

CAPÍTULO 3

CONCEPTOS GENERALES DE CABLES SUBTERRÁNEOS

3.1 Definición de cable subterráneo

La función primordial de un cable de potencia aislado es la de transmitir potencia eléctrica a una intensidad de corriente y tensión preestablecidas durante cierto tiempo. Es por ello que sus elementos constitutivos primordiales deben de estar diseñados para soportar el efecto producido por estos parámetros.

El cable por su construcción podrá ser monopolar o tripolar. Los elementos constitutivos primordiales se pueden resumir en seis elementos:

1. El Conductor, por el cual fluye la corriente eléctrica.
2. La capa semiconductor sobre conductor, el cual distribuye uniformemente el campo eléctrico.
3. El Aislamiento, elemento que soporta la tensión aplicada.
4. La segunda capa semiconductor sobre el aislante, la cual confina el campo eléctrico en el aislamiento, eliminando esfuerzos tangenciales.
5. La Pantalla metálica, que cumple la función de confinar el campo eléctrico y así mismo de conductor para las corrientes de secuencia cero, en caso de corto circuito.
6. La cubierta, que es la encargada de la protección contra el ataque del tiempo y agentes externos.

Los anteriores elementos se muestran en la siguiente figura 3.1.

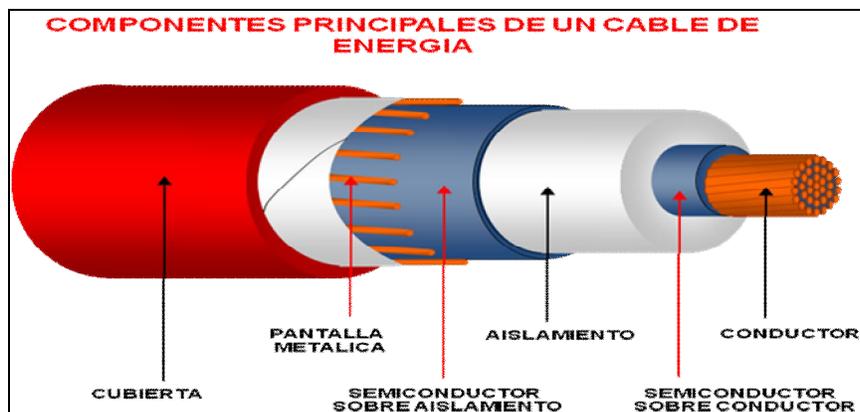


Figura 3.1 Imagen del Manual de Cables Condumex

3.2 Conductor

La principal razón para utilizar el cobre es su excelente conductividad eléctrica o, en otras palabras, su baja resistencia eléctrica. La resistencia es indeseable, produce pérdidas en forma de calor cuando el flujo eléctrico circula a través del material.

Debido a que la plata y el oro son demasiado costosos, el cobre y el aluminio son los principales materiales que se utilizan como conductores. La resistencia del aluminio es 65% más alta que la del cobre. Como resultado de esto, para conducir la misma corriente eléctrica, un cable de aluminio necesitará una sección transversal un 65% más grande que la de un cable de cobre.

CAPÍTULO 3

Además de ser menos conductivo, el aluminio es tres veces más liviano que el cobre. Como resultado de esto, el cobre y el aluminio tienen cada uno sus propias áreas de aplicación.

Para cables aéreos, el peso de los cables es el factor decisivo, por eso el aluminio es el que más se usa. Esto significa conductores más voluminosos, pero no es significativo a la hora de diseñar una línea aérea. Para cables subterráneos que transportan alta corriente, el cobre es el más comúnmente utilizado.

El aluminio puede significar un conductor de mayor área, por lo que se necesitará una mayor cantidad de material de aislamiento para rodearlo. Consecuentemente, en este caso, se prefiere a menudo el menor volumen que ofrece el cobre.

Lo fundamental de la ingeniería de cables de potencia es transmitir potencia eléctrica económica y eficientemente. La selección del material conductor, su diámetro y diseño son de gran importancia para su correcto funcionamiento, para ello se deben tomar las siguientes consideraciones:

- a) Tensión nominal entre fases y tensión máxima de operación
- b) Potencia a transmitir
- c) Pérdidas
- d) Radio de curvatura y flexibilidad
- e) Propiedades del material conductor

Las propiedades de los materiales conductores más utilizados en la industria eléctrica son el cobre y aluminio. Las propiedades del cobre y del aluminio corresponden a los valores establecidos por la International Annealed Copper Standards (IACS), estableciendo para el cobre, cobre electrolítico suave (100% IACS) y para el aluminio, aluminio del tipo 1350-H-12 (61% IACS), en la siguiente tabla 3.1 se muestran las propiedades para el cobre y aluminio de la IACS.

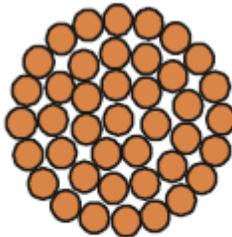
Tabla 3.1 Valores establecidos por IACS

Propiedades de los materiales Conductores		
	Cobre	Aluminio
Número atómico	29	13
Peso específico	8.89 (gr/cm ³)	2.703 (gr/cm ³)
Coefficiente de temperatura por °C a 20°C	0.00393	0.00403
Conductividad Eléctrica	100%	60.97%
Conductividad Térmica	0.93 (cal/cm ³)	0.52 (cal/cm ³)
Temperatura de fusión	1083 °C	660 °C
Coefficiente de dilatación lineal por °C	16.22x10 ⁻⁶	23.0x10 ⁻⁶
Calor específico	0.0918 cal/gr/°C	0.2299 cal/gr/°C
Resistividad Volumétrica a 20°C	0.017241 Ohms-mm ²	0.02828 Ohms-mm ²

Resistividad Eléctrica (a 20°C) ⁽¹⁾	1.7241 ($\Omega\text{-mm}^2 / 10 \text{ km}$)	2.828 ($\Omega\text{-mm}^2 / 10 \text{ km}$)
Esfuerzo de tensión, Temple duro	3870 (kg/cm^2)	1820 (kg/cm^2)
Esfuerzo de tensión, Temple suave	2,250 (kg/cm^2)	845 (kg/cm^2)
Módulo de elasticidad	1,200,000 (kg/cm^2)	702,000 (kg/cm^2)
Resistencia al corte	1,750 (kg/cm^2)	665 (kg/cm^2)
Resistencia límite de fluencia	560 (kg/cm^2)	350 (kg/cm^2)
Densidad	8.89 (g / cm^3)	2.70 (g / cm^3)

Los cables para extra alta tensión están conformados básicamente por un conductor que puede ser de cobre ó aluminio. La fabricación del conductor es de varios hilos, cuando se emplean varios hilos su forma podrá ser:

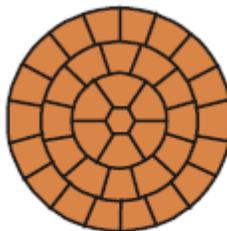
i) Cuerda redonda concéntrica normal. Está formada por hilos del mismo diámetro dispuesto en coronas concéntricas, como se muestra en la figura 3.2.



