

**NORMA
VENEZOLANA**

**COVENIN
457:1973**

**CÁLCULO DE LA CORRIENTE
ADMISIBLE EN LOS CABLES EN
RÉGIMEN PERMANENTE (FACTOR
DE CARGA 100%)**



CODELECTRA
COMITE DE ELECTRICIDAD DE VENEZUELA



FONDONORMA

NORMAS VENEZOLANAS

C O V E N I N

CALCULO DE LA CORRIENTE ADMISIBLE EN LOS CABLES EN REGIMEN
PERMANENTE (FACTOR DE CARGA 100%)

P R O L O G O

Esta norma fue elaborada por el grupo de Cables de CODELECTRA.

En ella han intervenido los profesionales siguientes:

Briceño, Ernesto (CABEL)
Sarratué, Félix (ICONEL)
Ustáriz, Rafael (ALCAVE)
Avilés, Tomás (ELECTRICIDAD DE CARACAS)

Esta norma está basada en la Publicación 287-1969 1ra. edición de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), teniendo en cuenta la modificación N° 1 de fecha Abril de 1971.

NORMAS VENEZOLANASC O V E N I NCALCULO DE LA CORRIENTE ADMISIBLE EN LOS CABLES EN REGIMEN
PERMANENTE (FACTOR DE CARGA 100%)I N D I C E

	<u>Páginas</u>
Introducción	1
Sección 1 - Generalidades	1
1 Alcance	1
2 Símbolos	2
3 Intensidad de corriente alterna permisible en los cables	3
Sección 2 - Calculo de las pérdidas	8
4 Resistencia en corriente alterna del conductor R	8
5 Pérdidas dieléctricas W_d	12
6 Factor de pérdida de la pantalla λ_1	14
6.1 Cables unipolares en formación de trébol con pantallas interconectadas en ambos extremos	15
6.2 Cables unipolares en formación plana, con regular transposición y pantallas interconectadas en ambos extremos .	16
6.3 Cables unipolares en formación plana, sin transposición, cuyas pantallas están interconectadas en ambos extremos .	16
6.4 Variación de la distancia entre cables unipolares con pantalla metálica conectada en ambos extremos	17
6.5 Efecto de los grandes conductores segmentados	18
6.6 Cables unipolares con las pantallas interconectadas en un punto o seccionadas y transpuestas	18

I N D I C E(Continuación)

	<u>Páginas</u>
6.7	Cables de tres conductores con una envoltura metálica común 20
6.8	Cables tripolares con armadura de cinta de acero 21
6.9	Cables armados de conductores bajo plomo 21
6.10	Pérdidas en pantallas y envolturas de los cables del tipo de tubería 22
7	Pérdidas en la armadura y en el refuerzo λ_2 23
7.1	Uso de las fórmulas 23
7.2	Armadura o refuerzo no magnético 23
7.3	Armadura magnética o refuerzo 24
	7.3.1 Cables monopolares 24
	7.3.2 Cables tripolares 24
	7.3.3 Cables tripolares con armadura o refuerzo de cinta de acero 25
7.4	Pérdida en los tubos de acero 26
	Sección 3 - Cálculo de las resistencias térmicas 27
8	Resistencias térmicas de las partes integrantes del cable T1, T2 y T3 27
8.1	Resistencia térmica entre un conductor y la envoltura T1 29
	8.1.1 Cables unipolares 29
	8.1.2 Cable tripolar con cinturón 29
	8.1.3 Cables tripolares con pantalla metálica 30
	8.1.4 Cables de aceite 30
8.2	Calculo de la resistencia térmica T2 31
8.3	Calculo de la resistencia térmica T3 32
8.4	Cables de tipo de tubería 32
9	Resistencia térmica exterior T4 33
9.1	Cables colocados al aire libre 33
9.2	Cable unipolar directamente enterrado 34
9.3	Grupo de cables enterrados (sin tocarse) 35
	9.3.1 Cables con cargas desiguales 35
	9.3.2 Cables idénticos igualmente cargados 36
9.4	Cables enterrados colocados en trébol (tocandose) 37
9.5	Tuberías enterradas 37

I N D I C E (Continuación)

	<u>Páginas</u>
9.6 Cables en canales enterrados	37
9.7 Cables en ductos o tuberías	38
9.8 Resistencia térmica entre el cable y el ducto T_4'	38
9.9 Resistencia térmica propia del ducto T_4''	40
9.10 Resistencia térmica exterior del ducto (o tubería) T_4'''	40
Fig. 1 - Diagrama mostrando un grupo de q cables y su reflexión con respecto a la superficie aire-tierra	42
Fig. 2 - Factor geométrico G para cables tripolares con cinturón de conductores de sección circular	43
Fig. 3 - Resistencia térmica de cables tripolares con pantalla, de conductores circulares, comparada a aquella de cables sin pantalla correspondientes	44
Fig. 4 - Resistividad térmica de cables tripolares con pantalla y conductores sectoriales, comparada con aquella de los cables sin pantalla correspondientes.	45
Fig. 5 - Curvas del factor geométrico G para obtener la resistencia térmica por fase del material de relleno entre la cubierta y la armadura de los cables tipo S.L y S.A	46
Fig. 6 - Coeficiente de disipación de calor para cables en el aire ...	47
Fig. 7 - Gráfico para el cálculo de la resistencia térmica externa T_4 de cables en el aire	48

NORMAS VENEZOLANASC O V E N I NCALCULO DE LA CORRIENTE ADMISIBLE EN LOS CABLES EN REGIMEN
PERMANENTE (FACTOR DE CARGA 100%)INTRODUCCION

Esta norma tiene por objeto dar a conocer un método completo para el cálculo de la capacidad de corriente de los cables de potencia, de acuerdo con el criterio térmico, independientemente de las consideraciones relativas a la carga económica.

En la práctica en varios países, se han hecho hasta ahora muchos cálculos sobre la capacidad de transporte según métodos generales, sin embargo, existían diferencias entre algunas de las fórmulas utilizadas. El método de cálculo indicado en este documento ha sido aprobado a nivel internacional por conducto de la CEI; está basado sobre datos ya publicados por este organismo y sobre unas fórmulas escogidas que reúnen satisfactoriamente los requisitos teóricos y la facilidad de aplicación.

Estas fórmulas contienen unos parámetros que varían según las especificaciones de los cables y de los materiales utilizados, para los cuales se indican en las tablas los valores apropiados. Algunos son aceptados internacionalmente como por ejemplo las resistencias térmicas y la constante dieléctrica de los materiales. En algunos casos los valores indicados no son característicos de la calidad de los cables sin uso, sino de los que corresponden a cables que están en servicio desde hace mucho tiempo.

Con el objeto de obtener resultados comparables y reproducibles, se deben calcular los regímenes permanentes con los valores indicados en la presente norma.

La determinación de los valores en los diferentes parámetros, debe efectuarse de la manera siguiente:

Los valores numéricos deben basarse de preferencia en mediciones válidas. Tales resultados pueden estar incluidos en otras normas venezolanas bajo la forma de valores recomendados, de manera que los cálculos pueden basarse en estos valores.

SECCION 1 - GENERALIDADES1 ALCANCE

Esta norma se aplica únicamente en el caso de cables que trabajen exclusivamente en régimen permanente, a cualquier tensión directamente enterrados colocados dentro de ductos o tubos, como también al aire libre. Se entiende por régimen permanente la circulación continua de una corriente constante (factor de carga 100%), suficiente para llegar de manera asintótica a la temperatura máxima del conductor, permaneciendo constantes las condiciones del medio ambiente.

Las fórmulas propuesta son esencialmente literales y dejan en principio la libertad de escoger algunos parámetros importantes. Estos se pueden dividir en tres grupos:

- Los parámetros relacionados con la constitución del cable (por ejemplo la resistencia térmica del aislante), para los cuales los valores representativos han sido tomados de trabajos publicados;
- Los parámetros ligados a las condiciones del medio, que pueden variar considerablemente; la escogencia de éstos depende del país en el cual los cables deben ser utilizados;
- Los parámetros que resultan de un acuerdo entre fabricante y usuario y que se refieren al margen de seguridad en servicio (por ejemplo temperatura máxima del conductor).

2 SIMBOLOS

Nota. Los símbolos que se indican a continuación no están enteramente conformes con los que están indicados en la publicación 27 de la CEI, símbolos literarios a utilizar en electrotécnica.

Los símbolos utilizados en este documento y las cantidades que representan están indicados en la lista dada a continuación:

A	= Volúmen de la armadura y del refuerzo por centímetro de cable	cm^3/cm
C	= Capacitancia por conductor	$\mu\text{F}/\text{cm}$
Da	= Diámetro interior de la armadura	cm
Dá	= Diámetro exterior de la armadura	cm
Dd	= Diámetro interior del ducto	cm

De	= Diámetro exterior del cable o diámetro equivalente de un grupo de conductores para cables tipo tubulares, con aceite	cm
Di	= Diámetro sobre el aislante	cm
Do	= Diámetro exterior del ducto	cm
Ds	= Diámetro exterior de la envoltura metálica	cm
Eo	= Tensión eficaz entre un conductor y la pantalla o envoltura	V
G	= Factor geométrico para cables con cinturón	
\bar{G}	= Factor geométrico para los cables de tres conductores con envoltura individual de plomo o de aluminio	
I	= Intensidad de corriente en un conductor. (Valor eficaz)	A
K	= Factor de apantallamiento para los cables con pantalla metálica	
K _{du}	= Resistividad térmica de la cinta metálica que forma el canal del aceite	grado C cm/W
L	= Profundidad desde la superficie de la tierra al eje del cable	cm
L _G	= Distancia de la superficie del suelo al centro del conjunto de ductos	cm
R	= Resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna, a su temperatura máxima de servicio continuo	Ω/cm
R _A	= Resistencia de la armadura	Ω/cm
R _S	= Resistencia de la envoltura	Ω/cm
R'	= Resistencia eléctrica en corriente continua de un conductor a la temperatura máxima de servicio continuo	Ω/cm
R _O	= Resistencia de un conductor a corriente continua a 20 °C	Ω/cm
S	= Sección recta de un conductor	cm ²
T ₁	= Resistencia térmica por conductor entre conductor y envoltura metálica o pantalla	grado C cm/W
T ₂	= Resistencia térmica entre envoltura metálica o pantalla y armadura	grado C cm/W
T ₃	= Resistencia térmica del recubrimiento exterior	grado C cm/W

