

## CAPÍTULO III. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL CABLE DE ENERGÍA

Hasta este punto, se han mencionados todos los elementos físicos de un cable de potencia así como su función, sin embargo al quedar hasta ese punto, poco se puede entender sobre el comportamiento del cable mismo y su mantenimiento, por lo cual ahora se presentan los parámetros eléctricos, los cuales son de gran utilidad para la selección del tipo de cable, para conocer las pérdidas eléctricas, el costo económico, la impedancia del cable una vez que ya ha sido seleccionado y que es útil para estudiar el comportamiento en cortocircuito del sistema completo. Conocer los parámetros eléctricos de operación de un cable de potencia son indispensables para el responsable del diseño del sistema, pues permite el estudio no sólo técnico sino también económico que sirve como base para la selección correcta del calibre.

### 3.1 Resistencia eléctrica de un conductor al paso de la corriente directa

Cuando se pone en servicio un sistema eléctrico en el cual obviamente se han involucrado cables de potencia, es bien sabido que el cable se va a calentar, y ese calentamiento crece con el cuadrado de la intensidad de corriente que va a estar en función del material del conductor, a esto se le llama resistencia eléctrica.

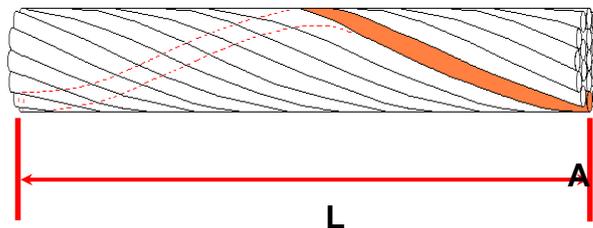


Figura 10. Resistencia eléctrica de un conductor

Fuente: ConduMex. Características de cables de energía de media y alta tensión

La resistencia eléctrica se calcula mediante la expresión:

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

Donde:

$R_{cd}$  = Resistencia del alambre a la corriente directa a 20 °C [ $\Omega$ ]

$\rho$  = Resistividad eléctrica del material del alambre a 20 °C  $\left[ \frac{(\Omega)(mm)^2}{km} \right]$

$L$  = Longitud del alambre [ $km$ ]

$K_c$  = Factor de cableado

$A$  = Área de la sección transversal de cada alambre [ $mm^2$ ]

La siguiente tabla determina el factor de cableado de acuerdo al tipo de conductor.

Tipo de cableado	$k_c$
Redondo normal	0.020
Redondo compacto	0.020
Sectorial	0.015
Segmento	0.020

Tabla 7. Incremento de la resistencia eléctrica por efecto del cableado

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

$\text{mm}^2$	AWG Kcmil	Área de la sección transversal ( $\text{mm}^2$ )	Resistencia eléctrica nominal a la c.d (20°C, Cu suave) $\Omega/\text{km}$
	8	8.37	2.10
	6	13.30	1.322
	5	16.77	1.05
	4	21.15	0.832
	3	26.70	0.660
	2	33.60	0.523
<b>35</b>		34.89	0.504
	1	42.41	0.415
<b>50</b>		48.30	0.364
	1/0	53.50	0.329
	2/0	67.43	0.261
<b>70</b>		69.00	0.255
	3/0	85.00	0.207
	4/0	107.21	0.134
	250	126.70	0.139
<b>150</b>	300	152.01	0.116
	350	177.34	0.0992
	400	202.70	0.0867
<b>240</b>		242.50	0.0726
	500	253.40	0.0694
	600	304.02	0.0578
	700	354.70	0.0496
	750	380.02	0.0463
	800	405.36	0.0434
	1000	506.7	0.0347

Tabla 8. Resistencia a la corriente directa a 20 °C en conductores de cobre con cableado concéntrico normal, comprimido y compacto

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

AWG Kcmil	Área de la sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Resistencia eléctrica nomina a la c.d. a 20°C, Ω/km
2	33.6	0.860
1/0	53.5	0.539
2/0	67.4	0.428
3/0	85.0	0.3391
4/0	107.2	0.269
250	126.7	0.228
350	177.3	0.163
500	253.4	0.114
600	304.0	0.0948
700	354.7	0.0813
1000	506.7	0.0569

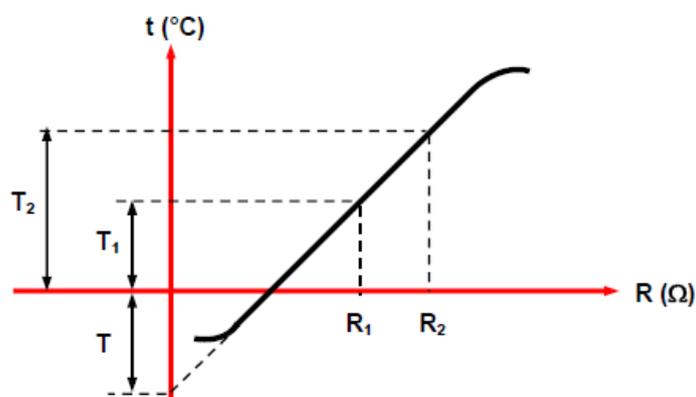
Tabla 9. Resistencia a la corriente directa a 20 °C en conductores de aluminio con cableado concéntrico normal, comprimido y compacto

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

Cabe señalar, que ésta expresión se utiliza cuando el cable está a una temperatura de 20° C, sin embargo como al ponerse en operación la temperatura suele ser mayor que el valor establecido, entonces es necesario determinar qué es lo que sucede con la resistencia de un conductor cuando la temperatura aumenta.

