

# CAPÍTULO IV. SELECCIÓN DE UN CABLE DE ENERGÍA DE MEDIA TENSIÓN

Existen varios criterios para la selección del cable que va a ser utilizado para la instalación, y en definitiva es lo más importante antes de realizar la instalación, por lo cual se debe tener la suficiente atención para elegir el o los criterios adecuados para seleccionar el cable que se requiere. A continuación se presentan dichos criterios de selección que dan los elementos suficientes para estar convencidos de que la selección ha sido la correcta.

## 4.1 Por nivel de aislamiento

Los niveles de aislamiento pueden ser del 100%, 133% ó 173%, cada nivel se utiliza dependiendo de la protección asociada al circuito para el cual el cable está prestando el servicio.

El nivel de aislamiento es un criterio de selección del cable poco considerado, sin embargo de vital importancia ya que tiene que ver con el espesor que tendrá el cable, y sobre todo el tiempo en el que una falla se liberará, tomando como referencia el voltaje de operación entre fases y las características del sistema. Los niveles de aislamiento se clasifican:

### 4.1.1 Categoría I. Nivel 100%

En ésta categoría se encuentran los cables que tienen un sistema de protección con relevadores que liberan una falla rápidamente, en un tiempo menor a un minuto. Se puede aplicar a la mayoría de los sistemas que tienen el neutro conectado a tierra.

Cuando el cable para Media Tensión está conectado a un circuito provisto de un relé de protección contra fallas a tierra que despeje el evento tan rápido como sea posible (pero que no supere un minuto de duración), se puede utilizar un cable para Media Tensión con nivel de aislamiento del 100%.

### 4.1.2 Categoría II. Nivel 133%

Se aplican éstos niveles de aislamiento en donde las condiciones de tiempo de operación de las protecciones liberan una falla que ocurra en un tiempo menor a una hora. Se puede utilizar éste nivel de aislamiento en las instalaciones en donde se desee un nivel de espesor mayor al 100%, como por ejemplo los cables submarinos o subacuáticos.

El nivel del 133% se utiliza para sistemas conocidos formalmente como sistemas no aterrizados, se utiliza cuando el tiempo para despeje de fallas no

encaja para un aislamiento del 100% y el tiempo de despeje de la falla no excede una hora de duración.

#### 4.1.3 Categoría III. Nivel 173%

Los cables con este nivel de aislamiento se utiliza en los sistemas en los que el tiempo para liberar una falla es mayor a una hora. Se recomienda usar éste nivel para los sistemas que tienen problemas de resonancia, en los que se pueden presentar niveles de sobretensiones de muy grande magnitud. Ésta categoría no está normalizada, por lo que se debe de evaluar cuidadosamente el diseño del sistema con un 173% de aislamiento.

#### 4.2 Por capacidad de conducción de corriente

El principal elemento que debe de considerarse para definir el cable que ha de ser seleccionado, es la corriente que va a circular por el conductor, y para ello hay que considerar las siguientes expresiones, la potencia de un sistema está definida por:

$$S = VI$$

Donde:

$S$  = Potencia del sistema [kVA]

$V$  = Voltaje del sistema [kV]

$I$  = Corriente del sistema [A]

Por lo que para saber la corriente que va a circular por un sistema trifásico se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$I = \frac{S[kVA]}{\sqrt{3}(V)[kV]} [A]$$

De ésta manera, el valor de la corriente  $I$  determinará el calibre del cable a utilizar, si es que solamente se va a tomar en cuenta éste parámetro para la selección del tipo de conductor y cable.

TamañoDesignación		Capacidad de conducción de corriente para 2 001 V - 5 000 V		Capacidad de conducción de corriente para 5 001 V - 35 000 V	
Mm <sup>2</sup>	AWG o kcmil	90 °C	105 °C	90 °C	105 °C
8,37	<b>8</b>	65	<b>74</b>		
13,3	<b>6</b>	90	99	100	110
<b>21,2</b>	<b>4</b>	120	130	130	140
33,6	<b>2</b>	160	175	170	195
<b>42,4</b>	<b>1</b>	185	205	195	225
53,5	1/0	215	<b>240</b>	225	255
<b>67,4</b>	<b>2/0</b>	250	275	260	295
85,0	3/0	290	320	300	340

107	<b>4/0</b>	335	375	345	390
127	250	375	415	380	430
177	350	465	515	470	525
253	500	580	645	580	650
380	750	750	835	730	820
507	1000	880	980	850	950