T_4	= Resistencia térmica del medio exterior (Relación entre el aumento de temperatura de la superficie del cable por encima de la temperatura ambiente y las pérdidas totales por unidad de longitud)	grado C cm/W
T_{du}	= Resistencia térmica de los ductos de aceite	grado C cm/W
T_{f1}	= Resistencia térmica de los materiales de relleno y de la pantalla entre dieléctrico y envoltura	grado C cm/W
W	= Pérdidas disipadas por unidad de longitud	W/cm
W_d	= Pérdidas dieléctricas por unidad de longitud y por fase	W/cm
W_k	= Pérdidas disipadas por el cable k	W/cm
X	= Reactancia de la envoltura o pantalla cuando los cables están dispuestos en trébol	Ω/cm
X_1	= Reactancia de la envoltura o pantalla cuando los cables están dispuestos en formación horizontal	Ω/cm
X_m	= Reactancia mutua entre la envoltura o pantalla de un cable y los conductores de otros dos cuando los cables están colocados en formación horizontal	Ω/cm
a	= Anchura de la cinta metálica que forma el canal del aceite en los cables de aceite	cm
b	= Distancia de la espiras sucesivas de la cinta metálica que forma el canal del aceite en los cables de aceite	cm
c	= Distancia entre los ejes de los conductores y el eje del cable (= $0,55 r_1 + 0,29 t$ para los conductores sectoriales).	cm
d	= Diámetro medio de la envoltura o pantalla	cm
d_A	= Diámetro medio de la armadura	cm
d_a	= Diámetro exterior del cinturón aislante	cm
d_c	= Diámetro exterior del conductor	cm
d_c'	= Diámetro exterior equivalente de un conductor sólido redondo que tenga el mismo canal central que un conductor sectorial hueco	cm
d_d	= Diámetro interno de la tubería	cm
d_i	= Diámetro interno de un conductor hueco	cm

d_M	=	Diámetro mayor de la pantalla o de la envoltura de un conductor ovalado	cm
d_m	=	Diámetro menor de la pantalla o de la envoltura de un conductor ovalado	cm
d_x	=	Diámetro de un conductor circular cableado que tenga la misma sección recta que el conductor sectorial	cm
e	=	espesor de la cinta metálica que forma el canal del aceite en el cable de aceite	cm
f	=	frecuencia del sistema	Hz
h	=	Coeficiente de disipación del calor	W/cm^2 (grado C) ^{5/4}
k	=	Factor utilizado para el cálculo de las pérdidas por histéresis en las armaduras o refuerzos	
k_p	=	Factor utilizado para el cálculo de x_p (efecto de proximidad)	
k_s	=	Factor utilizado en el cálculo de x_s (efecto pelicular)	
k_t	=	Factor de corrección relativo al efecto pelicular y de proximidad en los cables tipo tubería	
n	=	Número de conductores de un cable	
r_e	=	Radio exterior del cable	cm
r_l	=	radio del círculo circunscrito a los tres conductores sectoriales de un cable tripolar	cm
r_l	=	En 8.1.4, radio exterior de cada pantalla que está en contacto con un cable tripolar de aceite	cm
s	=	Distancia entre ejes de conductores	cm
s_l	=	Distancia entre ejes de dos cables adyacentes, en el caso de formación horizontal de tres cables que no se toquen	cm
t	=	Espesor de aislante entre conductores	cm
t_l	=	Espesor de aislante entre conductores y envoltura o pantalla	cm
$u = \frac{L}{r_e}$	=	véase 9.2	
$u = \frac{LG}{r_b}$	=	véase 9.10	
x_p	=	Argumento de una función de Bessel, utilizada en el cálculo del efecto de proximidad.	
x_s	=	Argumento de una función de Bessel, utilizada en el cálculo del efecto pelicular.	

x, y	= Lados del bloque de ductos ($y > x$)	cm
y_p	= Factor del efecto de proximidad	} artículo 4
y_s	= Factor del efecto pelicular	
α_{20}	= Coeficiente de variación de la resistencia eléctrica con la temperatura a 20 °C, por grado C	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$
δ	= Espesor equivalente de la armadura o refuerzo	cm
δ_1	= Espesor de la pantalla metálica en los cables apantallados	cm
$\tan \delta$ $\text{tg} \delta$	= Factor de pérdida del aislante	
ϵ	= Permitividad relativa del aislante	
λ_1, λ_2	= Relación entre las pérdidas en los forros metálicos y la armadura respectivamente y las pérdidas totales en el conductor	
λ_1'	= Relación entre las pérdidas en una envoltura producidas por las corrientes que circulan en la envoltura y las pérdidas en un conductor	
λ_1''	= Relación entre las pérdidas en una envoltura producidas por las corrientes de Foucault y las pérdidas en un conductor	
μ	= Permeabilidad magnética relativa del material que constituye la armadura.	
ρ	= Resistividad de un conductor a 20 °C	$\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_e	= Resistividad térmica del suelo alrededor de un banco de ductos	grado C cm/W
ρ_c	= Resistividad térmica del concreto, utilizado en el banco de ductos	grado C cm/W
ρ_m	= Resistividad térmica de las pantallas metálicas de los cables multipolares	grado C cm/W
ρ_t	= Resistividad térmica del material	grado C cm/W
Θ	= Temperatura máxima de servicio del conductor	°C
Θ_m	= Temperatura media del medio entre el cable y el ducto o tubo	°C
$\Delta \Theta$	= Aumento de temperatura admisible de un conductor en relación a la temperatura ambiente	grado C

$\Delta\theta_{ducto}$ = Diferencia entre la temperatura media del aire en un ducto y la temperatura ambiente grado C

$\Delta\theta_s$ = Diferencia entre la temperatura de la superficie de un cable colocado en el aire, y la temperatura ambiente grado C

ω = Frecuencia angular del sistema ($2\pi f$) 1/s

3 INTENSIDAD DE CORRIENTE ALTERNA PERMISIBLE EN LOS CABLES

La corriente permisible en un cable puede ser derivada de la ecuación que da el aumento de temperatura del cable por encima de la temperatura ambiente:

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

donde:

I = Intensidad de corriente que fluye en un conductor. A

$\Delta\theta$ = Aumento de temperatura admisible del conductor en relación con la temperatura ambiente grado C

R = Resistencia en corriente alterna por unidad de longitud del conductor a temperatura máxima de servicio continuo ohm/cm

W_d = Pérdidas dieléctricas por unidad de longitud del aislante que rodea el conductor W/cm

T_1 = Resistencia térmica por unidad de longitud, entre un conductor y la envoltura. grado C cm/W

T_2 = Resistencia térmica por unidad de longitud del relleno entre la envoltura y la armadura grado C cm/W

T_3 = Resistencia térmica, por unidad de longitud, de la envoltura externa del cable. grado C cm/W

T_4 = Resistencia térmica, por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio que la rodea, como se deduce de la cláusula 9. grado C cm/W

n = Número de conductores que transportan corriente en el cable (conductores de igual sección y con igual carga)

λ_1 = Relación entre las pérdidas de la cubierta metálica y las pérdidas total de todos los conductores.

λ_2 = Relación entre las pérdidas en las armaduras y las pérdidas totales en todos los conductores.

De la fórmula precedente se obtiene la corriente admisible que es dada por la expresión:

$$I = \left[\frac{\Delta e - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{RT_1 + n R(1 + \lambda_1) T_2 + n R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

Esta norma dá los métodos de evaluación de las diferentes cantidades requeridas para el cálculo de la expresión anterior.

La Sección dos contiene las fórmulas para el cálculo de las cantidades R, W_d , λ_1 y λ_2 .

La Sección tres contiene las fórmulas para el cálculo de las resistencias térmicas T_1 , T_2 , T_3 , y T_4 , asociadas con las diferentes partes del circuito térmico.

SECCION DOS - CALCULO DE LAS PERDIDAS

4 RESISTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA DEL CONDUCTOR, R

La resistencia en corriente alterna por unidad de longitud del conductor a su máxima temperatura de servicio está dada por la siguiente fórmula, con excepción de los cables tipo de tubería (véase 4.4)

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

donde:

R = Resistencia en corriente alterna del conductor a máxima temperatura de servicio, ohm/cm

R' = Resistencia en corriente continua del conductor a máxima temperatura de servicio, ohm/cm.

y_s = Factor de efecto pelicular

y_p = Factor de efecto de proximidad

4.1 Resistencia en corriente continua del conductor, R'

La resistencia en corriente continua por unidad de longitud del conductor a su máxima temperatura de servicio está dada por:

$$R' = R_0 \left[1 + \alpha_{20}(\theta - 20) \right]$$

donde:

R_0 = Resistencia en corriente directa del conductor a 20°C, ohm/cm.

El valor de R_0 , deberá ser tomado directamente de las normas NORVEN de conductores eléctricos, alambres de cobre: 130-68, cables de cobre: 529-68, alambres de aluminio: 531-68, cables de aluminio: 533-69, alambres de aleación de aluminio 6201: 556-71 y cables de aleación de aluminio: 557-71.

α_{20} = Coeficiente de variación a 20°C de la resistividad en función de la temperatura a masa constante y por grado C, siendo:

0,00393 para el cobre (Norma NORVEN 451-67, Cobre tipo recocido para uso eléctrico.)

0,00403 para el aluminio (Norma NORVEN 531-68. Alambres de aluminio desnudos de sección circular para usos eléctricos)

= Temperatura máxima de servicio en grado C (Esta será determinada según tipo de aislante utilizado (véase el Anexo).

4.2 Factor de efecto pelicular y_s

El factor de efecto pelicular viene dado por:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

$$x_s^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_s$$

donde:

f = Frecuencia del sistema, Hz.

Los valores para k_s están dados en la Tabla I.

La fórmula anterior es precisa si x_s no es mayor de 2,8 lo cual se cumple en la mayoría de los casos.

4.3 Factor del efecto de proximidad y_p

El factor de efecto de proximidad está dado por:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,08 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

donde: $x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_p$

d_c = Diámetro del conductor, cm

s = Distancia entre los ejes del conductor, cm

En el caso de cables multipolares con conductores sectoriales, el valor de y_p deberá multiplicarse por $2/3$ para obtener el factor del efecto de proximidad.

$d_c = d_x$ = diámetro de un conductor cableado circular de igual sección, cm

$s = (d_x + t)$, cm.

donde:

t = Espesor de aislamiento entre los conductores, cm.

Los valores de k_p están dados en la Tabla 1.

La fórmula anterior es precisa si x_p no es mayor de 2,8 lo cual se cumple en la mayoría de los casos.

4.4 Efectos pelicular y de proximidad en cables tipo de tubería.

Para los cables tipo de tubería, el efecto pelicular y el de proximidad deberán multiplicarse por un factor igual a 1,7. Para estos cables:

$$R = R' \left[1 + 1,7(y_s + y_p) \right]$$

TABLA 1
EFEECTO PELICULAR Y EFECTO DE PROXIMIDAD

Valores experimentales de los coeficientes k_s y k_p para conductores de cobre. (Los valores correspondientes para los conductores de aluminio están en estudio).

1	2	3	4
Tipo de conductor	secado e impregnado o no	k_s	k_p
Redondo, trenzado	si	1	0,8
Redondo, trenzado	no	1	1
Redondo, compacto	si	1	0,8
Redondo, compacto	no	1	1
Redondo, segmentado*	si	0,435	0,37
Hueco	si	**	0,8
Sectorial	si	1	0,8
Sectorial	no	1	1

* Los valores dados son aplicables a conductores de 4 segmentos (con o sin ducto central) y de secciones hasta 1500 mm².

Estos valores se aplican a los conductores cuyas capas de hilos están todas en un mismo sentido; son provisionales y están en estudio.

** La fórmula siguiente deberá usarse para el cálculo del factor k_s :

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

donde:

d_i = es el diámetro interior del conductor (canal central), cm.

d_c' = es el diámetro exterior del conductor sólido equivalente y con el mismo canal central, cm.

A pesar de que no se ha aprobado hasta ahora ningún resultado experimental que se aplique a los conductores de aluminio trenzados, se recomienda a los usuarios utilizar para los conductores de aluminio de cableado concéntrico, los mismos métodos y los mismos coeficientes que los indicados para los conductores de cobre trenzados similares. El error estará del lado seguro.