Concéntrico

Figura 3.2

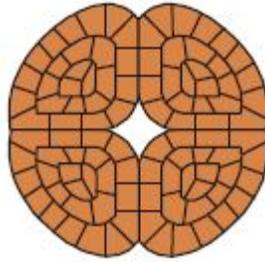
ii) Cuerda redonda compacta. Similar a la anterior, con la diferencia de que en su construcción se pasa por un dado reductor forzando a que los hilos se deformen llenando los vacíos llegando a obtenerse una reducción del diámetro de aproximadamente 8%, como se muestra en la figura 3.3



Compacto

Figura 3.3

iii) Cuerda segmental. Se utiliza en cables de energía superiores a los 1250 KCM con objeto de reducir las pérdidas por efecto piel. Los segmentos generalmente son 4 o 6 y van aislados de forma alternada, como se muestra en la figura 3.4.



segmental

Figura 3.4

Para el caso de cables de Extra Alta Tensión, la construcción del conductor es segmental tipo "Milliken" con capas semiconductoras entre los segmentos para reducir el efecto piel y mejorar la capacidad de transmitir corriente. Este tipo de conductor permite que el diámetro total del cable se disminuya en comparación con los otros tipos de conductor.

3.2.1 Capa semiconductor sobre conductor

Es una capa de co-polímero de etileno utilizada como interfaz entre el conductor y el aislante. La capa semiconductor sobre el conductor y el aislamiento se aplican en un solo paso de triple extrusión, siendo el material semiconductor compatible con el material del aislamiento. Los co-polímeros de etileno contienen cantidades de carbón negro que provee de propiedades de conducción. Estos co-polímeros son considerados como "portadores", pero estos "portadores" poseen propiedades de adhesión controlada en el aislamiento. Esto se usa como un material conductor disperso por toda la interfaz del conductor y el aislamiento.

En un cable típico de potencia, dos capas de material semiconductor rodean el núcleo metálico. La primera capa directamente colocada alrededor del conductor tiene los siguientes propósitos:

1. La de distribuir uniformemente el campo eléctrico alrededor del conductor.
2. La de prevenir la formación de huecos ionizados en el conductor.
3. El amortiguar los impulsos de corriente que viajan sobre la superficie del conductor.

3.3 Aislamiento

Un aislante es un material que se resiste al flujo de carga eléctrica. La utilización de aislantes del tipo seco ha incrementado su uso a nivel mundial sobre los de papel impregnado en aceite o tipo tubo enfriados y aislados con aceite, los materiales aislantes son compuestos a base de polímeros ya sean termofijos o termoestables. Un aislante termoestable, tiene la propiedad de soportar 90° C en régimen permanente y 250 °C en cortocircuito. Los más comunes son el polietileno de cadena entrecruzada (XLPE), etileno-propileno (EPR), poliolefinas y siliconas.

El aislamiento con XLPE es un material aislante de polietileno de cadena entrecruzada que tiene buenas propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas que lo hace el material más adecuado para cables de Alta y Extra Alta Tensión. El XLPE tiene una alta resistencia de aislamiento y una baja constante dieléctrica.

El XLPE también llamado polietileno vulcanizado, se obtiene mediante la adición de un peróxido, que a temperatura elevada del proceso de vulcanización o extrusión, reacciona con el polietileno, produciendo la liga de las cadenas moleculares del polietileno. En la figura 3.5 se muestra un gráfico comparativo de los diversos materiales aislantes contra la vida útil de los mismos.

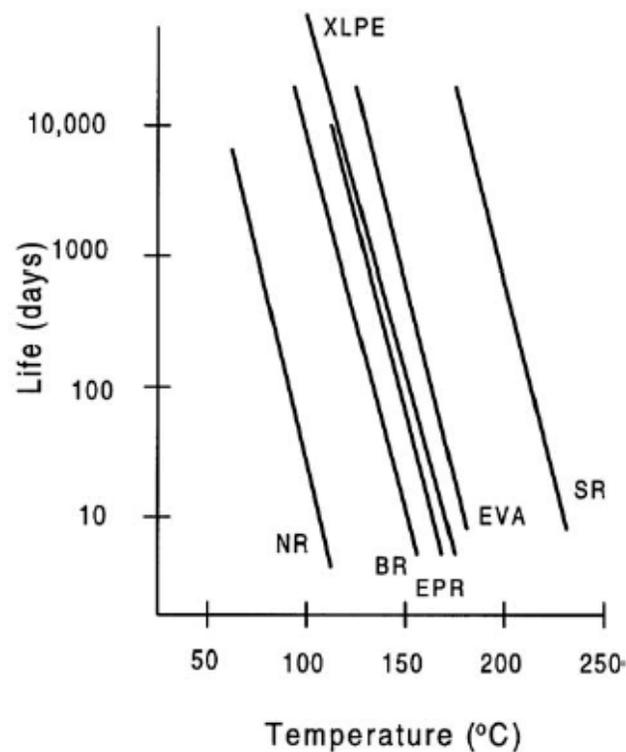


FIGURE 4.38 Life vs. temperature for different insulating materials.

Figura 3.5 Grafico de Temperatura contra días de vida útil.

Los cables con aislamiento extruido para alta tensión (HV) y de extra alta Tensión (EHV) constituyen un factor importante en la transmisión de alta tensión y su uso está creciendo en todo el mundo. Puesto que el aislamiento se obtiene mediante polietileno diseñado especialmente, estos cables presentan *pérdidas dieléctricas muy bajas*. Además, debido al proceso de extrusión triple, poseen excelentes características de envejecimiento térmico y mecánico, así como mayores temperaturas de operación permisibles que los cables con aislamiento de papel/aceite.