TamañoDesignación		Capacidad de conducción de corriente para 2 001 V - 5 000 V		Capacidad de conducción de corriente para 5 001 V - 35 000 V	
mm <sup>2</sup>	AWG o kcmil	90 °C	105 °C	90 °C	105 °C
13,3	<b>6</b>	70	77	75	<b>84</b>
<b>21,2</b>	<b>4</b>	90	100	100	110
33,6	<b>2</b>	125	135	130	150
<b>42,4</b>	<b>1</b>	145	160	150	175
53,5	1/0	170	185	175	200
<b>67,4</b>	<b>2/0</b>	195	215	200	230
85,0	3/0	<b>225</b>	250	230	265
107	<b>4/0</b>	265	290	270	305
127	250	295	325	300	335
177	350	365	405	370	415
253	500	460	510	460	515
380	750	600	665	590	660
507	1000	715	800	700	780

Tablas 16 y 17- Capacidad de conducción de corriente (A) permisible de cables monoconductores de aluminio aislados MT (MV), en configuración tríplex al aire, para una temperatura de los conductores de 90 °C y 105 °C y temperatura de aire ambiente de 40 °C.

*Fuente: Manual técnico de cables de energía, capítulo 10*

La capacidad de corriente de corto circuito del conductor de fase es un parámetro que se debe tener presente en la selección particular del cable para Media Tensión para una instalación determinada.

La corriente máxima de corto circuito en el conductor viene dada por el material y área del conductor, la temperatura máxima que se puede alcanzar y el tiempo de duración de la falla.

### 4.3 Por caída de tensión

Otro criterio que necesita considerarse para la selección del cable es la que tiene que ver con las pérdidas por causa del efecto Joule, ya que es bien sabido que cuando una corriente circula a través de un conductor, éste se calienta y dichas pérdidas se traducen en calor. Por lo tanto, en una caída en la diferencia de potencial que se va acumulando en toda la longitud del cable que finalmente se manifiesta en los extremos, a lo cual se le llama caída de tensión. De ésta manera, es muy importante considerar el calibre y tipo de cable adecuado para evitar que las pérdidas por efecto Joule sean muy altas y de ésta forma mantener una caída de tensión que sea aceptable de acuerdo a las necesidades para las cuales fue diseñado el circuito.

La caída de tensión se determina evaluando las pérdidas que se presentan en el conductor, aislamiento y protecciones metálicas.

La caída de tensión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V = k(I)(l)(R \cos \theta + X \sin \theta) - \frac{1}{2} k(I_c)(X)(l)$$

Sin embargo, por lo general en la caída de tensión que se calcula para líneas cortas, se puede despreciar la reactancia capacitiva, por lo cual la expresión se reduce a:

$$V = k(I)(l)(R \cos \theta + X \sin \theta)$$

Donde:

$k = \sqrt{3}$  Para líneas trifásicas y 2 para líneas monofásicas o de corriente continua.

$I$  = Intensidad de corriente [A]

$l$  = Longitud de línea en [km]

$R$  y  $X$  = Resistencia y reactancia de la línea en  $\left[ \frac{\Omega}{km} \right]$

$\cos \theta$  = Factor de potencia de la instalación.

Las aplicaciones generales de cables de energía aislados para media tensión rara vez implican distancias mayores a los 10 kilómetros, lo que nos permite calcular estos cables como una línea de transmisión corta. En este caso la impedancia está dada por la combinación en serie de la resistencia del conductor con la inductancia del cable, ya que la corriente capacitiva absorbida por el cable es despreciable para los efectos de cálculo.

