.52	1.64
De 17.81 a 38.0	1.62	2.03	2.16
De 38.01 a 63.5	2.23	2.79	2.92
Mayores de 63.51	2.85	3.56	3.69

Tabla III.12 Espesor de cubierta termoplástica

En la tabla III.13, se muestra un cuadro comparativo de materiales para cubiertas, mencionadas en esta sección.

La aplicación de esta cubierta debe hacerse mediante un proceso que garantice una deformación mínima de la pantalla al efecto de expansión térmica del aislamiento, durante el proceso de curado por calor.

III.6 ARMADURAS.

Cuando el conductor, va a ser instalado en ambientes donde puede estar expuesto a abuso mecánico, éste se debe proteger para resguardar su operación normal. Para este efecto existen diferentes alternativas de armadura, que se indican a continuación.

III.6.1 Cable monoconductor.

La protección mecánica recomendable para este cable, es que sea de un material no magnético, con la finalidad de evitar pérdidas de energía por efecto del campo electromagnético. Para este funcionamiento, es recomendable el uso de

alambre de cobre de temple duro, aleación de aluminio 6201 y bronce, otro material adecuado.

III.6.2. Cables tripolares.

Para efectos de proteger mecánicamente a estos conductores, normalmente se usan las alternativas siguientes:

a) Armadura de alambres de acero.

Esta armadura cumple la función de proteger al cable contra golpes y particularmente contra el esfuerzo a la tensión (jalado). Esta armadura se usa normalmente, en cables para uso submarino (para soportar corrientes marinas y posibles jalados de las anclas de embarcaciones) y también es usada cuando el cable es instalado en lugares con mucha pendiente y particularmente cuando es suspendido en un extremo.

b) Armaduras de flejes de acero.

Este tipo de armadura, es usado particularmente donde el cable está expuesto a golpes; debido a que la superficie de contacto del acero con el conductor es mayor y como consecuencia el impacto se distribuye en el área de fleje.

Es importante mencionar, que esta armadura es la más efectiva para proteger el cable contra los ataques de roedores.

c) Armadura mixta (fleje y alambre de acero).

Este tipo de armadura se usa frecuentemente en ambientes donde el cable puede estar expuesto tanto a golpes fuertes, como a esfuerzos de tensión (jalado). Esta armadura ha sido reemplazada por soleras de acero delgadas en espiral.

d) Armadura de alambre de acero doble.

Esta armadura se aplica en dos capas de alambre de acero, con sentido de paso de cableado opuesto entre ellas.

Esta armadura se usa habitualmente en lugares donde las condiciones del terreno, obligan a cambiar continuamente la dirección del conductor. Esta armadura elimina el efecto de resorteo que se presenta en las armaduras mencionadas anteriormente. Adicionalmente tiene excelentes características para efectos de soportar el efecto a la tensión (jalado).

Tabla III.13 propiedades de cubiertas.

Características	P.V.C.	Poliétileno Baja densidad	Poliétileno Alta densidad	Neopreno	Poliétileno Clorosulfanado. Hypalon	Plomo
Resistencia a la humedad	R	MB	E	M	MB	E
Resistencia a la abrasión	B	B	E	MB	MB	M
Resistencia a golpes	B	B	MB	E	E	M
Flexibilidad	B	B	R	E	E	R
Doblez en frío	R	E	MB	B	R	-
Propiedades Eléctricas	MB	E	E	R	B	-
Resistencia a la intemperie	MB	*E	*E	B	*E	MB
Resistencia a la flama	MB	M	M	B	B	B
Resistencia al calor	B	M	R	MB	E	MB
Resistencia a la radiación nuclear	R	B	B	B	MB	E
Resistencia a la oxidación	E	R	R	MB	E	B
Resistencia al ozono	E	E	E	B	E	E
Resistencia al efecto corona	E	B	B	R	B	E
Resistencia al corte por compresión	B	B	B	MB	B	M
Resistencia a ácidos:						
-30% sulfúrico	E	E	E	R	B	E
-3% sulfúrico	E	E	E	R	R	E
-10% nítrico	R	E	E	R	R	M
-10% clorhídrico	B	E	E	R	R	R
-10% fosfórico	E	E	E	R	R	B
Resistencia a álcalis y sales:						
-10% Hidróxido de sodio	E	E	E	M	R	B
-2% Carbonato de sodio	B	E	E	R	R	B
-10% Cloruro de sodio	E	E	E	B	B	B
Resistencia a agentes químicos orgánicos:						
-Acetona	M	B	B	B	B	E
-Tetracloruro de carbón	B	B	B	M	M	E
-Aceites	E	B	B	B	B	E
-Gasolina	B	B	B	B	B	E
-Craosota	R	B	B	M	M	-
Rango de temperatura MIN.	-55	-60	-60	-30	-30	-
De operación (°C) MAX.	+75	+75	+75	+90	+105	
Peso específico	1.4	0.9	1.0	1.3	1.2	11.3
Principales aplicaciones	Uso general, cables para interiores y exteriores cubiertos.	Cables a la intemperie. Cubiertas sobre plomo.	Ídem, pero cuando se requiera mayor resistencia a la abrasión	Cables flexibles. Cables para minas	Cables flexibles de alta calidad	Cables con aislamiento de papel impregnado. Cables para refinerías de petróleo y plantas petroquímicas.

E = Excelente MB = Muy Buena R = Regular M = Mala *Sólo en color negro, conteniendo negro de humo

Ver notas anexas.

Notas de la tabla III.13

- 1) El P.V.C. es bueno a la resistencia al aceite y a la flama, altamente resistente a ácidos inorgánicos, soluciones alcalinas e hidrocarburos alifáticos, pero son atacados por hidrocarburos aromáticos, cetonas, ésteres e hidrocarburos clorados. La descomposición del P.V.C bajo flama lleva a la emisión de cloro y ácido clorhídrico.
- 2) El **polietileno** tiene excelente resistencia a sustancias químicas como ácidos y bases, pero ofrece menor resistencia a los aceites y no son recomendados cuando van a estar en contacto con hidrocarburo; tiene excelentes propiedades a baja temperatura. La principal desventaja es que proponga la flama y el incendio.
- 3) **Neopreno (Policloropreno)**. Su resistencia al desgarre, a la compresión y a la abrasión son excelentes. Su resistencia a sustancias químicas, luz solar e intemperie, al envejecimiento, ozono, son excelentes; y tiene una considerable resistencia a la propagación de la flama. Tiene excelente resistencia a los hidrocarburos alifáticos, aceites y grasas, hidrocarburos fluorinados, ácidos minerales diluidos, soluciones alcalinas, y todas las sales, excepto aquellas de naturaleza oxidante. Tiene también buena resistencia a la oxidación. Es atacado por hidrocarburos aromáticos y por los hidrocarburos clorados.
- 4) **PE clorosulfonado (HYPALON)**. Puede ser utilizado para cubiertas de uso extra rudo en cables portátiles y para cables usados en lugares donde el cable esté expuesto a la abrasión y al desgarre. La resistencia a la intemperie, luz solar y a la humedad es excelente. Es resistente a ácidos, álcalis, aceites y grasas derivadas del petróleo, alcohol, cetonas, a la oxidación y tienen buena resistencia a la propagación de incendio. Su resistencia a hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos es regular y deben tomarse ciertas precauciones.

ANEXO A

A.1 CORTO CIRCUITO EN PANTALLAS METÁLICAS.

La fórmula para determinar la corriente de cortocircuito máxima permisible en la pantalla metálica es idéntica a la fórmula para el cálculo de la corriente de corto circuito en el conductor; de esa forma:

$$(I_{cc}/A)^2 t = k \log_{10} [(T_2 + T)/(T_1 + T)]$$

donde:

- I_{cc} = Corriente de cortocircuito (A).
- A = Area efectiva de la sección transversal de la pantalla (circular mils).
- t = Tiempo de duración de la falla (s).
- k = Constante que depende del material de la pantalla.
- T_2 = Temperatura transitoria máxima admisible en la pantalla (°C).
- T_1 = Temperatura de operación de la pantalla (°C).
- T = Temperatura (bajo cero) en la cual el material tiene resistencia eléctrica teóricamente nula (°C).

De la ecuación anterior si despejamos la corriente de cortocircuito tendremos:

$$I_{cc} = (A/\sqrt{t}) \sqrt{k \log_{10} (T_2 + T)/(T_1 + T)}$$

haciendo

$$Y = \sqrt{k \log_{10} (T_2 + T)/(T_1 + T)}$$

tendremos

$$I_{cc} = YA/\sqrt{t}$$

ó

$$t = (YA/I_{cc})^2$$

ANEXO A

o también

$$A = (I_{cc} \sqrt{t}) / Y$$

Los valores de Y dependen de las características físicas de la pantalla, en este caso para conocer su valor, primero determinamos la temperatura de operación de la pantalla (T_1) en función de la temperatura del conductor, ver tabla A.1.

Tabla A.1 Temperatura de operación de la pantalla.

TENSIÓN kV	T_1 (°C) A LAS TEMPERATURAS DEL CONDUCTOR			
	90°C	85°C	80°C	75°C
5	85	80	75	70
15	85	80	75	70
25	85	80	75	70
35	80	75	70	65

El valor de Y para una pantalla de cobre utilizamos la tabla k.2.

Tabla A.2

MATERIAL DE CUBIERTA	VALOR DE "Y", A UNA TEMPERATURA DE LA PANTALLA DE:				
	85°C	80°C	75°C	70°C	65°C
TERMOPLÁSTICO	0.063	0.065	0.066	0.068	0.070
TERMOFIJO	0.089	0.090	0.091	0.092	0.093

Nota: Ver ICEA P-45-482, 1979.

ANEXO A

A.2 FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS PANTALLAS.

Una vez determinada el área de la pantalla "A" conociendo la corriente de cortocircuito (I_{cc}), el tiempo de duración (t) de la falla y el factor Y, podemos determinar con las siguientes fórmulas:

- a) Para pantallas de alambre aplicados helicoidalmente.

$$A = nd^2$$

donde:

- A** = Área de la pantalla (CM)
N = Número de alambres.
d = Diámetro de los alambres (mils).

- b) Cintas aplicadas helicoidalmente no traslapadas.

$$A = 1.27nwb$$

donde:

- n** = Número de cintas.
w = Ancho de la cinta (mils).
b = Espesor de la cinta (mils).

- c) Cintas aplicadas helicoidalmente con traslape.

$$A = 4bd_m \sqrt{[100/(2*(100-L))]}$$

donde:

- b** = Espesor de la cinta (mils).
d_m = Diámetro promedio de la pantalla (mils).
L = Traslape de las cintas (%).

IV. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS.

Para elaborar un buen diseño de los sistemas eléctricos de distribución utilizando cables subterráneos, es importante conocer las características eléctricas de los mismos, que a continuación se indican:

IV.1. RESISTENCIA A LA CORRIENTE DIRECTA (R_{cd}).

Como es sabido, los conductores eléctricos presentan una resistencia al paso de la corriente eléctrica, la cual es importante para el cálculo de las pérdidas por efecto Joule. La fórmula utilizada para obtener la resistencia a la corriente directa o también conocida como resistencia óhmica para un solo alambre, es la siguiente:

$$R_{cd} = \rho \frac{L}{A} \quad [\Omega] \quad \text{IV.1}$$

donde:

L = longitud del conductor (km).

A = área de la sección transversal del conductor (mm^2).

ρ = resistividad volumétrica ($\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$)

para el cobre $\rho = 17.241 \quad \Omega\text{-mm}^2/\text{km}$

para el aluminio $\rho = 28.280 \quad \Omega\text{-mm}^2/\text{km}$

IV.1.1. Efecto de cableado y temperatura.

Debido a que los cables de energía, están formados por varios alambres trenzados (ver Capítulo III), la resistencia del conductor, será la resistencia de cada uno de los alambres; además, la resistencia aumenta con la temperatura, con lo cual para fines prácticos podemos utilizar la fórmula siguiente, para el cálculo de la resistencia óhmica de los conductores:

$$R_{cd} = \rho \frac{L}{A} (1 + k_c)(f) \quad [\Omega] \quad \text{IV.2}$$

donde:

k_c = 0.020 para cables abiertos, compresos y compactos.

f = factor de corrección por temperatura (ver Tabla IV.1.)

La resistencia eléctrica nominal de corriente directa (C.D.) y 20°C para los cables concéntricos de cobre, se puede encontrar en la Tabla 4 de la norma NOM-J-12, para los cables de aluminio ver la norma NOM-J-32 ó también los catálogos de los fabricantes.

IV.2 RESISTENCIA A LA CORRIENTE ALTERNA (R_{ca})

Si se hace circular una corriente alterna por un conductor, la resistencia será mayor, que al hacer circular una corriente directa, de magnitud igual al valor eficaz de la corriente alterna.

Este incremento es ocasionado por los fenómenos conocidos como efecto superficial y efecto de proximidad.

- Efecto superficial, piel o Kelvin.

Al circular una corriente alterna en un conductor de varios alambres trenzados, se produce un flujo alterno, que al cortar los alambres inducirá una FEM en cada alambre, opuesta a la diferencia de potencial aplicada al conductor, con esto los alambres centrales se eslabonan con más líneas de fuerza que los alambres de la superficie y la fuerza contra-electromotriz inducida en los alambres centrales será mayor que en los superficiales o sea que la densidad de corriente, será mayor en la superficie del conductor que en el centro. Por lo mencionado anteriormente, este efecto equivale a una disminución de la sección del conductor y por lo tanto a un aumento de la resistencia óhmica.

- Efecto proximidad.

El efecto proximidad consiste en que el flujo producido por la corriente en un conductor, al cortar a otro conductor, modifica la distribución de corriente en la sección de éste; si se trata de conductores próximos, recorridos por corrientes de signo contrario, la densidad de la corriente es mayor en la parte más próxima al otro conductor, con lo cual aumentará la resistencia óhmica.

Tabla IV.1

Factores de corrección por temperatura (f) para el cálculo de resistencias de conductores eléctricos.

TEMPERATURA DEL CONDUCTOR EN °C	COBRE	ALUMINIO
0	0.9216	0.9191
5	0.9416	0.9398
10	0.9615	0.9596
15	0.9803	0.9803
20	1.0000	1.000
25	1.0204	1.0204
30	1.0395	1.0405
35	1.0593	1.0604
40	1.0787	1.0810
45	1.0989	1.1013
50	1.1185	1.1210
55	1.1376	1.1415
60	1.1507	1.1614
65	1.1764	1.1820
70	1.1961	1.2019
75	1.2165	1.2224
80	1.2360	1.2422
85	1.2562	1.2626
90	1.2755	1.2820

Tomando en cuenta los conceptos indicados anteriormente, podemos encontrar la resistencia a la C.A. con la fórmula siguiente:

$$R_{ca} = R_{cd}(1 + S + P)$$

IV.3

donde:

S = factor debido al efecto superficial.

