

DIMENSIONAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS

RICARDO LEÓN MESA PÉREZ
ANDRÉS MAURICIO HENAO RESTREPO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2013

DIMENSIONAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS

RICARDO LEÓN MESA PÉREZ
ANDRÉS MAURICIO HENAO RESTREPO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2013

DIMENSIONAMIENTO DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS

RICARDO LEÓN MESA PÉREZ

ANDRÉS MAURICIO HENAO RESTREPO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor

Boris Darío Pérez Durán

Ingeniero Electricista

Msc. en sistemas energéticos

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2013

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Msc. Boris Darío Pérez Durán, por su apoyo y orientación para la realización de este proyecto.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
CONTENIDO	5
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	9
NOMENCLATURA	10
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. AMBIENTES DE INSTALACIÓN.....	18
1.1. CABLES ENTERRADOS.....	18
1.1.1. <i>Profundidad de excavación</i>	<i>19</i>
1.1.2. <i>Ancho de la excavación.....</i>	<i>20</i>
1.1.3. <i>Solado</i>	<i>20</i>
1.1.4. <i>Cama suave.....</i>	<i>20</i>
1.1.5. <i>Distancia entre dos líneas</i>	<i>20</i>
1.1.6. <i>Relleno</i>	<i>21</i>
1.2. CABLES EN DUCTOS	21
1.3. CABLES EN TÚNELES	23
1.4. CABLES PORTADOS EN BANDEJAS.....	24
2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS	25
2.1. CONDUCTORES.....	25
2.2. PANTALLA SEMICONDUCTORA.....	26
2.3. AISLAMIENTO.....	26
2.3.1. <i>XLPE</i>	<i>27</i>
2.3.2. <i>PVC.....</i>	<i>29</i>

2.3.3.	<i>Polietileno</i>	29
2.4.	PANTALLA SEMICONDUCTORA DEL AISLAMIENTO.....	31
2.5.	PANTALLA METÁLICA.....	32
2.5.1.	<i>Implicaciones del uso de pantallas metálicas</i>	32
2.5.2.	<i>Tipos de Pantalla Metálica</i>	32
2.6.	CHAQUETA PROTECTORA	33
3.	MODELO TERMODINÁMICO.....	35
3.1.	RED ESCALERA	35
3.2.	FUENTES INTERNAS DE CALOR	36
3.2.1.	<i>Pérdidas debidas a efectos dieléctricos</i>	36
3.2.2.	<i>Pérdidas debidas al efecto joule o eddy</i>	36
3.3.	TRANSFERENCIA DE CALOR EN SISTEMAS DE CABLES.....	41
3.3.1.	<i>Conducción</i>	41
3.3.2.	<i>Convección</i>	42
3.3.3.	<i>Radiación</i>	42
3.4.	RESISTENCIA TÉRMICA.....	44
3.4.1.	<i>Resistencias térmicas de los cables de potencia aislados</i>	45
4.	CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	68
4.1.	CABLES DIRECTAMENTE ENTERRADOS.....	68
4.1.1.	<i>Instalaciones en las que no se presenta secado del suelo</i>	68
4.1.2.	<i>Instalaciones donde ocurre secado parcial del suelo</i>	69
4.1.3.	<i>Instalaciones donde el secado del suelo debe ser evitado</i>	70
4.2.	CABLES AÉREOS	70
4.2.1.	<i>Cables protegidos de la radiación solar directa</i>	70
4.2.2.	<i>Cables directamente expuestos a la radiación solar</i>	70
4.3.	CABLES EN TÚNELES.....	71
5.	RECOMENDACIONES	72
6.	CONCLUSIONES	75
	REFERENCIAS	76
	ANEXO A	77
	TABLAS DE AMPACIDAD	78

ANEXO B	84
EJEMPLOS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	85
TRES CABLES XLPE DE 15 KV DIRECTAMENTE ENTERRADOS	85
<i>Condiciones de instalación</i>	85
<i>Características del cable.....</i>	86
<i>Cálculo de las resistencias térmicas.....</i>	87
<i>Parámetros eléctricos</i>	88
<i>Fuentes internas de calor</i>	89
<i>Cálculo de la ampacidad</i>	89
<i>Cálculo de la temperatura al interior del conductor.....</i>	90
TRES CIRCUITOS DE 5 KV EN UN BANCO DE DUCTOS	91
<i>Condiciones de instalación</i>	91
<i>Características del cable.....</i>	92
<i>Cálculo de las resistencias térmicas.....</i>	92
<i>Parámetros eléctricos</i>	94
<i>Fuentes internas de calor</i>	94
<i>Cálculo de la ampacidad</i>	94
ANEXO C.....	96
EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	97
EVALUACIÓN DE RESULTADOS	109

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PERFIL DE UNA EXCAVACIÓN TÍPICA CON CABLE DE POTENCIA AISLADO DE TRIPLE CONDUCTOR	19
FIGURA 2. TENDIDO PLANO DE DOS CIRCUITOS TRIFÁSICOS EN UNA SOLA ZANJA (UNIDADES EN CM)	20
FIGURA 3. PERFIL SIMPLE DE EXCAVACIÓN	21
FIGURA 4. CABLES EN DUCTOS ENTERRADOS CON ESPACIADO TÍPICO DE SISTEMAS DE ALTA TENSIÓN	22
FIGURA 5. CABLES EN DUCTOS ENTERRADOS, CONFIGURACIONES TIPO TRÉBOL Y HORIZONTAL ESPACIADA (UNIDADES EN CM)	22
FIGURA 6. TÚNELES PARA EL TENDIDO DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS CON DIFERENTES FORMAS DE INSTALACIÓN (UNIDADES EN CM)	23
FIGURA 7. SISTEMA DE BANDEJAS PORTA-CABLES	24
FIGURA 8. FORMAS TÍPICAS DE TRENZADO CIRCULAR DE LOS CONDUCTORES DE POTENCIA	27
FIGURA 9. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL POLIETILENO Y EL XLPE	28
FIGURA 10. CABLES DE POTENCIA AISLADOS CON DIFERENTES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	34
FIGURA 11. DIAGRAMA ESCALERA PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL CABLE. DE IZQUIERDA A DERECHA: CONDUCTOR, AISLAMIENTO, PANTALLA, CHAQUETA	35
FIGURA 12. DIAGRAMA ESCALERA PARA MODELADO TÉRMICO EN ESTADO ESTABLE DE UN CABLE DE POTENCIA	45
FIGURA 13. FACTOR GEOMÉTRICO PARA CABLES DE DOS POLOS CON CONDUCTORES CIRCULARES	48
FIGURA 14. FACTOR GEOMÉTRICO G PARA CABLES TRIPOLARES CON CONDUCTORES CIRCULARES	50
FIGURA 15. RESISTENCIA TÉRMICA DE CABLES DE TRES POLOS APANTALLADOS CON CONDUCTORES CIRCULARES COMPARADA CON CABLES NO APANTALLADOS	52
FIGURA 16. RESISTENCIA TÉRMICA DE CABLES DE TRES POLOS APANTALLADOS CON CONDUCTORES EN FORMA DE SECTOR COMPARADA CON CABLES NO APANTALLADOS	53
FIGURA 17. FACTOR GEOMÉTRICO \bar{G} PARA OBTENER LA RESISTENCIA TÉRMICA DEL MATERIAL DE RELLENO ENTRE PANTALLAS Y ARMADURA DE CABLES TIPO SL Y SA	54
FIGURA 18. IMÁGENES DEL MÉTODO DE KENNELLY	55
FIGURA 19. GRUPO DE Q CABLES Y SUS IMÁGENES REFLEJADAS EN LA SUPERFICIE TIERRA-AIRE	57
FIGURA 20. COEFICIENTES DE DISIPACIÓN DE CALOR PARA CABLES AL AIRE LIBRE. PARTE 1	62
FIGURA 21. COEFICIENTES DE DISIPACIÓN DE CALOR PARA CABLES AL AIRE LIBRE. PARTE 2	63
FIGURA 22. COEFICIENTES DE DISIPACIÓN DE CALOR PARA CABLES AL AIRE LIBRE. PARTE 3	63

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ALEACIONES NORMALIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CONDUCTORES DE POTENCIA.....	25
TABLA 2. PROPIEDADES TÍPICAS DEL PVC.....	30
TABLA 3. PROPIEDADES TÍPICAS DEL POLIETILENO.....	30
TABLA 4. EFECTO PELICULAR Y DE PROXIMIDAD, VALORES EXPERIMENTALES PARA KS Y KP	38
TABLA 5. RESISTIVIDAD Y COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE METALES USADOS EN LA FABRICACIÓN DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS	40
TABLA 7. PERMITIVIDAD RELATIVA Y FACTORES DE PÉRDIDA EN EL AISLAMIENTO PARA CABLES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN	40
TABLA 8. TENSIÓN MÍNIMA PARA LA NECESIDAD DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL AISLAMIENTO, DE ACUERDO A SU MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	41
TABLA 9. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SOLAR PARA SUPERFICIES DE CABLE	43
TABLA 9. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE CABLES DE POTENCIA	46
TABLA 10. DIÁMETRO EQUIVALENTE PARA CONDUCTORES TIPO TUBERÍA.	59
TABLA 11. VALORES DE LAS CONSTANTES U, V Y Y	60
TABLA 12. VALORES DE LAS CONSTANTES Z, E Y G	64
TABLA 13. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA CABLES AGRUPADOS.....	67
TABLA 14. PARÁMETROS PARA FÓRMULAS DE CONVECCIÓN DE CABLES EN TÚNELES	67
TABLA 15. LONGITUDES MÁXIMAS DE INSTALACIÓN DE PANTALLAS ATERRIZADAS EN UN SOLO PUNTO PARA CONDUCTORES MONOPOLARES	73

NOMENCLATURA

Símbolo	Cantidad	Sistema internacional de unidades
A_s	Área de convección por unidad de longitud	m^2
A_{sr}	Área efectiva de radiación por unidad de longitud	m^2
A_w	Área de convección por unidad de longitud para la superficie interna	m^2
C	Capacitancia	F
D	Profundidad del enterramiento	mm
D_d	Diámetro interior del ducto	mm
D_e^*	Diámetro exterior del cable	mm
D_{it}	Diámetro del cilindro imaginario que apenas tocaría la parte interna de los valles de la pantalla corrugada	mm
D_0	Diámetro exterior del ducto	mm
D_{oc}	Diámetro del cilindro imaginario que apenas tocaría la parte externa de las crestas de la cubierta	mm
D_s	Diámetro externo de la pantalla.	mm
D'_a	Diámetro externo de la pantalla.	mm
$F_{s,w}$	Factor de forma de la radiación térmica	
G	Factor geométrico del grupo de cables	
H	Intensidad solar	W/m^2
I	Corriente	A
I_a	Corriente por la armadura	A
I_c	Corriente por el núcleo conductor	A
I_s	Corriente por la cubierta	A
L_T	Distancia de enterramiento hasta el eje del conductor	m
N	Número de polos conductores dentro del cable	
Pr	Numero de prandtl	
R	Resistencia eléctrica	Ω
R_a	Resistencia eléctrica de la armadura	Ω/m
R_s	Resistencia eléctrica de la cubierta	Ω/m
R_θ	Resistencia eléctrica en función de la temperatura	Ω
S	Distancia entre ejes de conductores adyacentes	m
T	Resistencia térmica	$K \cdot m/W$
T_1	Resistencia térmica entre un conductor y pantalla	$K \cdot m/W$

T_2	Resistencia térmica entre pantalla y armadura	$K \cdot m/W$
T_3	Resistencia térmica de la chaqueta	$K \cdot m/W$
T_4	Resistencia térmica exterior	$K \cdot m/W$
T''_4	Resistencia térmica de la pared del ducto	$K \cdot m/W$
T'''_4	Resistencia térmica exterior del ducto	$K \cdot m/W$
T_{ins}	Resistencia térmica del aislamiento entre los conductores	$K \cdot m/W$
U_0	Tensión de fase	V
W_a	Pérdidas joule en la armadura	$W \cdot m$
W_c	Pérdidas por conducción	$W \cdot m$
W_d	Pérdidas dieléctricas	$W \cdot m$
W_{rad}	Pérdidas por radiación	$W \cdot m$
W_s	Pérdidas joule en la pantalla	$W \cdot m$
W_t	Pérdidas totales del cable	$W \cdot m$

Símbolo	Cantidad	Sistema internacional de unidades
d_a	Diámetro exterior del aislamiento del cable	<i>mm</i>
d_c	Diámetro del conductor	<i>mm</i>
d_{cM}	Diámetro mayor del conductor ovalado	<i>mm</i>
d_{cm}	Diámetro menor del conductor ovalado	<i>mm</i>
d_x	Diámetro de un conductor circular con la misma sección Transversal que la de los sectores	<i>mm</i>
f	Frecuencia industrial del sistema	<i>Hz</i>
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección	<i>W/m²K</i>
n	Número de conductores activos al interior del cable	
q	Flujo de calor	
r_a	Radio del aislamiento	<i>mm</i>
r_e	Radio externo del conductor	<i>mm</i>
r_1	Radio del círculo que circunscribe los conductores	<i>mm</i>
t	Espesor del material	<i>mm</i>
t_1	Espesor del aislamiento	<i>mm</i>
t_2	Espesor del recubrimiento	<i>mm</i>
t_3	Espesor de la chaqueta	<i>mm</i>
$\tan \delta_x$	Factor específico de pérdidas	
t_s	Espesor de la pantalla	<i>mm</i>
v	Espesor del aislamiento entre los conductores	<i>mm</i>
y_p	Factor de reducción por proximidad	
y_s	Factor de reducción por efecto piel	

Símbolo	Cantidad	Sistema internacional de unidades
α_{θ}	Coeficiente de temperatura del material	K^{-1}
ϵ	Emisividad de la pared	
ϵ	Permitividad relativa	
θ	Temperatura del material	$^{\circ}C$
θ_{amb}	Temperatura del aire	$^{\circ}C$
θ_{amb}^*	Temperatura absoluta del aire	K
θ_{gas}	Temperatura del aire en el espacio libre	$^{\circ}C$
θ_m	Temperatura media del espacio entre el cable y el ducto	$^{\circ}C$
θ_s^*	Temperatura absoluta de la superficie	K
θ_x	Temperatura de la superficie	$^{\circ}C$
λ_a	Factor de pérdidas en la armadura	
λ_s	Factor de pérdidas en la cubierta	
ρ	Resistividad térmica	$K \cdot m/W$
ρ_c	Resistividad térmica del concreto	$K \cdot m/W$
ρ_e	Resistividad térmica de la tierra	$K \cdot m/W$
ρ_i	Resistividad térmica del aislamiento	$K \cdot m/W$
ρ_f	Resistividad térmica del material de relleno	$K \cdot m/W$
ρ_s	Resistividad térmica del suelo	$K \cdot m/W$
ρ_T	Resistencia térmica del material	$K \cdot m/W$
σ	Coeficiente de absorción de radiación solar directa	
σ_B	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
ω	Frecuencia angular	rad/s

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo matemático para el cálculo de la capacidad portante de corriente en conductores de potencia aislados; para ello se toma en cuenta parámetros como el máximo aumento permisible de la temperatura, la resistencia eléctrica de los materiales, pérdidas por efecto Joule y efectos dieléctricos así como los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en los cables ubicados en túneles, ductos, bandejas o directamente enterrados.

PALABRAS CLAVE: RESISTENCIA TÉRMICA, EFECTO JOULE, TRANSFERENCIA DE CALOR, AMPACIDAD.

ABSTRACT

This project presents a mathematical model for the computation of the current rating of isolated power cables, accounting the different electrical and thermal parameters that define the operation of power cables laying in tunnels, ducts, in air or directly buried.

KEYWORDS: THERMAL RESISTANCE, JOULE LOSSES, HEAT TRANSFER, AMPACITY.

INTRODUCCIÓN

La construcción e instalación de cables subterráneos es más costosa que la de las líneas de transmisión aéreas. El alto costo de las instalaciones bajo tierra se debe al valor de los materiales, el tiempo y los equipos necesarios para la construcción y manipulación de los conductores; además de la excavación, tratamiento de suelos y llenado de las zanjas.

Debido al elevado costo de las instalaciones con cables aislados estas son normalmente usadas para los grandes centros urbanos y en las salidas de potencia desde las centrales de generación hacia las subestaciones. Además de ello, el enorme capital requerido para este tipo de construcciones hace necesario que se realice un buen dimensionamiento técnico/económico, de tal manera que se pueda garantizar la vida útil del conductor.

La información sobre la capacidad de soporte de corriente de los cables de potencia es importante para garantizar que no se pone en riesgo el conjunto de todos los materiales que componen el cable. Los valores de ampacidad de los cables deben ser calculados para cada nueva instalación, teniendo en cuenta que las condiciones del medio ambiente en que serán dispuestos cambian.

Los cálculos de la ampacidad del cable deben tener en cuenta las pérdidas por efecto Joule (I^2R) que ocurren a medida que la energía eléctrica circula a través del conductor. Dichas pérdidas se convierten en calor que debe ser transferido al medio ambiente que circunda al conductor, o en su defecto, ocasionarán el sobrecalentamiento del mismo.

El sobrecalentamiento de los cables es un tema bastante importante cuando se está trabajando con instalaciones bajo tierra, o aquellas en que sea necesario utilizar conductores aislados. En el caso de las líneas aéreas se tiene movimiento de aire y una mayor tasa de transferencia de calor, por lo que no resulta tan relevante este problema. Los materiales utilizados para la construcción del aislamiento del cable también se comportan como aislantes térmicos, lo cual combinado con un ambiente de instalación cerrado termina por limitar enormemente la transferencia de calor desde el interior al exterior del cable.

La ampacidad de conductores de potencia depende tanto de factores relacionados con sus materiales de construcción, como de las propiedades termodinámicas del cable y de los ambientes de instalación, y a partir de ellos estudiar el modelo matemático para el cálculo de la ampacidad de los conductores bajo dichas condiciones instalación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y clarificar una metodología para el cálculo de la capacidad de corriente de cables aislados de potencia en condiciones de estado estable, en diferentes tipos de instalaciones. Como objetivos específicos se pueden diferenciar:

Identificar de forma simple y sistemática los criterios de dimensionamiento de conductores eléctricos.

Determinar las propiedades termodinámicas de los materiales de construcción del conjunto de elementos que componen el cable y la instalación.

Establecer un modelo de cálculo de ampacidad para condiciones de instalación tales como: Cables directamente enterrados, aéreos y en bandejas, en ductos, bancos de ductos y túneles.

En el Capítulo 1 se realiza la descripción de los ambientes típicos de instalación de conductores aislados, y el estudio de las propiedades termodinámicas de los mismos; que posteriormente serán utilizadas para la construcción de los modelos de cálculo para el dimensionamiento de los conductores que serán instalados dentro de ellos.

En el Capítulo 2 se muestran los materiales típicos de construcción de los cables de potencia, tanto del conductor como de su aislante; y se definen las propiedades termodinámicas de este conjunto. En el Capítulo 3, se definen las características tanto del cable como del ambiente de instalación, se procederá con la construcción del modelo de cálculo para el rateo de conductores de potencia aislados.

En el Capítulo 4 se realizan ejemplos de cálculo de la ampacidad de conductores de potencia aislados, a partir del modelo previamente construido, y para condiciones de instalación comúnmente utilizadas.

1. AMBIENTES DE INSTALACIÓN

La construcción de líneas aéreas de alta y media tensión suele ser la principal selección cuando se trata de la construcción de nuevos enlaces eléctricos. Ya sea suspendidas en postes o torres metálicas, las líneas aéreas son normalmente de menor costo que cualquier tipo de instalación en la que sea necesario utilizar cables de potencia aislados. Si bien es necesaria la construcción de todas las estructuras de soporte de los conductores, el costo del cable aislado será difícilmente superado.

A pesar de la enorme ventaja económica de las instalaciones aéreas de líneas de transmisión, existen circunstancias en las que resulta necesaria la utilización de cables de potencia aislados. Algunas situaciones en las que comúnmente se deben utilizar este tipo de conductores son: La salida de potencia desde una central de generación a la subestación, cruce de grandes cuerpos acuáticos o redes submarinas, líneas de transmisión que atraviesen centros urbanos importantes, entre otras.

Las condiciones de instalación más comunes para los conductores de potencia aislados son: Cables directamente enterrados, en ductos, en túneles e instalados en bandejas. A continuación se realiza una descripción de cada uno de los ambientes de instalación aquí mencionados.

1.1. CABLES ENTERRADOS

Una de las formas más comunes de utilización de los cables de potencia aislados es instalándolos directamente enterrados; su rapidez y relativo bajo costo son sus principales ventajas. Los cables submarinos por ejemplo, son ligeramente enterrados en el lecho submarino, siendo abierta una pequeña brecha en la arena que posteriormente es cubierta con el mismo material de las profundidades. Al interior de muchos centros urbanos alrededor del mundo, se encuentra restringida la instalación de redes aéreas por lo que es necesario mantener ocultos los cables de potencia, siendo una muy buena elección el enterramiento de los mismos.

Para el enterramiento de cables se realiza una brecha lo suficientemente ancha para que puedan ser ubicados los conductores en la configuración que haya sido prevista. En muchos casos el relleno de la zanja posterior al posicionamiento de los conductores, se realiza con la misma tierra que fue retirada en un principio; no obstante, es muy común la utilización de un relleno con

materiales que modifican las propiedades térmicas del ambiente de instalación, y por consiguiente modificando el desempeño y la vida útil del conductor.

1.1.1. PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN

Es necesaria una profundidad de excavación adecuada para el enterramiento de los cables, de lo contrario no estarán protegidos ante esfuerzos mecánicos importantes como el paso de vehículos, herramientas de excavación, entre otras. Además se debe proteger a las personas y la propiedad privada en caso de que ocurra una falla eléctrica. En zonas públicas la profundidad debe ser de entre 1,30 m y 1,50 m. En subestaciones eléctricas debe ser de mínimo 1 m [1].

En la Figura 1 se muestran algunas medidas típicas de la brecha, así como otros datos importantes que más adelante serán explicados adecuadamente.

Los efectos electrodinámicos de este tipo de instalación son mucho más severos que cuando el cable se ubica al interior de un ducto, debido a que éste actúa como una cámara de descompresión.

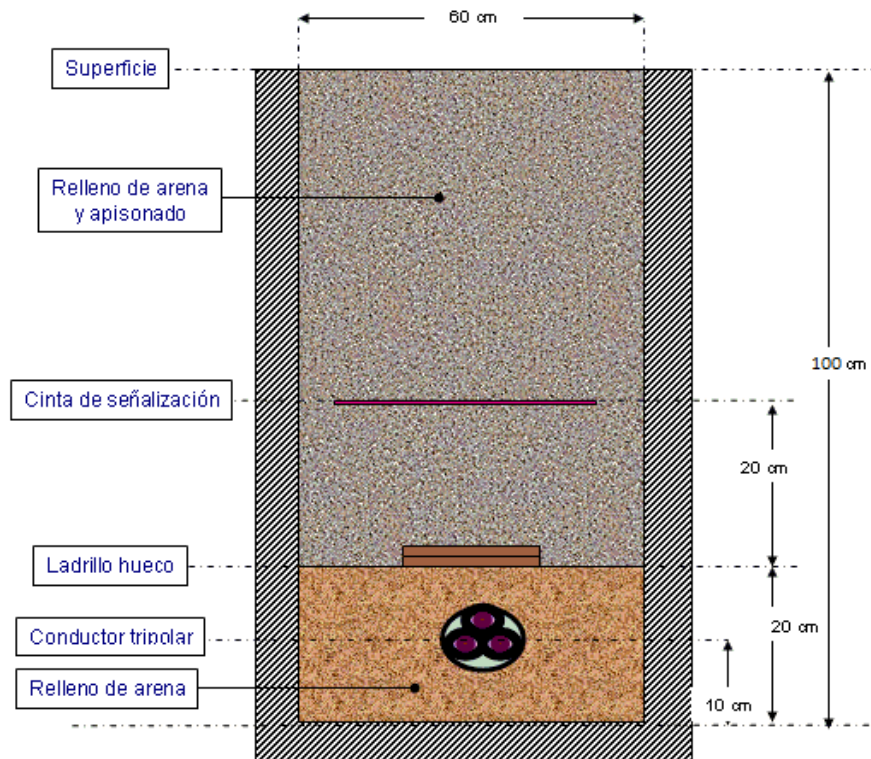


Figura 1. Perfil de una excavación típica con cable de potencia aislado de triple conductor

1.1.2. ANCHO DE LA EXCAVACIÓN

El ancho de la excavación depende del método de enterramiento usado y del espaciamiento recomendado para la capa de cables de acuerdo con la corriente que será transmitida. El ancho ocupado por los conductores es incrementado aún más para permitir:

- El llenado con arena o mortero.
- Facilidad para el halado y posicionamiento del cable.
- Amarrado. Por razones de seguridad el amarrado es necesario para limitar los esfuerzos debido a corrientes de cortocircuito.

1.1.3. SOLADO

Los cables deben ser tendidos en una cama de arena de al menos 15 cm de espesor o en una superficie suave.

1.1.4. CAMA SUAVE

Una cama suave de mortero de entre 5 y 10 cm de espesor se debe ubicar al fondo de la excavación.

1.1.5. DISTANCIA ENTRE DOS LÍNEAS

Esta distancia depende de los valores térmicos que sean asumidos para el cálculo de la capacidad de transmisión de cada línea. En la práctica se recomienda una distancia mínima de 70 cm. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de tendido de varios circuitos [2].

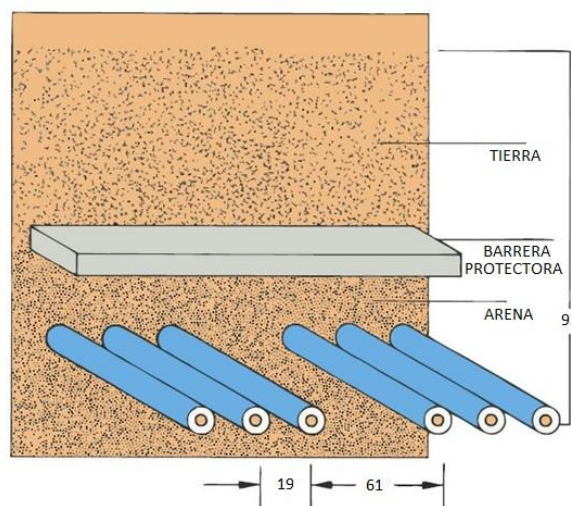


Figura 2. Tendido plano de dos circuitos trifásicos en una sola zanja (unidades en cm)

1.1.6. RELLENO

De acuerdo al método de tendido, el relleno se realiza en capas compactas. Se deben adicionar dispositivos de advertencia entre las capas del relleno; que de acuerdo al método de tendido puede ser una placa de concreto, una malla o cinta de advertencia.