5 PERDIDAS DIELECTRICAS W_d

Las pérdidas dieléctricas solamente se hacen importantes cuando la tensión a tierra es mayor de 30 kV para cables aislados con papel, o 6 kV para cables aislados con PCV, que sean tripolares apantallados o unipolares. Las tensiones correspondientes para cables con aislamiento de goma-butyl y de polietileno están en estudio. Las pérdidas dieléctricas por unidad de longitud en cada fase vienen dadas por:

$$W_d = \omega C E_0^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}$$

donde:

$$\omega = 2\pi f, \frac{1}{s}$$

C = Capacidad por unidad de longitud, $\mu\text{F/cm}$

E_0 = tensión a tierra, V

Los valores de la $\operatorname{tg} \delta$, el factor de pérdida de la aislación a la frecuencia y la temperatura de servicio, vienen dados en la Tabla II.

5.1 Capacidad C. La capacidad de los conductores de sección circular está dada por:

$$C = \frac{0,0241 \epsilon}{\log_{10} \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} \cdot 10^{-5} \mu\text{F/cm}$$

donde:

ϵ = Permitividad relativa del aislante

D_i = diámetro externo del aislante, cm

d_c = diámetro del conductor incluyendo la pantalla, si la hay, cm

La misma fórmula puede ser usada para conductores ovalados, si la media geométrica de los diámetros, mayor y menor sobre el aislante y el conductor es utilizada en lugar de D_i y d_c .

Los valores de ϵ están dados en la Tabla II.

TABLA II

Valores de permeabilidad relativa y factor de pérdidas para los aislantes de cables usados en tensiones altas y medianas.

1	2	3
Tipo de cable	ϵ	$\text{tg } \delta *$
<u>Cables aislados con papel impregnado</u>		
Tipo sólido, totalmente impregnado o impregnado con material no migrante	4	0,01
De aceite, baja presión i)	3,3	0,004**
De aceite, alta presión	3,5	0,0045**
A presión de aceite del tipo de tubería	3,7	0,0045
A presión exterior de gas ii)	3,5	0,0040
A presión interior de gas iii)	3,4	0,0045
<u>Cables aislados con otros materiales</u>		
Goma butílica	4	0,050
EPR	3	0,040
P.V.C	8	0,1
Polietileno	2,3	0,0010
Polietileno reticular	2,5	0,008

* Valores seguros para la máxima temperatura permisible, aplicables a la tensión más alta normalmente especificada para cada tipo de cable.

** De existir diferentes valores, estos son principalmente consecuencias de las características del papel utilizado y no de la presión.

- i) Véase Publicación CEI 141-1; Pruebas en cables de aceite a presión de gas y en sus accesorios, Parte 1: Cable de aceite con aislamiento de papel, cubierta metálica y accesorios, para tensiones alternas hasta 275 kV.
- ii) Véase Publicación CEI 141-2; Pruebas en cables de aceite, a presión de gas y en sus accesorios, Parte 2; Cables a presión de gas interno y sus accesorios, para tensiones alternas hasta 275 kV.
- iii) Véase Publicación CEI 141-3; Pruebas en cables de aceite, a presión de gas y en sus accesorios, Parte 3 cables a presión de gas externo (a compresión de gas) y sus accesorios, para tensiones alternas hasta 275 kV.

Se debería tener en cuenta la pérdida dieléctrica para los valores de U_0 iguales o mayores que los valores siguientes:

Tipo de cable	U_0 kV
Cables aislados con papel impregnado	26
Cables aislados con otros materiales	
Goma butílica	12
EPR	15
PVC	6
Polietileno	110
Polietileno reticular	37

En general, los valores de la constante dieléctrica y del ángulo de pérdidas han sido medidos hasta estas tensiones, sin embargo, para el polietileno reticular no se han medidos con tensiones superiores a 20 kV y el uso de este material para altas tensiones puede requerir ciertas precauciones.

6 FACTOR DE PERDIDA DE LA PANTALLA λ_1

La pérdida de energía de la pantalla (λ_1) es consecuencia de corrientes circulares (λ_1') y de corrientes de Foucault (λ_1'').

entonces:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

La fórmula dada en esta sección expresa las pérdidas de la pantalla en términos de la pérdida total en el (los) conductor(es), y para cada caso en particular, se indica que tipo de pérdida habrá de considerarse.

Para cables unipolares con la pantalla puesta a tierra en ambos extremos, solamente se deberá considerar la pérdida debida a corrientes circulantes en la pantalla. Esto está considerado en 6.1, 6.2 y 6.3.

Para cables de grandes conductores segmentados, el factor de pérdida deberá ser incrementado para tomar en cuenta las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault en la pantalla (véase 6.5). Se debe igualmente tomar un cierto margen de seguridad para tener en cuenta aumentos de separación en algunos puntos del tendido (véase 6.4)

Para una instalación del tipo de pantallas transpuestas, no es posible admitir en la práctica que las secciones menores sean electricamente idénticas y que la pérdida debida a las corrientes circulantes en la pantalla sean despreciables. Se hacen recomendaciones en 6.6, para tener en cuenta este desequilibrio eléctrico.

La resistividad eléctrica y los coeficientes de temperatura del plomo y del aluminio para uso en el cálculo de resistencia de la pantalla R_s , están dados en la Tabla III.

6.1 Cables unipolares en formación de trébol con pantallas interconectadas en ambos extremos. Para cables unipolares instalados en forma de trébol, con pantallas interconectadas en ambos extremos, el factor de pérdida está dado por la ecuación

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 \left(+ \frac{R_s}{X} \right)^2}$$

donde:

R_s = Resistencia de la pantalla o blindaje por unidad de longitud, ohm/cm

X = Reactancia de la pantalla por unidad de longitud, ohm/cm.

$$= 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

s = Distancia entre los ejes de los conductores, cm.

d = Diámetro medio de la pantalla, el cual, en el caso de conductores de forma ovalada, será igual a: $a = \sqrt{d_M \cdot d_m}$, donde d_M y d_m son los diámetros mayor y menor respectivamente, en cm.

$$\omega = 2\pi f \quad (f = \text{frecuencia})$$

$\lambda_1'' = 0$, es decir que las pérdidas por corrientes de Foucault son despreciables, salvo para conductores segmentales de grandes secciones para los cuales λ_1'' se calcula por el método dado en 6.5.

6.2 Cables unipolares en formación plana, con regular transposición y pantallas interconectadas en ambos extremos. Para cables unipolares en formación plana, con el cable central equidistante de los cables extremos, transpuestos regularmente y con las pantallas interconectadas cada tres transposiciones, el factor de pérdida está dado por la siguiente ecuación:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

donde:

$$\begin{aligned} X_1 &= \text{Reactancia de la pantalla por unidad de longitud, ohm/cm} \\ &= 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2,52 s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm} \end{aligned}$$

$\lambda_2'' = 0$, es decir que las pérdidas por corrientes de Foucault son despreciables, salvo para conductores segmentales de gran sección donde λ_2'' se calcula según el método dado en 6.5.

6.3 Cables unipolares en formación plana, sin transposición, cuyas pantallas están interconectadas en ambos extremos. Para cables unipolares en formación plana, con el cable central equidistante de los cables extremos, sin transposición y con la pantalla interconectada en ambos extremos, el factor de pérdida para el cable que tiene la mayor pérdida (por ejemplo el cable exterior que transporta una corriente desfasada hacia atrás) está dado por la siguiente ecuación:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Para el otro cable extremo, el factor de pérdida estará dado por:

$$\lambda_2' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Para el cable del medio, el factor de pérdida estará dado por:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right)$$

Para todas las fórmulas:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

donde:

X = Reactancia por unidad de longitud de la pantalla o del blindaje para cables unipolares en formación trébol, ohm/cm

$$x = 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \quad \text{ohm/cm}$$

X_m = Reactancia mutua por unidad de longitud entre la pantalla de uno de los cables exteriores y el conductor de los otros dos, cuando los cables están en formación plana.

$$= 4,6 \omega \log_{10} (2) 10^{-9} = 0,435 10^{-6} \quad \text{ohm/cm a 50 Hz}$$

$\lambda_3'' = 0$, es decir que las pérdidas por corrientes de Foucault son despreciables, salvo para conductores segmentales de gran sección, donde λ_3'' se calcula según el método dado en 6.5.

6.4 Variación de la distancia entre cables unipolares con pantalla metálica conectada en ambos extremos. Para cables unipolares con pantalla conectada en ambos extremos, la corriente de circulación y consecuentemente, las pérdidas, se incrementan al aumentar la separación entre los cables, de ahí el interés de reducir la separación tanto como sea posible. El espaciado óptimo se consigue considerando tanto las pérdidas como el calentamiento mutuo de los cables.

No es siempre posible instalar cables con la separación óptima, y por varias razones, los cables están generalmente mucho más separados en ciertos sitios que lo que se desearía y que se realiza sobre el resto del tendido. Si la pérdida debida a la corriente circulante se calcula sobre la base de la separación deseada, se obtiene un resultado incorrecto, porque las tensiones inducidas en la pantalla en los lugares de mayor espaciado han sido despreciadas. Es posible calcular separadamente la tensión inducida y la impedancia de separación para cada parte del tendido entre dos puntos de interconexión de la pantalla metálica. Este cálculo sin embargo, puede ser muy tedioso y puede incluir un elemento de aproximación, ya que no es posible determinar de antemano la separación en cada lugar. De todos modos es recomendable para todas las instalaciones con cables unipolares en las cuales las panta -

llas están interconectadas en más de un punto, el aumentar arbitrariamente en un 25% el factor de pérdida de la envoltura para tomar en cuenta particularidades tales como el paso de cables. Si se piensa que el incremento del 25% no es conveniente, se puede llegar a un acuerdo sobre otro porcentaje.

Nota. Este incremento no se aplicará en instalaciones con las pantallas interconectadas en un solo punto o transpuestas (véase 6.6)

6.5 Efecto de los grandes conductores segmentados. Donde los conductores están sujetos a un reducido efecto de proximidad, como en grandes conductores segmentados y aislados, el factor de pérdida de la pantalla λ_1'' de 6.1, 6.2 y 6.3, no puede ser ignorado, pero será obtenido por la multiplicación del valor λ_1'' obtenido de 6.6 para la misma configuración de cable, por el factor F, dado por la fórmula:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)}$$

donde:

$$M = N = \frac{R_s}{X} \quad \text{para cables colocados en formación trébol}$$

y

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Para cables colocados en posición plana, estando} \\ \text{el cable central equidistante de los cables exte} \\ \text{riores.} \end{array}$$

6.6 Cables unipolares con las pantallas interconectadas en un punto o seccionadas y transpuestas. Para cables unipolares con las pantallas interconectadas en un punto o seccionadas y transpuestas, el factor de pérdidas es dado por:

$$\lambda_1'' = A_1 \frac{R_s}{R} \frac{\left(\frac{d}{2s}\right)^2}{\left(\frac{R_s \cdot 10^9}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2s}{d}\right)} \left[1 + A_2 \left(\frac{d}{2s}\right)^2 \right]$$

donde los coeficientes A_1 y A_2 tienen los siguientes valores:

	A ₁	A ₂
Cables colocados en formación trébol	3,0	0,417
Cables colocados en posición plana con el cable central equidistante de los cables exteriores:		
Para los cables exteriores	1,5	0,27
Para el cable central	6	0,083

Nota. En este caso las pérdidas son debidas a las corrientes de Foucault en la pantalla metálica y no están afectadas por la transposición de los cables. Si los cables están colocados en forma plana con transposición regular, el valor medio de pérdidas por fase para una sección de transposición completa, puede ser obtenido usando los coeficientes dados antes para cables en formación trébol. Se tendrá $\lambda_1'' = 0$ para instalaciones en donde las pantallas están interconectadas en un sólo punto y para instalaciones donde las pantallas están transpuestas y donde cada sección de transposición completa es dividida en tres secciones elementales eléctricamente idénticas.