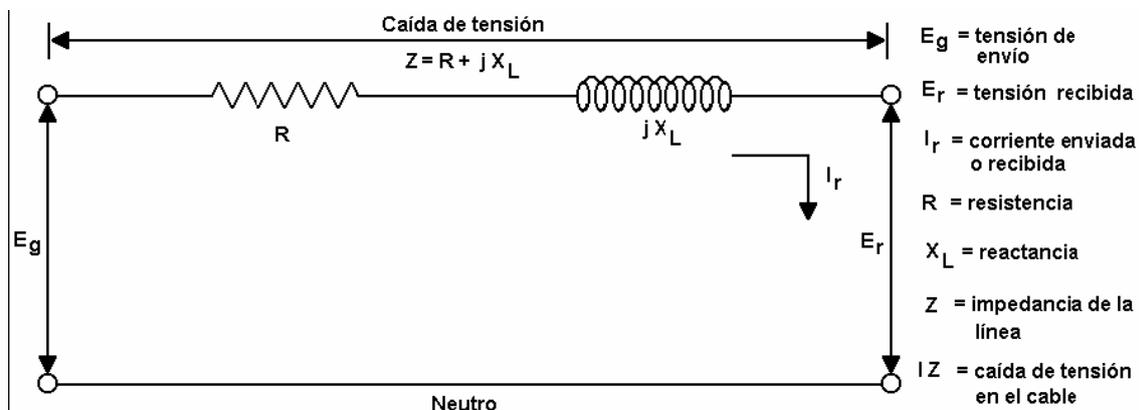


Figura 16. Caída de tensión

#### 4.4 Por regulación de voltaje

La regulación de tensión es un concepto tan importante que se considera como un criterio para seleccionar el calibre de un cable aislado, y dicha selección se basa en que se permita una caída de tensión inferior al 3% en el alimentador respecto a la tensión nominal y que no supere el 5% en la carga más alejada.

La manera de calcular la regulación de voltaje de una forma adecuada es expresada como el porcentaje del incremento de la tensión que se obtiene en el extremo de salida de un cable, cuando se retira una carga con un determinado factor de potencia, en tanto que la tensión del extremo de entrada permanece constante. Debido a que la tensión de entrada suele ser constante, es conveniente que el factor de potencia sea aproximado a 1 para asegurar una tensión de alimentación previsible en el extremo receptor. Por lo cual se calcula:

$$\% \text{regulación} = \frac{|V_{SC}| - |V_{PC}|}{|V_{PC}|} (100)$$

Donde:

$|V_{SC}|$  = Tensión sin carga

$|V_{PC}|$  = Tensión a plena carga

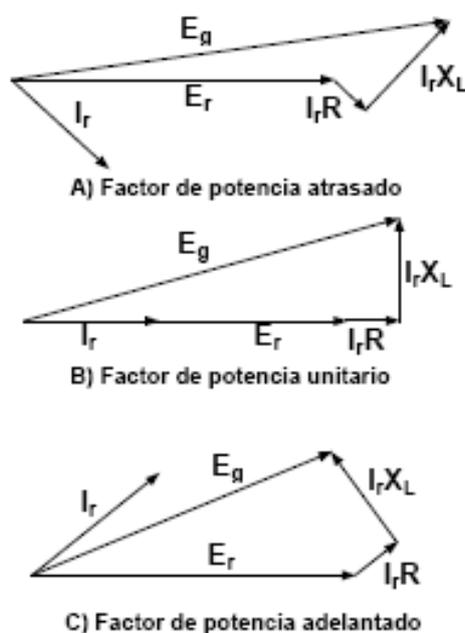


Figura 17. Factor de potencia

En los diagramas fasoriales de la figura se puede observar que se requiere una tensión de envío ( $E_g$ ) mayor (fig. A) para mantener constante la tensión

recibida ( $E_r$ ), cuando la corriente requerida por la carga está desfasada en atraso con respecto a la tensión, en comparación con la misma corriente en fase con  $E_r$  (fig. B). Se requiere una tensión de envío todavía menor para mantener la tensión recibida, cuando la corriente tomada por la carga está desfasada en adelanto. Se dice que, en el primer caso (factor de potencia atrasado) la regulación es mayor, mientras que es menor (factor de potencia unitario) o incluso negativa, cuando el factor de potencia está en adelanto.

#### 4.5 Por corriente de corto circuito

Bajo condiciones de cortocircuito se incrementa con rapidez la temperatura de los elementos metálicos de los cables de energía (conductor y pantalla o cubierta metálica), cuando están diseñados para soportar tal incremento; el límite dependerá de la temperatura máxima admisible para la cual no se deteriore el material de las capas vecinas, esto es, la que resulte menor entre la del conductor, que no dañe al aislamiento, o la de la pantalla, para no deteriorar el aislamiento, pantalla semiconductor o cubierta. En la tabla 18 aparecen los valores máximos aceptados por las normas ICEA.

Material de cable en contacto con el metal	Conductor	Pantalla
Termofijos (XLP o EP)	250	350*
Termoplásticos (PVC o PE)	150	200
Papel impregnado en aceite	200	200

\*Para cables con cubierta de plomo, esta temperatura deberá limitarse a 200° C

Tabla 18. Temperaturas máximas admisibles en condiciones de cortocircuito °C

*Fuente: Manual técnico de cables de energía, capítulo 11*

Si la sección del conductor o de la pantalla no es la adecuada para soportar las condiciones de cortocircuito, el intenso calor generado en tan poco tiempo produce un daño severo en forma permanente en el aislamiento, e incluso forma cavidades entre la pantalla semiconductor y el aislamiento, las cuales provocan serios problemas de ionización.