En la Figura 3 se muestra el perfil de una excavación con las características mencionadas anteriormente, con dos tipos diferentes de tendido; coplanar y en trébol. Aparecen en ella los dispositivos de advertencia, y las capas con que se configura típicamente el relleno. [1]



Figura 3. Perfil simple de excavación

1.2. CABLES EN DUCTOS

Una de las formas de instalación más común es la ubicación de los cables en el interior de ductos, bien sea expuestos, empotrados e incluso enterrados.

Cuando se trata de ductos enterrados se debe anotar que este tipo de instalación facilita las labores de mantenimiento e inspección de los conductores, con respecto a las instalaciones en que éste se entierra directamente. Así mismo, la ubicación de conductos paralelos adicionales permite la posibilidad de crecimiento de la red sin necesidad de excavaciones posteriores.

Para el enterrado de cables de potencia en ambientes en los que haya una alta probabilidad de que se presenten grandes esfuerzos mecánicos, resulta ser mucho más conveniente la instalación de los cables al interior de ductos, bien sean poliméricos, metálicos o en concreto. Entre los ambientes que requieren este tipo de enterramiento se pueden encontrar: cruce de carreteras, zonas de carga, descarga y almacenamiento de materiales y equipos, entre otros

Comúnmente los cables son tendidos en formación tipo trébol (como se muestra en la Figura 5), puesto que se reduce el espacio necesario para la ubicación del circuito o circuitos completos, y más importante aún, porque se reducen los acoples inductivos y capacitivos, con lo que se logra mitigar las pérdidas en la pantalla, sin embargo, con el objetivo de reducir el calentamiento mutuo de los cables, estos tienden a ser separados. (Figura 5) [3].

En sistemas de alta tensión la separación de los conductores empieza a hacerse más notable, y la configuración en forma de trébol debe ser ubicada de manera tal que no se supere un mínimo de distancia entre los ductos.

En la Figura 4 se muestran de nuevo las dos configuraciones mencionadas, esta vez mostrando el espaciado requerido en sistemas de alta tensión [1].

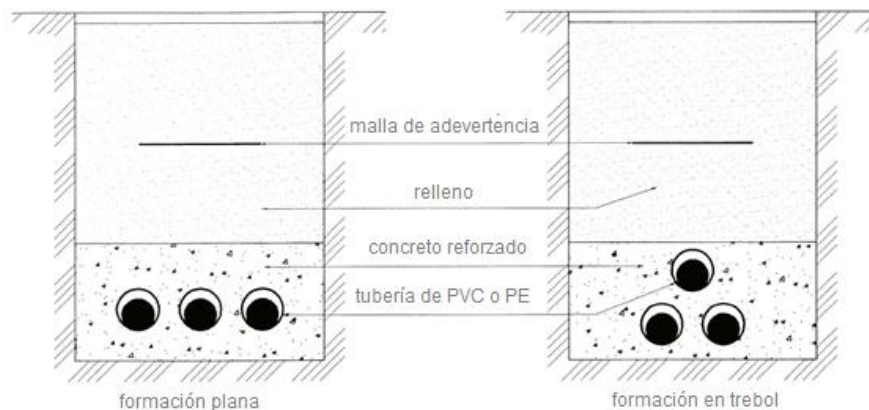


Figura 4. Cables en ductos enterrados con espaciado típico de sistemas de alta tensión

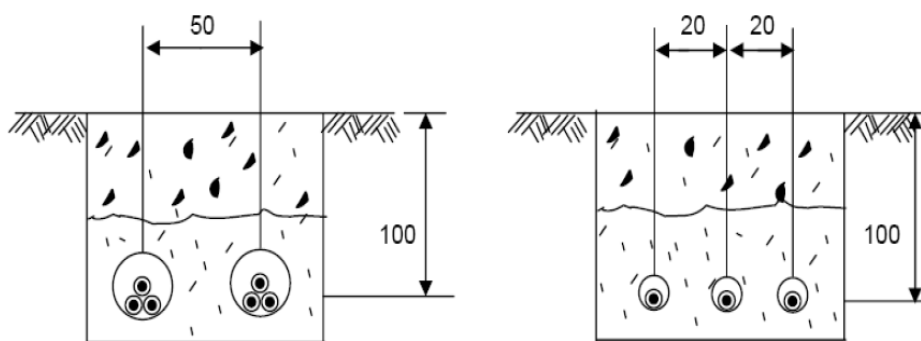


Figura 5. Cables en ductos enterrados, configuraciones tipo trébol y horizontal espaciada (Unidades en cm)

Cuando se trata de cables de potencia al interior de ductos no enterrados, es decir, ductos empotrados en paredes o expuestos, se deben también mantener ciertas distancias con el objetivo de evitar pérdidas por acoples mutuos. Para efectos de éste trabajo, la instalación de cables al

interior de ductos se analizará únicamente para el caso en que se encuentren enterrados, que resulta ser el más retador debido a la variabilidad de las condiciones termodinámicas que puede presentar la tierra, y a que es la más común de ellas en sistemas de media y alta tensión.

1.3. CABLES EN TÚNELES

Existen varias circunstancias bajo las cuales se deben instalar conductores de potencia al interior de túneles. Generalmente las salidas de potencia desde una central de generación hasta la subestación, se realizan mediante el tendido de cables aislados a lo largo de la pared del túnel de acceso a la casa de máquinas. De acuerdo a necesidades de inspección y mantenimiento de los cables de ciertas instalaciones, resulta necesaria la construcción de túneles cuya función específica es la de llevar los conductores de potencia de un lado a otro de la red. Es también importante tener en cuenta que en múltiples ocasiones los túneles ferroviarios o automotores, resultan ser también el ambiente de instalación de cables de potencia, bien sea para cubrir los requerimientos del sistema de transporte o simplemente como medio de tendido de circuitos de la red eléctrica de la región.

La instalación de cables al interior de túneles se realiza generalmente sobre las paredes laterales de las mismas, mediante el uso de bandejas o soportes que permitan mantener el conductor cerca de las superficies verticales de la cavidad. En la Figura 6 se muestran ejemplos de pequeños túneles dedicados al tendido de cables de potencia aislados, con diversas modalidades de instalación de los conductores [3].

Cuando se requieren inspecciones continuas del estado de la red, o cuando el túnel cumple diversas funciones aparte del tendido de los conductores, es necesario que estos estén sujetos a las paredes, para mantener el espacio libre, y para garantizar el buen estado y vida útil de los cables.

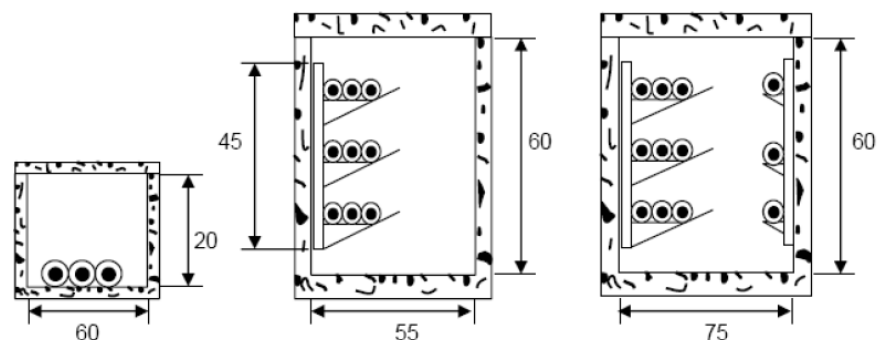


Figura 6. Túneles para el tendido de cables de potencia aislados con diferentes formas de instalación (unidades en cm)

1.4. CABLES PORTADOS EN BANDEJAS

Una bandeja porta-cables o soportería es una estructura rígida de materiales metálicos u otros no combustibles capaces de soportar el peso de los conductores. Existen varios tipos de ellas; a manera de escalera, enmalladas, o de fondo cerrado.

Las bandejas porta-cables se utilizan en lugares donde no es posible excavar zanjas o llevar los cables por el interior de los muros, o como se mencionó en la sección anterior de este capítulo, para realizar el tendido de los cables al interior de túneles o galerías.

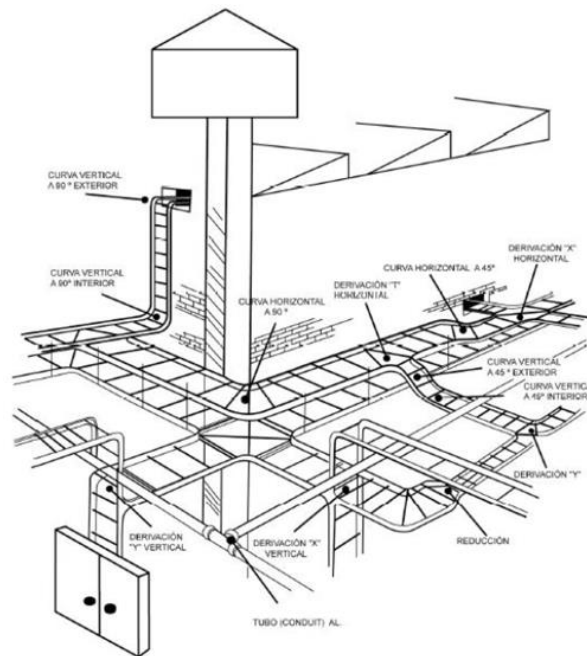


Figura 7. Sistema de bandejas porta-cables

La instalación de bandejas porta-cables resulta ser un método económico para el transporte de los conductores de potencia, además de que se consolidan como una excelente alternativa para el mantenimiento e inspección de las redes, debido a que éstas se encuentran expuestas a lo largo de todo su recorrido. Cuando los cables son colocados sobre bandejas porta-cables, es posible llevar un mayor número de conductores en una misma área, considerando las ventajas en materia de transferencia de calor que puede presentar un espacio abierto con respecto a los ya mencionados.

En la Figura 7 se muestra un sistema bandejas porta-cables con diversas configuraciones.

2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS

En general los cables de potencia aislados están compuestos por varias capas de materiales aislantes y conductores. La primera, ubicada en el centro, consiste de uno o más conductores, que es seguida de una capa de material aislante, una pantalla y una chaqueta protectora. En ocasiones se adiciona una cinta semiconductora entre el aislante y los conductores con el fin de igualar los esfuerzos eléctricos en el aislamiento del cable. Para evitar cualquier flujo longitudinal a lo largo del cable se adiciona una cinta expandible a cada lado de la pantalla, el material se expandirá cuando tenga contacto con el agua, y prevendrá el flujo de ésta a lo largo de los conductores de la pantalla. A continuación se realiza una descripción detallada de cada una de las capas que componen al cable de potencia.

2.1. CONDUCTORES

La parte central de los cables de potencia está compuesta por el conductor o los conductores en caso de que se trate de un conductor múltiple. Son construidos en aleaciones de aluminio o cobre. Comúnmente debido al alto costo del cobre son preferiblemente seleccionados los conductores de aluminio. En la Tabla 1 se muestra un listado de aleaciones normalizadas para la construcción de conductores de potencia [2].

Tabla 1. Aleaciones normalizadas para la construcción de conductores de potencia

Tipo de conductor	Aleaciones
Conductor de Cobre	ASTM B-3 Cobre suave o templado
	ASTM B-5 Cobre de grado eléctrico
	ASTM B-8 Clase A, B, C o D trenzado
	ASTM B-33 Suave o templado con baño en estaño
	ASTM B-496 Trenzado compacto circular
	ASTM B-784 Trenzado en capas concéntricas
	ASTM B-787 Combinación mono-capa de 19 hilos
	ASTM B-835 Trenzado circular compacto
	ASTM B-902 Trenzado circular comprimido

Conductor Aluminio	de	ASTM B-230 Aluminio de grado eléctrico 1350-H19
		ASTM B-231 Aluminio 1350 clase A, B, C o D trenzado
		ASTM B-233 Aluminio de grado eléctrico con hebras cruzadas
		ASTM B-400 Aluminio 1350, trenzado circular compacto
		ASTM B-609 Aluminio 1350, templado e intermedicamente templado
		ASTM B-786 Aluminio 1350, combinación mono-capa de 19 hilos
		ASTM B-800 Aluminio series 8000, templado e intermedicamente templado
		ASTM B-801 Aluminio series 8000, trenzados concéntrico, compacto y comprimido de clases A, B, C o D
		ASTM B-836 Trenzado circular compacto
	ASTM B-901 Trenzado circular comprimido	
Conductor flexible de Cobre		ASTM B-172 Trenzado tipo lazo de múltiples torones.
		ASTM B-173 Trenzado tipo lazo, capas concéntricas de torones
		ASTM B-174 Conductores trenzados.

Como puede observarse en la Tabla 1 existen tres formas típicas de trenzado de los conductores; circular concéntrico, circular compacto y circular comprimido, las cuales se muestran en la Figura 8 [2].

2.2. PANTALLA SEMICONDUCTORA

Para evitar las concentraciones de campo eléctrico, se coloca una lisa y delgada capa generalmente de XLPE¹, entre el núcleo de los conductores y la capa de aislamiento del cable de potencia.

2.3. AISLAMIENTO

El aislamiento suele ser la capa de mayor volumen de los conductores de potencia de media y alta tensión, se ubica justo después del núcleo conductor y en ocasiones son separados por la ya mencionada pantalla semiconductora. Existen múltiples materiales que pueden ser utilizados para la construcción del aislante en cables de potencia, tales como: PVC², PE³, CPE⁴, CSPE⁵, EPR⁶,

¹ Polietileno de cadena cruzada. Ver XLPE en la sección de aislamiento de este capítulo.

² Policloruro de Vinilo.

ETFE⁷, XLPO⁸, entre otros [2]. Sin embargo, actualmente el material más utilizado para la fabricación de esta capa es el XLPE, puesto que ofrece gran cantidad de ventajas frente a los demás materiales que pueden servir para este propósito.



Figura 8. Formas típicas de trenzado circular de los conductores de potencia

2.3.1. XLPE

2.3.1.1. ¿Qué es XLPE?

Las siglas XLPE son una abreviación para designar al Polietileno de cadena cruzada. En la Figura 9 se muestran de manera comparativa las estructuras moleculares del PE y el XLPE.

El polietileno tiene una estructura molecular lineal, tal y como se muestra en A; y sus moléculas, como se ve en B, no se encuentran químicamente entrelazadas por lo que se resulta fácilmente deformado cuando se expone a altas temperaturas. Las moléculas del XLPE están químicamente entrelazadas en una red tridimensional como se muestra en C y D, por lo que presentan una alta resistencia a la deformación incluso cuando es expuesto a altas temperaturas [1].

El polietileno de cadena cruzada se consigue a partir de un tratamiento a alta presión del polietileno con peróxidos orgánicos como aditivos. A partir de la aplicación de calor y presión se consigue el efecto de cruce de las cadenas, logrando que los enlaces moleculares individuales se vinculen con otros, lo que a su vez causa el cambio del material desde termoplástico a elástico.

Una importante ventaja del XLPE como aislante en cables de media y alta tensión es la reducción de las pérdidas dieléctricas⁹. Su factor de pérdidas dieléctricas es más de 10 veces menor que el

³ Polietileno.

⁴ Polietileno Clorado.

⁵ Polietileno Clorosulfonado.

⁶ Caucho de Etileno – Propileno.

⁷ Etileno – TetrafluoroEtileno.

⁸ Poliolefina de cadena cruzada.

de los cables aislados con papel impregnado, y más de 100 veces menor que el de aquellos con aislamiento de PVC. Debido a que la constante dieléctrica es más favorable, la capacitancia mutua en los cables aislados por XLPE es menor, reduciéndose las corrientes de fuga de los sistemas no aterrizados [1].

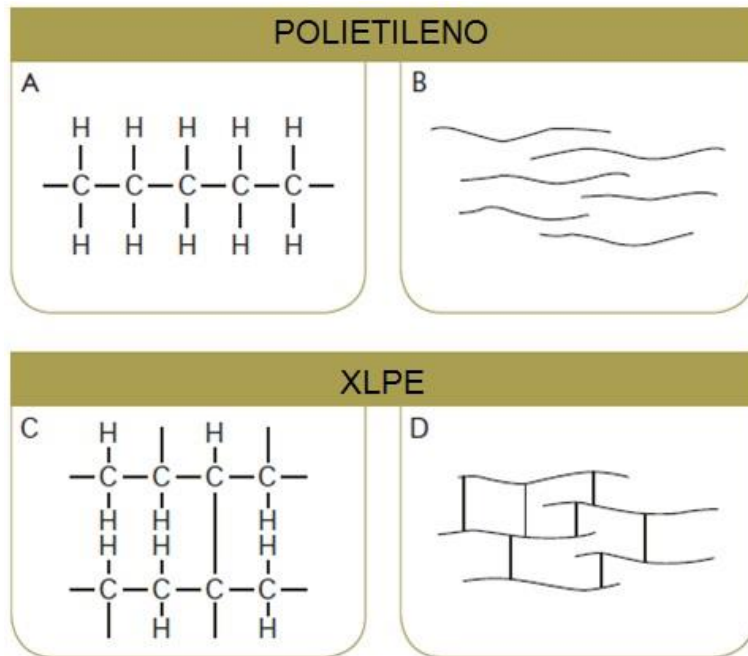


Figura 9. Estructura molecular del polietileno y el XLPE

2.3.1.2. Características y ventajas del XLPE.

2.3.1.2.1. Propiedades físicas y eléctricas

El cable XLPE se constituye como el mejor cable para líneas de transmisión y distribución debido a sus excelentes propiedades físicas y eléctricas.

2.3.1.2.2. Soportabilidad de altas corrientes

Resistencia a la deformación térmica y la enorme vida útil del cable XLPE, le permite llevar altas corrientes en condiciones normales (90°C), de emergencia (130°C) o corto circuito (250°C).

⁹ Pérdidas energéticas debidas a la reorientación de los dipolos de un material dieléctrico cuando se ve expuesto a un campo eléctrico cambiante, como es el caso de un cable de potencia en corriente alterna.

2.3.1.2.3. Facilidad de instalación

El XLPE soporta radios de curvatura definidos y es mucho más liviano que otros, lo que permite una fácil y confiable instalación. Por otra parte el empalmado y terminación del cable XLPE son mucho más sencillos.

2.3.1.2.4. Sin limitaciones de altura y mantenimiento

Los cables XLPE pueden ser instalados en cualquier lugar sin consideraciones especiales del perfil de la ruta, debido que a no contiene aceite y por lo tanto no existe el riesgo de migración de aceite que ocurre en otros cables.

2.3.1.2.5. No requiere armadura metálica

El cable XLPE no necesita generalmente armadura metálica. Por lo tanto es libre de las fallas que ocurren en los cables que si las requieren, tales como corrosión y fatiga.

2.3.2. PVC

El PVC (Cloruro de polivinilo) es utilizado en aplicaciones variadas, por lo general con una vida útil larga. Es reciclable, auto-extinguible, y se divide en dos tipos principales: PVC flexible y rígido.

2.3.2.1. Características

- 100% auto-extinguible, lo cual otorga confiabilidad para aplicaciones de transporte energético y conducción de materiales inflamables; no es un propagador de la llama.
- Es resistente a la humedad; no presenta oxidación ni corrosión. No es un nutriente para los hongos, por lo que no se presenta deterioro en la superficie.
- Resistencia mecánica y a la abrasión.
- Químicamente inerte y estable.
- En la Tabla 2 se muestran las propiedades eléctricas y mecánicas típicas del PVC [4].

2.3.3. POLIETILENO

Es un termoplástico ligero y semicristalino producido por la polimerización en fase líquida del etileno iniciada por radicales libres.

2.3.3.1. Características

- Baja resistencia a la temperatura, pero alta resistencia química.

Tabla 2. Propiedades típicas del PVC

Propiedad	Unidades	
	Inglesas	Internacional
Temperatura de procesamiento	315-410°F	157-210°C
Encogimiento lineal de molde	0,001-0,005 in/in	0,001-0,005 cm/cm
Punto de fusión	270-405°F	132-207°C
Densidad	72,4-91,8 lb/ft ³	1,16-1,47 g/cm ³
Resistencia a la tensión, deformación	1,3-7,4 lb/in ² x10 ³	0,9-5,2 kg/cm ² x10 ³
Resistencia a la tensión, rompimiento	1,1-7,4 lb/in ² x10 ³	0,8-5,2 kg/cm ² x10 ³
Elongación, rompimiento	5,0-500,0%	5,0-500,0%
Resistencia de flexión, deformación	10,7-12,0 lb/in ² x10 ³	7,5-8,4 kg/cm ² x10 ²
Resistencia a la compresión	6,5-10,1 lb/in ² x10 ²	4,6-7,1 kg/cm ² x10 ²
Módulo de tensión	2,7-4,5 lb/in ² x10 ⁵	1,9-3,2 kg/cm ² x10 ⁴
Módulo de flexión	3,0-5,4 lb/in ² x10 ⁵	2,1-3,8 kg/cm ² x10 ⁴
Ranurado Izod, R.T.	0,3-17,6 ft-lb/in	1,6-95,0 kg cm/cm
Dureza	A50-A95 Rockwell	A50-A95 Rockwell
Conductividad térmica	1,0-1,3 BTU in/hr-ft ³ -°F	0,14-1,19 W/m-K
Expansión térmica lineal	3,6-7,3 in/in-°F	6,5-13,1 cm/cm-°C x 10 ⁵
Temperatura-deflexión-264 psi	100-311°F	38 -155 °C
Temperatura- deflexion-66 psi	113-311°F	45-155°C
Temperatura de servicio continuo	130-220 °F	54 -104°F
Resistencia dieléctrica	350-725 V/10 ⁻³ in	1,4-2,8 V/mm x10 ⁴
Resistencia dieléctrica-1MHz	3,9-5,2	3,9-5,2
Factor de disipación-1 MHz	0,019-0,090	0,019-0,090
Absorción de agua	0,08-0,60%	0,08-0,60%

Tabla 3. Propiedades típicas del polietileno

Propiedad	Unidades	
	Inglesas	Internacional
Temperatura de procesamiento	300-630°F	149-332°C
Encogimiento lineal de molde	0,017-0,050- in/in	0,017-0,050- cm/cm
Punto de fusión	210-400°F	99-204°C
Densidad	56,2-58,1 lb/ft ³	0,90-0,93 g/cm ³
Resistencia a la tensión, deformación	1,1-2,0 lb/in ² x10 ³	0,8-1,4 kg/cm ² x10 ³
Resistencia a la tensión, rompimiento	1,1-5,8 lb/in ² x10 ³	0,8-4,1 kg/cm ² x10 ³

Elongación, rompimiento	60,0-78,0%	60,0-78,0%
Resistencia de flexión, deformación	--	--
Resistencia a la compresión	--	--
Módulo de tensión	0,1-0,4 lb/in ² x10 ⁵	0,1-0,3 kg/cm ² x10 ⁴
Módulo de flexión	0,2-0,3 lb/in ² x10 ⁵	0,1-0,4 kg/cm ² x10 ⁴
Ranurado Izod, R.T.	--	--
Dureza	D44-D55 Rockwell	R129-R125 Rockwell
Conductividad térmica	1,8-2,9BTU- in/hr-ft ³ .°F	0,26-0,42 W/m-°K
Expansión térmica lineal	11,0-18,0 in/in-°Fx10 ⁻⁵	19,8-32,4 cm/cm-°C
Temperatura-deflexion-264 psi	--	--
Temperatura-deflexión-66 psi	100-120°F	38-49°C
Temperatura de servicio continuo	--	--
Resistencia dieléctrica	475-900 V/10 ⁻³ in	1,9-3,5 V/mmx10 ⁴
Resistencia dieléctrica-1MHz	2,2-2,4	1,9-3,5
Factor de disipación-1 MHz	0,001-0,0005	0,0001-0,0005
Absorción de agua	--	--

- Se ha convertido en uno de los plásticos más populares por ser una resina de alta versatilidad.
- Flexible, transparente y con alta resistencia al impacto, a la filtración y la elongación; es comparable con algunos hules.
- El polietileno de alta densidad es muy resistente a la abrasión y a los reactivos químicos.

En la Tabla 3 se muestran las propiedades eléctricas y mecánicas típicas del polietileno [4].

2.4. PANTALLA SEMICONDUCTORA DEL AISLAMIENTO

Esta capa tiene el mismo propósito que la que está ubicada justo después del núcleo conductor, y es el de suavizar el cambio de un material con campo eléctrico no nulo (aislante) a uno con campo nulo (conductor).

2.5. PANTALLA METÁLICA

Cuando la tensión alcanza decenas e incluso centenas de kilo voltios es necesario implementar una chaqueta metálica, su función es la de eliminar el campo eléctrico en el exterior del conductor, actuando como el segundo electrodo del capacitor formado por el cable.

La segunda función de la pantalla metálica es la de formar una barrera radial para la prevención de la penetración de la humedad, particularmente al sistema de aislamiento.

El sistema de aislamiento sintético, no debe ser expuesto a la humedad. Cuando la humedad y campos magnéticos actúan juntos, el aislante se deteriora por lo que es llamado *Watertreeing*¹⁰, que eventualmente puede causar fallas en el aislamiento.

2.5.1. IMPLICACIONES DEL USO DE PANTALLAS METÁLICAS

- Necesidad de aterrizar el cable cuando menos en un punto a lo largo de la ruta, con el fin de reducir las tensiones inducidas.
- Necesidad de drenado de la corriente capacitiva que fluye a través del aislamiento.
- Circulación de corrientes de secuencia cero o parte de ellas.
- Circulación de corrientes inducidas por campos electromagnéticos de otros cables en la vecindad. Aumento de las pérdidas energéticas en los cables.
- Necesidad de aislamiento eléctrico de la pantalla metálica a lo largo de gran parte de la longitud del cable.
- Necesidad de protección de la pantalla metálica de la corrosión química o electroquímica.