### 3.2 Corrección por temperatura de la resistencia a la corriente directa

Es necesario hacer esta corrección dado que cuando la temperatura de un conductor aumenta, la resistencia también aumenta de forma significativa, tal y como se muestra en la gráfica en donde se comparan justamente éstos dos parámetros, la resistencia y la temperatura.



Gráfica 1. Resistencia vs temperatura

Fuente: Condumex. Manual técnico de cables de energía, capítulo 5

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

Donde:

$R$  = Resistencia del cable a la temperatura  $T$  [ $\Omega$ ]

$R_0$  = Resistencia del cable a la temperatura  $T_0$  (20° C) [ $\Omega$ ]

$\alpha$  = Coeficiente térmico de resistividad eléctrica a 20° C  $\left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$

En la siguiente tabla se tienen los factores de corrección para calcular la resistencia de cobre y aluminio.

Temperatura del conductos en °C	Factor de corrección a 20°C	
	Cobre	Aluminio
0	1.085	1.088
5	1.062	1.064
10	1.040	1.042
15	1.020	1.020
20	1.000	1.000
25	0.980	0.980
30	0.962	0.961
35	0.944	0.943
40	0.927	0.925
45	0.910	0.908
50	0.894	0.892
55	0.879	0.876
60	0.869	0.861
65	0.850	0.846
70	0.836	0.832
75	0.822	0.818
80	0.809	0.805
85	0.796	0.792
90	0.784	0.780

Tabla 10. Factores de corrección por temperatura para cálculo de resistencias de conductores eléctricos de cobre y aluminio

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

### 3.3 Resistencia eléctrica de un conductor al paso de la corriente alterna

Cuando se hace pasar corriente alterna a través de un conductor se produce la inducción de un campo magnético, y si cerca de éste se coloca un conductor más y se pone en movimiento se induce una diferencia de potencial, y al suceder esto, se provoca un aumento de la resistencia y como consecuencia un aumento en las pérdidas eléctricas por efecto Joule.

Es justamente en ese punto donde radica la importancia de calcular éste parámetro eléctrico del conductor.

$$R_{ca} = R_{cd}(1 + Y_s + Y_p)$$

Donde:

$R_{ca}$  = Resistencia en corriente alterna a la temperatura de operación [ $\Omega$ ]

$R_{cd}$  = resistencia en corriente directa a la temperatura de operación [ $\Omega$ ]

$Y_s$  = factor de corrección por efecto piel

$Y_p$  = factor de corrección por efecto proximidad

El efecto piel es de mayor magnitud cuando se trata de conductores con grandes secciones y a frecuencias elevadas, por lo cual es importante calcularlo. Factor de corrección por efecto piel:

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

$$(X_s)^2 = \left( \frac{8\pi f}{R_{cd}} \right) 10^{-4} k_s$$

$Y_s$  = Factor de corrección de la resistencia por efecto piel

$f$  = Frecuencia del sistema [Hz].

Para sistemas de transmisión de potencia  $f = 60$ [Hz]

$R_{cd}$  = Resistencia del conductor en corriente directa corregida a temperatura de operación  $\left[ \frac{\Omega}{km} \right]$

Para este caso, la constante  $k_s$  se considera de la siguiente manera:

Tipo de conductor	$k_s$
Redondo	1.0
Segmental ( 4 segmentos)	0.435

Tabla 11. Valores de constante  $k_s$

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

De la forma en cómo debe de tomarse en cuenta el efecto piel, también se considera el factor de corrección por efecto proximidad, es decir, que se plasma la relación que existe entre los conductores centrales se encuentran a una determinada distancia.

Lo anterior se valúa a través de la siguiente expresión:

$$Y_p = \frac{(X_p)^4}{192 + 0.8(X_p)^4} \left( \frac{dc}{s} \right)^2 \left[ 0.312 \left( \frac{dc}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{(X_p)^4}{192 + 0.8(X_p)^4} + 0.27} \right]$$

Y de la misma manera:

$$(X_p)^2 = \left( \frac{8\pi f}{R_{cd}} \right) 10^{-4} k_p$$

Donde:

$Y_p$  = Factor de corrección de la resistencia por efecto proximidad

$f$  = Frecuencia del sistema [Hz]

- Para sistemas de transmisión de potencia  $f = 60$  [Hz]

$R_{cd}$  = Resistencia del conductor en corriente directa corregida a temperatura de operación  $\left[ \frac{\Omega}{km} \right]$

$dc$  = Diámetro del conductor [mm]

$s$  = Distancia entre ejes de los conductores [mm]