P = factor debido al efecto proximidad.

Tanto "S" como "P", dependen de la frecuencia del sistema; en la Tabla IV.2 se indica la relación de resistencias de C.A. y de C.D., para conductores con cableado concéntrico normal, donde ya están considerados los factores mencionados.

Tabla IV.2

Relación de resistencia C.A./C.D. para conductores de cobre y aluminio a una frecuencia de 60 Hz. Cableado concéntrico normal.

CALIBRE CONDUCTOR AWG Ó KCM	CASO A		CASO B	
	COBRE	ALUMINIO	COBRE	ALUMINIO
3 y menores	1.000	1.000	1.00	1.00
2	1.000	1.000	1.01	1.00
1	1.000	1.000	1.01	1.00
1/0	1.001	1.000	1.02	1.00
2/0	1.001	1.001	1.03	1.00
3/0	1.002	1.001	1.04	1.01
4/0	1.004	1.001	1.05	1.01
250	1.005	1.002	1.06	1.02
300	1.006	1.003	1.07	1.02
350	1.009	1.004	1.08	1.03
400	1.011	1.005	1.10	1.04
500	1.018	1.007	1.13	1.06
600	1.025	1.010	1.16	1.08
750	1.039	1.015	1.21	1.11
1000	1.067	1.026	--	1.19
1250	1.102	1.040	--	1.27
1500	1.142	1.058	--	1.36
1750	1.185	1.079	--	1.46
2000	1.233	1.100	--	1.56
2500	1.326	---	--	--

CASO A:

- Conductor monofásico sin pantalla metálica, instalado en aire o en ductos no metálicos.
- Conductor monofásico con pantalla metálica y cubierta, instalado en ductos no metálicos.

CASO B:

- Cables trifásicos con pantalla metálica.
- Dos o múltiplo de dos conductores monofásicos sin pantalla, instalados en ducto metálico.

IV.3 REACTANCIA INDUCTIVA.

Para el cálculo de la reactancia inductiva en cables de energía, se deben tomar dos criterios importantes; siendo estos: cuando no existen corrientes inducidas en las pantallas o cubiertas metálicas, o cuando existen corrientes inducidas en dichas pantallas. Para efectos prácticos, en cables con pantalla a base de alambres o cintas de cobre, con conexión a tierra de la pantalla, en dos o más puntos, se producirán corrientes circulantes en ésta; pero la sección de la pantalla es muy pequeña y por lo tanto su resistencia eléctrica es muy alta, lo que limitará las corrientes circulantes a valores despreciables y en tal caso puede utilizarse la expresión siguiente, para el cálculo de la reactancia inductiva:

$$x_l = 2\pi f l$$

IV.4

donde:

X_L = reactancia inductiva (Ω/km)

f = frecuencia del sistema (Hz)

L = inductancia (H/km)

IV.3.1. Inductancia.

La inductancia de un cable está dada por la suma de la inductancia propia, más la inductancia mutua.

La inductancia propia del conductor es constante y depende únicamente de su construcción, la inductancia mutua depende de la separación y disposición de los cables.

La fórmula generalizada, tomando en cuenta los conceptos anteriores, es la siguiente:

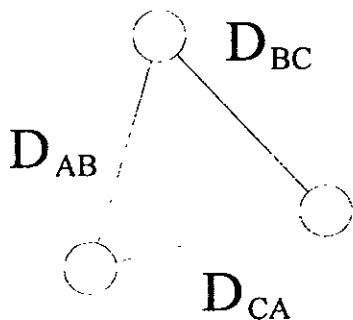
$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad \text{IV.5}$$

donde:

- L** = inductancia (H/km)
- DMG** = distancia media geométrica (mm)
- RMG** = radio medio geométrico (mm)

Cálculo de la distancia media geométrica (DMG)

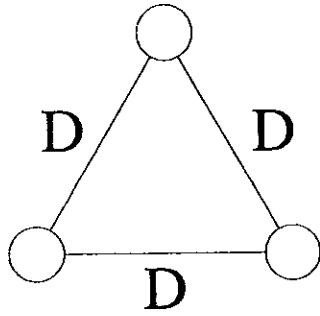
a) Disposición en triángulo.



$$DMG = \sqrt[3]{D_{AB} \times D_{BC} \times D_{CA}}$$

$$D_{AB} \neq D_{BC} \neq D_{CA}$$

b) Disposición en triángulo equilátero.



$$DMG = \sqrt[3]{D \times D \times D}$$

$$DMG = D$$

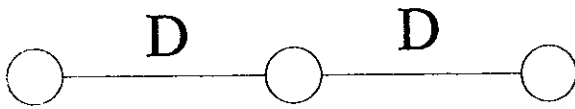
c) Disposición plana, 2 conductores.



$$DMG = \sqrt{D \times D}$$

$$DMG = D$$

d) Disposición plana, 3 conductores.



$$DMG = \sqrt[3]{D \times D \times 2D}$$

$$DMG = \sqrt[3]{2} \quad D = 1.26 D$$

Cálculo del Radio Medio Geométrico (RMG)

Para el cálculo del Radio Medio Geométrico, podemos utilizar la Tabla IV.3.

Tabla IV.3

Radio medio geométrico de conductores más usuales, de un solo conductor.

CONSTRUCCIÓN DEL CONDUCTOR	RMG
Alambre sólido	0.779 r (1)
7 hilos	0.726 r
19 hilos	0.758 r
37 hilos	0.768 r
61 hilos	0.772 r

Nota:

1) r = radio del conductor (mm).

IV.4 REACTANCIA CAPACITIVA.

La fórmula generalizada para el cálculo de la reactancia capacitiva, es la siguiente:

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{IV.6}$$

donde:

X_c = reactancia capacitiva (MΩ-km)

f = frecuencia del sistema (Hz)

C = capacitancia (μF/km)

IV.4.1. Capacitancia (C).

El cable de energía con pantalla o forro metálico, constituye un condensador, en el cual el conductor que está al potencial de la línea, será una de las placas y el forro o pantalla que esta a tierra, será la otra placa, quedando el aislamiento del cable como el dieléctrico del condensador.

En este trabajo se analizarán dos casos, cable monofásico con pantalla o cubierta metálica y cable trifásico con cubierta metálica común.

a) Cable monofásico con pantalla o cubierta metálica.

Como se vio en el Capítulo III, la capacitancia a tierra de un cable en el que el campo eléctrico tiene una disposición radial y uniforme, debido a la presencia de la pantalla o cubierta metálica, está dada por la expresión siguiente:

$$C = \frac{(0.02413) (SIC)}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)} \quad \text{IV.7}$$

donde:

C = capacitancia ($\mu\text{F}/\text{km}$).

SIC = constante dieléctrica del aislamiento.

D = diámetro sobre el aislamiento (mm).

d = diámetro sobre la pantalla del conductor (mm).

Nota:

SIC =2.3 para XLP.

SIC =2.6 para EPR.

b) Cable trifásico con cubierta metálica común.

La capacitancia de los cables trifásicos con cubierta metálica común, puede establecerse considerando el sistema formado por las cargas eléctricas de cada conductor y las cargas de sus imágenes con respecto a la cubierta metálica (ver figura IV.1).

Para este caso, la capacitancia está dada por la relación siguiente:

$$C = \frac{(0.1665) (SIC)}{G_3} \quad \text{IV.8}$$

donde:

C = capacitancia ($\mu\text{F}/\text{km}$)

SIC = constante dieléctrica del aislamiento.

G₃ = factor geométrico del cable.

$$G_3 = \frac{3}{2} \ln \frac{3a^2(r^2 - a^2)}{r^2(r^6 - a^6)} \quad (\text{ver figura IV.1})$$

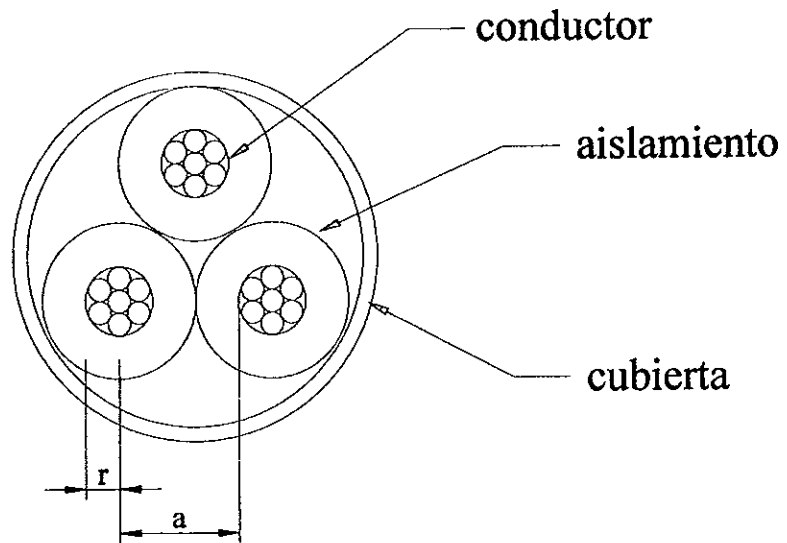


Figura IV.1 Cable trifásico con frecuencia común.

IV. 5 IMPEDANCIA.

Cuando un circuito constituido por elementos lineales es excitado por una fuente de tensión, que es una función sinusoidal del tiempo a una frecuencia (f), circulará por éste una corriente que depende del tiempo y de la misma frecuencia (f) y cuya amplitud y ángulo de fase dependen de la tensión aplicada, de la resistencia, inductancia y capacitancia del circuito.

Podemos definir a la Impedancia, como la representación compleja de las funciones sinusoidales que nos permite relacionar la amplitud y el ángulo de fase de la corriente y la tensión.

Partiendo de la Ley de Ohm generalizada, tendremos:

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{IV.9}$$

donde:

$$Z = (R_{ca} + j(x_l - x_c)) = |Z| \angle \phi \quad \text{IV.10}$$

donde:

$$|Z| = \sqrt{R_{ca}^2 + (x_l - x_c)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(x_l - x_c)}{R_{ca}}$$

Z = impedancia (Ω/km)
 X_L = reactancia inductiva.
 X_C = reactancia capacitiva.

Para cables de energía aislados de mediana tensión, con longitudes menores a 10 km, se puede despreciar la reactancia capacitiva (X_C), tratando su análisis como una línea corta, de esa manera la ecuación IV.10, se reduce a:

$$Z = (R_{ca} + jx_L) \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{IV.11}$$

Para practicar los conceptos vistos hasta ahora en este capítulo, resolveremos el ejemplo siguiente:

EJEMPLO:

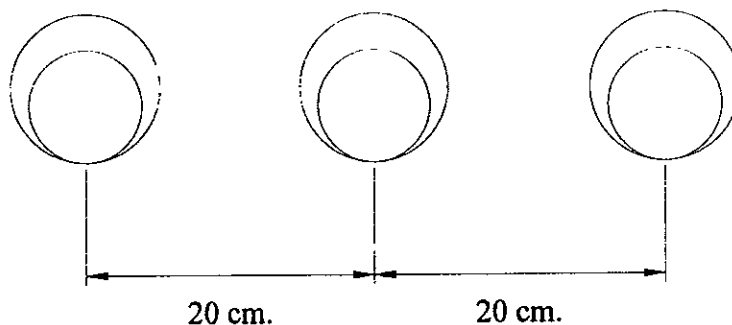
Se tiene una instalación en ductos de PVC subterráneos, formada por 3 cables monofásicos como se muestra en la figura, el conductor es de cobre compacto, calibre 1/0 AWG, 7 hilos (fabricación especial), longitud de 1 km, con aislamientos XLP, 90°C para 25 kV y cubierta de PVC,, sus dimensiones son:

Area = 53.84 mm².

D_c = diámetro del conductor = 9.46 mm.

e_{ps} = Espesor de la pantalla semiconductora = 0.38 mm.

e_c = espesor de la cubierta = 2.03 mm.



Se desea encontrar lo siguiente:

- a) R_{ca} (Ω/km).
- b) X_L (Ω/km).
- c) X_C ($M\Omega/km$).
- d) Z (Ω/km).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

SOLUCION:

a) Resistencia en corriente alterna del conductor.

Utilizando la fórmula IV.2, tendremos:

$$R_{cd} = \rho \frac{L}{A} (1 + k_c) f$$

$$\rho = 17.241$$

$$A = 53.48$$

$$k_c = 0.020$$

$f = 1.2755$ para calcular la resistencia a la temperatura de operación del cable que es de 90°C (ver Tabla IV.1).

Sustituyendo:

$$R_{cd_{90^\circ C}} = \frac{17.241}{53.480} (1 + 0.020) 1.2755 = 0.4194 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Para calcular la resistencia a la C.A., utilizamos los factores dados en la Tabla IV.2, de donde:

$$\frac{R_{cd_{90^\circ C}}}{R_{cd_{20^\circ C}}} = 1.001$$

$$R_{cd_{20^\circ C}} = (0.4194) (1.001) = 0.4198 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

b) Reactancia inductiva (X_L)

Para calcular la inductancia (L), utilizamos la ecuación IV.5.

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG}$$

Del arreglo de la instalación, tenemos:

$$DMG = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} = \sqrt[3]{(20)(20)(40)} = 252 \text{ [mm]}$$

RMG = 0.726 r (según Tabla IV.3 para 7 hilos)

$$RMG = 0.726 \left(\frac{9.46}{2} \right) = 3.43 \text{ [mm]}$$

Sustituyendo valores, tendremos:

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{252}{3.43} = 8.60 \times 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

tomando $f = 60\text{Hz}$ que es la frecuencia del sistema y utilizando la ecuación IV.4, obtenemos:

$$x_L = 2\pi(60)(8.6 \times 10^{-4}) = 0.3242 \text{ [\Omega/km]}$$

c) Reactancia capacitiva (X_C)

Utilizando la ecuación IV.7 para cables monofásicos, tendremos:

$$C = \frac{0.0241(SIC)}{\log_{10} \frac{D}{d}}$$

Tomando como SIC = 2.3 para XLP y de los datos del problema, tendremos:

$$\begin{aligned} D &= (D_c + 2e_p + 2e_u) = 9.46 + 2(0.38) + 2(6.60) \\ &= 23.42 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

$$d = (D_c + 2e_p) = 9.46 + 2(0.38) = 10.22 \text{ [mm]}$$

$$C = \frac{(0.02413)(2.3)}{\log_{10} \frac{23.42}{10.22}} = 0.1541 \text{ [\mu F/km]}$$

Utilizando la ecuación IV.6, se tendrá:

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi (60)(0.1541)} = 0.01721 \text{ [M}\Omega\text{-km]}$$

d) Impedancia (Z).

Utilizando la ecuación IV.11 y sustituyendo los valores encontrados anteriormente:

$$Z = 0.4198 + j0.3241 = 0.5303 \angle 37.66^\circ \text{ [\Omega/km]}$$

IV.6 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA CERO.