2.5.2. TIPOS DE PANTALLA METÁLICA

2.5.2.1. Pantalla extruida de aleación de plomo

2.5.2.1.1. Ventajas

- A prueba de agua. Garantizado por el proceso de fabricación.
- Alta resistencia eléctrica. Se minimizan las pérdidas energéticas por corrientes a tierra.
- Resistencia a la corrosión.

2.5.2.1.2. Desventajas

- Pesado y costoso.
- El plomo es un metal tóxico, por lo que tiene gran cantidad de limitaciones.

¹⁰ Fisuras progresivas en el aislamiento que se extienden a manera de ramificaciones arbóreas.

- Capacidad limitada para circulación de corrientes de secuencia cero.

2.5.2.2. **Alambres de cobre y cinta de aluminio adherida a la chaqueta.**

2.5.2.2.1. **Ventajas**

- Liviana y con una buena relación de beneficio – costo.
- Alta Soportabilidad de corto circuito.

2.5.2.2.2. **Desventajas**

- Baja Resistencia eléctrica. Necesidad de conexiones a tierra especiales.

2.5.2.3. **Pantalla de aluminio soldado longitudinalmente y adherido a una chaqueta de polietileno.**

2.5.2.3.1. **Ventajas**

- Estructura liviana.
- Soportabilidad de corto circuito.
- Impermeable a la humedad.

2.5.2.3.2. **Desventajas:**

- Baja resistencia eléctrica. Necesidad de conexiones a tierra especiales.
- Mayores pérdidas por corrientes de Eddy¹¹ que en las demás pantallas.

2.5.2.4. **Pantalla de alambre de cobre con Pantalla extruida de plomo.**

2.5.2.4.1. **Ventajas:**

- Combina la resistencia a la corrosión otorgada por el plomo, con la gran Soportabilidad de cortocircuito de la pantalla de cobre.

2.5.2.4.2. **Desventajas:**

- Su principal desventaja radica en el alto costo y el contenido de plomo.

2.6. **CHAQUETA PROTECTORA**

La chaqueta protectora cumple dos funciones principales que son:

¹¹ Corrientes circulares parasitas, también conocidas como corrientes de Foucault o corrientes torbellino.

- Aislar la pantalla metálica de la tierra, especialmente para líneas con conexiones especiales de la pantalla.
- Proteger los componentes metálicos de la humedad y la corrosión.

La chaqueta exterior debe soportar los esfuerzos mecánicos que aparecen durante la instalación y el servicio del cable; así como otros riesgos tales como termitas, hidrocarburos, etc. El material que mejor cumple estas características es el Polietileno.

El PVC es aún utilizado pero se ha ido reduciendo bastante su uso. Una de las principales ventajas del PVC son sus propiedades de retardo de la llama, aunque los vapores tóxicos y corrosivos que libera son prohibidos por muchos usuarios. Si se requiere retardo de la llama se prefiere una chaqueta de HFFR de acuerdo con los estándares de la IEC 332.

Para la verificación de la integridad de la chaqueta se suele aplicar una capa semiconductora sobre ésta, ya sea pintura de grafito o un polímero semiconductor co-extruido con el aislamiento.

En la Figura 10 se muestran las capas de tres cables de potencia aislados diferentes, cada uno de ellos con materiales de construcción distintos [1].



Figura 10. Cables de potencia aislados con diferentes materiales de construcción

3. MODELO TERMODINÁMICO

Como fue mencionado anteriormente, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta durante la vida útil de un conductor de potencia, es el comportamiento térmico que éste presente mientras se encuentre en operación. Si bien el operador de la red en que se encuentre ubicado el cable no puede obtener esta información con una medición directa; en la mayoría de los casos se conocen los valores en tiempo real de la tensión y corriente del sistema. Resulta entonces necesaria la adecuación de un modelo de cálculo que permita determinar los límites de seguridad para las condiciones de operación del conductor, que aseguren el buen desempeño térmico de la instalación.

3.1. RED ESCALERA

Los sistemas de transferencia de calor por conducción son análogos a los circuitos eléctricos, y se pueden modelar por medio de resistencias y capacitancias térmicas que se combinan para formar un diagrama en forma de escalera¹², que permite conocer la distribución de la temperatura en el tiempo en cada una de las secciones del conductor.

En la Figura 11 se muestra un ejemplo simple de red escalera de un conductor de potencia aislado, con las resistencias y capacitancias térmicas de cada una de sus secciones, y con un ambiente de instalación indefinido [6]. En este capítulo se realizará un acercamiento a cada una de las secciones del diagrama *Ladder*, y se terminará por tratar el ambiente de instalación.

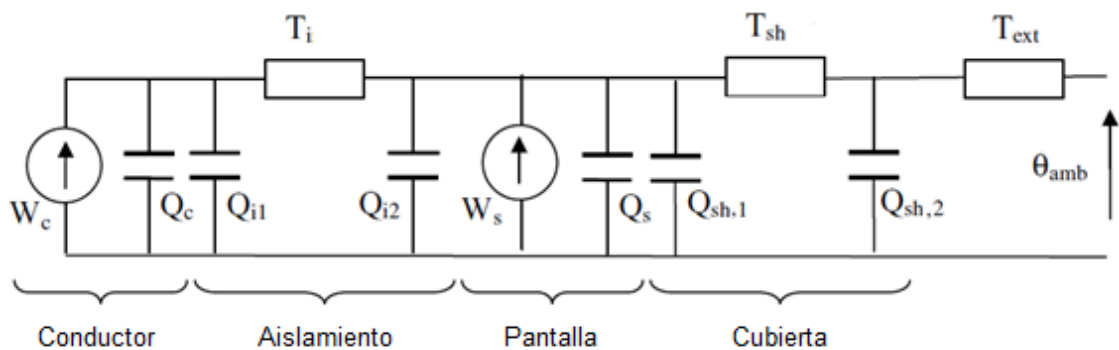


Figura 11. Diagrama escalera para el cálculo de la temperatura del cable. De izquierda a derecha: Conductor, aislamiento, pantalla, Chaqueta

¹² *Ladder Network* en Inglés.

El ambiente de instalación del cable de potencia aislado resulta ser la parte más importante del modelo, debido a que la disipación del calor generado al interior de éste depende de las variaciones que puedan ocurrir en las propiedades termodinámicas del lugar de tendido de los conductores, mientras que el cable conserva sus características térmicas sin importar su ubicación.

3.2. FUENTES INTERNAS DE CALOR

En general existen dos tipos de fuentes de calor en un conductor de potencia; las pérdidas debidas a la corriente, y las perdidas debidas al voltaje, las cuales a su vez pueden ser subdivididas en diferentes tipos.

3.2.1. PÉRDIDAS DEBIDAS A EFECTOS DIELECTRICOS

Éstas se pueden subdividir en pérdidas dieléctricas y pérdidas por corrientes de carga.

Las pérdidas dieléctricas son el resultado del comportamiento de los materiales dieléctricos ante estímulos de sistemas de corriente alterna. Durante el cambio de polaridad de la fuente las cargas deben desplazarse primero en una dirección y luego en la otra, encontrándose con una oposición natural de las partículas del material, la cual al ser vencida genera pérdidas en forma de calor.

Las pérdidas dieléctricas son generalmente despreciadas en los sistemas de distribución, sin embargo, para redes de alta y extra-alta tensión se hace necesario incluir esta fuente de calor para el cálculo de la ampacidad de los conductores. Las pérdidas dieléctricas (W_d) se pueden determinar a partir de la ecuación:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta_x \quad (3.1),$$

donde ω es la frecuencia angular de la fuente, C es la capacitancia, U_0 es la tensión de fase y $\tan \delta_x$ es el factor específico de pérdidas del material.

La corriente de carga producida por la capacitancia del cable genera pérdidas óhmicas cada vez que el conductor es energizado. En cables de baja y media tensión, y en conductores de XLPE el valor de éstas perdidas es muy bajo por lo que en la mayoría de los casos puede ser despreciado. En la tabla 8 se muestran las tensiones de referencia para la necesidad del cálculo de las pérdidas por efectos dieléctricos.

3.2.2. PÉRDIDAS DEBIDAS AL EFECTO JOULE O EDDY

Las pérdidas por corriente son aquellas que se producen en las partes metálicas del conductor, tales como el núcleo, la pantalla, entre otros. Estas pérdidas pueden ser del tipo I^2R (por

conducción), o debidas a corrientes de Eddy, bien sea al interior del núcleo conductor o en algún otro elemento metálico del cable.

Las pérdidas por conducción son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y se denotan por W_c ; se calculan por medio de la ecuación:

$$W_c = R_\theta I^2 \quad (3.2).$$

La resistencia eléctrica en corriente alterna varía en función de diversos factores, tales como la temperatura, el efecto piel, la histéresis y las pérdidas inducidas en materiales metálicos próximos. El efecto de la temperatura en la resistencia del cable no puede ser despreciado, y se hace necesario el cálculo de esta magnitud en función de la temperatura para el rateo de conductores de potencia, lo cual se puede lograr a partir de la expresión [5]:

$$R_\theta(\theta) = R_{20^\circ C}(1 + \alpha_\theta(\theta - 273.15^\circ K - 20^\circ K)) \quad (3.3),$$

donde $R_\theta(\theta)$ es la resistencia como función de la temperatura, $R_{20^\circ C}$ es la resistencia a $20^\circ C$ y α_θ es el coeficiente de temperatura para el material ($0,00403^\circ K^{-1}$ y $0,00393^\circ K^{-1}$ para el aluminio y el cobre a $20^\circ C$ respectivamente [6]).

Es importante tener en cuenta también para la determinación de la resistencia eléctrica, los factores de efecto piel y la proximidad, el efecto piel se calcula como [7]:

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8X_s^4} \quad (3.4),$$

siendo:

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R_\theta} \cdot 10^{-7} k_s \quad (3.5),$$

El efecto de proximidad para dos cables mono-polares se puede calcular como:

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot 2,9 \quad (3.6),$$

Siendo:

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R_\theta} \cdot 10^{-7} k_p \quad (3.7),$$

Donde f es la frecuencia en Hertz, d_c el diámetro del conductor en mm, y s es la distancia entre los ejes de los conductores en mm. Los valores de k_s y k_p están dados en la Tabla 4 [7].

Tabla 4. Efecto pelicular y de proximidad, valores experimentales para k_s y k_p

Tipo de conductor	Impregnado	k_s	k_p
<i>Cobre</i>			
Trenzado circular	Sí	1	0,8
Trenzado circular	No	1	1
Circular compacto		0,435	0,37
Trenzado helicoidal, con centro vacío	Sí	¹³	0,8
De sectores	Sí	1	0,8
De sectores	No	1	1
<i>Aluminio</i>			
Trenzado circular	Cualquiera	1	
Circular de 4 segmentos	Cualquiera	0,28	
Circular de 5 segmentos	Cualquiera	0,19	
Circular de 6 segmentos	Cualquiera	0,12	
Segmentado con trenzado perimetral	Cualquiera	¹⁴	

El efecto de proximidad varía de acuerdo con el tipo de cable que se esté utilizando; bien sean grupos de conductores mono-polares o cables con múltiples hilos conductores. Para calcular el efecto de la proximidad en cables de tres polos circulares o en un grupo de tres conductores unifilares, se debe hacer uso de la ecuación [7]:

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} + 0,27} \right] \quad (3.8).$$

En el caso de conductores multipolares de sectores, el valor de y_p se debe calcular como las dos terceras partes del resultado obtenido con la ecuación 3,8, y cambiando los valores de d_c y s , por

¹³ Para determinar k_s se debe hacer uso de la ecuación [7]:

$$k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i}\right) \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i}\right)^2$$

donde d_i es el diámetro interno del conductor y d_c es el diámetro externo del conductor sólido equivalente.

¹⁴ Para determinar k_s con un conductor segmentado central rodeado de varios torones trenzados, se hace uso de la ecuación [7]:

$$k_s = \{12c[(\alpha c - 0,5)^2 + (\alpha c - 0,5)(\psi - \alpha)c + 0,33(\psi - \alpha)^2 c^2] + b(3 - 6b + 4b^2)\}^{0,5}$$

dónde b es la razón entre el diámetro total de los torones exteriores y el diámetro total del conductor; c la razón entre el diámetro de la sección segmentada y el diámetro total del conductor; α y ψ se calculan a partir de :

$$\alpha = \frac{1}{(1 + \text{sen}(\pi/n))^2}$$

$$\psi = \frac{2\pi/n + 2/3}{2(1 + \pi/n)}$$

donde n es el número de sectores.

d_x (diámetro de un conductor de sección circular equivalente) y $d_x + t$, siendo t el espesor del aislamiento entre los conductores, respectivamente [7].

Una vez determinados cada uno de los efectos que ocasionan cambios en la resistencia del conductor, se puede encontrar el valor de la resistencia en las nuevas condiciones a partir de la ecuación:

$$R = R_{\theta}(1 + y_s + y_p) \quad (3.9).$$

Las partes metálicas del cable diferentes al conductor pueden ocasionar pérdidas Joule debido a las corrientes inducidas en ellas. Existen dos secciones del cable en las que se pueden presentar estas pérdidas; la pantalla (se denotan por W_s) y la armadura o cubierta metálica (denotadas por W_a).

En general hay dos tipos de pérdidas presentadas en las pantallas y armaduras. Las primeras son las llamadas pérdidas de eddy, ocasionadas por las corrientes parasitas que aparecen cuando un material metálico se ve expuesto a flujos magnéticos alternantes, y que ocurren debido a que ningún punto de la pantalla se encuentra equidistante a los 3 hilos conductores de potencia.

El segundo tipo de pérdidas metálicas son las conocidas como pérdidas por circulación en las pantallas y armaduras, la cual ocurre cuando estas cubiertas son aterrizadas en más de un solo punto. Se da en conductores mono-polares, o en cables de núcleos múltiples con armadura individual.

Las pérdidas en la cubierta metálica y en la armadura son generalmente representadas por una función del calor producido en el conductor. De acuerdo con la configuración en que sean instalados los conductores, las pérdidas en las pantallas pueden verse incrementadas o reducidas. Para cables en formaciones tipo trébol, las corrientes inducidas en las pantallas se anulan considerablemente, mientras que para configuraciones planas las pérdidas por circulación en las cubiertas metálicas son de magnitudes considerables, y son denotadas como se muestra a continuación:

$$W_s = \lambda_s \cdot W_c \quad (3.10),$$

$$W_a = \lambda_a \cdot W_c \quad (3.11),$$

donde los sufijos c , s y a hacen referencia al conductor, la pantalla y la armadura, respectivamente. El factor de pérdidas λ puede ser calculado para grupos de 3 conductores en formación plana, como se muestra a continuación:

$$\lambda_s = \frac{|I_s|^2 R_s}{|I_c|^2 R} \quad (3.12),$$

$$\lambda_a = \frac{|I_a|^2 R_a}{|I_c|^2 R} \quad (3.13),$$

donde R en Ω/m representa la resistencia eléctrica del conductor.

Debido a que la distancia entre los núcleos conductores de los cables es pequeña, las corrientes inducidas lo serán igualmente, y por consiguiente las pérdidas se darán principalmente en el núcleo conductor [5].

En la Tabla 5 se muestran los valores de resistividad de los materiales metálicos utilizados para la construcción de cables de potencia aislados. Mientras que en las tablas 6 y 7 se muestran los valores relacionados con las pérdidas por tensión, es decir, permitividades relativas y valores de pérdidas del aislamiento [7].

Tabla 5. Resistividad y coeficientes de temperatura de metales usados en la fabricación de cables de potencia aislados

Material	ρ	α_{20}
	$\Omega \cdot m @ 20^\circ C$	Por K @ $20^\circ C$
<i>Conductores</i>		
Cobre	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Aluminio	$2,8264 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$
<i>Pantallas y armaduras</i>		
Plomo o aleaciones de plomo	$21,4 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Acero	$13,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Bronce	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Acero inoxidable	$70 \cdot 10^{-8}$	Despreciable
Aluminio	$2,84 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

Tabla 6. Permitividad relativa y factores de pérdida en el aislamiento para cables de media y baja tensión

Tipo de cable	ϵ	$\tan(\delta_x)$
<i>Cables aislados con papel impregnado</i>		
Tipo sólido, totalmente impregnado, pre-impregnado	4	0,01
Lleno de aceite		
Hasta 36 kV	3,6	0,0035
Hasta 87 kV	3,6	0,0033
Hasta 160 kV	3,5	0,0030
Hasta 220 kV	3,5	0,0028

Presión de aceite, tipo tubería	3,7	0,0045
Presión externa de gas	3,6	0,0040
Presión interna de gas	3,5	0,0045
<hr/> <i>Cables con otros tipos de aislamiento</i> <hr/>		
Caucho de butilo	4	0,050
EPR		
Hasta 36 kV	3	0,020
Más de 36 kV	3	0,005
PVC	8	0,1
PE	2,3	0,001
XLPE		
Hasta 36 kV (sin relleno)	2,5	0,004
Más de 36 kV (sin relleno)	2,5	0,001
Más de 36 kV (relleno)	3	0,005
PPL		
Cables desde 63/110 kV	2,8	0,0014

Tabla 7. Tensión mínima para la necesidad del cálculo de pérdidas en el aislamiento, de acuerdo a su material de construcción

Material	U_0 [kV]
<hr/> <i>Cables aislados con papel impregnado</i> <hr/>	
Tipo sólido	38
Llenos de aceite y presión de gas	63,5
<hr/> <i>Cables con otro tipo de aislamiento</i> <hr/>	
Caucho de butilo	18
EPR	63,5
PVC	6
PE (HD y LD)	127
XLPE (sin relleno)	127
XLPE (relleno)	63,5

3.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN SISTEMAS DE CABLES

3.3.1. CONDUCCIÓN

En general el mecanismo de transferencia de calor en los conductores enterrados es la conducción, aunque en otro tipo de instalaciones como cables aéreos o en túneles, la convección suele ser el modo principal de disipación del calor generado por la circulación de corriente.

La ecuación de transferencia de calor por conducción es conocida como la *Ley de Fourier*; para una pared con distribución de temperatura $\theta(x)$ el flujo de calor se puede encontrar mediante la ecuación:

$$q = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.14),$$

Donde ρ es la resistividad térmica, y el signo menos es consecuencia de que el calor fluye en la dirección en la que decrece la temperatura [5].

3.3.2. CONVECCIÓN

Cuando se trata de cables instalados en el aire, en túneles u otro tipo de ambiente en que se encuentren en contacto con dicho fluido, la convección y la radiación juegan un papel importante en la disipación del calor producido al interior del conductor.

En general existen dos tipos de convección; convección forzada, que es ocasionada por medios externos como el viento, ventiladores o bombas; y la convección natural, que es aquella que se da por la diferencia de densidades y temperaturas de las partículas cercanas a la superficie caliente. Con el objetivo de ser de alguna manera conservativos con el cálculo, cuando se analizan los mecanismos de disipación de calor en los conductores, solo se tiene en cuenta la convección natural en el exterior del cable [8].

Independientemente de cuál sea la forma en que la convección tenga lugar, la ecuación para su cálculo es de la forma:

$$q = h(\theta_x - \theta_{amb}) \quad (3.15),$$

Donde q , el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del aire, θ_x y θ_{amb} respectivamente. Esta ecuación es conocida como la *ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad h es conocida como el *coeficiente de transferencia de calor por convección*. La determinación de este valor es quizá la tarea más importante para el rateo de conductores aéreos, puede variar entre 2 y 25 W/m^2K para la convección natural en el aire, y entre 25 y 250 W/m^2K para convección forzada [8].

3.3.3. RADIACIÓN

El calor por radiación, son emisiones de energía ocurridas en la superficie del cable o el cuerpo estudiado. El flujo de calor por radiación está dado por la ley de *Stefan – Boltzmann* [8].

$$q = \epsilon \sigma_B \theta_s^{*4} \quad (3.16),$$

donde θ_s^* es la temperatura absoluta de la superficie¹⁵, σ_B es la constante de *Stefan – Boltzmann* ($\sigma_B = 5,68 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), y ϵ es una propiedad de radiación de la superficie llamada emitancia, la cual puede tomar valores entre 0 y 1. De igual forma, si la superficie recibe radiación, una porción de ella es absorbida de acuerdo a la propiedad α de la pared llamada absorptancia, la cual se calcula de la forma:

$$q_{abs} = \alpha q_{inc} \quad (3.17),$$

debido a que la radiación en los cables es tanto emitida como absorbida, se debe calcular como una interacción entre ambas formas de transferencia de calor entre dos paredes. La superficie del cable puede ser considerada pequeña, y la otra como una superficie gris ($\alpha = \epsilon$) lejana y grande. El flujo de calor en esta red de superficies estaría dado por:

$$q = \epsilon \sigma_B (\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (3.18),$$

Para encontrar la expresión para la tasa de transferencia de calor por radiación, se debe multiplicar el flujo por el área de la superficie, la ecuación obtenida para la tasa de transferencia de calor por radiación por unidad de longitud es:

$$W_{rad} = \epsilon \sigma_B A_{sr} (\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (3.19),$$

donde A_{sr} es el área efectiva de radiación por unidad de longitud.

En cables aéreos la transferencia de calor se presenta tanto por radiación como por convección en el aire, la tasa a la que se realizan estos intercambios energéticos se puede calcular como una combinación de ambos mecanismos, tal y como lo representa la expresión:

$$W = hA_s(\theta_s - \theta_{amb}) + \epsilon \sigma_B A_{sr} (\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (3.20),$$

donde A_s es el área de convección por unidad de longitud.

En la Tabla 8 se muestran los valores del coeficiente de absorción de la radiación solar en la superficie del cable para distintos materiales de construcción de conductores de potencia aislados [7].

Tabla 8. Coeficiente de absorción solar para superficies de cable

Material	α
Bitumen	0,8
Poli-cloropreno	0,8
PVC	0,6

¹⁵ En adelante el superíndice * simbolizará temperaturas absolutas y dadas en grados Kelvin.

PE	0,4
Plomo	0,6

3.4. RESISTENCIA TÉRMICA

Para el modelado de un sistema térmico en estado estable, se pueden realizar simplificaciones al diagrama tipo escalera presentado en la figura 11. De igual manera a como sucede en los circuitos eléctricos, los efectos de los elementos capacitivos se hacen mucho más relevantes durante el estado transitorio, y en los sistemas para los cuales la corriente es continua (en este caso el flujo de calor); su efecto es despreciable. En la Figura 12 se muestra el sistema simplificado con las resistencias térmicas y las fuentes de calor ya especificadas.

La ley de Ohm es análoga a la ley de Fourier y el modelo térmico puede ser evaluado similarmente a como se realiza con un circuito eléctrico. El sistema puede entonces dividirse en un conjunto de volúmenes representados por resistencias y capacitancias térmicas como fue explicado anteriormente.

La resistencia térmica se define como la habilidad de un material para oponerse al flujo de calor a través del mismo, y el equivalente térmico de la ley de Ohm se puede escribir de la siguiente manera:

$$W = \frac{\Delta\theta}{T} \quad (3.21),$$

Para la conducción en una capa cilíndrica, la resistencia térmica por unidad de longitud estará dada por:

$$T = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{max}}{r_{min}}\right) \quad (3.22),$$

donde ρ es la resistividad térmica del material, r_{max} el diámetro externo de la capa y r_{min} el diámetro interno.

Para conductores unipolares la ecuación 3.22 resulta ser adecuada para el cálculo de la resistencia de cada uno de los segmentos del cable de potencia. Sin embargo, en la industria existen múltiples condiciones bajo las cuales resulta de mayor conveniencia la instalación de cables de núcleo triple, y esta ecuación resulta ser insuficiente para dicho cálculo.

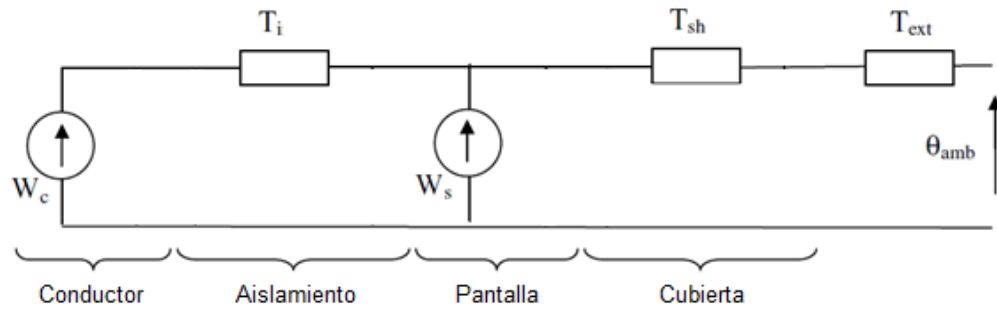


Figura 12. Diagrama escalera para modelado térmico en estado estable de un cable de potencia

La siguiente modificación de la ecuación debe ser introducida para su uso con conductores tripolares con secciones de porción circular [8].

$$T_{ins} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot G = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left(3 + \frac{9v}{2\pi(2r_x + v) - v} \right) \ln \left(\frac{r_a}{r_1} \right) \quad (3.23),$$

donde T_{ins} es la resistencia térmica del aislamiento entre los conductores, G el factor geométrico, r_a el radio del aislamiento, r_1 el radio del círculo que circunscribe a los conductores, r_x el radio de un conductor circular con sección transversal igual a la de los conductores con porción circular y v es el espesor del aislamiento entre los conductores.

En la Tabla 9 se muestran la resistividad térmica y el calor específico de algunos de los materiales más utilizados en la construcción de cables de potencia aislados [8].

3.4.1. RESISTENCIAS TÉRMICAS DE LOS CABLES DE POTENCIA AISLADOS

A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de las resistencias térmicas de cada una de las secciones que componen al cable o grupo de cables, así como las variaciones que deben ser introducidas de acuerdo a las diversas condiciones de instalación en las que puede realizarse el tendido de los conductores de potencia. En primera instancia se revisarán las resistencias térmicas de las partes constitutivas del cable: T_1 , T_2 y T_3 , que hacen referencia a las resistencias entre conductor y pantalla, pantalla y armadura, y recubrimiento exterior respectivamente. Posteriormente se presentarán las ecuaciones relacionadas con los elementos externos al conductor, es decir, el ambiente de instalación, que estará representado por la resistencia térmica T_4 .