Por otra parte, para determinar la corriente permisible en el conductor o pantalla, es necesario conocer el tiempo que transcurre antes de que las protecciones operen para liberar la falla.

Asimismo, de acuerdo con el tipo de falla, se deberán verificar los distintos componentes de la siguiente manera:

a) Para el conductor:

- Cortocircuito trifásico balanceado.
- Cortocircuito trifásico desbalanceado, calculando la corriente de falla de secuencia cero.

b) Para la pantalla:

- Cortocircuito de fase a tierra.
- Cortocircuito trifásico desbalanceado, calculando la corriente de falla de secuencia cero.

Interruptores de potencia coordinados por relevadores 2.4-13.8 [kV]	Disparo instantáneo	Relevador de inducción instantáneo	Relevador de inducción de tiempo inverso
Tiempos de relevador en ciclos	0.25-1	0.5-2	6-6000
Tiempo de interrupción del interruptor de potencia en ciclos	3-8	3-8	3-8
Tiempo total en ciclos	3.25-9	3.5-10	9-6000
Fusibles de medio y alto voltaje			
Alta corriente	0.25 ciclos (para fusibles limitadores de corriente operando dentro de sus rangos de diseño)		
Baja corriente	600 segundos (para fusibles tipo E operando al doble de su capacidad nominal; otras capacidades están disponibles con diferentes tiempos considerando el doble de su capacidad nominal)		

Tabla 19. Tiempos estimados de liberación de falla de diversos dispositivos de protección.

Fuente: Manual técnico de cables de energía, capítulo 11

La siguiente ecuación permite verificar la sección del conductor, conocidos los amperes de falla y duración de la misma.

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 t = K \log\left(\frac{T_2 + T}{T_1 + T}\right)$$

Donde:

$I$  = Corriente máxima de cortocircuito permitida, amperes

$K$  = Constante que depende del material del conductor (tabla 20)

$A$  = Área de la sección transversal del conductor, circular mils

$t$  = Tiempo de duración del cortocircuito, segundos

$T$  = Temperatura en °C (bajo cero), en la cual el material del que se trate tiene resistencia eléctrica teóricamente nula (tabla 20)

$T_1$  = Temperatura de operación normal del conductor, °C

$T_2$  = Temperatura máxima de cortocircuito que soporta el aislamiento, °C

Los valores de  $K$  y  $T$  se encuentran en la siguiente tabla:

Material	K	T
Cobre	0.0297	234.5
Aluminio	0.0125	228.0
Plomo	0.00108	236.0
Acero	0.00355	180.0

Tabla 20. Valores de  $K$  y  $T$  para la ecuación anterior

*Fuente: Manual técnico de cables de energía, capítulo 11*

Esta ecuación está basada en la premisa de que, debido a la cantidad de metal concentrado y la duración tan corta de la falla, el calor permanece en el metal formando un sistema adiabático.

Esta consideración es muy cercana a la realidad, en el caso del conductor, pero objetable para las pantallas, ya que éstas tienen una mayor área de disipación de calor y una menor concentración de la masa metálica.

La ecuación anterior resultaría entonces conservadora para las pantallas y, en la mayoría de los casos, daría como resultado mayor área de la necesaria.

Modificando la ecuación podemos encontrar el área de la pantalla de un sistema en que se conozca magnitud y duración de la corriente de falla, o el tiempo de duración de la falla para una pantalla o cubierta de sección conocida.

Cuando se trate de analizar el comportamiento bajo condiciones de cortocircuito de nuestros cables comerciales, con parámetros perfectamente definidos, la fórmula se puede escribir:

$$I = C \left( \frac{A}{\sqrt{t}} \right)$$

A y t tienen el mismo significado anterior, la constante C depende de:

- a) Las unidades de A.
- b) El material del conductor.
- c) El tipo de aislamiento.