Cuando una instalación seccionada y transpuesta contiene secciones cuyo desequilibrio no es despreciable, se produce una tensión residual, la cual origina una pérdida por corrientes circulantes en esa sección que debe ser tomada en cuenta.

Para instalaciones donde las longitudes reales de las secciones menores son conocidas, el factor de pérdida λ_1' puede ser obtenido a partir de la corriente de circulación en un sistema de la misma configuración no transpuesto y donde las pantallas están interconectadas y puestas a tierra en ambos extremos y el multiplicador de este último factor será:

$$\left(\frac{n + m - 2}{n + m + 1} \right)^2$$

donde en cualquier sección mayor, las dos secciones menores más largas son n y m veces la longitud de la sección menor más corta (ejm. las longitudes de la sección menor son a, n a y m a, donde la sección más corta es a)

Esta fórmula interviene solo cuando las secciones menores tienen longitudes distintas.

Las variaciones en la separación deben también ser tomadas en consideración.

Cuando las longitudes de las secciones menores no son conocidas, es recomendable que el valor de $\lambda_{j'}$ sea:

$$\lambda_{j'} = 0,03 \quad \text{para cables enterrados directamente}$$

$$\lambda_{j'} = 0,05 \quad \text{para cables instalados en ducto.}$$

6.7 Cables de tres conductores con una envoltura metálica común. Para un cable de tres conductores donde los mismos estén contenidos en una envoltura metálica común, $\lambda_{j'}$ es despreciable y el factor de pérdidas es, por lo tanto, dado por una de las siguientes fórmulas:

a) Para conductores redondos u ovoides, y donde la resistencia de la envoltura metálica R_s es menor o igual a $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_{j''} = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \right]$$

donde:

C = distancia entre el eje de un conductor y el eje del cable, cm.

d = diámetro medio de la envoltura metálica, cm.

f = frecuencia, Hz

b) Para conductores redondos u ovoides, y donde la resistencia de la envoltura metálica R_s es mayor que $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_{j''} = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-18}$$

c) Para los cables de conductores sectoriales y cualquier valor R_s :

$$\lambda_{j''} = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2}$$

donde:

r_1 = radio del círculo que circunscribe los tres conductores sectoriales, cm

t = espesor del aislamiento entre conductores, cm.

6.8 Cables tripolares con armadura de cinta de acero. La adición de una armadura de cinta de acero aumenta las pérdidas por corrientes de Foucault en la envoltura. Los valores para λ'' , dados en 6.7, deberán ser multiplicados por el siguiente factor, si el cable tiene armadura de cinta de acero:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}} \right]^2$$

donde:

d_A = diámetro medio de la armadura, cm.

μ = permeabilidad relativa de la cinta de acero (usualmente tomada como igual a 300).

δ = espesor equivalente de la armadura = $\frac{A}{\pi d_A}$, cm.

donde A = sección transversal de la armadura, cm^2

Esta corrección es aplicable solamente a cintas de espesor comprendido entre 0,3 mm y 1,0 mm. Está en estudio aún el caso de cintas más delgadas (véase 7.3).

6.9 Cables armados de conductores bajo plomo. Para un cable tripolar en el cual cada conductor tiene una envoltura de plomo individual, el factor de pérdida para las envolturas está dado por:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

donde:

$X = 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9}$ ohm/cm

s = distancia entre los ejes de los conductores, cm.

$$\lambda_{1''} = 0$$

6.10 Pérdidas en pantallas y envolturas de los cables del tipo de tubería. Si cada conductor de un cable del tipo de tubería tiene solamente una pantalla sobre el aislamiento, por ejemplo, una cinta de cobre o una cubierta de plomo, la relación entre las pérdidas de la pantalla y las pérdidas del conductor pueden ser calculadas por la fórmula dada en 6.1, para la envoltura de un cable uniconductor, teniendo en cuenta que la fórmula está corregida para la pérdida adicional causada por la presencia del tubo de acero.

La fórmula modificada es la siguiente:

$$\lambda_{1'} = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

Si cada conductor tiene una pantalla metálica y un refuerzo no magnético, se utiliza la misma fórmula, pero la resistencia R_s es reemplazada por la resistencia equivalente a la puesta en paralelo de la pantalla metálica y de la armadura. El diámetro d es reemplazado por el valor d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2}}$$

donde:

d' = diámetro medio de la pantalla metálica y la armadura, cm.

d_1 = diámetro medio de la pantalla o cubierta, cm.

d_2 = diámetro medio de la armadura, cm.

En el caso de conductores segmentados de forma ovalada, d_1 y d_2 son dados por $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, donde d_M y d_m son los diámetros medios mayor y menor respectivamente.

Nota: Véase también 7.2

7 PERDIDAS EN LA ARMADURA Y EN EL REFUERZO λ_2

7.1 Uso de las fórmulas. Las fórmulas dadas en este sub-párrafo expresan las pérdidas de potencia que ocurren en la armadura o en el refuerzo metálico de un cable, en término de un incremento, λ_2 , de las pérdidas de potencia en todos los conductores.

Los valores apropiados de resistividad y del coeficiente de variación de resistividad con la temperatura en los materiales usados para armadura y refuerzo son dados en la tabla III.

TABLA III

RESISTIVIDADES ELECTRICAS Y COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE LOS METALES
USADOS

Material	Resistividad (ρ) ohm.cm a 20 °C		Coeficiente de temperatura (α 20) por grado C a 20°C	
a) Conductores				
Cobre	1,7241	10 ⁻⁶	3,93	10 ⁻³
Aluminio	2,8264	10 ⁻⁶	4,03	10 ⁻³
b) Envolturas y armaduras				
Plomo o aleación de plomo	21,4	10 ⁻⁶	4,0	10 ⁻³
Acero	13,8	10 ⁻⁶	4,5	10 ⁻³
Bronce	3,5	10 ⁻⁶	3,0	10 ⁻³
Acero inoxidable	70	10 ⁻⁶	despreciable	
Aluminio	2,84	10 ⁻⁶	4,03	10 ⁻³

Nota. Los valores para conductores de cobre son tomados de la Publicación IEC N° 28. Los valores para conductores de aluminio son tomados de la Publicación IEC N° 111.

7.2 Armadura o refuerzo no magnético. El procedimiento general es combinar el cálculo de las pérdidas en el refuerzo con el de las pérdidas en la envoltura. Las fórmulas están dadas en 6 y la combinación en paralelo de las resistencias de la envoltura y del refuerzo es usada en lugar de la resistencia R_s de la envoltura sola. El valor medio cuadrático (rmc) de los diámetros de la envoltura y del refuerzo, reemplaza el diámetro medio d_1 de la envoltura. Este procedimiento se aplica tanto a cables unipolares como a multipolares.

El valor de la resistencia del refuerzo depende del paso de la cinta como se indica a continuación:

a) Si la cinta está colocada con un paso muy largo (cintas longitudinales), la resistencia se calcula como la de un cilindro que tiene la misma masa de material por unidad de longitud del cable y también el mismo diámetro interno de las cintas.

b) Si las cintas están arrolladas a aproximadamente 54° del eje del cable, la resistencia es dos veces el valor calculado de acuerdo al párrafo a) anterior.

c) Si las cintas son arrolladas con un paso muy corto (cintas circunferenciales), la resistencia es considerada como infinita, en consecuencia las pérdidas pueden ser despreciadas.

d) Si hay dos o más capas de cintas en contacto mutuo, teniendo un paso muy pequeño, la resistencia es dos veces el valor calculado de acuerdo al párrafo a).

Estas consideraciones se aplican también a los conductores de los cables del tipo de tubería tratados en 6.10.

7.3 Armadura magnética o refuerzo.

7.3.1 Cables monopolares. Este caso se considerará posteriormente.

7.3.2 Cables tripolares. Armadura de alambres de acero.

a) Cables de conductores redondos.

$$\lambda^2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1}$$

donde:

R_A = resistencia de la armadura a su temperatura máxima ohm/cm.

d_A = diámetro medio de la armadura, cm.

c = distancia entre los ejes de un conductor y el centro del cable, cm.

No se hace corrección por concepto de distribución no uniforme de corriente en los conductores, debido a que esta se considera despreciable hasta secciones de 400 mm².

b) Cable armado de tres conductores bajo plomo.

Cuando la armadura esté sobre cable de tres conductores bajo plomo, el efecto de apantallamiento resultante de las corrientes de las envolturas reduce las pérdidas en la armadura. La fórmula para λ^2 dada anteriormente deberá ser multiplicada por el factor $(1 - \lambda')$ donde λ' se obtiene del sub-párrafo 6.1

c) Cables con conductores sectoriales.

$$\lambda^2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2 r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1}$$

donde:

r_1 = Radio del círculo que circunscribe los tres conductores sectoriales, cm.

f = frecuencia de alimentación, Hz

7.3.3 Cable tripolar, con armadura o refuerzo de cinta de acero. La siguiente fórmula se aplica para cintas con espesores de 0,3 a 1,0 mm. La fórmula para cintas con espesores menores a 0,3 mm está aún en consideración.

Las pérdidas por histéresis λ'_2 a una frecuencia de 50 Hz es dada por:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-9}}{R d_A \delta}$$

donde:

s = Distancia entre los ejes del conductor, cm.

δ = Espesor equivalente de la armadura, cm.

es decir
$$\frac{A}{\pi d_A}$$

y:

A = Sección recta de la armadura, cm².

d_A = diámetro medio de la armadura, cm.

El factor k está dado por:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

donde:

μ = permeabilidad relativa de la cinta de acero, usualmente tomada como igual a 300.

Para frecuencias f distintas de 50 Hz, multiplíquese el valor obtenido en la fórmula inicial por el factor $\frac{f}{50}$

Las pérdidas por corriente de Foucault, para una frecuencia de 50 Hz, están dadas por la siguiente ecuación.

$$\lambda_{2''} = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

y para cualquier otra frecuencia multiplíquese el resultado obtenido por el factor $\left(\frac{f}{50}\right)^2$

El factor total de pérdidas en la armadura está dado por la suma de ambas pérdidas, histéresis y corrientes de Foucault sea:

$$\lambda_2 = \lambda_{2'} + \lambda_{2''}$$

Nota. Si existen armaduras o refuerzos magnéticos, se incrementan las pérdidas por corriente de Foucault en las envolturas. La referencia se hace en 6.8.

7.4 Pérdidas en tubos de acero. Las pérdidas en los tubos de acero vienen dadas por dos fórmulas empíricas; la primera para polos dispuestos en forma trébol y la segunda para polos dispuestos en una formación más abierta en la parte inferior del tubo. Los cables en servicio probablemente se aproximan a una configuración intermedia a las mencionadas. Se considera entonces usual hacer un cálculo por separado para cada configuración y tomar el valor promedio:

Nota. Estas fórmulas han sido obtenidas empíricamente en los EE.UU. y hasta el presente, solo ha sido aplicada a los tamaños de tuberías de acero usados en dicho país.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,0115 s - 0,001485 d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

para la configuración trébol

$$y: \lambda_2 = \left(\frac{0,00438 s + 0,00226 d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

para la formación en arco abierto,

donde:

s = Distancia entre ejes de conductores, cm.

d_d = diámetro interior de la tubería, cm.