Tabla 9. Propiedades térmicas de los materiales de construcción e instalación de cables de potencia

Material	Resistividad Térmica		Calor específico	
	(ρ)		$(c \cdot 10^6)$	
	$[K \cdot m/W]$		$[J/(m^3 \cdot K)]$	
<i>Materiales de aislamiento</i>				
Aislamiento de papel en cables de aceite	5,0		2,0	
PE	3,5		2,4	
XLPE	3,5		2,4	
Cloruro de polivinilo				
Cables de hasta 3 kV	5,0		1,7	
Cables de más de 3 kV	6,0		1,7	
EPR				
Cables de hasta 3 kV	3,5		2,0	
Cables de más de 3 kV	5,0		2,0	
Caucho butilo	5,0		2,0	
Caucho	5,0		2,0	
Papel – Propileno – papel	6,5		2,0	
<i>Pantallas protectoras</i>				
Poli-cloropreno	5,5		2,0	
PVC				
Cables de hasta 35 kV	5,0		1,7	
Cables de más de 35 kV	6,0		1,7	
PE	3,5		2,4	
<i>Material de instalaciones en ductos</i>				
Concreto	1,0		1,9	
Fibra	4,8		2,0	
Asbestos	2,0		2,0	
Barro	1,2		1,7	
PVC	6,0		1,7	
PE	3,5		2,4	

3.4.1.1. Resistencia térmica entre el conductor y la pantalla

3.4.1.1.1. Cables Monopolares

La resistencia térmica entre un conductor y la pantalla está dada por [9]:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (3.24),$$

donde ρ_T es la resistencia térmica del aislamiento en $K \cdot m/W$, d_c es el diámetro del conductor en mm y t_1 es el espesor del aislamiento entre el conductor y la pantalla en mm .

Para pantallas corrugadas se debe realizar la corrección del valor de t_1 , basándose en el diámetro interno medio de dicha cubierta, el cual estará dado por [9]:

$$t_1 = \left(\frac{D_{it} + D_{oc}}{2} \right) - ts \quad (3.25),$$

donde D_{it} es el diámetro del cilindro imaginario que apenas tocaría la parte interna de los valles de la pantalla corrugada, D_{oc} es el diámetro del cilindro imaginario que apenas tocaría la parte externa de las crestas de la pantalla, y ts es el espesor de la pantalla.

3.4.1.1.2. Cables cruzados

La resistencia térmica entre un conductor y la pantalla está dada por [9]:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (3.26),$$

donde G es el factor geométrico. Para el cálculo de la resistencia T_1 con cables de pantalla corrugada, se debe introducir, en el cálculo de G , la corrección para t_1 especificada por la ecuación 3.25.

Cables cruzados de dos polos con conductores circulares

El factor geométrico G esta dado en la Figura 13 [9].

Cables cruzados de dos polos con conductores sectorizados

El factor geométrico está dado por [9]:

$$G = 2 F_1 \ln \left(\frac{d_a}{2r_1} \right) \quad (3.27),$$

donde F_1 está dado por:

$$F_1 = 1 + \frac{2,2 t}{2\pi(d_x + t) - t} \quad (3.28),$$

donde d_a es el diámetro exterior del aislamiento del cable en mm , r_1 es el radio del círculo que circunscribe a los conductores en mm , d_x es el diámetro de un conductor circular con la misma sección transversal en mm , y t es el espesor del aislamiento en mm .

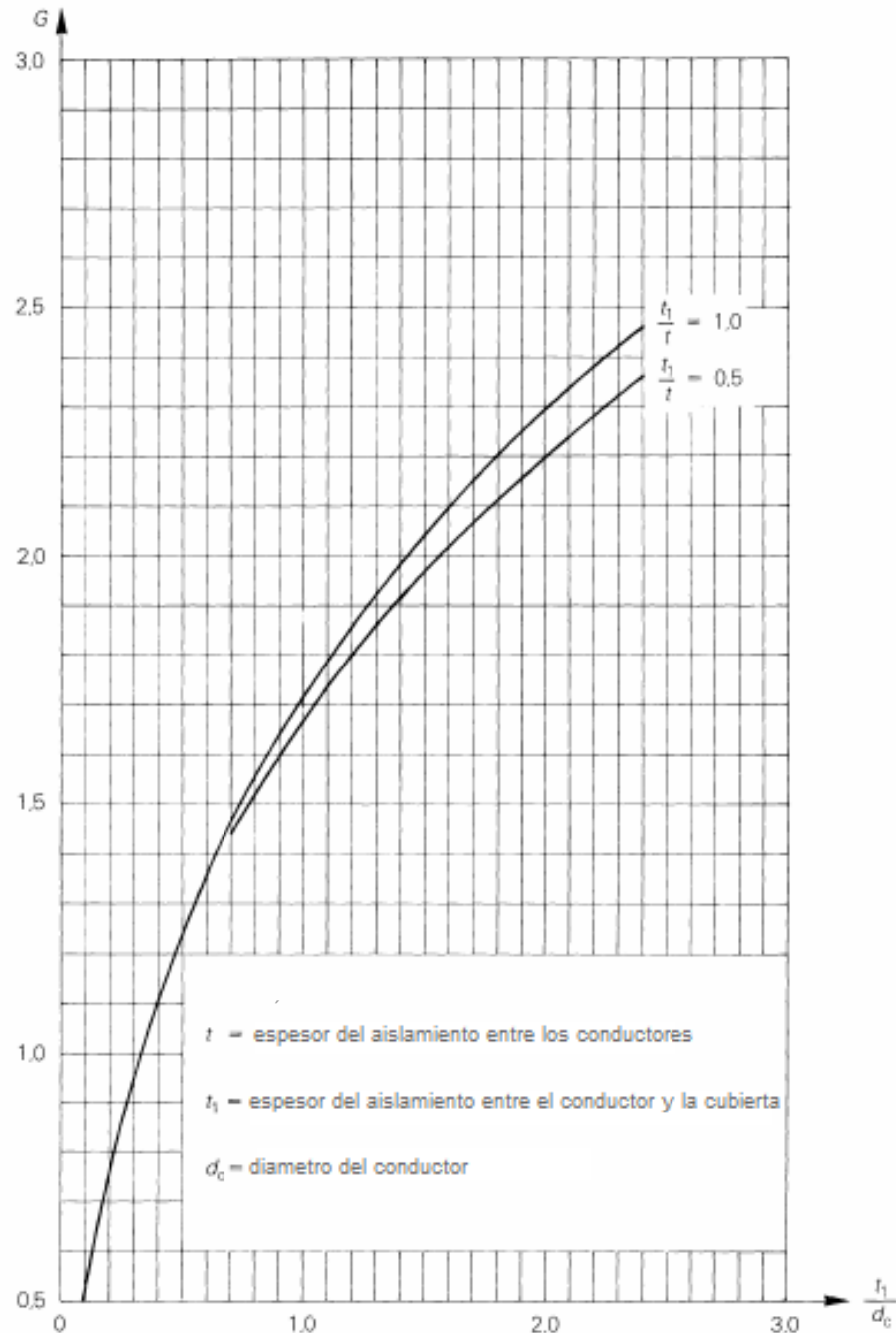


Figura 13. Factor geométrico para cables de dos polos con conductores circulares

Cables tripolares cruzados con conductores circulares

Para cables tripolares con conductores circulares la resistencia térmica T_1 está dada por [9]:

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G + 0,031(\rho_f - \rho_i)e^{0,67t_1/d_c} \quad (3.29),$$

donde ρ_i es la resistividad térmica del aislamiento en $K \cdot m/W$, ρ_f la resistividad térmica del material de relleno en $K \cdot m/W$, y el factor geométrico G está dado en la Figura 14 [9].

Cables tripolares cruzados con conductores ovalados

El cable puede ser tratado de igual manera que el de conductores circulares, con un diámetro equivalente dado por [9]:

$$d_c = \sqrt{d_{cM} \cdot d_{cm}} \quad (3.30),$$

donde d_{cM} es el diámetro mayor del conductor ovalado en mm , y d_{cm} es el diámetro menor del conductor ovalado en mm .

Cables tripolares cruzados con conductores de sector

El factor geométrico G para estos cables depende de la forma de los sectores, sin embargo para efectos de raneo una ecuación que se adapta bastante bien es [9]:

$$G = 3 F_2 \ln\left(\frac{d_a}{2 r_1}\right) \quad (3.31),$$

donde F_2 está dado por:

$$F_2 = 1 + \frac{3 t}{2\pi(d_x + t) - t} \quad (3.32),$$

d_a es el diámetro exterior del aislamiento del cable en mm , r_1 es el radio del círculo que circunscribe a los conductores en mm , d_x es el diámetro de un conductor circular con la misma sección transversal que la de los sectores en mm , y t es el espesor del aislamiento en mm .

3.4.1.1.3. Cables multipolares con pantalla de cinta metálica

Cables apantallados con conductores circulares

Los cables con aislamiento de papel deben ser tratados como cables cruzados para los que $\frac{t_1}{t}$ es 0,5. Posteriormente, para tener en cuenta la conductividad térmica de las armaduras metálicas, el resultado debe ser multiplicado por un factor K llamado el factor de apantallamiento y cuyo valor se muestra en la Figura 15. Entonces la resistencia térmica T_1 estará dada por:

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (3.33),$$

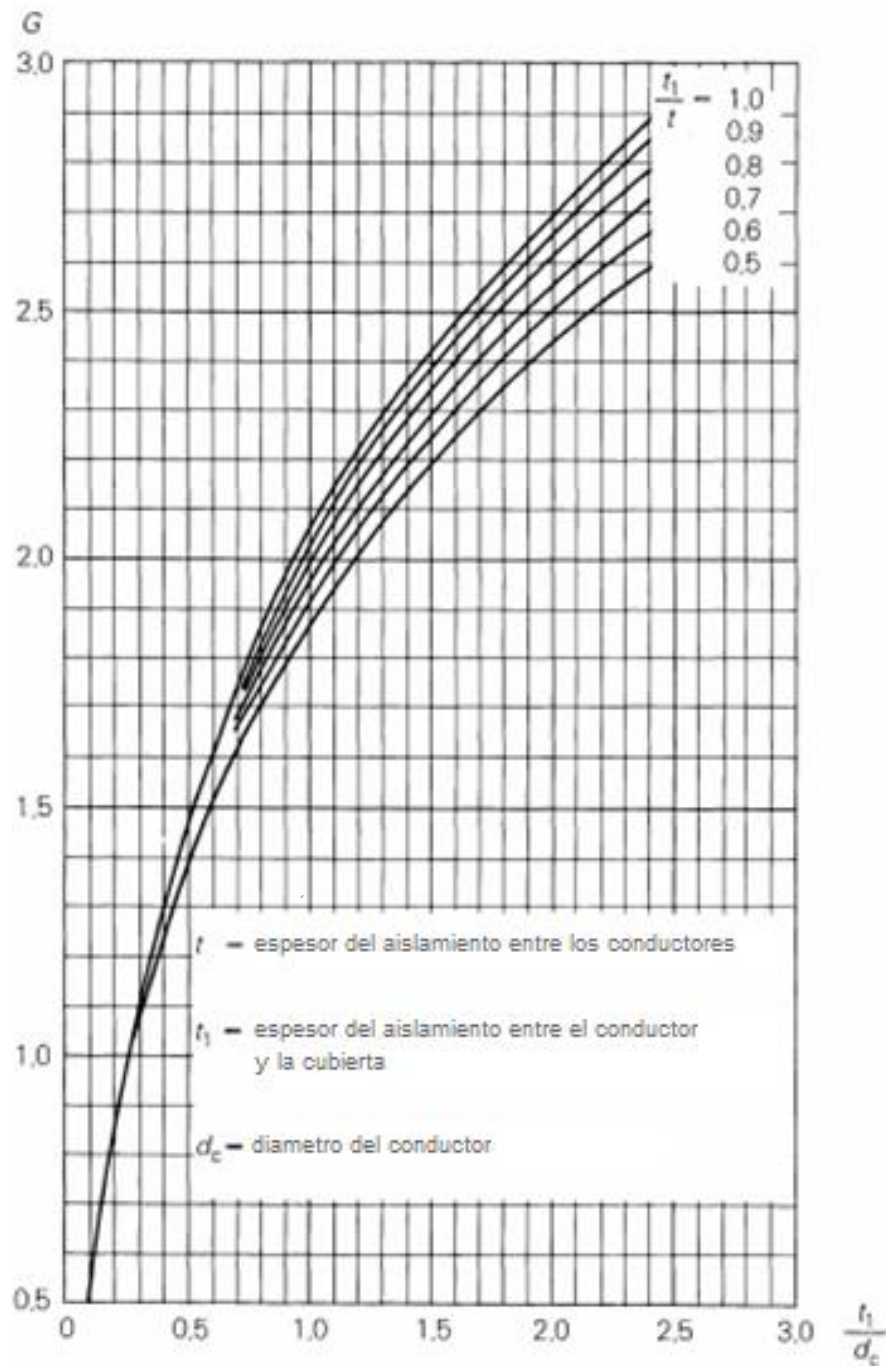


Figura 14. Factor geométrico G para cables tripolares con conductores circulares

Los cables tripolares con aislamiento extruido y cintas de cobre individuales en cada núcleo, deben ser tratados como cables tipo SL, que serán tratados más adelante en este capítulo [9]. Para

conductores de tres polos con aislamiento polimérico y pantallas individuales de alambre de cobre se debe utilizar la ecuación 3.29 [9].

3.4.1.1.4. **Cables apantallados con conductores ovalados**

Se deben tratar como un cable del mismo tipo con conductores circulares de diámetro equivalente, el cual estará dado por la ecuación 3.30.

3.4.1.1.5. **Cables apantallados con conductores en forma de sector**

T_1 se debe calcular de la misma manera que se realiza para cables cruzados con conductores en forma de sector, cambiando el valor de d_a por el diámetro de un círculo que circunscribe todo el conjunto del núcleo, y se debe multiplicar por un factor de apantallamiento dado en la Figura 16 [9].

3.4.1.1.6. **Cables de aceite**

Cables tripolares con conductores circulares, pantallas individuales de papel metalizado y ductos circulares de aceite entre núcleos

La resistencia térmica entre un conductor y la pantalla está dada por [9]:

$$T_1 = 0,385 \rho_T \left(\frac{2t_i}{d_c + 2t_i} \right) \quad (3.34),$$

donde d_c es el diámetro del conductor en mm , t_1 el espesor del aislamiento incluyendo las cintas de papel metalizado y carbón, más la mitad de las cintas no metálicas por encima de los tres núcleos en mm , y ρ_T es la resistencia térmica del aislamiento en $K \cdot m/W$.

Cables tripolares con conductores circulares, pantallas metálicas individuales de y ductos circulares de aceite entre núcleos

La resistencia térmica entre un conductor y la pantalla está dada por [9]:

$$T_1 = 0,35 \rho_T \left(0,923 - \frac{d_c}{d_c + 2t_i} \right) \quad (3.35),$$

donde t_1 el espesor del aislamiento incluyendo las cintas metálicas, más la mitad de las cintas no metálicas por encima de los tres núcleos en mm .

3.4.1.1.7. **Cables tipo SA y SL**

La resistencia térmica T_1 debe calcularse de igual manera a como se realiza para cables Monopolares.

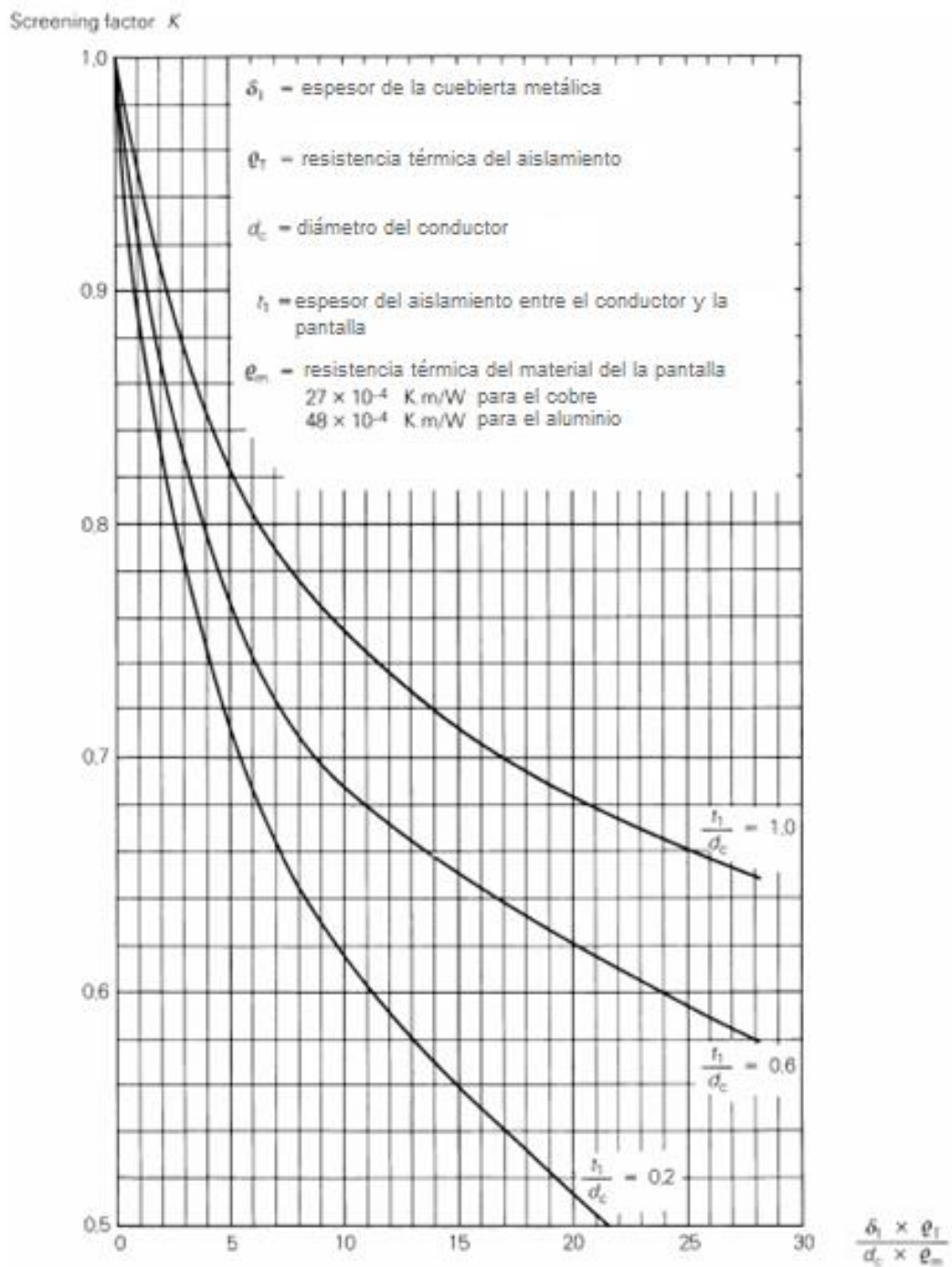


Figura 15. Resistencia térmica de cables de tres polos apantallados con conductores circulares comparada con cables no apantallados

Screening factor K

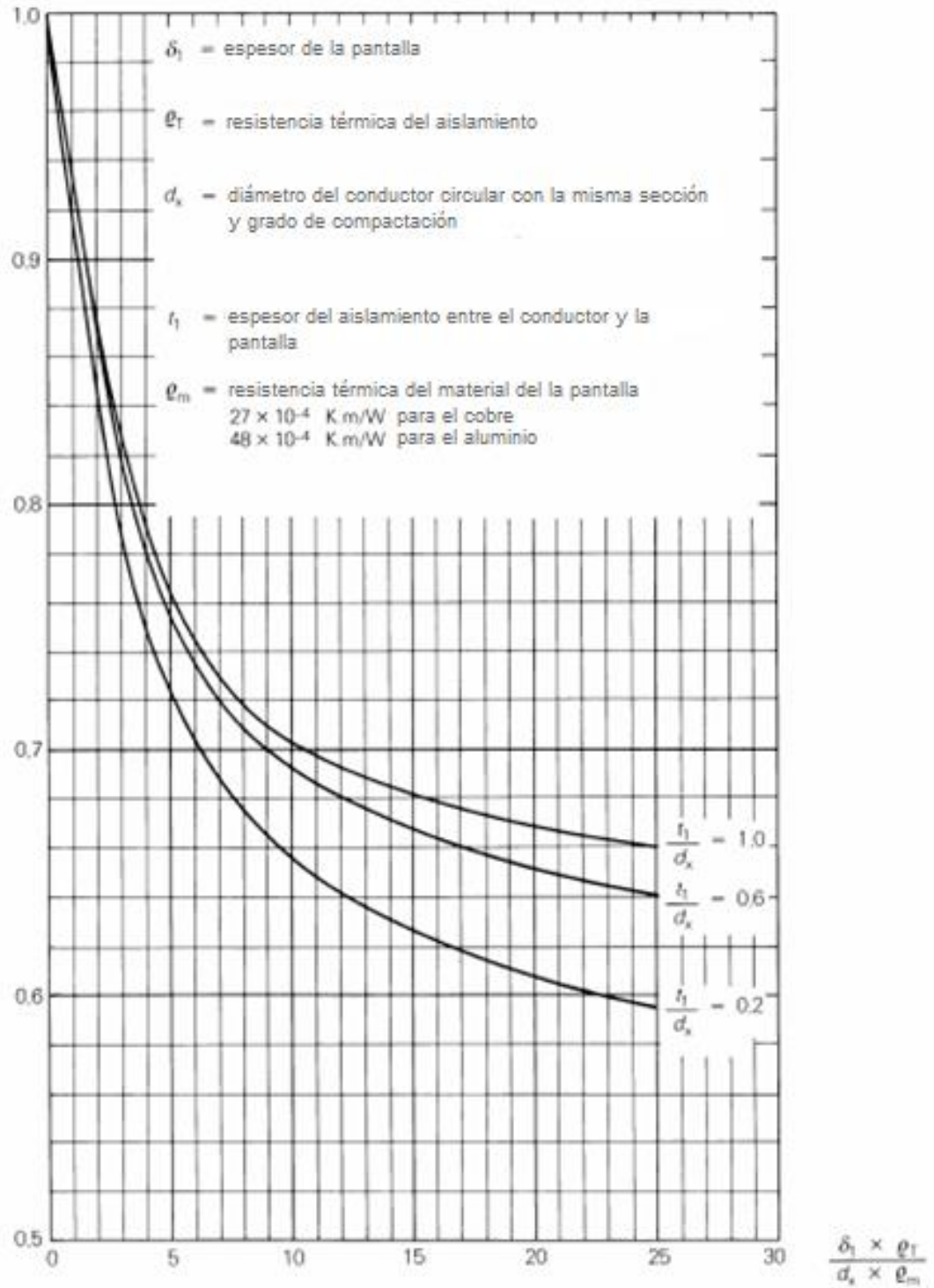


Figura 16. Resistencia térmica de cables de tres polos apantallados con conductores en forma de sector comparada con cables no apantallados

3.4.1.2. Resistencia térmica entre pantalla y armadura

3.4.1.2.1. Cables monopolares, bipolares y tripolares con pantalla metálica común

La resistencia térmica entre pantalla y armadura T_2 estará dada por [9]:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_s}\right) \quad (3.36),$$

donde t_2 es el espesor de la armadura y D_s es el diámetro externo de la pantalla.

3.4.1.2.2. Cables tipo SL y SA

La resistencia térmica del relleno y los recubrimientos que se encuentran debajo de la armadura estará dada por [9]:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{6\pi} \bar{G} \quad (3.37),$$

donde \bar{G} es el factor geométrico mostrado en la figura 17 [9].

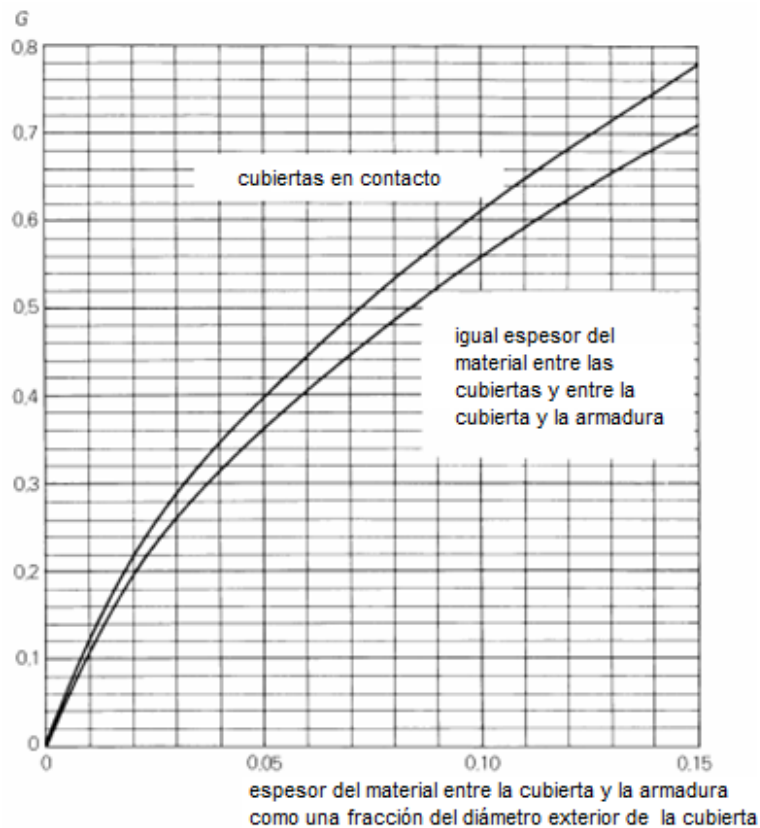


Figura 17. Factor geométrico \bar{G} para obtener la resistencia térmica del material de relleno entre pantallas y armadura de cables tipo SL y SA

3.4.1.3. Resistencia térmica de la chaqueta exterior

La parte exterior del cable generalmente tiene la forma de capas concéntricas, por lo que la resistencia térmica T_3 estará dada por [9]:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right) \quad (3.38),$$

donde t_3 es el espesor de la chaqueta exterior y D'_a es el diámetro externo de la pantalla.