Para el caso de la constante  $k_p$ , se tiene que

Tipo de conductor	$k_p$
Redondo	1.0
Segmental ( 4 segmentos)	0.37

Tabla 12. Valores de constante  $k_p$

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 5

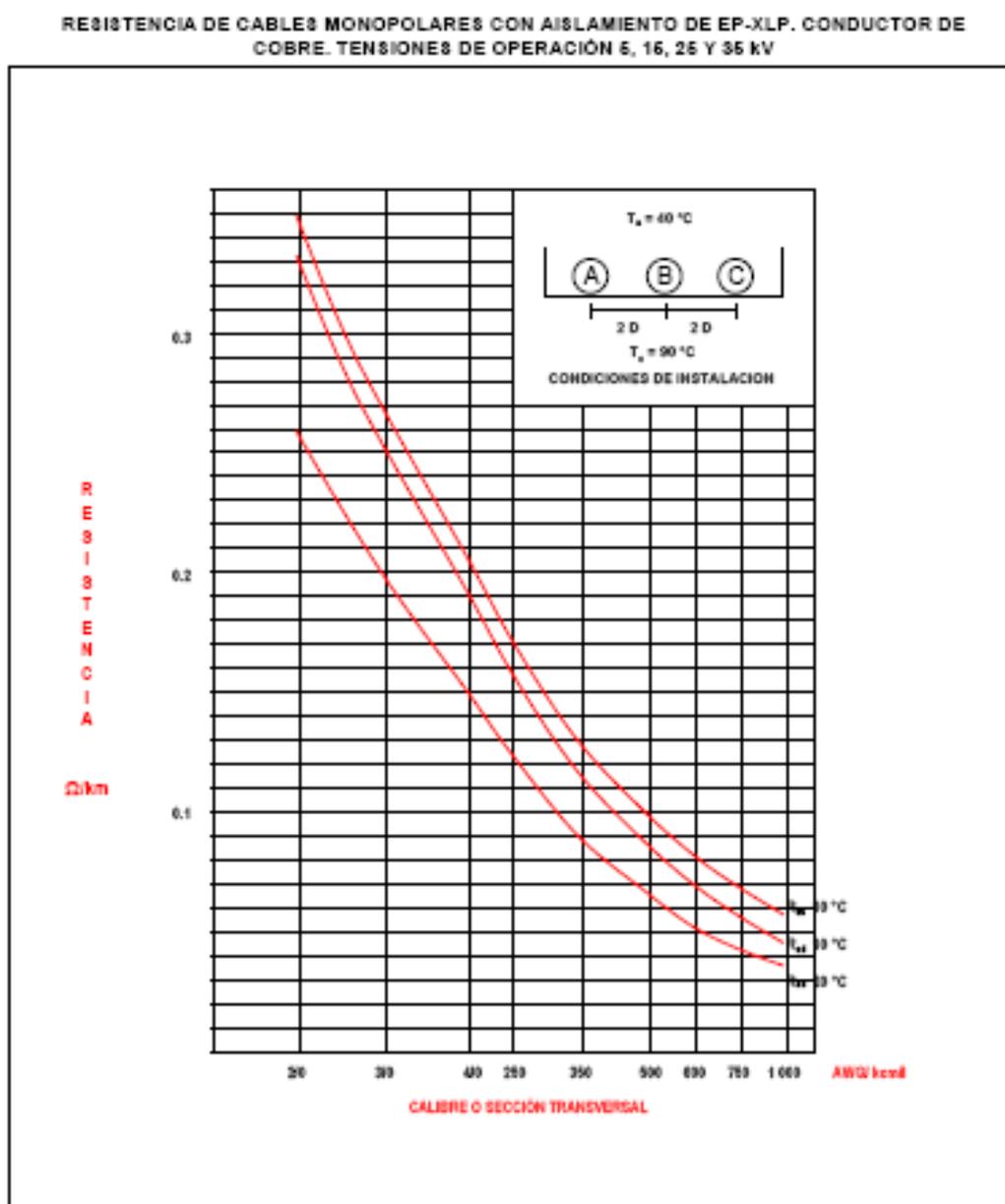
### 3.3.1 Efecto de piel

Es importante mencionar este efecto que se produce cuando al transmitir energía eléctrica a través de un conductor, la corriente que circula se distribuye en la superficie del conductor de acuerdo a la frecuencia de la corriente. Cuando se trata de corriente alterna o directa transmitida a muy baja frecuencia la corriente se distribuye de forma uniforme a través de todo el conductor, sin embargo cuando se aumenta la frecuencia sucede que la corriente circula solamente por la superficie exterior del conductor.

El efecto piel provoca que la resistencia de corriente alterna sea mayor que la de corriente directa, y aún más, cuando se presentan variaciones en la frecuencia, también existen variaciones en la resistencia eléctrica.

### 3.3.2 Efecto de proximidad

Cuando un conductor por el que fluye una corriente alterna se encuentra cercano a otro que transporta corriente de iguales características pero de sentido contrario, crea una resta vectorial de densidad de flujo, originando una reducción en la inductancia en las caras próximas y un aumento en las diametralmente opuestas, dando por resultado una distribución no uniforme de la densidad de corriente y un aumento aparente de la resistencia efectiva, la cual se calcula afectando la resistencia original por un factor  $Y_p$ .



Gráfica 2. Resistencia de cables monopolares con aislamiento EP-XLP, conductor de cobre, 5, 15, 25 y 36 [kV]

Fuente: Condumex. Manual técnico de cables de energía, capítulo 5

Cuando las circunstancias de instalación y por razones de trayectoria impliquen que el sistema de cables se cruce o siga una trayectoria paralela con otros servicios, debe de tomarse en cuenta las condiciones impuestas por la normatividad.