A pesar de que los cables de alta tensión y extra alta tensión están compuestos de numerosas capas, las áreas clave a considerar para el rendimiento eléctrico son el aislamiento y las capas semiconductoras utilizados en el núcleo de los cables. El aislamiento debe estar lo suficientemente limpio, para esto los fabricantes denominan los compuestos de fabricación como superlimpios y super tersos para reducir las irregularidades internas de los materiales, a fin de presentar excelentes propiedades eléctricas para el cable, como el *factor de disipación* y la *rigidez dieléctrica*.

El proceso de envejecimiento de un cable de energía es consecuencia, de las reacciones químicas del aislante y este proceso se ve afectado por diversos mecanismos de deterioro dentro del aislante, los cuales son:

- Arborescencias acuosas (water trees)
- Descargas parciales en cavidades
- Arborescencias eléctricas (electrical trees)

Cuando un cable está instalado y operando a la tensión nominal, este envejecimiento transcurre al pasar de los años, dependiendo del uso y de las condiciones de su instalación, el tiempo transcurrido puede variar, a continuación se ilustra un proceso de envejecimiento sin la presencia de defectos de fabricación. Fig. 3.6

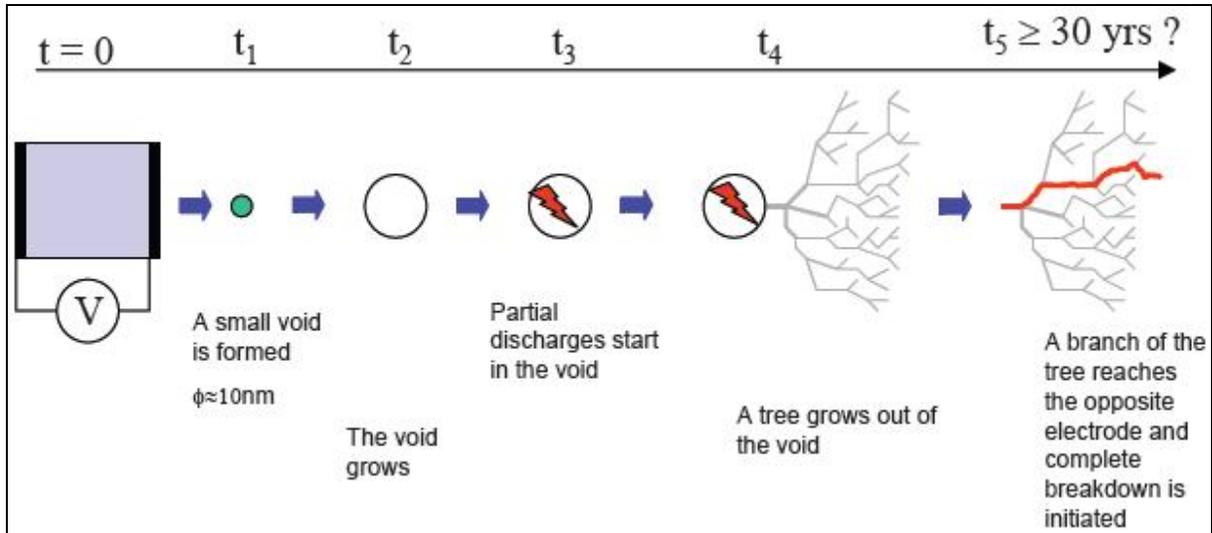


Figura 3.6. Proceso de envejecimiento de un cable con aislamiento extruido [1].

Para alargar la vida útil de los cables de energía, cada fabricante presenta capas extras con el fin de evitar el deterioro debido a la presencia de arborescencias. Estas capas extras son barreras mecánicas contra la humedad y agentes externos como el azufre que deterioren el aislante. En el proceso de vulcanización o extrusión, también se añaden químicos retardantes de arborescencias acuosas (Tree Retardant). El diseño de los cables de potencia debe presentar óptimos rendimientos, eléctricos, térmicos y mecánicos por lo que su diseño sigue en continuo desarrollo para tener cables mas eficientes y durables. En la fig. 3.7 se presenta el diseño de cable de potencia por parte de CONDUMEX.

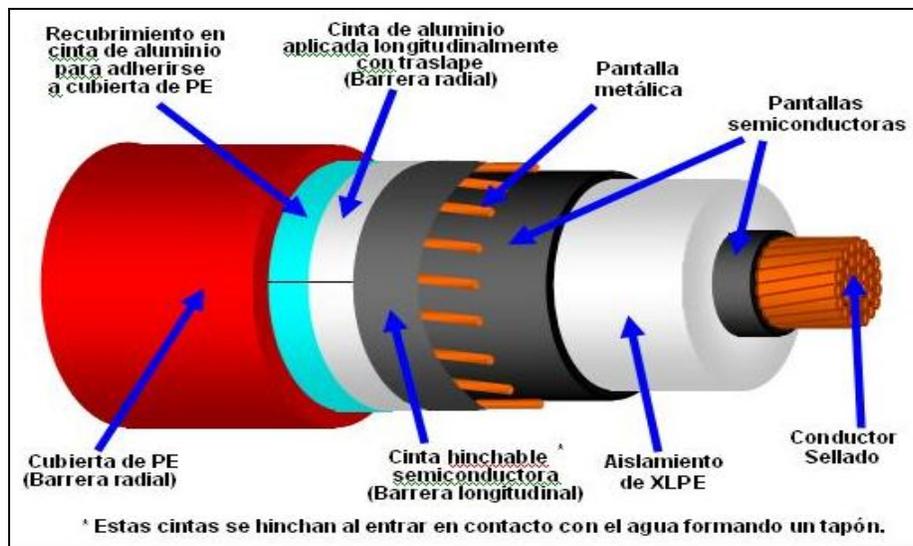


Figura 3.7

3.3.1 Niveles de aislamiento

Una vez seleccionado el material apropiado para el aislamiento del cable, es necesario determinar el espesor de acuerdo a la tensión de operación según el fabricante, tomando como base la tensión de operación entre fases y las características del sistema, los niveles de aislamiento se clasifican en tres categorías, que son las siguientes:

Categoría I. Nivel 100%

Quedan incluidos en esta clasificación los cables que se usen en sistemas protegidos con relevadores que liberen fallas a tierra lo más rápido posible, en un tiempo no mayor a un minuto. Este nivel de aislamiento es aplicable a la mayoría de los sistemas con neutro conectado sólidamente a tierra, y puede también aplicarse a otros sistemas (en los puntos de aplicación del cable) donde la razón entre la reactancia de secuencia cero y de secuencia positiva (X_0/X_1) no esté en el intervalo de -1 a -40 y que cumplan la condición de liberación de falla, ya que en los sistemas incluidos en el intervalo descrito pueden encontrarse valores de tensión excesivamente altos en condiciones de fallas a tierra.