En el caso de que la chaqueta sea corrugada se debe introducir una corrección a la ecuación del cálculo de la resistencia térmica T_3 , tal y como se muestra a continuación.

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left[\frac{D_{oc} + 2t_3}{\left(\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} \right) + t_s} \right] \quad (3.38),$$

3.4.1.4. Resistencia térmica exterior

La capacidad de conducción de corriente de los cables de potencia aislados depende enormemente de las condiciones del ambiente en el que se encuentran instalados. La resistencia térmica externa se dice que es responsable en un 70% por el calentamiento de los conductores; ésta depende de las características del suelo o cualquier otro medio circundante, del diámetro del conductor y de los campos térmicos generados por fuentes de calor cercanas, que en muchos de los casos son conformadas por otros cables.

El primer tipo de instalación que se tendrá en cuenta para el planteamiento de este modelo de cálculo, es aquél en el que los cables son enterrados directamente.

3.4.1.4.1. Cables directamente enterrados

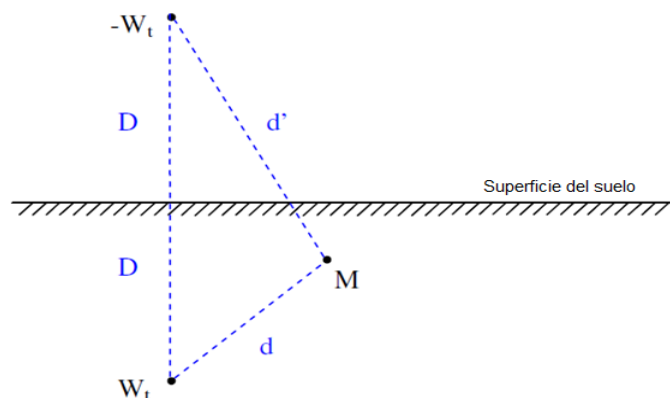


Figura 18. Imágenes del método de Kennelly

El método de Kennelly para el cálculo de la temperatura del suelo, está basado en la superposición de la fuente y su imagen ficticia ubicada por encima de la tierra. Si se asume que el suelo es una superficie isotérmica el aumento de la temperatura en un punto específico M, se puede calcular como el incremento ocasionado por W_t , sumado con el que es causado por su imagen ficticia ubicada simétricamente por encima de la superficie $-W_t$. Entonces, el aumento de la temperatura puede hallarse como [8]:

$$\Delta\theta = \frac{\rho_s}{2\pi} \cdot W_t \cdot \ln\left(\frac{d'}{d}\right) = \frac{\rho_s}{2\pi} \cdot W_t \cdot \ln(2u) \quad (3.39),$$

donde: ρ_s es la resistividad térmica del suelo; u es igual a D/r_e , siendo r_e el radio externo del conductor y D la profundidad de enterramiento, y W_t el total de pérdidas del cable.

3.4.1.4.2. Un solo conductor enterrado

La resistencia térmica exterior puede ser determinada como [5]:

$$T_4 = \frac{\Delta\theta}{W_t} = \frac{\rho_s}{2\pi} \cdot \ln(2u) \quad (3.40),$$

En la ecuación 3.40 se asume que las líneas de flujo de calor son originadas en el centro del conductor. En una buena cantidad de casos prácticos el valor de u es mayor de 10, es decir, la profundidad de enterramiento es mucho mayor que el radio del conductor, y por consiguiente la aproximación es buena; con un error menor a una milésima. Aun así existen ocasiones en que este valor es bastante más bajo, por lo que se debe introducir una corrección a la ecuación. La nueva fórmula obtenida, conocida como la ecuación larga de Kennelly [7] es la que se muestra a continuación.

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \cdot \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \quad (3.41).$$

Grupo de conductores enterrados sin contacto

Estos casos deben ser resueltos mediante superposición, teniendo en cuenta que cada cable actúa como una fuente calor, y que no interviene con el campo de calor de los demás conductores. Por consiguiente, para el cálculo del incremento de la temperatura en la superficie de cada cable se debe calcular independientemente el efecto de cada uno de los cables del grupo sobre el conductor a evaluar, para ellos se hace uso de la ecuación [9]:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp} \quad (3.42),$$

donde $\Delta\theta_{kp}$ es el aumento de temperatura en la superficie del cable p ocasionado por el calor W_k disipado en el cable k , el cuál está dado por [9]:

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot W_k \cdot \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \quad (3.43).$$

Las distancias d_{pk} y d'_{pk} son medidas desde el centro del cable p hasta el cable k , y hasta el centro de la imagen de k por encima de la superficie del suelo respectivamente. Ver la Figura 19 [9].

Se debe tener en cuenta que el término $\Delta\theta_{pp}$ está excluido de la ecuación 3.42 y se debe calcular, al igual que la resistencia térmica T_4 , de la misma manera a como se haría con un conductor único ubicado en p . Este cálculo debe repetirse para todos los cables del grupo.

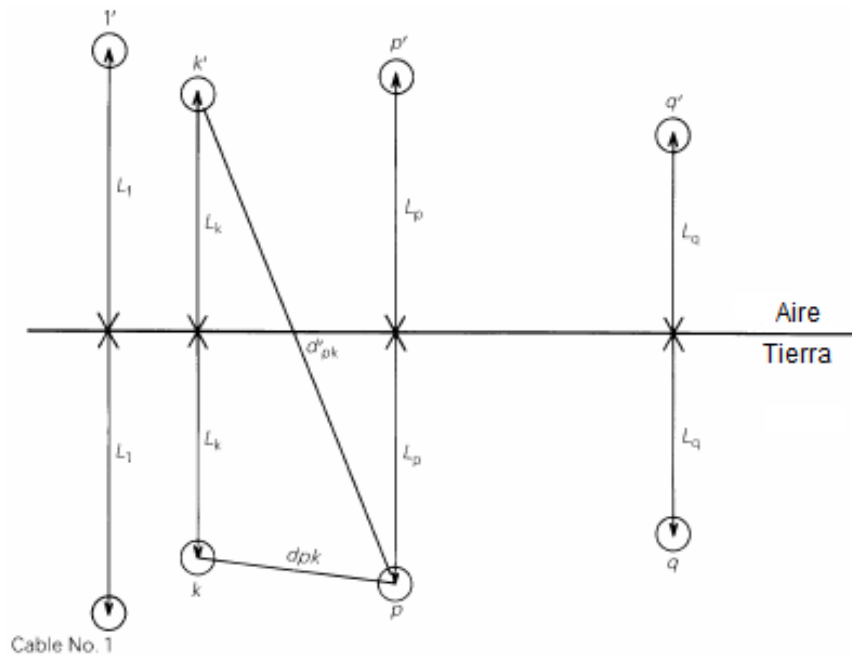


Figura 19. Grupo de q cables y sus imágenes reflejadas en la superficie tierra-aire

En el caso de que todos los cables del grupo se encuentren igualmente cargados y sean idénticos, la ecuación para el cálculo de la resistencia térmica T_4 se puede reducir de la siguiente manera.

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\} \quad (3.44).$$

Hay $(q - 1)$ términos en la ecuación, con $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ excluido.

Para un grupo de tres cables con pérdidas aproximadamente iguales, tendidos en un plano horizontal y con un espaciado uniforme, el cálculo de la resistencia térmica exterior se vería reducido a:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.45),$$

donde s_1 es la separación de los ejes entre dos conductores adyacentes en mm , y L es la distancia desde la superficie del suelo hasta el eje del cable.

Grupo de cables enterrados haciendo contacto

Dos cables monopolares en formación plana

Dependiendo del material con el que se construye la chaqueta exterior del cable de potencia, la ecuación para el cálculo de la resistencia exterior de cables en contacto tendrá ciertas variaciones. La existencia de una capa metálica en el recubrimiento más externo o justo debajo de él, puede generar, debido a la baja resistencia térmica, una superficie isotérmica que cambiaría el comportamiento del grupo de cables. En el caso de que los cables posean un recubrimiento metálico, el cálculo de la resistencia T_4 se realiza a partir de la ecuación [9]:

$$T_4 = \frac{1}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,451] \text{ para } u \geq 5 \quad (3.46).$$

En caso de que la chaqueta del conductor no esté compuesta por materiales metálicos, la ecuación para el cálculo de T_4 es la siguiente.

$$T_4 = \frac{1}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,295] \text{ para } u \geq 5 \quad (3.47).$$

Tres cables monopolares en formación plana

De igual manera a como sucede para grupos de dos cables, se debe tener en cuenta la existencia de componentes de baja resistividad térmica en la parte exterior del conductor. A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de la resistencia externa para conductores con y sin chaqueta exterior metálica, respectivamente.

$$T_4 = \rho_T [0,475 \cdot \ln(2u) - 0,346] \text{ para } u \geq 5 \quad (3.48).$$

$$T_4 = \rho_T [0,475 \cdot \ln(2u) - 0,142] \text{ para } u \geq 5 \quad (3.49).$$

Tres cables monopolares en formación trébol

En este caso la diferencia en el cálculo se presenta no solo cuando existen componentes metálicos en la parte exterior del cable, sino también del porcentaje de cubrimiento que estos elementos tienen sobre la superficie de la capa. Para cables con componentes metálicas la resistencia T_4 se calcula como:

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630] \quad (3.50).$$

En caso de que la capa exterior posea una cinta metálica o un trenzado de hilos conductores que cubra más del 50% del área, se debe aplicar una corrección al cálculo de la resistencia T_3 multiplicándola por un factor de 1,6. De lo contrario, si la parte metálica se compone de hilos o cintas helicoidales que cubran entre un 20 y 50% de la superficie de la chaqueta, las correcciones se deben aplicar sobre T_1 y T_3 , aplicándoles factores de corrección de 1,07 y 1,6 para cables de hasta 35 kV, y de 1,16 y 1,6 para cables de más de 35 kV.

Para cables con cubierta exterior no metálica, la resistencia T_4 se calcula como:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T [\ln(2u) + 2\ln(u)] \quad (3.51).$$

3.4.1.4.3. Cables en ductos

En este caso la resistencia térmica T_4 debe ser subdividida en 3 secciones diferentes, que son [9]:

Resistencia térmica entre el cable y el ducto T'_4

Para cables con diámetros de entre 25 y 100mm se debe utilizar la ecuación:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (3.52),$$

donde los valores de U , V y Y , son constantes que dependen de las condiciones de instalación y que están dados en la Tabla 11; θ_m es la temperatura media del espacio entre el cable y el ducto, y D_e es el diámetro externo del cable en mm; que para el caso de cables tipo tubería, se debe utilizar el equivalente del grupo de cables mostrado en la tabla 10.

Tabla 10. Diámetro equivalente para conductores tipo tubería.

Grupo de cables	D_e $\times D'_e$ ¹⁶
Dos núcleos	1,65
Tres núcleos	2,15
Cuatro núcleos	2,50

¹⁶ Diámetro exterior de cada uno de los conductores que componen el grupo.

Tabla 11. Valores de las constantes U, V y Y

Condiciones de instalación	U	V	Y
Tubería metálica	5,2	1,4	0,011
Ducto de fibra en el aire	5,2	0,83	0,006
Ducto de fibra en concreto	5,2	0,91	0,010
<i>Tubería en asbesto</i>			
Ducto en el aire	5,2	1,2	0,006
Ducto en concreto	5,2	1,1	0,011
Cable de presión de gas en tubería	0,95	0,46	0,0021
Cable tipo tubería de presión de aceite	0,26	0,0	0,026
Ductos plásticos	1,87	0,312	0,0037
Ductos en barro	1,87	0,28	0,0036

Resistencia térmica de la pared del ducto T''_4

La resistencia térmica a través de la pared de la tubería puede ser calculada como:

$$T''_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (3.53),$$

donde D_0 es el diámetro exterior del ducto, D_d el diámetro interior y ρ_T la resistividad térmica del material de la tubería. En caso el ducto sea metálico se puede desprestigiar este segmento de la resistencia térmica exterior.

Resistencia térmica exterior del ducto T'''_4

En caso de que la tubería se encuentre enterrada, este parámetro se debe calcular de igual manera a como se realiza para cables enterrados en las diferentes formaciones que se pueden presentar. En caso de que estén ubicados al aire el cálculo se debe realizar de igual forma que para cables en esta condición, y que será mostrado más adelante en el presente capítulo. Por otra parte, para ductos embebidos en concreto se debe aplicar una corrección al resultado, la cual estará dada por:

$$\frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \cdot \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \quad (3.54),$$

donde N es el número de cables cargados en el banco de ductos, ρ_e la resistividad térmica de la tierra alrededor del banco en $K \cdot m/W$, ρ_c la resistividad térmica del concreto en $K \cdot m/W$, y u esta

dado por $\frac{L_G}{r_b}$, siendo L_G la profundidad a la que se encuentra el centro del banco en mm , y r_b es el radio equivalente del banco de concreto en mm dado por la ecuación:

$$\ln(r_b) = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{y} \cdot \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \left(\frac{x}{2} \right) \quad (3.55),$$

donde los valores x y y son los lados más largo y más corto respectivamente, del banco de ductos, sin importar su posición. Esta fórmula solo es válida para valores de $\frac{y}{x}$ menores a 3.

Una vez obtenidos todos los segmentos de la resistencia externa para cables en ductos, se puede encontrar la resistencia externa total de este tipo de instalaciones, la cual estará dada por:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4 \quad (3.56).$$

3.4.1.4.4. Cables al aire

Cables protegidos de la radiación solar directa

La resistencia térmica externa para cables aéreos sin la influencia de la radiación solar, está dada por la fórmula [9]:

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_e^* \cdot h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (3.57),$$

donde h se calcula como:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E \quad (3.58),$$

siendo D_e^* es el diámetro externo del cable en m . h es el coeficiente de disipación de calor obtenido con un uso apropiado de las constantes Z , E y g , a partir de la Tabla 12 o las figuras 20, 21 y 22 [8]. En caso de que la superficie del cable sea no metálica se debe considerar como un cuerpo negro, de lo contrario se le debe dar un valor de h equivalente al 88% del valor de una superficie negra. $\Delta\theta_s$ es el aumento de la temperatura del cable por encima del ambiente.

Para realizar este cálculo con cables de chaqueta corrugada e debe introducir una corrección al diámetro, la cual está dada por:

$$D_e^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3} \quad (3.59),$$

donde t_3 es el espesor de la chaqueta, y D_{oc} es el diámetro de un círculo imaginario que apenas tocaría las crestas de la parte de la chaqueta.

Un método iterativo simple para el cálculo de $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ se muestra a continuación.

Primero se calcula:

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \quad (3.60),$$

y posteriormente:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25} \quad (3.61).$$

Inicialmente el valor de $(\Delta\theta_s)_0^{1/4}$ se toma como 2, y se realizan iteraciones hasta que $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0,001$, $\Delta\theta_d$ se calcula como:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n \lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \quad (3.62).$$

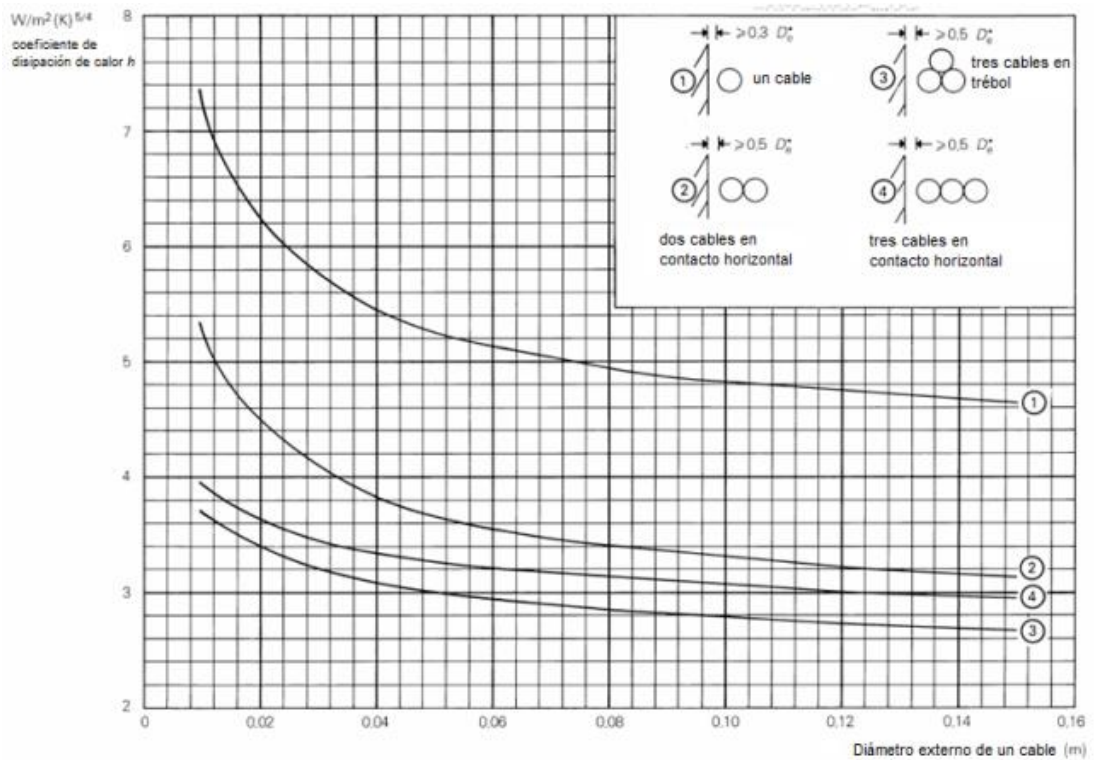


Figura 20. Coeficientes de disipación de calor para cables al aire libre. Parte 1

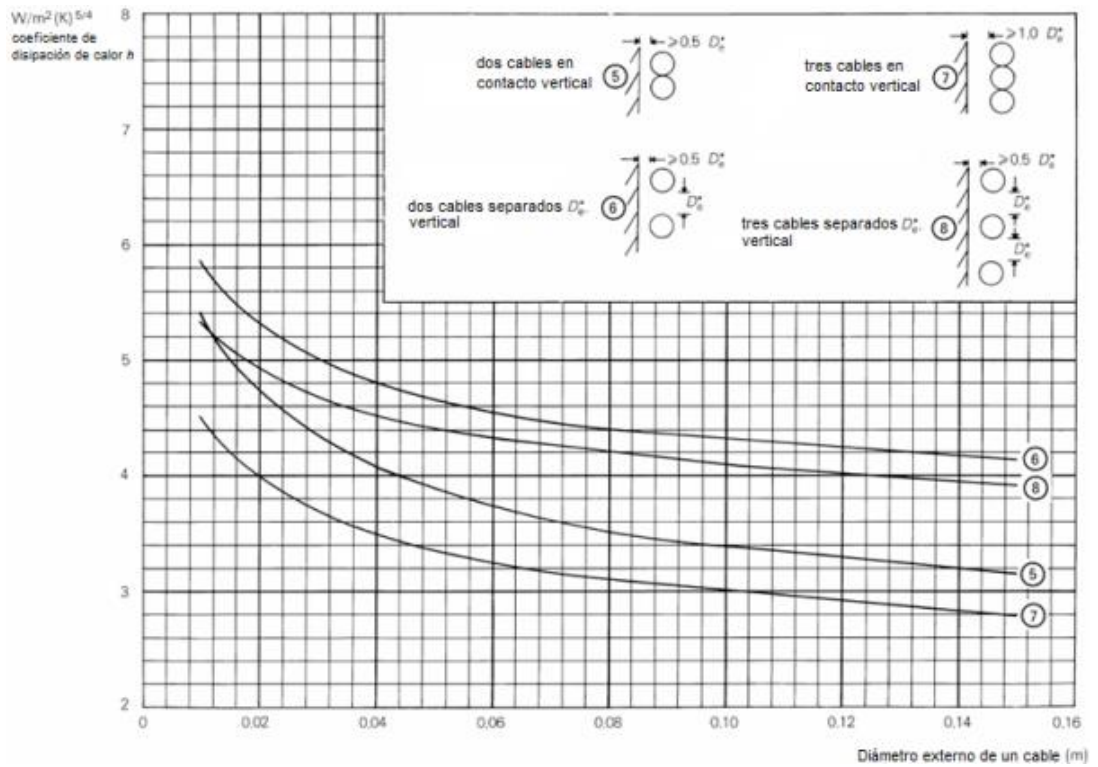


Figura 21. Coeficientes de disipación de calor para cables al aire libre. Parte 2

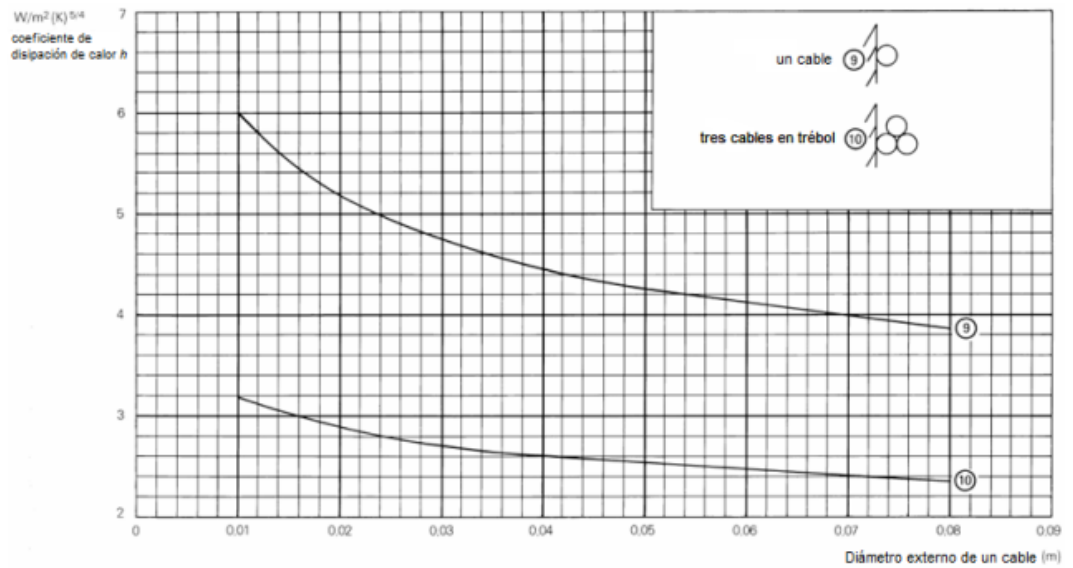












Figura 22. Coeficientes de disipación de calor para cables al aire libre. Parte 3

Tabla 12. Valores de las constantes Z , E y g

Instalación	Z	E	g	Modo
<i>Cables separados de la pared</i>				
Un solo cable o grupo de cables separados más de 0,75 veces D_e^*	0,21	3,94	0,60	
Dos cables en contacto, horizontal	0,29	2,35	0,50	
Tres cables en forma de trébol	0,96	1,25	0,20	
Tres cables en contacto, horizontal	0,62	1,95	0,25	
Dos cables en contacto, vertical	1,42	0,86	0,25	
Dos cables con una separación D_e^* , vertical	0,75	2,80	0,30	
Tres cables en contacto, vertical	1,61	0,42	0,20	
Tres cables con una separación D_e^* , vertical	1,31	2,0	0,20	
Cables directamente pegados a la pared				
Un solo cable	1,69	0,63	0,25	
Tres cables en forma de trébol	0,94	0,79	0,20	

Este factor tiene en cuenta las pérdidas dieléctricas que se dan al interior de las partes aislantes de los cables, en caso de que éstas sean despreciables $\Delta\theta_d$ se puede igualar a cero. $\Delta\theta$ es el aumento de temperatura permitido del conductor sobre el ambiente.

Cables expuestos a la radiación solar directa

En el caso de que los conductores sean expuestos directamente a la radiación solar, el cálculo de la resistencia externa T_4^* se realiza de igual manera que para cables no expuestos, pero introduciendo el siguiente cambio en el proceso de iteración:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25} \quad (3.63),$$

donde:

$$\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma D_e^* H}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \quad (3.64),$$

siendo $\Delta\theta_{ds}$ un factor para tener en cuenta las diferencias de temperatura causadas por la radiación solar directa, σ el coeficiente de absorción de radiación solar directa en la superficie del cable; H la intensidad solar, que debe ser tomada como 10^3 W/m^2 para la mayoría de las latitudes, aunque es recomendable buscar el valor local donde sea posible.

3.4.1.4.5. Cables portados en bandejas

Para efectos del cálculo de la capacidad de corriente en cables de potencia aislados se debe considerar un modelo equivalente al de los cables aéreos, teniendo en cuenta los factores de reducción inherentes al agrupamiento de cables y el acercamiento a paredes verticales y horizontales presentados en la sección anterior.

3.4.1.4.6. Cables en túneles

La composición del modelo para el cálculo de la capacidad de conducción de corriente de los cables de potencia aislados instalados al interior de túneles, es diferente en gran medida, de los procedimientos relacionados con los tipos de instalaciones descritos anteriormente. En este caso debido a que el volumen de aire con el cual tienen contacto los conductores es limitado, no puede asumirse un escenario con temperaturas estables, y deben realizarse iteraciones que permitan determinar los valores de temperatura para cada una de las superficies asociadas al flujo de calor.

Si bien el modelo tiene variaciones considerables con los casos previamente estudiados, el esquema se conserva hasta el cálculo de la resistencia térmica T_3 . Una vez calculada esta resistencia se deben calcular las resistencias térmicas T_4'' y T_4''' , que corresponden a la pared del túnel y el suelo circundante respectivamente.

La resistencia térmica de la pared del túnel se calcula a partir de:

$$T_4'' = \frac{\rho_{th} l}{S} \quad (3.65),$$

donde ρ_{th} es la resistencia térmica del material de la pared, l el espesor y S el área de conducción asociada a la pared.

Para túneles de sección circular la resistencia térmica del suelo circundante se calcula a partir de la ecuación 3.41, reemplazando el diámetro externo del cable por el diámetro externo de la pared. En el caso de túneles de sección cuadrada, la ecuación para el cálculo de esta resistencia térmica es la siguiente.

$$T_4''' = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left(3.388 \frac{L_T}{a} \right) \quad (3.66),$$

donde L_T es la distancia de enterramiento hasta el eje central del túnel, y a el lado del túnel cuadrado.