Cuando una corriente de secuencia cero fluye a lo largo de los conductores de fase de un circuito trifásico, debe retornar por tierra, o por las pantallas de los cables, o por una combinación en paralelo de la tierra y de las pantallas. Una corriente de secuencia cero que fluye por un conductor encuentra la resistencia de corriente alterna, y cuando regresa por tierra o por las pantallas encuentra la resistencia de esos caminos. La corriente de secuencia cero que fluye en una fase encuentra la reactancia propia del conductor, la reactancia debida a la inductancia mutua con los otros dos conductores de fase, y a la reactancia debido a la inductancia propia de las trayectorias de retorno. Cada uno de estos efectos inductivos no siempre puede identificarse en forma individual de las ecuaciones usadas para cálculo de reactancia. Los efectos de la resistencia y de la reactancia, están interrelacionados tan estrechamente que son tratados simultáneamente.

Las pantallas de los cables deben estar unidas y conectadas a tierra en varios puntos a lo largo del circuito, lo que permite que la mayoría de corriente de secuencia cero fluya por la pantalla. Sin embargo, cuando se emplea algún método para limitar las corrientes de secuencia cero, la mayoría de corriente de retorno fluye por tierra. Es por esto que el método de unir y conectar a tierra las pantallas y los neutros, tiene un efecto importante en la impedancia de secuencia cero de los cables.

Cualquier instalación de cables aislados debe considerarse dentro de cualquiera de los tres casos siguientes:

- a) La corriente de retorno fluye por la pantalla y por tierra.
- b) La corriente regresa por la pantalla únicamente.
- c) La corriente regresa por tierra únicamente.

- a) La corriente de retorno fluye por la pantalla y por tierra.

Este caso es similar al de una línea de transmisión aérea con cables de guarda, la impedancia de secuencia cero estará dada por:

$$Z_{00} = Z_{00c} - \frac{Z_{00M}^2}{Z_{00F}} \quad \text{IV.12}$$

donde:

- Z_{00c} = impedancia propia de secuencia cero del grupo de tres conductores.
 Z_{00F} = impedancia propia de secuencia cero de la pantalla o cubierta metálica.
 Z_{00m} = impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores y las tres cubiertas metálicas.

- b) La corriente regresa por la pantalla únicamente.

Este caso puede presentarse cuando las pantallas o las cubiertas metálicas están aisladas de tierra, la impedancia de secuencia cero estará dada por la expresión siguiente:

$$Z_{00} = Z_{00c} + Z_{00F} - 2Z_{00M} \quad \text{IV.13}$$

- c) La corriente regresa únicamente por tierra.

Este caso es similar a una línea de transmisión aérea sin cables de guarda, o cuando los cables de energía no cuentan con cubierta o pantalla metálica (cables para aeropuerto de 5 kV). La impedancia de secuencia cero es igual a la impedancia de secuencia cero de los tres conductores, o sea:

$$Z_{00} = Z_{00c} \quad \text{IV.14}$$

IV.6.1 Para cables monofásicos.

La impedancia propia de secuencia cero (Z_{00c}), del grupo de 3 conductores, estará dada por la expresión siguiente:

$$Z_{00c} = r_c + 0.002964 f + j0.008676 f \log \frac{658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{\sqrt[3]{RMG(DMG)^2}} \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{IV.15}$$

donde:

r_c = resistencia a la corriente alterna del conductor (Ω/km).

f = frecuencia del sistema (Hz).

ρ = resistividad del terreno (Ω/m).

RMG = radio medio geométrico de cada conductor (cm).

DMG = distancia media geométrica entre los tres conductores:

$$\sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} \quad [\text{cm}]$$

La impedancia propia (Z_{00F}) de secuencia cero de la pantalla o cubierta metálica, está dada por la expresión siguiente:

$$Z_{00c} = r_F + 0.002964 f + j0.008676 f \log \frac{658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{\sqrt[3]{r_0 (DMG)^2}} \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{IV.16}$$

donde:

r_F = resistencia eléctrica de la pantalla o cubierta metálica (Ω/km), ver tabla IV.4 para el cálculo de este concepto.

$$r_0 = \text{radio medio de la pantalla o forro metálico} = \frac{r_e + r_i}{2} \quad [\text{cm}]$$

r_e = radio exterior.

r_i = radio interior.

DMG = distancia media geométrica (cm).

La impedancia mutua entre los tres conductores y las tres pantallas o cubiertas metálicas, está dada por la expresión siguiente:

$$Z_{00M} = 0.002964f + j0.008676f \log \frac{658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{\sqrt[3]{r_0 (DMG)^2}} \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{IV.17}$$

Tabla IV.4 Fórmulas para el cálculo de la resistencia eléctrica de las pantallas y cubiertas metálicas.

1) Pantalla de alambres.	$r_F = \rho \frac{1.02}{(0.7854)(n)(d^2)} \quad [\Omega/\text{km}]$
2) Cubierta de plomo.	$r_F = \frac{\rho}{(\Pi)(d_m)(e)} \quad [\Omega/\text{km}]$
3) Pantallas de cintas de cobre traslapadas.	$r_F = \frac{5.33\rho K}{(d_m)(e)} \quad [\Omega/\text{km}]$

Para 1):

ρ = resistividad eléctrica del material ($\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$).

cobre = 17.241

n = número de alambres.

d = diámetro de los alambres (mm).

Para 2):

ρ = 241 ($\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$).

d_m = diámetro medio = $\frac{d_e + d_i}{2}$

e = espesor (mm).

Para 3):

ρ = 17.241 $\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$.

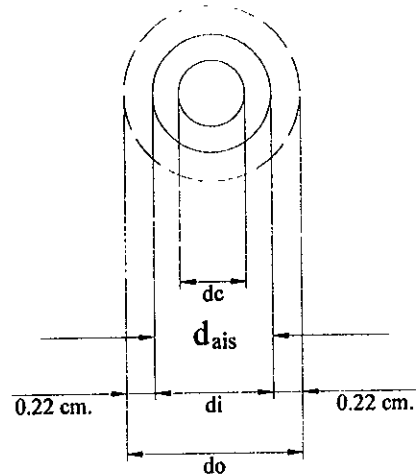
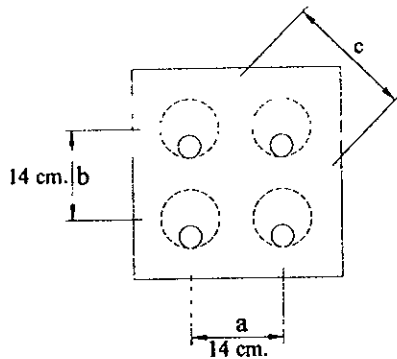
K = constante para incrementar la resistencia, debido al contacto en el traslape ($K=1$ en cables nuevos, $K=2$ para cables en servicio).

d_m = diámetro medio (mm).

e = espesor de la pantalla (0.12 mm aprox.).

Ejemplo:

Determine la impedancia de secuencia cero de 3 cables monopolares de 240 mm^2 de sección transversal, cada uno con 37 alambres, con aislamiento de EPR y cubierta de plomo; instalados en un banco de ductos, como se muestra en la figura. El diámetro de cada conductor es de 2.012 cm , el espesor del aislamiento es de 0.61 cm y el espesor de la cubierta de plomo es de 0.22 cm . Considérese la resistividad de tierra igual a $100 \Omega\text{-m}$, la resistencia del conductor es de 0.1088 a 60Hz .



$$d_c = 2.012 \text{ cm}$$

$$d_{\text{ais}} = 3.232 \text{ cm.}$$

$$d_o \text{ (plomo)} = 3.672 \text{ cm.}$$

Solución:

Para el cálculo de la impedancia propia de secuencia cero, utilizamos la expresión IV.15.

$$Z_{00c} = 0.1088 + 0.002964(60) + j0.008676(60) \log \frac{658 \sqrt{\frac{100}{60}}}{\sqrt[3]{RMG(DMG)^2}}$$

Cálculo del radio de la cubierta:

$$r_0 = \frac{r_e + r_i}{2} = \frac{1.836 + 1.616}{2} = 1.726 \text{ [cm]}$$

DMG = 15.71 cm (calculada anteriormente).

Sustituyendo valores, tendremos:

$$Z_{00F} = 1.01 + 0.17784 + j0.5205 \log \frac{849.47}{\sqrt[3]{(1.726)(15.71)^2}}$$

$$Z_{00F} = 1.1878 + j1.068 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{00F} = 1.597 \angle 41.96^\circ \text{ [\Omega/km]}$$

Para el cálculo de la impedancia mutua de los tres conductores, utilizamos la relación IV.17.

$$Z_{00M} = 0.002964(69) + j0.008676(60) \log \frac{658 \sqrt{\frac{100}{60}}}{\sqrt[3]{(1.726)(15.71)^2}}$$

$$Z_{00M} = 0.17784 + j1.068 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{00M} = 1.082 \angle 80.54^\circ \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

El radio medio geográfico (RMG), de cada conductor de 37 hilos, será:

$$RMG = 0.768r = 0.768 \left(\frac{2.012}{2} \right) = 0.7726 \text{ } [\text{cm}]$$

La distancia media geográfica (DMG), será:

$$DMG = \sqrt[3]{14 \times 14 \times 19.8} = 15.71 \text{ } [\text{cm}]$$

Sustituyendo valores tendremos:

$$Z_{00c} = 0.108 + 0.17784 + j0.52056 \log \frac{849.47}{\sqrt[3]{(0.7726)(15.71)^2}}$$

$$Z_{00c} = 0.28664 + j1.129 = 1.164 \angle 75.75^\circ \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Para el cálculo de la impedancia propia de secuencia cero de la cubierta, utilizamos la expresión IV.16.

$$Z_{00F} = r_F + 0.002964 f + j0.008676 f \log \frac{658 \sqrt{\frac{100}{60}}}{\sqrt[3]{r_0 (DMG)^2}}$$

Cálculo de la resistencia de la pantalla (r_F), utilizaremos la Tabla IV.4.

$$r_F = \frac{\rho}{\Pi d_m e}$$

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{3.672 + 3.232}{2} = 34.52 \text{ } [\text{mm}]$$

$$r_F = \frac{241}{(\Pi)(34.52)(2.2)} = 1.01 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Haciendo el cálculo de la impedancia de secuencia cero, para las tres condiciones mencionadas en la teoría, tendremos:

a) Cuando la corriente fluye por la pantalla y por la tierra.

$$Z_{00c} = Z_{00c} - \frac{(Z_{00M})^2}{Z_{00F}}$$

$$Z_{00} = 0.28864 + j1.129 - \frac{(1.082 \angle 80.54^\circ)^2}{15.79 \angle 41.96^\circ}$$

$$Z_{00} = 0.6451 + j0.489 \quad [\Omega/\text{km}]$$

b) Cuando la corriente regresa únicamente por la pantalla.

$$Z_{00} = Z_{00c} + Z_{00F} + 2Z_{00M}$$

$$Z_{00} = 0.28864 + j1.129 + 1.1874 + j1.068 - 0.3556 - j2.136$$

$$Z_{00} = 1.12 + j0.061 \quad [\Omega/\text{km}]$$

c) Cuando la corriente regresa únicamente por tierra.

$$Z_{00} = Z_{00c} = 0.28664 + j1.129 \quad [\Omega/\text{km}]$$

V. COMPORTAMIENTO DE LOS CABLES AISLADOS.

V.1 CAÍDA DE TENSIÓN Y REGULACIÓN.

Caída de tensión. Las aplicaciones generales de cables aislados para media tensión implican rara vez distancias mayores a los 10 km, lo que nos permite calcular estos cables como una línea de transmisión corta. El valor de la reactancia capacitiva en derivaciones despreciables, para los efectos de cálculo, y sólo se considera el circuito equivalente a la resistencia y reactancia inductiva en serie como se ilustra en la figura V.1.

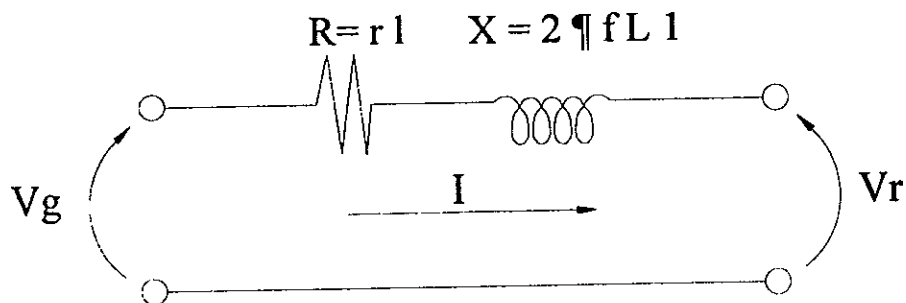


Figura V.1 Circuito monofásico equivalente de un cable.

El circuito anterior, se analiza mediante la ecuación.

$$V_g = V_r + I(R + jX) = V_r + IZ \quad \text{V.1}$$

donde:

- V_g = tensión al neutro de envío.
- V_r = tensión al neutro recibida.
- I = corriente enviada o recibida.
- Z = impedancia total ($R + j X$)
- IZ = caída de tensión en el cable.

Regulación. La regulación de tensión de un circuito eléctrico, es el incremento de tensión en el extremo de recepción, expresado como un porcentaje de la tensión a plena carga, cuando se retira la carga a un cierto factor de potencia, mientras que la tensión en el extremo de envío permanece constante.

La finalidad de calcular y conocer la regulación del sistema es vigilar y garantizar que no se excedan los valores permisibles de operación (máximo y mínimo), propios de los aparatos que se van a conectar al sistema.

De acuerdo con la definición dada, la expresión matemática para el cálculo de la regulación es:

$$\% \text{Reg} = \frac{|V_0| - |V_r|}{|V_r|} \times 100 \quad \text{V.2}$$

donde:

$\% \text{Reg.}$ = regulación en por ciento.

$|V_0|$ = Magnitud de la tensión en el punto de recepción después de desconectar la carga; es equivalente a la tensión en vacío del sistema.

$|V_r|$ = Magnitud de la tensión en el punto de recepción a plena carga, es decir, con la totalidad de la carga conectada.

$|V_0| - |V_r|$ = Elevación de la tensión, es aproximadamente igual a la caída de tensión debida a la carga.