Categoría II. Nivel 133%

Anteriormente en esta categoría se agrupaban los sistemas con neutro aislado. En la actualidad se incluyen los cables destinados a instalaciones en donde las condiciones de tiempo de operación de las protecciones no cumplen con los requisitos del nivel 100%, pero que, en cualquier caso, se libera la falla en no más de una hora.

El nivel 133% se podrá usar también en aquellas instalaciones donde se desee un espesor del aislamiento mayor al 100%. Por ejemplo, cables submarinos, en los que los esfuerzos mecánicos propios de la instalación y las características de operación requieren un nivel de aislamiento mayor.

Categoría III. Nivel 173%

Los cables de esta categoría deberán aplicarse en sistemas en los que el tiempo para liberar una falla no está definido. También se recomienda el uso de cables de este nivel en sistemas con problemas de resonancia, en los que se pueden presentar sobretensiones de gran magnitud. Los espesores de aislamiento y las tensiones de prueba para esta categoría no están normalizados, por lo que se deberá consultar con el fabricante para evaluar cada caso en particular.

En el Sistema Eléctrico Nacional, para las líneas de transmisión de 230 kV y 400 kV, existen esquemas de protección por medio de relevadores, digitales o microprocesados en la mayoría de los casos, por lo que el nivel de aislamiento para líneas de 230 kV y 400 kV, los cables deben ser con un nivel de aislamiento del 100%. Este requerimiento está contemplado en la especificación **CFE E0000-28** "Cables de Energía Monopolares con Aislamiento Sintético para Tensiones de 150 kV hasta 500 kV".

3.3.2 Segunda capa semiconductor sobre aislante.

La segunda capa de material semiconductor está colocada alrededor de la primera capa de aislamiento (XLPE) y cumple con los siguientes propósitos:

1. La de reducir la tensión en la superficie a cero.
2. La de confinar el campo eléctrico en el aislamiento, eliminando esfuerzos tangenciales.
3. La de permitir una trayectoria directa de las corrientes de corto circuito si la pantalla está conectada sólidamente a tierra.

3.3.3 Cubiertas protectoras

La selección del material de la cubierta de un cable dependerá de su tipo, aplicación y naturaleza, así como de los agentes externos mecánicos, interperismos, agentes químicos del medio, de los cuales se desea proteger el cable; la cubierta puede ser metálica o sintética. El material comúnmente usado en las cubiertas metálicas es el plomo y sus aleaciones.

Las cubiertas sintéticas pueden ser textiles, termoplásticos o termoestables. Las cubiertas termoplásticas usuales son: el PVC (cloruro de polivinilo), polietileno de alta y baja densidad (PE). Las cubiertas termoestables son el neopreno y polietileno clorosulfonado.

3.4 Pantalla metálica

La función electrostática principal de la pantalla metálica sobre aislamiento es confinar al campo eléctrico al interior del aislamiento, es decir que no exista diferencia de potencial con respecto a tierra en la superficie exterior del cable.

La pantalla metálica debe operar todo el tiempo cerca de, o al potencial de tierra. La pantalla que no tenga la conexión adecuada a tierra es más peligrosa, desde el punto de vista de la seguridad, que un cable sin pantalla. Además del peligro para quienes pudieran estar en contacto, una pantalla “flotante” puede ocasionar daños al cable. Si el potencial de dicha pantalla es tal que perfora la cubierta, la descarga resultante producirá calor y quemaduras al cable. En la figura 3.8 se ilustra la función de la pantalla metálica.

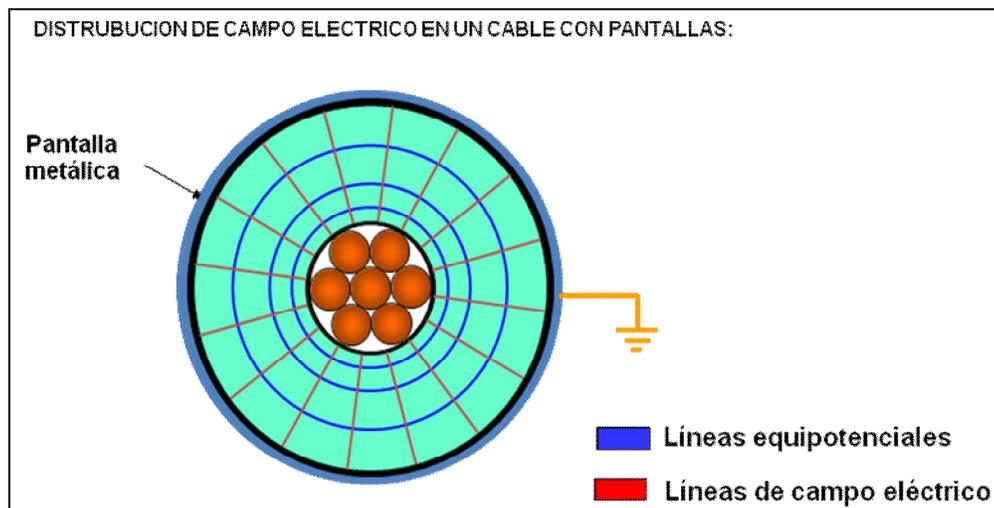


Figura. 3.8 Función de la pantalla metálica.

Los métodos de conexión de las pantallas metálicas varían dependiendo de la longitud del circuito y de si la pantalla metálica funcionara como medio de retorno de las corrientes de corto circuito. En todos los métodos de conexión de las pantallas metálicas, es en al menos un punto del circuito, la pantalla se debe conectar solidamente a tierra, quedando al potencial de tierra, lo que permite realizar su función electrostática. En el capítulo 4 se vera con mas detalle.