Después de determinar todas las resistencias térmicas del túnel, se procede con el cálculo del flujo de calor en el volumen de aire, el cuál debe ser iterado a partir de las siguientes ecuaciones [8]:

$$W_{total} = h_s(\theta_s - \theta_{gas}) \cdot A_s + A_{sr} F_{s,w} \sigma_B + (\theta_s^{*4} - \theta_{gas}^{*4}) \quad (3.67),$$

$$\frac{\theta_w - \theta_o}{T_4''} = h_w(\theta_{gas} - \theta_w) A_w + A_{sr} F_{s,w} \sigma_B + (\theta_s^{*4} - \theta_{gas}^{*4}) \quad (3.68),$$

$$\frac{\theta_w - \theta_o}{T_4'''} = \frac{\theta_o - \theta_{amb}}{T_4''} \quad (3.69),$$

$$F_{s,w} = \left(1 + \theta_s / \varepsilon_s + \zeta A_s \sigma_w / A_w \varepsilon_w \right)^{-1} \quad (3.70),$$

$$\zeta = \frac{N}{1 - \frac{N(N-1)\pi A_s \varepsilon_s \sigma_w}{A_w \varepsilon_w}} \quad (3.71),$$

$$h_s = h_{s,n} = \eta_s \cdot \eta_{wh} \cdot \eta_{wv} \cdot Nu_1 \cdot k_{aire} / D_e \quad (3.72),$$

$$Nu_1 = c(Gr \cdot Pr)^n \quad (3.73),$$

$$Gr = g\beta(\theta_s - \theta_{gas}) D_e^3 / v^2 \quad (3.74),$$

$$h_w = Nu_2 \cdot k_{aire} / L \quad (3.75),$$

$$Nu_2 = 0,59(Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (3.76),$$

$$Gr = g\beta(\theta_{gas} - \theta_w) L^3 / v^3 \quad (3.77),$$

donde los sufijos s , w y o , hacen referencia a la chaqueta y las paredes interna y externa del túnel respectivamente, N es el número de cables en el grupo, los coeficientes η_c , η_{wh} y η_{wv} (calentamiento mutuo y efectos de pared horizontal y vertical) se toman de la Tabla 13, mientras que los factores c y n se obtienen de la Tabla 14 [8]; y Pr es el número de Prandtl, que se calcula cómo:

$$Pr = 0,833209 - 0,582349\theta^* \cdot 10^{-3} + 0,552336\theta^{*2} \cdot 10^{-6} \quad (3.78),$$

siendo θ^* la temperatura a la que se encuentra el aire en Kelvin.

Tabla 13. Factores de reducción para cables agrupados














Arreglo de cables	¹⁷ Relación mínima (e/D_e)	Factor de reducción	
<i>Arreglo horizontal de cables (η_c)</i>			
2 multipolares		0,5	1,41
3 multipolares		0,75	1,65
2 formaciones tipo trébol		1,0	1,2
3 formaciones tipo trébol		1,5	1,25
<i>Arreglo vertical (η_c)</i>			
2 multipolares		2	$1,085(e/D_e)^{-0,128}$
3 multipolares		4	$1,19(e/D_e)^{-0,135}$
2 formaciones tipo trébol		4	$1,106(e/D_e)^{-0,078}$
<i>Cerca de superficie plana (η_{wh}, η_{wv})</i>			
Horizontal o vertical		0,5	1,23

Tabla 14. Parámetros para fórmulas de convección de cables en túneles

Agrupamiento	Espaciado	Cable	c	n
	Sin tocarse $s/D_e > 2$	Superior	0,725	0,24
		Central	0,785	0,21
		Exterior	0,815	0,21
	Tocándose	Central	0,55	0,20
		Exterior	0,69	0,20
	Tocándose	Central	0,40	0,215
		Superior	0,54	0,215
		Inferior	0,715	0,215
	Sin tocarse $s/D_e > 2$	Central	0,60	0,225
		Superior	0,70	0,225
		Inferior	0,78	0,225
	Tocándose	Superior	0,48	0,20
		Inferior	0,68	0,20

¹⁷ Para valores de e/D_e menores al especificado en cada caso, el factor de reducción no puede ser despreciado. En caso de ser despreciado, o que debido a las condiciones de instalación no aplique, debe asignársele un valor de 1,0 al factor de reducción respectivo.

4. CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

Si bien en los capítulos anteriores se consolidaron los elementos esenciales del modelo termodinámico para el cálculo de la capacidad de transporte de corriente de cables de potencia aislados, aún es necesario realizar ciertas modificaciones que permitan introducir la intensidad y el aumento de temperatura dentro de la ecuación de dimensionamiento del conductor.

A partir de las ecuaciones descritas en el capítulo anterior, y conforme a la primera ley de la termodinámica, se puede construir una expresión para el aumento de temperatura en el conductor, en función de la energía disipada en el cable o grupo de cables, y las resistencias térmicas de cada una de las secciones que los componen. La ecuación para el cálculo del aumento de temperatura es, en general, como se muestra a continuación. [7]

$$\Delta\theta = \left(I^2 R + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \quad (4.1),$$

donde $\Delta\theta$ es el aumento permisible de temperatura en el conductor, R la resistencia eléctrica del conductor y n es el número de conductores activos de igual tamaño al interior del cable.

La ampacidad permitida de los cables de potencia puede ser calculada como se muestra a continuación, teniendo en cuenta cada una de las variaciones que deben ser introducidas en las resistencias térmicas de acuerdo a los tipos de cable y ambientes de instalación, tal y como fue especificado en el capítulo anterior.

4.1. CABLES DIRECTAMENTE ENTERRADOS

4.1.1. INSTALACIONES EN LAS QUE NO SE PRESENTA SECADO DEL SUELO

4.1.1.1. Cables de corriente alterna

La expresión para el cálculo de la corriente permisible de cables de corriente alterna en estas condiciones es [7]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (4.2),$$

siendo R la resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna y a la temperatura especificada.

4.1.1.2. Cables de corriente directa de hasta 5 kV

El cálculo de la máxima soportabilidad de corriente del cable se calcula como:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R'T_1 + nR'T_2 + nR'(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (4.3),$$

donde R' es la resistencia eléctrica en corriente directa por unidad de longitud en (Ω/m) .

4.1.2. INSTALACIONES DONDE OCURRE SECADO PARCIAL DEL SUELO

Cuando se presenta secado del suelo alrededor de los cables directamente enterrados, las condiciones térmicas del sistema sufren cambios que deben ser considerados. Para el cálculo de la ampacidad de cables de potencia aislados en estas condiciones se deben introducir correcciones en las resistencias térmicas del modelo, que permitan tener en cuenta los nuevos modos de transferencia de calor que actúan durante el secado de la tierra.

4.1.2.1. Cables de corriente alterna

Para cables de corriente alterna en instalaciones con secado parcial del suelo se debe utilizar la siguiente fórmula, en comparación con la ecuación 4.1.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + vT_4)] + (v - 1)\Delta\theta_x}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + vT_4)} \right]^{0,5} \quad (4.4),$$

donde

$$\Delta\theta_x = (\theta_x - \theta_a) \quad (4.5),$$

siendo v la razón entre las resistividades térmicas del suelo seco y húmedo (ρ_a/ρ_w) , θ_x la temperatura crítica de la tierra (temperatura en la frontera entre los suelos seco y húmedo) en $^{\circ}C$, y θ_a la temperatura ambiente en $^{\circ}C$.

4.1.2.2. Cables de corriente directa de hasta 5 kV

La ecuación para la ampacidad de cables de corriente directa en instalaciones con secado parcial del suelo es:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta + (v - 1)\Delta\theta_x}{R' T_1 + nR' T_2 + nR'(T_3 + vT_4)} \right]^{0,5} \quad (4.6).$$

4.1.3. INSTALACIONES DONDE EL SECADO DEL SUELO DEBE SER EVITADO

4.1.3.1. Cables de corriente alterna

Para evitar el secado del suelo debido al aumento de la temperatura ocasionado por la circulación de corriente, se deben introducir las siguientes correcciones al cálculo de la ampacidad.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x + n W_d T_4}{n R T_4 (1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5} \quad (4.7).$$

4.1.3.2. Cables de corriente directa de hasta 5 kV

El cálculo de la corriente permisible se debe realizar a partir de la siguiente simplificación:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x}{n R' T_4} \right]^{0,5} \quad (4.8).$$

4.2. CABLES AÉREOS

4.2.1. CABLES PROTEGIDOS DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

Para el cálculo de la ampacidad de cables aéreos se deben utilizar las ecuaciones 4.2 y 4.3 en cables de corriente alterna y corriente directa respectivamente, introduciéndose las correcciones necesarias para las resistencias térmicas de acuerdo al tipo de cables y ambientes.

4.2.2. CABLES DIRECTAMENTE EXPUESTOS A LA RADIACIÓN SOLAR

4.2.2.1. Cables de corriente alterna

Para tener en cuenta el efecto de la radiación solar se debe modificar la ecuación de la siguiente manera:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma D_e^* H T_4^*}{R T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5} \quad (4.9).$$

4.2.2.2. Cables de corriente directa de hasta 5 kV

Para cables de corriente directa la ecuación se simplifica como:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR'(T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5} \quad (4.10).$$

4.3. CABLES EN TÚNELES

Para el cálculo de la capacidad de conducción de corriente de cables en túneles, se debe realizar el procedimiento presentado en la sección *iv* del literal *d* en el numeral 4.4.1.

Se deben utilizar las ecuaciones 3.65 a 3.78 para realizar el proceso de iteración para el cálculo de las resistencias térmicas externas que intervienen en el proceso de disipación del calor total producido al interior del cable debido a la circulación de corriente a través de las partes metálicas del conductor, cuya ecuación; necesaria para el proceso de iteración es:

$$W_{total} = n I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (4.11).$$

La variable objetivo para el método iterativo utilizado en el cálculo, debe ser la corriente que circula a través del conductor, lo que garantiza, que una vez alcanzada la convergencia, se obtenga el valor de la ampacidad del cable en las condiciones de instalación respectivas.

5. RECOMENDACIONES

El dimensionamiento de los cables aislados de potencia debe realizarse de acuerdo con el tipo de instalación, debido a que cada una de las características del ambiente tiene un impacto considerable sobre su desempeño.

Factores como la temperatura del suelo, la distancia de enterramiento, la separación entre cables y la resistividad térmica de la tierra, pueden generar cambios en la ampacidad del orden del 10 y hasta el 20 por ciento de la ampacidad (Ver Anexo C). Otros factores como los diámetros de los ductos utilizados y la forma constructiva de las pantallas y armaduras, pueden generar cambios, que de igual manera pueden comprometer la capacidad de transporte del cable.

Existe sin embargo otro aspecto que no fue mencionado entre los anteriores, y que resulta ser uno de los más importantes a ser considerados cuando se realiza una nueva instalación de cables aislados de potencia; y que es el tipo de conexión de las pantallas, no solo por el incremento en las pérdidas de calor sino por las implicaciones en materia de seguridad que conlleva la circulación de corriente por las pantallas, y el incremento de la tensión en sus extremos.

Cuando se instalan cables apantallados las pantallas metálicas deben ser aterrizadas, ya que las tensiones que aparecen debido a efectos inductivos o capacitivos pueden alcanzar valores altos y pueden ocasionar problemas de seguridad en la instalación. Sin embargo, el aterrizamiento de las pantallas es causante de la circulación de corrientes de gran magnitud a través de ellas, por lo que surgen, como efectos adversos, el incremento de tensiones de toque que deben ser controladas; y el aumento de las pérdidas en forma de calor por efecto joule de hasta un 200%; por lo que deben implementarse medidas para la mitigación de estos fenómenos (Ver Anexo C).

Entre las medidas que pueden ser implementadas para la reducción de las corrientes a través de la pantalla se pueden encontrar:

- Agrupamiento e interconexión de las pantallas de todos los conductores del circuito. Este método suele ser efectivo para el control de las corrientes de cortocircuito a través de la pantalla, y mejora la seguridad de la instalación. En cuanto a las corrientes inducidas en estado estable no es una buena alternativa, debido a que su efectividad se ve afectada por la separación entre las fases del circuito, la longitud del cable, los materiales de aislamiento y la conductividad de la pantalla.

- Conexión de la pantalla en un solo extremo. Un circuito abierto garantiza la eliminación de las corrientes que circulan a través de la pantalla, y por consiguiente, las pérdidas en forma de calor son controladas efectivamente. Sin embargo a medida que la longitud del cable aumenta, las condiciones de seguridad de la instalación pueden verse afectadas, debido al incremento de la tensión en el extremo abierto de la pantalla. En la tabla 15 se muestran longitudes de referencia para la instalación de pantallas con conexión en un único punto, de acuerdo a el tamaño del cable y al número de fases por grupo [1].
- Pantallas cruzadas. Otra alternativa de gran efectividad para el control de las corrientes que circulan a través de las pantallas es la implementación de pantallas cruzados. Existen varios tipos de pantallas cruzadas, tales como: de punto final, de punto medio, transpuestas, no transpuestas, seccionadas, entre otros¹⁸.

Tabla 15. Longitudes máximas de instalación de pantallas aterrizadas en un solo punto para conductores monopolares

Tamaño del conductor [AWG ó kcmil]	Longitud ¹⁹	
	Una fase por grupo	Una fase por grupo
	[m]	[m]
1/0	430	337
4/0	296	1079
350	239	835
500	203	709
750	171	572
1000	152	512
2000	123	0

De acuerdo a lo anterior, se pueden entonces formular las siguientes recomendaciones:

- Se deben realizar los cálculos de ampacidad para cada instalación que involucre la utilización de cables de potencia aislados, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y evitar el deterioro acelerado de los materiales que componen al cable. Además de ello, un buen cálculo de la capacidad de transporte de corriente, permite optimizar la selección tanto técnica como económicamente.

¹⁸ Para información más detallada consultar estándar ANSI/IEEE 575 de 1988.

¹⁹ Las longitudes recomendadas son basadas en cables de 15 kV.

- Es necesario implementar medidas de mitigación de las corrientes que circulan a través de las pantallas, con el objetivo de minimizar los riesgos que esto representa, y de reducir las pérdidas por efecto Joule en las cubiertas metálicas; lo cual finalmente llevará a la optimización de la capacidad del cable.
- Cuando se consultan catálogos o manuales (*Handbooks*) de fabricantes de cables, es indispensable tener en cuenta las anotaciones que se hacen acerca de cada una de las recomendaciones, teniendo especial cuidado de las condiciones con que fue realizado el cálculo de las capacidades y/o distancias allí presentadas. Las variaciones que pueden presentarse en los valores de resistividad térmica de la tierra, temperatura del suelo, profundidad de enterramiento, tipo de conexionado de las pantallas, entre otras, pueden generar variaciones de magnitudes considerables, y que pueden causar dimensionamientos que comprometan la seguridad de la instalación, o la economía del proyecto. En el Anexo C se presentan curvas de sensibilidad de la ampacidad a algunos de los parámetros aquí mencionados.
- Con el objetivo de maximizar la capacidad del cable se debe realizar una evaluación de los parámetros técnicos, las condiciones de seguridad y el impacto económico; que permitan optimizar la instalación mediante la implementación de las siguientes estrategias para la reducción de los efectos sobre la ampacidad:
 - ✓ Reducción de la profundidad de enterramiento.
 - ✓ Aumento de la separación de los conductores activos.
 - ✓ Reducción de la resistividad térmica del terreno (Mediante el reemplazo del material de relleno).
 - ✓ Utilización de haces de cables de potencia para la reducción de la susceptibilidad de la ampacidad ante los cambios en las condiciones de instalación.
- Cuando se realiza la selección de los cables de potencia para ser implementados en todo tipo de instalación, es necesario tener en cuenta parámetros de diseño adicionales a la ampacidad; como lo son las corrientes de cortocircuito y la regulación de tensión, las tensiones inducidas en las pantallas, en algunos casos los ciclos de trabajo del cable. En sistemas con grandes longitudes de cable y niveles de cortocircuito elevados, es posible que las secciones de los conductores deban ser incrementadas para mitigar sus efectos.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló y clarificó una metodología para el cálculo de la capacidad de corriente de cables de potencia aislados en diferentes condiciones de instalación; tales como cables aéreos, directamente enterrados, al interior de tuberías, túneles y bancos de ductos.

Se identificaron de forma simple y sistemática los criterios para el dimensionamiento de conductores eléctricos de potencia en diferentes condiciones de instalación.

Se determinaron de forma clara las propiedades termodinámicas de los materiales de construcción del conjunto de elementos que componen el cable, así como de los diferentes ambientes a los que estos puedan verse expuestos.

Se estableció un modelo termodinámico para las siguientes condiciones de instalación: Cables directamente enterrados, aéreos y en bandejas, en ductos, bancos de ductos y túneles.

Se establecieron las relaciones respectivas entre cada uno de las características de la instalación, con la ampacidad de cables de potencia aislados, analizándose las sensibilidades de la capacidad de acuerdo a la variación en cada uno los parámetros.

Se identificaron estrategias simples y efectivas para la optimización de la capacidad de los conductores, y se presentaron recomendaciones al respecto.

REFERENCIAS

- [1] The Okonite Company. Engineering Handbook. Engineering Data for Copper and Aluminum Conductor Electrical Cables. The Okonite Company, 2010.
- [2] Universal Cable (M) Berhad. XLPE Insulated Power Cables. Universal Cable and Subsidiaries. Consultado en línea [<http://www.ucable.com.my/industrialcables.html>] en 25-06-2013.
- [3] Condumex. Manual para la instalación de cables de energía de media tensión. Condumex, 2009.
- [4] Schneider Electric. Productos Dexon 2012. Schneider Electric de Colombia S.A. Colombia 2012.
- [5] MØLLER Jensen, Morten. Overload Capacity of Polymer Insulated Medium Voltage Cables. Master's Thesis. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark. March 2001.
- [6] RAS, Enrique. Teoría de las líneas eléctricas. Universidad Politécnica Barcelona. Marcombo, Boixareu Editores. 1973.
- [7] IEC. International Standard 60287-1-1. Calculation of the current rating, current rating equation (100% load factor) and calculation of losses. International Electrotechnical Commission. Second edition. 2006.
- [8] ANDERS, George J. Rating of Electric Power Cables, Ampacity computations for transmission, distribution and industrial applications. IEEE Press, 1997.
- [9] IEC. International Standard 60287-2-1. Calculation of the current rating, Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. International Electrotechnical Commission. Second edition. 2006.

ANEXO A
TABLAS DE AMPACIDAD

TABLAS DE AMPACIDAD

A manera de referencia se muestran a continuación tablas de ampacidad de cables de potencia aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV en condiciones de instalación específicas.

Es pertinente reiterar que para condiciones de instalación con características diferentes a las aquí especificadas, los valores aquí contenidos carecen de validez, y es necesario realizar el cálculo para los parámetros específicos del ambiente.

Tabla A-1. Ampacidad de cables monopolares aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV directamente enterrados en configuración plan: pantallas en circuito abierto

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²⁰		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	134	-	-
4	174	-	-
2	224	217	-
1	254	-	-
1/0	288	-	266
2/0	327	317	301
3/0	367	-	-
4/0	417	409	386
250	457	-	-
350	549	540	507
500	661	653	611
750	819	808	751
1000	947	927	865

²⁰ Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, separación entre ejes de 20 cm, resistividad térmica del suelo 1 K · m/W y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

Tabla A-2. Ampacidad de cables monopoles aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV directamente enterrados en configuración plana: pantallas con corrientes circulantes

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²¹		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	134	-	-
4	173	-	-
2	222	215	-
1	251	-	-
1/0	284	-	262
2/0	321	311	294
3/0	359	-	-
4/0	404	398	373
250	439	-	-
350	518	510	475
500	623	601	562
750	723	715	662
1000	779	791	751

²¹ Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, separación entre ejes de 20 cm, resistividad térmica del suelo $1 K \cdot m/W$ y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

Tabla A-3. Ampacidad de cables monopoles aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV directamente enterrados en configuración tipo trébol: pantallas en circuito abierto

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²²		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	116	-	-
4	149	-	-
2	192	191	-
1	218	-	-
1/0	247	-	211
2/0	281	279	239
3/0	317	-	-
4/0	360	360	305
250	395	-	-
350	475	475	398
500	574	575	479
750	714	715	589
1000	828	825	677

²² Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, cables en contacto, resistividad térmica del suelo $1 K \cdot m/W$ y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

Tabla A-4. Ampacidad de cables monopolares aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV directamente enterrados en configuración tipo trébol: pantallas con corrientes circulantes

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²³		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	116	-	-
4	149	-	-
2	192	191	-
1	217	-	-
1/0	246	-	210
2/0	279	278	237
3/0	315	-	-
4/0	357	357	302
250	390	-	-
350	466	466	390
500	563	560	466
750	684	686	564
1000	773	782	645

²³ Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, cables en contacto, resistividad térmica del suelo $1 K \cdot m/W$ y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

**Tabla A-5. Ampacidad de cables monopolares aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV en ductos enterrados:
Tres circuitos, uno por tubería: pantallas en circuito abierto**

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²⁴		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	77	-	-
4	99	-	-
2	127	129	-
1	144	-	-
1/0	162	-	145
2/0	184	187	163
3/0	208	-	-
4/0	236	239	206
250	258	-	-
350	309	313	267
500	372	376	319
750	460	464	390
1000	531	535	446

²⁴ Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, tuberías de 6 pulgadas, separación entre ductos igual a D/2, resistividad térmica del suelo 1 K · m/W y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

**Tabla A-6. Ampacidad de cables monopolares aislados de 5 kV, 15 kV y 35 kV en ductos enterrados:
Tres circuitos, uno por tubería: pantallas con corrientes circulantes**

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Ampacidad ²⁵		
	MV-90 @ 5 kV [A]	MV-90 @ 15 kV [A]	MV-105 @ 35 kV [A]
6	77	-	-
4	99	-	-
2	127	128	-
1	144	-	-
1/0	162	-	142
2/0	183	183	158
3/0	208	-	-
4/0	235	231	198
250	256	-	-
350	306	293	248
500	368	343	290
750	447	406	340
1000	503	451	382

²⁵ Válido para cables XLPE con chaqueta lisa de PVC y pantalla de cinta de cobre, profundidad de enterramiento de 90 cm, tuberías de 6 pulgadas, separación entre ductos igual a D/2, resistividad térmica del suelo 1 K · m/W y temperatura de la tierra de 20°C. Cables de 5 kV con aislamiento tipo 133%, 15 kV con aislamiento tipo 133% y 35 kV con aislamiento tipo 100%.

ANEXO B
EJEMPLOS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

EJEMPLOS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

TRES CABLES XLPE DE 15 kV DIRECTAMENTE ENTERRADOS

A continuación se ilustra detalladamente el proceso de cálculo de la ampacidad de cables de potencia asilados a partir de un ejemplo de aplicación del modelo.

CONDICIONES DE INSTALACIÓN

La aplicación del modelo se realizará en una instalación trifásica con cables monopolares, instalados directamente enterrados en formación coplanar, y con una separación entre ejes de 30cm. La distancia de enterramiento es de 1m. Para este caso se asume que no se presenta secado del suelo, la resistividad térmica del suelo es de $1,2\text{Km/W}$ y que las pantallas se encuentran aterrizadas y transpuesta.

En la Figura B-1 se muestra el perfil de la excavación, y en la Tabla B-1 se muestran los parámetros necesarios para el cálculo de la ampacidad y las temperaturas de operación.

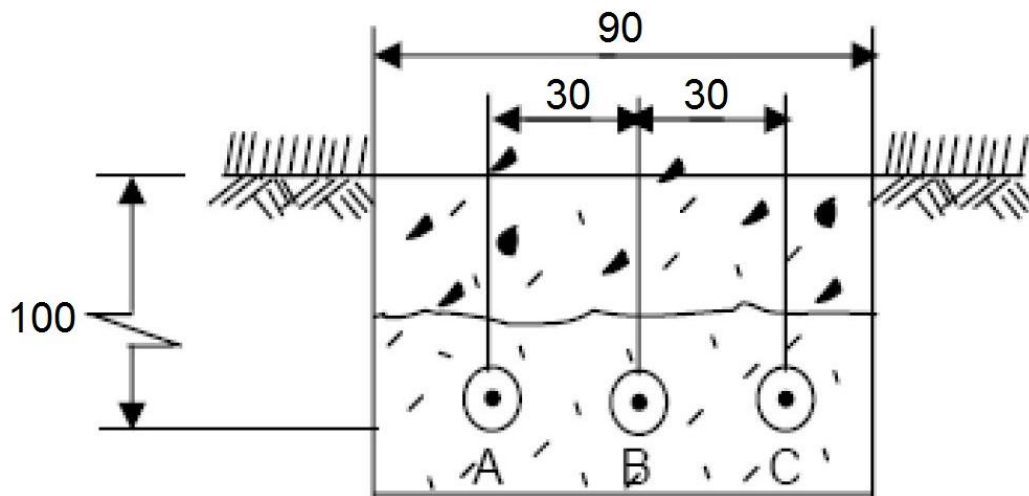


Figura B-1. Perfil de la excavación

Tabla B-1. Condiciones de instalación

Parámetro	Símbolo	Valor
-----------	---------	-------

Separación entre ejes de dos conductores adyacentes	s_1	0,30 m
Profundidad de enterramiento	L	1 m
Resistividad del suelo	ρ_s	1,2 Km/W
Temperatura del suelo	θ_{amb}	18°C

CARACTERÍSTICAS DEL CABLE

Se tomó como referencia un cable XLPE de 15 kV de la marca *Centelsa* de referencia MV-90 con aislamiento del 133% y conductor de cobre suave de área transversal de 1000kcmil. En la Tabla B-2 se muestran las características del cable.

Tabla B-2. Parámetros del cable seleccionado

Parámetro	Valor
Temperatura de operación	90°C
Tensión nominal	15 kV
Nivel de aislamiento	133%
Diámetro del conductor	26,68 mm
Diámetro del aislamiento	37,2 mm
Espesor de la chaqueta	2,79 mm
Espesor del aislamiento	5,26 mm
Diámetro Exterior	45,3 mm

En la Figura 24 se muestran los cortes de cada una de las capas que componen al cable, y que son en orden de 1 a 6: Conductor, blindaje en semiconductor de XLPE, Aislamiento en XLPE, Blindaje en semiconductor de XLPE, Pantalla de cinta helicoidal de cobre, chaqueta en PVC.