En el caso de que el sistema de cables sea de varios conductores por fase, debe de ponerse especial atención en la manera más recomendable de instalar los cables para evitar efectos de inducción. Por lo cual, deben de seguirse las recomendaciones siguientes:

- Todos los cables de una fase deben tener prácticamente la misma impedancia para evitar que alguno de ellos transmita más corriente y por causa de ello se sobrecaliente, exponiéndolo a un envejecimiento prematuro y posibles fallas.
- Para el caso de líneas cortas (menores a 10 [km]), no es tan relevante que los cables de diferentes fases tengan la misma impedancia.
- Los cables se deben agrupar, de manera que cada circuito debe contener las tres fases.
- La separación entre los circuitos debe ser mucho mayor que la distancia entre centros de cables.

Por lo cual, para cables que tienen una formación plana:

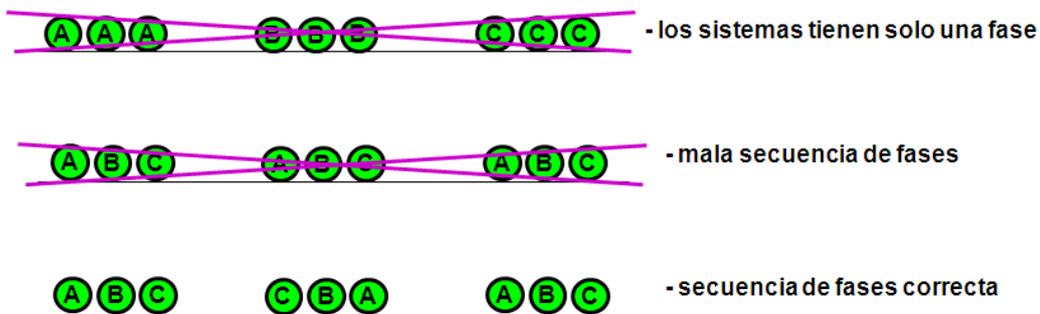


Figura 11. Cables en formación plana

Fuente: Conдумex. Características de cables de energía de media y alta tensión

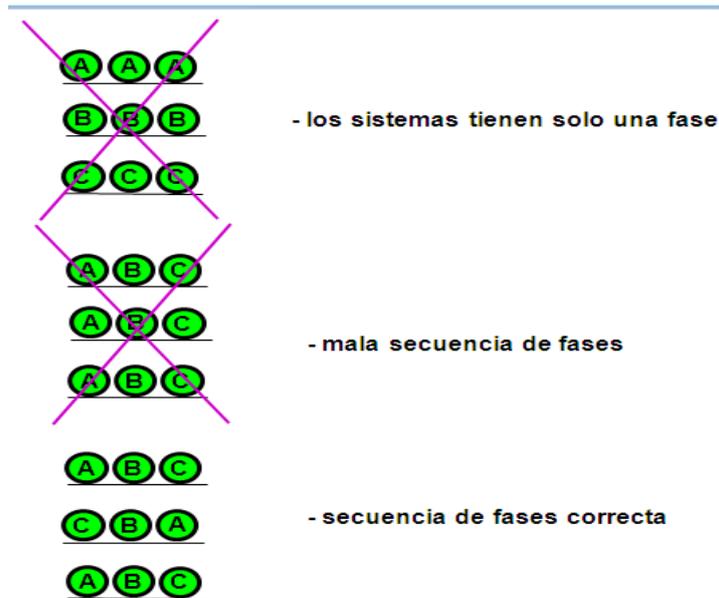


Figura 12. Circuitos de cables en formación plana

Fuente: Condux. Características de cables de energía de media y alta tensión

Para el caso de cables en formación trébol:

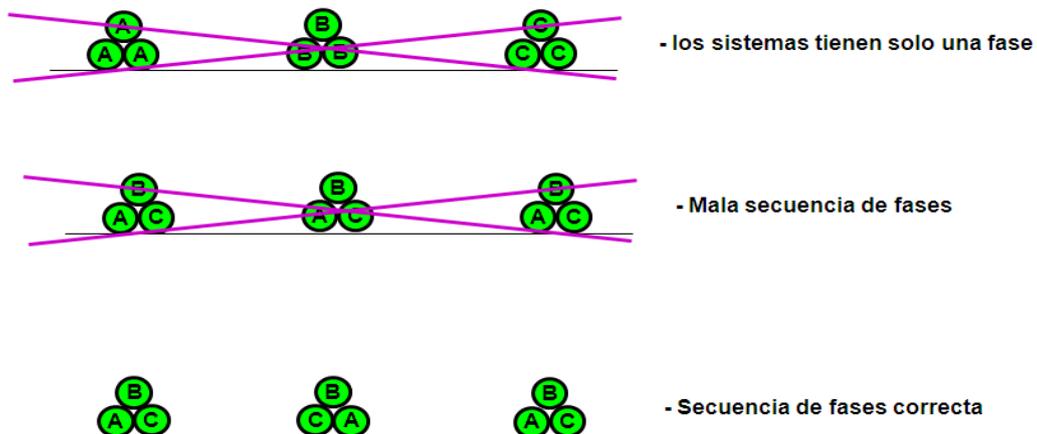


Figura 13. Cables en formación trébol

Fuente: Condux. Características de cables de energía de media y alta tensión

Cuando no sea posible respetar las distancias mínimas indicadas por la normatividad, se recomienda instalar los cables en ductos.