EJEMPLO:

Se tiene una instalación eléctrica industrial, con las características generales siguientes:

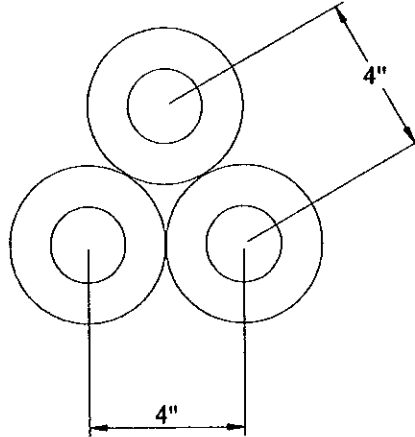
- Dos subestaciones tipo interior: receptora y otra transformadora.
- Potencia nominal: 500 kVA.
- Tensiones nominales: 23 kV/440-254 V.
- Línea de alta tensión enlazando las dos subestaciones:
Cable Syntenax, calibre 1/0 AWG.
- Longitud: 16m
- Disposición equilátera, con ductos de 4" (10 cm) de diámetro.
- Factor de potencia en la carga de 0.85 (-).
- $I = 12.55 \angle -31.8^\circ \text{ A}$, $r_{ca} = 0.377 \Omega$

Calcular el % de regulación, considerando el cable como una línea de transmisión corta.

SOLUCION:

1.- Cálculo de la distancia media geométrica. Para realizar este cálculo se toma en cuenta la disposición física siguiente:

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} = \sqrt[3]{(4)^3} = 4 \text{ pulgadas} = 0.333 \text{ pies}$$



2.- Se evalúa la inductancia y reactancia inductiva del cable.

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG} = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{0.333}{0.0113} = 6.797 \times 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

$$x = 2\pi f L = 2\pi(60)(6.797 \times 10^{-4}) = 0.256 \text{ [\Omega/km]}$$

3.- Se calculan la impedancia unitaria y la impedancia total de la línea.

$$z = r + jx = 0.377 + j0.256 = 0.456 \angle 34.2^\circ \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z = zL = (0.456 \angle 34.2^\circ)(0.016) = 0.0073 \angle 34.2^\circ \text{ [\Omega]}$$

4.- Determinación de la tensión en el extremo de envío, utilizando la ecuación V.1, se tiene:

$$V_g = V_r + IZ = 13221 \angle 0^\circ + [(12.55 \angle -31.8^\circ)(0.0073 \angle 34.2^\circ)]$$

$$V_g = 13221 \angle 0^\circ + 0.092 \angle 2.4^\circ$$

$$V_g = 13221.092 \angle 0.004^\circ \text{ [V]}$$

- 5.- Cálculo de la regulación. Para aplicar la ecuación V.2 es necesario observar en el circuito de la figura V.1, que la tensión $|V_0|$ que va a aparecer en el extremo de recepción al desconectar la carga es precisamente la tensión de envío V_g .

Por lo tanto:

$$\% \text{Reg} = \frac{13221.092 - 13221}{13221} \times 100 = 0.0007$$

$$\text{Reg} = 0.0007\%$$

V.2 PÉRDIDAS EN CONDUCTORES.

Los conductores metálicos utilizados en cables de energía, no son conductores perfectos, ya que ofrecen alguna resistencia R al flujo de corriente I . Por esta razón, se presentan pérdidas en el conductor del cable, las cuales son proporcionales a la resistencia y al cuadrado de la corriente circulante, éstas son conocidas como pérdidas " I^2R ". Estas pérdidas normalmente representan la fuente más grande de calor en el cable y pueden ser reducidas limitando la corriente, reduciendo la resistencia, o reduciendo ambas. En un cable de energía con una potencia de transmisión dada, la corriente de carga decrece en tanto la tensión de transmisión se incrementa. La resistencia puede ser reducida usando conductores de mayor sección o empleando circuitos múltiples con 2 o más conductores en paralelo.

En términos de potencia de pérdidas, podemos escribir:

$$P_c = I^2 R_{ca} \times 10^{-3} \text{ [kW/km]} \quad \text{V.3}$$

La corriente I se da en amperes y R_{ca} en Ω/km , esta resistencia efectiva deberá ser calculada a la temperatura de operación del conductor y tomar en cuenta los efectos de piel y proximidad, según las condiciones de instalación y operación.

V.3 PÉRDIDAS DIELECTRICAS.

Un cable aislado desde el punto de vista electrostático es un capacitor, en el que el conductor central y la pantalla son las placas y el aislamiento del cable el dieléctrico del capacitor. Desde el punto de vista electromagnético es un transformador con el conductor como primario y la pantalla trabajando como secundario al cortar las líneas magnéticas producidas por la corriente que transporta el conductor. Este aspecto de los cables se tratará en el tema V.4.

Las características eléctricas de los cables incluyen: la constante dieléctrica también conocida como la capacitancia inductiva específica, el factor de potencia dieléctrico y la rigidez dieléctrica a la frecuencia de tensiones transitorias. Otros parámetros de diseño incluyen características mecánicas tales como flexibilidad y elongación; así como, características físicas y químicas tales como compatibilidad de diferentes materiales y su confiabilidad después de sufrir envejecimiento ante esfuerzos eléctricos y variaciones térmicas.

La constante dieléctrica del aislamiento de un cable se usa para determinar la capacitancia del cable y posteriormente la corriente de carga. La magnitud de la corriente de carga requerida por el cable, que es una función de la tensión de operación y de las dimensiones geométricas del cable, se determina directamente de la capacitancia.

Las pérdidas dieléctricas y el factor de disipación también deben considerarse en el diseño del cable. La corriente tomada por el dieléctrico de un cable tiene dos componentes: la corriente capacitiva I_c y la componente I_g que produce el calentamiento dieléctrico en el aislamiento. Estas dos componentes de corriente se representan vectorialmente y dan lugar a otros dos términos: Factor de disipación o $\tan \delta$ y factor de potencia dieléctrico o $\cos \phi$; los dos valores son prácticamente iguales. Estos términos se utilizan para calificar la calidad de un aislamiento. El efecto de calentamiento de I_g se expresa en Watts de pérdidas por longitud del cable. A altas tensiones de operación el factor de potencia y las pérdidas dieléctricas P_d por fase, resultantes en el aislamiento son de gran importancia y se determinan por la ecuación:

$$P_d = V^2 \omega C \tan \delta \times 10^{-3} \quad [\text{W/m}] \quad \text{V.4}$$

en donde V es la tensión de línea neutro en kV, C es la capacitancia en microfaradios por km y $\tan \delta$ es la tangente de pérdidas y $\omega = 2\pi f$.

EJEMPLO:

Determine las pérdidas dieléctricas, por fase, en un cable monopolar de XLP de 23 kV de un kilómetro de longitud, cuyo diámetro del conductor es de 18 mm y el diámetro externo del aislamiento es de 50 mm, el $\cos \delta$ del aislamiento es igual a 0.002, la constante dieléctrica es igual a 2.3 y la frecuencia 60 Hz. Sabiendo que la resistencia del conductor es igual a 0.096 Ω/km , determine las pérdidas por efecto Joule cuando circule una corriente de 300 A por el cable. Compare este resultado con las pérdidas dieléctricas.

SOLUCION.

La capacitancia del cable:

$$C = \frac{0.02414 SIC}{\log \frac{R}{r}} = \frac{0.02414(2.3)}{\log \frac{25}{9}} = 0.125 \text{ } [\mu\text{F}/\text{km}]$$

Las pérdidas dieléctricas:

$$P_d = \omega C V^2 \tan \delta \times 10^{-3} \text{ } [\text{W}/\text{m}]$$

$$P_d = 2\pi(69)(13.29)^2(0.125)(0.002) \times 10^{-3}$$

$$P_d = 16.6 \text{ } [\text{W}/\text{km}]$$

Las pérdidas por efecto Joule por fase:

$$P_c = RI^2 = 0.096(300)^2 = 8640 \text{ } [\text{W}/\text{km}]$$

Las pérdidas dieléctricas representan de las pérdidas RI^2 :

$$\frac{P_d}{P_c} \times 100 = \frac{16.6}{8640} = 0.192\%$$

V.4 TENSIONES INDUCIDAS EN LAS PANTALLAS.

Los cables monopolares normalmente se construyen con una pantalla concéntrica la que nominalmente está al potencial de tierra. Cuando un cable de este tipo conduce una corriente alterna, se inducen tensiones en la pantalla concéntrica y fluyen corrientes a través de ella, si ésta se conecta de tal forma que se tenga un circuito cerrado, por ejemplo si se conecta a tierra en ambos extremos del cable. Estas corrientes son indeseables debido a que causan pérdidas RI^2 , las que reducen la capacidad de conducción del cable, razón por la que se han desarrollado métodos para interconectar entre sí y a tierra las pantallas de los cables, de tal forma que se eliminen o reduzcan estas corrientes en las pantallas.

Para circuitos con cables monopolares que conducen corrientes en exceso de 500 amperes, es cuando es económicamente deseable utilizar algún método para reducir las pérdidas RI^2 . No está perfectamente definido en que punto es conveniente introducir algún método especial de interconexión de las pantallas. Además de los cables, este debe compararse con el costo de un conductor mayor que compense la reducción en la capacidad de conducción debido a las corrientes circulares con el costo del equipo adicional y el mantenimiento que representa un sistema con interconexiones en las pantallas.

Cualquier conductor "p" que se instale en paralelo con tres conductores que conducen corriente trifásica balanceada tendrán un gradiente de tensión inducido a lo largo de su trayectoria, el que está dado por:

$$E_p = j \omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{S_{1p} S_{3p}}{S_{2p}^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S_{3p}}{S_{1p}} \right] \quad \text{V.5}$$

en donde:

I = Corriente en amperes.

ω = Frecuencia angular.

S_{1p} = Separación entre el conductor p y el conductor de fase número 1.

E_p = Tensión inducida en el cable p, en V/m.

En esta ecuación se considera que la rotación de fases es tal que:

$$I_1 = aI; \quad I_3 = a^2 I; \quad a = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

A medida que aumenta la separación del conductor en paralelo con los cables del circuito trifásico, las tensiones inducidas tienden a cero. Si los tres cables se transponen, las tensiones inducidas en el conductor ρ suman cero en un ciclo completo de transposición.

La tensión inducida en la pantalla de un cable se puede considerar como un caso especial en el que el conductor paralelo es una pantalla a una distancia del conductor que rodea, igual al radio medio de la pantalla. Si no se tiene cercano ningún otro conductor que lleve corriente, las tensiones inducidas en las pantallas (para cualquier arreglo) cuando transportan corrientes balanceadas.

$$E_1 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} \ln \frac{2S_{12}^2}{dS_{13}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right] \quad \text{V.6}$$

$$E_2 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{4S_{12}S_{23}}{d^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{S_{23}}{S_{12}} \right] \quad \text{V.7}$$

$$E_3 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} \ln \frac{2S_{23}^2}{dS_{13}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right] \quad \text{V.8}$$

en donde:

d = diámetro de la pantalla.

S_{12} = Distancia entre el conductor 1 y el 2.

Para la configuración en triángulo en donde la separación entre ellos es la misma o sea: $S_{12} = S_{23} = S_{13}$, estas ecuaciones se reducen a:

$$E_1 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \frac{2S}{d} \quad \text{V.9}$$

$$E_2 = j\omega I 2(10)^{-7} \ln \frac{2S}{d} \quad \text{V.10}$$

$$E_3 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \frac{2S}{d} \quad \text{V.11}$$

Para el arreglo en línea, en el que la separación entre cables adyacentes es igual a S , las tensiones inducidas son:

$$E_1 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} \ln \frac{S}{d} + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4S}{d} \right] \quad \text{V.12}$$

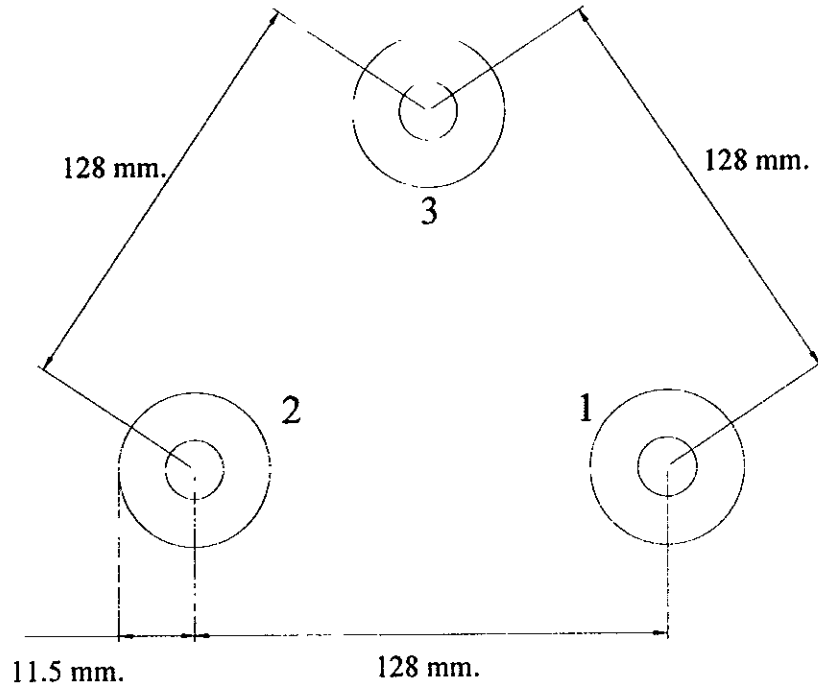
$$E_2 = j\omega I 2(10)^{-7} \ln \frac{2S}{d} \quad \text{V.13}$$

$$E_3 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} \ln \frac{S}{d} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4S}{d} \right] \quad \text{V.14}$$

En estas ecuaciones las tensiones inducidas E_1 , E_2 , E_3 están dadas en V/m.

Ejemplo:

Tres cables monopolares de pantalla de plomo, conducen una corriente trifásica de 300 A por fase. Calcule la tensión inducida en cada pantalla, cuando los cables están instalados en un arreglo en triángulo tal como se muestra en la figura. La longitud del circuito es de un kilómetro y la frecuencia de operación es de 60 Hz. Considere que la pantalla está aterrizada en un sólo punto, al inicio del circuito.



Solución:

La tensión inducida en la pantalla del cable 1:

$$E_1 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \frac{2S}{d}$$

$$E_1 = j6.28(60)(300)(2)(-0.5 + j0.86) \ln \frac{(2)(128)}{23} 10^{-7}$$

$$E_1 = 54.4 \angle 210^\circ \text{ [V/km]}$$

La tensión inducida en la pantalla del cable 2.

$$E_2 = j\omega I 2(10)^{-7} \ln \frac{2S}{d}$$

$$E_2 = 54.4 \angle 90^\circ \text{ [V/km]}$$

La tensión inducida en la pantalla del cable 3.

$$E_3 = j\omega I 2(10)^{-7} \left[\begin{array}{c} -1 \\ 2 \end{array} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \frac{2S}{d}$$

$$E_3 = 54.4 \angle -30^\circ \text{ [V/km]}$$

V.5 AMPACIDAD.