<b>Tipo de cable</b>	<b>Conductor*</b>	<b>Pantalla**</b>
<b>Vulcanel (EP o XLP) con cubierta de PVC</b>	141.90	128.28
<b>Sintenax</b>	110.32	138.14
<b>Vulcanel 23 TC</b>	141.90	128.28
<b>Vulcanel (EP o XLP) con cubierta de plomo</b>	141.90	23.68
<b>Vulcanel – DRS</b>	92.76	177.62
<b>Vulcanel – DS</b>	92.76	128.28
<b>6 PT</b>	77.16	23.68
<b>23 PT</b>	83.48	25.65

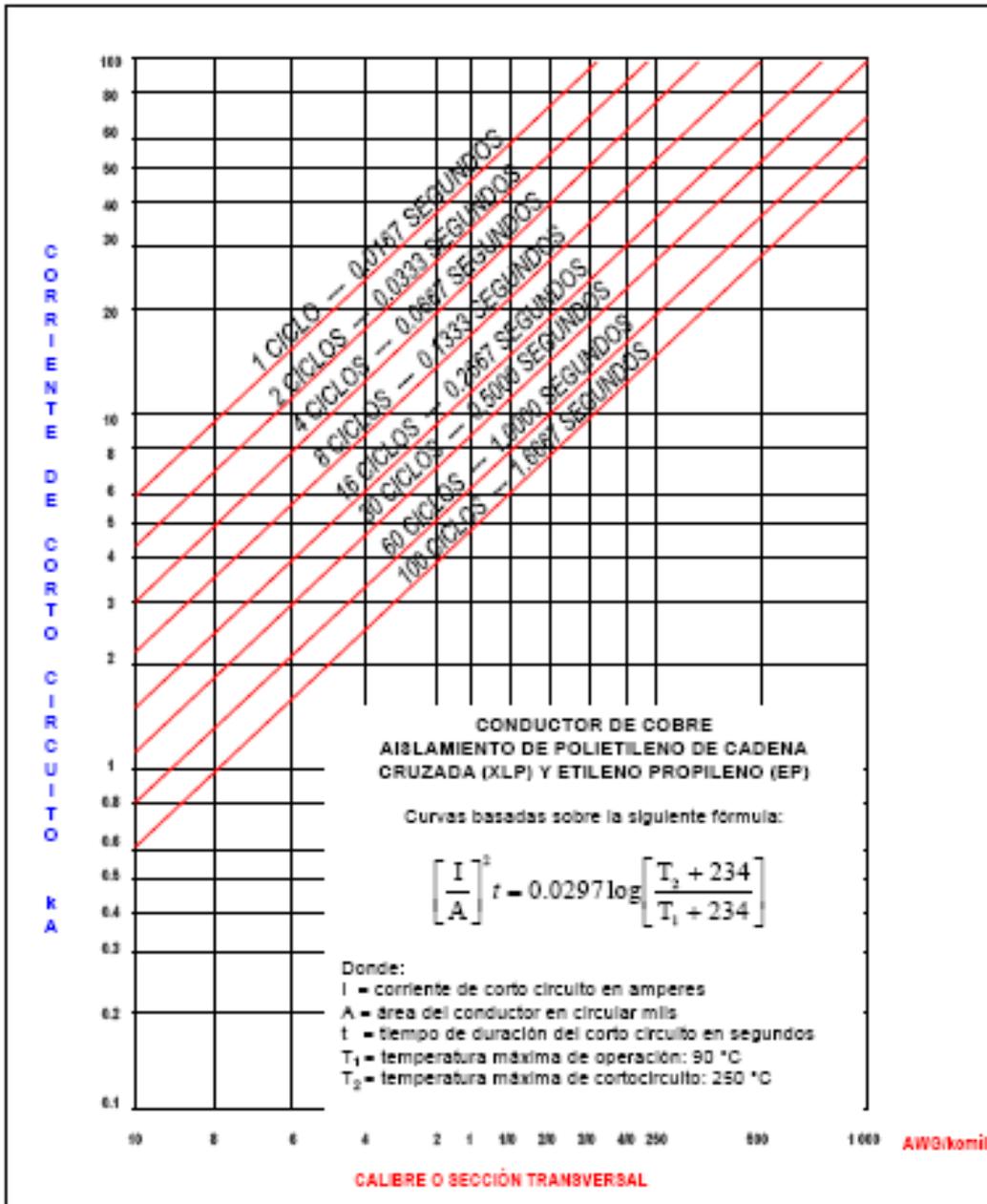
\*Se supone que la temperatura en el conductor es la máxima operación

\*\* La temperatura en la pantalla se considera, para cables de media tensión, 10°C debajo de la del conductor. Las cubiertas o pantallas son las usuales de construcción para los cables aislados.