Cuando el cruzamiento sea entre cables de energía y de telecomunicaciones o de aplicaciones parecidas, deben de protegerse mecánicamente con tubos metálicos y con suficiente protección contra la corrosión.

### 3.4 Inductancia

Cuando circula corriente de magnitud variable en el tiempo a través de un conductor eléctrico, se origina un flujo magnético también variable que enlaza no solamente al conductor en el cual la corriente está circulando, sino que también afecta a los demás conductores del circuito, por los cuales también circulan corrientes de la misma naturaleza. Por lo tanto, se conoce como inductancia a la razón de la variación del flujo magnético con respecto a la variación de la corriente en el tiempo. En este caso, siendo  $L$  la inductancia, se tiene que:

$$L \propto \frac{\text{variación del flujo magnético en el tiempo}}{\text{variación de la corriente en el tiempo}}$$

Como ya se ha mencionado, el efecto de la inductancia se relaciona con lo que se produce como efecto del paso de la corriente variable a través de un conductor, y también con lo generado por los conductores del circuito a través de los cuales producen también un flujo magnético. Por lo cual, la inductancia se reduce a la suma de la inductancia propia del conductor y a la inductancia externa producida por los demás conductores sobre éste primero (también llamada inductancia mutua), por lo cual, la inductancia total se calcula mediante la suma de las inductancias propia y mutua:

$$L_T = L_P + L_M$$

Donde:

$$L_T = \text{Inductancia total} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

$$L_P = \text{Inductancia propia o autoinductancia} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

$$L_M = \text{Inductancia mutua o externa} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

Para calcular la inductancia total de los cables de energía se tienen dos formas, dependiendo de cómo estén conectadas las pantallas metálicas a tierra, si es que permiten o no el paso de corriente. Las dos formas son las siguientes:

- a) Cuando se tienen cables sin pantalla o cubierta metálica, o bien, los cables tienen pantallas o cubiertas metálicas, pero éstas se conectan de tal forma que no permiten el flujo de corriente eléctrica a través del conductor de la pantalla o cubierta. Las fórmulas para calcular se encuentran en la siguiente tabla:

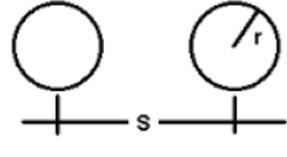
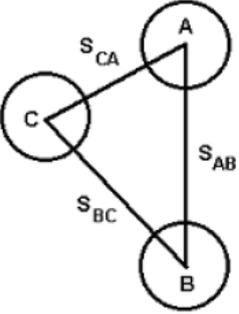
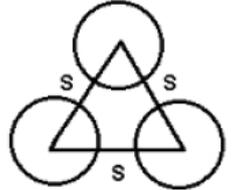
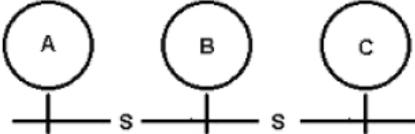
 $L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{S}{RMG} \quad (6.3)$	 <p>El valor medio de la inductancia total del sistema es:</p> $L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (6.5)$ <p>Donde DMG es la distancia media geométrica y queda definida como:</p> $DMG = \sqrt[3]{S_{AB} \times S_{BC} \times S_{CA}} \quad (6.5')$ <p><math>S_{AB} \neq S_{BC} \neq S_{CA}</math> Formación triangular</p>
<p>Formación triangular equidistante</p>  <p><math>L = L_A = L_B = L_C</math></p> $L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{S}{RMG} \quad (6.4)$	 <p>El valor medio de la inductancia total es:</p> $L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad (6.6)$ <p>donde <math>DMG = \sqrt[3]{2} \times S</math></p> <p>Formación plana</p>

Tabla 13. Fórmulas de cálculo de la inductancia total

Fuente: ConduMex. Manual técnico de cables de energía, capítulo 6

- b) Cuando se tienen cables con pantalla o cubierta metálica, o bien, los cables tienen pantallas o cubiertas metálicas, pero éstas se conectan de tal forma que permiten el flujo de corriente eléctrica a través del conductor de la pantalla o cubierta. En éste caso se debe de considerar el flujo que se produce por el efecto de las corrientes.

### 3.4.1 Reactancia inductiva

La reactancia inductiva tiene dos elementos a considerar, cuando no existen corrientes inducidas en las pantallas y cuando existen corrientes inducidas en éstas. En cables de energía con pantalla de alambres de cobre y que tienen conexión a tierra en dos o más puntos se van a producir corrientes circulantes que se van a ver limitadas dado que la sección de la pantalla es pequeña y su resistencia eléctrica alta, lo cual se calcula de la siguiente manera, en donde se toma en cuenta la frecuencia del sistema y el valor de la inductancia total:

$$X_L = 2\pi f L_T \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

Donde:

$$X_L = \text{Reactancia inductiva en } \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

$$f = \text{Frecuencia del sistema en } [Hz]$$

$$L_T = \text{Es la inductancia total en } \left[ \frac{H}{km} \right]$$

### 3.4.1.1 Inductancia propia

La inductancia propia de un conductor es constante, y depende solamente de que el cable sea sólido o cableado. Matemáticamente, se puede considerar un conductor imaginario que no es cortado por el flujo generado, es decir, que está fuera de su alcance, si se afecta la sección conductora por una constante, se obtiene el radio de un conductor imaginario para que todo el flujo pueda ser considerado externo o mutuo.