La capacidad de conducción de corriente (ampacidad) de un cable de energía, depende principalmente de la temperatura que pueda soportar su aislamiento y pantallas semiconductoras del cable, la resistencia del medio que rodea al cable y la temperatura del medio ambiente. La corriente que circula por un conductor genera calor, el que se disipa a través de su aislamiento, pantallas, cubierta protectora y la tierra que lo circunda. Cuando el calor generado es igual al calor disipado, se establece un equilibrio, diciéndose que el sistema es "estable", si el calor generado es mayor que el calor disipado, se dice entonces que el sistema es "inestable" y esto puede originar que el aislamiento envejezca prematuramente y falle.

El mecanismo de flujo de calor para el caso de un cable monopolar se puede efectuar mediante un circuito térmico equivalente, el conductor de cobre está conectado a un polo de la fuente de calor, la superficie de la tierra representa al otro polo, de tal forma que la diferencia de temperatura (análoga a la fuerza electromotriz de un circuito eléctrico) está dada por la diferencia entre la temperatura del conductor y la del medio ambiente. El calor fluye a través del aislamiento del cable (R_{ais}), de la pantalla semiconductor sobre el aislamiento (R_p), de la cubierta protectora (R_c), y de la resistencia térmica del suelo (R_s).

De acuerdo con lo anterior, el calor generado es igual al producto del cuadrado de la corriente que circula por el cable, por la resistencia óhmica por cm de longitud del conductor de cobre, a la temperatura de operación, y por el

número de cables considerado; lo que matemáticamente puede expresarse con la expresión siguiente:

$$C_g = I^2 R_{c0} \quad \text{V.15}$$

en donde:

C_g = Calor generado (W/cm).

I = Corriente que conduce el cable (A).

R_{c0} = Resistencia a la temperatura máxima de operación del conductor (Ω/cm).

El calor disipado lo podemos encontrar con la relación siguiente:

$$C_d = \frac{\theta}{R_t} \text{ W/cm} \quad \text{V.16}$$

en donde:

C_d = Calor disipado (W/cm).

θ = Diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

R_t = Resistencia térmica total ($^{\circ}\text{C} - \text{cm}/\text{W}$).

Al considerar que se le alcanza un nivel de estabilidad cuando el calor disipado es igual al calor generado, tendremos:

$$I^2 R = \frac{\theta}{R_t} \quad \text{V.17}$$

la corriente que puede conducir el cable, será:

$$I = \left[\frac{\theta}{R_{c0} R_t} \right]^{1/2} \quad \text{V.18}$$

Como se mencionó anteriormente, el elemento que influye para limitar la elevación de temperatura, es el circuito térmico que rodea al conductor, ya que el calor generado debe ser disipado a través de éste. En este curso se analizarán los cables que están directamente enterrados y los instalados en ductos.

V.5.1. Ampacidad de cables directamente enterrados.

Los cálculos de capacidad de conducción (ampacidad) para un cable instalado directamente enterrado, se basan en el hecho de que las pérdidas caloríficas debidas a las corrientes, se disipan finalmente en la atmósfera, lo que significa que tienen que superar la resistencia térmica del cable y del suelo así como la resistencia térmica de transición en la superficie del suelo. Para simplificar el problema se considera que la resistividad térmica del suelo y la temperatura ambiente son constantes y que la resistencia térmica de transición en la superficie del suelo es tan pequeña que se puede despreciar.

La capacidad de conducción de un cable de energía, instalado directamente enterrado se puede determinar con la siguiente ecuación, la que es similar a la anterior con la salvedad de que se ha sustituido el valor de θ .

$$I = \left[\frac{T_c - T_a - T_d}{R_{c0} R_t} \right]^{1/2}$$

en donde:

- I = Corriente del cable (A).
- T_c = Temperatura permisible de operación del cable ($^{\circ}\text{C}$).
- T_d = Elevación de temperatura debida a las pérdidas dieléctricas ($^{\circ}\text{C}$).
- T_a = Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).
- R_{c0} = Resistencia del conductor (Ω/cm).
- R_t = Resistencia térmica total del circuito, que es igual a la suma de las resistencias térmicas del aislamiento, pantallas y cubierta del cable y la resistencia térmica del suelo. O sea:

$$R_t = R_{ais} + R_p + R_c + R_s \quad [\Omega\text{-cm/W}]$$

Substituyendo el valor de R_t en la ecuación anterior:

$$I = \left[\frac{T_c - T_a - T_d}{R_{c0} (R_{ais} + R_p + R_c + R_s)} \right]^{1/2} \quad \text{V.19}$$

en donde:

- R_{ais} = Resistencia térmica del aislamiento ($^{\circ}\text{C} - \text{cm/W}$).
- R_p = La suma de las resistencias térmicas de las pantallas ($^{\circ}\text{C} - \text{cm/W}$).

R_c = Resistencia térmica de la cubierta ($^{\circ}\text{C} - \text{cm}/\text{W}$).

R_s = Resistencia térmica del suelo ($^{\circ}\text{C} - \text{cm}/\text{W}$).

El valor de las resistencias térmicas, R_{ais} , R_p y R_c , se puede encontrar con la relación siguiente:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad \text{V.20}$$

en donde:

ρ = Resistividad térmica del material aislante ($^{\circ}\text{C} - \text{cm}/\text{W}$).

Ver Tabla V.1.

D = Diámetro sobre el material aislante (cm).

d = Diámetro del conductor (cm).

Para el cálculo de la resistencia térmica del suelo, se puede utilizar la expresión siguiente:

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{4h}{D} \quad \text{V.21}$$

en donde:

ρ_s = Resistividad térmica del suelo ($^{\circ}\text{C} - \text{cm}/\text{W}$), entre 80 y 130.

h = Profundidad del cable (cm).

D = Diámetro exterior del cable (cm).

Para efectos prácticos, se puede despreciar la resistencia térmica de las pantallas semiconductoras (R_p) y la resistencia térmica de la cubierta (R_c), debido a que las pérdidas en éstas representan un valor pequeño y el grado de error que se comete es mínimo, asimismo podemos despreciar la temperatura por pérdidas dieléctricas (T_d), quedando la expresión V.19, como sigue:

$$I = \left[\frac{T_c - T_a}{(R_{\text{ais}} + R_c) R_{c0}} \right]^{1/2} \quad \text{V.22}$$

La ecuación anterior nos permite calcular la ampacidad de un cable de energía, cuando éste se opera con una corriente constante, es decir, cuando el factor de Carga (F.C.), es igual al 100%.

Tabla V.1 Resistividad térmica de los materiales aislantes.

MATERIAL	RESISTIVIDAD ρ (°C-CM/W)
Papel	600
Polietileno (*)	350
XLPE	350
EPR	500
PVC	600

NOTA IMPORTANTE: (*) Para cálculos más exactos de la ampacidad, se puede considerar la resistividad del polietileno como la resistividad de las pantallas semiconductoras, aunque éstas no son exactamente materiales aislantes.

Cuando los circuitos de distribución que se emplean en el sistema de distribución son trifásicos, la ecuación anterior sólo permite calcular la capacidad de conducción para un cable monopolar, es entonces necesario emplear una expresión que permita determinar "I" en función de las condiciones impuestas para circuitos de "n" cables. Esto se logra aplicando la ecuación anterior con la salvedad de que se modifica la resistencia térmica del suelo R_s en función de las separaciones entre los cables y de su profundidad de instalación.

De acuerdo con lo anterior el nuevo valor de la resistencia térmica del suelo R_{s1} se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R_{s1} = R_s + \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad \text{V.23}$$

en la ecuación anterior B_{ij} es función del número de cables, de su separación y de la profundidad a la que estén enterrados. Esta sumatoria representa un incremento de la resistencia térmica del suelo R_{s1} y por lo tanto también se expresa en °C-cm/W. El valor de B_{ij} se determina con la siguiente ecuación:

$$B_{ij} = \frac{\rho_v}{2\Pi} \ln \left[1 + \frac{2h}{x_{ij}} \right] \quad \text{V.24}$$

en donde X_{ij} es separación (cm), entre el cable "y" y el cable "j", y "h" la profundidad (cm) de los cables. Para aplicar la ecuación anterior a un cable "y" del circuito en cuestión se mantiene constante la "i", y la "j" se varía de 1,2,3, a "n" cables del circuito, a medida que se calculan las diferentes B_{ij} . A continuación se explican los pasos necesarios para calcular la resistencia térmica R_{s1} , en un caso particular:

- a) Calcule la resistencia térmica del suelo R_s (ecuación V.21).
- b) Calcule B_{ij} para cada uno de los cables con la ecuación V.24.
En cada caso X_{ij} es la distancia entre centros del cable "y" y el cable "j".
- c) Sume los diferentes valores de B_{ij} obtenidos en el paso "b" y agréguele el valor de R_s . obtenido en al paso "a". Esto da el valor de R_{s1} para el cable 1.
- d) Repita los pasos a,b,c para el cable 2, (i=2). Esto da el valor de R_{s1} para este cable.
- e) Repita los pasos a,b,c para cada uno de los otros cables, para obtener su R_{s1} correspondiente.

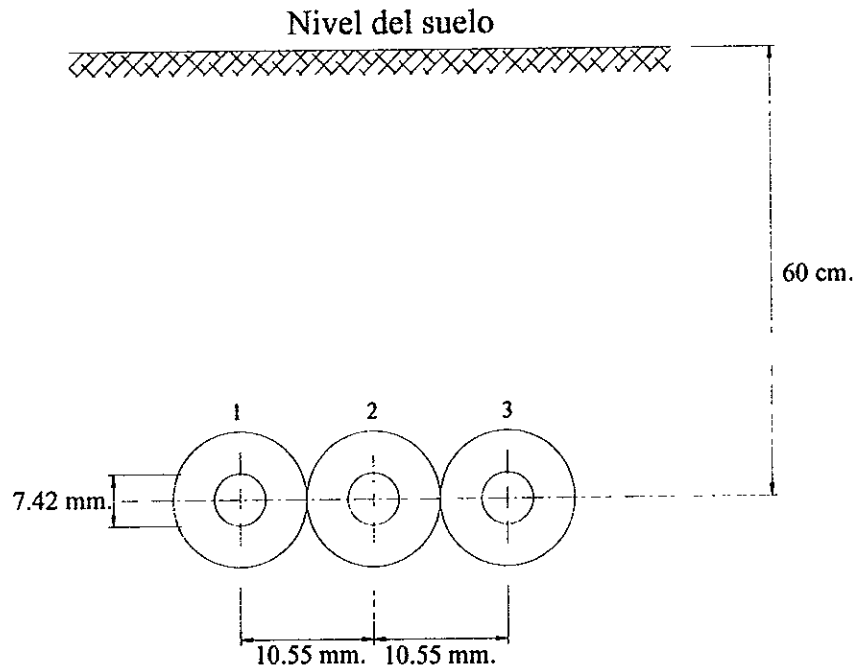
Si todos los cables son similares y conducen la misma corriente, el cable localizado en el centro del circuito tendrá el más alto valor de resistencia R_{s1} . Esta es la razón por la cual no es absolutamente necesario calcular la capacidad de conducción de todos los cables (en circuitos balanceados), sino únicamente la del caso más crítico.

Cuando los cables no conduzcan la misma corriente, el valor de B_{ij} para el cable "i" debe multiplicarse por la relación: pérdidas en el cable j/pérdidas en el cable "i", al efectuar el cálculo de R_{s1} para el cable "i" se deben emplear relaciones similares cuando se calcula R_{s1} para cada uno de los otros cables que componen el circuito.

Ejemplo:

Determine la capacidad de corriente de los cables de energía de 25 kV, con aislamiento XLPE, directamente enterrados como se muestra en la figura, los cables son de 35 mm², tienen una resistencia óhmica de 0.666 Ω/km, y un diámetro de 7.42 mm.

La resistividad del suelo es de 120 °C-cm/W y la del aislamiento de los cables de 350 °C-cm/W. La temperatura ambiente es de 30 °C y la máxima temperatura de operación del cable bajo condiciones normales, de 90 °C.



Solución:

La resistencia térmica del aislamiento del cable, se calcula con la ecuación V.20, teniendo así:

$$R_{ais} = \frac{\rho_{ais}}{2\pi} \ln \frac{D}{d} = \frac{350}{6.28} \ln \frac{10.55}{7.42} = 19.6 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica del suelo R_s para los cables 1,2,3 se puede calcular con la ecuación V.21, donde tenemos:

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{4h}{D} = \frac{120}{6.28} \ln \frac{240}{1.055} = 103.65 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

Ahora calcularemos los valores de B_{ij} , utilizando la ecuación V.24:

$$B_{12} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{120}{1.055} \right] = \frac{120}{6.28} \ln 114 = 90.58 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

$$B_{23} = B_{12} = 90.58 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

$$B_{13} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{120}{2.11} \right] = \frac{120}{6.28} \ln 57.87 = 77.5 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

El nuevo valor de la resistencia térmica del suelo para los cables 1, 2 y 3:

$$R_{s1} = 103.7 + 90.58 + 77.50 = 271.78 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

$$R_{s1} = 103.7 + 90.58 + 90.58 = 284.86 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

$$R_{s1} = 103.7 + 90.58 + 77.50 = 271.78 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

Ahora para encontrar la corriente nominal de cada cable, utilizaremos la ecuación V.22:

$$I_1 = \left[\frac{60 (10)^5}{0.666 (271.78 + 19.6)} \right]^{1/2} = 176 \text{ [A]}$$

$$I_2 = \left[\frac{60 (10)^5}{0.666 (284.86 + 19.6)} \right]^{1/2} = 172 \text{ [A]}$$

$$I_3 = I_1 = 176 \text{ [A]}$$

La corriente nominal del circuito que se tomará, es igual a 172 amperes.

V.5.2. Ampacidad de cables instalados en ductos.

Los cálculos de capacidad de conducción para cables instalados en ductos, son un poco diferentes de los que se efectúan para cables directamente enterrados en el suelo. La diferencia estriba en el cálculo de la resistencia térmica del ducto, ya que al introducir éste, las condiciones del circuito térmico cambian. La resistencia térmica del ducto consiste en tres partes:

- 1 La resistencia térmica del aire entre la superficie externa del cable y la superficie interna del ducto (R_{air}).
- 2 La resistencia térmica del ducto (R_d).
- 3 La resistencia térmica externa al ducto (R_e).

La resistencia total del banco de ductos es igual a la suma de las tres.

$$R_s = R_{air} + R_d + R_e \quad \text{V.25}$$

- Resistencia del aire (R_{air}).

Para cables cuyo diámetro fluctúa entre 2.5 y 10 cm se puede emplear la siguiente fórmula para calcular la resistencia del aire.

$$R_{air} = \frac{100 A}{1 + (B + C \theta_m) D_e} \quad [\text{°C-cm/W}] \quad \text{V.26}$$

en donde A, B y C son constantes que dependen de la instalación y están dadas en la Tabla V.2.

D_e = diámetro exterior del cable (cm)

θ_m = temperatura del medio que se tiene entre el cable y el ducto (°C).