3.5 Características eléctricas.

Hay tres constantes principales que afectan el funcionamiento del cable en un sistema eléctrico, estas son: **resistencia, capacitancia, inductancia.**

3.5.1 Capacitancia

La propiedad de un cable que permite al conductor mantener un potencial a través de un material aislante se conoce como capacitancia. Este valor depende de la constante dieléctrica del aislante y de los diámetros del conductor y del aislante. Un cable es un capacitor distribuido, la capacitancia de un conductor, con pantalla conectada a tierra o aterrizada esta dada por los siguientes parámetros y la formula es la siguiente:

$$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10} \frac{D}{d}}$$

Donde:

C = capacitancia en uF por 1000 pies

ε = constante dieléctrica (k), permitividad (ε) o al SIC (Capacitancia Inductiva Especifica)

D = diámetro sobre el aislante

d = diámetro sobre el conductor.

Investigando en los catálogos de los fabricantes se encontraron las siguientes fórmulas de la capacitancia, ver tabla 3.2.

Tabla 3.2

FABRICANTE	ABB	CONDUMEX	EL-SEWEDY	BRUGG	LIBRO: ELECTRICAL POWER CABLE ENGINEERING
FORMULA	$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \text{Ln} \left(\frac{d_o}{d_i} \right)}$	$C = \frac{0.0241\varepsilon_r}{\log_{10} \left(\frac{d_a}{dp} \right)} \times 10^{-6}$	$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \text{Ln} \left(\frac{d_a}{dp} \right)}$	$C = \frac{5.56\varepsilon_r}{\text{Ln} \left(\frac{D}{d} \right)}$	$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)}$
UNIDADES	$\left[\frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[\frac{F}{km} \right]$	$\left[\frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[\frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[\frac{\mu F}{1000 \text{ feet}} \right]$

Cada fabricante especifica una ecuación para el cable que suministra, sin embargo estas ecuaciones son equivalentes entre los Sistemas Internacional de Unidades y el Sistema Inglés de Unidades, a continuación se realiza una demostración de la equivalencia de las fórmulas.

Demostración.

Partiendo de la ecuación en el sistema inglés y haciendo la conversión de pies a kilómetros queda lo siguiente:

$$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)} \left[\frac{uF}{1000ft} \right] \left[\frac{3280.839ft}{1.0km} \right] \Rightarrow C = \frac{0.024147\varepsilon_r}{\log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)} \left[\frac{uF}{km} \right]$$

Tomando la equivalencia de logaritmo base 10 a logaritmo natural nos queda la siguiente expresión:

$$\log_{10} a = \frac{Lna}{2.302}; \log_{10}\left(\frac{D}{d}\right) = \log_{10} D - \log_{10} d \Rightarrow \frac{LnD}{2.302} - \frac{Lnd}{2.302} = \frac{Ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2.302}$$

$$C = \frac{0.024147\varepsilon}{\frac{Ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2.302}} \Rightarrow C = \frac{0.0555\varepsilon}{Ln\left(\frac{D}{d}\right)} \Rightarrow C = \frac{\varepsilon}{18Ln\left(\frac{D}{d}\right)};$$

Transformando el número racional a decimal nos queda la siguiente aproximación:

$\frac{1}{18} \approx 0.05555$ por lo que la equivalencia entre las fórmulas es en base al sistema de unidades y prefijos de las unidades.

3.5.1.1 Constante dieléctrica (ε), Permitividad, SIC.

La constante dieléctrica, permitividad relativa, y capacitancia inductiva específica (SIC), significan lo mismo. Estos términos son la relación entre la permitividad absoluta de un material dieléctrico y de la permitividad del vacío. El símbolo de la permitividad es ε (épsilon). Dicho de otra forma, estos términos se refieren a la relación entre la capacitancia de un aislante con un espesor dado (C) y la capacitancia del mismo capacitor aislado al vacío (C_0).

$$\xi = \frac{C}{C_0}$$

A continuación se muestran algunos materiales aislantes con sus valores de constante dieléctrica.

Tabla 3.3

PERMITIVIDAD, CONSTANTE DIELECTRICA, Y INDUCTANCIA CAPACITIVA ESPECÍFICA (SIC)		
MATERIAL	RANGO DE VALORES	VALOR TÍPICO
HULE	3.0 - 4.5	3.2
PVC	3.4 - 10	6.0
PAPEL IMPREGNADO	3.3 - 3.7	3.5
CAUCHO NATURAL	2.7 - 7.0	3.5
HMWPE	2.1 - 2.6	2.2
XLPE O TR-XLPE	2.1 - 2.6	2.3
XLPE	3.5 - 6.0	4.5
EPR	2.5 - 3.5	3.0
GOMA DE SILICON	2.9-6.0	4.0

CAPÍTULO 3

El valor real de la constante dieléctrica está dado por cada fabricante, debido al proceso de construcción que cada uno emplee, en los catálogos de cables de potencia se indica el valor de la constante dieléctrica.

3.5.1.2 Corriente de carga en CA

Un cable de potencia con la pantalla conectada a tierra, se convierte en un capacitor, este capacitor presenta pequeñas corrientes circulando entre el conductor y la pantalla.

Para un cable con un solo conductor, la corriente puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$I_c = 2\pi fCLV_0$$

Donde:

I_c = Corriente capacitiva en el cable (A).

f = Frecuencia del sistema (60 Hz).

L = Longitud del cable (km).

V_0 = Tensión de fase a tierra del sistema (Vo).

Otras corrientes de fuga también están presentes, pero la corriente capacitiva tiene una magnitud mayor; la corriente de carga capacitiva fluye a lo largo del sistema energizado. Esta condición siempre ocurre entre los dos extremos del cable, sin importar cual sea la carga, mientras más largo sea el cable, mayor corriente existirá, incrementando las pérdidas debidas a la circulación de esta corriente.

3.5.1.3 Componente resistiva de la corriente de carga.

La componente resistiva de la corriente de carga depende de los mismos factores que la corriente capacitiva y esta dada por la fórmula:

$$I_R = 2\pi fCE \tan \delta$$

Donde:

I_R = Componente resistiva de la corriente de carga.

$\tan \delta$ = Factor de disipación del aislamiento.

Para ángulos pequeños estos valores son casi iguales, la corriente de carga capacitiva está desfasada 90° respecto a la corriente de carga resistiva, la corriente total está, generalmente dada por la componente capacitiva y la sigue cualquier corriente resistiva fluyendo a través del circuito a 90° .

3.5.1.4 Factor de potencia. (Tan δ)

(Tan δ), también llamado ángulo de pérdidas o prueba de factor de disipación, es un método de diagnóstico para determinar la calidad del aislante del cable. Esto intenta predecir la expectativa de vida y planear el reemplazo o mantenimiento del cable.