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 14. Radio medio geométrico de conductores usuales

Fuente: Manual técnico de cables de energía. Capítulo 6

### 3.4.1.2 Inductancia mutua

Para el caso de la inductancia mutua o externa, depende de la separación y disposición de los cables, de la construcción del conductor del cable y si tiene pantallas o cubiertas metálicas y también si éstas están conectadas a tierra.

## 3.5 Capacitancia

El cable de energía tiene un comportamiento de un capacitor, ya que el conductor del cable está al potencial de la línea toma el papel de una de las placas del capacitor, mientras que la pantalla que está a tierra funciona como la otra placa, quedando el aislamiento del cable como dieléctrico del condensador:

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

Donde:

C = Capacitancia [F]

Q = Carga entre los conductores  $\left[ \frac{C}{km} \right]$

V = Diferencia de potencial [V]

La expresión anterior, se utiliza de una forma general, sin embargo para cables de energía, la capacitancia se calcula dependiendo de su construcción geométrica, si es monopolar o tripolar, con o sin pantalla, así como del espesor del aislamiento y su material.

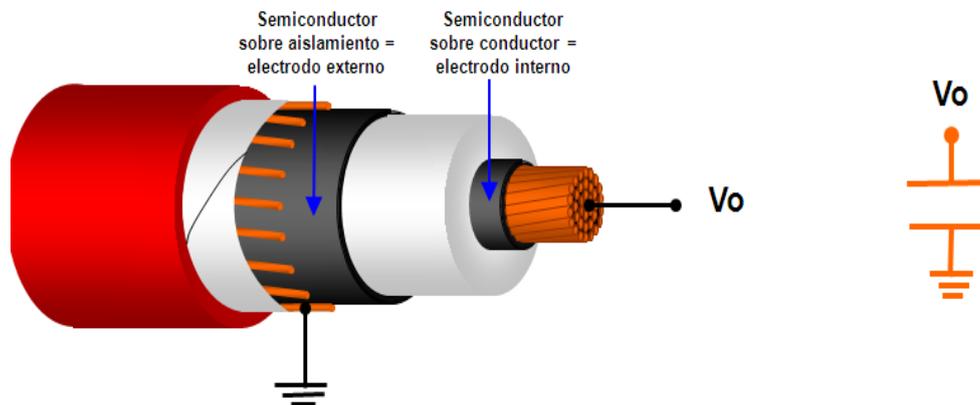


Figura 14. Capacitancia del cable

Fuente: Condumex. Características de cables de energía de media y alta tensión.

Para un cable monopolar y con pantalla o cubierta metálica, se tiene que el cable representa a un capacitor en el que el conductor se encuentra al potencial de la línea representa una de las paredes, y la pantalla o cubierta metálica que está conectada a tierra, representa la otra pared y el aislamiento es, por lo tanto, el dieléctrico. La fórmula para calcular la capacitancia de un cable con éstas características es:

$$C = \frac{0.0241 SIC}{\log_{10}\left(\frac{d_a}{d_e}\right)} \times 10^{-6} \left[ \frac{F}{km} \right]$$

Donde:

$SIC$  = Capacitancia inductiva específica del aislamiento

$d_a$  = Diámetro sobre el aislamiento [mm]

$d_e$  = Diámetro bajo el aislamiento [mm]

Una expresión íntimamente relacionada con la capacitancia, es la que se tiene a continuación:

$$I = 2\pi fCLV$$

Donde:

$I$  = Corriente capacitiva en el cable [A]

$f$  = Frecuencia del sistema [Hz]

$L$  = Longitud del cable [km]

$V_0$  = Voltaje de fase a tierra del sistema [V]

### 3.5.1 Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva es otro parámetro que se calcula de la siguiente manera:

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

Donde:

$X_c$  = Reactancia capacitiva  $[\Omega - km]$

$f$  = Frecuencia del sistema  $[Hz]$

$C$  = Capacitancia  $\left[ \frac{F}{km} \right]$

### 3.5.2 Capacitancia inductiva específica (SIC)

Para el cálculo de la capacitancia, existen dos constantes que pueden ser utilizadas para su cálculo, en éste caso la capacitancia inductiva específica (SIC) es la razón entre la permitividad eléctrica del aislamiento que se utiliza y la permitividad eléctrica del aire, por lo que se tiene:

$$SIC = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Donde:

$SIC$  = Capacitancia Inductiva Específica

$\varepsilon$  = Permitividad eléctrica del aislamiento que se utiliza  $\left[ \frac{F}{m} \right]$

$\varepsilon_0$  = Permitividad eléctrica del aire  $\left[ \frac{F}{m} \right]$

### 3.5.3 Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es un parámetro característico de la capacidad de un material dieléctrico (en este caso aislamiento) en un capacitor para producir almacenamiento de energía, mientras más grande sea su valor, mayor será la capacidad.

Por lo que para cada uno de los aislamientos utilizados en los cables de energía se tiene un valor diferente de la constante dieléctrica, en la siguiente tabla se tienen los valores de la SIC de acuerdo a los diferentes aislamientos más usados en cables:

Se tiene la siguiente tabla en donde se presentan los valores de la capacitancia inductiva específica y  $\tan \delta$  para los aislamientos más comúnmente usados.