INSTALACIÓN	A	B	C
Conduit metálico.	5.2	1.4	0.011
Ducto de fibra en aire.	5.2	0.83	0.006
Ducto de fibra en concreto.	5.2	0.91	0.010
Ducto asbesto cemento en aire.	5.2	1.2	0.006
Ducto asbesto cemento en concreto.	5.2	1.1	0.011

Tabla V.2.- Valores de las constantes A, B y C.

- Resistencia térmica del ducto (R_d).

La resistencia térmica del ducto R_d se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$R_d = 0.366 \rho_d \log \frac{D_o}{D_i} \quad [^{\circ}\text{C-cm/W}] \quad \text{V.27}$$

en donde:

D_o = Diámetro externo del ducto (cm).

D_i = Diámetro interno del ducto (cm).

ρ_d = Resistividad térmica del material del ducto en $^{\circ}\text{C-cm/W}$, para ductos metálicos se puede tomar igual a cero, para asbesto cemento 200, para concreto 85 y para PVC 600.

- Resistencia térmica externa al ducto (R_e).

Esta resistencia está formada por la resistencia del suelo R_s más una resistencia R_e que toma en cuenta el efecto térmico de la masa de los ductos.

La resistencia R_s del suelo para el caso de varios cables instalados en un banco de ductos (incluyendo los efectos mutuos de calentamiento) está dada por:

$$R_s = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\frac{d_{ab'}}{d_{ab}} \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} \dots \frac{d_{an'}}{d_{an}} \right] \right\} \quad \text{V.28}$$

en donde:

ρ_T = Resistividad térmica del material en que están embebidos los ductos ($^{\circ}\text{C-cm/W}$).

$u = L/r_e$.

L = Profundidad del cable más caliente (cm).

r_e = Radio externo de un cable (cm).

las distancias $d_{ab'}$, $d_{ac'}$, d_{ab} , etc. son las separaciones entre conductores reales y entre conductores reales e imaginarios. Ver figura V.2. Para relaciones de $L/r_e \geq 10$ ($u \geq 10$) se puede emplear la ecuación siguiente:

$$R_s = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left\{ 2u \left[\frac{d_{ab'}}{d_{ab}} \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} \dots \frac{d_{an'}}{d_{an}} \right] \right\} \quad \text{V.29}$$

La resistencia externa R'_e , está dada por la ecuación siguiente:

$$R'_e = 0.366 N (\rho_s - \rho_c) \log 2u_b \quad \text{V.30}$$

en donde:

N = Número de cables en el banco de ductos.

ρ_s = Resistividad térmica del suelo alrededor del banco de ductos ($^{\circ}\text{C}\text{-cm/W}$).

ρ_c = Resistividad térmica del concreto ($^{\circ}\text{C}\text{-cm/W}$).

$u_b = L_g/r_b$

L_g = Profundidad al centro del banco de ductos (cm).

r_b = Radio equivalente del banco de concreto (cm) y se puede encontrar con la expresión siguiente:

$$\log r_b = \frac{x}{2y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \log \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \log \frac{x}{2} \quad \text{V.31}$$

en donde x y y son los lados (ancho y largo) del banco de ductos, sin importar su posición.

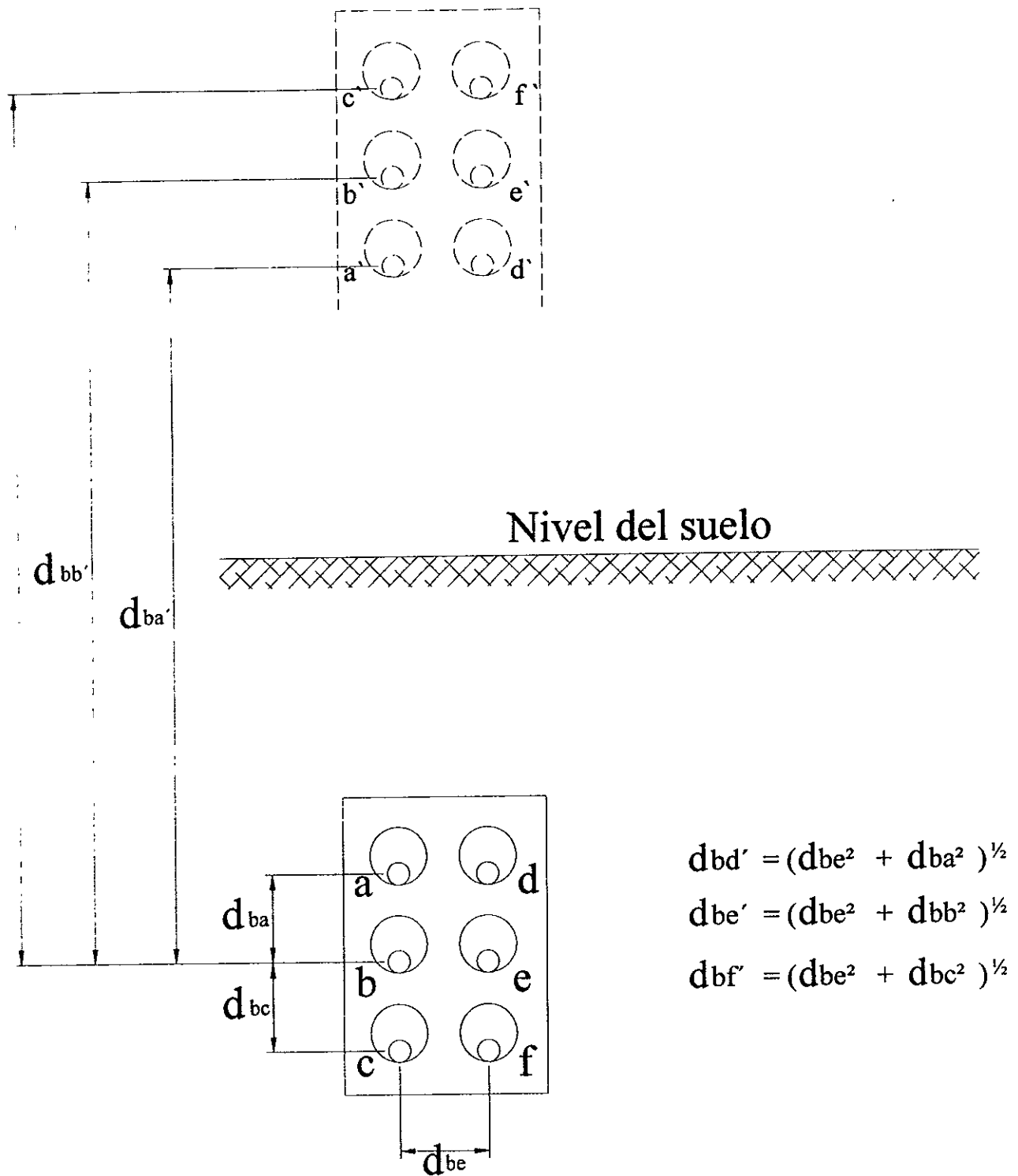


Figura V.2 Separación entre conductores reales y entre conductores reales e imaginarios.

Ejemplo:

En la siguiente figura se muestra el arreglo de tres cables de 25 kV, de aislamiento de polietileno de cadena cruzada y cubierta de PVC, en ductos de asbesto cemento embebidos en un banco de concreto. Determine la capacidad de conducción del circuito considerando que la temperatura ambiente máxima es igual a 35°C, la temperatura máxima de operación del cable es de 90°C y la temperatura media del aire en el ducto es de 40°C. Los detalles del cable y ductos son:

Area del conductor (una fase) = 53.5 mm² (1/0 AWG).

Resistencia en c.a. del conductor = 0.429 Ω/km (90°C).

Diámetro del conductor = 0.87 cm.

Diámetro externo del aislamiento = 3.1 cm.

Diámetro externo de la cubierta = 3.7 cm.

Resistividad térmica del suelo = 120°C-cm/W.

Resistividad térmica del XLP = 350 °C-cm/W.

Resistividad térmica de la cubierta PVC = 700 °C-cm/W.

Resistividad térmica del asbesto cemento = 200 °C-cm/W.

Resistividad térmica del concreto = 85 °C-cm/W.

Diámetro interno del ducto = 10.6 cm.

Diámetro externo del ducto = 12 cm.

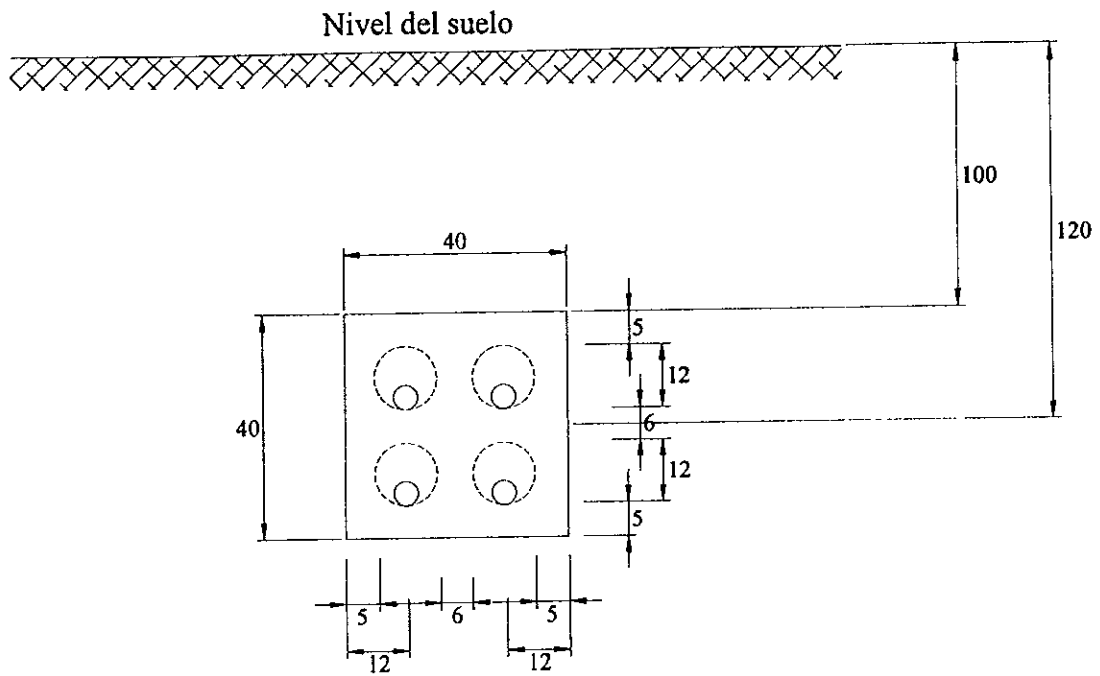
X (ancho del banco de ductos) = 40 cm.

Y (largo del banco de ductos) = 40 cm.

Separación entre centros de ductos = 18 cm.

Profundidad al centro del banco = 120 cm.

Disposición del banco de ductos y cables:



Solución:

La resistencia térmica del aislamiento, se puede calcular con la ecuación V.20:

$$R_{ais} = \frac{350}{2\pi} \ln \frac{3.1}{0.87} = 70.78 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica de la cubierta protectora, será:

$$R_c = \frac{700}{2\pi} \ln \frac{3.7}{3.1} = 19.71 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica de la superficie externa del cable a la pared interna del ducto:

$$R_{air} = \frac{100 A}{1 + (B + C\theta_m) D_e}$$

De la Tabla V.2, tendremos:

$A = 5.2$, $B = 1.1$ y $C = 0.011$; de los datos del problema $\theta_m = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$R_{air} = \frac{100(5.2)}{1 + [1.1 + 40(0.011)] 3.7} = 77.63 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica del ducto, será:

$$R_d = 0.366 \rho_d \log \frac{D_o}{D_d}$$

$$= 0.366(200) \log \frac{12}{10.6} = 3.94 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica externa al ducto:

Considerando que los ductos están en un medio homogéneo de $\rho_c = 85$ $^\circ\text{C-cm/W}$. La resistencia térmica del cable que recibe más calor (incluyendo efectos mutuos de calentamiento):

$$R_v = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left\{ 2u \left[\frac{d_{ab'}}{d_{ab}} \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} \right] \right\}$$

de la figura: $d_{ab} = 18$ cm; $d_{ac} = 18$ cm; $d_{ab'} = 270.6$ cm;

$$d_{ac'} = 252 \text{ cm; } u = L/r_e = 135/1.85 = 73$$

$$R_v = \frac{85}{2} \ln \left[146 \left(\frac{270.6}{18} \right) \left(\frac{252}{18} \right) \right] = 139.85 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

el valor de r_b :

$$\log r_b = \frac{x}{2y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \log \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \log \frac{x}{2}$$

$$\log r_b = \frac{40}{80} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) \log(1+1) + \log 20 = 1.34$$

$$\therefore r_b = 22 \text{ [cm]}$$

La resistencia térmica externa R_e' , será:

$$R_e' = 0.366 N (\rho_s - \rho_c) \log 2u_b$$

$$R_e' = 0.366(3)(120 - 85) \log \frac{2(120)}{22}$$

$$R'_e = 40 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La resistencia térmica del circuito:

$$R_T = R_{ais} + R_c + R_{arr} + R_d + R_s + R'_e$$

$$R_T = 70.81 + 19.72 + 77.63 + 3.94 + 139.85 + 40$$

$$R_T = 351.95 \text{ [}^\circ\text{C-cm/W]}$$

La capacidad de conducción del cable, se encuentra utilizando la ecuación V.22, despreciando la temperatura por pérdidas dieléctricas (T_d).

$$I = \left[\frac{(90 - 35)10^5}{0.429(351.95)} \right]^{1/2} = 190 \text{ [A]}$$

V.6 ANALISIS DE CORTO CIRCUITO EN CABLES AISLADOS.

Cuando ocurre una falla de aislamiento, se produce una alta corriente de corto circuito que fluye de la fuente al punto en que el aislamiento se ha degradado. Bajo estas condiciones casi toda la energía debe aparecer como calor en los conductores y debido al corto tiempo en que se tiene la falla (si es que se tiene un medio de protección como fusibles o interruptores que aislen la falla), se puede considerar que el total del calor generado es absorbido por el conductor.

Para prevenir daño al aislamiento ante corrientes de corto circuito, se han aplicado los siguientes límites de temperatura:

Para aislamiento de papel: 160°C

Para aislamiento termofijos (XLPE, EPR): 250 °C.

Para aislamiento de Cloruro de Polivinilo (PVC): 150 °C.