R = resistencia en corriente alterna a máxima temperatura de servicio, por unidad de longitud del conductor ohm/cm.

Las fórmulas dadas se aplican a la frecuencia de 60 Hz.

Para la frecuencia de 50 Hz el valor obtenido deberá multiplicarse por 0,7. Este factor está, sin embargo, aún en consideración.

Para cables de tipo de tuberías cuya armadura de alambres planos se coloca sobre los tres polos después del tendido de estas, las pérdidas son independientes de la presencia del tubo.

Para estos cables, las pérdidas en la armadura deben calcularse como para los cables armados de conductores bajo plomo (véase 7.3.2) y se deben despreciar las pérdidas en el tubo.

SECCION TERCERA CALCULO DE LAS RESISTENCIAS TERMICAS

8 RESISTENCIAS TERMICAS DE LAS PARTES INTEGRANTES DEL CABLE T_1 , T_2 y T_3

Esta sección da las fórmulas para el cálculo de las resistencias térmicas por unidad de longitud de las diferentes partes de los cables, T_1 , T_2 y T_3 (véase el artículo 3).

Las resistividades térmicas de los materiales usados como aislamiento y cubiertas protectoras, están dadas en la tabla IV.

TABLA IV
RESISTENCIAS TERMICAS DE LOS MATERIALES

Material	Resistividad térmica (ρ_t) grado C.cm/W
<u>Materiales aislantes</u>	
Aislamiento de papel (en cables tipo sólido)	600
Aislamiento de papel en cables de aceite	500
Aislamiento de papel en cables con presión externa de gas	550
Aislamiento de papel en cables con presión interna da gas	
a) Preimpregnados	650
b) Impregnados en masa	600
Polietileno	350
Polietileno reticulado	350
Cloruro de polivinilo (PVC)*	600
EPR	500
Goma butilica	500
Goma	500
*Este valor para el PVC es un valor medio ya que la resistividad térmica del PCV varia de manera apreciable según el tipo de compuesto.	
<u>Envolturas protectoras</u>	
Compuesto de yute y material fibroso	600
Protección de goma tipo "sandwich"	600
Policloropreno (Meopreno)	550
Cuando para el revestimiento de protección se ha utilizado materiales plásticos o elastoméricos, las resistividades térmicas serán las mismas que las indicadas en la tabla para los grados de aislamiento de estos materiales.	
<u>Materiales para instalación en ductos</u>	
Cemento	100
Fibra	480
Asbesto cemento	200
Arcilla cocida	120
P.V.C.	700
Polietileno	350

8.1 Resistencia térmica entre un conductor y la envoltura T_1 .

8.1.1 Cables unipolares.

 T_1 es dado por:

$$T_1 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

donde:

 d_c = diámetro del conductor, cm. t_1 = espesor del aislamiento entre el conductor y la envoltura, cm. ρ_T = resistividad térmica del aislante, grado C cm/W

8.1.2 Cable tripolar con cinturón

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G$$

donde:

 G = factor geométrico definido a continuación:

- Cable de tipo cinturón con conductores circulares.

El factor geométrico G está dado en la figura N° 2 página 43

- Cable de tipo cinturón con conductores sectoriales

El factor geométrico para estos cables depende de la forma del sector del conductor, la cual varía de una fábrica a otra. Una fórmula adecuada es:

$$G = F_1 6,9 \log_{10} \left(\frac{d_a}{2r_1} \right)$$

donde:

 d_a = diámetro exterior del cinturón aislante, cm. r_1 = radio del círculo circunscrito a los conductores, cm.

Para los valores usuales de las secciones de los conductores y de los espesores de aislamiento, F_1 puede ser tomado como igual a la unidad, sin embargo con conductores pequeños y de gran espesor de aislamiento entre conductores, un valor más correcto de F_1 puede obtenerse de la siguiente fórmula:

$$F_1 = 1 + \frac{3t}{2\pi (d_x + t) - t}$$

donde:

d_x = es el diámetro de un conductor redondo que tenga la misma sección transversal recta que el sectorial considerado, cm.

8.1.3 Cables tripolares con pantalla metálica.

a) Cables con pantalla, con conductores circulares. Se considera primero que estos cables son del tipo con cinturón para el cual $\frac{t_1}{t}$ es 0,5

Sin embargo, para tener en cuenta la conductividad térmica de la pantalla metálica, se debe multiplicar el resultado por un factor K, llamado factor de pantalla, que está indicado en la figura 3 página 44 para diferentes valores de $\frac{t_1}{d_c}$ y para diferentes especificaciones de cables.

En consecuencia:
$$T_1 = K \frac{\rho T}{2\pi} G$$

b) Cables con pantalla, con conductores en forma sectorial.

T_1 es calculado para estos cables en la misma forma que para los cables con cinturón, pero d_a es tomado como el diámetro de un círculo circunscrito a los conductores aislados. Este resultado viene multiplicado por un factor de pantalla dado en la Fig. 4, página 45.

8.1.4 Cables de aceite. Para cables tripolares de aceite, se debe tener en cuenta la presencia de los canales del aceite. Suponiendo que la resistividad térmica del aceite no difiera demasiado del papel impregnado, para cables tripolares de aceite sin material de relleno ni cintas metálicas formando los canales de aceite, T_1 , es calculado de acuerdo a 8.1.3.

Para cables con cintas metálicas que forman los canales del aceite, T_1 viene dado por:

$$T_1 = T_0 + \frac{T_{du} \times T_{f1}}{T_{du} + T_{f1}}$$

donde:

T_0 = Resistencia térmica interna de un conductor unipolar aislado, con pantalla, de la misma dimensión que cada uno de los conductores aislados con papel de un cable tripolar de aceite.

T_{du} = Resistencia térmica de los canales del aceite.

T_{f1} = Resistencia térmica del material de relleno y de la pantalla situada entre el dieléctrico y la envoltura.

= Resistencia térmica interna de cables tripolares con pantalla de las mismas dimensiones que el cable dado, pero sin canales de aceite, excepto la del conductor unipolar T_0 .

La contribución debida a la resistencia térmica de los canales de aceite es:

$$T_{du} = K_{du} \left(\frac{a+b}{a} \right) \left[\left(0,576 \frac{r_1}{e} \right) - 0,6 \right]$$

donde:

K_{du} = Resistividad térmica de la cinta metálica que forma el canal del aceite (0,48 grado C cm/W y 2,2 grado cm/W) para aluminio y acero respectivamente.

a = Anchura de la cinta metálica en cm.

b = Separación entre vueltas sucesivas, cm.

r_1 = Radio externo de cada pantalla en contacto, en cm.

e = Espesor de la cinta metálica en cm.

Cables armados de conductores bajo plomo o bajo aluminio.

La resistencia térmica T_1 se calcula de la misma forma que para los cables unipolares.

8.2 Cálculo de la resistencia térmica T_2

a) Cables unipolares y tripolares con una cubierta metálica común.

$$T_2 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left(\frac{D_a}{D_s} \right)$$

donde:

D_a = Diámetro externo del revestimiento, en cm.

D_s = Diámetro interno del revestimiento, en cm.

b) Cables con cubierta de plomo o aluminio.

La resistencia térmica del relleno y del relleno y del revestimiento bajo la armadura está dado por:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{6 \pi} \bar{G}$$

donde:

\bar{G} = Factor geométrico dado en la Fig. 5, Pág. 46

8.3 Cálculo de la resistencia térmica T_3 . Los revestimientos exteriores son generalmente en forma de capas concéntricas, y:

$$T_3 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left(\frac{D_e}{D_{a'}} \right)$$

donde:

D_e = Diámetro exterior del revestimiento externo, en cm.

$D_{a'}$ = Diámetro interior del revestimiento externo, en cm.

8.4 Cables de tipo de tubería.

Para estos cables tenemos:

a) La resistencia térmica T_1 del aislante de cada polo, entre el conductor y la pantalla.

Referirse a la sección de cables unipolares.

b) La resistencia térmica T_2 está compuesta por:

1) La resistencia de cualquier envoltura sobre la pantalla o envoltura de cada polo. El valor que ha de ser introducido por parte de T_2 en la ecuación del artículo 3, es el valor por cable. Por ejemplo: un tercio del valor por polo, para un cable tripolar.

El valor por polo se calcula por el método dado en 8.2 para el revestimiento de cables unipolares. Para conductores ovalados, se usará el diámetro equivalente (media geométrica).

Y también por:

2) La resistencia térmica del gas o aceite comprendido entre la superficie exterior del cable y la tubería. Esta resistencia se calcula de la misma forma que T_4 , que corresponde al espacio comprendido entre el cable y la superficie interna del ducto en que se encuentra, dado en 9.8.

El valor calculado será para cada cable y se sumará el valor mayor a la cantidad calculada en 1) para determinar la resistencia T_2 que será incorporada en la ecuación de la corriente admisible del artículo 3.

3) La resistencia térmica T_3 de cualquier cubierta exterior de la tubería se determinara como se indica en 8.3. La resistencia térmica de la tubería metálica es despreciable.

9 RESISTENCIA TERMICA EXTERIOR T_4

9.1 Cables colocados al aire libre. La resistencia térmica T_4 del medio ambiente que rodea a un cable colocado al aire libre y protegido de la radiación solar, viene dada por la fórmula:

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta \theta_s)^{1/4}}$$

donde:

D_e = Diámetro exterior del cable, cm.

h = Coeficiente de disipación de calor (obtenido de la Fig. 6, Pág. 47 el cual da el valor para dos condiciones extremas de la superficie del cable, por ejemplo, negro y brillante, W/cm^2 (grado C)^{5/4})

$\Delta \theta_s$ = Exceso de temperatura de la superficie del cable por encima de la temperatura ambiente grado C (Véase más adelante el método para calcularlo)

Los cables con revestimiento de yute deben ser considerados como si tuvieran una superficie negra.

Para los cables sin revestimiento de yute, con cubierta de plomo o armadura desnuda, como también para los cables con envoltura termoplástica, se debe tomar un valor de h intermedio entre los valores dados para la superficies negras y brillantes.

Tres cables instalados sobre soportes no continuos se deben considerar equivalentes al caso 2) en figura 6, página 47 y cuando van sobre soportes continuos, como equivalentes al caso 3) en figura 6.

Para cables en canales sin rellenar, véase 9.6.

Cálculo de $\Delta\theta_s$ por medio de un ábaco.

La elevación de temperatura de la superficie del cable $\Delta\theta_s$ sobre la temperatura ambiente está dada por la ecuación:

$$(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s) = \pi D_e h (\Delta\theta_s)^{5/4} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

donde:

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

El procedimiento es el siguiente:

a) Calcular el valor de $\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$ usando la fórmula:

$$\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} = \frac{\pi D_e h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

b) Localice la recta en el ábaco de la figura 7, página 48 con el valor calculado en a) como ordenada, y luego localice el punto sobre esta recta con la intercepción de la curva $\Delta\theta + \Delta\theta_d = \text{constante}$.

c) Lea la abscisa de este punto para obtener $(\Delta\theta_s)^{1/4}$.

9.2 Cable unipolar directamente enterrado

$$T_4 = 0,366 \rho_T \log_{10} (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

donde:

ρ_T = Resistividad térmica del suelo, grado C cm/W

$$u = \frac{L}{r_e}$$

L = Distancia entre la superficie de la tierra y el eje del cable, cm.

r_e = Radio exterior del cable, cm.