Aislamiento	$\tan \delta$ (por unidad)	SIC
EP	0.015	2.6
XLP	0.001	2.1
Papel impregnado	0.011	3.9

Tabla 15. Valores de la constante inductiva específica (SIC) y  $\tan \sigma$  para aislamientos empleados usualmente

*Fuente: Cables eléctricos aislados: Descripción y aplicaciones practicas*

### 3.6 Impedancia

La impedancia puede entenderse como una representación compleja de las funciones sinusoidales que permiten establecer una relación entre la amplitud y el ángulo de fase de la corriente y la tensión.

Cuando un circuito que es excitado por una fuente de tensión, que resulta ser una función sinusoidal del tiempo a una frecuencia establecida, va a circular por éste una corriente que depende del tiempo y de la misma frecuencia, además de que tendrá una amplitud y ángulo de fase que dependen de la tensión que sea aplicada, así como de la resistencia, inductancia y capacitancia del mismo circuito.

Para considerar el concepto de impedancia, se tienen que mencionar previamente algunos otros junto con las expresiones matemáticas que los definen. Cuando se alimenta un elemento resistivo  $R$  con una tensión  $E$  se genera el flujo de una corriente  $I$  de magnitud correspondiente con la ley de Ohm.

$$I = \frac{E}{R}$$

Ahora bien, si el elemento resistivo es sustituido por un elemento reactivo  $X$ , inductivo o capacitivo, el flujo de la corriente ahora sería:

$$I = \frac{E}{X}$$

En éste caso, el flujo de corriente estaría desfasado  $90^\circ$  con respecto al voltaje aplicado, ya sea atrasado o adelantado, según la reactancia sea inductiva o capacitiva.

De manera más precisa, considerando que en un circuito siempre están presentes la combinación de resistencias, capacitancias o inductancias, es imprescindible utilizar el concepto de impedancia junto con la ley de Ohm generalizada.

$$I = \frac{E}{Z}$$

Donde:

$I$  = Flujo de corriente

$E$  = Voltaje de aplicación

$Z$  = Impedancia

Si el circuito con el que se esté trabajando presenta una resistencia y una inductancia en serie, entonces la impedancia tiene que expresarse así:

$$Z = R + jX_L$$

Donde:

$R$  = Resistencia

$X_L$  = Reactancia inductiva

El operador  $j$  significa un giro de  $90^\circ$  a la parte imaginaria de la ecuación anterior, por lo que la ecuación para calcular el módulo o la magnitud de la impedancia se tiene:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Y para calcular el ángulo de fase o argumento de la impedancia se tiene:

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

### 3.7 Pérdidas eléctricas

Las pérdidas eléctricas están siempre presentes en un circuito formado por un cable de potencia, debido al efecto Joule, a través del cual se disipa energía eléctrica en forma de calor.

Es decir, cuando un cable se pone en servicio y comienza a transportar energía, éste se calienta a causa de las pérdidas que se originan en sus diferentes componentes, como el conductor, el aislamiento y las pantallas metálicas.

### 3.7.1 En el conductor

Se tiene que para un cable por efecto Joule, el calor generado en el conductor se calcula mediante la expresión:

$$w_c = I^2 R \times 10^{-3} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

Donde:

$w_c$  = Calor generado en el conductor (Pérdidas)  $\left[ \frac{kW}{km} \right]$

$I$  = Corriente eléctrica en el conductor [A]

$R$  = Resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura de operación  $\left[ \frac{\Omega}{km} \right]$

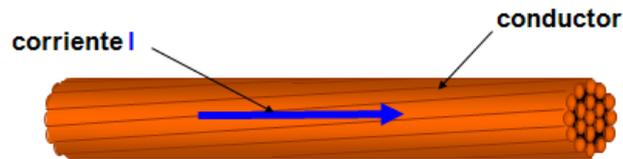


Figura 15. Paso de corriente eléctrica a través de un conductor

Fuente: Condumex. Características de cables de energía de media y alta tensión.

La expresión anterior muestra que cuando circula corriente eléctrica en un conductor, parte de esa energía se transforma en calor a causa del choque que se presenta entre las moléculas del conductor por el que circulan, aumentando de ésta manera la temperatura de éste. Con el objetivo de cuantificar las pérdidas en un periodo de tiempo, se evalúan las pérdidas en unidades de energía, en este caso [Kw-h], y de la ecuación anterior se obtiene

$$W_c = w_c L N H F_p \left[ \frac{kW-h}{año} \right]$$

Donde:

$w_c$  = Pérdidas evaluadas  $\left[ \frac{kW}{km} \right]$

$L$  = Longitud del circuito [km]

$N$  = Número de cables del sistema

$H$  = Horas efectivas de operación del sistema [h]

$F_p$  = Factor de pérdidas

A su vez, el factor de pérdidas viene determinado por:

$$F_p = 0.3F_C + 0.7F_C^2$$

Donde:

$F_C$  = Factor de pérdidas en por unidad

### 3.7.2 En el aislamiento

Está muy claro que aún los materiales aislantes están sujetos a una diferencia de potencial y por lo tanto a una circulación de corriente, la cual también produce calor. Las pérdidas en el aislamiento dependen del tipo de aislamiento, concretamente de la permitividad y el factor de potencia, por lo cual las pérdidas en el aislamiento se calculan:

$$w_d = (2\pi f C E_0^2 \tan \delta) \times 10^{-3} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

Donde:

$f$  = Frecuencia [Hz]

$E_0$  = Voltaje al neutro [V]

$\tan \delta$  = Factor de pérdidas de aislamiento y temperatura de operación

$C$  = Capacitancia del cable  $\left[ \frac{F}{km} \right]$

De la misma manera que en el caso anterior, las pérdidas en el aislamiento también se puede expresar en términos de energía, a través de la siguiente expresión:

$$W_d = w_d L N H \left[ \frac{kW-h}{año} \right]$$

Donde:

$w_d$  = Pérdidas calculadas  $\left[ \frac{kW}{km} \right]$

$L$  = Longitud del circuito [km]

$N$  = Número de cables del sistema

$H$  = Horas efectivas de operación del sistema [h]

En esta expresión se observa que las pérdidas en el aislamiento son constantes, y para que se hagan presentes es suficiente con energizar el cable, aún cuando no haya carga.

### 3.7.3 En la pantalla metálica

La corriente que circula por el conductor de un cable de potencia induce una corriente por las pantallas o cubiertas metálicas cuando se encuentran conectadas en sus extremos. Por lo tanto, también se tiene el cálculo de las pérdidas en la pantalla metálica:

$$w_p = I_p^2 R_p \times 10^{-3} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

Donde:

$$w_p = \text{Calor generado en la pantalla} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

$$I_p = \text{Corriente eléctrica en pantalla} [A]$$

$$R_p = \text{Resistencia de la pantalla a la temperatura de operación} \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

También se tiene que:

$$\lambda = \frac{w_p}{w_c} = \frac{(I_p)^2 R_p}{I^2 R_c}$$

Donde:

$\lambda$  = Relación de pérdidas entre pantalla y conductor

$$w_c = \text{Calor generado en el conductor} \left[ \frac{W}{m} \right]$$

$R_c$  = Resistencia eléctrica del conductor a la corriente alterna a la temperatura de operación  $\left[ \frac{\Omega}{m} \right]$

$I$  = Corriente circulando en el conductor [A]

Para tener las pérdidas en términos de energía, se tiene la siguiente fórmula:

$$W_p = w_p L H F_p \left[ \frac{kW-h}{año} \right]$$

Donde:

$$w_p = \text{Pérdidas evaluadas} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

$L$  = Longitud del circuito [km]

$N$  = Número de cables del sistema

$H$  = Horas efectivas de operación del sistema [h]

### 3.7.4 Otras pérdidas

Adicionalmente a las pérdidas mencionadas en los puntos anteriores, existen otras menos perceptibles pero no por ellos insignificantes, como las pérdidas eléctricas debidas a las corrientes de Foucault, ya que cuando una capa de material magnético envuelve tres almas aisladas y con pantalla, como lo puede ser la armadura de acero de un cable tripolar, o también puede ser una armadura tubular de acero por el que circulan tres cables unipolares, la presencia de la cubierta aumenta las pérdidas en las pantallas, por lo cual es recomendable, que se evita en la medida de lo posible utilizar armaduras de materiales ferromagnéticos.

Existen otras pérdidas por efecto de proximidad, ya que debido a las tensiones que se inducen en las pantallas no son iguales en todo su perímetro se generan en dichas pantallas otras corrientes transversales que son distintas a las longitudinales de circulación, para los cables unipolares éstas corrientes por efecto de proximidad son más intensas cuanto más cercanos estén los cables entre sí.

### 3.7.5 Pérdidas totales

Las pérdidas totales, como es de suponerse no son otra cosa más que la suma de las pérdidas calculadas anteriormente, y en términos de energía se tiene que se calculan mediante:

$$W_T = [(w_c + w_p)F_p + w_d]LHN \left[ \frac{kW \cdot h}{\text{año}} \right]$$

Donde:

$$w_c = \text{Pérdidas evaluadas} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

$$w_p = \text{Calor generado en la pantalla} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

$$w_d = \text{Pérdidas calculadas} \left[ \frac{kW}{km} \right]$$

$F_p$  = Factor de pérdidas

$L$  = Longitud del circuito  $[km]$

$N$  = Número de cables del sistema

$H$  = Horas efectivas de operación del sistema  $[h]$

O bien, se pueden calcular:

$$W_T = W_c + W_d + W_p \left[ \frac{kW \cdot h}{\text{año}} \right]$$

En el caso de cables multiconductores con pantalla común, generalmente las corrientes inducidas son pequeñas, ya que la pantalla o cubierta circunda a todos los conductores, y los efectos inductivos de la corriente en un conductor son neutralizados casi por completo por los efectos de las corrientes en los demás conductores. Sin embargo, para conductores de secciones mayores y corrientes elevadas, la neutralización no es completa y existen pérdidas apreciables en la pantalla. Para cables tripolares con conductores redondos, la resistencia efectiva  $R_e$  se puede calcular con:

$$R_e = \left( \frac{4260S^2}{R_p r_0^2} \right) \times 10^{-6} \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

Donde S, a su vez, está dada por:

$$S = \frac{1}{\sqrt{3}}(d + 2t)$$

Donde:

$d$  = Diámetro del conductor en [cm]

$t$  = Espesor de aislamiento en [cm]

$R_p$  = Resistencia de la pantalla en  $\left[ \frac{\Omega}{km} \right]$

$r_0$  = Radio medio de la pantalla o cubierta en [cm]