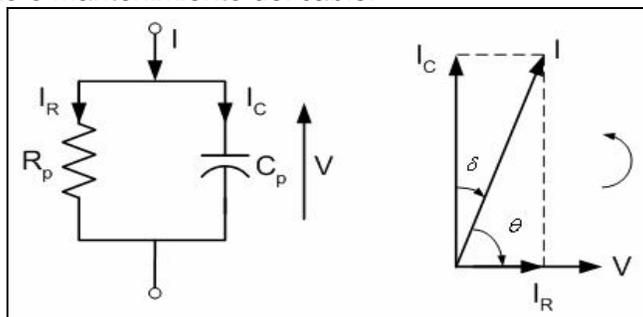


Fig. 3.9

Siendo un cable de potencia un capacitor distribuido (ver Fig. 3.9), la relación entre la corriente de la componente resistiva y la corriente de la componente capacitiva se conoce como factor de disipación.

$$\cos \theta = \frac{I_r}{I_c} \cong \tan \delta$$

Siendo $\tan \delta$ el factor de disipación, también se puede calcular con la siguiente formula:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega CR}$$

Donde: $\omega = 2\pi f$
 C = capacitancia del cable en Faradios
 R = resistencia del cable en Ohms.

Si el aislante del cable esta libre de defectos, como arborescencias acuosas, arborescencias eléctricas, humedad o burbujas de aire, las propiedades del cable se aproximan a un capacitor perfecto. En un capacitor perfecto, la tensión y la corriente están desfasadas 90° y la corriente a través del aislante es capacitivo. Si existen impurezas en el aislante, como los mencionados anteriormente, la resistencia en el aislamiento decrece, resultando en un aumento en la corriente resistiva a través del aislante.

3.5.2 Reactancia Capacitiva

La reactancia capacitiva de un cable depende inversamente de la capacitancia del cable y la frecuencia a la cual opera.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Xc = reactancia capacitiva en Ohms por kilómetro
 f = frecuencia en Hz
 C = capacitancia en Faradios por kilómetro

3.5.3 Inductancia

Un campo magnético variable es creado cuando una corriente eléctrica alterna pasa a través de un conductor. Este campo interactúa con los campos magnéticos de otros conductores adyacentes que transportan corriente. El campo magnético variante en el tiempo dividido por una corriente variante en el tiempo, se le llama Inductancia. La inductancia total del cable (L) esta compuesta por la inductancia interna o propia (Lo) y la inductancia mutua o externa (Lm) $L=Lo+Lm$. La inductancia mutua es causada por la interacción de conductores adyacentes que transportan una corriente alterna, la inductancia mutua depende de la separación y disposición de los cables, de la construcción del cable en cuanto al conductor y si está provisto o no de pantallas o cubiertas metálicas y conexión a tierra de las mismas. La inductancia L para un cable tripolar o para tres cables monopolares se obtiene de la siguiente forma:

$$L = k + 0.2Ln \left(\frac{2S}{d} \right) \times 10^6 \left[\frac{H}{m} \right]$$

donde: L – Inductancia del cable por metro.
 k – Inductancia propia, dependiendo de la construcción del conductor.
 S – Espacio entre centros de conductores adyacentes.
 d – diámetro del conductor.

CAPÍTULO 3

Para definir la distancia S entre conductores, hay dos tipos de arreglos que se utilizan en la instalación de cables de potencia. En triángulo equilátero (Fig. 3.10), y formación plana (Fig. 3.11), en ambos casos se determina la Distancia Media Geométrica (DMG)

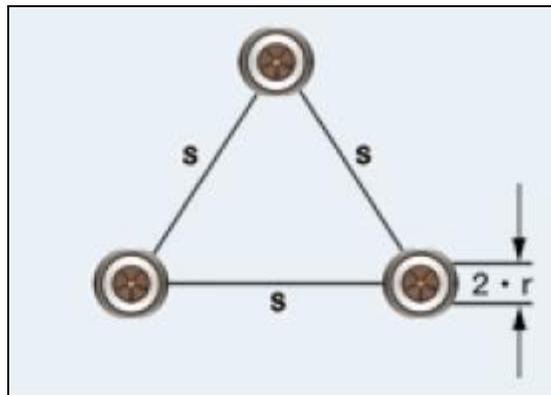


Fig. 3.10

Para este caso la DMG queda como sigue:

$$DMG = \sqrt[3]{S^3} = S.$$

El diámetro del conductor d esta especificada por los fabricantes, ya sea indicando el diámetro o el radio del conductor $d = 2 * r$.

Para la configuración plana, $DMG = \sqrt[3]{S_x S_x 2S} = \sqrt[3]{2S^3} = 1.26S$

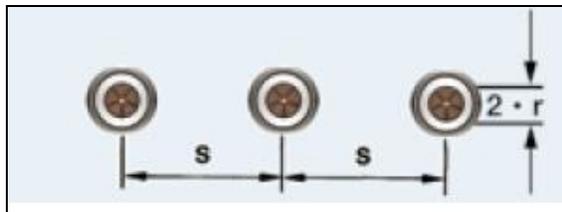


Fig 3.11

La inductancia mutua esta en función del tipo de conductor, ante la posibilidad de conocer el número de alambres que constituyen el conductor, se puede emplear el cálculo del Radio Medio Geométrico (RMG), tabla 3.4(a) otra forma de determinar la inductancia mutua, es utilizar tablas con el valor aproximado de k , tabla 3.4 (b)

Construcción del conductor	RMG
Alambre sólido	$0.779 r$
Cable de un solo material	
7 hilos	$0.726 r$
19 hilos	$0.758 r$
37 hilos	$0.768 r$
61 hilos	$0.772 r$
91 hilos	$0.774 r$
127 hilos	$0.776 r$

$r =$ radio del conductor

Tabla 3.4 (a)

TABLE 4.7 Approximate Values of K for Stranded Conductors

Number of Wires in Conductor	K
3	0.078
7	0.064
19	0.055
37	0.053
61	0.051

Tabla 3.4 (b)

CAPÍTULO 3

- (a) Radio Medio Geométrico de conductores usuales.
- (b) valor aproximado k de tablas.