Figura B-2. Capas del cable seleccionado

CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

Resistencia térmica entre el conductor y la pantalla

La resistencia térmica T_1 se calcula en este caso con la ecuación 4.24, correspondiente a cables monopolares.

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right)$$

La resistividad térmica ρ_T corresponde al material del aislamiento del cable, que en este caso se trata de XLPE, por lo que su valor es de $3,5 K \cdot m/W$. El diámetro d_c del conductor sería de $26,68 mm$ y el espesor t_1 del aislamiento de $5,26 mm$.

Tras evaluar la ecuación de T_1 se obtiene como resultado una resistencia térmica de $0,195 K \cdot m/W$.

Resistencia térmica entre la pantalla y la armadura

En este caso, debido a que el conductor no posee armadura sino simplemente una chaqueta en PVC alrededor de la pantalla, no existe la resistencia térmica T_2 .

Resistencia térmica de la chaqueta exterior

Para este caso, con una chaqueta lisa de PVC, se debe utilizar la ecuación 4.38, para el cálculo de este parámetro.

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D'_a}\right)$$

La resistividad térmica ρ_T corresponde en este caso a la del PVC, cuyo valor es de $6,0 K \cdot m/W$. El diámetro externo de la pantalla D'_a es de $39,72 mm$, y el espesor de la chaqueta t_3 es de $2,79 mm$.

Una vez evaluada la ecuación para T_3 se obtiene como resultado un valor de $0,126 K \cdot m/W$.

Resistencia térmica exterior

En este caso se tiene un grupo de tres conductores enterrados directamente, tendidos de forma horizontal, sin hacer contacto y con un espaciado uniforme. Por esta razón se debe realizar el cálculo de la resistencia T_4 por medio de la ecuación 4.45.

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

El valor de u que se calcula como D/r_e sería igual a 22,0751, la distancia L desde la superficie al eje del cable sería de 977,35 mm, la separación entre ejes s_1 es de 300 mm, y la resistividad térmica en este caso corresponde a la de la tierra, que se tomará en un valor estándar de $1,2 K \cdot m/W$.

El valor obtenido para T_4 tras evaluar la ecuación es de $1,585 K \cdot m/W$.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Resistencia eléctrica

Como se vio en el capítulo 4, la resistencia eléctrica del conductor varía de acuerdo a diversos factores como lo son la temperatura, la frecuencia y la proximidad con otros elementos portadores de corriente. Generalmente el efecto de la proximidad es despreciado pues no genera cambios importantes en la resistencia para las frecuencias normales de operación, bien sea 50 o 60Hz. El efecto piel, aunque pequeño también para 60 ciclos, se considerará en este caso y se calculará como se especificó en el capítulo 4.

El cable elegido posee un núcleo conductor de cobre con área transversal de 1000 kcmil , que equivalen a $506,7 \text{ mm}^2$. La resistividad eléctrica del cobre a 20°C es de $1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, lo que equivale a $0,017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/m$. De acuerdo a lo anterior la resistencia eléctrica del cable en corriente directa y a 20°C sería de: $3,478 \times 10^{-5} \Omega/m$.

La temperatura máxima de operación del conductor es de 90°C , por lo que se debe aplicar el factor de corrección presentado en la ecuación 4.3.

$$R_\theta(\theta) = R_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha_\theta (\theta - 273,15^\circ\text{K} - 20^\circ\text{K}))$$

Para un valor de $R_{20^\circ\text{C}}$ de $3,478 \times 10^{-5} \Omega/m$, una temperatura de 90°C , y el coeficiente de variación para el cobre con un valor de $0,00393^\circ\text{K}^{-1}$; se obtiene como resultado una resistencia eléctrica a 90°C y en corriente directa, de $4,434 \times 10^{-5} \Omega/m$.

Al tratarse de un cable de trenzado circular, el valor de k_s para el cálculo del efecto pelicular es de 1, por lo que evaluando la ecuación 4.5 para 60 Hz se obtiene un valor de 3,476 para X_s^2 .

Una vez obtenido este valor se procede con el cálculo del efecto pelicular en el cable, a partir de la ecuación 4.4. El resultado arrojado para y_s es de 0,059, por lo que la resistencia eléctrica R del cable a 90°C y a una frecuencia de 60Hz será de $4,731 \times 10^{-5} \Omega/m$.

FUENTES INTERNAS DE CALOR

Pérdidas dieléctricas

Como se especificó en la Tabla 6, las pérdidas en el aislamiento empiezan a ser considerables para ciertos niveles de tensión, de acuerdo con los materiales con que éste sea construido. Para el XLPE, la tensión para la cual los efectos dieléctricos empiezan a ser importantes, es de 127 kV, por esta razón, para un cable XLPE de 15 kV como el que se está trabajando, es posible omitir el cálculo de W_d , puesto que su valor resultaría ser de una magnitud depreciable.

Pérdidas por efecto Eddy

Las pérdidas por efecto Eddy como se explicó en el capítulo 4, son debidas a las corrientes parasitas que aparecen en la pantalla y la armadura. En este caso, debido a que el cable no posee una armadura, debe calcularse únicamente el factor de pérdidas en la pantalla λ_1 .

Para este caso debido a que las pantallas se encuentran transpuestas, la circulación de corrientes a través de ellas es muy pequeña, y por esta razón, se puede aproximar el valor del factor de pérdidas por efecto Eddie como [8]:

$$\lambda_1 = 0,001$$

CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

Para el cálculo de la corriente máxima de operación del grupo de cables enterrados en formación plana con espaciado uniforme, se debe hacer uso de la ecuación 4.65.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5},$$

para la cual los parámetros previamente calculados se muestran en la Tabla B-3.

Tabla B-3. Parámetros para el cálculo de la ampacidad

Parámetro	Valor
$\Delta\theta$	72°C
W_d	0

T_1	$0,195 K \cdot m/W$
T_2	0
T_3	$0,126 K \cdot m/W$
T_4	$1,585 K \cdot m/W$
n	1
R	$4,731 \times 10^{-5} \Omega/m$
λ_1	0,001
λ_2	0

Una vez evaluada la ecuación se obtiene como resultado una corriente máxima de operación del conductor de:

$$I = 893 A$$

La corriente máxima que puede circular a través del cable sin causar deterioro de los materiales de construcción de éste, es de 890 amperios.

CÁLCULO DE LA TEMPERATURA AL INTERIOR DEL CONDUCTOR

Una vez conocida la corriente máxima de operación del conductor, y con ayuda del diagrama tipo escalera para el circuito térmico configurado por el cable, se puede realizar el cálculo de la distribución superficial de temperatura en el área transversal del cable.

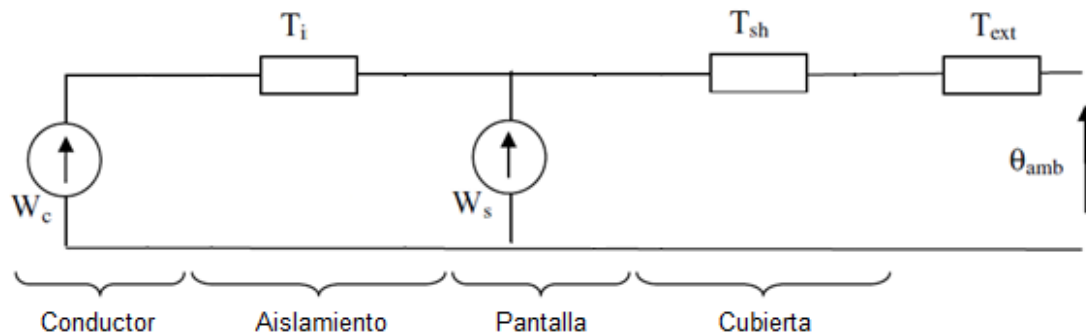


Figura B-3. Diagrama escalera para un conductor monopolar sin armadura.

$$T_i \equiv T_1, T_{sh} \equiv T_3 \text{ y } T_{ext} \equiv T_4$$

La temperatura en la superficie externa del cable, que corresponde a la superficie de la chaqueta se calcula como:

$$\theta_{sh} = I^2 R(1 + \lambda_1) T_4 + \theta_{amb}$$

Con un valor de temperatura del suelo de $18^\circ C$, el resultado obtenido al evaluar la ecuación es de $77,7^\circ C$.

La temperatura a la que se encuentra la pantalla se calcula a partir de la ecuación:

$$\theta_s = I^2 R(1 + \lambda_1) T_3 + \theta_{sh}$$

De la cual, al ser evaluada, se obtiene como resultado una temperatura de $82,5^\circ C$.

Para el cálculo de la temperatura de operación del núcleo conductor se debe emplear la siguiente ecuación.

$$\theta_c = I^2 R T_1 + \theta_s$$

El resultado obtenido para la temperatura del conductor, como es de esperarse, es de $90^\circ C$.

TRES CIRCUITOS DE 5 kV EN UN BANCO DE DUCTOS

CONDICIONES DE INSTALACIÓN

En este caso se trata de tres circuitos trifásicos cada uno compuesto por tres cables de $5 kV$ instalados al interior de una tubería de $6''$, la cual se encuentra contenida en un banco de tres ductos en formación plana, y con separación de $3''$ entre sí. La resistividad del suelo es de $1 Km/W$, la profundidad de enterramiento es de 90 cm y la temperatura de la tierra es de $20^\circ C$. En la tabla B-4 se muestran los parámetros de la instalación.

Tabla B-4. Condiciones de instalación

Parámetro	Símbolo	Valor
Cantidad de ductos	-	3
Número de circuitos por ducto	-	1
Diámetro del ducto	-	$6''$
Separación entre ductos	s_1	$3''$
Profundidad de enterramiento	L	$0,9 m$
Resistividad del suelo	ρ_s	$1 Km/W$
Temperatura del suelo	θ_{amb}	$20^\circ C$

CARACTERÍSTICAS DEL CABLE

Se tomó como referencia un cable XLPE de 5 kV de la marca *Okonite* de referencia MV-90 con aislamiento del 133% y conductor de cobre suave de área transversal de 4/0 AWG. En la Tabla B-5 se muestran las características del cable.

Tabla B-5. Parámetros del cable seleccionado

Parámetro	Valor
Temperatura de operación	90°C
Tensión nominal	5 kV
Nivel de aislamiento	133%
Diámetro del conductor	12,07 mm
Diámetro del aislamiento	19,05 mm
Espesor de la chaqueta	2,03 mm
Espesor del aislamiento	3,49 mm
Diámetro Exterior	25,9 mm

CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

Resistencia térmica entre el conductor y la pantalla

La resistencia térmica T_1 se calcula en este caso con la ecuación 4.24, correspondiente a cables monopolares.

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right)$$

La resistividad térmica ρ_T corresponde al material del aislamiento del cable, que en este caso se trata de XLPE, por lo que su valor es de $3,5 K \cdot m/W$. El diámetro d_c del conductor sería de 12,07 mm y el espesor t_1 del aislamiento de 3,49 mm.

Tras evaluar la ecuación de T_1 se obtiene como resultado una resistencia térmica de $0,254 K \cdot m/W$.

Resistencia térmica entre la pantalla y la armadura

En este caso, debido a que el conductor no posee armadura sino simplemente una chaqueta en PVC alrededor de la pantalla, no existe la resistencia térmica T_2 .

Resistencia térmica de la chaqueta exterior

Para este caso, con una chaqueta lisa de PVC, se debe utilizar la ecuación 4.38, para el cálculo de este parámetro.

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right)$$

La resistividad térmica ρ_T corresponde en este caso a la del PVC, cuyo valor es de $6,0 K \cdot m/W$. El diámetro externo de la pantalla D'_a es de $20,57 mm$, y el espesor de la chaqueta t_3 es de $2,03 mm$.

Una vez evaluada la ecuación para T_3 se obtiene como resultado un valor de $0,172 K \cdot m/W$.

Resistencia térmica exterior

En este caso se tiene un grupo de tres conductores al interior de un ducto y la resistencia térmica exterior T_4 debe dividirse en tres secciones: Resistencia del espacio entre los conductores y la pared del ducto T'_4 , resistencia de la pared del ducto T''_4 y resistencia exterior T'''_4 . Para ello se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\theta_m)D_e}$$

Una vez establecidas todas las ecuaciones del modelo se debe iterar debido al desconocimiento de la temperatura media del aire al interior del ducto θ_m , para ello se tomará un valor inicial de $2^\circ C$. Los valores de U , V y Y para tuberías plásticas son $1,87$, $0,312$ y $0,0037$ respectivamente. Una vez realizada la iteración se obtiene un valor de $0,693 K \cdot m/W$

$$T''_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \cdot \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

Para un ducto de PVC de $6''$ el valor de la resistencia térmica T''_4 es de $0,015 K \cdot m/W$.

Debido a que los ductos se encuentran tendidos de forma plana, la resistencia térmica exterior se calcula de igual manera a como se haría para cables directamente enterrados en esta configuración, con los diámetros y separaciones respectivas. Una vez calculada la resistencia térmica T'''_4 se obtiene un valor de $1,147 K \cdot m/W$, por lo que la resistencia térmica T_4 equivaldría a $1,856 K \cdot m/W$.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica del cable en corriente directa y a 20°C es de: $1,64 \times 10^{-4} \Omega/m$. Por lo que una vez calculado el efecto piel y la corrección por temperatura, se obtiene un valor de resistencia de $2,10 \times 10^{-4} \Omega/m$

FUENTES INTERNAS DE CALOR

Pérdidas dieléctricas

Como se especificó en la Tabla 6, las pérdidas en el aislamiento empiezan a ser considerables para ciertos niveles de tensión, de acuerdo con los materiales con que éste sea construido. Para el XLPE, la tensión para la cual los efectos dieléctricos empiezan a ser importantes, es de 127 kV, por esta razón, para un cable XLPE de 15 kV como el que se está trabajando, es posible omitir el cálculo de W_d , puesto que su valor resultaría ser de una magnitud depreciable.

Pérdidas por efecto Eddy

Las pérdidas por efecto Eddy como se explicó en el capítulo 4, son debidas a las corrientes parasitas que aparecen en la pantalla y la armadura. En este caso, debido a que el cable no posee una armadura, debe calcularse únicamente el factor de pérdidas en la pantalla λ_1 .

Para este caso debido a que las pantallas se encuentran transpuestas, la circulación de corrientes a través de ellas es muy pequeña, y por esta razón, se puede aproximar el valor del factor de pérdidas por efecto Eddie como [8]:

$$\lambda_1 = 0,001$$

CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

Para el cálculo de la corriente máxima de operación del grupo de cables enterrados en formación plana con espaciado uniforme, se debe hacer uso de la ecuación 4.65.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5},$$

Una vez evaluada la ecuación se obtiene como resultado una corriente máxima de operación del conductor de:

$$I = 236 A$$

La corriente máxima que puede circular a través del cable sin causar deterioro de los materiales de construcción de éste, es de 235 amperios.

ANEXO C
EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

Para la evaluación del impacto de las condiciones de instalación de los conductores de potencia aislados, sobre la capacidad de transporte de corriente de los mismos, se realizó un análisis de sensibilidad de la ampacidad respecto a los parámetros más relevantes y se generaron las curvas de reducción de la capacidad respecto a ellos.

Los cables utilizados para este análisis corresponden a la línea *5/8 kV Okobond Shielded Power Cable* de *Okonite*, cuyas características geométricas se muestran en la Tabla C-1.

Tabla C-1. Características de los cables utilizados

Tamaño del conductor [AWG o kcmil]	Diámetro del conductor [mm]	Espesor del aislamiento [mm]	Espesor de la chaqueta [mm]	Diámetro exterior [mm]	Resistencia 60 Hz 20 °C [Ω/m]
6	4,29	3,44	1,52	16,8	1,320
4	5,41	3,39	1,52	17,8	0,830
2	6,81	3,45	1,52	19,3	0,522
1	7,59	3,57	1,52	20,3	0,413
1/0	8,53	3,48	1,52	21,1	0,328
2/0	9,55	3,48	1,52	22,1	0,261
3/0	10,74	3,52	2,03	24,6	0,207
4/0	12,07	3,49	2,03	25,9	0,165
250	13,21	3,56	2,03	27,2	0,139
350	15,65	3,48	2,03	29,5	0,100
500	18,69	3,73	2,03	32,5	0,071
750	23,06	3,58	2,03	36,8	0,048
1000	26,92	3,56	2,03	40,9	0,037

El procedimiento de análisis consistió en el cálculo de la capacidad de transporte de corriente de los cables de potencia aislados relacionados en la Tabla C-1, realizando sensibilidades respectivas a cada uno de los siguientes parámetros:

- Profundidad de enterramiento.
- Resistividad térmica de la tierra.
- Temperatura ambiente (de la tierra).
- Separación entre conductores activos.

Se realizaron los cálculos suponiendo un circuito trifásico con conductores monopoles directamente enterrados. El tipo de aislamiento es MV-90 que corresponde a una temperatura máxima de 90°C, y el tipo de pantalla es cinta superpuesta de cobre. Se efectuó el análisis tanto para pantallas en circuito abierto como para pantallas con corrientes circulantes a tierra, con el objetivo de realizar una evaluación de esta condición.

En las figuras C-1 y C-2 se muestran las curvas de Ampacidad Vs. Profundidad de enterramiento, con ausencia y presencia de corrientes circulando a través de la pantalla; respectivamente.

En las figuras C-3 y C-4 se muestran las curvas de Ampacidad Vs. Resistividad térmica del suelo, con ausencia y presencia de corrientes circulando a través de la pantalla; respectivamente.

En las figuras C-5 y C-6 se muestran las curvas de Ampacidad Vs. Temperatura de la tierra, con ausencia y presencia de corrientes circulando a través de la pantalla; respectivamente.

En las figuras C-7 y C-8 se muestran las curvas de Ampacidad Vs. Separación entre conductores activos, con ausencia y presencia de corrientes circulando a través de la pantalla, respectivamente.

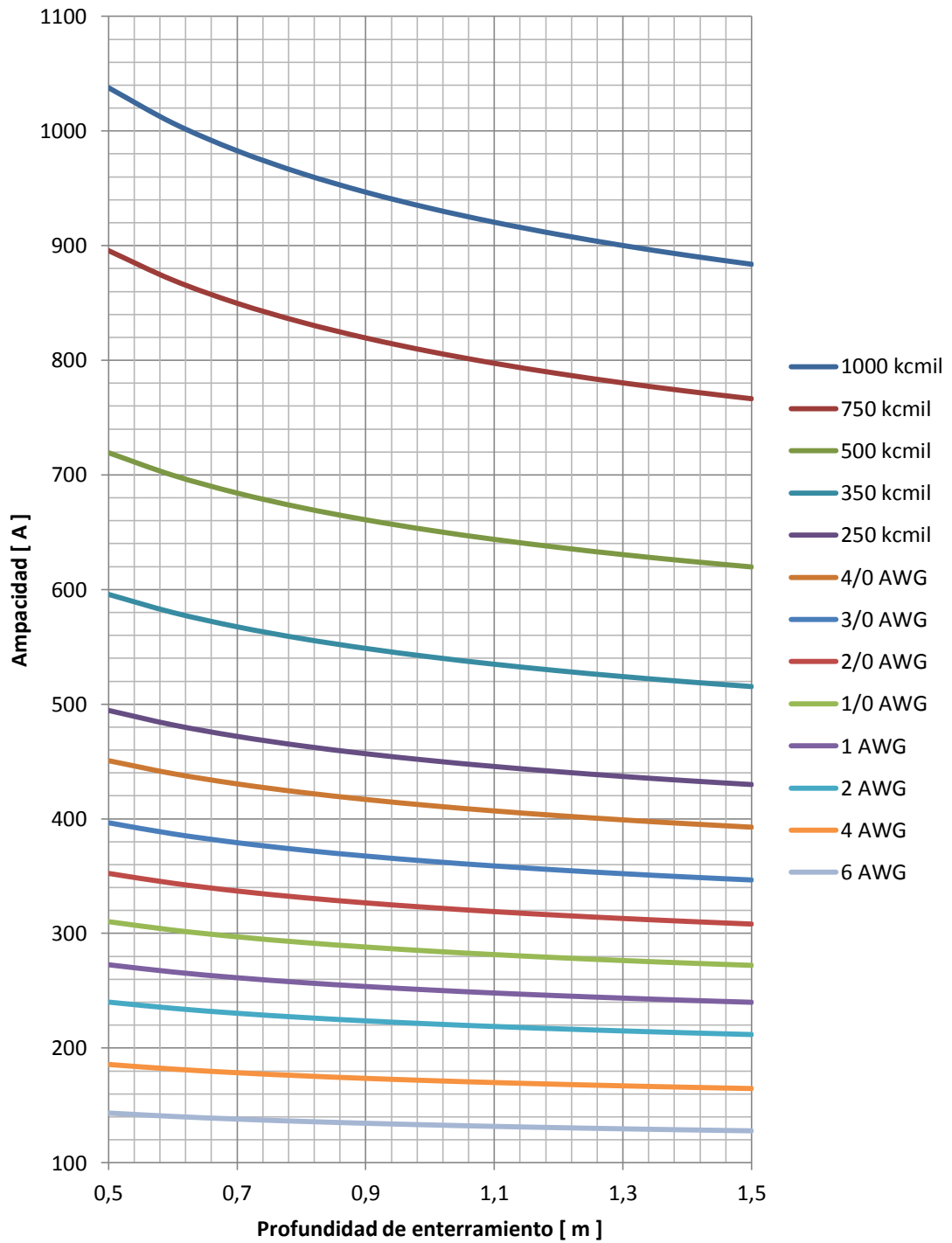


Figura C-1. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la profundidad de enterramiento; cables con pantallas en circuito abierto²⁶

²⁶ Cálculos basados en una resistividad térmica del suelo de $1 K \cdot m/W$, separación entre ejes de $20 cm$ y temperatura de la tierra de $20^{\circ}C$.

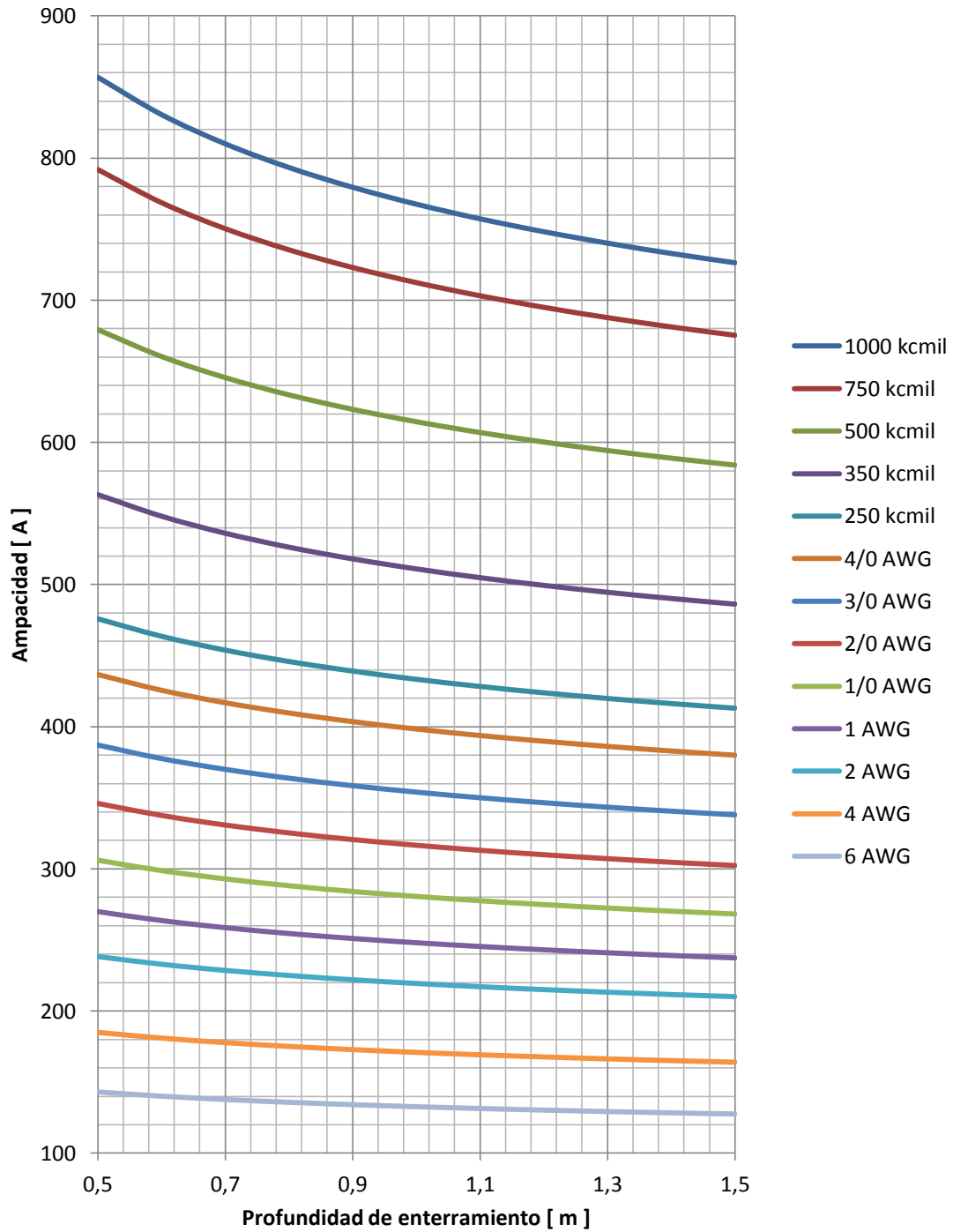


Figura C-2. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la profundidad de enterramiento; cables con circulación de corrientes por la pantalla²⁷

²⁷ Cálculos basados en una resistividad térmica del suelo de $1 K \cdot m/W$, separación entre ejes de $20 cm$ y temperatura de la tierra de $20^{\circ}C$.