Para pantallas de plomo la temperatura de corto circuito se ha limitado a 250 °C. En la práctica es muy raro que se encuentren cables dañados en los que la falla se pueda atribuir a los efectos de las corrientes de corto circuito, esto se puede deber a varias causas:

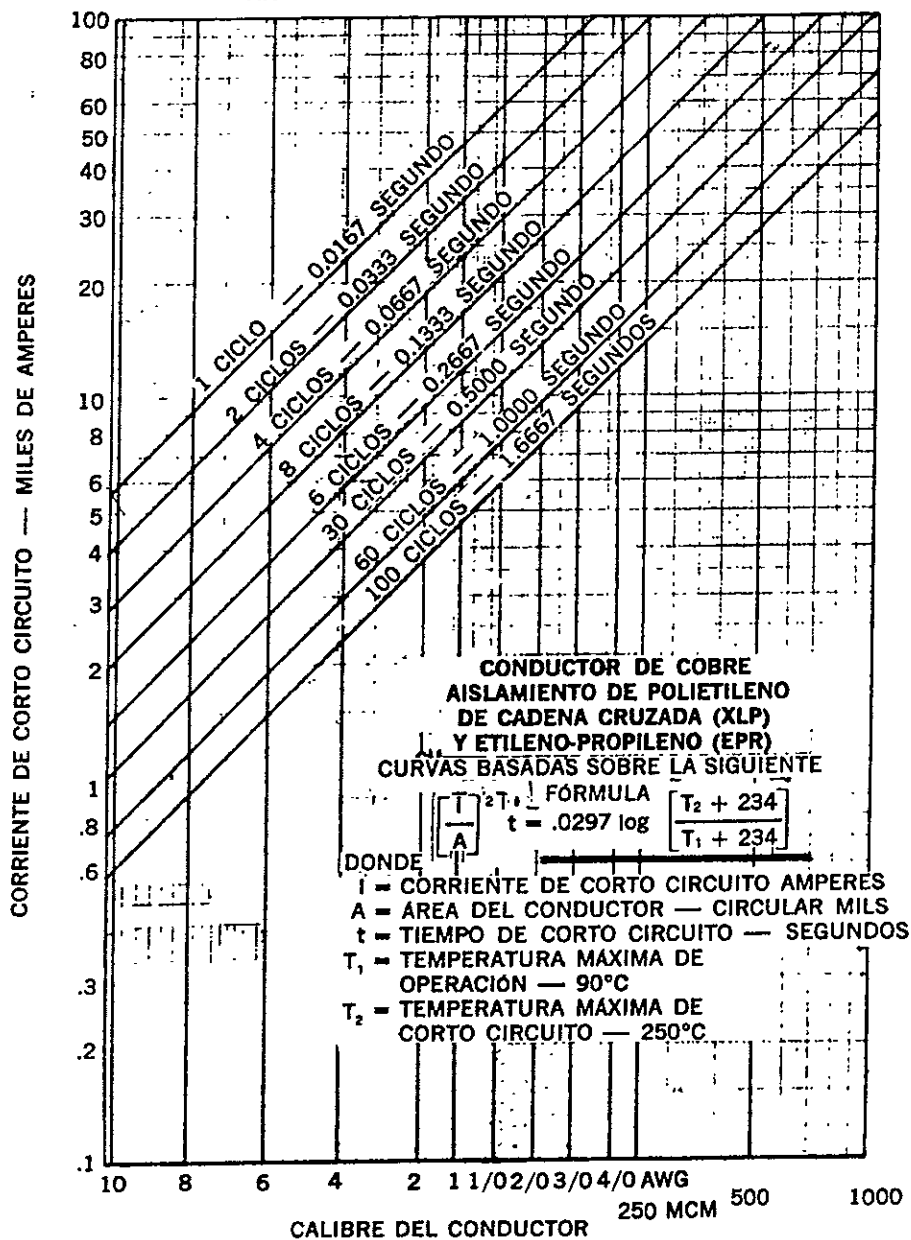
- 1.- Los niveles de corto circuito son menores que los que puede soportar el cable.
- 2.- La rápida operación de los equipos de protección que limitan el tiempo de falla a valores bajos.

- 3.- La mayoría de las fallas son de fase a tierra (como se sabe, ésta difícilmente es la condición más desfavorable).
- 4.- La instalación premeditada de impedancias en el neutro de la instalación para disminuir las corrientes de falla.
- 5.- La ocurrencia de fallas con arco.
- 6.- Una baja temperatura de operación del cable cuando ocurre la falla.

En la práctica es muy difícil decir qué situación es más peligrosa, una alta corriente de corto circuito que se elimina en un corto tiempo a una sobrecarga que se interrumpe en un tiempo mayor de 10 segundos. Ante esta situación el calibre del cable debe ser lo suficientemente grande para conducir la sobrecorriente (por corto circuito o sobrecarga) durante un tiempo tal que permita la operación del fusible, y el aislamiento no alcance una temperatura que lo dañe térmicamente. La determinación de los límites térmicos se basa en la magnitud de la corriente y en el tiempo durante el cual fluye por el cable.

Para la condición de altas corrientes de corto circuito, la capacidad térmica del aislamiento se evalúa bajo la consideración de que el intervalo de tiempo no excede de 10 segundos, quedando el calor generado contenido dentro del conductor, sin que se libere por conducción o radiación. Para la condición de bajas corrientes de corto circuito o sobrecarga, los intervalos de tiempo que se deben tomar, son mayores de 10 segundos.

CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTOR DE COBRE



Calibre del conductor

Figura V.3 Corriente de corto circuito permisible para cables aislados con conductor de cobre.

Durante muchos años han existido curvas de daño de los cables que permiten determinar su capacidad térmica ante corrientes de corto circuito. En estas curvas, cada una representa el tiempo máximo que soportan los diferentes calibres de los cables, ver figura V.3. Estas curvas son proporcionadas por los fabricantes y son las que en la mayoría de los casos se usan para determinar el comportamiento térmico de los cables en función de las corrientes de corto circuito. La dificultad de aplicar este método para seleccionar el calibre correcto, estriba en que es necesario verificar el calibre del cable para cada valor de la corriente de corto circuito y del tiempo correspondiente.

Un método alternativo de análisis da lugar a otra familia de curvas, cuando se grafican en el mismo papel logarítmico las curvas de daño de los cables en el que se graficaron las curvas características tiempo-corriente de los fusibles. Usando ecuaciones para diferentes calibres, materiales de conductores y aislamientos se pueden obtener curvas de daños para cables de energía, las que representan una forma diferente en el estudio de coordinaciones térmicas de los cables y fusibles ante corrientes de corto circuito.

A continuación se muestran las consideraciones técnicas que se deben seguir para deducir las ecuaciones que permiten determinar las curvas de daño térmico de cables aislados ante una corriente de corto circuito.

Se considera que la resistencia de un conductor varía en forma lineal con el cambio de temperatura, como se muestra en la figura V.4 siguiente:

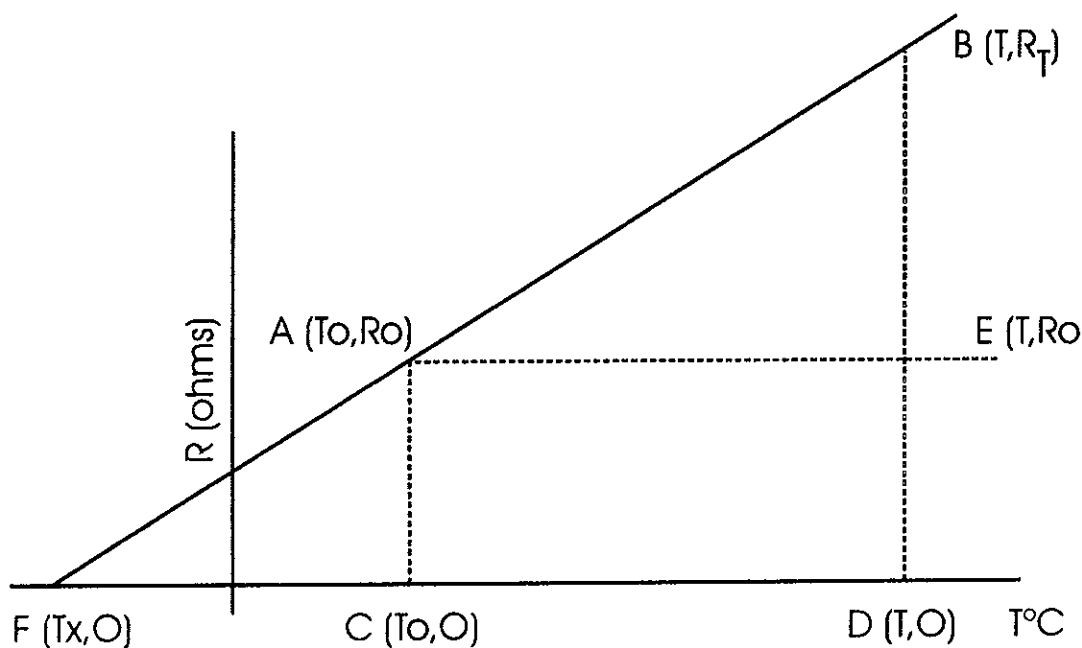


Figura V.4 Variación de la resistencia de un conductor con respecto a la temperatura

De los triángulos semejantes AFC y FDB se tiene:

$$\frac{R_T}{R_0} = \frac{T - T_x}{T_0 - T_x} \quad \text{V.32}$$

en donde "R₀" es la resistencia del conductor a la temperatura ambiente "T₀" (generalmente igual a 20 °C), "R_T" es la resistencia del conductor a la temperatura "T" (que es menor que la máxima temperatura de operación), "T_x" es la temperatura que se tiene para "R" igual a cero. Para conductores de cobre T_x = -234 °C y para conductores de aluminio es igual a -228 °C.

Despejando a R_T de la ecuación V.32, tendremos:

$$R_T = R_0 \frac{T - T_x}{T_0 - T_x} \quad \text{V.33}$$

Haciendo la siguiente consideración:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha_{20} \Delta T) \quad \text{V.34}$$

en donde α_{20} = coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura:

$$\alpha_{20} = \frac{1}{T_0 - T_x} \quad \text{V.35}$$

$$\Delta T = T - T_0$$

Si consideramos que T₁ es la temperatura de operación del conductor y T₂ es la temperatura de corto circuito del cable, para el caso de un cable con conductor de cobre, tendremos:

$$R_2 = R_1 \frac{T_2 + 234}{T_1 + 234} \quad \text{V.36}$$

para conductores de aluminio:

$$R_2 = R_1 \frac{T_2 + 228}{T_1 + 228} \quad \text{V.37}$$

Por otra parte, sabemos que la resistencia de un conductor, viene dada por las expresiones siguientes:

$$R_T = \rho_T \frac{L}{A} \quad \text{V.38}$$

$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{A} \quad \text{V.39}$$

en donde R_T y R_0 (Ω), son las resistencias del conductor a las temperaturas T °C y 0 °C respectivamente, ρ_T y ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$) son las resistividades específicas del conductor a T °C y 0 °C respectivamente, L (m) es la longitud del conductor y A (m^2) es el área de la sección transversal del conductor. haciendo la relación R_T/R_0 , tendremos:

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha_{20} \Delta T) \quad \text{V.40}$$

La deducción de la ecuación que permite determinar la capacidad térmica de un cable ante corrientes de corto circuito, se basa en la consideración de que la corriente de corto circuito fluye durante un tiempo muy corto, y por tanto el calor generado queda contenido dentro del conductor, despreciándose la cantidad de calor liberada por conducción o radiación. La fórmula se obtiene al igualar el calor generado por las pérdidas RI^2 con el calor almacenado en el conductor " $m\Delta T$ ", durante el tiempo Δt , así:

$$R_T I^2 \Delta t = mc\Delta T \quad \text{V.41}$$

en donde R_T es la resistencia del cable en Ohms, " I " es la corriente en Amperes, " Δt " es el tiempo que fluye la corriente de corto circuito (en segundos), m es la masa del conductor del cable (en kg), " c " es el calor específico del conductor ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$) y ΔT ($^\circ\text{C}$) es la elevación de temperatura del conductor durante el tiempo de falla. De acuerdo con la definición de peso específico, tendremos:

$$p = \frac{m}{AL} \quad \text{V.42}$$

en donde " p " es el peso específico del material del conductor (kg/m^3), " L " es la longitud del conductor (m) y " A " es el área de la sección transversal del conductor (m^2).

Al sustituir el valor de " m " en la ecuación V.41, se tendrá:

$$R_T I^2 \Delta t = ALpc\Delta T \quad \text{V.43}$$

Al sustituir el valor de R_T de la ecuación V.38 en V.43, tendremos:

$$\rho_T \left(\frac{I}{A} \right)^2 \Delta t = pc \Delta T \quad \text{V.44}$$

Al sustituir el valor ρ_T de la ecuación V.40 en la ecuación V.44, se tiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\left(\frac{I}{A} \right)^2 dt = \frac{pc}{\rho_0} \frac{dT}{1 + \alpha_{20}(T - T_0)} \quad \text{V.45}$$

Sustituyendo el valor de α_{20} de la ecuación V.35 en la ecuación anterior, se tendrá:

$$\left(\frac{I}{A} \right)^2 dt = \frac{pc}{\rho_0} \frac{dT}{1 + \frac{T - T_0}{T_0 - T_x}} \quad \text{V.46}$$

$$\left(\frac{I}{A} \right)^2 dt = \frac{pc}{\rho_0} \frac{T_0 - T_x}{T - T_x} dT \quad \text{V.47}$$

Al integrar la expresión anterior, tendremos:

$$\left(\frac{I}{A} \right)^2 t = \frac{pc}{\rho_0} (T_0 - T_x) \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T - T_x} \quad \text{V.48}$$

$$\left(\frac{I}{A} \right)^2 t = \frac{pc}{\rho_0} (T_0 - T_x) \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.49}$$

La ecuación anterior permite determinar la capacidad térmica de cables aislados ante corrientes de corto circuito. De esta ecuación se puede deducir que el calor de los cables aislados no depende de su longitud. Para evitar daño térmico indeseable a los aislamientos de los cables, es necesario diseñar los sistemas de protección y seleccionar los cables de tal forma que los límites térmicos no se vean excedidos al calcularlos con ecuación V.49.

En la Tabla V.3 se muestran valores de las características físicas de los elementos conductores más empleados en la fabricación de cables aislados.

Material	P (g/cm ³)	C (cal/g°C)	ρ ₀ (μΩ-cm)	T _x (°C)
Cobre	8.89	0.092	1.724	-234
Aluminio	2.703	0.214	2.826	-228

Tabla V.3 de características de los elementos conductores.

Para los aislamientos XLPE y EPR, considerar T₁ = 90°C T₂ = 250°C.