Como ejemplo, a continuación se presenta la fórmula para calcular la inductancia por parte de ABB en su Guía de Usuarios de Sistemas de Cable XLPE (*XLPE Cable Systems, User's guide*)

$$L = 0.05 + 0.2 \text{Ln} \left(\frac{K * S}{r} \right) \left[\frac{\text{mH}}{\text{km}} \right]$$

- K = 1, en formación triangular equilátera, K= 1.26, en formación plana.
- S = distancia entre ejes de conductores (mm)
- r = radio del conductor (mm)

Dependiendo de cada fabricante, se puede utilizar para el cálculo de la inductancia las siguientes ecuaciones:

$$(a)... \quad L(a) = 0.05 + 0.2 \text{Ln} \left(\frac{k * S}{r} \right)$$

$$(b)... \quad L(b) = 0.05 + 0.2 \text{Ln} \left(\frac{2 * k}{d} \right)$$

En la ecuación (a) se utiliza el radio del conductor (r) proporcionado por el catálogo del fabricante según el área de sección transversal elegido. En la ecuación (b) se utiliza el diámetro del conductor (d) proporcionado por el catálogo del fabricante según el área de sección transversal elegido. $K = 1$, en formación equilátera, $K = 1.26$, en formación plana.

3.5.4 Reactancia Inductiva del cable

La reactancia inductiva de un circuito eléctrico esta basada en la Ley de Faraday. Esta ley establece que la tensión inducida que aparece en un circuito es proporcional a la relación del cambio del flujo magnético que los une o liga.

La inductancia de un circuito eléctrico que consiste de conductores paralelos, como lo es un cable de un solo conductor concéntrico, puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$X_L = 2\pi f (0.01404 \log_{10} \left(\frac{S}{r} + 0.153 \right)) \times 10^{-3}$$

Donde.

X_L = Ohms por 1000 pies

S = distancia del centro del conductor del cable al centro del cable aterrizado o conectado a tierra.

R = radio del conductor central

3.5.5 Impedancia en el conductor del cable.

La impedancia del conductor del cable puede calcularse con la siguiente formula:

$$Z = R_{ac} + jX_L$$

Donde:

Z = Impedancia del conductor en Ohms por 1000 pies

R_{ac} = Resistencia en ca en Ohms por 1000 pies.

X_L = Reactancia del conductor en Ohms por 1000 pies

CAPÍTULO 3

La impedancia del conductor se convierte en un factor importante cuando se calcula la caída de tensión. El ángulo del factor de disipación y el ángulo de la impedancia son diferentes, el cálculo de la caída de tensión puede ser fastidioso.

La siguiente ecuación de caída de tensión, puede usarse como una buena aproximación:

$$V_D = R_{ac} + I \cos \theta + X_L I \sin \theta$$

Donde:

V_D = caída de tensión de fase a neutro en Volts

R_{ac} = resistencia en ac

3.5.6 Resistencia en corriente alterna (c.a.)

3.5.6.1 Resistencia del conductor en corriente directa (c.d.)

La resistencia a la corriente directa de un conductor eléctrico, formado por un alambre de cualquier material, está expresada por la fórmula:

$$R_{cd} = \rho \frac{L}{A} [\Omega]$$

Donde: L = longitud del conductor

A = área de la sección transversal del conductor

ρ = resistividad volumétrica del material del conductor

El valor de la resistividad por unidad de masa para el cobre suave, que ha normalizado la IACS a 20 °C y 100% de conductividad es 0.15828 $\Omega \cdot \text{gr}/\text{m}^2$. Para su aplicación práctica, la resistividad se suele dar por volumen. Algunos valores, en diferentes unidades usadas en los cálculos de ingeniería, son:

Resistividad por unidad de volumen para cobre suave IACS 100%	1.7241	$\mu\Omega\text{-cm}$	0.67879	$\mu\Omega\text{-pulgada}$
	10.371	$\Omega\text{-cmil/pie}$	17.241	$\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$

Los valores para el aluminio grado EC (Aluminio 1350 para usos eléctricos, de acuerdo a ASTM) con 61% de conductividad a 20°C, según IACS, son:

Resistividad por unidad de volumen para Aluminio 61%	2.828	$\mu\Omega\text{-cm}$	1.1128	$\mu\Omega\text{-pulgada}$
	17.002	$\Omega\text{-cmil/pie}$	28.28	$\Omega\text{-mm}^2/\text{km}$

3.5.6.2 Efecto de cableado

Cuando se trata de conductores cableados, su resistencia es igual a la resistencia de cada uno de los alambres dividida entre el número de ellos.

$$R_{cd} = \frac{R'}{n} = \frac{\rho}{n} x = \frac{L}{A'} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

En donde R' y A' son la resistencia y el área de la sección transversal de cada alambre respectivamente. Sin embargo, esta fórmula sería válida sólo si todos los alambres tuviesen la misma longitud. Como en realidad esto no es exacto, ya que las longitudes de los alambres de las capas

superiores tienen una longitud mayor, el incremento de la resistencia por efecto de cableado, para fines prácticos, se puede suponer:

$$R_{cd} = \rho \frac{L}{A} (1 + k_c) \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

Tabla 3.5

Tipo de cableado	Kc
Redondo normal	0.020
Redondo compacto	0.020
Sectorial	0.015
Segmental	0.020

K_c es el “factor de cableado”; los valores correspondientes para diversos tipos de cuerdas se encuentran en la tabla 3.5

En los catálogos de los fabricantes, normalmente se indica la resistencia en corriente directa del conductor a 20°C, incluso pueden venir indicadas las resistencias en corriente alterna. Lo más común es hacer la corrección por temperatura por medio de la siguiente expresión:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ C)]$$

- Donde:
- R_t = Resistencia en corriente directa a la temperatura t
 - R_{20} = Resistencia en corriente directa a 20 °C
 - T = Temperatura del conductor.
 - α_{20} = Coeficiente de corrección por temperatura.
 - $\alpha_{20} = 0.00393$ Cobre suave

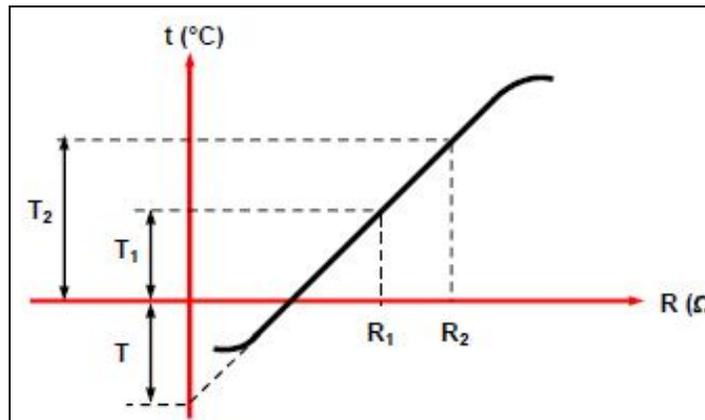


Figura. 3.12

La corrección por temperatura es importante debido a que al incrementar la temperatura, incrementa la resistencia, figura 3.12, el incremento de temperatura se asocia al aumento de pérdidas por el efecto Joule en el conductor, por lo que la capacidad de conducir corriente se ve afectado por la temperatura.