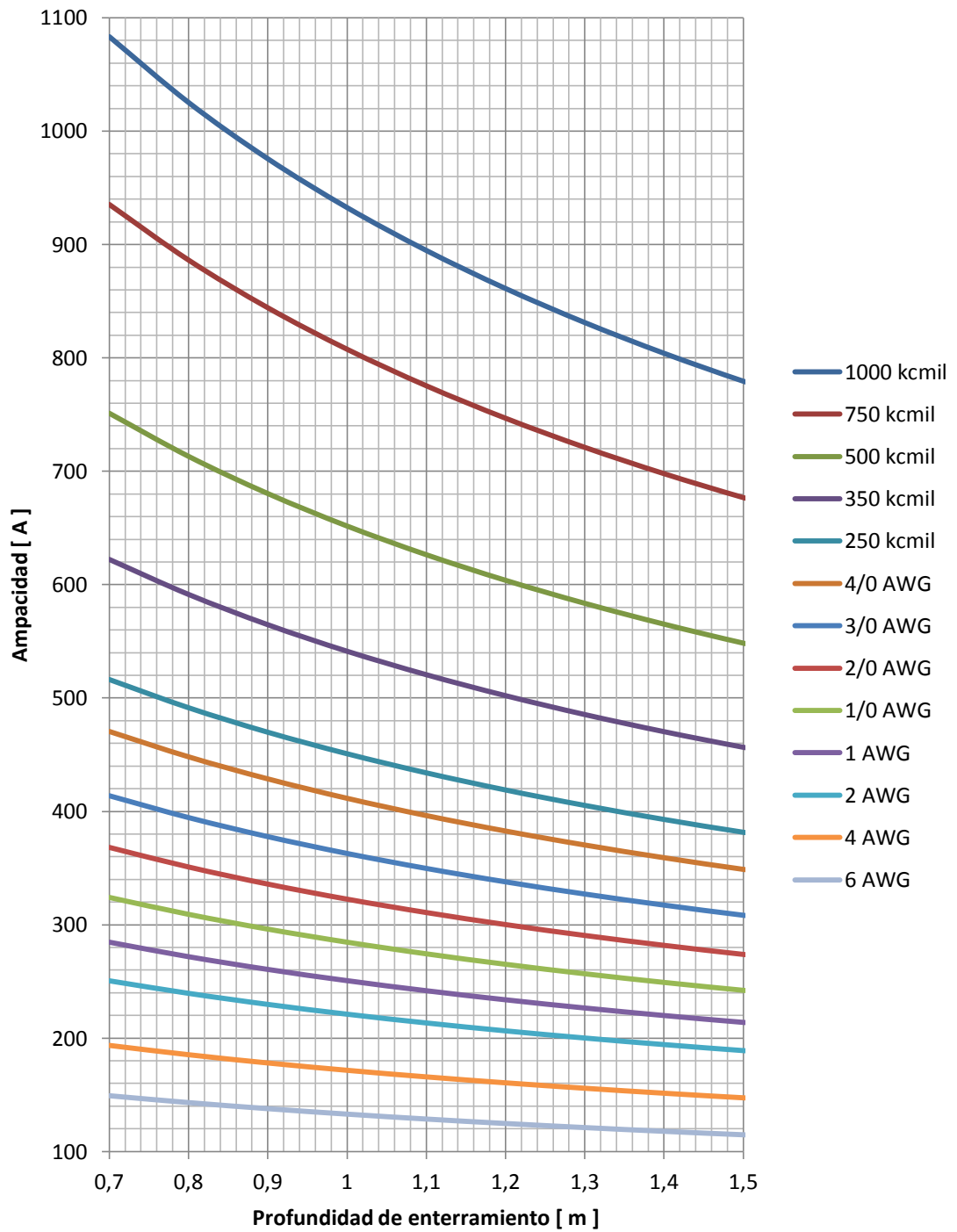


Figura C-3. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la resistividad térmica del terreno; cables con pantallas en circuito abierto²⁸

²⁸ Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, separación entre ejes de 20 cm y temperatura de la tierra de 20°C.

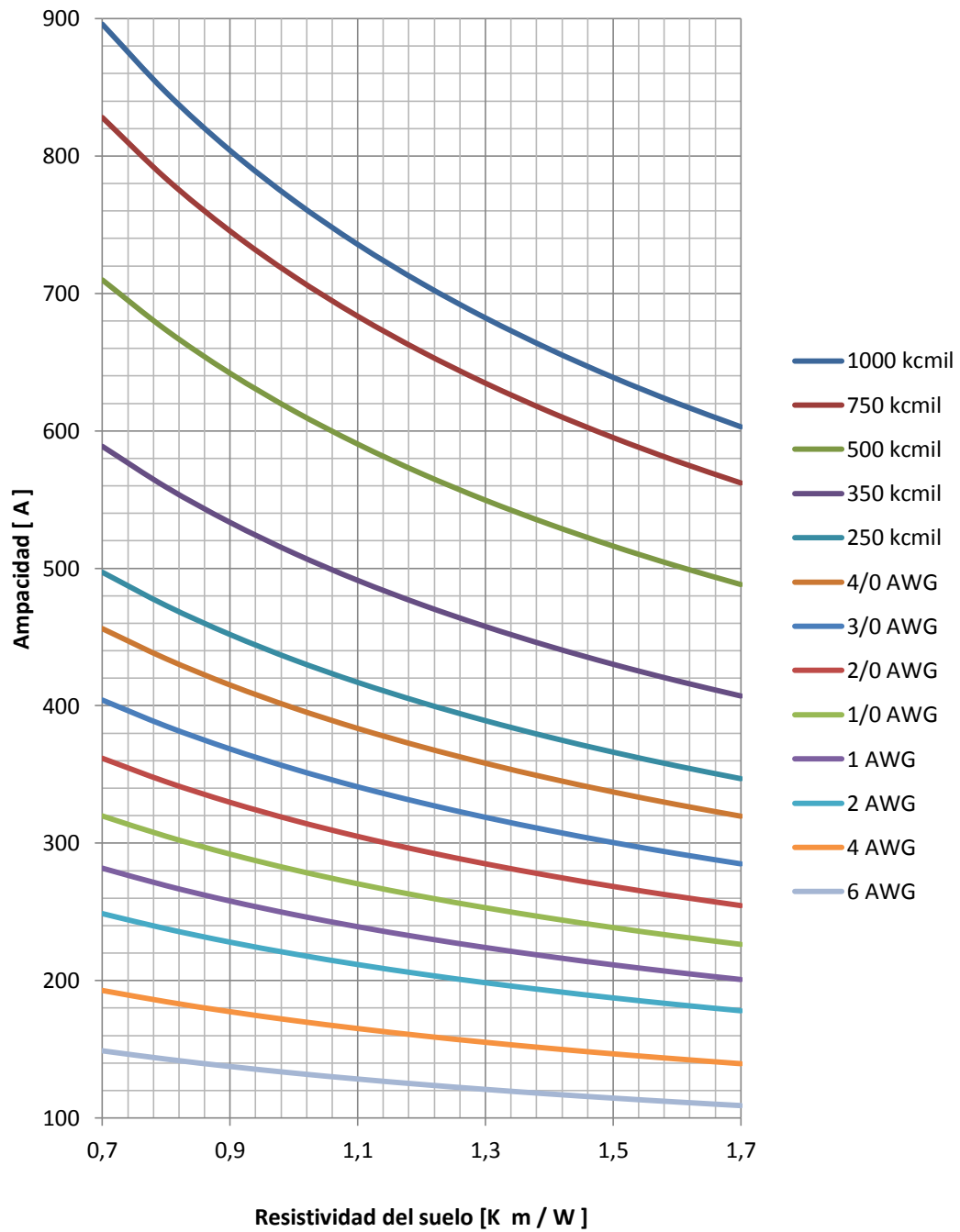


Figura C-4. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la resistividad térmica del terreno; cables con circulación de corrientes por la pantalla²⁹

²⁹ Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, separación entre ejes de 20 cm y temperatura de la tierra de 20°C.

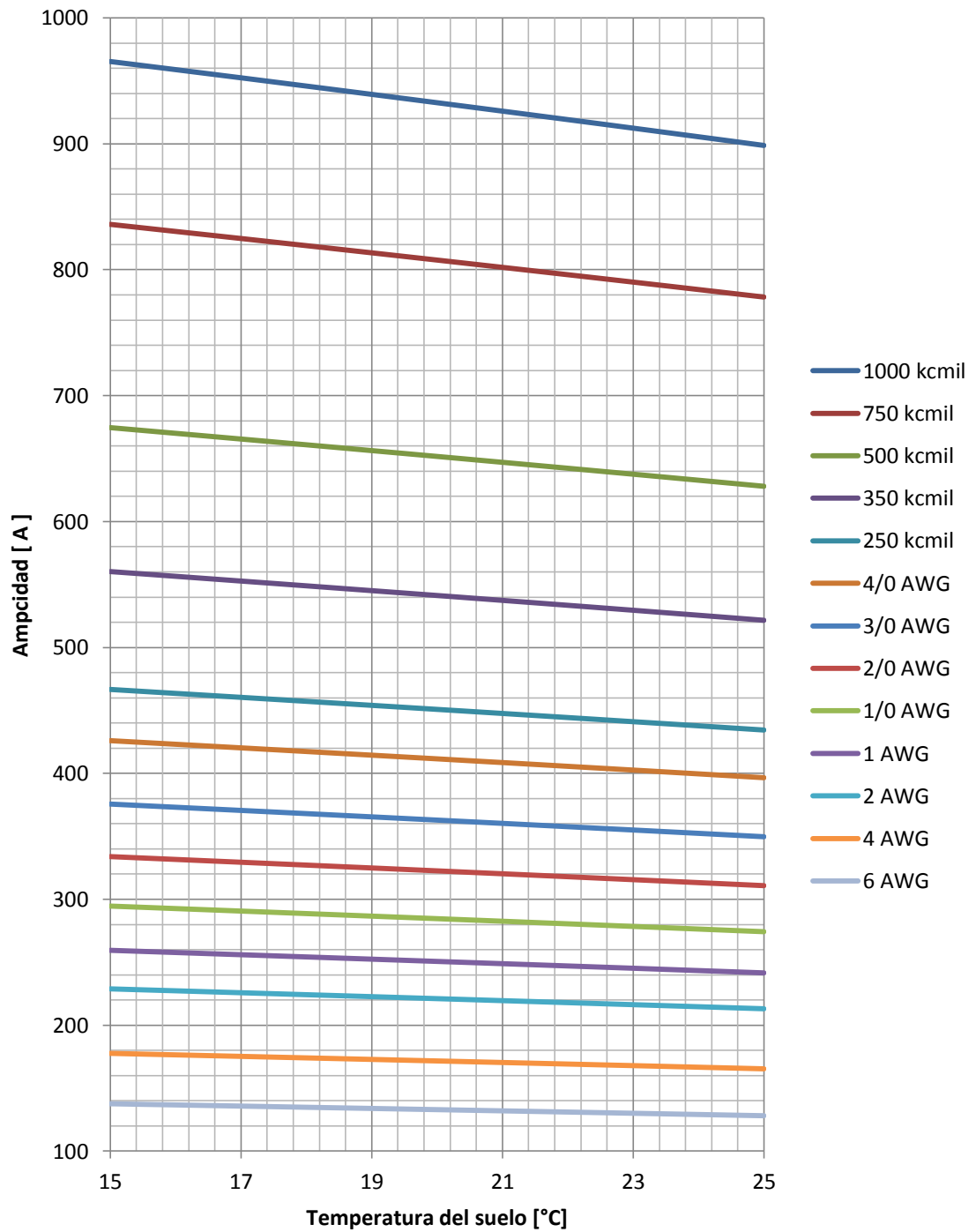


Figura C-5. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la temperatura de la tierra; cables con pantalla en circuito abierto³⁰

³⁰ Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, separación entre ejes de 20 cm y resistividad térmica del suelo de 1 K · m/W.

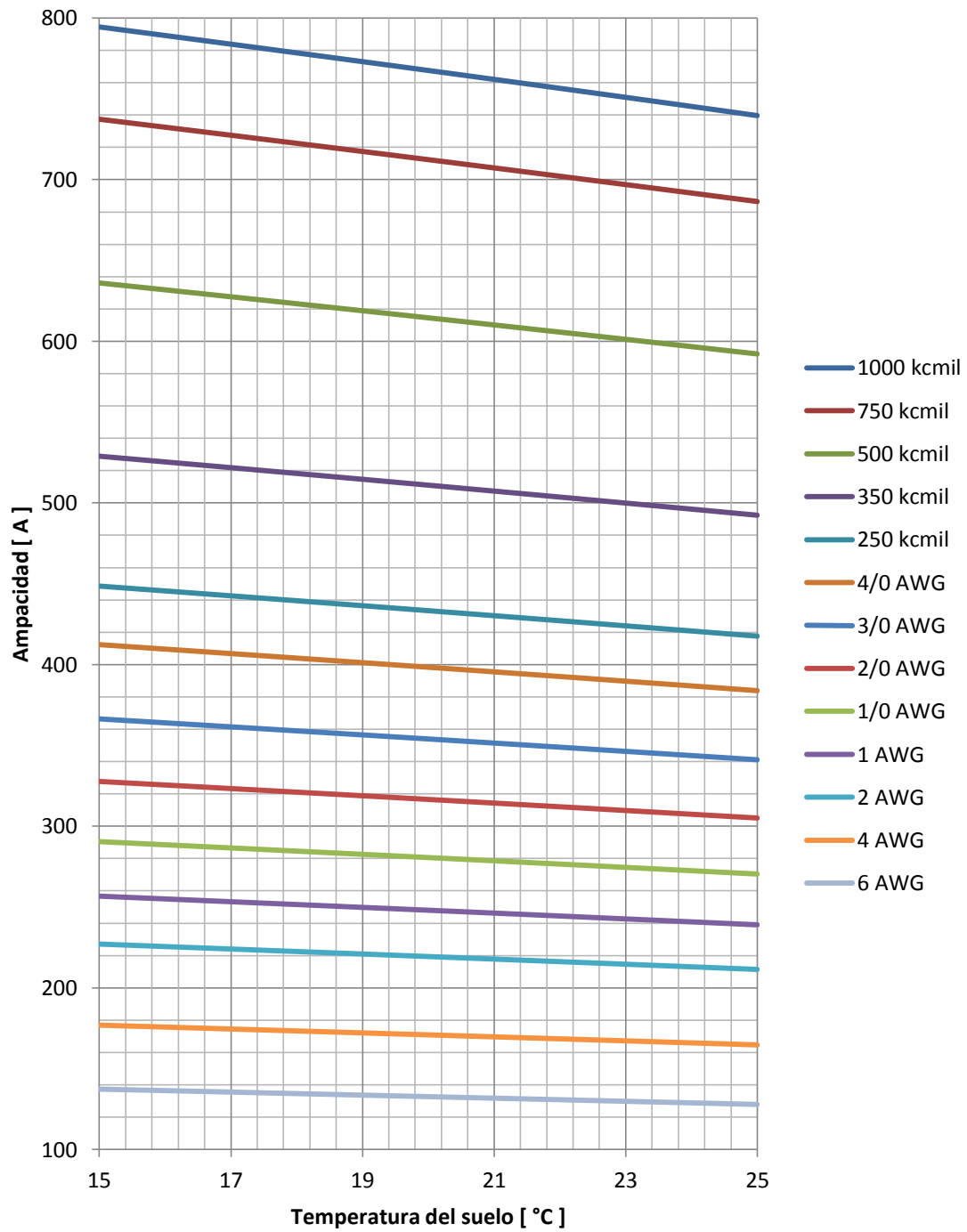


Figura C-6. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la temperatura de la tierra; cables con circulación de corrientes por la pantalla³¹

³¹ Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, separación entre ejes de 20 cm y resistividad térmica del suelo de 1 K · m/W.

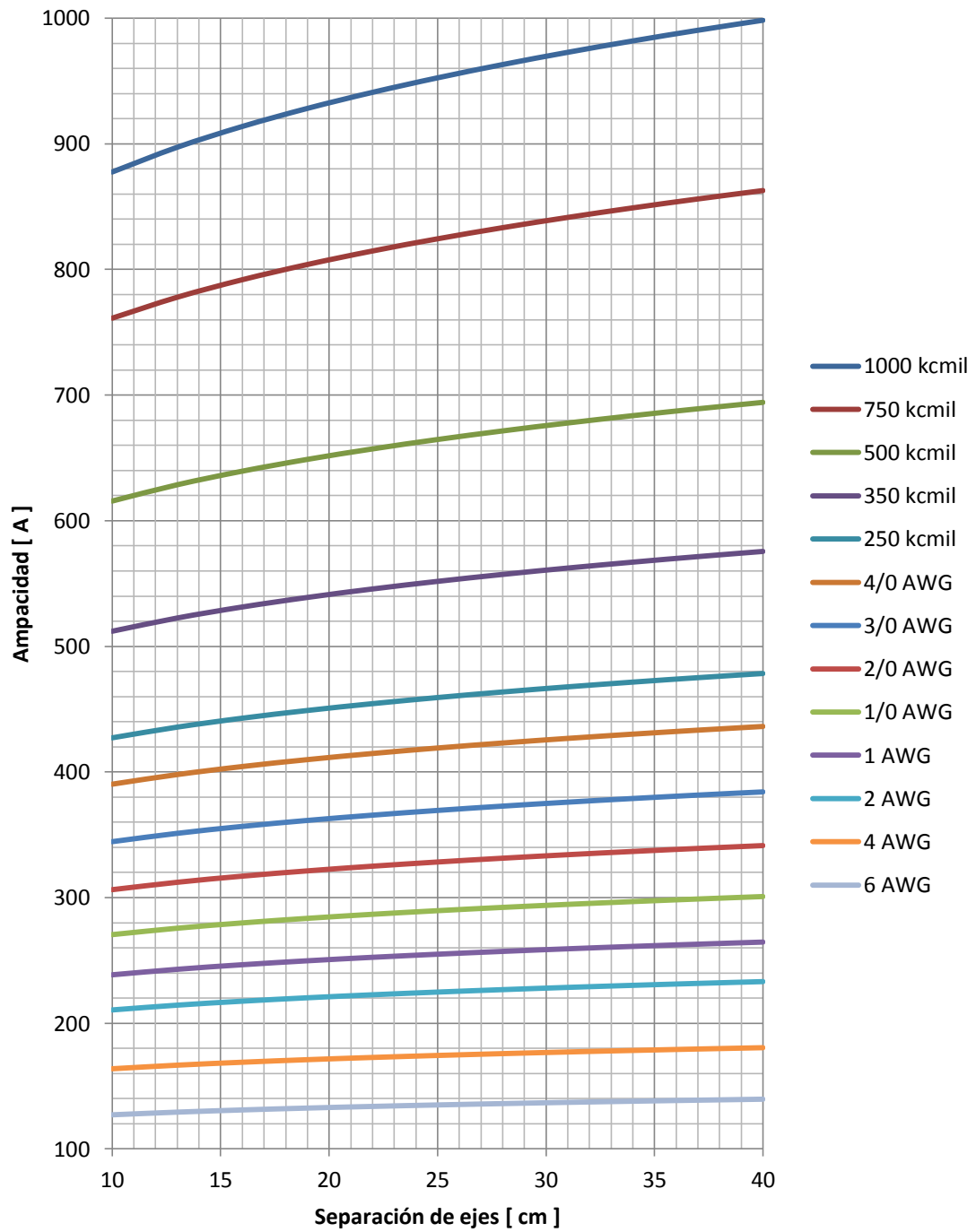


Figura C-7. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la separación entre conductores; cables con pantalla en circuito abierto³²

³² Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, temperatura de la tierra de 20°C y resistividad térmica del suelo de 1 K · m/W.

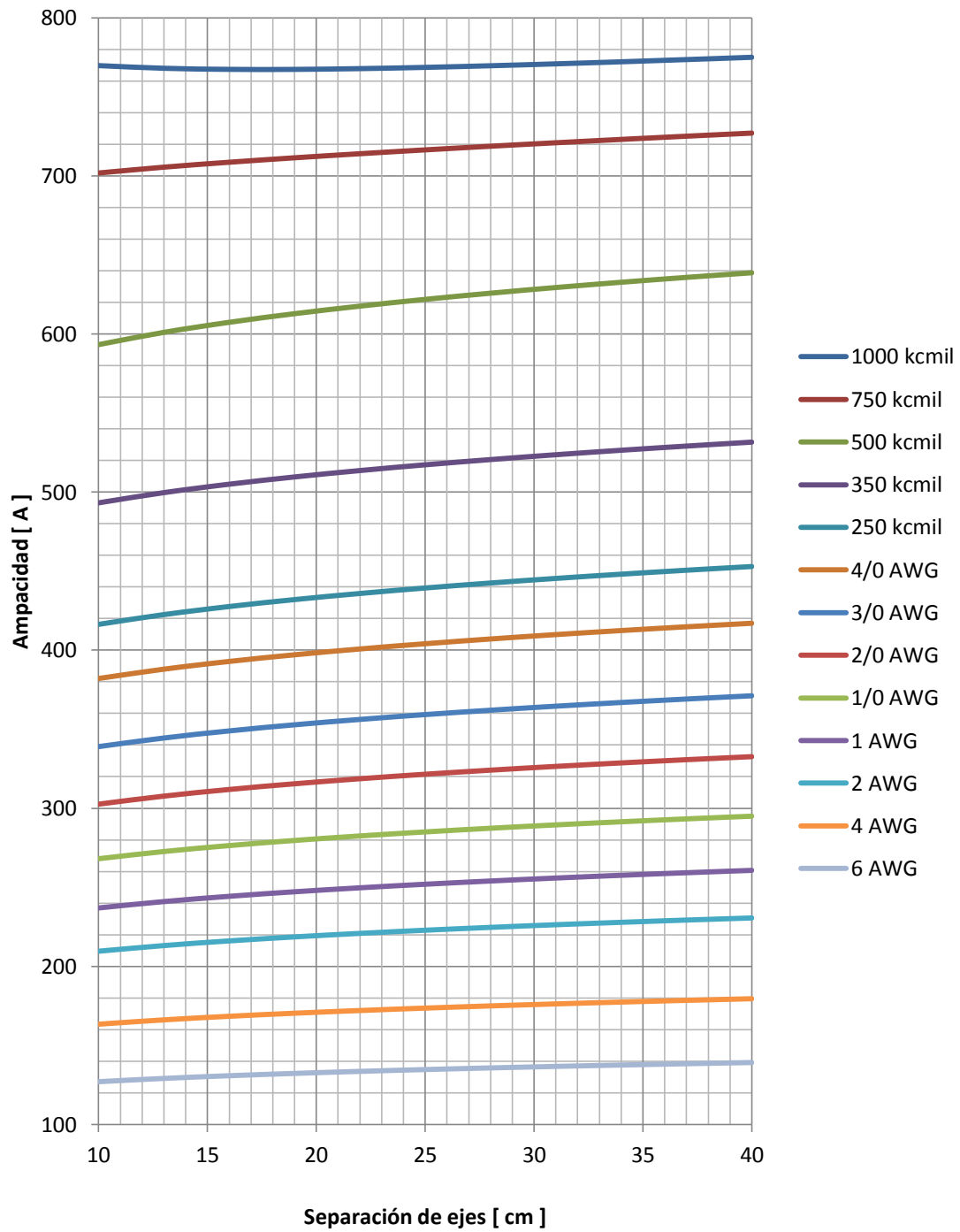


Figura C-8. Sensibilidad de la ampacidad a la variación de la separación entre conductores; cables con circulación de corrientes por la pantalla³³

³³ Cálculos basados en una profundidad de enterramiento de 1 m, temperatura de la tierra de 20°C y resistividad térmica del suelo de 1 K · m/W.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al realizar una comparación entre las gráficas de sensibilidades de la ampacidad para cables con pantallas en circuito abierto, con sus homólogas de cables con circulación de corrientes a través de las cubiertas metálicas, se puede apreciar el enorme impacto que tiene esta condición sobre la capacidad del cable. Respecto a esta condición de instalación se deben realizar las siguientes anotaciones:

- La capacidad de corriente de los cables de potencia aislados puede verse reducida hasta en un 50%, cuando circulan corrientes a tierra a través de las pantallas. Dependiendo del material de dicha cubierta, la corriente que circula a través de ella puede alcanzar valores tan altos como el de la corriente principal, y de hasta el doble de ella.
- Al aumentar el área transversal del conductor, los efectos de las condiciones de instalación sobre la capacidad del cable se hacen mucho mayores. Uno de los aspectos más importantes para resaltar sobre esta condición, es que las pérdidas por circulación de corriente en las pantallas incrementan considerablemente entre un tamaño de conductor y el otro.
- Al incrementar la separación entre ejes de los conductores se pueden apreciar dos condiciones diferentes. En la figura se puede evidenciar el aumento en la capacidad de transporte de corriente del cable, que se presenta al alejar los conductores. Sin embargo, al observar la curva de sensibilidad para los conductores de mayor sección, se puede apreciar que la concavidad presenta grandes cambios; en conductores pequeños la tendencia es de crecimiento, y a medida que el tamaño del cable aumenta la curva se va aplanando hasta invertir su concavidad.

Este último fenómeno está íntimamente ligado con las corrientes que circulan a través de las pantallas, puesto que al reducir la distancia entre los cables las inductancias mutuas tienen la misma tendencia a la reducción: A medida que la distancia entre los ejes de los cables se reduce, los acoples de las pantallas con cada una de las fases del circuito tienden a igualarse, y por consiguiente las corrientes residuales se anulan mutuamente.

Por esta razón, en cables de potencia con grandes secciones transversales; para los cuales los efectos de las corrientes que circulan por la pantalla son altos, se presenta un efecto similar sobre la ampacidad para el acercamiento y el alejamiento de los conductores.

A continuación se presenta una tabla de resumen de los efectos que tiene la variación de los parámetros de la instalación, sobre la capacidad de transporte de corriente de los cables de potencia aislados.

Tabla C-2. Resumen de sensibilidades de la ampacidad a la variación en las condiciones de instalación

Condición	Efecto
Incremento de la profundidad de enterramiento.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la resistividad térmica del terreno.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la temperatura de la tierra.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la separación entre conductores.	Aumento de la capacidad de transporte de corriente. Aumento de las pérdidas por circulación de corrientes en las pantallas.
Circulación de corrientes por la pantalla.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento del área transversal del conductor.	Aumento de la sensibilidad de la ampacidad a la variación en los parámetros de la instalación.