Tabla 21. Valores de C para determinar la corriente de cortocircuito en el conductor y pantalla o cubierta

*Fuente: Manual técnico de cables de energía, capítulo 11*

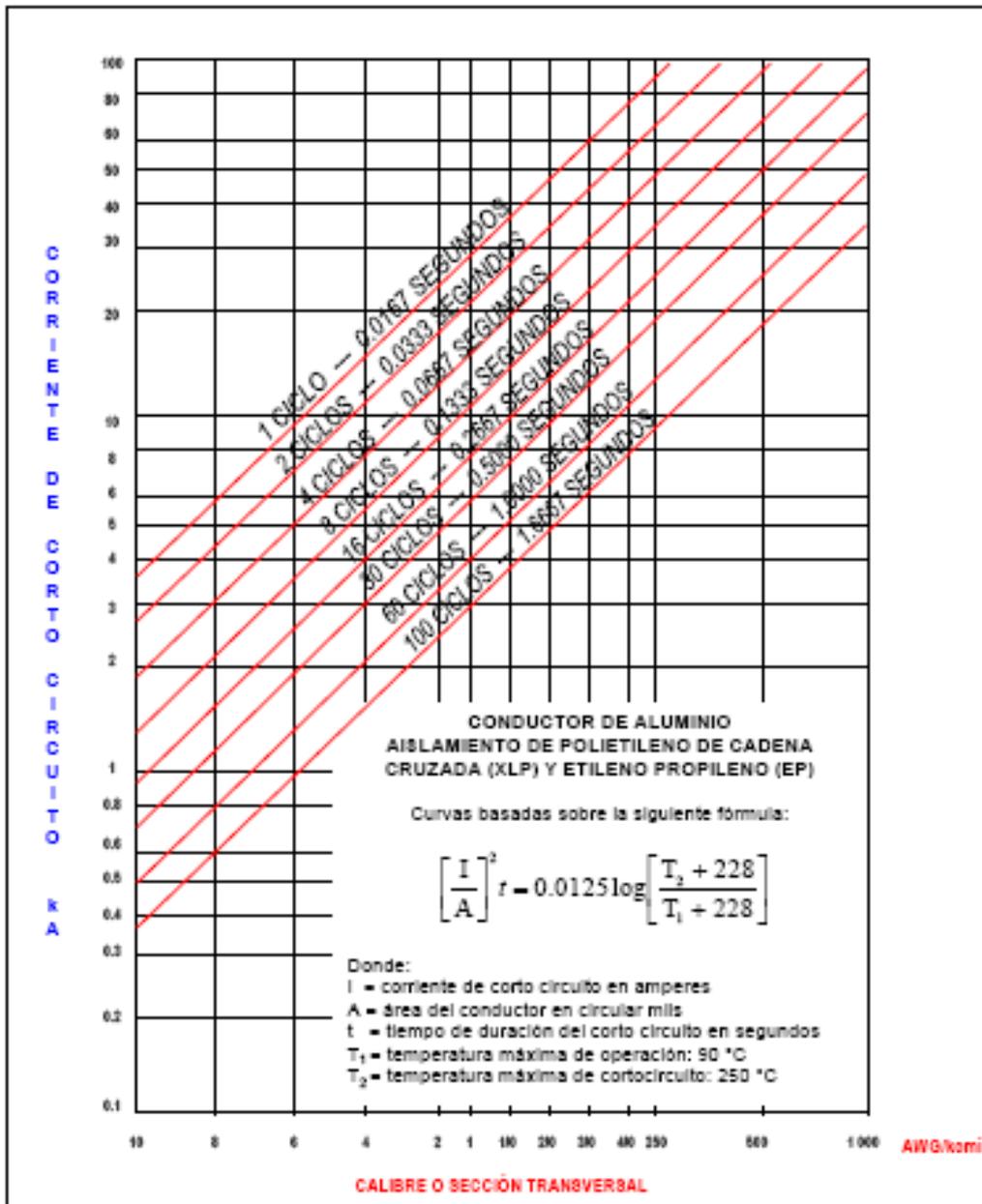
**CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTOR DE COBRE**



Gráfica 3. Corrientes de corto circuito permitidas para cables aislados con conductor de cobre.