La ecuación V.49 está escrita en una forma muy general y para aplicarla se debe escribir en una forma que sea consistente con el sistema de unidades en que se está trabajando, así cuando la sección del conductor está dada en circular mils (CM), la corriente en Amperes, la densidad en g/cm³, el tiempo en segundos y el calor específico en cal/g-°C, una expresión más simplificada es:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 1.077 (10)^{-4} \frac{pc}{\rho_0} (T_0 - T_x) \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.50}$$

sustituyendo los datos dados en la Tabla V.3 para el cobre, se tiene:

$$p = 8.89 \text{ g/cm}^3$$

$$c = 0.092 \text{ cal/g-}^\circ\text{C}$$

$$\rho_0 = 1.724 \text{ } \mu\Omega\text{-cm}$$

$$T_x = -234^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

tendremos:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0129 \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.51}$$

cambiando de logaritmos:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0297 \log \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.52}$$

Haciendo las operaciones similares para el aluminio, tendremos:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 5.43(10)^{-3} \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.53}$$

cambiando de logaritmos

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 0.0125 \log \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.54}$$

Con estas expresiones podemos calcular el valor de la corriente de cortocircuito "I" en Amperes, cuando el área del conductor este dada en circular mils (CM). Cabe mencionar que estas ecuaciones se pueden utilizar para comprobar que el área de la sección transversal del conductor (calculada por ampacidad o caída de tensión), puede soportar la corriente de cortocircuito a la que va a ser sometido el cable durante una falla en el sistema.

Similarmente, cuando la sección del conductor está dada en mm², la densidad en g/cm³, el tiempo en segundos, el calor específico en cal/g-°C y la corriente en Amperes, tendremos:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 418 \frac{pC}{\rho_0} (T_0 - T_x) \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.55}$$

Al sustituir $p = 8.89 \text{ g/cm}^3$, $C = 0.092 \text{ cal/g-}^\circ\text{C}$
 $\rho_0 = 1.724 \text{ } \mu\Omega\text{-cm}$, $T_x = -234 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, se tendrá:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = 5.036(10)^4 \ln \frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \quad \text{V.56}$$

Ejemplo:

Determine el máximo valor de la corriente de corto circuito, que puede conducir un cable con conductor de cobre de 500 kCM y aislamiento de polietileno de cadena cruzada (XLPE), durante 1 y 5 segundos, sin que sufra daño térmico.

Solución:

Dado que el aislamiento es de polietileno de cadena cruzada (XLPE), $T_2 = 250^\circ\text{C}$ y $T_1 = 90^\circ\text{C}$. Utilizando la ecuación V.51 podemos calcular la corriente que soporta el cable durante un segundo:

$$I = A \left\{ \frac{0.0129}{t} \ln \left[\frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \right] \right\}^{1/2}$$

$$I = 500000 \left\{ 0.0129 \ln \left[\frac{250 + 234}{90 + 234} \right] \right\}^{1/2} = 35977 \text{ [A]}$$

Para un tiempo t igual a 5 segundos:

$$I = 500000 \left\{ \frac{0.0129}{5} \ln \left[\frac{250 + 234}{90 + 234} \right] \right\}^{1/2} = 16088 \text{ [A]}$$

Ejemplo:

Determine el máximo valor de la corriente de corto circuito, que puede conducir un cable con conductor de cobre de 253 mm² de sección transversal y aislamiento de polietileno de cadena cruzada, durante 1 y 5 segundos, sin que sufra ningún daño térmico.

Solución.

Al igual que en el caso anterior, el aislamiento es de polietileno de cadena cruzada; entonces, T₂ y T₁ son iguales a 250 °C y 90°C respectivamente. Con la ayuda de la ecuación V.56 calcularemos la corriente que soporta el cable en un segundo:

$$I = A \left\{ \frac{5.036(10)^4}{t} \ln \left[\frac{T_2 - T_x}{T_1 - T_x} \right] \right\}^{1/2}$$

$$I = 253 \left\{ 5.036(10)^4 \ln \left[\frac{250 + 234}{90 + 234} \right] \right\}^{1/2} = 35966 \text{ [A]}$$

Para un tiempo t igual a 5 segundos:

$$I = 253 \left\{ \frac{5.036(10)^4}{5} \ln \left[\frac{20 + 234}{90 + 234} \right] \right\}^{1/2} = 16085 \text{ [A]}$$

Como se puede ver los resultados obtenidos son iguales que en el ejemplo anterior debido a que un cable de 500 kCM es igual a uno de 253 mm² de sección. Esto sirve para probar la validez de las ecuaciones.

V.7 Pérdidas en las pantallas ó cubiertas metálicas

Cuando se hace circular una corriente por el conductor, se inducirá una corriente en la pantalla o cubierta metálica, siempre y cuando estas se encuentran conectadas a tierra en sus extremos.

Las pérdidas que se tendrán en la pantalla ó cubierta metálica son debidas al efecto Joule, de tal forma, la ecuación con la cual podemos calcular dichas pérdidas será la siguiente:

$$P_p = I_p^2 r_f \quad [\text{W/km}] \quad \text{V.57}$$

donde:

I_p = corriente inducida (A)

r_f = resistencia eléctrica de la pantalla (Ω/km)

Ver tabla V.4 a la temperatura de operación de esta (se puede considerar 10°C menos que la del cable)

La corriente inducida en las pantallas o cubiertas metálicas (I_p) para cables monopolares o trifásicos dispuestos en configuración equilátera se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_p = \frac{I x_m}{\sqrt{x_m^2 + r_f^2}} \quad \text{V.58}$$

donde:

I = corriente que circula por el conductor (A)

$$x_m = 2\pi f \left(2 \times 10^{-4} \ln \frac{d}{r_0} \right)$$

de donde:

d = distancia entre el centro conductor y pantalla ó distancia de separación entre conductores (mm)

$$r_0 = \text{radio medio de la pantalla} = \frac{r_e + r_i}{2} \quad (\text{mm})$$

Para otras configuraciones, la magnitud de I_p se puede calcular con la ayuda de las ecuaciones dadas en la tabla

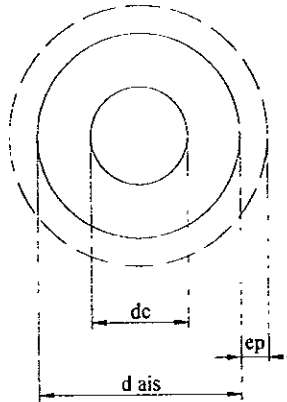
Tabla V.4 Fórmulas para el cálculo de las corrientes que circulan por las pantallas o cubiertas metálicas.

Configuración	I Monofásica	II Equilátera	III Rectangular	IV Plana	V Doble circuito	VI Doble circuito
Pantallas abiertas						
1. $\frac{E_{p1}}{l} =$	X_m	X_m	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{a}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - a)^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$
2. $\frac{E_{p2}}{l} =$	X_m	X_m	X_m	X_m	$(X_m + \frac{a}{2})$	$(X_m + \frac{a}{2})$
3. $\frac{E_{p3}}{l} =$		X_m	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{a}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - a)^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$	$\frac{1}{2} \sqrt{3 Y^2 + (X_m - \frac{b}{2})^2}$
Pantallas sólidamente aterrizadas						
$\frac{I'_{a1}}{I'} \frac{W_{a1} + 10^4}{I' R_p} \frac{R_{a1}}{R_p}$	$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{(P^2 + 3 Q^2) + 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$			
$\frac{I'_{a2}}{I'} \frac{W_{a2} + 10^4}{I' R_p} \frac{R_{a2}}{R_p}$	$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{1}{(Q^2 + 1)}$			
$\frac{I'_{a3}}{I'} \frac{W_{a3} + 10^4}{I' R_p} \frac{R_{a3}}{R_p}$		$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{(P^2 + 3 Q^2) - 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$			
$\frac{W_{a1} + 10^4}{3 I' R_p} \frac{R_{a1,2,3}}{R_p}$		$\frac{X'_m}{R'_p + X'_m}$	$\frac{P^2 + Q^2 + 2}{2(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$			
Donde:	$Y = X_m$	X_m	$(X_m + \frac{a}{2})$	$(X_m + a)$	$(X_m + a + \frac{b}{2})$	$(X_m + a + \frac{b}{2})$
$P = \frac{R_p}{Y}$	$Q = \frac{R_p}{Z}$	X_m	$(X_m - \frac{a}{6})$	$(X_m - \frac{a}{3})$	$(X_m + \frac{a}{3} - \frac{b}{6})$	$(X_m + \frac{a}{3} - \frac{b}{6})$
$X'_m = 2 \pi f (2 \times 10^{-4} \ln \frac{S}{r_s}), a = 2 \pi f (2 \times 10^{-4} \ln 2), b = 2 \pi f (2 \times 10^{-4} \ln 5)$ En ohms/km $X'_m = 0.0754 \ln \frac{S}{r_s}, a = 0.0523, b = 0.1214$						

Ejemplo:

Calcular la corriente inducida y las pérdidas en la pantalla (formada por cinta de cobre de 0.12 mm de espesor) en una instalación nueva de tres cables directamente enterrados en configuración trébol, como se muestra en la figura, los cables son de cobre del calibre 4/0 AWG para 25 kV con aislamiento de XLPE y circula por ellos una corriente nominal de 290 A.

CONDUCTOR

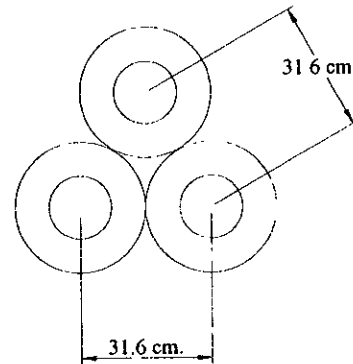


$$d_c = 13.4 \text{ mm.}$$

$$d_{\text{ais}} = 26.6 \text{ mm.}$$

$$e_p = 0.12 \text{ mm.}$$

INSTALACION



Solución.

Para el cálculo de la corriente inducida en las pantallas utilizamos la ecuación V.58:

$$= \frac{I x_m}{\sqrt{x_m^2 + r_f^2}}$$

Para encontrar x_m utilizamos la ecuación:

$$x_m = 2\pi f \left(2 \times 10^{-4} \ln \frac{d}{r_0} \right)$$

donde:

$$r_0 = \frac{r_e + r_i}{2} = \frac{13.42 + 13.3}{2} = 13.36 \text{ [mm]}$$

$$d = 31.6 \text{ [mm]}$$

sustituyendo valores tendremos:

$$x_m = 2\pi (60) 2 \times 10^{-4} \ln \frac{31.6}{13.36} = 0.06356 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Para el cálculo de r_F utilizamos la tabla IV.4 para pantallas de cinta de cobre:

$$r_f = \frac{5.33 \rho k}{(d_m)(e)}$$

$$d_m = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{26.84 + 26.6}{2} = 26.72 \text{ } [\text{mm}]$$

$K = 1$ para cable nuevo

sustituyendo valores obtenemos:

$$r_F = \frac{(5.33)(17.241)(1)}{(26.72)(0.12)} = 28.66 \text{ } [\Omega/\text{km}] \text{ a } 20^\circ \text{C}$$

corrigiendo r_F a 80°C (ya que la temperatura de operación del cable es de 90°C que lo determina la clase de aislamiento XLPE).

$$\frac{r_{F(20^\circ \text{C})}}{r_{F(80^\circ \text{C})}} = \frac{234.5 + 20}{234.5 + 80} = \frac{254.5}{314.5} = 0.8092$$

$$r_{F(80^\circ \text{C})} = \frac{r_{F(20^\circ \text{C})}}{0.8092} = \frac{28.66}{0.8092} = 35.41 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Sustituyendo valores en la ecuación I_p tendremos:

$$I_p = \frac{(290)(0.06356)}{\sqrt{(0.06356)^2 + (35.41)^2}} = 0.5205 \text{ } [\text{A}]$$

Para calcular las pérdidas en la pantalla utilizamos la ecuación V.57:

$$P_p = I_p^2 r_F$$

$$P_p = (0.5205)^2 (35.41) = 9.59 \text{ } [\text{W}/\text{km}]$$

VI. BIBLIOGRAFÍA

1. UNDERGROUND POWER CABLES
S.Y. King, N.A. Halfer
Ed. Longman
2. UNDERGROUND SYSTEMS REFERENCE BOOK
Edison Electric Institute
EEI - Publication
3. MODERN POWER SYSTEM ANÁLISIS
TURAN GÖNEN
WILEY INTESCIENCE
4. REDES ELECTRICAS TOMO 1 Y 2
Jacinto Viqueira Landa
Representaciones y Servicios de Ingeniería,S.A.
5. UNDERGROUND POWER TRANSMISSION
Peter Graneau
Ed. John Wiley & Sons Inc.
6. THERMAL BEHAVIOUR OF ELECTRICAL CONDUCTORS
Vicent T. Morgan
Ed. John Wiley & Sons Inc.
7. MANUAL ELECTRICO (CUARTA EDICION)
Conelec
8. MANUAL TECNICO DE CABLES DE ENERGIA (SEGUNDA EDICION)
Condumex, Mc Graw-Hill
9. LINEAS DE TRANSMISION SUBTERRANEAS
B.M. Weedy
Ed. Limusa
10. COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
Juan Yebra Morón
Ed. Mc. Graw Hill

11. NORMAS APLICABLES:

NOM-J-12	Productos eléctricos – conductores – cables de cobre con cableado concéntrico para usos eléctricos.
NOM-J-43	Productos eléctricos – conductores – cubiertas protectores de materiales termofijos, para conductores eléctricos.
NOM-J-59	Productos eléctricos – conductores – cable de cobre con cableado redondo compacto para usos eléctricos.
NOM-J-62	Productos eléctricos – conductores – cable concéntrico compacto de aluminio para usos eléctricos.
NOM-J129	Determinación del área de la sección transversal de conductores eléctricos cableados.
NOM-J-142	Productos eléctricos – conductores – cables de energía con pantalla metálica, aislados con polietileno de cadena cruzada o a base de etileno-propileno para tensiones de 5 a 115 kV.
NOM-J-177	Determinación de espesores de pantallas semiconductoras, aislamientos y cubiertas protectoras de conductores eléctricos.
NOM-J-292	Productos eléctricos – conductores – cubiertas protectoras a base de materiales termoplásticas para cables de energía de baja, media y alta tensión.
UL-1072	Standard For Medium – voltage power cables.
ICEA/NEMA S-61-402	Thermoplastic – insulated wire and cable for the transmission and distribution of electrical energy.
ICEA/NEMA S-66-524	Cross – linked –thermosetting – polyethylene – insulated wire and cable for the transmission and distribution of electrical energy.
ICEA-P-45-482	Short circuit performance of metallic shields and sheaths of insulated cable.

AEIC-CS5	Specification for thermoplastic and cross linked polyethylene insulated shielded power cables rated 5 through 35 kV.
AEIC-CS6	Specification for ethylene – propylene rubber insulated shielded power cables rated 5 through 69 kV.
AEIC-CS7	Specification for thermoplastic and cross linked polyethylene insulated shielded power cables rated 46 through 138 kV.
IEC-287	Calculation of the continuous current rating of cables.
ICEA/NEMA S-68-516	Ethylene – Propylene – rubber insulated wire and cable for the transmission and distribution of electrical energy.