Cuando el valor de u es mayor de 10, se obtiene una buena aproximación superior a 1 por 1000, utilizando la fórmula:

$$T_4 = 0,366 Q_T \log_{10} (2u)$$

9.3 Grupo de cables enterrados (sin tocarse). Tales casos se resuelven con el principio de la superposición, suponiendo que cada cable actúa como una fuente independiente de calor lineal que no distorsiona el campo de calor generado por los otros cables.

Existen 2 casos principales: el primero y el más generalizado, es un grupo de cables con cargas desiguales, de diferentes especificaciones; en este caso solamente se puede dar una indicación general del método. El segundo, que es el más particular, es un grupo de cables idéntico, igualmente cargados, y en este caso se puede obtener una solución bastante simple.

9.3.1 Cables con cargas desiguales. El método sugerido para grupos de cables con cargas desiguales consiste en calcular el aumento de temperatura del cable bajo consideración, causada por los otros cables del grupo, y substraer, este aumento del valor de $\Delta\theta$ usado en la ecuación para la corriente nominal en 3. De antemano se debe efectuar un estimado de la potencia disipada por unidad de longitud de cada cable, y esto puede ser subsecuentemente corregido como resultado del calculo, cuando esto sea necesario.

Por lo tanto, para el cable de orden p para el cual se quiere determinar la carga admisible, el aumento de temperatura $\Delta\theta_p$ (por encima de la temperatura ambiente) debido a la potencia disipada por los $q-1$ cables restantes del grupo, será:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp}$$

(El termino $\Delta\theta_{pp}$ está excluido de la sumatoria)

donde:

$\Delta\theta_{kp}$ = el aumento de temperatura en la superficie del cable producido por la potencia disipada W_k en vatios por unidad de longitud, en el cable k :

$$\Delta\theta_{kp} = 0,366 \rho_T w_k \log_{10} \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

Las distancias d_{pk} y d'_{pk} se toman desde el centro del cable de orden p al centro del cable k , y al centro de la imagen del cable k en la superficie tierra - aire respectivamente (véa la figura 1, página 42)

El valor de $\Delta\theta$ en la ecuación de la corriente admisible en 3 se reduce en la cantidad $\Delta\theta_p$ y la corriente admisible para el cable de orden p se determina usando un valor para T_4 correspondiente a un cable en la posición p supuesto solo.

Este cálculo se efectúa para todos los cables en el grupo y será repetido tantas veces como sea necesario para eliminar la posibilidad de sobrecalentar cualquier cable.

9.3.2 Cables idénticos igualmente cargados. En este segundo tipo de agrupación la corriente admisible de un número de cables idénticos e igualmente cargados se determina por la capacidad del cable más caliente.

Comunmente es posible determinar a partir de la configuración de la instalación cual de los cables será el más caliente y calcular la corriente admisible para éste.

En caso de dificultad, podrá ser necesario un cálculo más avanzado para otro cable del grupo. El método de cálculo consiste en utilizar un valor modificado de T_4 , el cual toma en consideración el calentamiento mutuo del grupo y dejar sin modificaciones el valor de $\Delta\theta$ usado en la ecuación de 3.

El valor modificado de la resistencia térmica exterior T_4 del cable de orden p está dado por:

$$T_4 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right\}$$

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

Las distancias d_{pk} , etc. son las mismas que las mostradas en la Figura 1, página 42, para el primer método.

La expresión simplificada, $2u$, puede ser usada en vez de la expresión $u + \sqrt{u^2 - 1}$ si es aplicable (véase 9.2)

Para configuraciones de cables simples, esta fórmula puede ser simplificada considerablemente. Un ejemplo es el siguiente:

En el caso práctico de tres cables igualmente cargados, colocados en un plano horizontal, separado por espacios iguales, la fórmula anterior se puede escribir:

$$T_4 = 0,366 \rho_T \left[\log_{10} (2u) + \log_{10} \left(\frac{4L^2 + S_1^2}{S_1^2} \right) \right]$$

donde:

$$u = \frac{L}{r_e}$$

L = Distancia entre la superficie de la tierra y el eje del cable, cm.

r_e = Radio exterior de un cable, cm.

S₁ = Separación de los ejes de dos cables adyacentes, cm.

El valor T₄ es para el cable central del grupo y se usa directamente en las ecuaciones en 3 tal como aparece.

9.4 Cables enterrados colocados en trébol (tocándose)

Para cables con cargas iguales colocados en trébol.

$$T_4 = 0,366 \rho_T \left[\log_{10} (2u) + \log_{10} u \right]$$

donde:

$$u = \frac{L}{r_e}$$

Aquí L se mide desde el centro de la configuración en trébol y r_e es el radio de un cable. T₄ es la resistencia térmica exterior de cualquier cable en el grupo y la configuración puede tener el saliente en el fondo o en la parte superior del grupo.

9.5 Tuberías enterradas. La resistencia térmica exterior de los tubos enterrados utilizados para cables del tipo de tubería es calculada como para cables ordinarios, usando la fórmula del artículo 9.2. En este caso, la profundidad de colocación L es medida al centro del tubo y r_e es el radio exterior del tubo, incluyendo la cubierta anticorrosiva.

9.6 Cables en canales enterrados

a) Canales enterrados rellenos con arena.

Las características térmicas de la arena y de los canales son generalmente similares a los del suelo y el cálculo es hecho como si los cables estuvieran enterrados directamente.

b) Canales rellenos de arena, con tapa protectora al nivel de la superficie de la tierra.

En estudio.

c) Canales de cualquier tipo, no rellenos, con la tapa al nivel de la superficie de la tierra y expuesta al aire libre.

Se usa una fórmula empírica la cual da el aumento de la temperatura del aire por encima de la temperatura ambiente:

$$\Delta \theta_{tr} = \frac{W_{TOT}}{3 p}$$

donde:

W_{TOT} = Es la potencia total disipada en el canal, por metro de longitud, W/m

p = Aquella parte del perímetro del canal, el cual es efectivo para la disipación del calor, en m.

Nota: La validez de ésta fórmula está actualmente en estudio.

No se debe incluir en el vapor de p las partes del perímetro expuestas a los rays del sol. La corriente admisible en un cable particular en el canal es tam - bién calculada como para un cable al aire libre, (véase artículo 9.1), pero la temperatura ambiente debe ser aumentada en $\Delta \theta_{tr}$.

9.7 Cables en ductos o tuberías. La resistencia térmica exterior de un cable en ducto incluye;

1) La resistencia térmica del espacio de aire entre la superficie del cable y la superficie interior del ducto, T_4' .

2) La resistencia térmica propia del ducto T_4'' . La resistencia térmica de una tubería metálica es despreciable.

3) La resistencia térmica exterior del ducto T_4''' .

El valor para T_4 que debe figurar en la ecuación que da la capacidad de corriente en el artículo 2, será la suma de las tres partes mencionadas, por ejemplo:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

9.8 Resistencia térmica entre el cable y el ducto $T_{4'}$. Para cables de diámetro comprendido entre 2,5 cm y 10 cm instalados en ductos se utilizará la fórmula indicada más abajo. Esta se usará también para la resistencia térmica del espacio entre las fases y la superficie de la tubería de un cable de tipo de tubería (véase 8.4 b) cuando el diámetro equivalente de las tres fases en el tubo está comprendido entre 7,5 y 12,5 cm. El diámetro equivalente es definido a continuación:

$$T_{4'} = \frac{100 A}{1 + (B+C \Theta_m) D_e}$$

donde:

$A =$ }
 $B =$ } Son constantes dependientes de la instalación, y cuyos valores están da
 $C =$ } dos en la Tabla V

$D_e =$ Diámetro externo del cable, en cm

Cuando la fórmula es usada para cables en tubería (véase 8.4 b), D_e llega a ser el diámetro equivalente de un grupo de fases como se señala a continuación.

dos fases: $D_e = 1,65$ x diámetro exterior de una fase en cm
 tres fases: $D_e = 2,15$ x diámetro exterior de una fase en cm
 cuatro fases: $D_e = 2,50$ x diámetro exterior de una fase en cm

$\Theta_m =$ Temperatura media del medio que llena el espacio entre el cable y el ducto. Inicialmente tiene que suponerse un valor, y repetir luego el cálculo con un valor modificado si es necesario.

TABLA V

VALORES DE LAS CONSTANTES A, B y C

Condiciones de instalación	A	B	C
Tubería metálica	5,2	1,4	0,011
Ducto de fibra en aire	5,2	0,83	0,006
Ducto de fibra en concreto	5,2	0,91	0,010
Ducto de asbesto cemento en aire	5,2	1,2	0,006
Ducto de asbesto cemento en concreto	5,2	1,1	0,011
Cables de gas a presión en tubería	0,95	0,46	0,0021
Cables de aceite a presión en tubería	0,26	0,0	0,0026
Ductos plásticos	en consideración		
Ductos de arcilla cocida	1,87	0,28	0,0036

9.9 Resistencia térmica propia del ducto T_4'' . La resistencia térmica (T_4'') a través de la paredes de un ducto será calculada a partir de :

$$T_4'' = 0,366 \varrho_T \log_{10} \frac{D_o}{D_d}$$

donde:

D_o = Diámetro exterior del ducto en cm

D_d = Diámetro interior del ducto en cm

ϱ_T = Resistividad térmica del material del ducto, en $\frac{\text{grado Cxcm}}{W}$

El valor de ϱ_T puede ser tomado como 0 para ductos metálicos

9.10 Resistencia térmica exterior del ducto (o tubería), T_4''' . Esta será determinada para ductos de una sola vía, no empotrados en concreto, en la misma forma que para los cables, usando la fórmula apropiada de los artículos 9.1, 9.2, 9.3 o 9.4 y

el radio exterior del ducto o tubería incluyendo cualquier cubierta protectora por encima de él, reemplazando el radio exterior del cable. Cuando los ductos están empotrados en concreto, el cálculo de la resistencia térmica exterior al ducto, se hace suponiendo un medio uniforme fuera del ducto con una resistividad térmica igual a la del concreto. Una corrección es entonces añadida algebraicamente, para tomar en cuenta la diferencia, si hay, entre la resistividad térmica del concreto y la del suelo, para aquella parte del circuito térmico exterior al banco de ductos.

La corrección para la resistencia térmica está dada por:

$$N 0,366 (\rho_e - \rho_c) \log_{10} (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

donde:

N = Número de cables cargados en el banco de ductos

ρ_e = Resistividad térmica de la tierra alrededor del banco en $\frac{\text{grado Cxcm}}{W}$

ρ_c = Resistividad térmica del concreto $\frac{\text{grado Cxcm}}{W}$

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

L_G = distancia de la superficie de la tierra al centro del banco de ductos
cm

r_b = Radio equivalente del banco de concreto, en cm, dado por:

$$\log_{10} r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \log_{10} \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \log_{10} \frac{x}{2}$$

Las cantidades x e y son respectivamente la dimensiones más anchas y más largas de la sección del banco de ductos, independientes de su posición.

ANEXO

Valores de referencia para las temperaturas de ambiente, resistividad térmica de los suelos y temperatura máxima admisible en un conductor en varios países.