Fuente: Condumex. Manual técnico de cables de energía

**CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO PERMISIBLES PARA CABLES AISLADOS CON CONDUCTOR DE ALUMINIO**



Gráfica 4. Corrientes de corto circuito permisibles para cables aislados con conductor de aluminio

Fuente: Condux. Manual técnico de cables de energía, capítulo 11

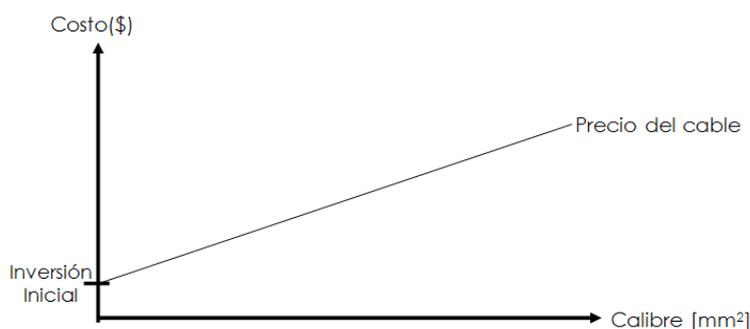
#### 4.6 Por calibre económico

Esta manera de seleccionar un cable de energía da oportunidades de ahorro, ya que mientras menos pérdidas existan en el cable, también existirán menos pérdidas económicas. Anteriormente ya se ha revisado la forma de calcular las pérdidas en los elementos de un cable de energía, las cuales si se evalúan económicamente, adicionadas a los costos por mantenimiento dan como resultado los costos totales de operación del sistema de cables.

Un sistema de cables demanda una carga determinada de acuerdo a lo que ha de alimentar, y a ésta carga corresponde un calibre mínimo aceptable y también un costo mínimo inicial. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que existen calibres mayores al mínimo si se consideran para la misma carga producirían menos pérdidas debido a la menor resistencia eléctrica tanto por el aumento del área conductora como por la temperatura de operación, pero por otro lado implica un mayor costo inicial.

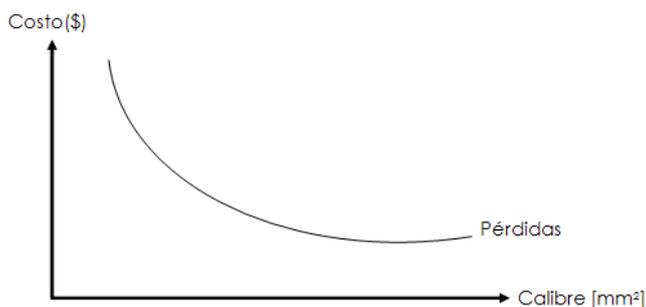
En resumen, para un calibre mínimo aceptable se requiere una menor inversión inicial pero un mayor costo de pérdidas, y para secciones mayores de conductor se tiene que hacer una mayor inversión inicial pero se tienen menos pérdidas eléctricas, estableciendo así una relación inversa de costos de acuerdo al calibre que se seleccione, esto proyectado a varios años permite determinar cuál es la mejor forma de elección del calibre de un cable.

La siguiente figura establece la relación costo-sección [ $\text{mm}^2$ ], que sigue una ecuación lineal, y la tendencia sigue para secciones mayores.



Gráfica 5. Precio del cable y su calibre

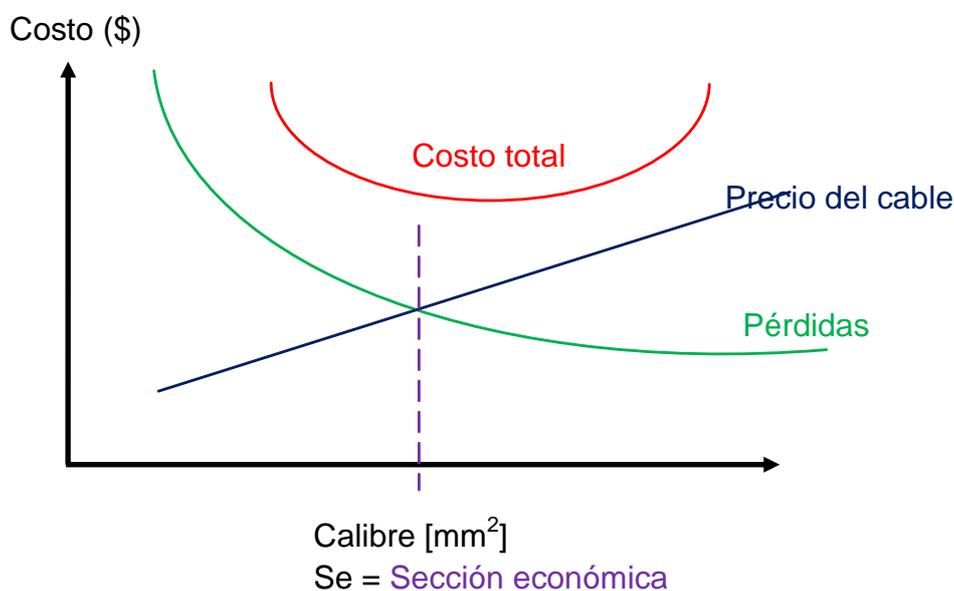
Por otro lado, en la misma relación costo-calibre [ $\text{mm}^2$ ], se tiene que mientras mayor sea el calibre, para una misma carga, menores serán las pérdidas.



Gráfica 6. Costo de las pérdidas

La selección del calibre económico se logra mediante la comparación del costo inicial y las pérdidas, considerando diversos calibres.

Ahora bien, si se suman las pérdidas del cable y su costo, se obtiene una tercer curva que son los gastos totales, de la cual su función se deriva con un valor igual a cero y se obtiene finalmente el calibre económico recomendado.



Gráfica 7. Selección económica del cable

La siguiente ecuación permite calcular la sección económica del conductor, considerando solamente pérdidas en el conductor:

$$S_e = (I) \sqrt{\frac{(\rho)(N)(H)(P)(F_p)(A)10^{-3}}{G}} [mm^2]$$

Donde:

$I$  = Corriente que circula en el conductor [A]

$\rho$  = Resistividad del conductor a la temperatura de operación del cable

$$\left[ \frac{\Omega mm^2}{km} \right]$$

$N$  = Número de cables del sistema

$H$  = Número de horas de operación al año [h]

$P$  = Costo de la energía  $\left[ \frac{\$}{kWh} \right]$

Dado que es una proyección a futuro, se tiene que calcular el precio a un valor actual, por lo cual se tiene que:

$$P = (R) \left( \frac{(1-i)^n - 1}{(1-i)^n (i)} \right)$$

Donde:

R = Número de pagos futuros que se llevarán a valor presente

i = Tasa de interés admisible

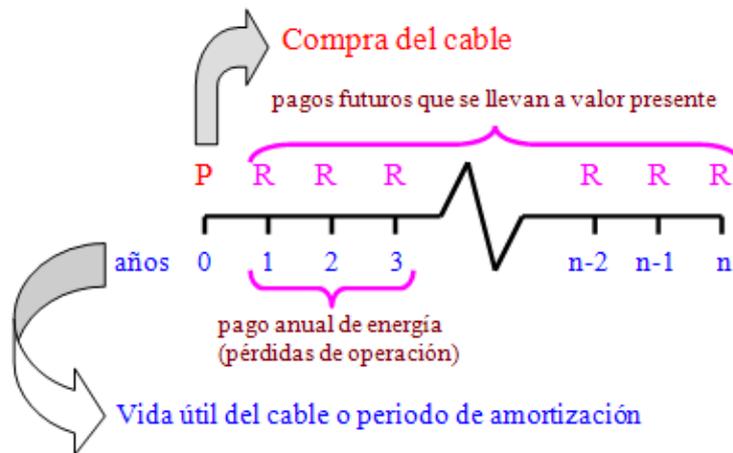


Figura 18. Periodo de amortización del cable

Fuente: Selección del calibre económico como una alternativa para el ahorro de energía

$F_p$  = Factor de pérdidas

A = Factor para convertir a valor presente los costos de las pérdidas de energía ocurridos durante N años a una tasa de interés i.

De donde se desprende que:

$$A = \frac{(1-i)^n - 1}{(1-i)^n (i)}$$

Donde:

i = Tasa de interés admisible

n = Vida útil del cable o periodo de amortización requerido

G = Pendiente de la recta, precio vs calibre de los cables. Esto se calcula de la siguiente manera:

$$G = \frac{(P_2 - P_1)}{(S_2 - S_1)}$$

Donde:

$P_2$  = Precio del cable inicial

$P_1$  = Precio del cable comparativo

$S_2$  = Sección transversal del cable inicial

$S_1$  = Sección transversal del cable comparativo

Con ésta forma de seleccionar el calibre de un cable, se ahorra energía y por lo tanto se tienen menores pérdidas, claro que la inversión inicial es mayor, pero al proyectarse a futuro, el ahorro puede ser considerable.