3.5.6.3 Resistencia del conductor en ca (Corriente Alterna).

Si un conductor está transportando altas corrientes alternas, la distribución de la corriente no está distribuida uniformemente en toda la sección transversal del conductor. Esto se debe a dos efectos independientes conocido como el efecto piel y el efecto de proximidad.

3.5.6.4 Factor de efecto piel (Ys)

Si el conductor está compuesto por uno o más elementos circulares concéntricos, la parte central del conductor se verá envuelto por un flujo magnético mayor que aquellos que se encuentren en el exterior. En consecuencia, la auto-inductancia inducida por vuelta será mayor hacia el centro del conductor, causando así que la densidad de corriente sea menor en el centro que en la superficie del conductor. Esta concentración adicional en la superficie es conocida como el efecto piel, y resulta en un aumento de la resistencia efectiva del conductor. A continuación se presenta la ecuación para calcular el factor Ys del efecto piel.

$$Y_s = \frac{X_s^4}{(192 + 0.8X_s^4)}$$

$$X_s^2 = 8 * \pi * f(Hz) * k_s * 1x10^{-7} / Rdc_t$$

f = Frecuencia (Hz)

ks = Factor determinado por la construcción del conductor, 1 para forma circular, trenzado, compactado y sectorial. Ver Tabla 3.6

Rdct = Resistencia en DC a la temperatura de operación t.



Fig. 3.13 Ilustración del efecto piel.

3.5.6.5 Efecto de proximidad, factor (Yp).

El efecto de proximidad también aumenta la resistencia efectiva y se asocia con los campos magnéticos de dos conductores que están próximos entre sí. Si cada uno lleva una corriente en la misma dirección, la mitad de los conductores más próximos, recortarán más flujo magnético que las mitades mas distanciadas. En consecuencia, la actual distribución no es uniforme en toda la sección transversal, una mayor proporción es transportada por las mitades mas alejadas. Si las corrientes están en direcciones opuestas, las dos mitades próximas, llevarán la mayor densidad de corriente.



Fig. 3.14 (a)



Fig. 3.14 (b)

(a) Efecto de proximidad cuando los conductores llevan corriente en la misma dirección. (b) cuando los conductores llevan corriente en direcciones opuestas.

CAPÍTULO 3

Para cables de un conductor o tres conductores, Y_p se calcula como sigue:

$$Y_p = X_p^4 / (192 + 0.8X_p^4) * (d_c / S)^2 * [0.132 * (d_c / S)^2 + 1.18 / \{X_p^4 / (192 + 0.8X_p^4) + 0.27\}]$$

Donde:

$$X_p^2 = 8 * \pi * f(\text{Hz}) * k_p * 1 \times 10^{-7} / R_{dc}$$

F = Frecuencia (Hz)

K_p = Factor determinado por la construcción del conductor, 1 para forma circular, trenzado, compactado y sectorial, 0.8 si los conductores son secados e impregnados. Ver Tabla 3.6

d_c = diámetro del conductor en (mm)

R_{dct} = Resistencia en corriente directa a la temperatura de operación t.

S = Distancia entre centros de conductores (mm)

Para cables en formación plana, S = 1.26S

Tabla 3.6. Valores K_s y K_p

Forma del conductor	K _s	K _p
Redondo normal	1.0	1.0
Redondo compacto	1.0	1.0
Segmental	0.435	0.37

Tomando en consideración tanto el efecto piel como el de proximidad, la resistencia en corriente alterna a una temperatura t esta dado por:

$$R_{act} = R_{dct} [1 + Y_s + Y_p]$$

3.6 Resistencia de aislamiento del cable.

La resistencia a un flujo de corriente directa a través de un material aislante (dieléctrico) se conoce como Resistencia de Aislamiento. Hay dos posibles formas en las que la corriente fluye cuando se va a medir la resistencia de aislamiento:

- A través del cuerpo del aislamiento (resistencia transversal del aislamiento)
- Sobre la superficie del sistema de aislamiento (resistividad superficial).

La resistencia transversal del aislamiento de un cable es la resistencia que presenta el aislante ante una señal de tensión de cd tendiendo a producir un flujo radial de fuga a través del material aislante. Esto se expresa como un valor de resistencia en megohms para 1000 pies de cable para un diámetro de conductor y espesor de aislamiento dado. Nótese que esto es para 1000 pies no por 1000 pies. Esto significa que en un cable largo, en el que se lee un valor de resistencia bajo, hay mas trayectorias paralelas para que la corriente fluya a tierra. La formula básica de la resistencia de aislamiento de un cable con un solo conductor de forma cilíndrica es:

$$IR = K * \log_{10} [D/d]$$

Donde:

IR = Resistencia de aislamiento en Megohms para 1000 pies de cable

K = Constante de resistencia del aislamiento.

D = Diámetro sobre el aislante

d = Diámetro bajo el aislante. (sobre el conductor)

Ecuación basada en valores a 60 °C

Para medir la resistencia de aislamiento de un cable, el aislante debe estar rodeado por una malla o pantalla metálica conectada a tierra ó inmerso en agua. Las mediciones de la resistencia son influenciadas de manera importante por la temperatura; a temperaturas altas, baja la resistencia de aislamiento. El fabricante del cable debe proporcionar el factor de corrección de temperatura para el aislante utilizado.

Tabla 3.7

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO		
AISLAMIENTO	ICEA MINIMO	TIPICO
HMWPE	50,000	1,000,000
XLPE&EPR,60V	10,000	100,000
XLPE&EPR, Med. V	20,000	200,000
PVC a 60 °C	2,000	20,000
PVC a 75°	5000	5,000

Cuando se aplica una tensión al conductor del cable, puede haber un flujo de corriente sobre la superficie del material. Esta corriente se suma a la corriente que fluye a través del volumen del aislamiento, la cual aparentemente disminuye la resistencia de aislamiento a menos que esta corriente se elimine mientras se realizan las mediciones.