En estudio

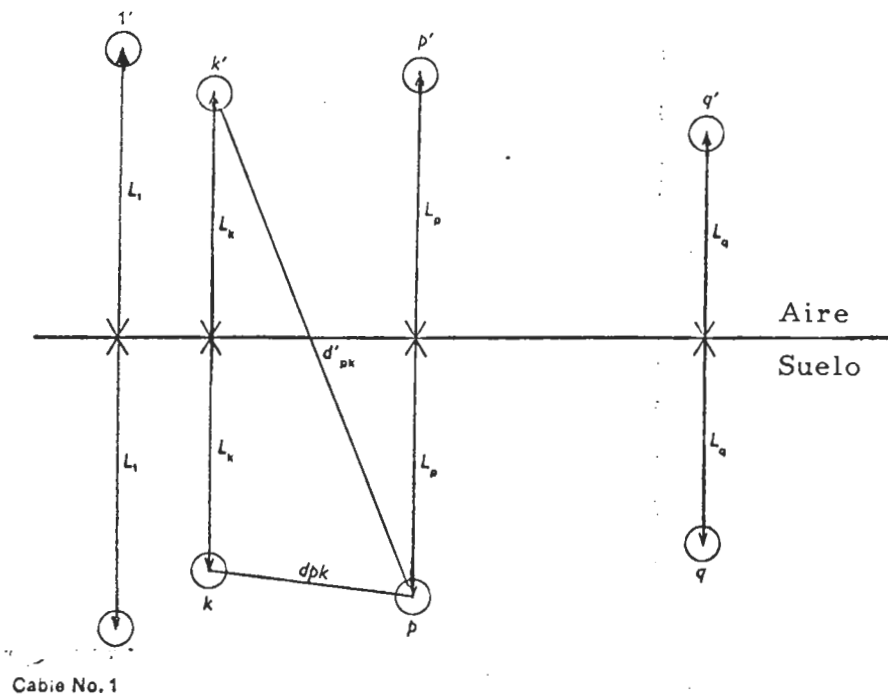


Fig. 1 - Diagrama mostrando un grupo de q cables y su reflexión con respecto a la superficie aire-tierra.

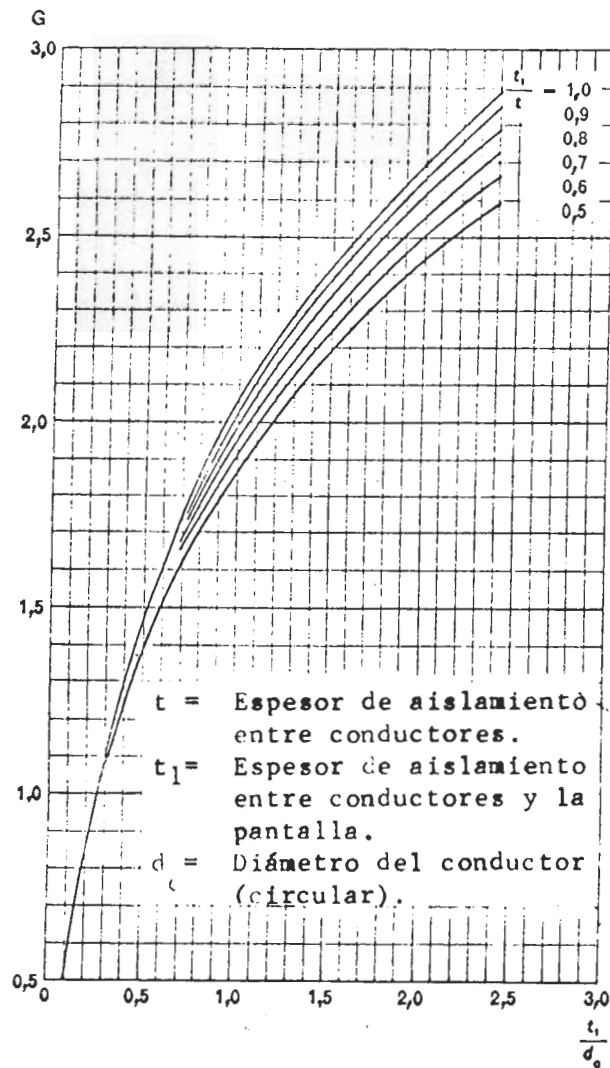


Fig. 2.- Factor geométrico G para cables tripolares con cinturón de conductores de sección circular. (Véase 8.1.2 y 8.1.3).

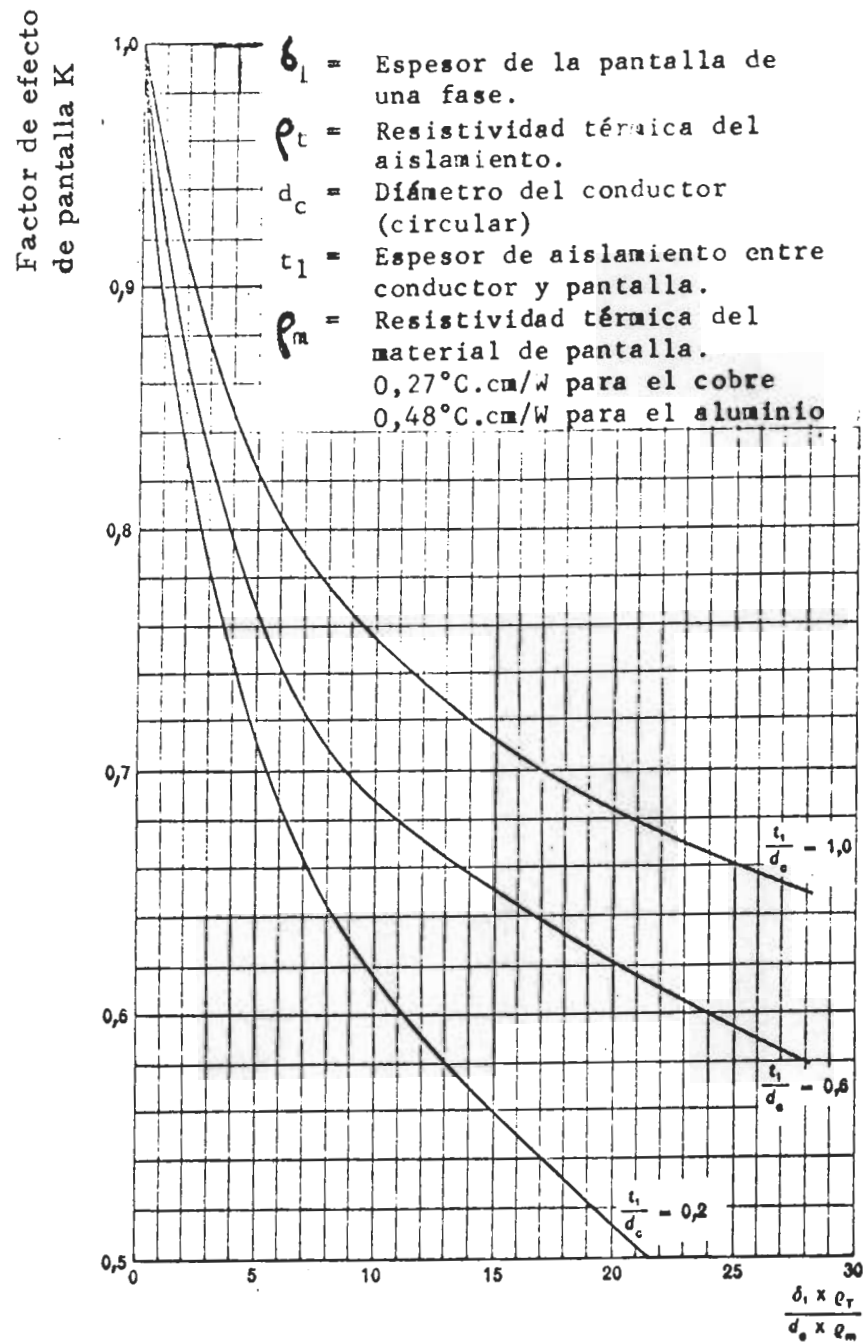


Fig. 3. - Resistencia térmica de cables tripolares con pantalla, de conductores circulares, comparada a aquella de cables sin pantalla correspondientes. (Véase 8.1.3).

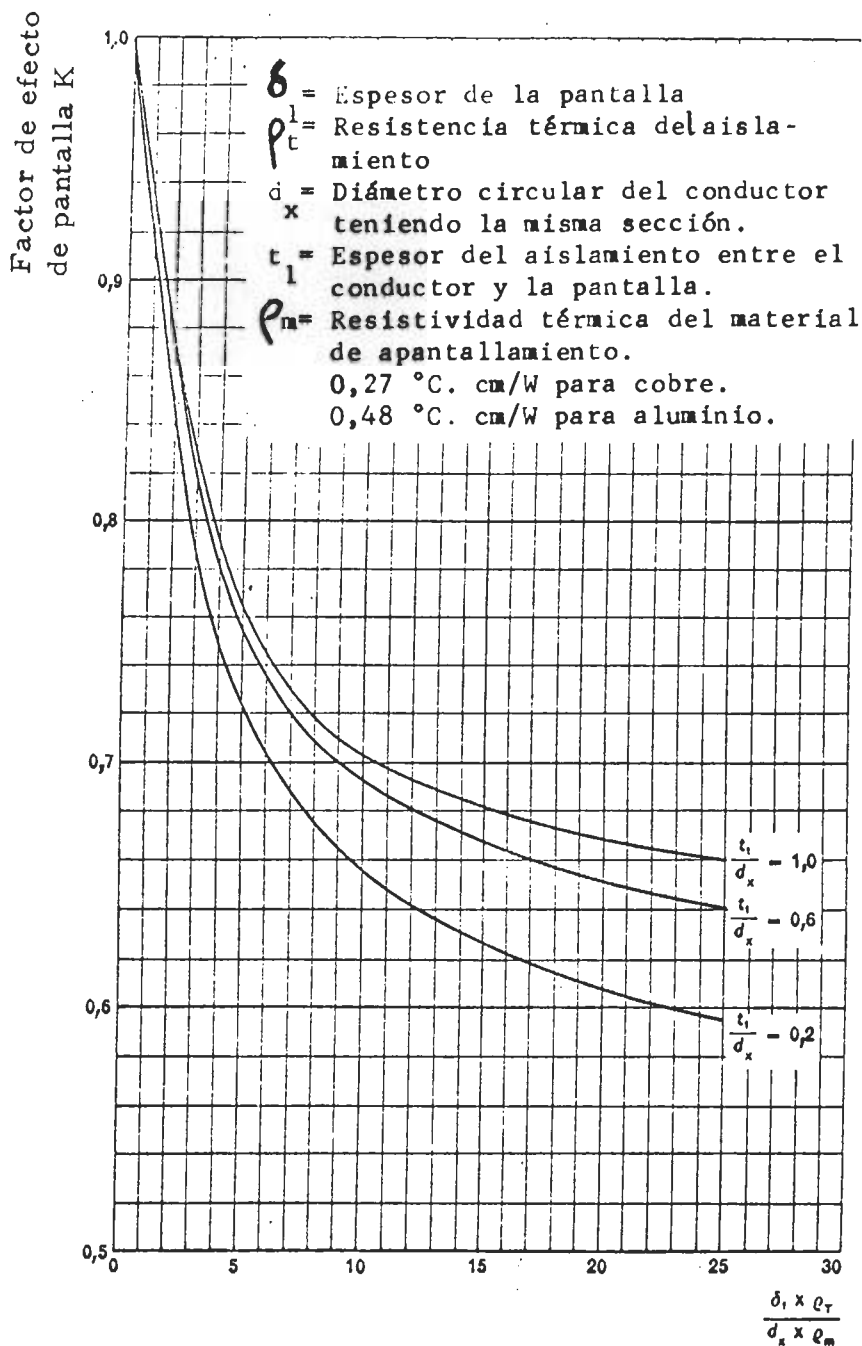


Fig. 4. - Resistividad térmica de cables tripolares con pantalla y conductores sectoriales, comparada con aquella de los cables sin pantalla correspondientes. (Véase 8.1.3).

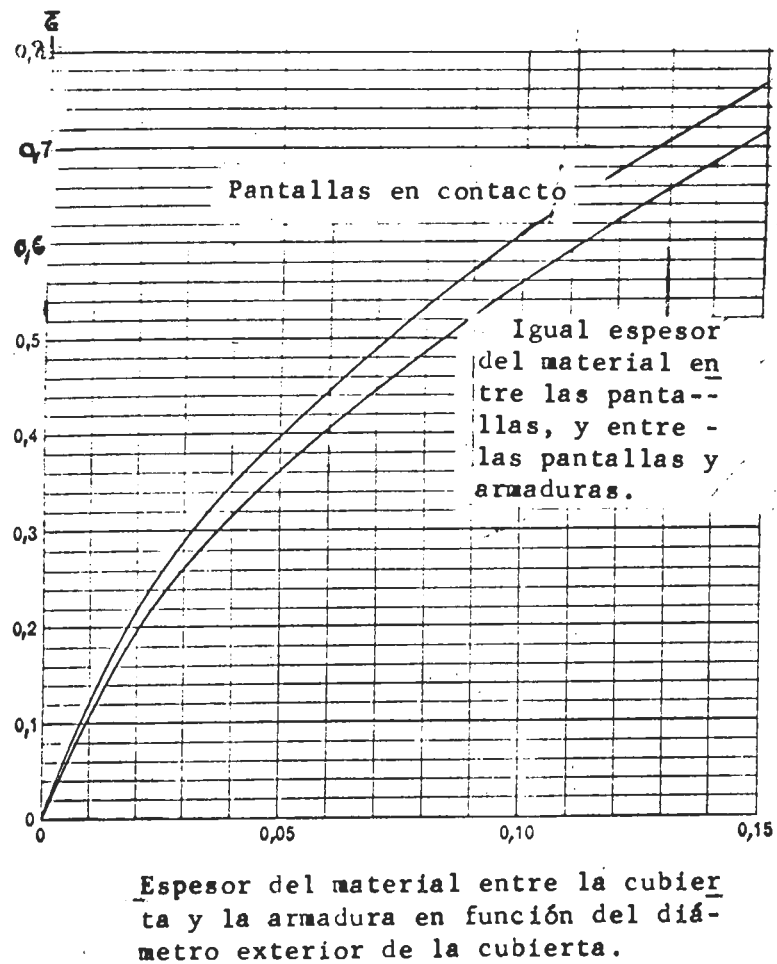


Fig. 5. - Curvas del factor geométrico G para obtener la resistencia térmica por fase del material de relleno entre la cubierta y la armadura de los cables armados de conductores bajo plomo o con envoltura individual de aluminio. (Véase 8.2).

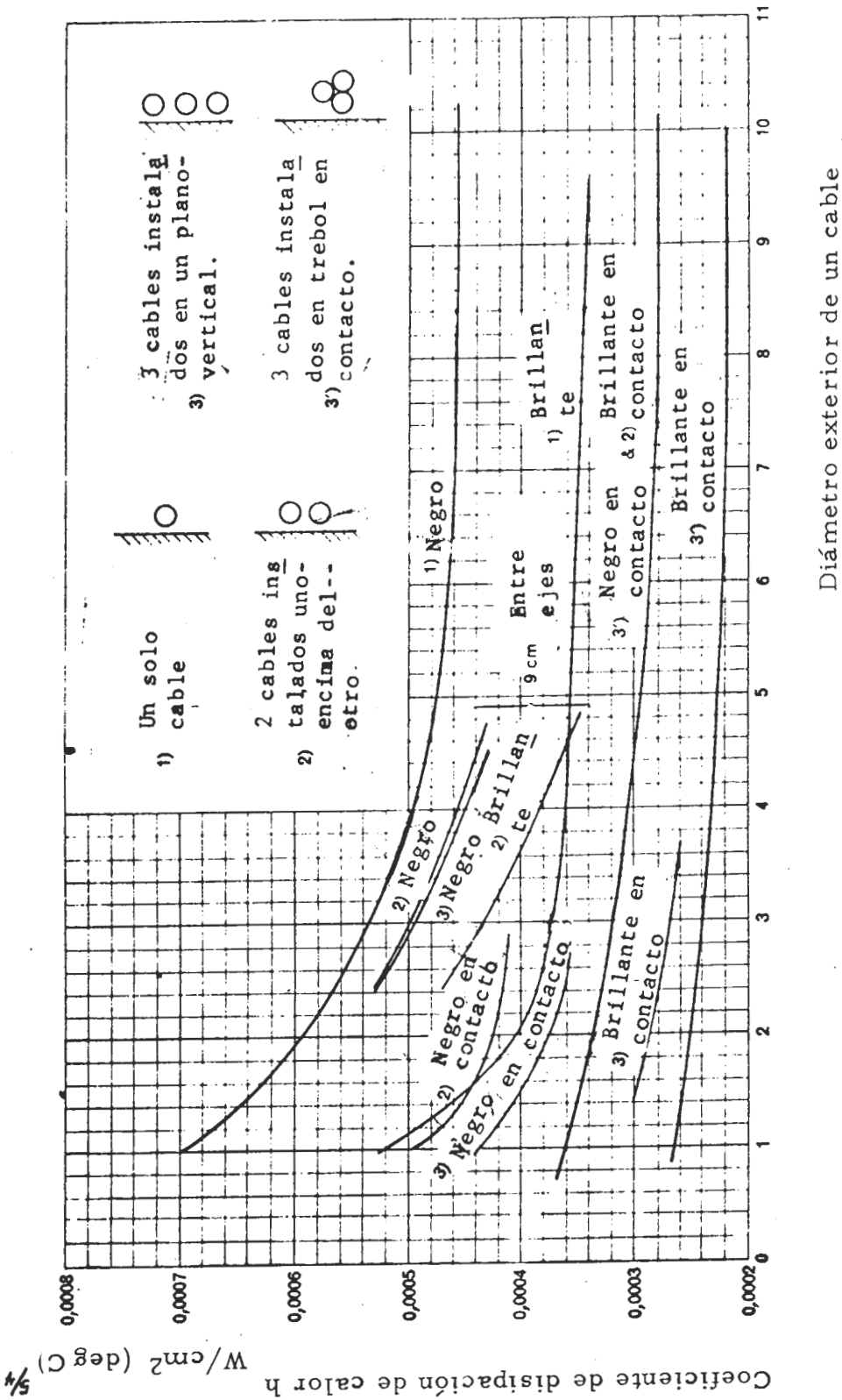


Fig. 6. - Coeficiente de disipación de calor para cables en el aire.
(Véase 9.1).

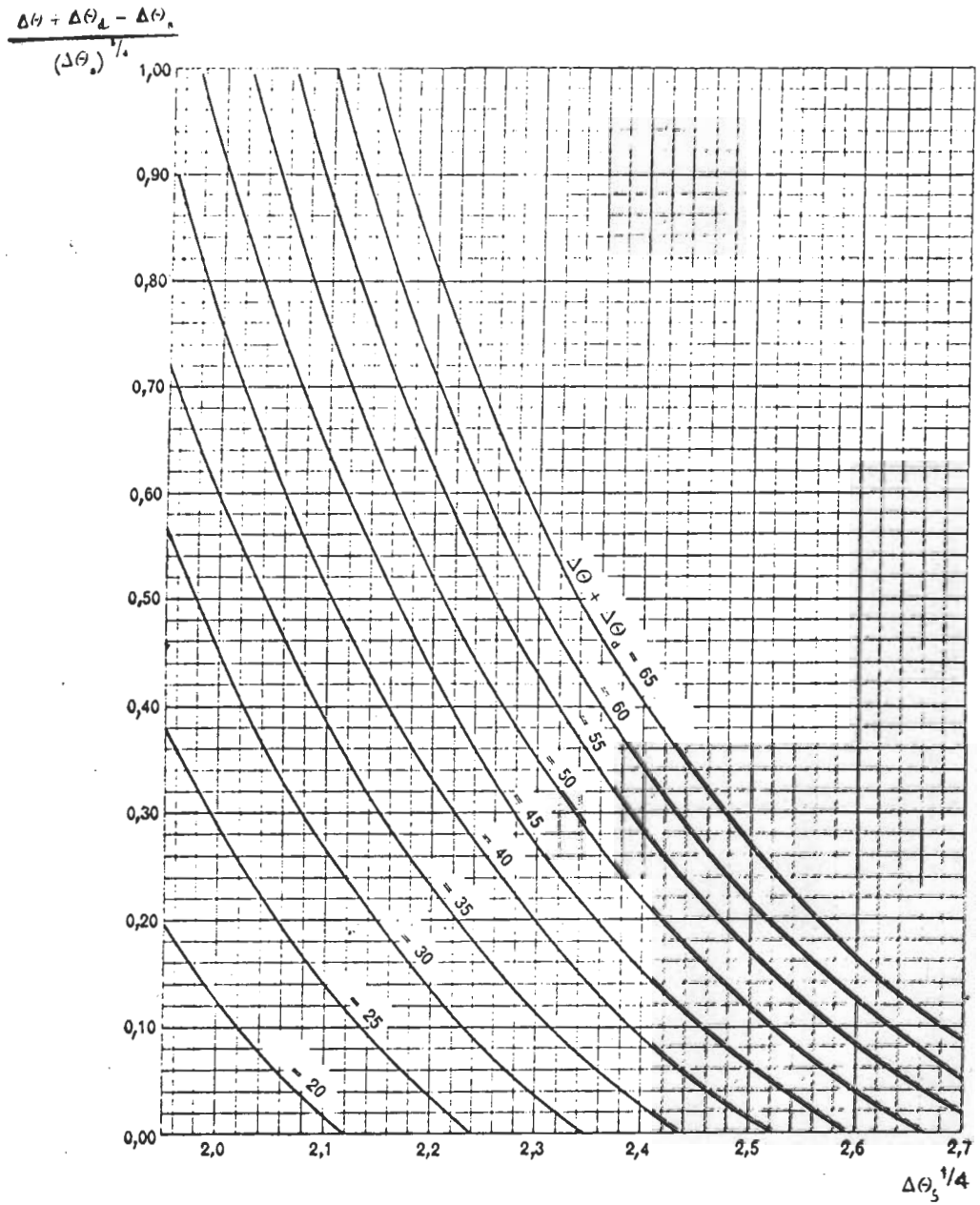


Fig. 7. - Gráfico para el cálculo de la resistencia térmica externa T_4 de cables en el aire.

(Véase 9.1).

COVENIN
457:1973

CATEGORÍA
E

CODELECTRA

Av. Sucre Los Dos Caminos, Centro Parque
Boyacá, Torre Centro, Piso 5, Oficina 51.
Teléfonos: 285-28-67 / 77-74 Fax: 285-47-87
E-mail: codelectra@codelectra.org

ICS: 621.315.2:3.017.2

ISBN:

RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS

Phoibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio.

Descriptores: