

REQUERIMIENTOS TECNICOS  
MINIMOS PARA CABLES  
SUBTERRANEOS A  
6.3 Y 13.2 KV

Tesis previa a la obtención del Título de  
Ingeniero Eléctrico  
de la Escuela Politécnica Nacional

PAUL AYORA GONZALEZ

Quito, Abril de 1973

A  
LA MINORIA,  
SIEMPRE

Juan Ramón Jiménez

Certifico que el presente trabajo de  
Tesis ha sido realizado en su totali  
dad por el señor PAUL AYORA GONZALEZ

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Remigio Maldonado", is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large initial "R".

Ing. REMIGIO MALDONADO P.

Director de Tesis

## A G R A D E C I M I E N T O

Al Ingeniero Honorato Placencia, quien se dignó dirigir la primera parte de esta Tesis. Al Ingeniero Remigio Maldonado, dilecto amigo, de una manera especial por su gentileza y asesoramiento en la elaboración del presente trabajo; y a todos y cada uno de quienes, en una u otra forma, colaboraron y alentaron para su culminación. A to dos ellos: GRACIAS .

P. A. G.

Quito, Abril de 1973

# I N D I C E

## CAPITULO 1.- ALCANCE DEL ESTUDIO

Su importancia . . . . .	1
Alcance general . . . . .	2

## CAPITULO 2.- MATERIALES UTILIZADOS EN LOS CABLES

2.1 Materiales conductores . . . . .	3
2.2 Materiales aislantes . . . . .	4
2.2.1 Caucho natural . . . . .	7
2.2.2 Elastómeros . . . . .	11

## CAPITULO 3.- CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS CABLES

3.1 Definiciones . . . . .	23
3.2 Tipos de cables según su estructura . . . . .	25
3.3 Denominación de los cables según su aislamiento . . . . .	27
3.4 Cables según su protección mecánica externa . . . . .	28
3.5 Otros tipos de cables . . . . .	28
3.6 Características de los conductores . . . . .	29
3.7 Variación de la resistencia con la temperatura . . . . .	31
3.8 Variación de la resistencia por efecto de la corriente alterna . . . . .	34
3.9 Variación de la inductancia por efecto de la corriente alterna . . . . .	38
3.10 El efecto de proximidad . . . . .	39
3.11 Corrientes de Foucault e histéresis . . . . .	41
3.12 Capacidad de conducción de corriente de los cables . . . . .	54
3.13 Pérdidas dieléctricas . . . . .	60
3.14 Capacitancia . . . . .	61
3.15 Cálculo de las resistencias térmicas . . . . .	63

CAPITULO 4.-		CONDICIONES DE TRABAJO DE LOS CABLES	
4.1	Capacidad de conducción de corriente limitada por la temperatura . . . . .		78
4.2	Resistividad termica del suelo . . . . .		81
4.3	Cortocircuitos . . . . .		88
4.4	Cálculo de la caída de tensión . . . . .		102
CAPITULO 5.-		INSTALACION DE CABLES DE POTENCIA	
5.1	Generalidades . . . . .		106
5.2	Cables enterrados directamente . . . . .		106
5.3	Cables en conductos . . . . .		109
5.4	Cables al aire libre . . . . .		111
5.5	Cables en túneles . . . . .		112
5.6	Empalmes y puesta a tierra . . . . .		113
5.7	Transposición de la envoltura . . . . .		118
CAPITULO 6.-		ANALISIS DE FALLAS EN LOS CABLES	
6.1	Causas . . . . .		123
6.2	Tipos generales de fallas . . . . .		123
6.3	Identificación y localización de fallas . . . . .		125
CAPITULO 7.-		PRUEBAS DE LOS CABLES	
7.1	Generalidades . . . . .		136
7.2	Requerimientos de las pruebas . . . . .		136
7.3	Pruebas de rutina . . . . .		137
7.4	Pruebas sobre muestras . . . . .		138
7.5	Pruebas tipos . . . . .		139
7.6	Pruebas de recepción . . . . .		140
CAPITULO 8.-		CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
8.1	Importancia del tema . . . . .		142
8.2	Normas para instalación y mantenimiento . . . . .		143
8.3	Recomendaciones a los interesados . . . . .		144

APENDICE I.	DEDUCCION DE LA CORRIENTE DE REGIMEN PERMANENTE DE UN CABLE . . . . .	145
APENDICE II.	CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO . . . . .	147
APENDICE III.	VOCABULARIO Y ABREVIATURAS . . . . .	154
BIBLIOGRAFIA	. . . . .	155

"REQUERIMIENTOS TECNICOS MINIMOS PARA CABLES  
SUBTERRANEOS A 6.3 KV Y 13.2 KV"

1.- ALCANCE DEL ESTUDIO

Su importancia. Desde el comienzo de la utilización de cables subterráneos, alrededor de los años 1870 - 1880, hasta la actualidad, ha existido un gran desarrollo en todos los aspectos técnicos, sobre lo que ha incidido las exigencias de los centros urbanos y fabriles.

En nuestro país, ciudades como Quito, Guayaquil y Cuenca, desde hace algunas décadas han incorporado a sus sistemas de distribución eléctrica el uso de cables para alta tensión, bien sea en conductos o directamente enterrados.

Con la instalación de nuevas centrales, el uso de cables tendrá que incrementarse y por otra parte la actual expansión de las principales ciudades del Ecuador, junto con la aparición de diversas industrias, hace necesario que en un tiempo no lejano, el empleo de redes de distribución subterránea sea corriente, como ha ocurrido en otros países. La utilización de cables subterráneos, a la vez que origina problemas técnicos - que se los analizará detenidamente más adelante - tiene indudables ventajas sobre las líneas aéreas como es la ausencia de cortocircuitos de tipo transitorio debidos a la exposición de conductores al ambiente, la limitación de accesorios en su instalación, la seguridad para el público, etc. Por otra parte, se puede obligar su instalación en determinadas áreas.

Por estos motivos, el presente trabajo trata de enfocar el aspecto técnico de la utilización de cables para tensiones de 6.3 KV y 13.2 KV por ser los que actualmente predominan en nuestro medio. Además, hoy día con el avance de la industria química y en especial en el campo de los plásticos, que permiten el uso de voltajes muy altos, con gran resistencia a la corrosión y una vida media relati



vamente alta, hace pensar que su empleo se incrementará en el país.

Alcance General. Como se ha mencionado, el tema a tratarse abarcará el campo de la distribución eléctrica en centros urbanos y fábricas, etc., sin llegar al estudio de instalaciones especiales, - como cables especiales para instalación vertical en minas, o que transporten corriente continua. Para esto se hace un estudio preliminar de los principales materiales usados en la confección de cables, sobre todo de los aislantes.

En los aspectos técnicos tratados en este estudio, se detalla la - constitución de los cables, sus tipos, el comportamiento de los mismos, los fenómenos eléctricos a los que se ven sometidos, las condiciones - de utilización y trabajo, pruebas de confiabilidad, sus normas, etc.

Actualmente el país no posee una normalización sobre las características que deben cumplir los cables o sus instalaciones y tampoco se los fabrica en nuestro medio, para los voltajes que trata este estudio. Por esta razón, el enfoque dado es el de presentar los diferentes parámetros que influyen en la selección y utilización de cables elaborados - bajo cualquier norma.

Una vez familiarizados con los diferentes elementos que pueden considerarse en un cable, se dan métodos simplificados de cálculo para determinados parámetros, sobre todo de la corriente de régimen permanente, que en último término es el factor principal que gobierna el empleo de un cable.

El estudio se desarrolla tratando primero los elementos constitutivos de los cables, luego su comportamiento bajo condiciones normales - de operación, según los diferentes métodos de instalación y los efectos de fallas sobre los cables. Además se presentan aspectos que deben considerarse en la instalación y por último, criterios sobre identificación y localización de fallas.

## 2.- MATERIALES UTILIZADOS EN LOS CABLES

2.1 Materiales Conductores. El más utilizado es el cobre, debido a su conductividad eléctrica, térmica y facilidad de fabricación y plasticidad, en sus diferentes presentaciones.<sup>i)</sup>  
(L1)

Dentro de rango de voltajes considerados (6.3 y 13.2 KV) existe actualmente la tendencia a utilizar aluminio, debido sobre todo a la fluctuación de precios del cobre, aun a pesar de que se deba emplear un mayor volumen de aislamiento a causa del incremento en la sección transversal del conductor, por la menor conductividad del aluminio para igual capacidad de conducción que el cobre.

El aluminio es del tipo denominado "Maleable para fines eléctricos" en sus diferentes presentaciones,<sup>ii)</sup> cuyas propiedades son similares a las del usado en líneas aéreas, excepción hecha de sus dimensiones y templado, lo que inherentemente incide en sus propiedades mecánicas.  
(L1)

Otro material usado ocasionalmente como conductor es el plomo de la envoltura de cables, pero únicamente como vía de circulación de corrientes muy pequeñas, como es en el caso de pruebas cuando se presentan fallas. Actualmente este material está siendo sustituido por aluminio de menor capacidad de conducción que el maleable para fines eléctricos, pero mayor que la del plomo, siendo ésta una de las causas para esta sustitución y otra, el menor peso del aluminio, con lo cual se facilita el transporte y manejo de los cables.

i) Se refiere a los tipos especificados en las normas COPANT:

4. 2 - 004: recocido (tipo B), semiduro (tipo SD), duro (tipo D)

ii) Según normas COPANT: 4. 2 - 004: duro (tipo H 19), recocido (tipo O), de dureza media (tipos H 140 ó H 24), semiduro de  $\frac{3}{4}$  de dureza (tipo H 16 ó H 26)

(L2)

2.2 Materiales Aislantes. En cables antiguos se ha utilizado como aislantes al caucho, fibras textiles compuestas y papel, el cual se continúa empleando actualmente en combinación con impregnantes y masas de relleno, con la tendencia al uso y ensayo de los nuevos tipos de aislantes plásticos-polimerizados, como el polietileno, el policlorovinil, etc., sobre los cuales se han concentrado los esfuerzos para mejorarlos, desechando prácticamente los caminos para hallar nuevos materiales de constitución diferente. (L3)

A excepción del papel y fibras textiles, los demás aislantes son polímeros, es decir sustancias compuestas de macromoléculas, las cuales a su vez están constituidas por moléculas más pequeñas (monómeros) o por repetición de moléculas unitarias.

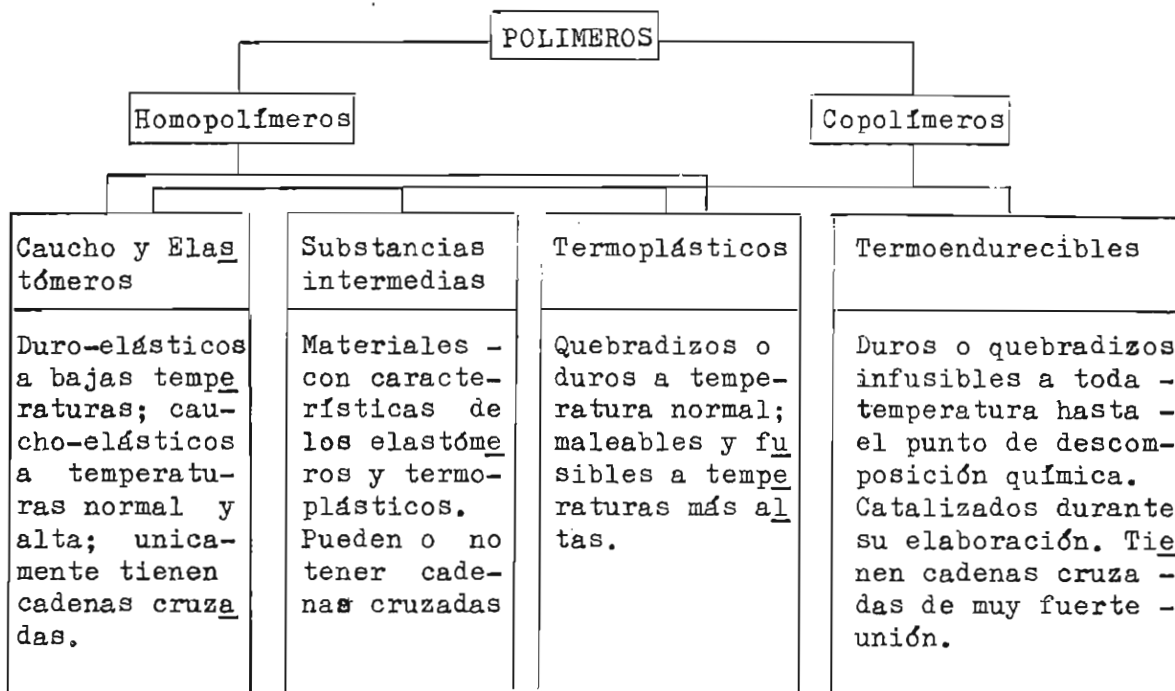
Los polímeros se dividen en Homopolímeros y Copolímeros. Los Homopolímeros se hallan constituidos por la unión de monómeros idénticos. Los Copolímeros, en cambio, están conformados por la unión de dos o más monómeros diferentes que reaccionan similarmente durante la formación del polímero o Polimerización.

El cuadro 1. presenta la división de los polímeros y su propiedades más sobresalientes.

Cadenas de los Polímeros. Al realizar la polimerización de un material (o vulcanización en el caso del caucho), los monómeros se unen para formar la macromolécula del polímero; ésta a su vez se une con otras similares, formando una cadena. La cadena así constituida puede ser de dos tipos: Lineal, en cuyo caso no posee ramas laterales, y cadena Cruzada con la presencia de estas ramas laterales, que en conjunto conforman una verdadera red molecular.

El cuadro 2. presenta los materiales usados en cables, de acuerdo a su ubicación dentro de las diferentes clases de polímeros.

CUADRO 1.



CUADRO 2.

POLIMEROS USADOS EN CABLES

	Termoplásticos	Substancias intermedias	Caucho y Elastómeros
Homopolímeros	P.E.: Polietileno	-	Caucho natural P.E.X.: Polietileno de cadenas cruzadas
	P.V.C.: Policlorovinil	-	P.C.P.: Policloropreno P.E.C.S.: Polietileno cloro sulfonado
Copolímeros	Poliamida	A.V.E.: Acetato-vinil-etileno Poliuretano	Caucho-silicón Caucho-propileno-etileno Caucho butílico Caucho-butadieno-estireno Caucho-butadieno-nitrílico

(L7)

Propiedades Físicas de los Aislantes. En forma general, para todos los materiales aislantes se exige que el cable soporte las eventualidades normales, producidas durante su instalación y que las mismas no afecten su normal servicio.

La evaluación del aislante se basa en las siguientes pruebas que deberán hacerse antes y después de la correspondiente a "envejecimiento acelerado" ; Resistencia a la tracción, Elongación o alargamiento, Punto de ruptura, Módulo de elasticidad.

Resistencia a la tracción: se la realiza tomando una muestra de cable o 'probeta', a la cual se le quita el conductor y recubrimientos, quedando por lo tanto el aislante unicamente, en forma de tubo. Se procede a realizar marcas de referencia, espaciadas entre 2.5 y 5.0 cm., se la coloca entre las mordazas de la máquina para pruebas de tracción y se la estira aplicando carga en tal forma que la relación: separación de mordazas sobre tiempo, sea la especificada por las normas, hasta que la probeta se rompa. La relación: carga de ruptura a la sección transversal original, dan la resistencia a la tracción.

Elongación: Se la obtiene midiendo la longitud final de la muestra (o de las marcas). La diferencia entre esta longitud y la inicial, expresada como un porcentaje de esta última, constituye el valor de la elongación.

Módulo de Elasticidad: Se determina mediante la relación entre la carga y el alargamiento por ella producido antes de alcanzar el punto de ruptura.

Prueba de Envejecimiento Acelerado: Un factor primordial en la selección de un cable o accesorio es su vida útil estimada. Resulta obvio que esperar por una prueba efectiva, en condiciones reales , demandaría un tiempo demasiado largo y por lo tanto impráctico, en tal forma que el ingeniero debe remitirse a las pruebas de laboratorio, para tener un criterio de selección adecuado, basándose en valores experimentales o en datos de fábrica.

La utilidad de esta prueba depende de tres factores esenciales, el primero es que este experimento simule lo más cerca posible el envejecimiento real del cable, el otro es conocer el proceso de envejecimiento real del material y por último los agentes que lo ataquen. Sabiendo es tos puntos, puede formarse ya un criterio práctico al estimar la vida útil para determinadas características de instalación.

La mayoría de las pruebas de envejecimiento acelerado se basa en el calentamiento de muestras del dieléctrico, similares a las usadas en las pruebas mecánicas, colocadas en un horno oscuro (método Geer) a temperatura elevada, con circulación forzada de aire. La temperatura que se adopta es tal que produzca un deterioro rápido de las muestras pero que a su vez no origine efectos secundarios.

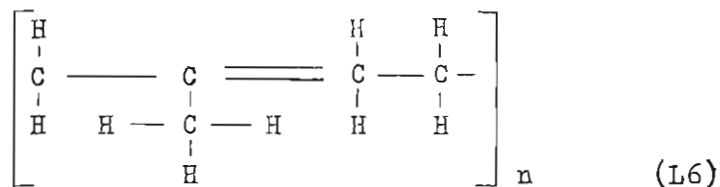
Otro método (Bierer-Davies) es el de la bomba de oxígeno. En esta prueba el efecto normal de oxidación es acelerado al colocar la muestra en una atmósfera de oxígeno puro y a presión; en esta prueba la temperatura es también elevada, pero menor que en el primer método.

Los valores para estas temperaturas, presiones y tiempo de prueba, dependen de la norma del país en que se fabrique el material, pero su orden es:  $100 \pm 30$  °C,  $200 \text{ New/cm}^2$  y  $100 \pm 30$  horas. (L4-L5)

Luego de esta prueba se realizan medidas físicas para calcular el coeficiente de depreciación, luego deberá correlacionarse con el valor de casos reales, para llegar a resultados concretos.

### 2.2.1 Caucho Natural.

El caucho natural puro posee altas cualidades como aislante, pero es muy higroscópico y tiene marcada tendencia a la oxidación. Está constituido por numerosas uniones de macromoléculas, cada una de las cuales a su vez está compuesta por aproximadamente 20.000 unidades repetidas del siguiente residuo de isopreno:



Antes de su preparación el caucho tiene forma de láminas o masas viscosas, las cuales son procesadas por molienda en caliente (cerca de 500 °C). Durante este tratamiento la macromolécula sufre pequeñas degradaciones al ser extendida, pero se incrementa su plasticidad. En su forma natural posee la tendencia a ser pegajoso cuando caliente y rígido cuando frío, estos defectos los corrige por vulcanización, que es realizada justamente cuando ha alcanzado la plasticidad mencionada. En este instante se mezclan los aditivos que pueden ser: azufre, antioxidantes, suavizadores, rellenos o catalizadores. Las propiedades del caucho natural se hallan descritas en la tabla 1, pág. 10.

La vulcanización del caucho natural involucra la formación de una red molecular por medio de cadenas cruzadas, la extensión de las cuales es función de la cantidad de azufre añadido, variando entre el 4 y 45 % según se desee caucho suave o duro. Las principales ventajas de la vulcanización son: se vuelve no higroscópico y se reduce la tendencia a la cristalización.

Frecuentemente se aplican aditivos al caucho vulcanizado con el objeto de que posea ciertas cualidades mecánicas; entre los aditivos se hallan suavizadores, que si bien mejoran la resiliencia, por otra parte disminuyen la resistencia a la tracción. Este hecho, por el cual se mejora una propiedad con sacrificio de otras es frecuente, en tal forma que el escoger el suavizador más apropiado se hace difícil; sin embargo como condición muy deseable, es que habiéndose logrado los efectos requeridos, estos aditivos sean no volátiles a las condiciones de operación del caucho. Otro tipo de aditivos influyen en sus propiedades eléctricas y mecánicas, y se los detalla a continuación:

Estabilizadores: el caucho vulcanizado es susceptible de degradación eléctrica y mecánica como resultado de su oxidación. Para preservarlo contra esta deficiencia se usan antioxidantes, entre los cuales los más comunes son las aminas aromáticas.

"Carbon Black"<sup>1)</sup>: es el agente que mejor refuerza al caucho, dando sus óptimos resultados al usárselo en una proporción del 15 al 25 % (en volumen). Sus efectos son:

- 1) Resistencia a la tracción: se ve incrementada y en proporción a la finura del aditivo;
- 2) Módulo de elasticidad: es incrementada en proporción a la cantidad de 'carbon black';
- 3) Elongación: decrece hasta la ruptura;
- 4) Resistencia a la abrasión: se incrementa;
- 5) Propiedades eléctricas: crece la conductividad eléctrica por la excesiva adición de 'carbon black' y es mayor, conforme más fino es el aditivo, sin embargo hasta un 10 % y siendo muy seco el 'carbon black' no se presenta una degradación en la rigidez dieléctrica y factor de pérdidas, con solo ligeros efectos en la constante dieléctrica. (L6)

De todas maneras las propiedades eléctricas dependen fundamentalmente del tipo de 'carbon black' utilizado, así como de su proporción.

El ozono ataca muy fuertemente al caucho natural, dando origen a la formación de grietas. Esta degradación puede atenuarse con la presencia de materiales bituminosos, parafina o un sucedáneo. La parafina ejerce su protección formando una capa sobre el caucho, pero cuando pierde su continuidad, nuevamente el caucho queda expuesto al ataque del ozono.

Todos estos inconvenientes han contribuido para el desarrollo y aplicación de sustitutos del caucho natural, como son los "cauchos sintéticos", los cuales gracias a la técnica actual prácticamente están desplazando al caucho natural.

- - - - -
- i) "carbon Black": no tiene traducción al español. Es un producto a base del carbono, existente en el negro de humo o en el petróleo.



TABLA 1.

PROPIEDADES GENERALES DEL CAUCHO NATURAL, SINTETICO Y ELASTOMEROS

Propiedades	Caucho Natural	Cloropreno	Polietileno Clorosulfonado
Gravedad específica relativa . . . . .	0.93 - 1.6	1.09 - 1.6	-
Absorción de agua, [%] . . . . .	1 - 2	3 - 4	-
Conductividad Calórica, [cal/s/cm <sup>2</sup> /°C/cm] . . . . .	3.5 x 10 <sup>-4</sup>	4.6 x 10 <sup>-4</sup>	2.7 x 10 <sup>-4</sup>
Calor Específico, [cal/gr/°C] . . . . .	0.52	0.52	-
Temperatura de Resquebrajamiento, [°C] . . . . .	- 57	- 40	- 30 a - 60
Inflamabilidad . . . . .	Se quema	No se quema	-
Máxima temperatura de servicio, [°C] . . . . .	75	90	150
Flexibilidad a baja temperatura . . . . .	Muy Buena	Buena	Hasta - 15
Resistencia al ozono . . . . .	Pobre	Muy Buena	Excelente
Resistencia a la tracción, [kg/cm <sup>2</sup> ] x 10 <sup>-2</sup> . . . . .	2.11 - 3.16	1.4 - 2.46	1.12 - 2.46
Elongación, [%] . . . . .	450 - 650	340 - 750	100 - 450
Resistencia a la abrasión . . . . .	Muy permeable	Buena	Excelente
Constante dieléctrica relativa, a 10 <sup>6</sup> [Hz] . . . . .	2.7 - 5	7.5 - 14.0	5 - 11
Factor de Potencia . . . . .	0.05 - 0.2	1.0 - 6.0	2.0 - 9.0
Resistencia Volumétrica, [ohm/cm <sup>3</sup> ] . . . . .	10 <sup>15</sup> - 10 <sup>17</sup>	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>12</sup>	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>15</sup>
Resistencia Superficial, [ohm] . . . . .	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>15</sup>	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup> - 10 <sup>15</sup>
Resistencia a los Solventes:			
Aceite mineral . . . . .	Pobre	Buena	Buena
Solventes oxigenados . . . . .	Buena	Pobre	Pobre
Solventes halogenados . . . . .	Pobre	Pobre	Pobre
Permeabilidad ante los gases . . . . .	Muy permeable	Muy Buena	-

Comportamiento del Caucho: En los cables se ve sometido a una temperatura elevada, la mayoría de las veces en combinación con esfuerzos dinámicos o estáticos, además actúan sobre él otros agentes físicos o químicos, como el oxígeno, ozono, aceites, solventes, humedad y otras sustancias agresivas. Tales factores y generalmente una combinación de ellos son los responsables de su envejecimiento. El oxígeno del aire y el ozono producido por altas tensiones son de primordial importancia, pues el caucho natural vulcanizado (C.N.V.) es afectado por la oxidación que causa una despolimerización del mismo, volviendo el material suave y pegajoso y en las últimas etapas de oxidación un material espeso (resinificación del material). Este proceso se debe principalmente al efecto de la temperatura, la cual produce un aglutinamiento de moléculas que causan un atiesamiento del material volviéndolo quebradizo. La postvulcanización que puede ocurrir en presencia de azufre libre, tiene síntomas similares y puede iniciar el proceso de envejecimiento. Cuando comienza a producirse éste, la presencia de otros agentes deteriorantes, como el cobre u otros metales pesados, harán que este proceso sea mucho más rápido; estos metales activan el oxígeno al producir sales disolventes del caucho que dan origen a ácidos resinosos que actúan como catalizadores. En general puede decirse que el caucho soporta mejor el proceso de envejecimiento que los materiales sintéticos, y que su vida útil depende principalmente de su materia prima, de las mezclas, de su proceso de manufactura y del porcentaje de caucho natural empleado.

### 2.2.2 Elastómeros

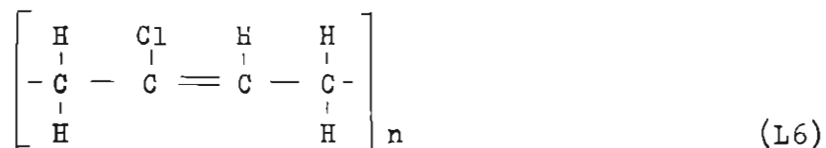
Se los conoce también como cauchos sintéticos, existiendo actualmente la tendencia a denominar Elastómeros únicamente a los materiales vulcanizables. (L5)

Las diferencias con el caucho natural residen en que éste posee una ligazón más fuerte entre sus cadenas intermoleculares, de tal manera que cuando una fuerza deformante cesa su acción, el retorno al estado original es mucho más rápido en el caucho; además al aplicar fuerzas -

tensoras a éste; su deformación está acompañada por una propensión a la cristalización, en los elastómeros esta tendencia es menor y por lo mismo la formación de grietas por resquebrajamiento del material. La temperatura tiene mayor efecto sobre la elasticidad de los elastómeros que sobre el caucho. En general el caucho es un elastómero, pero no todo elastómero posee las características del caucho. Los materiales que se asemejan en esta propiedades al caucho natural toman su denominación con la palabra "Caucho" antepuesta al resto del compuesto para especificar esta característica. Dentro del grupo de elastómeros, se estudian a continuación los aislantes empleados en cables.

### 2.2.2.1 Policloropreno, P.C.P., o Caucho de Cloropreno.

Es un elastómero sintético preparado por la plomerización de una emulsión de cloropreno, con o sin la presencia de un copolímero. El monómero cloropreno es polimerizado en presencia de azufre o un compuesto de éste; otro tipo de catalizadores modifican la polimerización. El producto obtenido por cualquiera de estos procesos es elastomérico por naturaleza y se compone de la siguiente estructura molecular unitaria:



Realmente no se necesita un agente vulcanizante para la producción de un compuesto elastomérico de este tipo, pero la presencia de ingredientes compuestos en productos comerciales parecen actuar como materiales vulcanizantes. Generalmente se usa el óxido de zinc para acelerar el proceso y el de magnesio para mejorar su estabilidad en el tiempo. Estos óxidos, junto con el de plomo, hacen decrecer la absorción de agua. El 'carbon black' se usa como reforzante, a fin de mejorar las propiedades mecánicas y de resiliencia del elastómero. Como en la mayoría de los compuestos de caucho, los cloroprénicos utilizan antioxidantes.

La tabla 2 presenta algunas características de dos tipos de Policloroprenos usados en cables.

TABLA 2.

CARACTERISTICAS DE COMPUESTOS ELASTOMERICOS  
DE POLICLOROPRENO

Usos \ Tipos	Cables y conductores	Revestimiento
- Aplicación en Estrucción	Bueno	Excelente
- Aplicación en Moldeo	Bueno	Excelente
- Tiempo de vulcanización, [min.] (a 152 °C)	10 - 30	10 - 50
- Resistencia a la tracción, agregado 'carbon black', [Kg/cm <sup>2</sup> ]	< 3.29	< 3.29
- Temperatura de resquebrajamiento cuando vulcanizado, [°C]	- 40	- 42

(L6)

Comportamiento del Policloropreno: En el rango de voltajes estudiados, no es usual utilizarlo como aislante debido a sus pobres propiedades dieléctricas, siendo en cambio un excelente revestimiento para todos los tipos de cables, sobre todo por su resistencia al fuego, al ozono y aceites, propiedades superiores a las del caucho natural; se le prefiere aún al P.V.C. por su mayor flexibilidad y resistencia a la abrasión al usárselo como revestimiento. Como característica relevante es el quemarse solamente en presencia de una fuente de ignición y es autoextinguible al eliminar dicha fuente. Las temperaturas elevadas producen una depolimerización del elastómero, pero no -

presenta la tendencia a suavizarse como el caucho.

(L6-L7)

Las ventajas y desventajas del Policloropreno considerado como caucho sintético se comparan brevemente a las del caucho natural:

-Propiedades superiores a las del caucho natural:

- 1) Resistencia a la fatiga por flexión;
- 2) Conductividad del calor;
- 3) Envejecimiento con el calor;
- 4) Resistencia a la llama;
- 5) Endurecimiento a bajas temperaturas;
- 6) Resistencia a la oxidación;
- 7) Resistencia a la luz solar;
- 8) Resistencia a disolverse por ataque de aceites minerales y vegetales excepto lubricantes a base de ésteres;
- 9) Resistencia a la difusión de gases;
- 10) Adhesión a los metales;
- 11) Resistencia a los ácidos resinosos y sales solventes; y
- 12) Resistencia a la acción del cobre.

- Propiedades similares o inferiores a las del caucho natural:

- 1) Propiedades mecánicas de extensibilidad, desgarré, elasticidad y - abrasión;
- 2) Resistencia a la deformación bajo carga;
- 3) Rigidez a bajas temperaturas;
- 4) Calor específico; y
- 5) Resistencia a disolverse por ataque de líquidos hidrocarbonados aromáticos.

#### 2.2.2.2 Polietileno (P.E.)

Este elastómero es utilizado en cables como funda protectora o como aislante, este último grupo lo compone el Polietileno Clorosulfonado y el polietileno de Cadenas Cruzadas, los cuales serán estudiados - más adelante.

De manera general se puede decir que la macromolécula del Polímero Etileno comercial tiene un peso molecular de 40.000, aunque se han preparado polietilenos de alta densidad con peso moleculares superiores a un millón.

Su estructura más simple es la siguiente:



pero puede también poseer cadenas laterales.

Clases de Polietileno: sus clases y características se aprecian en el cuadro 3, pág. 17.

Como complemento del cuadro 3 se puede expresar lo siguiente: Las cadenas laterales de P.E. de baja densidad no tienen un arreglo ordenado, facilitando su deformación mecánica, pero por un recocido cuidadoso se mejora su cristalinidad y con ella esta característica mecánica. Por otra parte, la mayor cristalinidad del P.E. de alta densidad eleva su temperatura de reblandecimiento, pero se vuelve rígido.

Comportamiento del Polietileno: En general es altamente resistente a la humedad y su absorción es mínima; flexible y fuerte, con baja constante dieléctrica relativa: 2.3 y factor de pérdidas:  $5 \times 10^{-4}$ , propiedades dieléctricas que no se ven afectadas en amplios rangos de voltaje.

El polímero, sin embargo, posee ciertas propiedades físicas y químicas indeseables, como la variación de su cristalinidad, una temperatura de reblandecimiento relativamente baja, además de un alto grado de expansión o contracción según el valor de la temperatura, provocando la formación de cavidades o vacíos, bien sea durante la manufactura o su utilización, limitando en esta forma el voltaje al que puede usarse, pues la existencia de dichas cavidades hace que campos eléctricos rela-

tivamente bajos causen ionización interna y posteriormente descarga eléctrica, siendo este proceso más probable con el P.E. de baja densidad.

Con relación a la oxidación, el Polietileno debe considerarse como fácilmente oxidable, siendo además la temperatura un factor que favorece la oxidación y su propio proceso es autocatalítico. Por esto necesita de aditivos inhibidores de la oxidación.

Esta dificultad puede evitarse en cierto grado por la mezcla de dos o más polietilenos de diferentes densidades, por la copolimerización con otros compuestos, por el 'hinjerto' en sus cadenas laterales de otros elementos como el poliestireno. Otras modificaciones mejoran específicamente ciertas cualidades; de esta forma se obtiene por ejemplo el Polietileno Clorosulfonado, cuya resistencia al ozono ha sido grandemente mejorada, por lo que su uso principal es como aislante de cables, solo o en unión del caucho.

#### Polietileno Clorosulfonado.

Se deriva de un polietileno de alto peso molecular, cercano a los 20.000 y contiene alrededor de un 29 % de cloro (Hidrógeno Clorado) y un 1.25 % de sulfuro. Este compuesto tiene facilidad de formar cadenas cruzadas o vulcanizarse, proceso en el que se emplea catalizadores.

Comercialmente se lo conoce como Hypalon (L6). Es un elastómero con buenas propiedades mecánicas, con una alta resistencia al ataque del ozono, aún a temperaturas elevadas. Posee además una resistencia alta, del orden de  $10^{14}$  ohm-cm a 20 °C. Es muy poco higroscópico, cualidad que se mejora con la adición de óxido de plomo. Esta propiedad hace que se lo use también como funda protectora y por su resistencia al ozono se emplea como aditivo al caucho natural y sintéticos, para impartirlos estos atributos que le son característicos. Sus propiedades generales se indican en la tabla 1.

CUADRO 3.

CLASES DE POLIETILENO Y CARACTERISTICAS

(L6)

Denominación	Baja densidad	Alta densidad
Presión, [Kg/cm <sup>2</sup> ]	1050 - 2100	menor a 1050
temperatura de fabricación, [°C]	100 - 300	—
Cadenas laterales	Sí	No <sup>i)</sup>
Cristalinidad	Menor	Mayor
Resistencia a la abrasión	Menor	Mayor
Resistencia a agentes químicos	Menor	Mayor
Absorción de agua	Mayor	Menor
Súbitos pero cortos aumentos de temperatura	Mejor	Peor
Temperatura de utilización	Mayor	Menor
Voltaje de utilización	Menor	Mayor
Fatiga por flexión	Menor	Mayor
Dilatación por temperatura	Mayor (desde 30 a 40 °C)	Menor (sobre los 80 °C)
i) Al añadirle peróxidos orgánicos, se consigue la formación de cadenas cruzadas, conformando el Polietileno de Cadenas cruzadas.		

Polietileno de Cadenas Cruzadas.

Al añadirse peróxidos orgánicos al polietileno, se consigue una estructura de enlaces cruzados mediante un proceso de vulcanización. Con esto el material obtiene mejores propiedades elastoméricas (L7) o mecánicas ante cambios de temperatura. El enlace de cadenas se realiza mejor cuando es hecho inmediatamente del proceso de extrucción en cables, por medio de una vulcanización continua.



Así mismo se mejoran la resistencia y estabilidad térmicas con el enlace de cadenas y gracias a esto es posible construir conductores con - temperaturas nominales de trabajo de hasta 90 °C.

La aplicación de este material como medio aislante está supeditada - en el futuro al costo del material y a las técnicas de manufactura que se adopten. (L7)

### 2.2.2.3 Cloruro de Polivinilo, Policlorovinil o P.V.C.

El P.V.C. es uno de los elastómeros más importantes en la industria de cables, su presentación puede variar desde un material flexible hasta un semirígido. Es fácilmente moldeado o procesado por extrucción, siendo este medio el más empleado para usarlo como aislante o funda protectora de cables. (L6)

Se lo obtiene a partir del Etileno o del Acetileno; para cables se usa un método de suspensión acuosa, durante el cual se lo polimeriza. Este método emplea catalizadores, agentes de suspensión y emulsificantes, a una temperatura del orden de los 50 °C.

La plasticidad del material se consigue por medio de plasticizantes no volátiles, estabilizadores y otros aditivos. (L6-L7)

Luego se le agrega pigmentos y complementos específicos según se lo emplee como aislante o como revestimiento. El compuesto final se logra por mezcla o gelatinización, siendo entonces colocado por extrucción sobre los conductores.

Las propiedades de un compuesto de P.V.C. usado como aislante de cables se expresan en la tabla 3., pág. 19.

Comportamiento del P.V.C.: Los cables aislados con P.V.C. poseen las - siguientes características generales:

Alta rigidez dieléctrica y mecánica, buena resistencia de aislamiento, aun si los cables se hallan sumergidos en agua. Alta estabilidad frente a la tensión continua y a los agentes atmosféricos, así como a

TABLA 3.

CARACTERISTICAS DE UN POLICLOROVINIL  
USADO COMO AISLANTE EN CABLES

Gravedad específica relativa . . . . .	1.03
Resistencia al ozono . . . . .	Buena
Resistencia a los rayos ultravioletas . . . . .	Buena
Resistencia al calor, [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}^2/\text{cm}$ ] . . . . .	600-800
Temperatura de reblandecimiento, [ $^{\circ}\text{C}$ ] . . . . .	121
Temperatura de resquebrajamiento, [ $^{\circ}\text{C}$ ] . . . . .	- 30
Temperatura de utilización:    Uso continuo, [ $^{\circ}\text{C}$ ] . . . . .	60-90
Corto tiempo, [ $^{\circ}\text{C}$ ] . . . . .	95-120
Constante dieléctrica relativa a 25 $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	5-6
Resistencia de aislamiento, [ohm-cm], a 25 $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	$10^{12}$ - $10^{13}$

(L6)

los ácidos y bases diluidos; no se ve afectado por exposiciones ocasionales a aceites y combustibles y además posee una vida media relativamente alta. (L7)

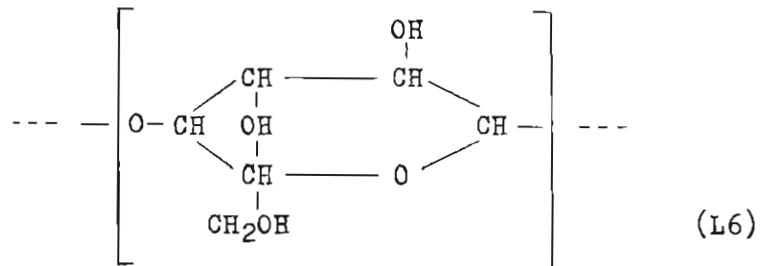
Durante la manufactura de cables pueden deteriorarse sus cualidades dieléctricas, sobre todo debido a burbujas de aire atrapado o vacíos; así como a la contaminación de humedad o gases clorados producidos por degradación térmica del propio P.V.C.

Una resistencia de aislamiento baja puede indicar la presencia de humedad u otros materiales contaminantes (conductores), pero generalmente se debe a esfuerzos mecánicos que resquebrajan el material y que además originan imperfecciones mecánicas. Estos esfuerzos mecánicos se deben principalmente a un defectuoso control de la temperatura durante el calentamiento del termoplástico.

En la actualidad se usan compuestos aislantes de Policlorovil de tipo especial para manufactura de cables que operan hasta 30 KV entre fases. (L7)

2.2.2.4 Papel.

Es una forma de presentación de la Celulosa, la cual tiene un origen vegetal. En estado natural la celulosa posee muchas impurezas, de difícil eliminación. Es un compuesto polar y su estructura molecular presenta ciertas propiedades de los polímeros, el conjunto de sus moléculas es una aglomeración de células básicas formando una especie de enrejado. Su fórmula aceptada es  $(C_6 H_{10} O_5)_n$ , con la configuración en bloque siguiente:



La longitud de la cadena molecular depende de los requerimientos - térmicos y mecánicos. El compuesto global posee además un material amorfo y poroso que es el responsable de la higroscopicidad del papel, siendo esta característica función del proceso dado a la celulosa.

El uso corriente del papel en cables es en forma impregnada, para lo cual previamente se elimina la humedad por secado. La celulosa a pesar de una alta pureza puede presentar una rigidez dieléctrica baja, a altas temperaturas, así como una constante dieléctrica que se incrementa rápidamente al subir el voltaje y la temperatura, aún a valores relativamente bajos, problema que se origina por la presencia de humedad. Inherentemente, las propiedades dieléctricas del papel son excelentes y precisamente el secado hace que se las aproveche de la mejor manera. Este proceso puede hacerse a temperatura elevada, al vacío, siendo los valores que se alcancen, factores determinantes sobre ciertas propiedades del del papel, como su higroscopicidad y vida útil.

El papel así tratado posee una rigidez dieléctrica muy baja, comparada con la de otros materiales, este factor se mejora aún más si los poros del aislante se los rellena con aceite mineral, siendo la efi -

ciencia de este proceso el determinante de la rigidez dieléctrica final del material.

En cables el papel usado es de alta densidad, a fin de lograr mayor rigidez y constante dieléctricas, siendo esta última propiedad de carácter no lineal con relación a la constante dieléctrica del líquido impregnante. La calidad del papel dificulta el secado y la impregnación.

El papel impregnado se comporta en forma compleja frente a pruebas de laboratorio, la rigidez dieléctrica es mayor para voltajes de corta duración, comparada con pruebas de varios minutos, y es además función de su espesor, el voltaje de disrupción es menor si previamente se le han aplicado altos voltajes, etc., por esto es usual confiar en los datos de fábrica.

Comportamiento del Papel. Es uno de los mejores aislantes, únicamente que la instalación de cables requiere de personal muy calificado. Las fallas que se presentan pueden deberse a sobrevoltajes o a deficiencias en el proceso de fabricación, pero si ocurren bajo condiciones normales de operación, serán fruto de una degradación en cadena.

El deterioro se inicia a causa del efecto corona, que normalmente se presenta entre 1.5 y 2 veces el voltaje nominal de operación, pero que por ciertas causas puede descender a valores muy bajos. La característica polar del papel, los portadores de carga (impurezas) y la heterogeneidad del aislante establecen pequeños flujos de corriente, los que originan gradientes localizadas de temperatura, que a su vez provocan concentraciones de corriente que gasifican el dieléctrico. En este momento se presenta el efecto corona que al calentar el material lo hace fallar por causas térmicas.

Este proceso puede detectarse por medio del osciloscopio de rayos catódicos y por medidas periódicas del factor de pérdidas.

Como solución a este problema, se impregna el papel con aceites autoregenerantes de alta viscosidad que evitan su propio desplazamiento por la presencia de gases, a los cuales además los comprimen extinguiendo la descarga por corona. Este cable se le conoce como tipo "Pirelli" (L6); el límite de esta protección es de hasta un 10 % de sobrevoltaje del inicial de efecto corona.

### 3.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CABLES.

La denominación y características físicas de los cables pueden variar según el país de fabricación, según normas y de acuerdo al nombre del producto terminado.

En los párrafos siguientes se enfocará este aspecto desde el punto de vista de aplicación en nuestro medio, y sujetándose en lo posible a las normas, sobre todo a aquellas que tengan una influencia decisiva ya sea por compromisos internacionales que ha suscrito el país o por la universalidad que revisten, tal es el caso de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) y de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

#### 3.1 Definiciones de las características físicas y de los elementos constitutivos de cables: (L2)

Antes de proceder al estudio de las características mismas de los cables, es conveniente conocer las definiciones correspondientes, que de acuerdo a COPANT son las siguientes:

- Conductor: Es el alambre o conjunto de alambres, no aislados entre sí, destinados a conducir la corriente eléctrica.
- Diámetro nominal: Es el diámetro teórico del conductor que sirve para designarlo.
- Diámetro real: Es el diámetro del conductor determinado por mediciones.
- Sección nominal: Es la sección transversal del conductor que sirve para designarlo.
- Sección especificada del conductor: Es la suma de las secciones transversales de los alambres del conductor, calculados en función de los diámetros nominales de los mismos.
- Sección transversal del conductor: Es la suma de las secciones transversales de los alambres componentes del conductor, medidas perpendicularmente a sus respectivos ejes.

- **Cableado:** Es la disposición helicoidal de los alambres o conjuntos de alambres que forman un conductor.
- **Cableado simple:** Es el cableado formado por alambres.
- **Cableado compuesto:** Es el cableado formado por conjuntos de alambres
- **Paso del cableado:** Es la proyección axial de la longitud de una vuelta completa de un alambre o grupo de alambres que forman un conductor.
- **Alma:** Es el alambre o conjunto de alambres que forman la parte central del conductor, de material diferente o no del de las capas exteriores.
- **Capa:** Es el conjunto de alambres equidistantes del eje del conductor cableado.
- **Aislante:** Es un material cuya conductividad eléctrica es nula o muy pequeña.
- **Aislación:** Es el conjunto de aislantes aplicados alrededor de los conductores y destinados a aislarlos eléctricamente.
- **Aislamiento:** Es el efecto logrado mediante la aplicación de una aislación, que se expresa cuantitativamente.
- **Cinturón:** Es la aislación aplicada sobre el conjunto de los conductores aislados que componen un cable multipolar aislado y completan la aislación de los conductores contra la envoltura metálica. (En la norma se refiere a conductores aislados con papel impregnado).
- **Relleno:** Es el material usado en un cable multipolar para llenar los espacios entre los conductores aislados que lo componen.
- **Pantalla o blindaje:** Es la cubierta conductora o levemente conductora aplicada sobre un conductor aislado o no, o sobre un conjunto de conductores aislados.

- **Envoltura:** Es una cubierta continua y ajustada, destinada a proteger la aislación del cable.
- **Armadura:** Es una protección metálica contra agentes mecánicos, constituida por alambres de sección circular o planos, bandas (flejes) o trenzados, colocados sobre un cable.
- **Cubierta protectora:** Es la cubierta externa no metálica aplicada sobre un conductor, sobre la envoltura o sobre la armadura de un cable.
- **Capas de homogenización:** Son estratos de material con características eléctricas tales que homogenicen el potencial superficial.

### 3.2 Tipos de cables según su estructura.

(L2)

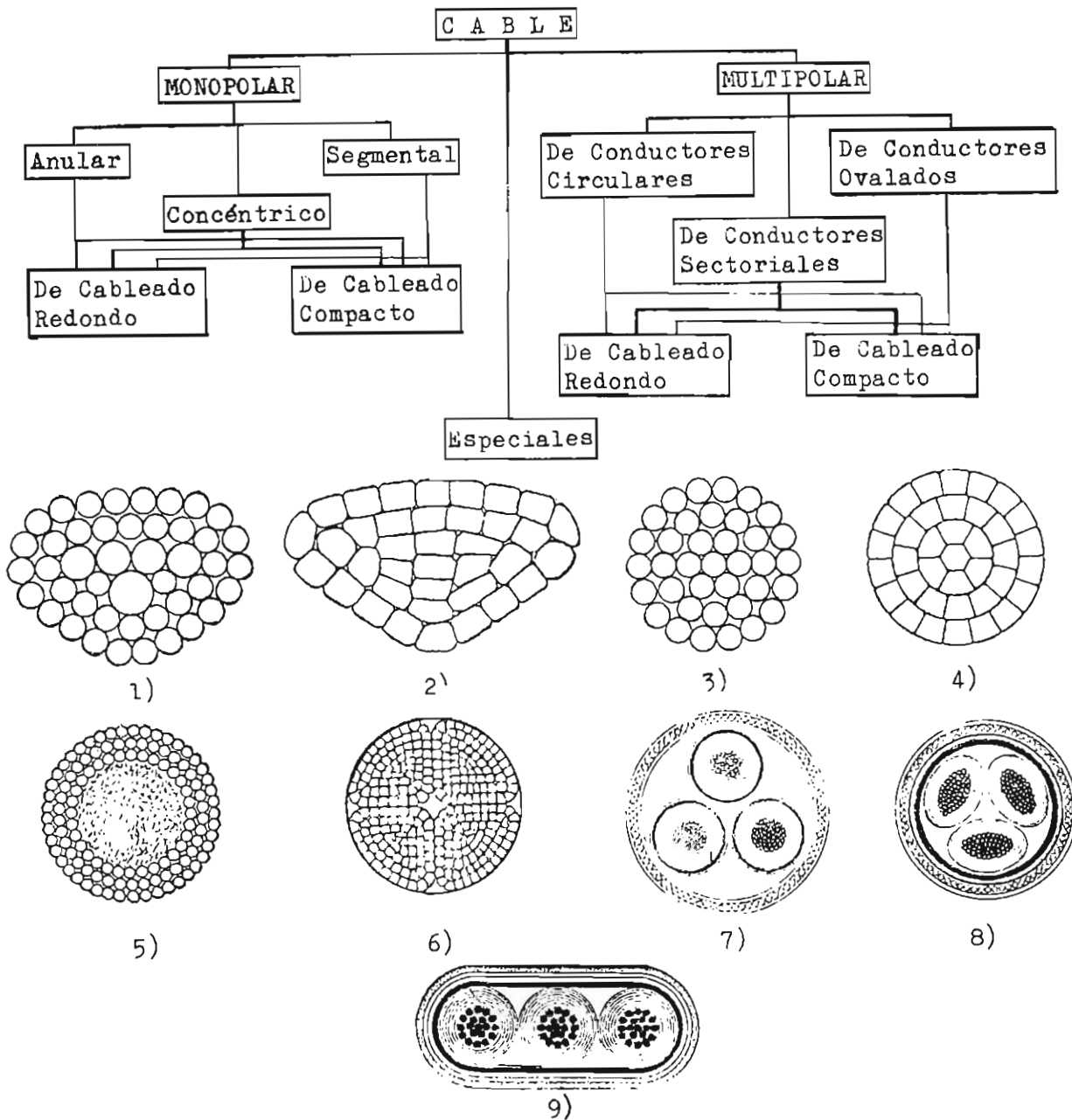
De conformidad con lo anteriormente expuesto y de acuerdo a COPANT se tiene las siguientes definiciones:

- **Cable:** Es un conductor retorcido, trenzado o cableado con aislantes y otras cubiertas o sin ninguno de ellos (cable de un conductor) o combinación de conductores aislados entre si (cable de varios conductores).
- **Cable unipolar:** Es el cable formado por un conductor aislado (se le conoce más comunmente como cable monopolar).
- **Cable multipolar:** Es el cable formado por varios conductores aislados.
- **Cable sectorial:** Es el cable multipolar en el cual la forma de la sección transversal de cada conductor que lo compone, se aproxima a la de un sector circular.

A pesar de que COPANT no especifica otros tipos de cables, en la práctica sin embargo sí existen, y por ello a continuación se presenta una división de cables basada más bien en la práctica:

001624





- |   |   |
|---|---|
| 1) Cableado Redondo.                                  | 6) Cable Monopolar, segmental de cableado compacto.             |
| 2) Cableado Compacto.                                 | 7) Cable Tripolar, de conductores circulares, cableado redondo. |
| 3) Cable Monopolar, concéntrico de cableado redondo.  | 8) Cable Tripolar, de conductores ovalados, cableado redondo.   |
| 4) Cable Monopolar, concéntrico de Cableado compacto. | 9) Cable de disposición especial.                               |
| 5) Cable Monopolar, anular de cableado redondo.       |   |

Fig. 1 - Clasificación de cables según el tipo de conductores. (Ejemplos)

(L1)

### 3.3 Denominación e identificación de los cables según su aislamiento.

Siguiendo el criterio expuesto al comienzo del numeral 3, existen diferentes denominaciones según el aislamiento del cable, por esto a continuación se presenta las definiciones según COPANT y la identificación dada por la CEI.

- Cable aislado con papel impregnado: Es el cable en el cual es aislamiento de los conductores consiste en tiras de papel impregnado con un compuesto de propiedades aislantes.
- Cable aislado con material termoplástico: Es el cable en el cual el aislamiento de los conductores lo constituye un compuesto termoplástico.
- Cable aislado con caucho natural o sintético: Es el cable en el - cual el aislamiento de los conductores lo constituyen compuestos de caucho natural o sintético. (En la norma se dice 'goma' natural o - sintética)

De acuerdo con la CEI la designación se hace por medio de dos dígitos, precediendo el número que proporciona la especificación mas relevante; así el primer número define la clase básica del cable y el - segundo el tipo particular dentro de la clase básica. Su contenido es el siguiente: (L7)

0 Cables no blindados para instalación fija.

- 01 Cable monopolar para propósitos generales.
- 02 Cables para montaje.
- 03 Cable para montaje resistente al calor.
- 05 Cables aislados con P.V.C.

1 Cables blindados para instalación fija.

- 11 Cables blindados con metal duro.
- 12 Cables recubiertos con plomo.
- 13 Cables blindados con P.V.C.

#### 6 Cables flexibles para servicio pesado.

- 61 Cable flexible blindado con caucho fuerte de peso medio.
- 62 Cable flexible blindado con caucho fuerte pesado.
- 65 Cable flexible blindado con P.V.C. de peso medio.
- 66 Cable flexible blindado con P.V.C. pesado.

#### 7 Cables flexibles para servicios especiales.

- 71 Cable blindado con caucho fuerte y con núcleo central cilíndrico de material fibroso.

### 3.4 Cable según su protección mecánica externa.

De acuerdo a la identificación de los cables hecha por la CEI, existen cables con protección externa y sin ella. La COPANT proporciona una sola definición que corresponde al primer caso. A continuación se presenta ésta y otra elaborada para satisfacer el caso último, tratando de ser consecuente con el contexto total de este estudio.

- Cable Armado: Es el cable provisto de una armadura, con el fin de darle protección mecánica. (L2)
- Cable No Armado : Es el cable que carece de armadura externa especial y la protección mecánica está impartida por la propia aislación o por la envoltura del cable.

### 3.5 Otros tipos de cables.

Durante su funcionamiento, el aislamiento de los cables se ve sometido a esfuerzos dieléctricos, cuya distribución puede o no ser uniforme según sea la superficie de contacto entre el conductor y el aislante. Este efecto, considerable ya a los voltajes estudiados, influye en el espesor del dieléctrico y en el tipo de apantallamiento del cable, por lo cual es preferible que el campo tenga una distribución radial, lo cual se consigue cubriendo al conductor con una capa conductora o semiconductora que ecualiza el campo, según puede apreciarse en la fig. 2, siendo en último término el costo, el factor determinante al seleccionar un cable.

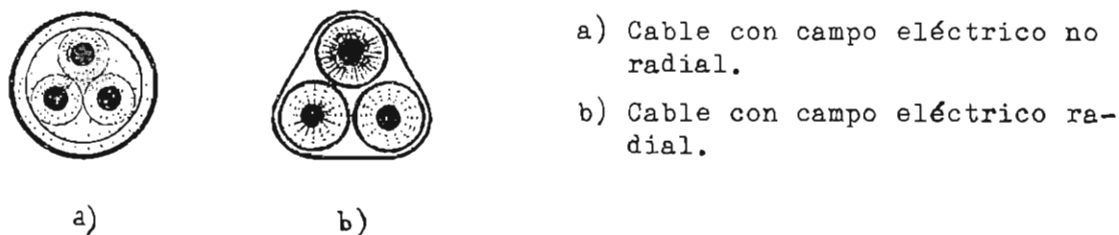


Fig. 2 Campo eléctrico en cables.

Este efecto es tomado en consideración por COPANT al hacer la siguiente tipificación de estos cables:

- Cable a campo eléctrico radial: Es el cable en el cual las líneas de fuerza del campo eléctrico están siempre orientadas en dirección normal a la o las capas de aislamiento.
- Cable a campo eléctrico no radial: Es el cable en el cual las líneas de fuerza del campo eléctrico presentan componentes tangenciales a la o las capas de aislamiento. (L2)

### 3.6 Características de los conductores.

En adelante para evitar confusiones se utilizará únicamente el Sistema Internacional de Unidades (S.I.)

Como se había mencionado, los conductores usados en cables son el cobre y el aluminio, cuyas propiedades físicas y eléctricas constan en la tabla 4.

#### 3.6.1 Resistividad y conductividad.

La relación entre la resistencia  $R_o$ , la longitud  $l$  y el área transversal  $A$  de un conductor eléctrico está dada por la fórmula muy conocida:

$$R_o = \rho_v \frac{l}{A} \quad (1)$$

en la cual el factor de proporcionalidad  $\rho_v$  corresponde a la resistividad volumétrica.

TABLA 4.

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL COBRE Y ALUMINIO

(L8)

Propiedad	Unidades	Cobre Recocido	Aluminio estimado en frío
Conductividad volumétrica, a 20 °C	Porcentaje del C.R.P.	100.0	61.0
Densidad, a 20 °C	[gr/cm <sup>3</sup> ]	8.89	2.703
Resistividad volumétrica, a 20 °C	[Ohm (m, mm <sup>2</sup> )] [microhm-cm]	0.017241 1.7241	0.028264 2.8264
Coefficiente de variación de resistencia por temperatura a 20 °C	[°C <sup>-1</sup> ]	0.00393	0.00403
Punto de Fusión	[°C]	1083	652 - 657
Coefficiente de dilatación por temperatura	[°C <sup>-1</sup> ]	0.000017	0.000023
Conductividad térmica, a 25 °C	[°C-cm <sup>3</sup> /W]	3.89	2.26

La conductividad de un material, normalmente no se expresa como una cantidad absoluta, sino como un porcentaje de la conductividad normalizada, siendo ésta fijada por la CEI y corresponde a la del "Cobre Recocido Patrón" (CRP)

Los valores normalizados para el cobre recocido patrón, fueron establecidos con las siguientes características:

- 1.- La resistencia a 20 °C de un conductor de CRP, de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, es  $\frac{1}{58}$  [ohm] = 0.017241 [ohm]; y

2.- La densidad a 20 °C del CRP es 8.89[g/cm<sup>3</sup>].

Haciendo uso de la segunda característica del CRP, se puede expresar la resistividad o conductividad con relación a la masa o al volumen del conductor, caso en el cual se denominan resistividad o conductividad en masa o volumétrica, respectivamente.

La conductividad volumétrica de un material, como porcentaje del CRP, puede ser calculada por medio de la fórmula siguiente:

$$\gamma_v = 100 \frac{\rho_{v20}}{\rho_v} \quad (2)$$

en donde:  $\rho_{v20}$  = resistividad del CRP, a 20 [°C]

$\rho_v$  = resistividad del material comparado

Para conductores de aluminio recocido, por cuanto su conductividad eléctrica depende de impurezas químicas, de difícil eliminación en su procesamiento, se ha escogido un valor representativo, siendo éste de 61.8 % del que presenta el CRP. De esta forma la resistividad volumétrica calculada para conductores de aluminio recocido es:

$$\rho_v = 0.027898 [\text{ohm (m, mm}^2)]$$

### 3.7 Variación de la resistencia con la temperatura:

De acuerdo con la fig. 3, la variación de la resistencia con la temperatura estará dada por la ecuación:

$$R_{of} = R_{oi} [1 + \alpha_i (\theta_f - \theta_i)] \quad (3)$$

en la cual:  $R_{oi}$  = Resistencia a la temperatura inicial

$R_{of}$  = Resistencia a la temperatura final

$\theta_i$  = Temperatura inicial, [°C]

$\theta_f$  = Temperatura a la cual se desea obtener la resistencia final, [°C]

$\alpha_i$  = Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura, según la tabla 5.

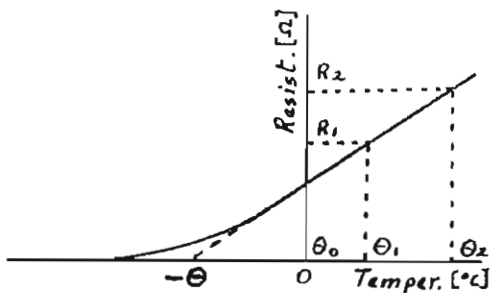


Fig. 3 Relación entre la Temperatura y la Resistencia

Para valores entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , La variación de la resistividad para estos dos elementos conductores tiene una relación aproximadamente lineal (ver fig. 3). Si el cambio fuese estrictamente lineal, habría un coeficiente constante de variación de la resistencia:  $\alpha$ .

La tabla 5 proporciona valores de los coeficientes  $\alpha$ , para rangos de temperatura entre 0 y  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y conductividades entre 55 y 65 % (CRP) para el aluminio y de 95 a 102 % (CRP) para el cobre. (L8)

Según el gráfico 3 se tiene la igualdad siguiente:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\theta_0} \quad (4)$$

que para cualquier temperatura  $\theta$  daría un valor:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \theta} = \frac{1}{\theta_0 + \theta} \quad (5)$$

El coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura, para el aluminio, puede calcularse para cualquier conductividad y temperatura, por medio de la fórmula:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{0.610}{\gamma(0.00403)} + (\theta - 20)} \quad (6)$$

en donde:  $\alpha$  = Coeficiente de variación de la resistencia, a la temperatura  $\theta$  y de conductividad  $\gamma$ .

$\gamma$  = Conductividad del material, expresada como decimal.

$\theta$  = Temperatura en el punto de medición u operación,  $[^{\circ}\text{C}]$

0.610 = Conductividad (% CRP) a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el aluminio estirado en frío.

0.00403 = Coeficiente de variación de la resistencia a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el aluminio estirado en frío.

Otros factores que influyen en la variación de la resistencia de los conductores de aluminio y cobre, son las tolerancias de manufactura, que aproximadamente son las mismas para ambos. El coeficiente  $\alpha$  para el aluminio varía además por el recocido, pureza y dureza, en este último caso, la variación es menor que para el cobre.

Para propósitos prácticos existen factores que reducen los valores de resistencia al normalizado (20 °C) o que permiten calcular la resistencia a partir de dicho valor.

TABLA 5.

COEFICIENTES DE VARIACION DE LA RESISTENCIA  
POR EFECTOS DE TEMPERATURA

Conducti- vidad, % C.E.I.	Temperatura, [°C]						Temperatura - $\theta$ (resis- tencia 'teó- rica': 0) [°C]
	0	15	20	25	30	50	
	Coeficiente $\alpha$						
<b>Aluminio</b>							
55	0.00392	0.00370	0.00363	0.00357	0.00351	0.00328	255.2
56	.00400	.00377	.00370	.00363	.00357	.00333	250.3
57	.00407	.00384	.00377	.00370	.00363	.00338	245.6
58	.00415	.00391	.00383	.00376	.00369	.00344	241.0
59	.00423	.00398	.00390	.00382	.00375	.00349	236.6
60	.00431	.00404	.00396	.00389	.00381	.00354	232.3
60.6	.00435	.00400	.00400	.00393	.00385	.00357	229.8
60.97	.00438	.00411	.00403	.00395	.00387	.00359	228.3
61.0	.00438	.00411	.00403	.00395	.00387	.00360	228.1
61.3	.00441	.00413	.00405	.00397	.00389	.00361	226.9
61.4	.00441	.00414	.00406	.00398	.00390	.00362	226.5
61.5	.00442	.00415	.00406	.00398	.00390	.00362	226.1
61.8	.00445	.00417	.00408	.00400	.00392	.00364	224.9
62.0	.00446	.00418	.00410	.00401	.00393	.00365	224.1
63	.00454	.00425	.00416	.00408	.00400	.00370	220.3
64	.00462	.00432	.00423	.00414	.00406	.00375	216.5
65	.00470	.00439	.00429	.00420	.00412	.00380	212.9
<b>Cobre</b>							
95	.00403	.00380	.00373	.00367	.00360	.00336	247.8
96	.00408	.00385	.00377	.00370	.00364	.00339	245.1
97	.00413	.00389	.00381	.00374	.00367	.00342	242.3
97.5	.00415	.00391	.00383	.00376	.00369	.00344	241.0
98	.00417	.00393	.00385	.00378	.00371	.00345	239.6
99	.00422	.00397	.00389	.00382	.00374	.00348	237.0
100	.00427	.00401	.00393	.00385	.00378	.00352	234.5
101	.00431	.00405	.00397	.00389	.00382	.00355	231.9
102	.00436	.00409	.00401	.00393	.00385	.00358	229.5



### 3.8 Variación de la resistencia por efecto de la corriente alterna.

La corriente alterna produce algunos efectos diferentes a los de la continua, cuando es transportada por un conductor; uno de ellos es el incremento de la resistencia eléctrica.

Entre las razones principales contamos las siguientes: el efecto pelicular, el efecto de proximidad, corrientes de Foucault e histéresis.

Para tener idea de la resistencia debido a las causas mencionadas, se anota la denominada "relación  $\frac{R_a}{R_d}$ ". Existen tablas que permiten conocer directamente esta relación, pero al hacer uso de las mismas, es conveniente poner mucha atención en cuáles son los efectos considerados, pues algunas de ellas incluyen solamente algunos de estos efectos mencionados.

#### 3.8.1 Efecto Pelicular.

Conocido también como "efecto piel", es la tendencia de la corriente alterna a tener una densidad cada vez mayor en las cercanías de la superficie del conductor, en vez de distribuirse uniformemente a través de toda su sección transversal, incrementando en esta forma la resistencia.

La explicación de este fenómeno es la siguiente: la propagación de un campo variable dentro de un conductor se atenúa exponencialmente, produciéndose entonces la transmisión de la energía solamente por la parte externa del conductor. Así para una onda sinusoidal, caso común de transmisión de energía, la profundidad pelicular o profundidad de penetración de la onda, a la cual se llega a un 36.8 % de la total es:

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}} \quad (7)$$

(L9)

en donde:  $\Lambda$  = Profundidad pelicular, [mm]

$f$  = Frecuencia, [Hz]

$\mu$  = Permeabilidad del material conductor, [H/m]

$\gamma$  = Conductividad del material, [Mhos/m]

Para el caso del cobre a 60 Hz,  $\mu \doteq 1 \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m], y  $\gamma = 5.8 \cdot 10^7$  [Mhos/m], la profundidad pelicular es:  $\Lambda = 8.5$  [mm]; lo que indica que el 63% de la energía total transmitida ocupa una "banda" de conductor menor que 1 [cm] (L9)

El efecto pelicular para muchas formas de conductores puede encontrarse a partir de curvas o tablas, estando contenidas en los denominados gráficos de Ewan (fig. 4) que se utilizan generalmente para conductores de sección anular, y que permiten encontrar la relación  $R/R_0$ ,

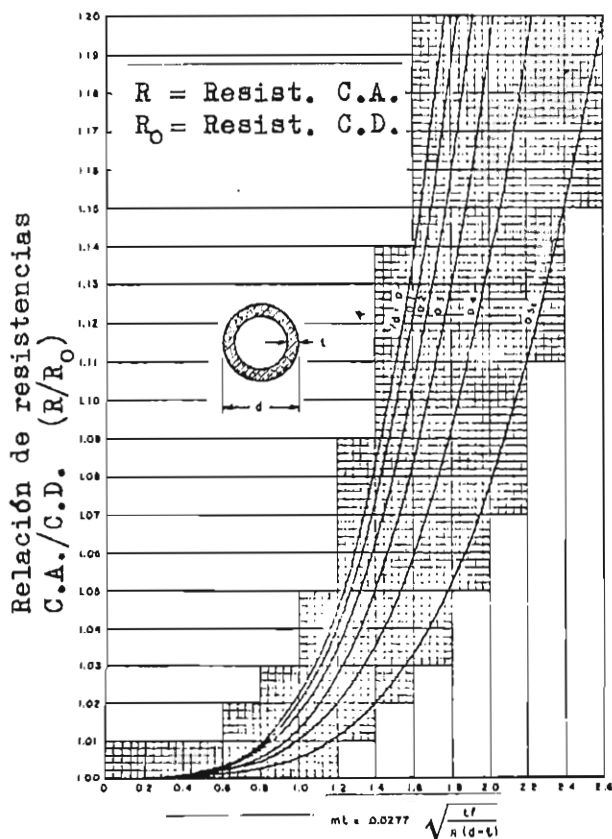


Fig. 4. - Curvas de Ewan. Relación por efecto pelicular

esto es la relación de la resistencia al paso de la corriente alterna, sobre la que presenta el conductor a la corriente continua, conocida también como factor por efecto pelicular ( $f_s$ ). La fig. 4 considera este caso a una frecuencia de 60 Hz.

La relación pelicular para conductores de sección no anular, puede hallarse en la tabla 6, en la cual el parámetro de referencia, considera el efecto de la frecuencia, expresada en [Hz] y cuya relación matemática es:

$$\bar{\chi} = 0.0501 \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (8)$$

(L8)

en donde:  $f$  = Frecuencia, [Hz]

$R_o$  = Resistencia del conductor a la corriente continua,  
[Ohm/Km]

TABLA 6.

RELACION DE RESISTENCIAS Y REACTANCIAS  
POR EFECTO PELICULAR

$\bar{x}$	$R/R_o$	$L/L_o$	$x$	$R/R_o$	$L/L_o$	$\bar{x}$	$R/R_o$	$L/L_o$	$\bar{x}$	$R/R_o$	$L/L_o$
0.0	1.00000	1.00000	2.9	1.28644	0.86012	6.6	2.60313	0.42389	17.0	6.26817	0.16614
0.1	1.00000	1.00000	3.0	1.31809	0.84517	6.8	2.67312	0.41171	18.0	6.62129	0.15694
0.2	1.00001	1.00000	3.1	1.35102	0.82975	7.0	2.74319	0.40021	19.0	6.97446	0.14870
0.3	1.00004	0.99998	3.2	1.38504	0.81397	7.2	2.81334	0.38933	20.0	7.32767	0.14128
0.4	1.00013	0.99993	3.3	1.41999	0.79794	7.4	2.88355	0.37902	21.0	7.68091	0.13456
0.5	1.00032	0.99984	3.4	1.45570	0.78175	7.6	2.95380	0.36923	22.0	8.03418	0.12846
0.6	1.00067	0.99966	3.5	1.49202	0.76550	7.8	3.02411	0.35992	23.0	8.38748	0.12288
0.7	1.00124	0.99937	3.6	1.52879	0.74929	8.0	3.09445	0.35107	24.0	8.74079	0.11777
0.8	1.00212	0.99894	3.7	1.56587	0.73320	8.2	3.16480	0.34263	25.0	9.09412	0.11307
0.9	1.00340	0.99830	3.8	1.60314	0.71729	8.4	3.23518	0.33460	26.0	9.44748	0.10872
1.0	1.00519	0.99741	3.9	1.64051	0.70165	8.6	3.30557	0.32692	28.0	10.15422	0.10096
1.1	1.00758	0.99621	4.0	1.67787	0.68632	8.8	3.37597	0.31958	30.0	10.86101	0.09424
1.2	1.01071	0.99465	4.1	1.71516	0.67135	9.0	3.44638	0.31257	32.0	11.56785	0.08835
1.3	1.01470	0.99266	4.2	1.75233	0.65677	9.2	3.51680	0.30585	34.0	12.27471	0.08316
1.4	1.01969	0.99017	4.3	1.78933	0.64262	9.4	3.58723	0.29941	36.0	12.98160	0.07854
1.5	1.02582	0.98711	4.4	1.82614	0.62890	9.6	3.65766	0.29324	38.0	13.68852	0.07441
1.6	1.03323	0.98342	4.5	1.86275	0.61563	9.8	3.72812	0.28731	40.0	14.39545	0.07069
1.7	1.04205	0.97904	4.6	1.89914	0.60281	10.0	3.79857	0.28162	42.0	15.10240	0.06733
1.8	1.05240	0.97390	4.7	1.93533	0.59044	10.5	3.97477	0.26832	44.0	15.80936	0.06427
1.9	1.06440	0.96795	4.8	1.97131	0.57852	11.0	4.15100	0.25622	46.0	16.51634	0.06148
2.0	1.07818	0.96113	4.9	2.00710	0.56703	11.5	4.32727	0.24516	48.0	17.22333	0.05892
2.1	1.09375	0.95343	5.0	2.04272	0.55597	12.0	4.50358	0.23501	50.0	17.93032	0.05658
2.2	1.11126	0.94482	5.2	2.11353	0.53506	12.5	4.67993	0.22567	60.0	21.46541	0.04713
2.3	1.13069	0.93527	5.4	2.18389	0.51566	13.0	4.85631	0.21703	70.0	25.00063	0.04040
2.4	1.15207	0.92482	5.6	2.25393	0.49764	13.5	5.03272	0.20903	80.0	28.53593	0.03535
2.5	1.17538	0.91347	5.8	2.32380	0.48086	14.0	5.20915	0.20160	90.0	32.07127	0.03142
2.6	1.20056	0.90126	6.0	2.39359	0.46521	14.5	5.38560	0.19468	100.0	35.60666	0.02828
2.7	1.22753	0.88825	6.2	2.46338	0.45056	15.0	5.56208	0.18822	$\infty$	$\infty$	0
2.8	1.25620	0.87451	6.4	2.53321	0.43682	16.0	5.91509	0.17649			

$R/R_o$ : relación de resistencias por efecto pelicular

$L/L_o$ : " " inductancias " " "

R : resistencia a la corriente alterna

$R_o$  : " " " " continua

L : inductancia para corriente desuniforme

$L_o$  : " " " " uniforme

(L8)

A frecuencias del orden de 60 Hz, el cableado de los conductores, tiene un efecto despreciable en el campo de la relación pelicular, por lo cual, no se lo toma en cuenta y el valor es obtenido directamente - de los gráficos o tablas mencionadas. (L10)

Para cálculos más precisos del factor por efecto pelicular, se aplican las siguientes expresiones:

$$f_s = \frac{\chi_s^4}{192 + 0.8 \chi_s^4} \quad (9)$$

en donde:

$$\chi_s^2 = \frac{8\pi f}{R_o} \times 10^{-9} \times K_s \quad (10)$$

(L11)

siendo:  $f$  = Frecuencia de la red, [Hz]

$R_o$  = Resistencia del conductor a la corriente continua, [Ohm/cm]

$K_s$  = valores indicados en la tabla 7.

TABLA 7.

EFFECTOS PELICULAR Y DE PROXIMIDAD i)  
(Valores experimentales)

Tipo de Conductor	Impregnados	$K_s$	$K_p$
Cableados redondos	SI	1.0	0.8
Cableados redondos	NO	1.0	1.0
Compactos redondos	SI	1.0	0.8
Compactos redondos	NO	1.0	1.0
Segmentales redondos ii)	SI	0.435	0.37
Tubulares (huecos)	SI	iii)	0.80
Sectoriales	SI	1.0	0.80
Sectoriales	NO	1.0	1.0

i) Estos valores se han obtenido experimentalmente para el cobre, cuyos conductores tienen el mismo sentido del cableado. Para el aluminio, los fabricantes recomiendan usar estos mismos valores, el error unicamente dará un factor de seguridad.

ii) Estos valores se aplican a conductores con cuatro segmentos (con o sin conducto central) y secciones transversales de hasta 1.500 mm<sup>2</sup>

iii) Para  $K_s$  debe aplicarse la siguiente fórmula:

$$K_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left( \frac{d'_c + \lambda d_i}{d'_c + d_i} \right) \quad (10.1)$$

(L11)

en donde:  $d_i$  = diámetro del conductor central, [cm]

$d'_c$  = diámetro externo del conductor sólido equivalente que tenga el mismo conducto central, [cm]

La fórmula 9 es precisa para valores de  $\chi_s$ , no mayores de 2.8 y por lo tanto aplicable en la mayoría de los casos prácticos. (L11)

### 3.9 Variación de la inductancia por efecto de la corriente alterna.

La inductancia se presenta en un circuito por la variación de flujo magnético que concatena ese circuito; en el caso de un conductor, - la corriente total puede considerarse en un principio uniformemente - distribuida a través de toda la sección transversal del mismo, una par te de esta corriente produce un flujo magnético que concatena al resto del conductor. El efecto total de este fenómeno es la inductancia que presenta el conductor para el caso de una distribución uniforme de la corriente. El caso real es que debido al efecto pelicular, la corriente tiende a circular por la periferie del conductor. Al hallarse la ma yor densidad de corriente alejada del centro, la inductancia tiende a hacerse menor, pues el número de líneas de flujo, producidas por esta corriente periférica, que concatena al conductor, es menor.

Valiéndonos nuevamente del parámetro  $\bar{\chi}$ , la relación  $L/L_0$ , esto - es, la inductancia considerado el efecto pelicular, sobre la inductancia para corriente con densidad uniforme a través de toda el área trans versal del conductor, se encuentra en la tabla 6.

Los valores de la tabla 6 son independientes del número de hilos - que forman el conductor, hasta conductores del orden de los  $7.600 \text{ mm}^2$  ( $1.5 \cdot 10^6$  c.m.) (L8)

Cuando se usa el "Radio Medio Geométrico", para cálculos de la inductancia, las fórmulas o tablas empleadas deben ser acondicionadas pa ra tomar en cuenta el efecto pelicular y además la frecuencia para la cual se han elaborado las tablas, debe coincidir con la real de opera ción del cable. (L10)

### 3.10 El efecto de proximidad.

Cuando existen conductores cercanos, el flujo producido por uno de ellos concatena al otro, y esta concatenación será mayor para la parte del conductor más cercana al otro. El efecto es reducir la inductancia en esa parte del conductor y por lo mismo la densidad de la corriente será mayor en esta sección. Como se ve, el principio es el mismo que para el efecto pelicular, produciéndose también una heterogeneidad en la densidad de la corriente que circula por la sección transversal del conductor. A este fenómeno se le denomina "efecto de proximidad".

Los efectos de proximidad y pelicular, en la práctica raras veces pueden hallarse separados, aunque su efecto combinado no es directamente acumulativo. El resultado del efecto de proximidad, en cables tripolares, de ordinario reduce ligeramente los resultados producidos por sólo el efecto pelicular.

El aumento de la resistencia en conductores, debido al efecto de proximidad, puede calcularse multiplicando la resistencia a la corriente continua  $R_0$ , por un factor  $f_p$ , que puede encontrarse en forma aproximada para los diferentes casos, por medio de las expresiones:

$$1 \text{ fase: } f_p = 4 \left( \frac{RMG}{DMG} \right)^2 (f_s - 1) \quad (11)$$

$$3 \text{ fases: } f_p = 6 \left( \frac{RMG}{DMG} \right)^2 (f_s' - 1) \quad (12)$$

(L8)

en donde:  $f_p$  = Factor debido al efecto de proximidad.

$f_s$  = Factor debido al efecto pelicular.

RMG = Radio medio geométrico de los conductores (iguales)

DMG = Distancia media geométrica de los conductores.

Cuando fuese necesario una mayor precisión, el factor  $f_p$  por el efecto de proximidad puede calcularse por medio de las siguientes ex-

presiones:

$$f_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} \left( \frac{d_c}{s} \right) \left[ 0.312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} + 0.27} \right] \quad (13)$$

en donde:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_o} \cdot 10^{-9} K_p \quad (13.1)$$

siendo los parámetros similares a los de la ecuación 9; y

$d_c$  = diámetro del conductor, [cm]

$s$  = distancia entre los ejes de los conductores, [cm] (L11)

En el caso de cables multipolares, de conductores sectoriales, el valor de  $f_p$  deberá multiplicarse por 1.5 para encontrar el verdadero valor del efecto de proximidad, y

$d_c = d_x$  = Diámetro de un conductor cableado circular de la misma sección transversal, [cm]

$s = (d_x + t)$ , [cm]; en donde:

$t$  = Espesor del aislamiento entre conductores, [cm]

$K_p$  = valores indicados en la tabla 7.

Tomando en cuenta tanto el efecto pelicular como el de proximidad, la resistencia de un conductor vendrá dada por la expresión siguiente:

$$R = R_o (1 + f_s + f_p) \quad (14) \quad (L7)$$

Para cables en tubería, tanto el efecto pelicular como el de proximidad deberán incrementarse en 1.7 veces, por lo cual para estos cables:

$$R = R_o \left[ 1 + 1.7 (f_s + f_p) \right] \quad (15) \quad (L7)$$

fórmulas en las cuales:  $R_o$  = Resistencia del conductor a la corriente continua, a la máxima temperatura de operación, [Ohm/cm]

$f_s$  = Factor por efecto pelicular

$f_p$  = Factor por efecto de proximidad.

### 3.11 Corrientes de Foucault e histéresis.

En sí mismo la producción de corrientes de Foucault (o corrientes de circulación) e histéresis, consideradas como origen de pérdidas de energía, dificultarían los cálculos, por lo cual el procedimiento para tomarlas en consideración, es acreditarlas a las pérdidas óhmicas del conductor, como un factor de éstas. Por este motivo el estudio correspondiente a estas corrientes se realiza desde el punto de vista de pérdidas de potencia.

A continuación se presentan factores que posteriormente serán utilizados, siendo  $\lambda_1$  el debido a pérdidas en la envoltura metálica, con sus componentes:  $\lambda_1'$ , correspondiente a corrientes de histéresis y  $\lambda_1''$  a las de circulación. Posteriormente se estudiará el factor debido a pérdidas en la armadura y sus respectivas componentes.

A base de  $\lambda_1'$  y  $\lambda_1''$  se puede calcular el factor de pérdidas en la envoltura metálica ( $\lambda_1$ ), por medio de la fórmula siguiente:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (16) \quad (L7)$$

Este factor  $\lambda_1$  expresa las pérdidas en la envoltura metálica en términos de la potencia total perdida en el o los conductores, indicándose a continuación cuáles son las pérdidas que deben ser consideradas en cada caso particular.

#### 3.11.1 Cables monopolares.

En este caso deben considerarse unicamente las pérdidas debidas a corrientes de histéresis, de la manera siguiente:

- 1.- Cables monopolares en triángulo, con unión de las envolturas metálicas en ambos terminales.

El factor de pérdidas será:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (17) \quad (L11)$$



en donde:

$R_s$  = Resistencia por unidad de longitud de la envoltura metálica o pantalla, [Ohm/cm].

$X$  = Reactancia por unidad de longitud de la envoltura, [Ohm/cm]  
 $= 4.6 \omega \log_{10} \left( \frac{2s}{d} \right) 10^{-9}$  [Ohm/cm]

$s$  = Distancia entre ejes de los conductores, [cm]

$d$  = Diámetro medio de la envoltura, que en el caso de conductores ovalados está dado por  $\sqrt{d_m \cdot d_n}$  siendo  $d_m$  y  $d_n$  los ejes mayor y menor, [cm]

$\omega = 2\pi f$  [ $s^{-1}$ ], siendo  $f$  la frecuencia.

$\lambda_i'' = 0$ , esto es, se desprecian las pérdidas por corrientes de circulación, excepto en el caso de cables de gran sección, como son los conductores sectoriales, caso en el cual el método de cálculo es el dado en el punto 5.

2.- Cables monopolares dispuestos en un plano, con transposición regular y envolturas unidas en ambos terminales.

Se considera además en este caso que el cable interior se halla equidistante de los otros dos y que las envolturas son unidas en cada tercera transposición. Las conexiones físicas del presente caso se tratan en la pág. 119.

El factor de pérdidas será:

$$\lambda_i' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left( \frac{R_s}{X_i} \right)^2} \quad (18) \quad (L11)$$

donde:  $X_i$  = Reactancia por unidad de longitud de la envoltura, [Ohm/cm]  
 $= 4.6 \omega \log_{10} \left( \frac{2.52 s}{d} \right) 10^{-9}$  [Ohm/cm]

$\lambda_i'' = 0$ , idem al caso 1.

3.- Cables monopolares dispuestos en un plano sin transposición y envolturas unidas en ambos terminales.

Para este caso se considera el cable interior equidistante de los otros dos. El factor de pérdidas correspondiente al cable con mayores pérdidas (el exterior que lleva la fase más atrasada) es:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (19)$$

Para el otro cable exterior el factor de pérdidas es:

$$\lambda'_2 = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (20)$$

Para el cable interior el factor de pérdidas es:

$$\lambda'_3 = \frac{R_s}{R} \left( \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right) \quad (21)$$

(L11)

en estas fórmulas:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3} ; \text{ en donde:}$$

$X$  = Reactancia por unidad de longitud de la envoltura o pantalla, - para cables monopolares en configuración triangular.

$$= 4.6 \omega \log_{10} \left( \frac{2s}{d} \right) 10^9 \text{ [Ohm/cm]}$$

$X_m$  = Reactancia mutua por unidad de longitud entre la envoltura de - un cable exterior y los otros dos conductores, cuando los cables se hallan sobre un plano.

$$= 4.6 \omega \log_{10} (2) 10^9 \text{ [Ohm/cm]}$$

$$\lambda''_1 = 0, \text{ idem al caso 1.}$$

4.- Variación del espaciamiento y su efecto en cables monopolares con la envoltura unida en ambos extremos.

En este caso las corrientes por histéresis y consecuentemente las pérdidas se incrementan al aumentar el espaciamiento, por lo cual es aconsejable unir los cables tanto como fuese posible. El espaciamiento óptimo se consigue considerando las pérdidas y el calentamiento mu tuo.

Como no siempre es posible instalar los cables con el espaciamiento más conveniente, ni conocer su disposición real antes de la instalación, se recomienda incrementar el factor de pérdidas en la envoltua

ra en un 25 % de los valores anteriormente expresados. Este incremento no debe aplicarse a instalaciones con un solo punto de unión de la envoltura o si ésta es transpuesta (ver caso 6)

5.- Efectos del uso de conductores de gran sección, tipo segmentales.

Quando los conductores están sujetos a un reducido efecto de proximidad, como en el caso presente, el factor de pérdidas  $\lambda''$ , para los casos 1 a 3 no puede despreciarse y su valor se obtendrá multiplicando - el obtenido en el punto 6, para la disposición dada de los cables, por el factor F cuya expresión es:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M+N)^2}{4 (M^2+1) (N^2+1)} \quad (22)$$

cuyos parámetros se indican en el cuadro 4.

CUADRO 4.

FACTORES PARA EL CALCULO DE PERDIDAS  
POR CORRIENTES DE CIRCULACION EN CON-  
DUCTORES DE GRAN SECCION (L11)

Disposición del Cable	M	N
En triángulo	$\frac{R_s}{X}$	$\frac{R_s}{X}$
Sobre un plano y con espaciamiento equidistante.	$\frac{R_s}{X + X_m}$	$\frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}}$

6.- Cables monopolares, con envolturas unidas en un solo punto o en forma transpuesta.

En este caso el factor de pérdidas está dado por:

$$\lambda'' = A_1 \frac{R_s}{R} \frac{\left(\frac{d}{2s}\right)^2}{\left(\frac{R_s 10^9}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2s}{d}\right)} \left[ 1 + A_2 \left(\frac{d}{2s}\right)^2 \right] \quad (23)$$

(L11)

en donde los coeficientes  $A_1$  y  $A_2$  tienen los valores dados en la tabla 8.

$\lambda'_1 = 0$ , para instalaciones en las que las envolturas son unidas en un solo punto o en aquéllas con envolturas transpuestas y cada sección principal dividida en tres menores, eléctricamente idénticas (ver pág. )

TABLA 8.

COEFICIENTES PARA EL CALCULO DE PERDIDAS  
POR CORRIENTES DE CIRCULACION SEGUN LA -  
Ec. 23. (L11)

Disposición de los cables	$A_1$	$A_2$
En triángulo	3.0	0.417
Sobre un plano, con el interior equidistante de los otros dos:		
- para los cables exteriores	1.5	0.270
- para el cable interior	6.0	0.083

NOTA: En este caso las pérdidas se deben a corrientes de circulación en las envolturas y no se ven afectadas por la transposición. Si los cables están dispuestos en un plano, con transposición regular, las pérdidas promedio para cualquier fase, pueden obtenerse usando los coeficientes anteriores para el caso de disposición triangular.

Cuando una instalación con envoltura transpuesta, contiene secciones cuyo desbalance no es despreciable, se produce un voltaje residual que origina corrientes de pérdidas por histéresis en esa sección. Si se conocieran dichas secciones, el factor de pérdidas  $\lambda'_1$  podría calcularse, multiplicando el factor de pérdidas calculado como si la envoltura de la sección fuese transpuesta, unida y puesta a tierra en ambos extremos, por:

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

donde  $n$  y  $m$  son las veces que la sección menor está contenida en las mayores (esto es, que si la sección menor es  $a$ , las mayores serán  $na$  y  $ma$ ). Además también deberá tomarse en cuenta el espaciamiento -

irregular entre cables, caso que lo hubiere.

Cuando se desconozca la relación entre secciones, se recomiendan los valores de  $\lambda_1'$  siguientes:

$\lambda_1' = 0.003$  para cables enterrados directamente.

$\lambda_1' = 0.050$  para cables instalados en conductos.

### 3.11.2 Cables tripolares.

#### 1.- Cables tripolares con envoltura común.

Para cables tripolares cuyos núcleos están contenidos en una envoltura metálica común,  $\lambda_1'$  es despreciable y el factor de pérdidas es por lo tanto dado por una de las siguientes fórmulas:

1.1 Conductores redondos u ovals, donde la resistencia  $R_s$  de la envoltura es menor o igual a  $1 \mu\Omega/\text{cm}$ :

$$\lambda_1'' = \frac{3 R_s}{R} \left[ \left( \frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left( \frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} + \left( \frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \right] \quad (24)$$

(L11)

donde:

$c$  = distancia entre el eje de un conductor y el eje del cable, [cm]

$d$  = diámetro medio de la envoltura, [cm]

$f$  = frecuencia, [Hz]

1.2 Conductores redondos u ovals, donde la resistencia  $R_s$  de la envoltura es mayor que  $1 \mu\Omega/\text{cm}$  :

$$\lambda_1'' = \frac{3.2 \omega^2}{R R_s} \left( \frac{2c}{d} \right)^2 10^{-18} \quad (25)$$

(L11)

1.3 Conductores sectoriales y cualquier valor de  $R_s$  :

$$\lambda_1'' = 0.94 \frac{R_s}{R} \left( \frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left( \frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \quad (26)$$

(L11)

donde:

$r_1$  = Radio de la circunferencia que circunscribe a los tres conductores sectoriales, [cm]

$t$  = Espesor del aislamiento entre conductores, [cm]

2.- Cables tripolares con armadura de acero.

La armadura de acero incrementa las pérdidas por corrientes de circulación en la envoltura. Los valores para  $\lambda_1''$ , dados en el punto 1, deberían multiplicarse por el siguiente factor, para considerar es te efecto de la armadura de acero: (L11)

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

donde:

$d_A$  = diámetro medio de la armadura, [cm]

$\mu$  = permeabilidad relativa del forro de acero (usualmente se toma - un valor de 300)

$t_a$  = espesor equivalente de la armadura =  $\frac{A}{\pi d_A}$ , [cm]

$A$  = área transversal de la armadura, [cm<sup>2</sup>]

Esta corrección es aplicable unicamente a envolturas o forros de 0.3 mm a 1.0 mm de espesor. Para envolturas de un espesor más delgado este factor se encuentra bajo estudio; sin embargo para cables tripolares ver la parte 3.11.3 punto 3.

3.- Cables con cada uno de sus núcleos con cubierta de plomo independiente y blindados.

El factor de pérdidas para estos cables está dado por:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left( \frac{R_s}{X} \right)^2} \quad (27)$$

(L11)

donde:

$X = 4.6 \omega \log_{10} \left( \frac{2s}{d} \right) 10^{-9}$  [Ohm/cm]

$s$  = distancia entre ejes de los conductores, [cm]

$$\lambda_1'' = 0$$

#### 4.- Pérdidas en cables con pantalla y del tipo 'en tubería'.

Si cada conductor de este tipo de cables tiene solamente una pantalla sobre la aislación, p. ej. un forro de plomo o cobre, la relación de las pérdidas en la pantalla a las pérdidas en el conductor, puede calcularse por la fórmula dada en la parte 3.11.1, punto 1, para la pantalla de un cable monopolar, tomando en cuenta que la fórmula debe ser corregida para pérdidas adicionales causadas por la presencia de la tubería de acero.

Esta corrección modifica a la fórmula 17 de la siguiente manera:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (28) \quad (L11)$$

Si cada núcleo tiene una envoltura o forro de refuerzo no magnético, se usa la misma fórmula, pero la resistencia  $R_s$  es reemplazada por la combinación en paralelo de la resistencia de la envoltura y la del refuerzo. El diámetro  $d$  es reemplazado por el valor  $d'$ :

$$d' = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2}} \quad (28.1)$$

donde:  $d'$  = Diámetro medio de la envoltura y el refuerzo, [cm]

$d_1$  = Diámetro medio de la envoltura o pantalla, [cm]

$d_2$  = Diámetro medio del refuerzo, [cm]

En el caso de conductores de tipo ovalado  $d_1$  y  $d_2$  están dados por  $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ , en donde  $d_M$  y  $d_m$  son los ejes mayor y menor respectivamente. (Ver también el punto 2 de la parte 3.11.3)

A continuación se considera el factor  $\lambda_2$  debido a pérdidas en la armadura.

3.11.3 Factor de pérdidas  $\lambda_2$  debido a las existentes en la armadura o en el forro de refuerzo.

1.- Uso de las fórmulas.

Las fórmulas dadas en este punto expresan las pérdidas de potencia que ocurren en la armadura metálica o en el forro de refuerzo de un cable, como una fracción  $\lambda_2$ , de la pérdida de potencia en todos los conductores.

En la tabla 9 se dan valores apropiados de resistividad y coeficientes de temperatura, para la resistencia de los materiales usados en la armadura o el refuerzo.

TABLA 9.

RESISTIVIDADES ELECTRICAS Y COEFICIENTES  
DE TEMPERATURA PARA METALES

Material	Resistividad ( $\rho$ ) Ohm. cm, a 20 °C	Coef. de Temp. por °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) Envoltura y armadura:		
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	70.0 $10^{-6}$	despreciable
Aluminio	2.84 $10^{-6}$	4.03 $10^{-3}$

\* Ver también la tabla 5.

(L11)

2.- Armadura o forro de refuerzo no magnético.

El procedimiento general es combinar el cálculo de pérdidas en el refuerzo con las de la envoltura.



La fórmula correspondiente es la 16 y se utiliza la combinación en paralelo de las resistencias de la armadura y del forro de refuerzo, en lugar de utilizar únicamente la resistencia de la envoltura  $R_s$ . El valor medio cuadrático de los diámetros de la armadura y del forro de refuerzo, reemplaza al diámetro medio de la envoltura  $d_1$ . Este procedimiento se aplica tanto para cables monopolares como multipolares.

El valor de la resistencia del forro de refuerzo es función de la disposición de éste en la siguiente forma:

- 1) Si las capas del forro tienen una longitud grande (forro longitudinal) la resistencia se basa en un cilindro que tenga la misma masa de material por unidad de longitud de cable y también el mismo diámetro interno del forro.
- 2) Si la capa del forro es devanada aproximadamente a  $54^\circ$  con relación al eje del cable, la resistencia es dos veces el valor calculado de acuerdo al punto anterior.
- 3) Si el forro es devanado con una capa muy pequeña (forro en forma de circunferencia) la resistencia es considerada como infinita, esto es equivalente a desprestigiar totalmente las pérdidas.
- 4) Si hay dos o más capas de forro en contacto entre ellas, que tengan una longitud bastante corta, la resistencia es dos veces el valor calculado de acuerdo al punto 1).

Estas consideraciones se aplican también a los cables de tipo en tubería, que se trata en la parte 3.11.2 punto 4. (L11)

### 3.- Armadura o forro de refuerzo metálico.

#### 3.1 Cables monopolares.

Este caso está actualmente bajo consideración por parte de la CEI, sin que hasta el momento se haya llegado a una generalización del procedimiento de cálculo. La razón para que el procedimiento no sea de uso común, se debe principalmente a que la utilización de este tipo de

cables produce excesivas pérdidas, redundando en un calentamiento peligroso o poco conveniente para una vida larga de los cables. (L11)

### 3.2 Cables tripolares con armadura de hilos de acero.

#### 3.2.1 Cables con conductores redondos.

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A}{R} \left( \frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left( \frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1} \quad (29) \quad (L11)$$

donde:  $R_A$  = Resistencia de la armadura, a la temperatura máxima que pueda alcanzar, [Ohm/cm]

$d_A$  = Diámetro medio de la armadura, [cm]

$c$  = Distancia entre los ejes de los conductores y el eje del cable, [cm]

No se acostumbra realizar correcciones por desuniformidad en la distribución de la corriente en los conductores, porque se considera un efecto despreciable en conductores de hasta 400 mm<sup>2</sup> de sección.

#### 3.2.2 Cables con cada núcleo separado y cubierto con envoltura de plomo.

Para este tipo de cables el efecto del apantallamiento de las corrientes de la envoltura, reduce las pérdidas en la armadura. La fórmula para  $\lambda_2$  dada anteriormente deberá multiplicarse por el factor  $(1 - \lambda'_1)$ , donde  $\lambda'_1$  se obtiene de la parte 3.11.1 punto 1, pág. 41.

#### 3.2.3 Cables con conductores sectoriales.

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A}{R} \left( \frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left( \frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1} \quad (30) \quad (L11)$$

donde:  $r_1$  = Radio de la circunferencia que circunscribe los tres conductores sectoriales, [cm]

$f$  = Frecuencia de la fuente, [Hz]

### 3.3 Cables tripolares con armadura de acero o reforzados.

Las siguientes fórmulas se aplican para forros de 0.3 a 1.0 mm de espesor. Las fórmulas para forros menores que 0.3 mm de espesor, se hallan actualmente bajo estudio de la CEI, para lograr su uniformidad.

Las pérdidas por histéresis para una frecuencia de 60 Hz están dadas por:

$$\lambda_2' = \frac{60}{50} \frac{s^2 K^2 10^{-9}}{R d_A t_a} \quad (31) \quad (L11)$$

donde: S = Distancia entre los ejes de los conductores, [cm]

$t_a$  = Espesor equivalente de la armadura, [cm]

=  $\frac{A}{\pi d_A}$ , siendo

A = Sección transversal de la armadura, [cm<sup>2</sup>]

$d_A$  = Diámetro medio de la armadura, [cm]

$K = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu t_a}}$ ; siendo

$\mu$  = Permeabilidad relativa del forro de acero, usualmente se toma un valor de 300.

Las pérdidas por corrientes de Foucault están dadas para una frecuencia de 60 Hz por:

$$\lambda_2'' = \left(\frac{60}{50}\right)^2 \frac{2.25 s^2 K^2 t_a 10^{-8}}{R d_A} \quad (32) \quad (L11)$$

El factor de pérdidas totales en la armadura está dado por la suma de los factores de pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis, esto es:

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2'' \quad (33) \quad (L11)$$

NOTA: Si existiese armadura magnética o de refuerzo, se incrementan las pérdidas por corrientes de Foucault. Para este caso se debe referir al punto 2 de la parte 3.11.2, pág. 47.

4.- Pérdidas para conductores en tuberías de acero.

Las pérdidas en este caso están dadas por dos fórmulas empíricas, una para los cables con núcleos unidos en una disposición en triángulo y otra para los cables donde los núcleos están colocados en una disposición más abierta en la parte superior de la tubería (fig. 5). Los cables actualmente en servicio probablemente se aproximan a una configuración entre estas dos. En este caso debe considerarse las pérdidas calculando los valores anteriores y tomando un valor medio.

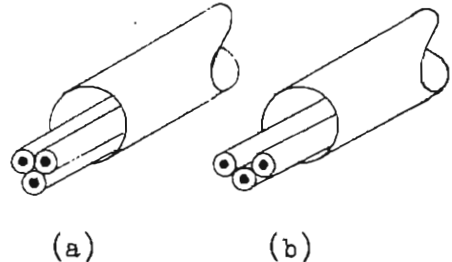


Fig. 5 Disposición de los núcleos de cables en tubería:  
 a) En triángulo  
 b) Con la parte superior más abierta.

Las fórmulas mencionadas son las siguientes:

1) Para una configuración triangular:

$$\lambda_2 = \left( \frac{0.0115 S - 0.001485 d_d}{R} \right) 10^{-6} \quad (34) \quad (L8)$$

2) Para la configuración con los cables superiores más separados:

$$\lambda_2 = \left( \frac{0.00438 S + 0.00226 d_d}{R} \right) \quad (35) \quad (L8)$$

en las cuales:

$S$  = Espaciamiento axial entre los conductores adyacentes, [cm]

$d_d$  = Diámetro interno de la tubería, [cm]

$R$  = Resistencia a la corriente alterna por unidad de longitud del conductor (a la máxima temperatura de operación) [Ohm/cm]

NOTA: Estas fórmulas han sido obtenidas empíricamente en los EE. UU. y se aplican por el momento solamente para tuberías cuyo tamaño y material sean de esa procedencia.

### 3.12 Capacidad de conducción de corriente de los cables.

La capacidad de conducción de corriente, es el parámetro guía en la selección de los cables. Los catálogos contienen tablas de corriente para diferentes tipos de cables, tensiones y secciones. Al escoger un cable, el valor dado por estas tablas se ve influenciado por las condiciones de la instalación, por lo cual, es posible que la corriente real que está en capacidad de conducir el cable seleccionado, sea diferente de la especificada en las tablas mencionadas. Por este motivo, a continuación se presenta la forma de cálculo para la real capacidad de conducción de un cable y los factores que la afectan.

La capacidad de conducción de corriente, está determinada por la máxima temperatura permisible del conductor y las condiciones ambientales, factores que tienen primordial importancia en la disipación del calor. Bajo condiciones estacionarias de operación, el calor a disiparse está dado por la suma de todas las pérdidas en el cable. El calor, por conducción, va hacia la superficie del cable y es entonces enviado al medio ambiente por convección y/o radiación. Con cables enterrados, el calor generado por pérdidas, fluye desde la superficie del cable, por conducción térmica, atravesando la tierra hacia la atmósfera, mientras que el cable se mantiene caliente. (figs. 6 y 7)

La diferencia entre temperatura del conductor y la del ambiente, es cercanamente proporcional a las pérdidas totales de energía, puesto que la temperatura que alcance el conductor se debe precisamente a la conversión de estas pérdidas en calor, haciendo del conductor una fuente calórica. La ley de flujo de calor es análoga a la ley de Ohm, existiendo una similitud entre los parámetros de estas leyes, de la forma descrita en el cuadro 5.

Las resistencias térmicas que debe atravesar el flujo de calor desde su punto de origen, son las del cable  $T_c$ , de la tierra  $T_e$ , o del aire  $T_a$ , dispándose entonces el calor en el medio ambiente.

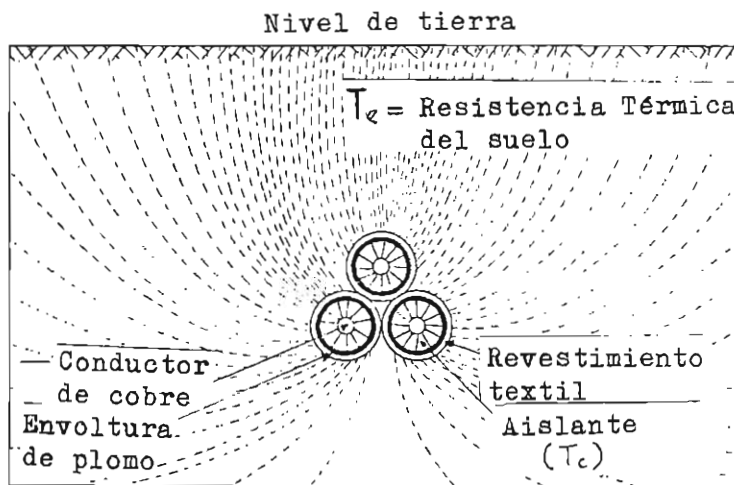


Fig. 6 - Líneas de flujo de calor de un grupo de cables monopolares enterrados directamente.

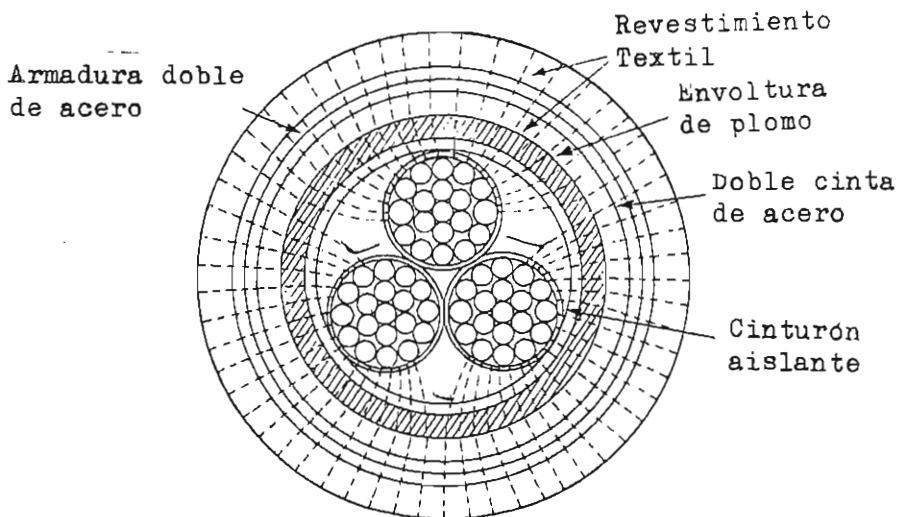


Fig. 7 - Mecanismo del flujo de calor en un cable trifásico.

CUADRO 5.

SIMILITUD ENTRE LA LEY DE OHM Y LA DE FLUJO DE CALOR

Ley de	Parámetros			Expresión
Ohm	Resistencia Eléctrica R	Diferencia de potencial $\Delta E$	Corriente eléctrica I	$\Delta E = I R$
Flujo de Calor	Resistencia Térmica T	Diferencia de temperatura $\Delta \theta$	Flujo de calor W	$\Delta \theta = W T$

De acuerdo con la analogía existente entre el flujo de calor y la corriente eléctrica (cuadro 5), puede dibujarse un diagrama equivalente (fig. 8) para el flujo de pérdidas de calor del cable y la elevación de temperatura por ellas producida.

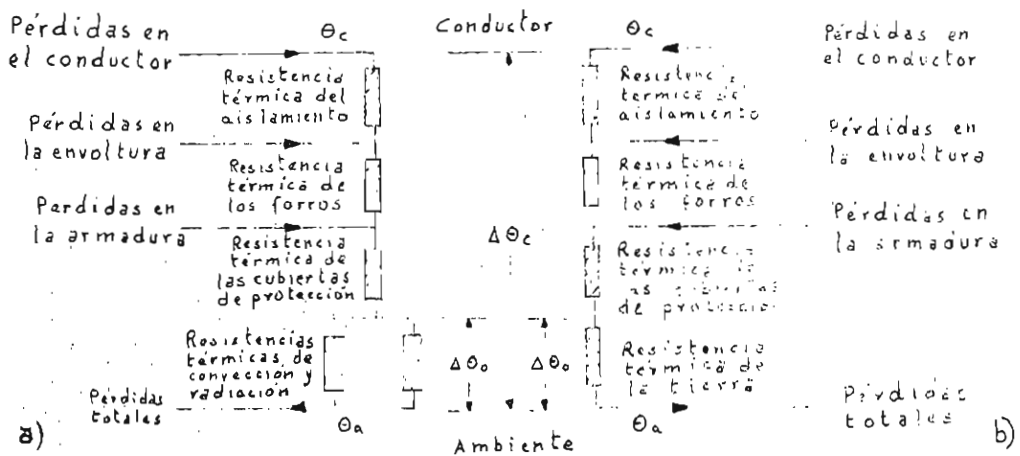


Fig. 8 "circuito equivalente" de las pérdidas de calor de un cable: a) instalado en el aire; y b) instalación subterránea.

Para una instalación subterránea, todas las resistencias térmicas están en serie; al aire libre en cambio, el calor transferido por radiación y convección está atravesando dos resistencias térmicas en paralelo y luego las demás resistencias térmicas del cable en serie (fig. 8). Las pérdidas de calor debidas a la corriente (pérdidas óhmicas) desarrolladas en el conductor, en la envoltura metálica y en la armadura, están representadas en la fig. 8, como alimentaciones de corriente eléctrica, en los puntos adecuados.

Como un resultado de las pérdidas de calor, la temperatura del conductor  $\theta_c$  es incrementada en  $\Delta\theta_c$  y la temperatura de la superficie del cable  $\theta_o$  en  $\Delta\theta_o$ , teniendo como referencia la temperatura ambiente  $\theta_a$ .

A partir de la ecuación de pérdidas óhmicas:

$$W_p = n I^2 R_p \quad (36)$$

en donde:  $n$  = Número de conductores de corriente.

$I$  = Corriente eléctrica que circula por cada conductor, [A]

$R_p$  = Resistencia efectiva a la corriente alterna, [ohm]

$W_p$  = Pérdidas óhmicas en un cable de  $n$  conductores, [W];

Estas pérdidas constituyen el calor a transmitirse desde el conductor y por analogía con la ecuación de diferencia de potencial ( $\Delta E = IR$ ) se puede encontrar la diferencia de temperatura entre dos puntos dados según la ecuación:

$$\Delta\theta = W T = (n I^2 R) T \quad (37)$$

(L7)

en la cual:

$W$  = Pérdidas óhmicas o calor producido en un conductor, por unidad de longitud, [W/cm]

$T$  = Resistencia térmica que atraviesa el flujo de calor. [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ]

$\Delta\theta$  = Diferencia de temperatura entre dos puntos dados, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Aplicando las ecs. 36 y 37, el apéndice I permite obtener el valor de  $\Delta\theta$ , o elevación de temperatura permitida para el conductor, sobre la temperatura ambiente (que en el caso de cables enterrados es la de la tierra) y cuya expresión es (ec. G, Apéndice I)

(L11)

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \quad (38)$$

en donde:

$I$  = Corriente que circula en un conductor, [A]

$\Delta\theta$  = Elevación de temperatura del conductor sobre la ambiente, [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$R$  = Resistencia a la corriente alterna, por unidad de longitud del conductor, a la máxima temperatura de operación, [Ohm/cm]

$W_d$  = Pérdidas dieléctricas, por unidad de longitud, de la aislación que cubre al conductor, [W/cm]



$T_1$  = Resistencia térmica, por unidad de longitud, entre un conductor y la envoltura. [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ]

$T_2$  = Resistencia térmica, por unidad de longitud, entre envoltura y armadura, [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ]

$T_3$  = Resistencia térmica, por unidad de longitud, del revestimiento exterior del cable, [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ]

$T_4$  = Resistencia térmica, por unidad de longitud, entre la superficie del cable y el medio ambiente (ver cuadro 9), [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ]

$n$  = Número de conductores en el cable (conductores de igual tamaño y conduciendo la misma carga)

$\lambda_1$  = Relación de pérdidas en la envoltura metálica a las pérdidas - totales en todos los conductores.

$\lambda_2$  = Relación de pérdidas en la armadura a las pérdidas totales en todos los conductores.

La corriente nominal permisible se obtiene según lo indicado en el apéndice I, ec. H, y cuya expresión es: (L11)

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R T_1 + n R (1 + \lambda_1) T_2 + n R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{1/2} \quad (39)$$

Las diferentes cantidades que requieran conocerse, para hallar el valor de  $I$  pueden calcularse por procedimientos ya vistos, los que faltaren, se los analiza más adelante, éstos son:  $W_d$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ .

Es importante mencionar que la corriente permisible, así calculada, corresponde a un factor de carga igual a la unidad o del 100 %; sin embargo, este no es el caso real de operación de los cables y más bien la corriente que circula por ellos, está supeditada a una curva de carga más o menos típica, de acuerdo a la clase de carga de servicio. Existen métodos, tales que a base de un curva de carga específica o para un factor de carga diferente de la unidad, permiten el cálculo de la corriente permisible, por medio de fórmulas especiales que determinan la elevación de temperatura del cable sobre el medio ambiente. Dichas fórmulas son más bien empíricas y muy variadas entre sí, al igual que los factores que involucran.

Por otra parte existen divergencias de criterios, en cuanto a considerar o no, la curva de carga como factor que influya en la corriente nominal permisible. Así por ejemplo, algunas empresas eléctricas norteamericanas, tienen como práctica dejar a un lado el influjo de la curva de carga, tomando un factor de carga unitario, sistema que les ha dado buenos resultados. Esto puede deberse a que el servicio suministrado, en conjunto, se acerca a una carga más o menos constante; en nuestro medio en cambio, el pico de la carga está mu<sup>ch</sup> por encima del consumo normal en otras horas. Un fenómeno similar ha sido estudiado por la "Electric Research Association" (E.R.A.) de Inglaterra, la que a base de una curva de carga patrón, compara otros tipos de curvas y proporciona factores de corrección de la corriente nominal permisible que puede soportar un cable. Estos factores, por comparación, pueden ser estimados a base de las curvas típicas dadas en la fig. 9.

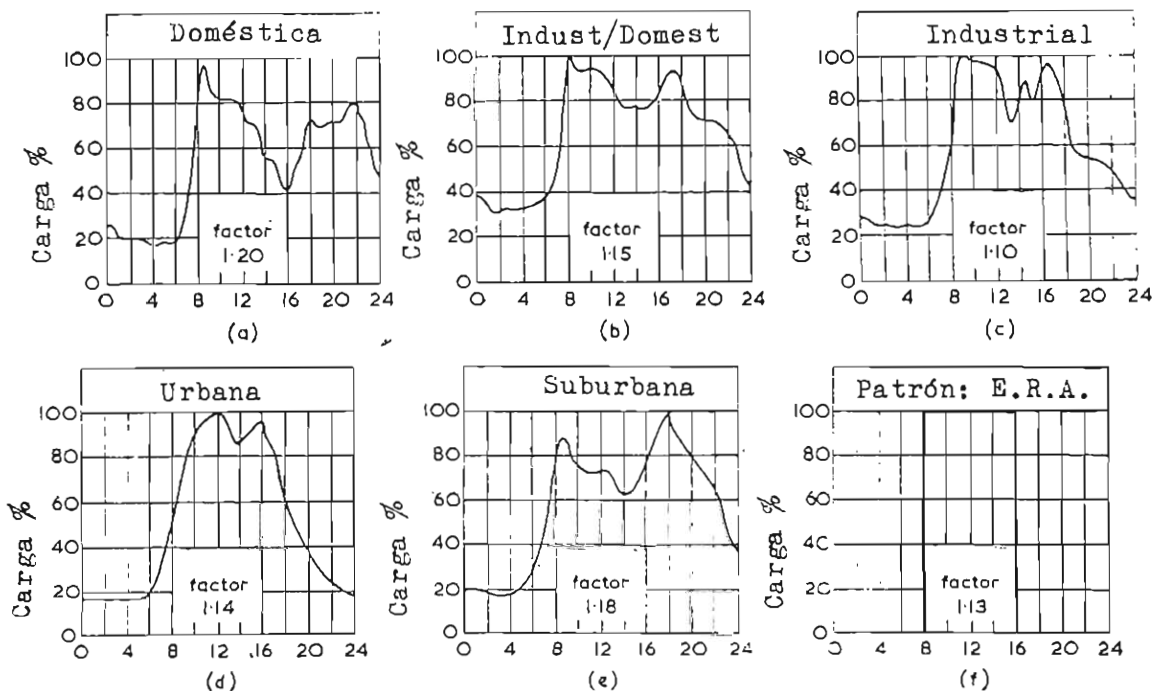


Fig. 9 Curvas de carga típicas y factores de corrección de la corriente nominal de cables.

Es así mismo de gran importancia considerar en este punto, la influencia que tiene el tipo de instalación sobre la corriente permisible en un cable. Aquélla radica principalmente en el medio ambiente - que rodea al cable, esto es, si la instalación es aérea o subterránea, porque en el primer caso el tiempo para alcanzar una temperatura más o menos constante es relativamente corto, mientras que si el cable está enterrado directamente o en conductos, la temperatura de estado estacionario puede ser alcanzada luego de días o aún semanas en casos extremos.

El hecho de que los cables que se encuentran en el aire se calienten más rápidamente que los que están instalados bajo tierra, es de suma importancia, puesto que en la mayoría de los casos, los cables - se hallan enterrados directamente o en conductos en su mayor extensión, con una corta longitud de los mismos en el aire (terminales). La corriente nominal o de estado estacionario (ec. 39) se determina para la sección bajo tierra, en cambio que la carga máxima será controlada por la que se encuentre en el aire.

Los efectos y cálculos de la máxima corriente se presentan normalmente en los casos de cortocircuitos y su estudio merece una consideración detallada y se lo presenta en el punto 4.3

### 3.13 Pérdidas dieléctricas $W_d$ .

Las pérdidas dieléctricas afectan el diseño del cable, limitando la capacidad de conducción de corriente; estas pérdidas calientan el cable independientemente de la carga, reducen la elevación permisible de temperatura sobre el ambiente, que sin ellas se dispondría para la conducción de corriente.

Las pérdidas dieléctricas son una función de las siguientes características del aislamiento del cable: factor de potencia, permitividad, temperatura y factor geométrico, este último basado en las dimensiones. Con aislación uniforme, las pérdidas son proporcionales al cuadrado del voltaje; mientras que el factor de pérdidas no es uniforme. Las pérdi-

das dieléctricas son además proporcionales a la rigidez dieléctrica localizada (Voltaje/espesor).

Las pérdidas dieléctricas solamente son importantes cuando el voltaje a tierra es de 30 KV para cables aislados con papel, ó 6 KV para cables aislados con P.V.C., cuando se utilizan cables tripolares apantallados o cables monopolares. Los voltajes correspondientes al caucho y al polietileno se hallan actualmente bajo consideración por parte de la C.E.I. (L11). En Inglaterra las pérdidas dieléctricas son usualmente despreciables para cables que operen a voltajes de hasta 22 KV, inclusive (L1) y en los EE. UU., según la "Insulated Power Cable Engineers Association" (IPCEA) este voltaje es de 33 KV (L8).

Las pérdidas dieléctricas por unidad de longitud, están dadas para cada fase por:

$$W_d = \omega C E_o^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6} \quad [W/cm] \quad (40)$$

donde:  $\omega = 2\pi f [s^{-1}]$

$C =$  Capacitancia por unidad de longitud,  $[\mu F/cm]$

$E_o =$  Voltaje a tierra,  $[V]$

Los valores de la  $\operatorname{tg} \delta$ , o factor de pérdidas de la aislación, dentro de la frecuencia y temperatura usuales de operación, están dados en la tabla 10.

### 3.14 Capacitancia C.

Este parámetro es importante tanto para el cálculo de pérdidas dieléctricas, como para la determinación de corriente de carga de un cable que se la usa como parámetro de comparación para la detección de fallas en cables.

La capacitancia para conductores monopolares circulares tiene la siguiente expresión (ver fig. 10):

$$C = \frac{0.0241 \epsilon}{\log_{10} \left( \frac{D_i}{d_c} \right)} \cdot 10^{-5} \quad (41)$$

(L11)

TABLA 10.

VALORES DE PERMITIVIDAD Y FACTOR DE PÉRDIDAS PARA AISLAMIENTO DE CABLES DE MEDIO Y ALTO VOLTAJE (L11)

Tipo de Cable	$\epsilon$	$t_g \delta$ *
- Cables aislados con papel impregnado: Tipo sólido, plenamente impregnado, preimpregnado o con relleno impregnado no desecado.	4.0	0.01
- Cables con otra clase de aislamiento:		
Caucho	4.5	0.05
P.V.C.	8.0	0.10
Polietileno	2.3	0.0004

\* Valores seguros a la máxima temperatura normal permisible y aplicables a los voltajes que trata este estudio.

en donde:  $C$  = Capacitancia para cables monopolares circulares, [ $\mu F/cm$ ]

$\epsilon$  = Permitividad relativa del aislante. (ver tabla 10)

$D_i$  = Diámetro externo del aislante, [cm]

$d_c$  = Diámetro del conductor, incluyendo pantalla si hubiere, [cm]

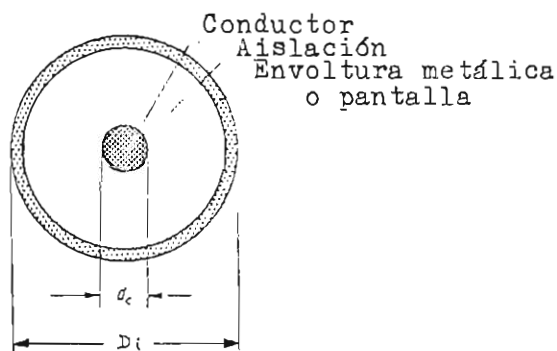


Fig. 10 Factores que influyen en la capacitancia de un cable monopolar.

La misma fórmula 41 puede usarse para conductores ovoides, si se emplea la media geométrica de los ejes mayor y menor, en lugar de  $D_i$  y  $d_c$  para el aislante y conductores, respectivamente.

La capacitancia para conductores tripolares circulares tiene por expresión:

$$C = \frac{0.0783 \epsilon}{\log_{10} 4 \frac{s^2}{d_c^2} \left[ \frac{(3d^2 - 4s^2)^3}{(27d^6 - 64s^6)} \right]} \quad (42)$$

(L7)

en donde:

C = Capacitancia para cables tripolares circulares, por unidad de longitud, [ $\mu\text{F}/\text{cm}$ ]

$\epsilon$  = Permitividad relativa del aislante. (ver tabla 10)

$d_c$  = Diámetro del conductor, [cm]

d = Diámetro exterior del cable o diámetro medio que incluya la envoltura o pantalla metálica, si hubiere (ver fig. 11), [cm]

S = Distancia interaxial de los conductores, [cm]

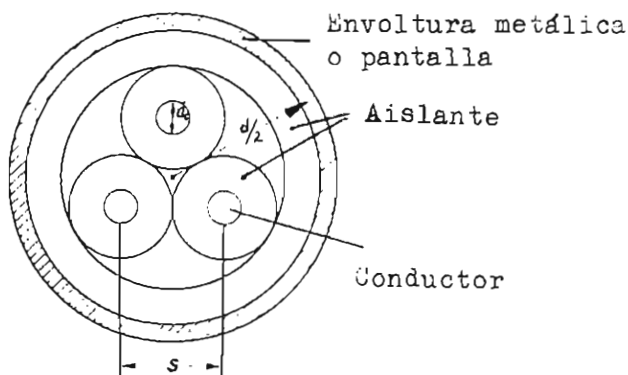


Fig. 11 - Factores que influyen en la capacitancia de un cable tripolar

### 3.15 Cálculo de las resistencia térmicas.

#### 3.15.1 Resistencia térmicas de cables.

Se había dicho que existe una analogía entre la Ley de flujo de calor y la ley de Ohm. También sus parámetros similares presentan esta analogía y así como la resistencia eléctrica es el efecto de la geometría de un conductor relacionada con la resistividad eléctrica, la re-

sistencia térmica también cumple este principio, aunque no a base de iguales fórmulas que la resistencia eléctrica; y como ésta es determinada a base de mediciones en muestras patrones. Su definición es la siguiente:

"La resistividad térmica de un material  $\rho_T$ , es la diferencia de temperatura en  $[\text{°C}]$ , entre caras opuestas de un cubo de  $l$   $[\text{cm}]$  de arista del material, que produce un flujo de calor de  $1$   $[\text{W}]$ " (L1)

Sus unidades son:  $[\text{°C cm/W}]$ , que algunos autores dan en llamarlas Ohmios térmicos por centímetro. Valores de esta resistividad para materiales comunes o relacionados con el cálculo de cables, se dan en la tabla 11.

TABLA 11.

RESISTIVIDAD TERMICA DE DIFERENTES MATERIALES  
( $\rho_T$ )

(L8-L11)

Material	( $\rho_T$ ) °C cm/W	Material	( $\rho_T$ ) °C cm/W
<b>Materiales Aislantes:</b>		<b>Materiales de Protección:</b>	
Papel en cables tipo sólido	600	Yute compuesto y materiales fibrosos	600
Papel en cables tipo llenos con aceite	500	Protección de caucho tipo "sandwich"	600
Polietileno	350	Policloropreno	550
Polietileno de cadenas cruzadas	350	Plásticos o elastómeros	**
Policlorovinil *	600	<b>Materiales para instalaciones en conductos:</b>	
Caucho-propileno-etileno	500	Concreto:	100
Caucho butílico	500	Fibra	480
Caucho natural	500	Asbestos	200
<b>Ambiente:</b>		Ladrillo	120
Aire	4000	Policlorovinil	700
Suelos	***	Polietileno	350

\* Este valor para el P.V.C. es promedio, porque su resistividad térmica varía mucho según el tipo de compuesto.

\*\* Para estos materiales usados como revestimiento de protección, su resistividad térmica es la misma que cuando se los emplea como aislantes.

\*\*\* Valores promedios de resistividad térmica de suelos se dan en la tabla 15.

La forma de cálculo de las resistencias térmicas varía para cada parte constitutiva de un cable y se la expresa en los cuadros 6, 7 y 8, que contienen además, los diferentes factores involucrados en el cálculo.

### 3.15.2 Resistencia térmica externa a los cables.

Su cálculo se lo realiza como se indica en los cuadros 9 y 10. El cuadro 9 hace referencia a  $\Delta\theta_s$  o exceso de temperatura de la superficie del cable sobre la ambiente; a continuación se presenta la forma de calcularlo:

$\Delta\theta_s$ : Método de cálculo. (L11)

Su evaluación se la realiza por medio de fórmulas y diagramas; su expresión más general es la siguiente (ec. 43), en la cual los símbolos tienen el significado dado en las págs. 57, 58, el cuadro 9 y la fig. 19.

$$(1+\lambda_1+\lambda_2)(\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s) = \pi D_c h (\Delta\theta)^{5/4} \left[ \frac{T_1}{n} + T_2(1+\lambda_1) + T_3(1+\lambda_1+\lambda_2) \right] \quad (43)$$

en donde:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[ \left( \frac{1}{1+\lambda_1+\lambda_2} - \frac{1}{2} \right) - \frac{n \lambda_2 T_2}{1+\lambda_1+\lambda_2} \right] \quad (43.1)$$

El procedimiento es el siguiente:

1º) Calcular el valor de  $\frac{(\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$  usando la fórmula:

$$\frac{(\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} = \frac{\pi D_c h}{(1+\lambda_1+\lambda_2)} \left[ \frac{T_1}{n} + T_2(1+\lambda_1) + T_3(1+\lambda_1+\lambda_2) \right] \quad (43.2)$$

2º) El valor anteriormente calculado, ubicarlo en la ordenada de la fig. 19. En este mismo gráfico hallar la curva que corresponde al valor:  $\Delta\theta + \Delta\theta_d = \text{constante}$ .

3º) Con los valores anteriormente localizados en la fig. 19, obtener la abcisa  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ .



CUADRO 6.

RESISTENCIA TERMICA POR UNIDAD DE LONGITUD  
ENTRE UN CONDUCTOR Y LA ENVOLTURA,  $T_1$ .

Caso	Tipo de Cable	Resistencia Térmica $T_1$	Caso	Observaciones
1.	Cables Monopolares y del Tipo S.L. y S.A., y en Tubería.	$T_1 = 0.366 \rho_r \left[ 1 + \frac{2 t_1}{d_c} \right]$	1.	Para cables en tubería la Resistencia térmica es la del aislante de cada núcleo, entre el conductor y la pantalla.
2.	Cables Tripolares con Cinturón.	$T_1 = \frac{\rho_r}{2 \pi} G$	2.1 2.2	Cables con conductores circulares: G: según la fig.12 Cables con conductores sectoriales: $G = F_1 6.9 \log_{10} \left( \frac{d_a}{2 r_1} \right)$ $F_1 = 1 + \frac{3 t}{2 \pi (d_x + t) - t}$
3. 3.1 3.2	Cables Tripolares Tipo Apantallados: Con Conductores Circulares Con conductores Sectoriales	$T_1 = K \frac{\rho_r}{2 \pi} G$	3.1 3.2	K: función de $t_1$ y $d_o$ , según la fig: 43 G: Idem al caso 2.2 K: función de $t_1$ y $d_x$ , según la fig: 44 G: Idem al caso 2.2
4. 4.1 4.2	Cables llenos con Aceite: Sin rellenos ni conductos metálicos. Con conductos metálicos para el aceite.	$T_1 = \frac{\rho_r}{2 \pi} G$ $T_1 = T_o + \frac{T_{d_w} T_{r1}}{T_{d_w} + T_{r1}}$	4.1 4.2	Similar al caso 2. $T_{d_w} = K_{d_w} \left( \frac{a+b}{a} \right) \left[ (0.576 \frac{r_1}{a}) - 0.6 \right]$ $K_{d_w} = 0.48 \text{ } ^\circ\text{C cm/W}$ para el Aluminio $= 2.20 \text{ } ^\circ\text{C cm/W}$ para el Acero

$F_1$  = Factor que depende del tamaño de las partes constitutivas del Cable; para el tamaño usual de conductores y aislamiento, puede tomarse como igual a la unidad; se aplica la fórmula para conductores pequeños y espesor grande de aislamiento.

G = Factor Geométrico.

$K_{d_w}$  = Resistividad térmica del forro metálico que forma el conducto de aceite, [°C cm/W]

$T_{d_w}$  = Resistencia Térmica de los conductos de aceite, [°C cm/W]

$T_{r1}$  = Resistencia térmica del material de relleno y del apantallamiento entre el dieléctrico y la envoltura. Es igual a la resistencia térmica interna de un Cable tripolar, apantallado, de las mismas dimensiones que el Cable dado, pero sin conducto de aceite y restado  $T_o$  de un Cable monopolar, [°C cm/W]

$T_o$  = Resistencia térmica interna de un solo Cable apantallado, monopolar, de las mismas dimensiones que cada conductor aislado con papel y apantallado del Cable tripolar relleno de aceite, [°C cm/W]

a = Ancho del forro metálico, [cm]

b = Espaciamiento entre espiras sucesivas, [cm]

$d_a$  = Diámetro externo del cinturón de aislamiento; en el caso 3.2 corresponde al diámetro de una circunferencia que circunscribe totalmente al núcleo, [cm]

$d_c$  = Diámetro del Conductor, [cm]

$d_x$  = Diámetro de un conductor cableado circular que tenga la misma área transversal que el conductor sectorial, [cm]

e = Espesor del forro metálico, [cm]

r = Radio de la circunferencia que circunscribe a los conductores; en el caso 4.2, radio externo de cada pantalla individual, [cm]

t = Espesor del aislamiento entre conductores, [cm]

$t_1$  = Espesor del aislante entre el conductor y la envoltura, [cm]

$\rho_r$  = Resistividad térmica del aislante, [°C cm /W]

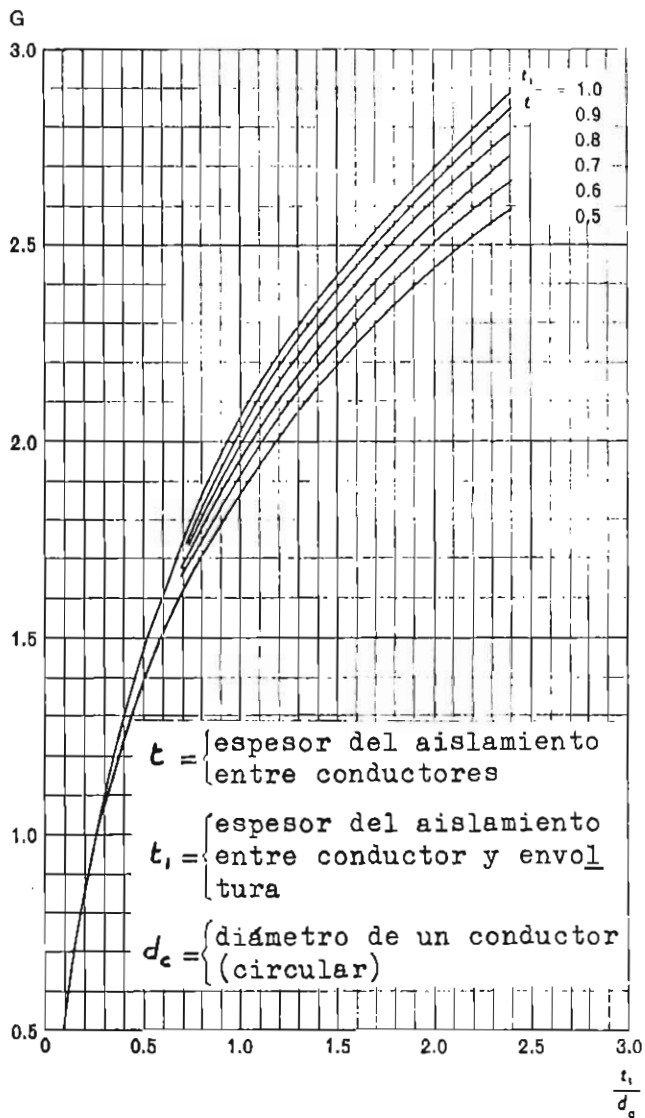


Fig. 12 - Factor geométrico  $G$  para cables tripolares con cinturón y conductores circulares

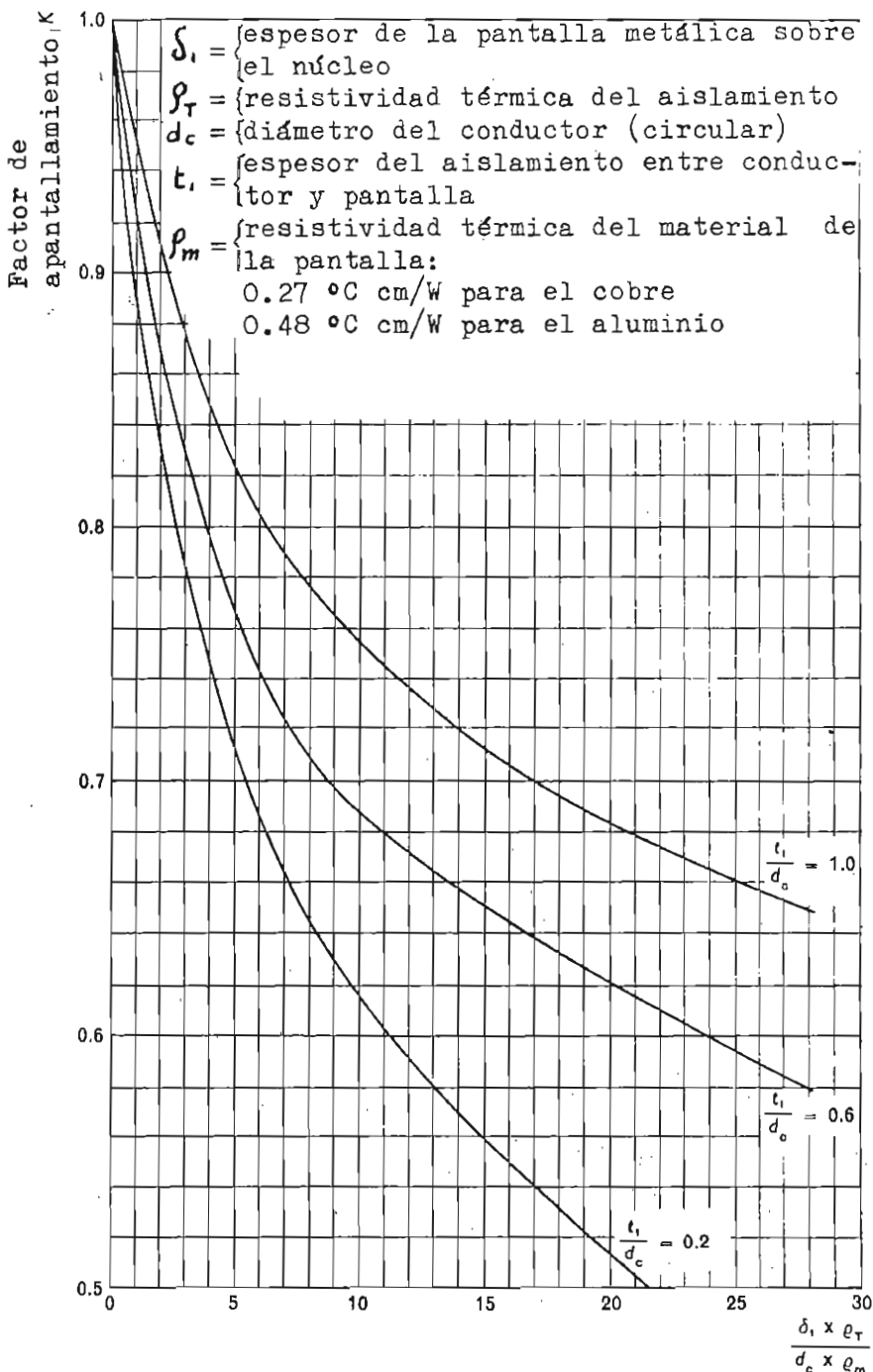


Fig. 13 - Resistencia térmica de cables tripolares apantallados, con conductores circulares, comparada con la del cable no apantallado correspondiente

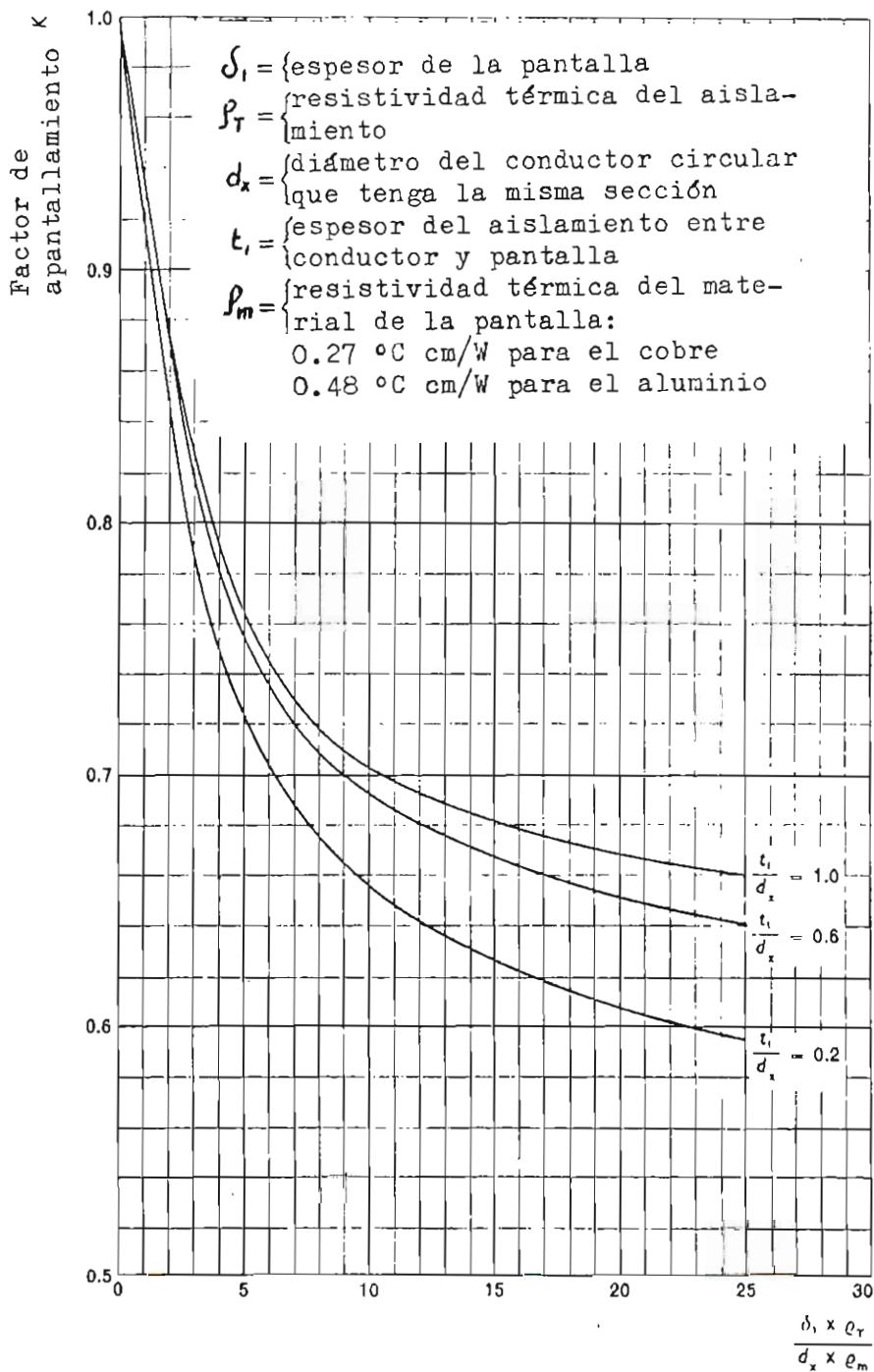


Fig. 14 - Resistencia térmica de cables tripolares apantallados, con conductores sectoriales, comparada con la del cable no apantallado correspondiente

CUADRO 7. RESISTENCIA TERMICA POR UNIDAD DE LONGITUD DEL FORRO ENTRE ENVOLTURA Y ARMADURA,  $T_2$

(L11)

Caso	Tipo de Cable	Resistencia Térmica $T_2$
1.	Cables monopolares y tripolares con envoltura metálica común.	$T_2 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left( \frac{D_a}{D_s} \right)$
2.	Cables tipo S.L. y S.A.	$T_2 = \frac{\rho_T}{\delta \pi} \bar{G}$
3.	Cables en Tubería	$T_2 = \frac{0.366}{3} \rho_T \log_{10} \left( \frac{D_a}{D_s} \right) + \frac{100 A}{1 + (B + C \theta_m) D_e} (*)$

$D_a$  = Diámetro externo del revestimiento; en el caso 3 para conductores ovals deberá usarse la media geométrica de los ejes mayor y menor, [cm]  
 $D_s$  = Diámetro interno del revestimiento; en el caso 3 para conductores ovals deberá usarse la media geométrica de los ejes mayor y menor, [cm]  
 $\bar{G}$  = Factor geométrico dado en la fig. 15.  
 $\rho_T$  = Resistividad térmica del aislante, [ $^{\circ}C$  cm/W]

(\*) Este sumando es válido para diámetros de cable entre 7.5 y 12.5 cm. El significado de sus símbolos se da al pie del cuadro 10.

CUADRO 8. RESISTENCIA TERMICA DEL REVESTIMIENTO EXTERIOR DEL CABLE,  $T_3$

(L11)

Tipo de cable	Resistencia Térmica $T_3$
Para todos los cables (*)	$T_3 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left( \frac{D_e}{D_a} \right)$

$D_a$  = Diámetro interno del revestimiento exterior del cable, [cm]  
 $D_e$  = Diámetro externo del revestimiento exterior del cable, [cm]  
 $\rho_T$  = Resistividad térmica del revestimiento, [ $^{\circ}C$  cm/W]

(\*) se estima que normalmente este revestimiento tiene la forma de capas concéntricas; para cables en tubería se desprecia la resistencia térmica del tubo metálico.

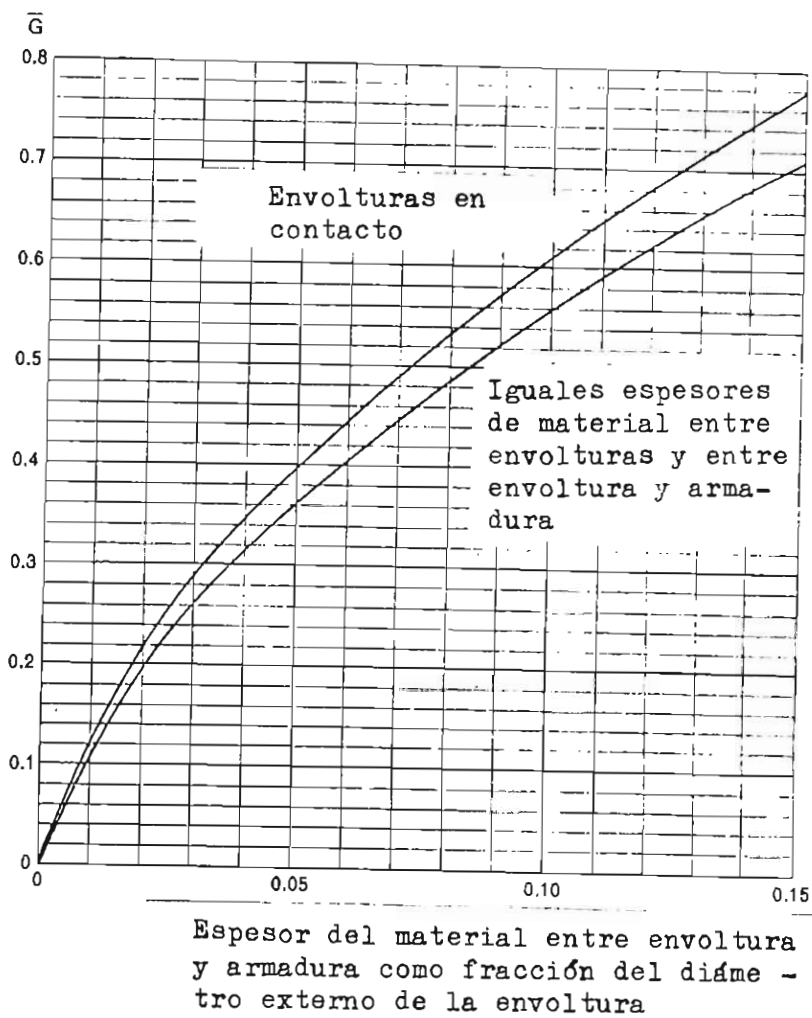


Fig. 15 - Factor geométrico  $\bar{G}$  para la obtención de la resistencia térmica por núcleo del material de relleno entre envolturas y armadura de cables con cada núcleo separado, con envoltura de plomo o aluminio

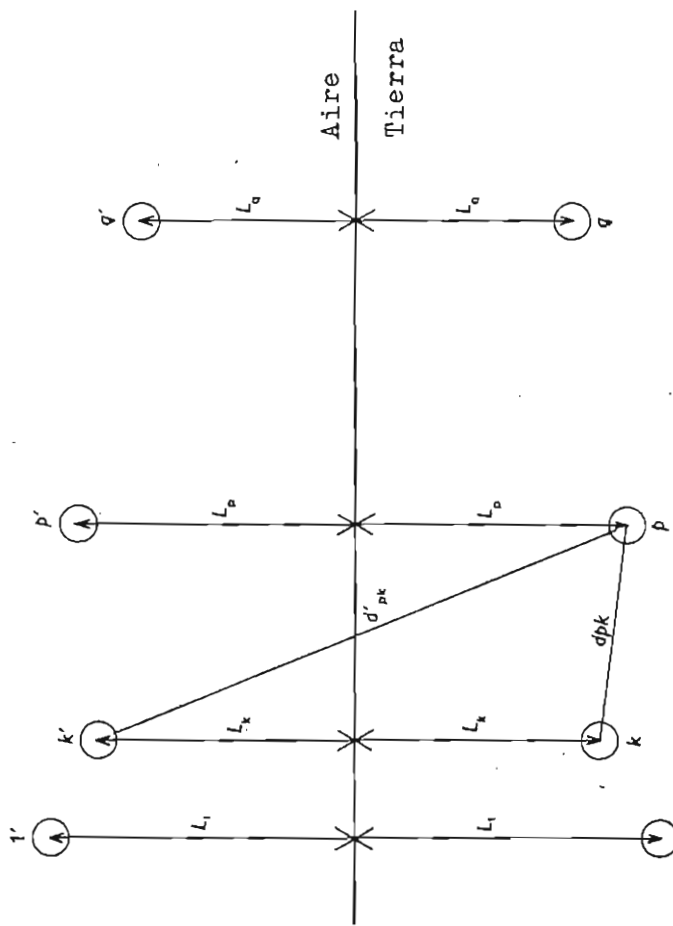
CUADRO 9.

RESISTENCIA TÉRMICA POR UNIDAD DE LONGITUD ENTRE LA SUPERFICIE DEL CABLE Y EL MEDIO AMBIENTE,  $T_4$

(L.11)

Caso	Tipo de Cable e Instalación	Resistencia Térmica $T_4$	Caso	Observaciones
1.	Cables Aéreos	$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta \theta_s)^{1/4}}$	1.	$\Delta \theta_s$ : Anteriormente se da un método de cálculo, pág 65.
2.	Un solo cable aislado, bajo tierra, o del tipo en tubería.	$T_4 = 0.366 \rho_T \log_{10} (u + \sqrt{u^2 - 1})$	2.	Cuando $u \geq 10$ , el valor entre paréntesis del logaritmo es $(2u)$
3.	Cables enterrados sin estar en contacto entre ellos. (Grupo de q cables):	(3.1) $\Delta \theta_p = \sum_{i=1}^{q+1} \Delta \theta_{k,p}$ $T_4 = 0.366 \rho_T \log_{10} (u + \sqrt{u^2 - 1})$	3.1	$\Delta \theta_{k,p} = 0.366 \rho_T \log_{10} \left( \frac{d_{k,i}}{d_{p,i}} \right)$ Para el cable pº: $\Delta \theta_p$ debe restarse del valor de $\Delta \theta$ en la ec. 39 y $T_4$ se calcula como en el caso 2. En el sumatorio se excluye el término $\Delta \theta_{p,p}$ .
3.1	De diferente construcción y cargados desigualmente.			
3.2	Idénticos y con cargas iguales.	(3.2) $T_4 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \prod_{i=1}^{q+1} \left( \frac{d_{k,i}}{d_{p,i}} \right) \right\}$	3.2	Para el cable pº: en el producto - se excluye el término $\left( \frac{d_{p,i}}{d_{p,i}} \right)$
3.2.1	En el caso de tres cables idénticos y cargados igualmente.	(3.2.1) $T_4 = 0.366 \rho_T \left[ \log_{10} (2u) + \log_{10} \left( \frac{u^2 + d_{k,i}^2}{3 \cdot d_{p,i}^2} \right) \right]$	3.2.1	Considera los cables dispuestos sobre un plano horizontal e igualmente espaciados.
4.	Cables enterrados, en triángulo y en contacto entre ellos.	$T_4 = 0.366 \rho_T \left[ \log_{10} (2u) + 2 \log_{10} u \right]$	4.	Considera cables cargados igualmente y el vértice del triángulo puede estar arriba o abajo.
5.	Cables enterrados en canales:	(5.1)	5.1	Se considera que las características térmicas del canal y la arena son similares a las del suelo.
5.1	Rellenos con arena	Idem a los casos 3 y 4.		
5.2	De cualquier tipo, abiertos a ras del suelo y expuestos al aire	(5.2) $\Delta \theta_{c,r} = \frac{W_{t,c}}{3 \bar{p}}$ $T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta \theta_s)^{1/4}}$	5.2	Fórmula empírica, bajo investigación. $\Delta \theta_{c,r}$ se suma a la ambiente y $T_4$ se calcula como en el caso 1.
6.	Cables en conductos.	$T_4 = T_4'' + T_4''' + T_4''''$	6.	Para diámetros de cables entre 2.5 y 10 cm. Los componentes de $T_4$ y su significado se dan en el cuadro 10.

$D_e$  = Diámetro externo del cable, [cm]  
 $L$  = Distancia desde la superficie de la tierra al eje del cable; en el caso de cables tipo tubería se mide al centro de ésta, [cm]  
 $u = \frac{L}{r_c}$   
 $W_{t,c}$  = Potencia total disipada en el canal por metro de longitud, [W/m]  
 $d_{k,i}$  = Distancia desde el centro del pº cable al del kº, [cm]  
 $d_{p,i}$  = Distancia desde el centro del pº cable al de la imagen del cable k (ver fig. 16), [cm]  
 $h$  = Coeficiente de disipación del calor (obtenido del diagrama de la fig. 17) según la superficie del cable sea negra o brillante. Los cables revestidos de yute se los considera como negros; sin revestimiento de yute pero con cubierta de plomo liso o armado, o con envoltura termoplástica, tendrán un valor intermedio entre el negro y el brillante. Tres cables sobre apoyos no continuos, corresponden al caso 2 del diagrama y sobre plataforma continua, al caso 3. [W/cm² (°C)⁻¹]  
 $\bar{p}$  = Parte del perímetro del canal que tiene una disipación efectiva del calor; se excluye la parte expuesta a la luz del sol, [m]  
 $q$  = Número de cables del grupo analizado.  
 $r_c$  = Radio externo del cable; en el caso de cables tipo tubería corresponde al radio externo del tubo, [cm]  
 $\Delta \theta_{k,p}$  = Elevación de la temperatura en la superficie del cable pº, producida por la potencia  $W_k$  [W/cm], disipada en el cable kº, [°C]  
 $\Delta \theta_p$  = Elevación de la temperatura de la superficie del pº cable sobre la ambiente, [°C]  
 $\Delta \theta_s$  = Exceso de la temperatura de la superficie del cable sobre la ambiente (ver método de cálculo), [°C]  
 $\Delta \theta_{a,r}$  = Elevación de la temperatura del aire en el canal sobre la ambiente, [°C]  
 $\rho_T$  = Resistividad térmica del suelo, [°C cm/W]



Cable No. 1

Fig. 16 - Diagrama de un grupo de  $q$  cables y su reflexión en la superficie tierra - aire



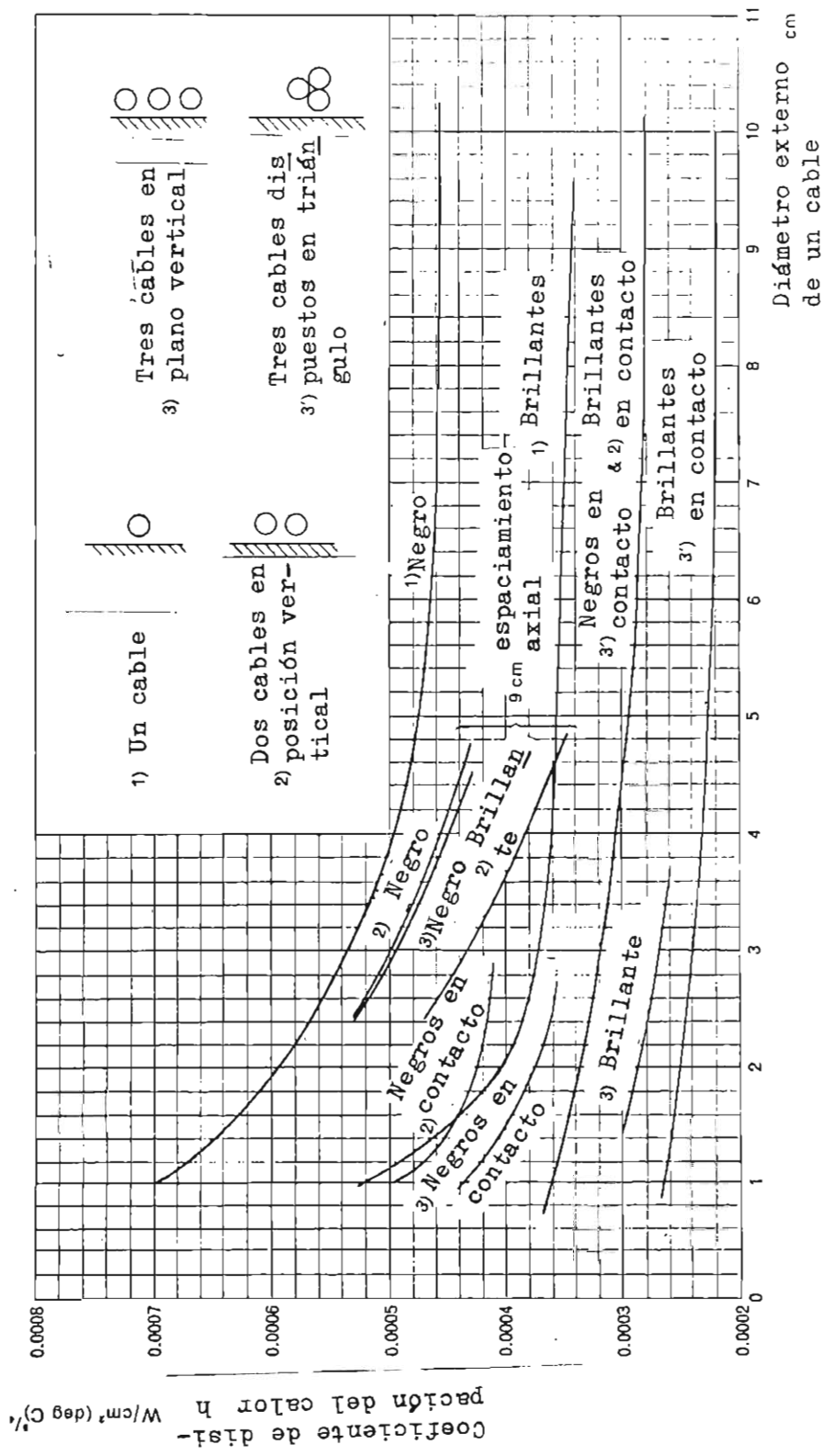


Fig. 17 - Coeficientes de disipación del calor para cables en el aire

CUADRO 10.

PARTES CONSTITUTIVAS DE LA RESISTENCIA  
TÉRMICA  $T_4'$ ,  $T_4''$ ,  $T_4'''$  y  $T_4''''$

(L11)

Significado Físico	Expresión Matemática	Observaciones
Resistencia Térmica entre el Cable y el Conducto.	$T_4' = \frac{100 A}{t + (B + C \theta_m) D_e}$	Para diámetros de Cable de 2.5 a 10 cm., los valores de A, B y C dependen de la instalación y se dan en la tabla 12.
Resistencia Térmica del Conducto en sí mismo.	$T_4'' = 0.366 \beta_T \log_{10} \left( \frac{D_o}{D_d} \right)$	$\beta_T = 0.$ para conductos metálicos.
Resistencia Térmica externa del Conducto o Tubería.	$T_4'''$ : Se calcula como en los puntos 1 a 4 - del cuadro 9.	En las fórmulas del cuadro 9 el radio exterior del cable se reemplaza por el del conducto o tubería. Cuando el conducto está rodeado por concreto, se calcula como que su medio exterior es totalmente de concreto, sumándose luego: $\Delta T_4'''' = 0.366 N (\beta_c - \beta_s) \log_{10}(\bar{U})$

A, B, C = Constantes que dependen de la instalación; ver tabla 12 .  
 $D_d$  = Diámetro interno del conducto, [cm]  
 $D_e$  = Diámetro externo del cable [cm]; cuando los cables son del tipo en tubería, viene a ser el diámetro equivalente del grupo de núcleos, en la siguiente forma:  
 - 2 núcleos:  $D_e = 1.65$  diámetro externo de un núcleo, [cm]  
 - 3 núcleos:  $D_e = 2.15$  " " " " " " [cm]  
 - 4 núcleos:  $D_e = 2.50$  " " " " " " [cm]  
 $D_o$  = Diámetro externo del conducto, [cm]  
 $L_c$  = Profundidad desde la superficie del suelo al centro del conducto, [cm]  
 $N$  = Número de cables cargados dentro del conducto.  
 $U = \frac{L_1}{r_b}$   
 $\bar{U} = (U + \sqrt{U^2 - 1})$   
 $r_b$  = Radio equivalente de la cubierta de concreto, [cm]. Está dado por:  $\log_{10} r_b = \frac{1}{2} \log_{10} \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \log_{10} \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \log_{10} \frac{x}{\sigma^2}$   
 $x$  y  $y$  son los lados más corto y largo de la cubierta de concreto (ver fig. 18) sin importar su posición, [cm]  
 $\theta_m$  = Temperatura media del relleno entre el cable y el conducto. Debe asumirse un valor y repetir el cálculo si fuese necesario modificar dicho valor, [°C]  
 $\beta_c$  = Resistividad térmica del concreto alrededor del conducto, [°C cm/W]  
 $\beta_s$  = Resistividad térmica del suelo alrededor del conducto, [°C cm/W]  
 $\beta_T$  = Resistividad térmica del material, [°C cm/W]

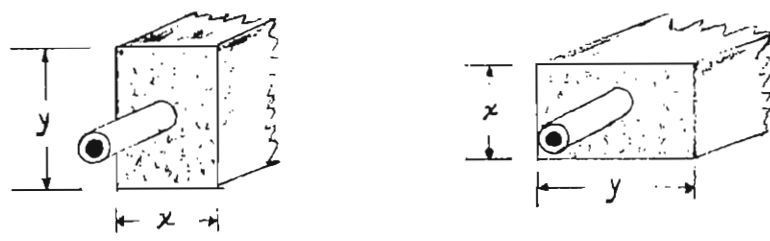


Fig. 18 - Revestimiento de concreto de cables en diferentes posiciones.

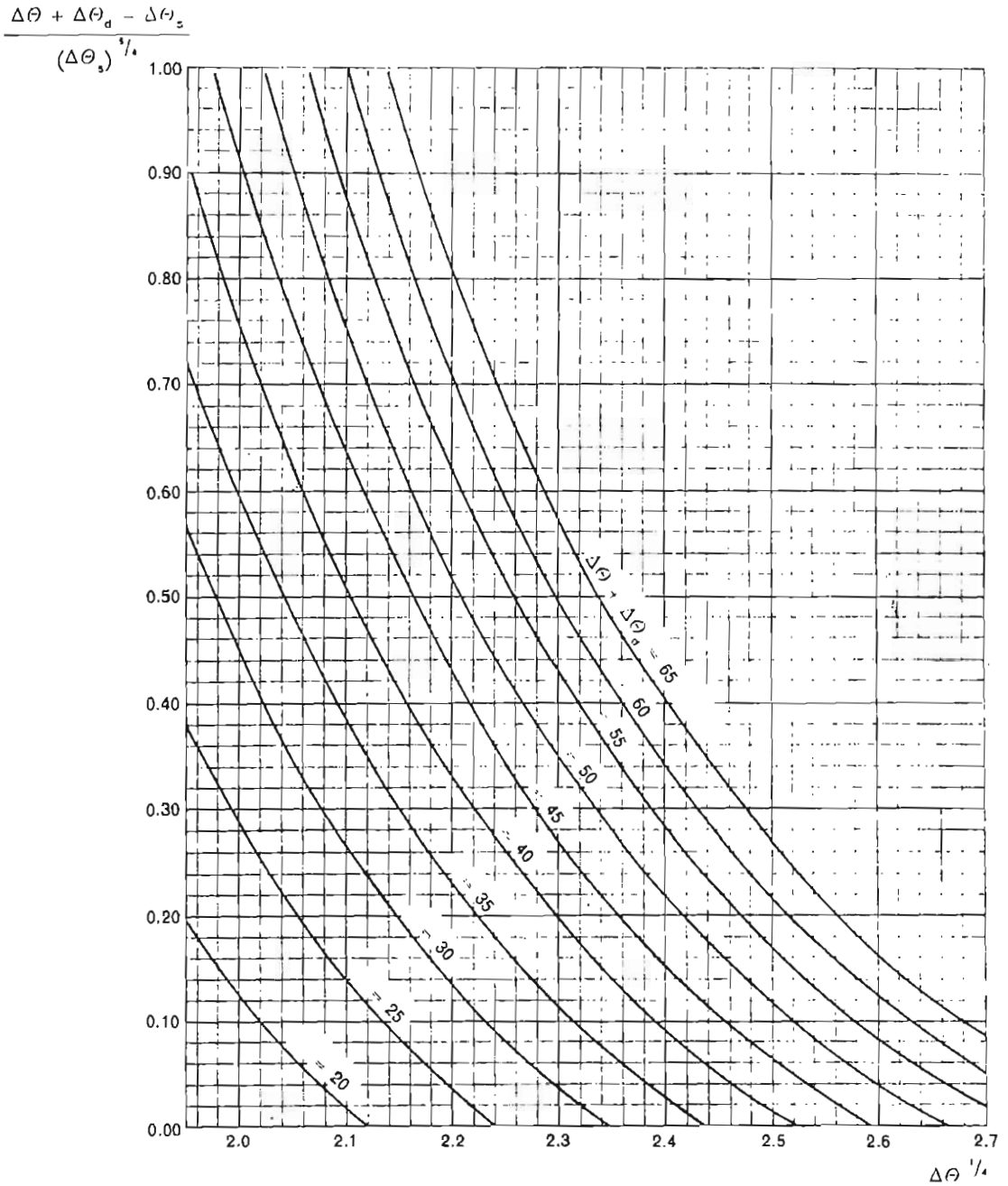


Fig. 19 - Gráfico para el cálculo de la resistencia térmica externa  $T_4$  de cables en el aire

TABLA 12.

VALORES DE LAS CONSTANTES A, B y C

(L11)

Tipo de instalación	A	B	C
En conducto metálico . . . . .	5.2	1.40	0.011
En conducto de fibra, en el aire . .	5.2	0.83	0.006
En conducto de fibra, en concreto . .	5.2	0.91	0.010
En conducto de asbesto-cemento, - en el aire. . . . .	5.2	1.20	0.006
En conducto de asbesto-cemento, - en concreto . . . . .	5.2	1.10	0.011
En conducto de ladrillo . . . . .	1.87	0.28	0.0036

3.15.3 Otros factores.

La resistividad térmica de los suelos, así como la ambiente, - que puede ser la del suelo para cables subterráneos, deberán ser obtenidas en el sitio de instalación. Las temperaturas máximas permisibles, para los conductores, deberán tomarse las proporcionadas por los fabricantes. Actualmente la normalización de estos valores se halla bajo estudio por parte de la Comisión Electrotécnica Internacional; hasta tanto se obtengan estos datos, la tabla 13 puede suplir esta deficiencia.

En el país no ha sido usual considerar los factores antes anotados, para realizar la selección de cables, sino únicamente confiar en los - datos de catálogos; por este motivo se carece de datos sobre resistividad térmica de suelos. Tratando de llenar este vacío, en la parte 4.2, se presentan resultados obtenidos en otros países y que pueden servir como datos comparativos o como punto de partida para investigar estos aspectos en nuestro medio.

#### 4.- CONDICIONES DE TRABAJO DE LOS CABLES.

En el capítulo anterior se han visto las características propias del cable. En el presente capítulo se trata de realizar una coordinación con las características de la instalación, poniendo especial atención en la practicidad de los métodos descritos, en tal forma que se facilite los cálculos que deban realizarse o que aclaren ciertos puntos específicos.

##### 4.1 Capacidad de conducción de corriente de cables, limitada por la temperatura.

Los fabricantes de cables usualmente se rigen por las normas y tomando en cuenta las condiciones ambientales y técnicas de su país. Desde este punto de vista, la corriente de régimen permanente que se da en tablas, no ha considerado ciertos parámetros que pueden ser diferentes en otros medios. Por este motivo, los valores dados por los fabricantes, dentro del estudio general que se está realizando, únicamente servirán como una referencia. Cuando se tengan datos concretos sobre temperatura de la tierra en el país, estos datos pueden aprovecharse por medio de la transformación indicada en la ecuación 44, la explicación es la siguiente:

La elevación permisible de la temperatura de un cable está determinada por la temperatura máxima del conductor y la temperatura ambiente (desechándose otras fuentes de calor), pero como la medida de esta última no es posible obtenerla en cada caso, frecuentemente deberá ser estimada (a base de los datos que se disponga). Analizando la ecuación 39, ésta puede ser simplificada, dejándola como una función de temperaturas, con lo cual la corriente de régimen permanente para una determinada temperatura ambiente, puede aprovecharse para deducir esta corriente bajo otras condiciones de temperatura ( $I_u$ ), aplicando la siguiente ecuación simplificada:

$$I_u = I_n \left[ \frac{\Delta \theta_u}{\Delta \theta_n} \right]^{1/2} \quad (44)$$

en donde:  $\Delta \theta_u = \Delta \theta_n + \theta_n - \theta_u$  [°C]

TABLA 13.

LIMITES DE TEMPERATURA EN °C PARA CABLES  
CON CINTURON, APANTALLADOS Y MULTIPOLARES  
DEL TIPO S.L. O S.A.

(L7)

Voltaje del sistema y tipo de cable	Instalados en el aire			En conductos		
	Blindaje de Pb		Blindaje de Al	Blindaje de Pb		Blindaje de Al
	Armados	No armados.	Armados o no.	Armados	No armados.	Armados o no.
1.1 KV Monopulares Multipolares con cinturón	--	80	80	--	60	80
	80	80	80	80	60	80
3.3 y 6.6 KV Monopulares Tripolares con cinturón	--	80	80	--	60	80
	80	80	80	80	60	80
11 KV Monopulares Tripolares con cinturón Tripolares apantallados	--	70	70	--	50	70
	65	65	65	65	50	65
	70	70	70	70	50	70
22 KV Monopulares Tripolares con cinturón Tripolares apantallados Tripolares tipo S.L. o S.A.	--	65	65	--	50	65
	55	55	--	55	50	--
	65	65	65	65	50	65
	65	--	65	65	--	65

$I_n$  = Corriente de régimen bajo condiciones normales, [A]

$\Delta\theta_n$  = Elevación de temperatura bajo condiciones normales, [°C]

$\theta_n$  = Temperatura para la cual fue calculada la corriente normal  $I_n$ , [°C]

$\theta_v$  = Temperatura ambiente actual, [°C]

$\Delta\theta_v$  = Elevación permisible de temperatura para las nuevas condiciones, [°C]

$\Delta\theta_n$  y  $\Delta\theta_u$  consideran las pérdidas en la aislación y forros que cubren los conductores, esto es:  $\Delta\theta_n = \Delta\theta - w_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]$  (ver ec. 39)

Según lo expuesto, el parámetro que reviste la mayor importancia es la máxima temperatura que puede alcanzar un conductor determinado. Su valor, en definitiva, determinará la capacidad de corriente de un cable para cualquier sitio en que se lo instale. Como ejemplo se presenta la tabla 13 que contiene valores según normas británicas. Por otra parte, cuando se tiene una temperatura base de referencia  $\theta_n$ , la fórmula 44 puede tabularse. A continuación se presenta la tabla 14, sobre la base  $\theta_n = 20 [^{\circ}\text{C}]$ .

TABLA 14.

FACTORES DE CORRIENTE DE RÉGIMEN  
POR TEMPERATURA AMBIENTE (L7)

Máxima temperatura permisible del conductor [°C]	Temperatura ambiente, [°C]											
	Aislamiento de											
	PL	PA	PL	PA	PL	PA	Plástico y papel					
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
<b>Para cables en la tierra</b>												
85	1.04	1	0.96	0.92	0.88	0.83	0.78	0.73	0.68	0.62		
80	1.04	1	0.96	0.91	0.87	0.82	0.76	0.71	0.65	0.58		
70	1.05	1	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45		
65	1.05	1	0.94	0.88	0.82	0.75	0.67	0.58	0.47	0.33		
60	1.06	—	0.93	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50	0.35	—		
55	1.07	—	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53	0.38	—	—		
<b>Para cables en el aire</b>												
85	1.13	—	1.09	—	1.04	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74	0.67
80	1.14	1.05	1.09	1.05	1.05	1	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63
70	1.17	1.06	1.12	1.06	1.06	1	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50
65	1.19	1	1.13	1	1.07	1	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53	0.38
60	1.22	1	1.15	1	1.08	1	0.91	0.82	0.71	0.58	0.41	—
55	1.26	—	1.18	—	1.10	—	0.89	0.77	0.63	0.45	—	—
<p>Nomenclatura: PL = plásticos; PA = papel.</p> <p>Para cables aislados con 'papel impregnado', no es posible incrementar la corriente de régimen a pesar de una temperatura ambiente baja.</p>												

En la misma forma que en el caso anterior puede calcularse la elevación de temperatura cuando la corriente circulante es diferente de la nominal, en este caso la ecuación aplicable se deriva de la anterior y es la siguiente:

$$\Delta \Theta_{11} = \Delta \Theta_n \left[ \frac{I_n}{I_u} \right]^2 \quad (45)$$

#### 4.2 Resistividad térmica del suelo.

No ha sido usual en el país realizar medidas de la resistividad térmica del suelo, en tal forma que no es posible hacer una referencia directa a valores reales. Por esto se realiza a continuación un estudio de tipo general a base de experiencias que sobre estos valores se han tenido en otros países.

Pruebas llevadas a cabo en Alemania durante muchos años indican que la resistividad de los suelos  $\rho_e$  pueden tener valores entre 50 y 100 [°C cm/W] para terrenos fangosos y arenosos con pequeñas cantidades de arcilla, respectivamente.

Impurezas como cenizas, basura, materiales orgánicos, etc., pueden hacer que estos valores lleguen hasta los 500 [°C cm/W]. Para instalaciones de servicio público, como es el caso de redes de distribución, se recomienda un valor mínimo de 100 [°C cm/W] a una profundidad de 70 [cm]. En Inglaterra se utilizan dos valores:  $\rho_e = 90$  [°C cm/W] a una profundidad de 100 [cm] en forma general, recomendándose no bajar de este valor si no se realizan medidas a intervalos regulares en la ruta del cable, o donde el terreno sea flojo o tenga buenos drenajes, o si la profundidad de instalación es menor; este valor debe subirse para suelos arenosos, con grava o ricos en yeso. Se recomienda un valor de  $\rho_e = 120$ , para sitios en donde los cables tengan cargas grandes durante el tiempo seco, y en algunas ocasiones  $\rho_e = 150$ , en terrenos muy bien drenados y con una constitución de arena, roca o caliza, así como en aquellos sitios con circunstancias muy desfavorables como son suelos extremadamente secos en el período de carga máxima.



En los EE. UU. los valores usuales son alrededor de 80 para suelos permanentemente húmedos, de 90 a 100 para húmedos y de 120 para secos. Datos más precisos se dan en la tabla 15.

TABLA 15

RESISTIVIDAD TÉRMICA DE SUELOS

Tipo de suelo	Resistividad térmica [°C cm/W]
Seco (promedio)	130
Húmedo (promedio)	70
Arena seca	120
Arena húmeda	50
Arcilla seca	140
Arcilla húmeda	80

(L8)

Dadas las condiciones de nuestro medio y la carencia de medidas al respecto, convendría utilizar una resistividad térmica del suelo más - bien alta, hasta tener datos reales, lo que permitiría poseer una re - serva de la capacidad del cable para el caso de sobrecargas o crecimiento del servicio.

4.2.1 Recubrimiento del suelo.

Es importante el material que recubre el suelo, puesto que una capa de asfalto o cemento protegen la evaporación de la humedad en tiempo seco, conservando una resistividad térmica más baja, aunque la temperatura del suelo casi no varíe (1 a 2 °C) según experiencias en los EE. UU.

Es así mismo importante el calor desarrollado por el propio cable, que tiende a secar su ambiente adyacente, al hacer que la humedad se - desplace en el sentido del flujo de calor, produciéndose un aumento de la resistencia térmica del suelo, así como un incremento de su temperatura. En Alemania se acostumbra usar una temperatura ambiente de 20 [°C] para el suelo y en Inglaterra entre los 15 y 20 [°C]. En el país tampo-

co se tienen datos precisos al respecto y para realizar un cálculo bastante exacto sería conveniente obtener medidas apropiadas. Como dato - para comparación o estimación se presenta la tabla 16 con temperaturas aproximadas del suelo en varios países, cuyo valor medio se aproxima a 25 [°C].

TABLA 16

TEMPERATURAS APROXIMADAS DEL SUELO  
EN VARIOS PAISES DEL MUNDO

País o lugar	Temperatura aproximada [°C]
Africa	25
Argentina	25
Australia	25 - 27
China	25
Egipto	25
India	25 - 35
Inglaterra	15 - 20
Norteamérica	20
Nueva Zelanda	15
Turquía	20

(L5)

Si los cables fuesen instalados en el aire, los datos son más completos en el país, o su estimación es más fácil, por lo cual este punto no se discute más.

4.2.2 Capacidad de conducción de corriente al variar la resistencia térmica del suelo.

La resistencia térmica del suelo es función de su resistividad, por lo cual a continuación se verá el método para simplificar el cálculo de la corriente de régimen para cables enterrados, cuyo ambiente - tenga diferentes valores de resistividad del suelo ( $\rho_T$ ), o lo que en la práctica serán diferentes resistencias térmicas ( $T_4$ ).

Según la ec. 39, la resistencia térmica del medio ambiente tiene - decisiva importancia en la corriente de régimen del cable. Al adecuar convenientemente esta ecuación, la corriente de régimen permanente puede expresarse por medio de la ecuación siguiente:

$$I = \left[ \frac{\Delta \theta'_k}{n R_w (T'_k + T_4)} \right]^{1/2} \quad (46)$$

en la que:  $\Delta \theta'_k = \Delta \theta - \Delta \theta_k$

$\Delta \theta$  = Elevación de la temperatura del conductor sobre la ambiente, [°C]

$\Delta \theta_k = W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n (T_2 + T_3) \right]$ , [°C]

$n$  = Número de conductores de corriente.

$R_w = R (1 + \lambda_1 + \lambda_2)$ , [ohm]

$T'_k = \frac{T_1' + (1 + \lambda_1) T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} + T_3$ , [°C cm/W]

$T_1' = \frac{T_1}{n}$ , [°C cm/W]

Nota: El significado de los símbolos está dado en la pág. 57 y 58

Si cualquier condición de la resistencia térmica del medio ambiente - se considera como normal y a la expresión de la ec. 46 se le da el sub índice n, la corriente de régimen  $I_t$  bajo una nueva condición ambiental estará dada por:

$$I_t = I_n \left[ \frac{T'_k + T_{4n}}{T'_k + T_4} \right]^{1/2} \quad (47)$$

El cálculo de esta nueva corriente de régimen puede abreviarse cuando se dispone de tablas que proporcionen el factor correspondiente al radical de la ec. 47. A continuación se presenta la tabla 17, para cables monopolares y multipolares, en la que  $T'_k$  y  $\rho_T (= 100 \text{ °C cm/W})$ , siguen normas alemanas, para diferentes valores de resistividad térmica del suelo  $\rho_T$ .

TABLA 17. RESISTIVIDAD TERMICA DEL SUELO

CABLES MULTIPOLARES								
Voltaje nominal [kV]	Area transversal [mm <sup>2</sup> ]	Resistividad Térmica, [°C cm/W]						
		70 <sup>1)</sup>	100	120	150	200	250	300
Factor de Régimen								
CABLES MULTIPOLARES								
Cables tripolares, aislados con P.V.C.								
3.5/6 y 5.8/10	Hasta 25	1.11	1	0.94	0.87	0.78	0.72	0.67
	35-95	1.13	1	0.93	0.86	0.76	0.70	0.64
	120-240	1.14	1	0.93	0.85	0.76	0.69	0.63
	300-500	1.15	1	0.92	0.85	0.75	0.68	0.63
Cables tripolares, aislados con papel, tipos: con cinturón y cada núcleo con envoltura de plomo								
3.5/6 y 5.8/10	Hasta 25	1.09	1	0.95	0.88	0.80	0.73	0.69
	35-95	1.11	1	0.94	0.87	0.78	0.71	0.66
	120-240	1.12	1	0.94	0.86	0.78	0.70	0.65
	300-500	1.13	1	0.93	0.86	0.77	0.69	0.65
Cables tripolares, aislados con papel, tipo: cada núcleo con envoltura de plomo; y aislados con P.V.C.								
8.7/15 11.6/20 17.3/30	Hasta 25	1.08	1	0.96	0.9	0.81	0.75	0.7
	35-95	1.09	1	0.95	0.89	0.79	0.73	0.67
	120-240	1.1	1	0.95	0.88	0.79	0.72	0.66
	300-500	1.11	1	0.94	0.88	0.78	0.71	0.66
CABLES MONOPOLARES								
Tres cables no armados dispuestos en un plano o en triángulo								
0.6/1 3.5/6 5.8/10	Hasta 25	1.12	1	0.94	0.85	0.76	0.70	0.65
	35-95	1.14	1	0.93	0.84	0.74	0.68	0.62
	120-240	1.15	1	0.93	0.83	0.74	0.67	0.61
	300-500	1.16	1	0.92	0.83	0.73	0.66	0.61
8.7/15 11.6/20 17.3/30	Hasta 25	1.11	1	0.94	0.87	0.78	0.72	0.67
	35-95	1.13	1	0.93	0.86	0.76	0.70	0.64
	120-240	1.14	1	0.93	0.85	0.76	0.69	0.63
	300-500	1.15	1	0.92	0.85	0.75	0.68	0.63

1) Estos factores deben usarse solamente si la resistividad térmica del suelo se ha obtenido por medida

#### 4.2.3 Efecto de rellenos especiales alrededor de los conductores.

Se había mencionado que la elevación de temperatura de operación de los cables subterráneos está afectada directamente por la resistencia térmica del suelo, cuyas características térmicas son quizás de mayor importancia que otros factores. Los suelos varían considerablemente respecto a sus características térmicas, aun dentro de una misma localidad y a lo largo de la ruta de un cable; el rango de valores de esta variación puede ser muy diverso. Cuando se encuentran condiciones térmicas desfavorables que restan la capacidad de carga del cable, desde el punto de vista de utilización económica, usualmente es deseable tomar acciones de corrección en los sitios más desfavorables, por medio de rellenos de superiores características térmicas que las locales.

El relleno deberá estar constituido de un material de bajo costo - con una conductividad térmica intrínseca alta (con un alto contenido - de sólidos) y que esté caracterizado por mantener la humedad bajo condiciones adversas. El mejor material con estas características es la - arena de cuarzo, pero como buenos substitutos pueden usarse arena silicosa (de construcciones) o grava; en cualquier caso el tamaño de los - gránulos debe ser tal que asegure un contenido de sólidos bastante grande.

Aun con el material más barato, es necesario minimizar la cantidad de excavación y relleno. Para esto J. H. Neher (L8) ha elaborado un cuadro, por el cual se consigue calcular las dimensiones mínimas de la excavación, para alcanzar una resistencia efectiva de  $120 [^{\circ}\text{C cm/W}]$ , en suelos con resistividades que varían desde los 140 a los  $200 [^{\circ}\text{C cm/W}]$ , con un relleno cuya resistividad es de  $70 [^{\circ}\text{C cm/W}]$ . (Ver fig. 20). Este método está basado en una tubería de  $15 [\text{cm}]$  de diámetro a una profundidad de  $90 [\text{cm}]$  aproximadamente.

En los EE. UU. algunas compañías como regla práctica, resultado de la experiencia, estiman el relleno necesario de la forma siguiente:  $30 [\text{cm}]$  bajo el cable y  $60 [\text{cm}]$  a los lados y arriba del mismo.

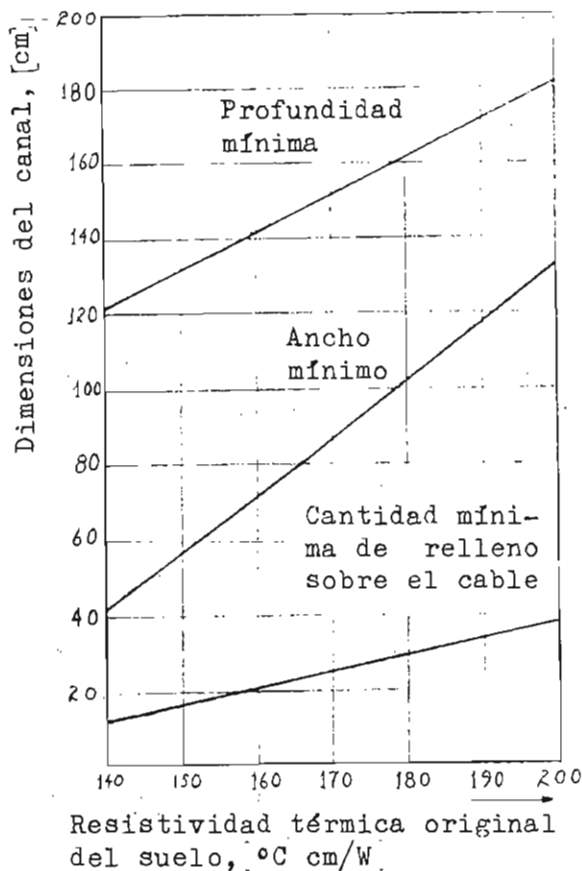


Fig. 20 Cantidad de relleno para un cable de diámetro 15 [cm], tipo en tubería, para reducir la resistividad del suelo a un valor promedio de 120 °C cm/W.

Como una alternativa, quizás más económica, puede instalarse el conductor a una profundidad mayor, esto es, buscar unas condiciones de terreno que tengan mejores características térmicas. En otros casos se ha encontrado satisfactorio instalar más conductos (tipo tubería) que los necesarios, dejándose algunos de ellos sin utilizarlos. Otra alternativa a este método es instalar el número necesario de conductos, pero incrementar la distancia vertical de los mismos.

El escoger el método más adecuado es por lo tanto el resultado de consideraciones económicas entre los diferentes métodos.

### 4.3 Cortocircuitos.

El estudio de las corrientes de cortocircuito que circularán por un cable, reviste la misma importancia que la determinación de la corriente de régimen permanente, debido a que sus valores deciden en último término si la selección del calibre del conductor es correcta y por tanto dicho cable satisface los requerimientos para los cuales fue escogido. En caso que la sección no satisfaga las condiciones de cortocircuito, el área obtenida durante este estudio reemplazará a la calculada para conducción de régimen permanente.

Los valores de las corrientes de cortocircuito que interesan en el estudio de cables, son las siguientes:

- Corriente de choque:  $I_s$
- Corriente alterna subtransitoria:  $I_k''$
- Corriente permanente de cortocircuito:  $I_k$

Su explicación y algunos métodos de cálculo se presentan en el apéndice II.

Las corrientes de cortocircuito producen principalmente dos tipos de esfuerzos: dinámicos y térmicos, que deben ser soportados por los cables sin sufrir deterioro (excepto el área afectada por el cortocircuito, si ésta hubiere).

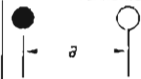

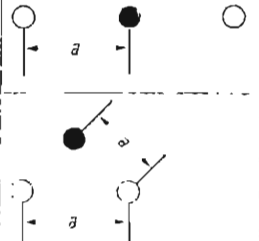
#### 4.3.1 Esfuerzos dinámicos.

Los esfuerzos originados sobre el cable son proporcionales a su longitud y al cuadrado de la corriente de cortocircuito asimétrica, (valor de cresta). Por este motivo, los esfuerzos sobre los cables, terminales y soportes pueden alcanzar valores muy altos, aun con corrientes de cortocircuito bajas. Con cables multipolares armados, este tipo de esfuerzos se presentan dentro del cable, siendo absorbidos por la envoltura o armadura, no existiendo efectos dañinos sobre el cable, pero los soportes deben estar previstos para resistirlos.

Los cables monopolares no enterrados directamente, deben hallarse sujetos a su lecho para evitar desplazamientos. Las fuerzas  $F_s$  que aparecerán por cortocircuito se pueden calcular por las fórmulas indicadas en el cuadro 11.

CUADRO 11.

ESFUERZOS MECANICOS DEBIDOS A CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Falla bifásica		$F_{s2} = 2.04 \frac{I_s^2}{a} \cdot 10^{-2} \text{ kp/cm}$
Falla trifásica		$F_{s3} = 0.808 F_{s2} \text{ kp/cm}$
		$F_{s3} = I_{s2} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} = I_{s2} 0.87 \text{ kp/cm}$

(L7)

El cable en negro indica que a él corresponde la fórmula, para cada caso.

$I_s$  = Valor de cresta de la corriente de cortocircuito asimétrica, [KA]  
 $a$  = separación axial entre cables, [cm]

Las fuerzas que aparecen con la falla bifásica (caso más desfavorable) y el espaciamiento  $a_s$  entre puntos de sujeción a lo largo del cable, pueden calcularse por los datos de las figs. 21 y 22, que permiten desplazamientos del siguiente orden:

- Cables monopolares con envoltura metálica . . . . . aprox. 1 [cm]
- Cables monopolares con aislamiento plástico y envoltura de P.E. o P.V.C. . . . . aprox. 1 a 2 [cm]

La fig. 21 da un factor  $b$  por el cual se debe multiplicar el diámetro externo del cable para encontrar la distancia  $a_s$  entre sujetado-



res. La fig. 22 da directamente este valor.

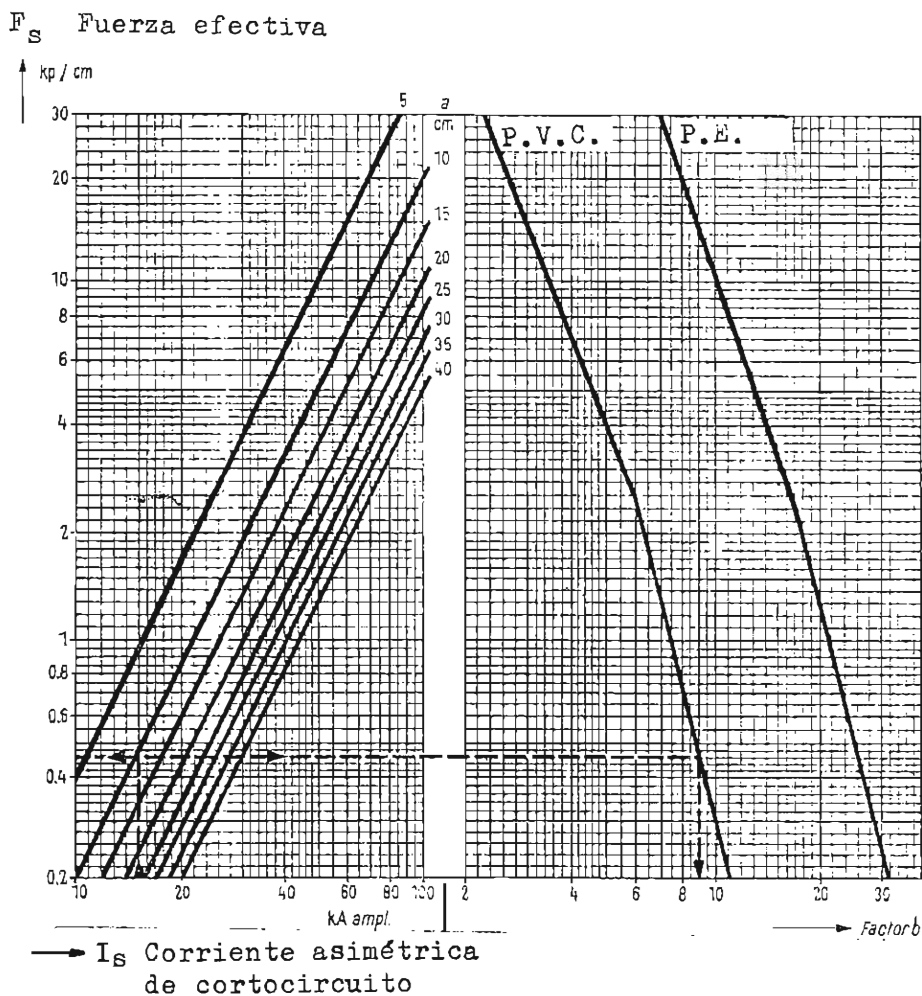


Fig. 21 - Máxima distancia permisible  $a_s$  entre grampas para cables con P.V.C. y P.E.

$D_a$  = diámetro externo del cable

$$a_s = b \cdot D_a$$

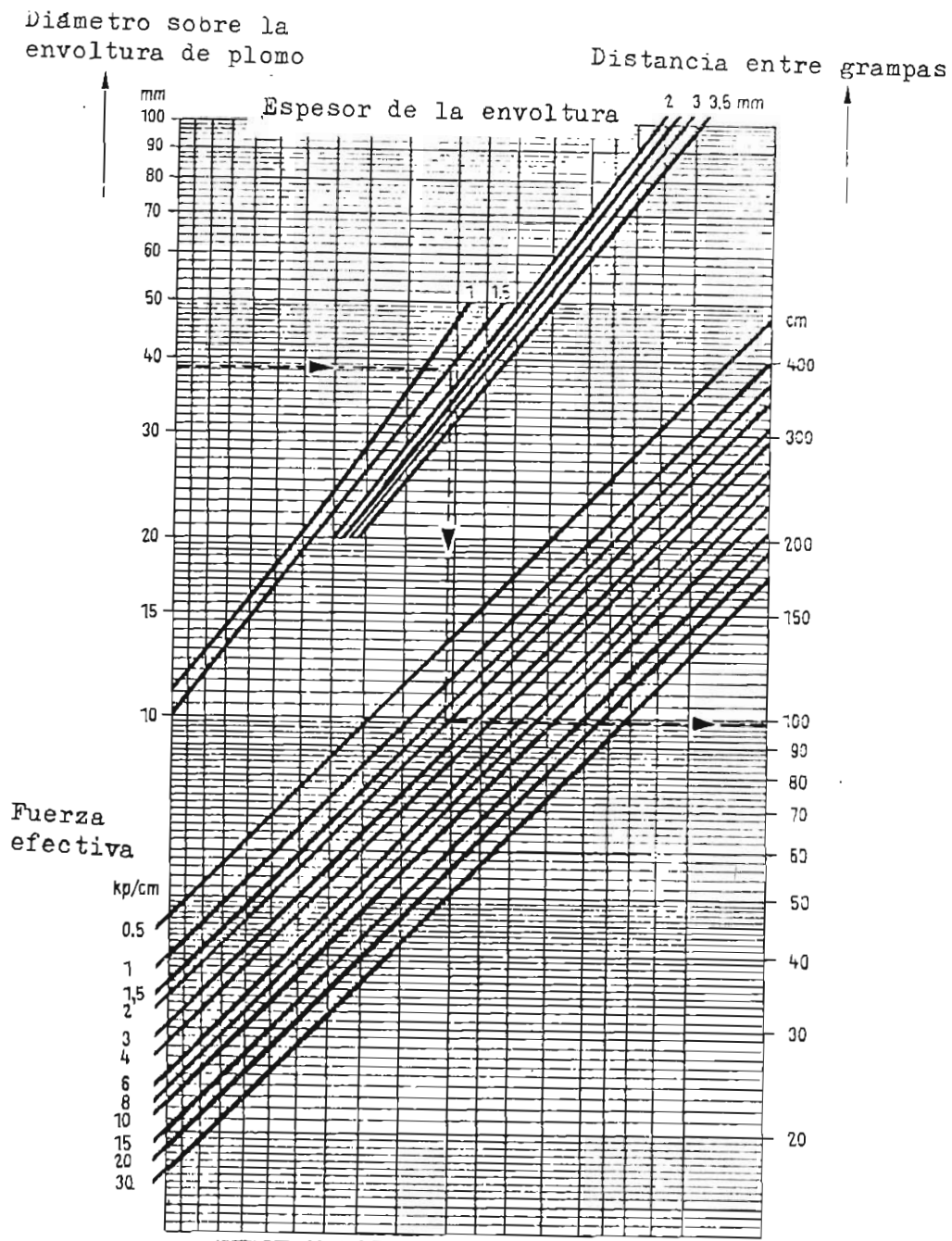


fig.22 - Máxima distancia permisible entre grampas para cables monopolares con envoltura de plomo. Para cables con envoltura de aluminio estos valores deben multiplicarse por 1.4

#### 4.3.2 Esfuerzos térmicos.

La elevación de temperatura del conductor depende del valor efectivo y la duración de la corriente de cortocircuito. Como el tiempo de calentamiento es de duración muy limitada y ocurre muy pocas veces, la máxima temperatura permisible será mayor que la de régimen normal. No existe actualmente un acuerdo general sobre la temperatura límite en estos casos, pero deberá considerarse el tipo de aislamiento, tipo de cable y voltaje nominal. Los valores dados en la tabla 18, son fruto de la experiencia alemana y podrían usarse hasta que estudios definitivos los normalicen.

TABLA 18.

TEMPERATURAS MAXIMAS DE CABLES  
PARA EL CASO DE CORTOCIRCUITO.

Voltaje Nominal KV	Tipo de cable y aislante	Máxima temperatura [° C]
6.3	P.V.C.	160
	Papel con cinturón	160*
	Papel con campo radial	160
13.8	P.V.C.	150
	Papel	155
* Este valor se refiere a cables con unión a presión. Con uniones soldadas puede subir a 180 °C		

(L7)

La elevación máxima de temperatura dentro de límites tolerables, para el caso de cortocircuito y de régimen permanente se consigue por una adecuada selección del calibre del conductor, en el primer caso teniendo además en cuenta la duración y el valor medio de la corriente de cortocircuito.

La sección mínima para conductores, según los valores de la tabla 18, puede obtenerse directamente, cuando los gráficos elaborados para este efecto toman en cuenta elevaciones de temperatura preestablecidos. Las figs. 23 y 24 consideran elevaciones de temperatura de 90 y 80 [°C] sobre la original del cable. Si el valor obtenido estuviese entre dos

Valor medio efectivo de la corriente de cortocircuito  $I_{km}$

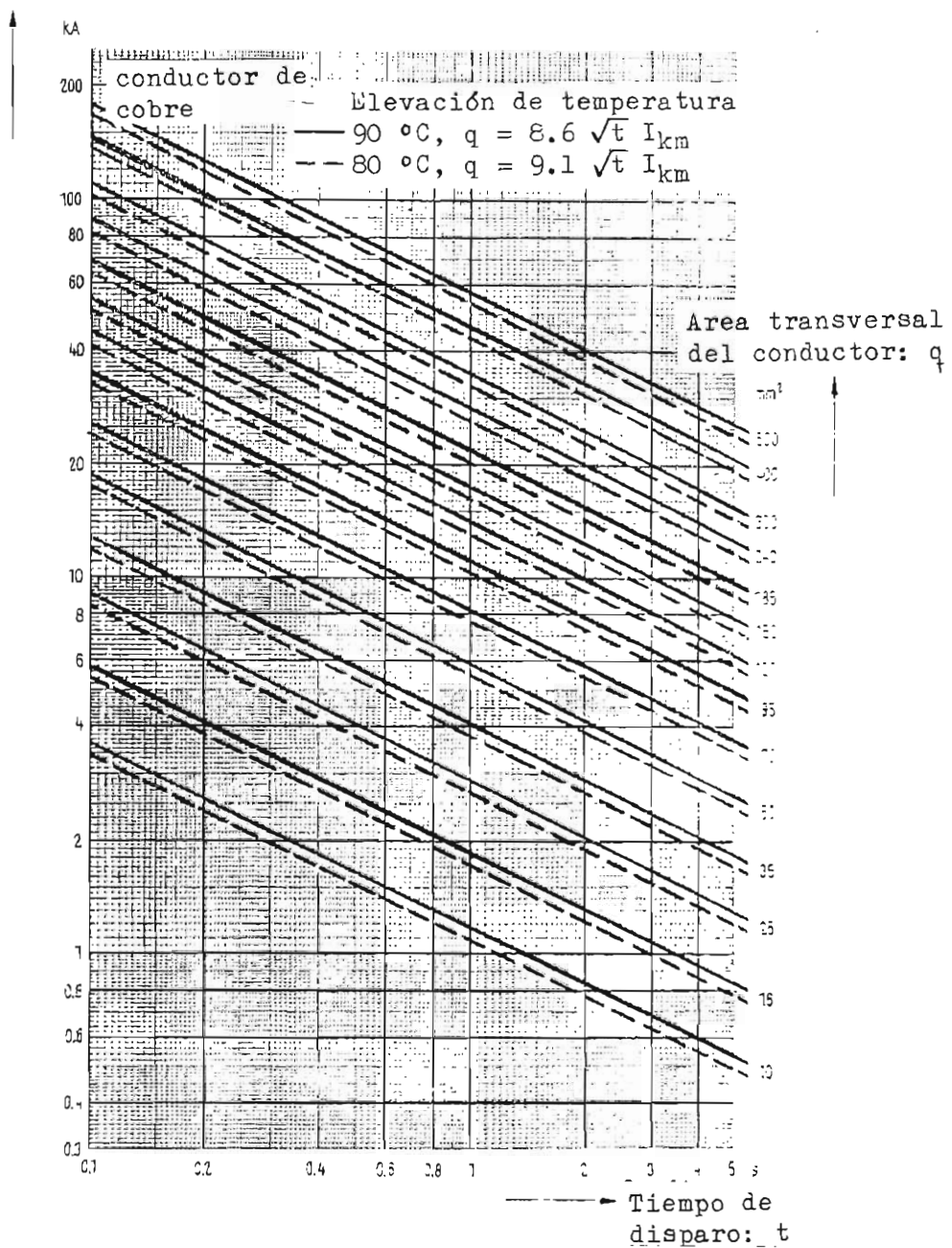


Fig. 23 - Corriente de cortocircuito, térmicamente permisible para conductores de Cu.

Valor medio efectivo de la corriente de cortocircuito  $I_{kcm}$

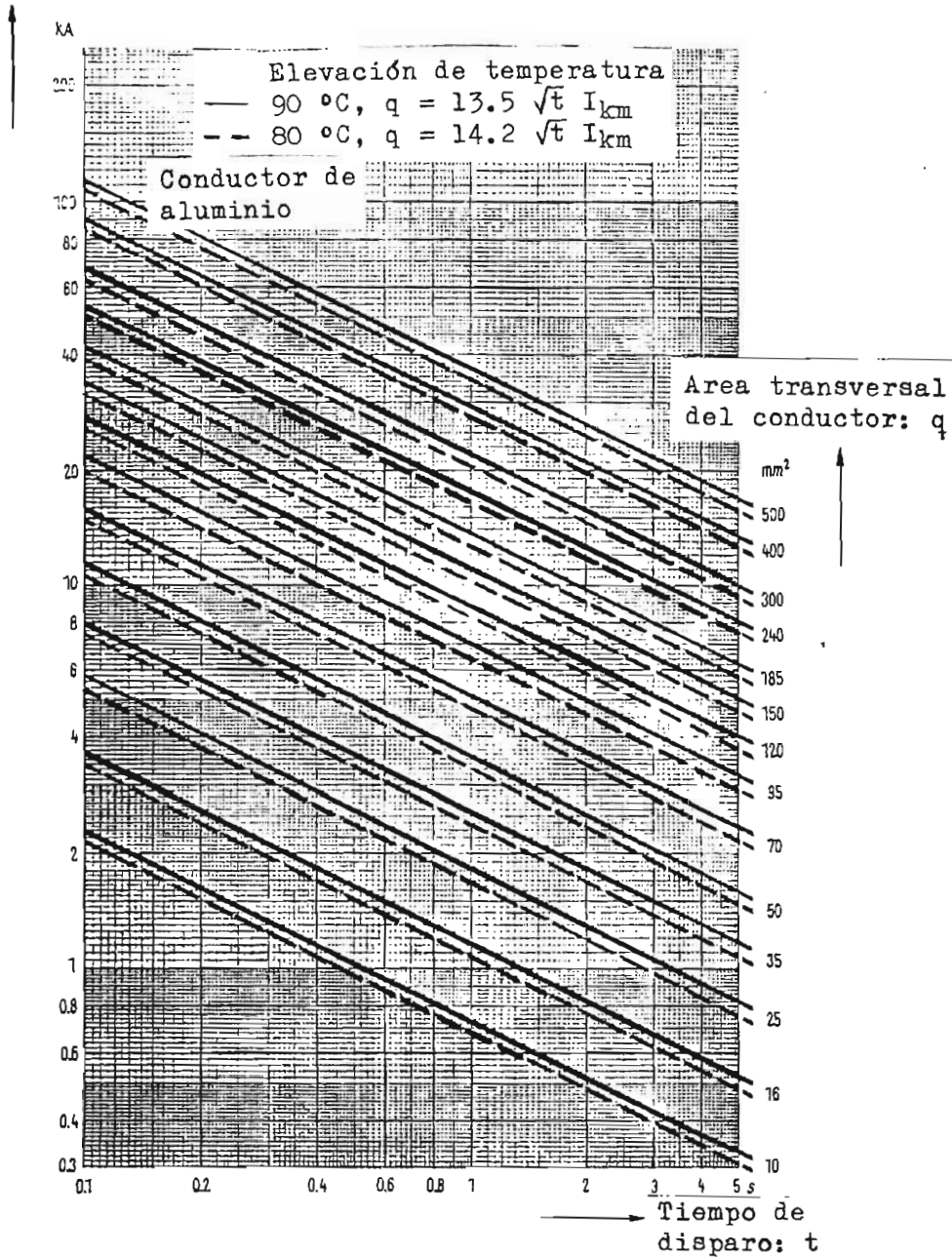


Fig. 24 - Corriente de cortocircuito, térmicamente permisible para conductores de Al.

no normalizados (que constan en dichas figuras) se deberá seleccionar el inmediato superior, pues incluso pequeñas reducciones de la sección conducirán a temperaturas finales excesivas.

La corriente promedio de cortocircuito  $I_{km}$  se calcula a base de la siguiente fórmula:

$$I_{km} = I_k'' (m + n)^{1/2} \quad (48)$$

(L7)

en donde:

$I_k''$  = corriente inicial de cortocircuito simétrica (valor efectivo) [KA]

$m$  = factor de decrecimiento de la componente de corriente continua (Ver apéndice II)

$n$  = factor de decrecimiento de la componente de corriente alterna. (Ver apéndice II)

El factor  $m$  es función del tiempo de corte de corriente (o de disparo) del elemento de protección y del factor de choque  $\mathcal{H}$  (Ver apéndice II). El factor  $n$  es función de la relación entre corrientes subtransitoria y permanente de cortocircuito  $I_k''/I_k$ . Los valores de  $m$  y  $n$  pueden obtenerse de la fig. 25.

El factor  $\mathcal{H}$  puede obtenerse por la fórmula:

$$\mathcal{H} = \frac{I_s}{\sqrt{2} I_k''} \quad (49)$$

en donde:

(L7)

$I_k''$  = Corriente inicial de cortocircuito simétrica (valor efectivo) [KA]

$I_s$  = Corriente de choque (Ver apéndice II), [KA]

#### 4.3.3 Cálculo de la sección del conductor en función de los esfuerzos térmicos.

Se dió ya en la pág. 92 un método particularizado usando gráficos para determinada elevación de temperatura; a continuación se presenta el método general de cálculo.

Por la limitada duración del cortocircuito se considera despreciable el calor disipado por la aislación, en cambio es importante la variación de la resistencia del conductor por el incremento de la tempe-

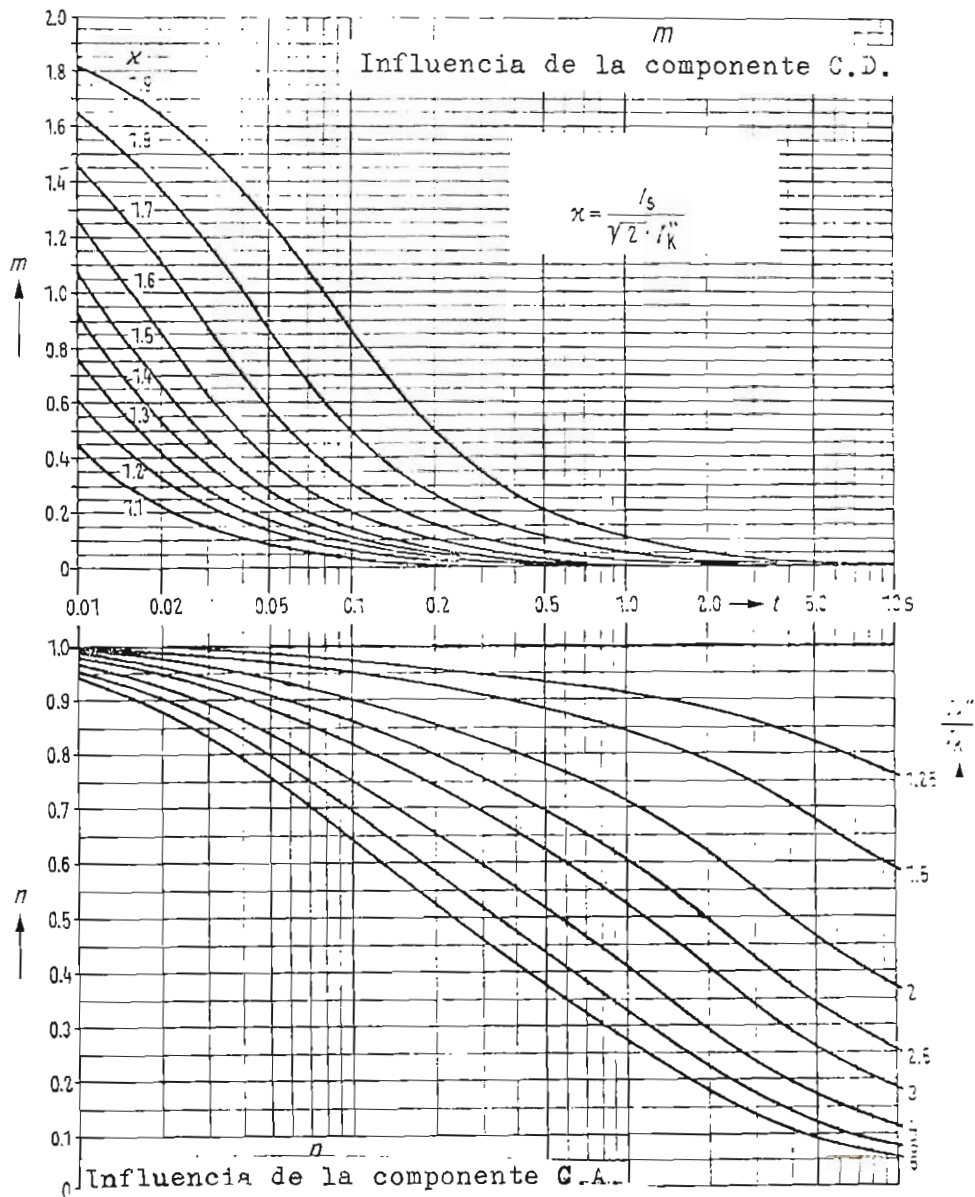


Fig. 25 - Determinación de la corriente media de cortocircuito, que origina los esfuerzos térmicos. ( $I_{km}$ ).

ratura, que a su vez influye en la magnitud del calor debido a pérdidas. Según estas consideraciones, la expresión que da la sección (  $q$  ) del conductor es:

$$q = I_{km} \cdot 10^3 \left[ \frac{\alpha t}{\gamma c \ln \frac{\theta_o + \theta_f}{\theta_o + \theta_i}} \right]^{1/2} \quad (50) \quad (L7)$$

en donde:

$q$  = Sección mínima del conductor para el caso de cortocircuitos, [mm<sup>2</sup>]

$I_{km}$  = Corriente media de cortocircuito, [KA]

$\gamma$  = Conductividad del material a la temperatura de referencia  $\theta$ ,  
[°C m/ohm mm<sup>2</sup>]

$c$  = Calor específico por unidad de volumen, [W s/°C g] = 0.24<sup>-1</sup> [cal/g]

$\theta_i$  = Temperatura inicial del conductor, [°C]

$\theta_f$  = Temperatura final del conductor, [°C] (ver tabla 18)

$t$  = Tiempo de despeje de la falla, [s]

$\alpha$  = Coeficiente de variación de la resistencia a la temperatura  $\theta$ ,  
(ver pág. 32), [°C<sup>-1</sup>]

=  $\frac{1}{\theta_o + \theta}$ , siendo  $\theta$  la temperatura de referencia de la resistividad: 20 [°C] según la CEI para el CRP (ver pág. 30)

$\theta_o = \alpha_o^{-1}$ , [°C]

$\alpha_o$  = Coeficiente de variación de la resistencia a 0 [°C] (ver fig. 3)  
[°C<sup>-1</sup>]

La fórmula anterior puede simplificarse de la siguiente manera:

$$q = k_1 k_2 I_{km} \sqrt{t} \quad (51)$$

en donde:

$$k_1 = \left( \frac{\gamma c}{\alpha} \right)^{-1/2} 10^3 \left[ \text{mm}^2 / \text{KA s}^{1/2} \right] \quad (51.1)$$

$$k_2 = \left( \ln \frac{\theta_o + \theta_f}{\theta_o + \theta_i} \right)^{-1/2} \quad (51.2)$$

Los valores de:  $\gamma$  (a 20 °C),  $c$ ,  $\theta_o$  y  $k_1$  para los materiales más importantes se hallan en la tabla 19. El valor para  $k_2$  se indica en la fig. 26, para los rangos de temperatura más comunes.



TABLA 19.

CONSTANTES PARA EL CONDUCTOR Y ENVOLTURA

Material	$\gamma$ $m(\Omega mm^2)^{-1}$	$c$ $Ws(^{\circ}C g)^{-1}$	$\theta_0$ $^{\circ}C$	$k_2$ $mm^2(KA s^{1/2})^{-1}$
Cu	58	3.47	234.5	4.41
Al	35.4	2.39	228.1	6.90
Fe	7.25	3.78	202.0	12.80
Pb	4.67	1.47	230.0	24.20

(L7)

Realizado el cálculo de la sección (  $\varphi$  ) para el caso de cortocircuito, habrá que comparárselo con el seleccionado en catálogos, según la corriente de régimen permanente (ec. 39) y en caso que este último valor fuese menor, desechar la primera selección y escoger otro cuya sección sea igual o mayor a  $\varphi$  , según catálogos.

Es también posible reducir el tiempo de despeje de la falla seleccionando un aparato de interrupción más rápido; en todo caso el resultado final será fruto del análisis económico entre aumento de costo por la mayor sección del cable o interruptores más rápidos.

4.3.4 Cálculo de la sección de la pantalla o envoltura metálica.

En el caso de cortocircuito es posible que la pantalla o la envoltura metálica deban conducir la totalidad de la corriente de falla, por esto también su sección debe ser adecuadamente dimensionada.

Basándose en la ec. 51 se puede encontrar la sección transversal (  $\varphi_k$  ) adecuada, según la siguiente fórmula:

$$\varphi_k = k_1 k_2 k_3 I_{km} \sqrt{t} \quad (52)$$

en donde:

$\varphi_k$  = Sección transversal efectiva durante el cortocircuito, [mm<sup>2</sup>]

$k_1$  = Constante del material según la ec. 51.1 (ver tabla 20)

$k_2$  = Coeficiente de temperatura según la ec. 51.2 (ver tabla 20)

$k_3$  = Coeficiente de apantallamiento (ver fig. 27)

Coeficiente de temperatura  $K_2$

Temperatura final  $\theta_f$

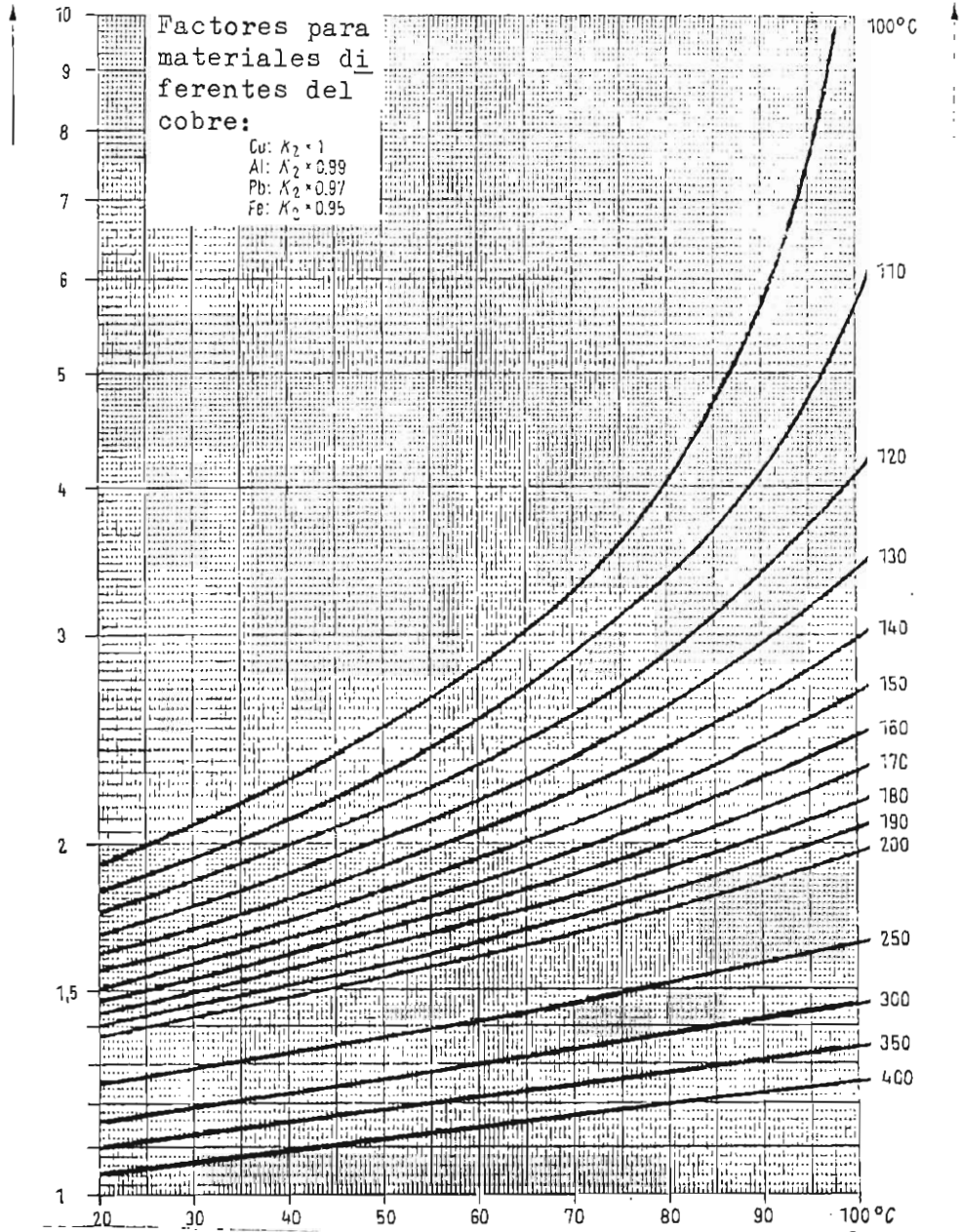


Fig. 26

Coeficiente de temperatura  $K_2 = \left[ \ln \frac{\theta + \theta_f}{\theta + \theta_i} \right]^{-\frac{1}{K_2}}$

Temperatura  $\theta_i$  inicial

$I_{km}$  = Corriente media de cortocircuito, [KA]

$t$  = Tiempo de duración del cortocircuito, [s]

TABLA 20.

CONSTANTES PARA EL CALCULO DE LA PANTALLA  
O ENVOLTURA EN EL CASO DE CORTOCIRCUITO

Material de la pantalla	Tipo de la pantalla	Aislante	$\theta_i$ °C	$\theta_f$ °C	$k_1$ $\frac{mm^2}{KAs}$	$k_2$	Constante $b$
Cobre	Conductores redondos, - cableado <u>con</u> <u>céntrico</u> .	P.V.C.	60	350	4.41	1.21	0.12*
	Cinta helicoidal, con bornes no - unidos.						
	Doble cinta simila a la doble armadura de <u>ace</u> <u>ro</u> .						
	Varias cintas en forma de flejes longitudinales.						
Acero	Armadura de sección <u>pl</u> <u>na</u> .		60	270	12.80	1.30	0.17
Plomo	Envoltura de plomo.	Papel	70	200	24.20	1.62	0.38
Aluminio	Envoltura de aluminio		70	200	6.90	1.65	0.34

\* Con pantalla de conductores redondos y cableado concéntrico, es te valor se incrementa a 0.15, si como espesor de la misma se toma el diámetro de estos conductores.

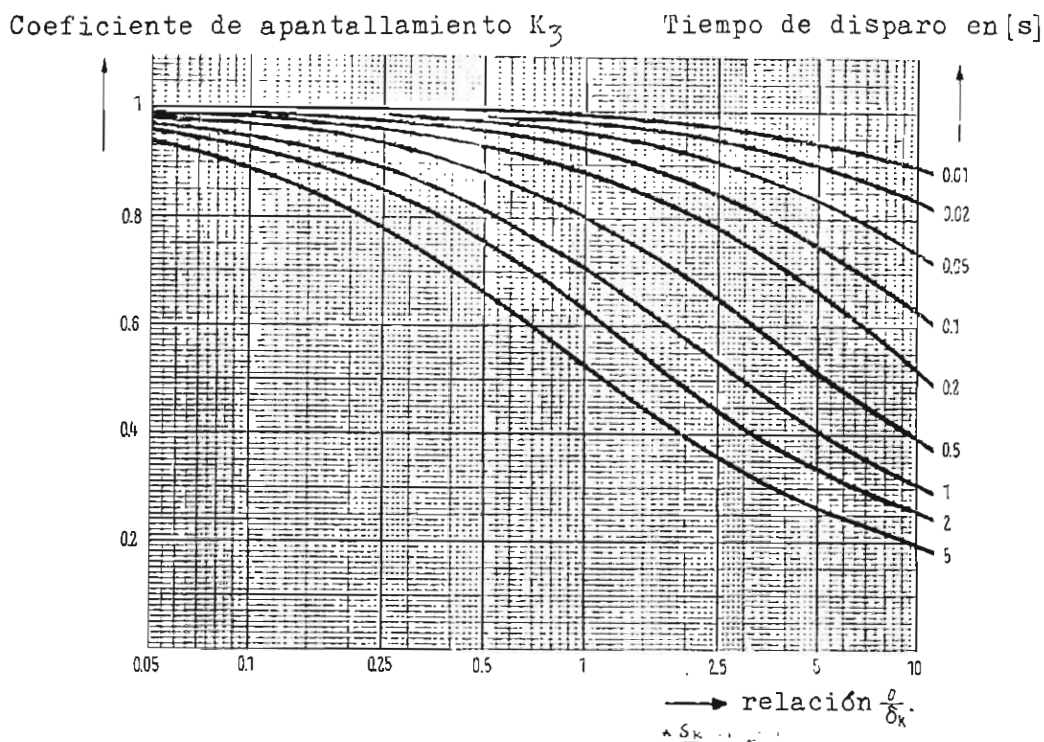


Fig.27 - Coeficiente de apantallamiento  $K_3$

Los factores  $k_1$  y  $k_2$  y las temperaturas inicial y final  $\theta_i$  y  $\theta_f$  pueden tomarse de la tabla 20. La determinación del factor  $k_3$  según la fig. 27 es como sigue: encontrado el factor  $b$  según la tabla 20, se busca en la figura la relación  $b/\delta_k$ , en donde  $\delta_k$  es el espesor de la pantalla escogida. Con el factor  $k_3$  conocido se calcula la sección  $q_k$  y si ésta es mayor o igual a la seleccionada previamente, el cable analizado puede usarse. El factor  $k_3$  toma en cuenta la disipación del calor desde la pantalla durante el cortocircuito. Con un buen contacto físico de la pantalla o envoltura con el medio ambiente y por su gran sección de contacto con éste, comparada con su sección transversal, el calor generado se disipará mucho más rápido que el del conductor. Existirá adicionalmente influencia en la disipación del calor de las características térmicas del material de la pantalla, su espesor, del medio ambiente y de la duración de la falla. Estos factores se han tomado en cuenta al elaborar la tabla 20 y la fig. 27 a base de la experiencia.

#### 4.4 Cálculo de la caída de tensión.

Por definición, es la diferencia en magnitud absoluta entre el voltaje al comienzo y al final de un alimentador. (L12)

En sistemas de distribución se conocen zonas de voltaje, a saber: Zona Favorable, Zona Tolerable y Zona Extrema.

La zona favorable contiene la mayoría de los voltajes de operación y los sistemas se los diseña para estos voltajes, en tal forma que los aparatos y equipos con voltajes de régimen que caen dentro de esta zona, tengan un adecuado y eficiente funcionamiento. La zona tolerable - incluye voltajes ligeramente sobre y bajo los de la zona favorable. Esta es una condición inevitable en la práctica y aceptada, si no como - ideal, como normal. Los aparatos en esta zona tendrán una operación satisfactoria. Los sistemas de distribución subterránea, por su alto costo sirven principalmente las dos zonas mencionadas, por lo cual la zona extrema no es considerada.

La eficiencia del funcionamiento de los aparatos y equipos que se halla intimamente ligada a los voltajes de servicio, determina en último término los niveles de tolerancia de estos voltajes. La Asociación de Fabricantes de Equipo de los EE. UU. (NEMA) proporciona los siguientes niveles de tolerancia de voltajes, aceptables para un funcionamiento normal del equipo, según la tabla 21.

TABLA 21.

NIVELES ACEPTABLES DE VOLTAJE EN PORCENTAJE

Voltaje nominal	Zona Favorable		Zona Tolerable	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
6.3 KV	- 96	+ 104	- 92	+ 108
13.2 KV	- 96	+ 103	- 89.5	+ 106

(L12)

A continuación se presentan algunos métodos de caída de tensión basados en la práctica.

En corriente alterna y sistemas trifásicos con cables hasta de 16 [mm<sup>2</sup>] solamente se toma en cuenta la resistencia a la corriente continua y a la temperatura de operación; para cables de mayor sección debe ya considerarse la resistencia efectiva (ecs. 14 y 15) y la reactancia.

Las fórmulas generales para el cálculo de caída de tensión son las siguientes:

$$\text{Corriente alterna monofásica: } \Delta U = 2 I \ell (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (53)$$

$$\text{Corriente alterna trifásica: } \Delta U = \sqrt{3} I \ell (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (54)$$

en las cuales:

$\Delta U$  = Caída de tensión, [V]

$R$  = Resistencia a la corriente alterna, por unidad de longitud del conductor, [ohm/m]

$X$  = Reactancia inductiva a la corriente alterna, por unidad de longitud del conductor, [ohm/m]

$\ell$  = Longitud del conductor, [m]

$I$  = Corriente circulante por el conductor, [A]

En el caso de carga capacitiva, en donde la corriente adelanta al voltaje, el término en  $X$  cambia de signo.

El desplazamiento angular entre voltajes al comienzo y al final del conductor es:

$$\cos \delta = \frac{U_e + \Delta U}{U_a} \quad (55)$$

en donde:  $U_a$  y  $U_e$  son los voltajes, en [V] entre fases, al comienzo y al final del cable (ver fig. 28)

Para redes urbanas es posible calcular la caída de tensión como una función de la potencia transmitida, esto es:

$$\Delta U = \frac{P \ell (R \cos \varphi + X \sin \varphi) 10^5}{U^2 \cos \varphi} \quad (56)$$

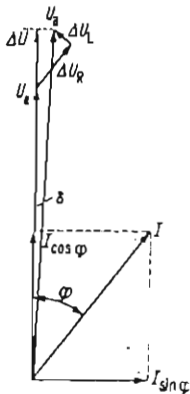


Fig. 28 - Diagrama fasorial para el cálculo de la caída de tensión.

en donde:

$\Delta U$  = Caída de tensión, como porcentaje del voltaje de operación, [%]

$P$  = Potencia transmitida, [KW]

$l$  = Longitud del cable, [m]

$R$  = Resistencia a la corriente alterna, por unidad de longitud, [ohm/m]

$X$  = Reactancia inductiva a la corriente alterna, por unidad de longitud, [ohm/m]

$U$  = Voltaje de operación, [V]

$\varphi$  = Angulo de fase entre voltaje y corriente sobre la carga.

Una buena aproximación de la caída de voltaje puede obtenerse según las figs. 29 y 30, para voltajes de operación sobre los 10 [KV] y longitudes de cable apreciables, tales que al calcular la corriente capacitiva  $\bar{I}_{c_e}$  (ec. 57) su magnitud sea considerable según la fig. 30 e influya sobre la de servicio al final del cable  $\bar{I}_e$ , esto es, que la corriente capacitiva no pueda despreciarse.

En este caso se asume que la mitad de la capacitancia total del cable se halla ubicada al comienzo y al final del mismo. La caída de tensión en el cable para la corriente ficticia  $\bar{I}_f$  debida a la resistencia y reactancia es calculada según el procedimiento siguiente:

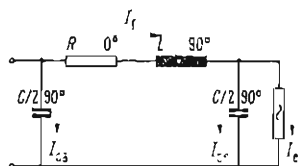


Fig. 29 Circuito equivalente para el cálculo de la caída de tensión.

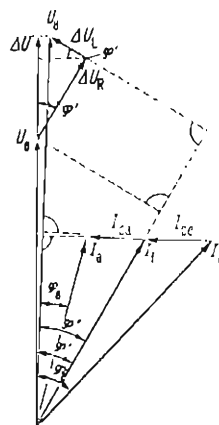


Fig. 30 Diagrama fasorial según la fig. 29.

Corriente en la capacitancia concentrada  $C \cdot \frac{1}{2} \ell$  al final del cable:

$$I_{ce} = \frac{U_e \omega C \ell \cdot 10^{-6}}{2 \sqrt{3}} \quad (57)$$

Corriente ficticia  $I_f$  :

$$I_f = \left[ (I_e \cos \varphi_e)^2 + (I_e \sin \varphi_e - I_{ce})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (58)$$

Obteniéndose según el diagrama fasorial de la fig. 30:

Para la corriente activa:  $\Delta U_R = \sqrt{3} I_f R \ell \quad (59)$

Para la corriente reactiva:  $\Delta U_L = \sqrt{3} I_f X \ell \quad (60)$

Con lo cual la caída de tensión será:

$$\Delta U = \Delta U_R \cos \varphi' + \Delta U_L \sin \varphi' \quad (61)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} I_f \ell (R \cos \varphi' + X \sin \varphi') \quad (62)$$

En esta fórmulas:  $I_{ce} = [A]$  ;  $R = [ohm/m]$  ;  $X = [ohm/m]$  ;  $\ell = [m]$   
 $\Delta U_R = [V]$  ;  $\Delta U_L = [V]$  ;  $\Delta U = [V]$  ;  $C = [\mu F/m]$  ;  $I_f = [A]$  ;  $I_e = [A]$

Si fuese necesario un cálculo más exacto, se pueden realizar los cálculos según el diagrama fasorial de la fig. 30, efectuándose las correspondientes sumas vectoriales según este mismo gráfico.



## 5.- INSTALACION DE CABLES DE POTENCIA

### 5.1 Generalidades.

El método empleado está supeditado principalmente a las condiciones locales , así como a los mejores resultados que la experiencia ha demostrado.

En las fábricas se tiene especial cuidado en el manejo del cable; el mismo tratamiento es esencial durante la instalación para asegurarse que su vida útil no se vea reducida. La duración de un cable ha sido fijada normalmente en 25 años según criterios de comisiones internacionales de trabajo; aunque bajo las mejores condiciones de funcionamiento puede esperarse que dure cerca de los 40 años. En todo caso no existe evidencia sobre un factor matemático determinante, que limite con exactitud el lapso de vida útil.

En vista del alto costo de los cables es importante que no se enfatice demasiado en reducir a un mínimo el costo de instalación, puesto que en caso de hacerlo, se elevarían exageradamente los costos de mantenimiento.

Las formas más importantes y comunes de instalación son las siguientes;

- 1) Enterrados directamente;
- 2) En conductos;
- 3) Al aire libre; y
- 4) En túneles.

### 5.2 Cables enterrados directamente.

Es la forma más usual en Europa. Su empleo data de hace mucho tiempo y se han establecido reglas prácticas de instalación que son las siguientes: cuidadoso tratamiento durante su colocación y relleno limpio del lecho, o sea sin piedras u otros objetos peligrosos. Este sistema es simple y en la mayoría de los casos el menos costoso, pero involucra la excavación del lecho del cable a lo largo de toda su ruta.

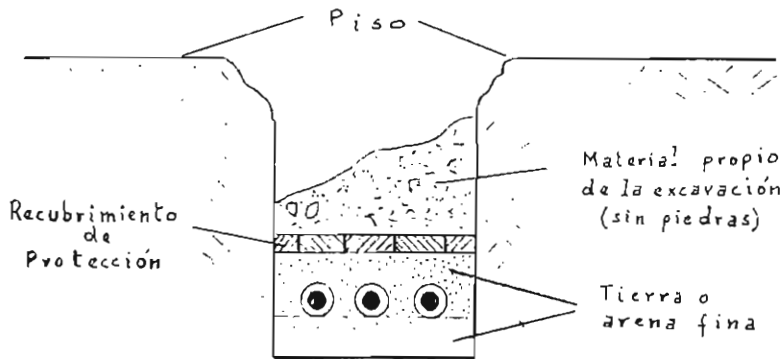


Fig. 31 Materiales de relleno para instalación de cables directamente enterrados.

El canal, antes de colocar el cable debe ser acondicionado con una primera capa de tierra tamizada, luego sobre este lecho se asienta el cable y se rellena con igual calidad de tierra o arena fina (fig. 31).

La ruta decidida antes de realizarse la excavación, habrá que revisarla a intervalos más o menos regulares para conocer los obstáculos - que habrán de ser eliminados o que obliguen a modificar la ruta. En el caso de redes de distribución las aceras son usualmente el camino más barato, sobre todo debido a que si el cable recorriese la calle, por seguridad, la profundidad de instalación deberá ser mayor. La acera es cogida dependerá del número de obstáculos que haya en cada una de ellas, así como de la demanda de potencia y energía a cada lado de la calle. - Es posible que ciertos reglamentos obliguen a seguir determinada ruta, pero este no es el caso actual en el país.

El ancho del canal deberá ser mínimo pero previendo que los obreros puedan efectuar su trabajo con facilidad. El cruce de cables con otras instalaciones debe ser convenientemente protegido por soportes de ladrillo o concreto, este último caso también se emplea como refuerzo de cimientos de edificios o estructuras cercanas (fig. 32).

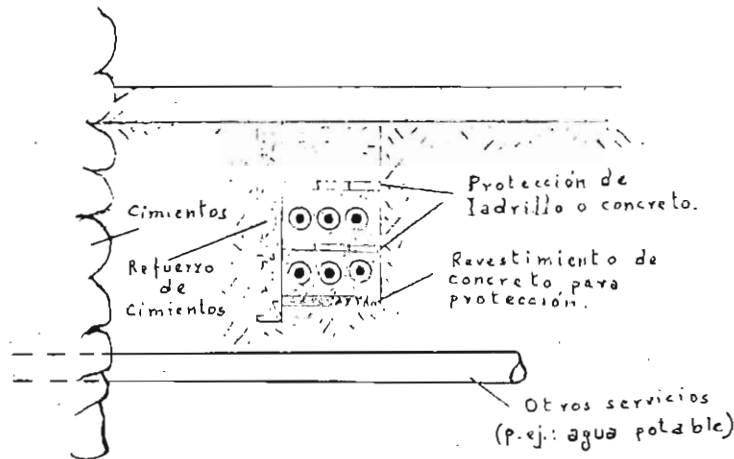


Fig. 32 Revestimientos de protección de cables contra otras instalaciones y refuerzo de estructuras.

En el caso, de que por alguna razón, el canal se llenara de agua, debe bombeársela y preferiblemente secar el canal por un cierto tiempo antes de proceder a colocar el cable, así mismo si el canal actuase como colector de aguas cercanas, habrá que darle una cierta pendiente, - incluso con desfogues, para evitar la excesiva presencia de líquido.

La profundidad recomendada de los cables, para voltajes de 6.3 y - 13.2 KV, según experiencias en Europa, está entre 70 y 100 [cm] debiendo considerarse que a mayor profundidad más segura es la instalación - contra agentes externos, pero que por otra parte el costo de la misma se eleva.

Cuando se instala más de un cable tripolar en el mismo canal, la - separación interaxial recomendada está entre 30 y 40 [cm], a fin de reducir los efectos de mutuo calentamiento y daños en cadena en caso de falla de alguno de los cables (fig. 33). En el caso de cables monopolares que forman un circuito trifásico, usualmente se los coloca juntos formando un triángulo. Con instalaciones transpuestas, los cables monopolares se los coloca en un mismo plano. Cuando se necesita más de una terna de cables, la siguiente debe separarse de la anterior en forma -

vertical por tierra tamizada de un espesor entre 30 y 45 [cm]. Sobre los últimos cables, hacia arriba, se colocará una capa de la tierra mencionada o arena, de una altura entre 8 y 10 [cm], sobre la cual se colocan baldosas de protección o planchas de concreto, que servirán además como un aviso de la presencia de cables a quienes realicen excavaciones. (Ver fig. 33)

El relleno del canal, una vez colocado el cable, debe hacerse lo antes posible como prevención de daños. En ocasiones es necesaria una sustitución del material del suelo; para su estudio ver pág. 86.

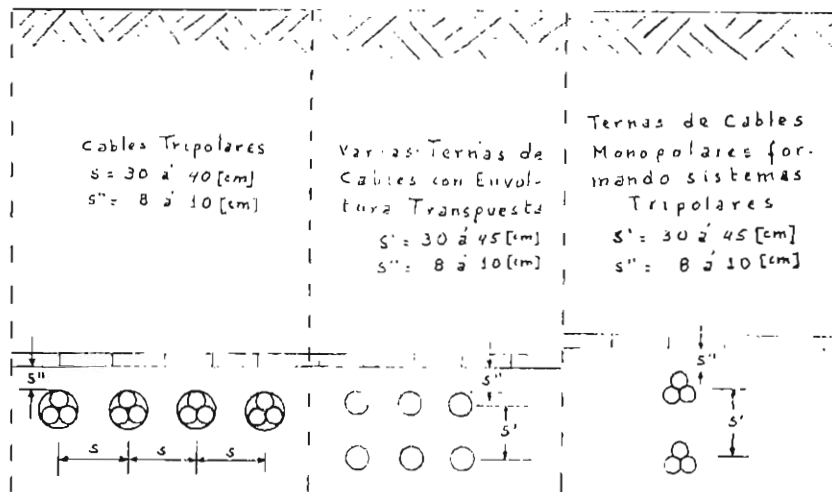


Fig. 33 Espaciamientos entre cables enterrados directamente.

### 5.3 Cables en conductos.

En áreas de congestión dentro de ciudades, donde la excavación de una zanja es cara e inconveniente, o para instalaciones cortas, se utilizan conductos, puesto que la adición de nuevos cables a los ya existentes o el cambio por otros, requiere un mínimo de trabajo y costo. Además, cuando existe un sistema de conductos, las reparaciones, modificaciones, etc., pueden realizarse sin una nueva ruptura del piso.

A pesar de lo expuesto, existen dos grandes desventajas al compararse esta forma de instalación con la anterior y son: a) El costo inicial es más elevado; y b) La capacidad de conducción de los cables se ve reducida por la cercanía de los otros y por la dificultad de una rápida disipación del calor.

Los cables en conductos, al comparárselos con los otros sistemas de instalación, tienen una capacidad menor de conducción, debido únicamente a la alta resistencia térmica del medio que los rodea, pues el aire que los envuelve es un mal conductor del calor. La práctica ha encontrado que la sección del cable, comparada con la del conducto, debe ser del orden del 70 al 80 %, por facilidad de instalación y para dotar a ésta de una cierta circulación del aire caliente.

Los conductos usualmente están hechos de ladrillo vitrificado (dada una adecuada forma), o de cemento asbesto y tienen forma de tubería o de bloque con varios conductos internos. Se los coloca directamente sobre el suelo o preferiblemente sobre una plancha de concreto nivelada cuidadosamente. Se debe tener mucho cuidado que no queden materiales abrasivos dentro de los conductos. Actualmente se está incrementando el uso de conductos de fibra saturada con compuestos bituminosos, debido a su poco peso, facilidad de manejo y reducidos costos de instalación. También se usan tubos de acero o hierro fundido.

Según lo expuesto, este sistema no es muy recomendable; en caso de usárselo, los cables deberán tener funda protectora de plomo para evitar deterioros durante la instalación y al cambiar de cables. En otros casos, cuando hay el peligro de deterioro químico o corrosión de la funda de plomo, es preferible que además tenga una envoltura de material textil externa como una protección extra. Con cables tripolares es preferible que tengan una armadura de un solo conductor delgado.

La profundidad de la parte superior del conducto, recomendada para los niveles de voltaje estudiados, es de 75 a 80 [cm].

Los cables tripolares deben instalarse en un conducto y si hubiere - ren varios circuitos, deberá adoptarse una disposición horizontal en - lo posible; con cables monopolares, que configuran un sistema trifási- co, una disposición triangular.

#### 5.4 Cables al aire libre, instalados en soportes angulares o bastido- res de suspensión ("racks").

Estas formas de instalación son simples y económicas por su bajo - costo inicial. Los cables en estaciones de generación, fábricas, gran- des edificios, etc., aunque difieren en detalles de instalación, son - de una naturaleza similar y normalmente se los coloca en esta forma.

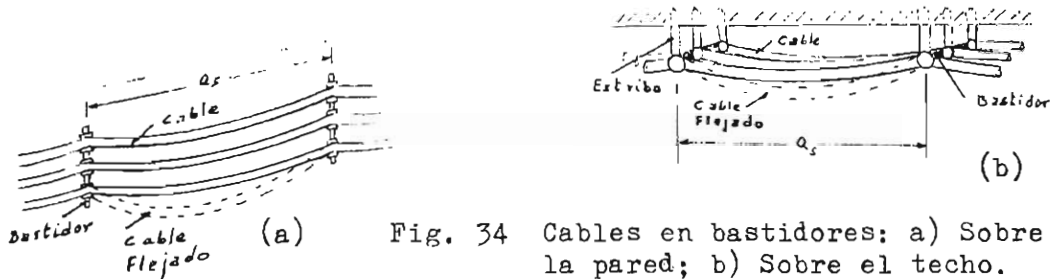
El requerimiento esencial es preparar una planificacoión detallada de las conexiones necesarias y luego realizar los diagramas reales de la instalación. En general es más económico adoptar una ruta simple por la cual van agrupados los cables, antes que escoger los caminos más cor- tos. Las principales ventajas logradas con este sistema son:

- 1) El trabajo del proyecto es más simple cuando se adopta una ruta pa- ra grupos de cables, cada uno de éstos bien definido.
- 2) La forma de sujeción es más fácil de lograrla y el costo sus acceso- rios es menor.
- 3) La longitud de los cables es más fácil de determinarla, consiguién- dose que el empleo de materiales sea más preciso, evitándose desper- dicios.
- 4) La instalación es más expedita, reduciéndose los costos de trabajo, puesto que es más sencillo instalar un número de cables en una sola ruta, que el mismo número en varias partes separadas.
- 5) La localización y arreglo de fallas se simplifica.

Los soportes angulares para cables monopolares deben ser de materia- les no magnéticos, como latón o madera, en cuyo caso es usual cubrirlos con pintura resistente al fuego. Estos soportes para tramos largos de ca- bles deben diseñarse para resistir el peso de los mismos.

Los bastidores deben ser de latón u otro material no magnético, en

lo posible diseñados para llevar tres fases diferentes, a fin de reducir las corrientes inducidas en el blindaje. En todo caso conviene aislar los blindajes de los soportes; el grado de aislación es muy pequeño, por ejemplo el de dos hojas de papel impregnado y la envoltura textil normal del cable, son suficientes.



Cuando los cables vayan en bastidores sobre pisos, paredes o cielo raso, debe cuidarse del arreglo y espaciamiento entre estribos sobre los que se fijan los bastidores, pues si éste es demasiado grande, los cables vienen a flejarse, pudiendo producirse excesivos esfuerzos mecánicos en los puntos de sujeción; si el espaciamiento es muy corto, además del desperdicio de accesorios, la expansión longitudinal del cable por efectos de temperatura repercutirá en esfuerzos mecánicos en los sitios donde el cable cambia su dirección o en la unión entre tramos. El espaciamiento óptimo depende entonces del peso del cable y de su rigidez mecánica; para centrales eléctricas se recomienda un espaciamiento no mayor de 90 [cm] entre bastidores para cables de diámetros igual o mayores a 2.5 [cm] y no más de 180 [cm] para cables de diámetros menores al indicado.

### 5.5 Cables en túneles.

Esta forma de instalación se usa especialmente cuando debe instalarse un número grande de cables, como en centrales, subestaciones, cruce de caminos, etc.

Los túneles deben diseñarse para contener incluso un mayor número de cables que los previstos inicialmente, dando facilidades para futuras ampliaciones, así como previendo los trabajos que deberán realizarse para facilitar su labor. El techo debe estar por lo menos entre 180 y 200 [cm] sobre el piso, con una acera en el centro y bastidores o plataformas en ambos costados. Estos túneles únicamente se usarán para la instalación de cables y deben poseer cierta ventilación para extracción del aire caliente.

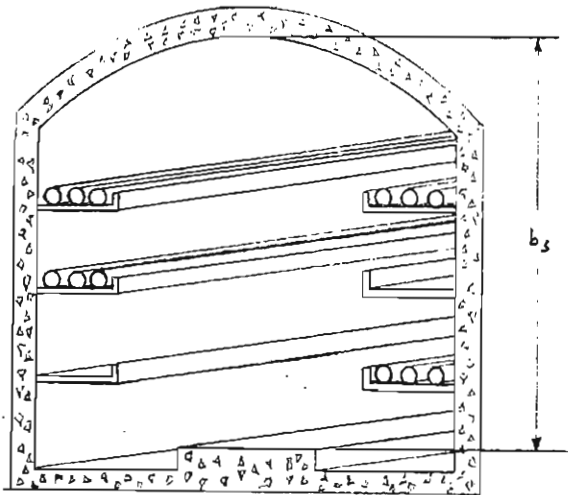


Fig. 35 Cables sobre plataformas en túneles.

Se muestran plataformas de reserva para ampliaciones.

$b_s$  : Altura del túnel  
= 180 a 200 [cm]

## 5.6 Uniones y puesta a tierra de la envoltura, blindaje y neutro.

### 5.6.1 Blindaje.

El blindaje consiste en confinar el campo eléctrico del cable al aislante del o los conductores. Este efecto se consigue por medio de una envoltura cableada, una cinta no metálica o capa de material semiconductor, flejes metálicos o envoltura concéntrica. Este tipo de cables constituyen los denominados a campo radial.

Las funciones que desempeña el blindaje son las siguientes:

- a) Confinar el campo eléctrico dentro del cable.
- b) Minimizar el esfuerzo dieléctrico de las cavidades existentes entre el conductor y el aislamiento.



- c) Obtener una distribución radial simétrica del campo eléctrico, evitando las descargas superficiales, al eliminar campos eléctricos - tangenciales excesivos.
- d) Proteger de potenciales inducidos a cables conectados a líneas aéreas u otros elementos.
- e) Limitar la radio interferencia en cables de comunicaciones que sigan una ruta paralela a los de potencia.
- f) Reducir las probabilidades de "shock" eléctrico. Esta ventaja solamente se obtiene cuando el blindaje está puesto a tierra, de otra manera el peligro puede incrementarse. (L13)

#### 5.6.2 Usos del blindaje.

Su utilización involucra un estudio de las condiciones de la instalación y operación. Por lo tanto, no pueden establecerse reglas definidas que abarquen todos los casos, pero pueden establecerse las siguientes características más sobresalientes:

Cuando no hay envoltura metálica o blindaje sobre el aislante, el campo eléctrico se distribuirá parte en el aislante y parte en el medio ambiente hasta llegar a tierra. El campo externo, si es suficientemente intenso en el aire, generará descargas superficiales con producción de ozono que puede destruir aislantes de caucho o envolturas de protección. La tierra puede ser un conductor metálico, un no metálico húmedo, grampas de sujeción, etc.

Así mismo puede originarse un daño del cable sin blindaje, cuando la superficie esté húmeda o cubierta con cualquier material conductor en forma de fina película, que confina el campo eléctrico, en tal forma que cualquier corriente de carga de esta película es conducida hasta donde pueda descargarse a tierra, descarga que puede quemar el aislante.

Cuando se usan cables con envoltura no metálica y sin blindaje en conductos con varios circuitos que trabajan independientemente, un campo eléctrico suficientemente intenso puede causar un 'shock' eléctrico a quienes manejen cables energizados.

En todos estos casos es preferible usar cables blindados, los que a más de reducir este tipo de peligro, tienen una resistencia baja del blindaje que puede permitir la operación del equipo de protección en casos de falla.

### 5.6.3 Práctica del blindaje.

Se lo deberá tomar en cuenta para cables con envoltura no metálica, cuando operen sobre los 2 [KV], en casos que se presenten cualquiera de las siguientes condiciones:

- a) Conexión a líneas aéreas;
- b) Cuando hay transición de un medio ambiente no conductor a uno conductor (se incluye la transición de suelos secos a húmedos);
- c) En suelos secos;
- d) En conductos húmedos o que tengan rellenos;
- e) Donde la superficie del cable pueda contaminarse con materiales conductores, como hollín, sal, polvo de cemento, etc,;
- f) Donde se deba evitar la radio interferencia; y
- g) Donde se deba preservar la seguridad del personal.

El uso de los cables no blindados se recomienda cuando la puesta a tierra de la envoltura sea peligrosa o donde el blindaje no puede ser adecuadamente puesto a tierra. Ejemplos de estos casos son los siguientes:

- a) Un cable monopolar sobre aisladores.
- b) Algunos tipos de cables verticales.

La tabla 22 contiene las recomendaciones de la 'Insulated Power Cable Engineers Association' (IPCEA), tomando en consideración el voltaje entre fases, para cables aislados con caucho o termoplásticos, desde el cual deberá usarse el blindaje.

TABLA 22

VOLTAJES LIMITES DE OPERACION SOBRE LOS CUALES  
DEBERA USARSE BLINDAJE PARA CABLES AISLADOS CON  
CAUCHO Y TERNOPLASTICOS (KV) (L13)

Tipo de Cable	Monopolares		Multipolares *	
	Puestos a tierra	No puestos a tierra	Puestos a tierra	No puestos a tierra
a) Con envoltura metálica tubular (Pb o AL)	5**	5**	5	5
b) Con envoltura metálica corrugada o anillada	5**	5**	5	5
c) Con recubrimiento fibroso	2	2	2	2
d) Con recubrimiento resistente al ozono	2	2	2	2
e) Con recubrimiento no resistente al ozono:				
1. En conducto metálico o en canales sujetos al techo (interiores y locales secos)	5 †	3	5	5
2. Enterrados en conductos, canales no rellenos y lugares húmedos	3 ††	3	5	5
3. Aéreos	3	3	5	5
4. Aéreos preensamblados o revestidos con protección metálica	5	5	5	5
5. Enterrados directamente	3	3	5	5

\* Con envoltura común.

\*\* En estos casos, el efecto de blindaje de la envoltura metálica debe suplementarse con otro blindaje no metálico, íntimamente en contacto con el aislante y la envoltura metálica. No se necesita un nuevo blindaje metálico.

† Se supone un ambiente limpio; si existen contaminantes, el valor se reduce a 3 [KV].

†† Para cables tripolares sin envoltura común y blindados uno a uno, el voltaje es 5 [KV].

#### 5.6.4 Puesta a tierra del blindaje.

Se recomienda poner a tierra al menos en una parte del cable y - preferiblemente en dos o más sitios, especialmente en los extremos, em palmes y derivaciones. Además se recomienda el uso de conos ecualizado res de campo eléctrico en los terminales del blindaje.

La puesta a tierra múltiple reduce la posibilidad de secciones abier tas en cables sin armadura metálica, mejorándose la confiabilidad y se guridad del circuito. Todas las conexiones a tierra del blindaje deben ser del tipo sólido y además tomándose precauciones contra la corrosión de las conexiones y la propia puesta a tierra. Si el blindaje no tiene una adecuada conexión a tierra, debido a discontinuidades del mismo o a un acabado defectuoso de la instalación, puede ser más peligroso que cables no blindados o sin recubrimiento metálico.

Debe tomarse en cuenta que cuando el blindaje se halla puesto a - tierra, si bien se evitan potenciales peligrosos, las corrientes inducidas tienen ahora un circuito cerrado pudiendo circular libremente, - por lo cual es necesario seleccionar adecuadamente la sección de la en voltura a fin de evitar calentamiento del aislante por pérdidas óhmi - cas de estas corrientes.

#### 5.6.5 Puesta tierra del neutro.

Para sistemas de corriente alterna, la puesta a tierra del neutro es recomendable en todos los casos y la resistencia o reactancia de - puesta a tierra, deberá ser suficientemente baja, para evitar arcos pe ligrosos a tierra durante fallas. Sin importar la potencia transmitida o el voltaje, una práctica usual ha sido emplear un conductor de cone xión a tierra del orden de  $95 \text{ [mm}^2\text{]}$ . La regla general es la siguiente: - "Se considera que un circuito debe tener su neutro puesto a tierra pa - ra mejorar las condiciones de una rápida desconexión de fallas a tie - rra, de cualquier elemento de un circuito". (L13)

El electrodo de tierra se conecta a través de la caja de unión, en tal forma que el circuito a tierra pueda o no ser conectado, según el voltaje que se presente en la envoltura o para reemplazo de cables. - Las cajas terminales de sistemas trifásicos se montan sobre soportes - conectados directamente a tierra.

#### 5.6.6 Empalmes y terminales.

El enlace entre tramos de cables se lo realiza por medio de juntas, pero es práctica común enlazar además las envolturas de los cables monopolares que conforman un sistema trifásico y también en ciertos casos enlazar dos o más alimentadores que se hallan en la misma ruta. Es esencial que el empalme sea robusto, cuando yace sobre la tierra protegido únicamente por una cinta envolvente. El conductor usado en estos casos es similar al de la conexión a tierra, esto es del orden de los 95 [mm<sup>2</sup>]

Las uniones y terminales de cables trifásicos hasta 23 [KV] y monofásicos hasta 34.5 [KV], han venido utilizando un tipo de empalme con mufla rellena de compuestos, dando resultados muy satisfactorios. Sin embargo cuando el cable posee entre su aislación rellenos, su mezcla con el del empalme puede causar deterioro del cable; en este caso es preferible que el relleno de la unión sea del tipo "sello" para evitar migraciones dentro del cable, o del tipo soluble en el compuesto del cable, con la misma finalidad, también suele emplearse compuestos de alta viscosidad. En todos los casos es importante que a la temperatura de operación, los materiales del empalme no sean duros y/o quebradizos.

#### 5.7 Transposición de la envoltura.

La transposición de la envoltura es una técnica común en los EE. - UU. y Canadá. Está destinada a eliminar o al menos reducir considerablemente las corrientes circulantes en la envoltura, que de otra forma son permanentes en los tres cables monofásicos que conforman un sistema trifásico y que tienen sus envolturas unidas y puestas a tierra en cada extremo de la ruta.

La eliminación de estas corrientes se consigue interrumpiendo la -  
continuidad de las envolturas en los empalmes de cada tramo de cable,  
por medio de manguitos aislantes entre la unión y tierra y entre las -  
envolturas de los tramos de cables.

Las envolturas correspondientes a un tramo de cable son solidamen-  
te unidas en los terminales y en cada tercer empalme, efectuando la -  
transposición en los tramos intermedios, como se indica en la fig. 36.  
La conexión transpuesta de la envoltura en los empalmes hace que la su-  
ma vectorial de los voltajes inducidos sea cero para cada tres tramos  
de cable, previendo que cada uno de éstos sea de igual longitud.

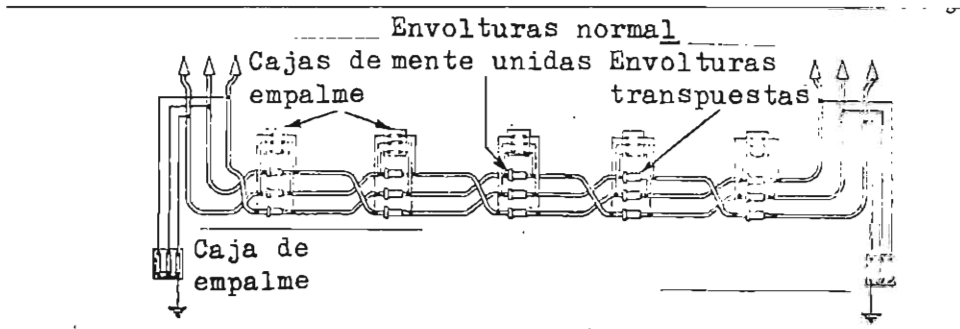


Fig. 36 - Diagrama de un sistema transpuesto que indica las interconexiones de las envolturas y la transposición de los cables.

Las ventajas obtenidas por la transposición son las siguientes:

- 1) Reducción de las pérdidas en la envoltura.
- 2) Menor sección transversal del conductor, al reducir el calentamiento por pérdidas; esta ventaja es especialmente significativa para conductores desde  $2.5 \text{ [cm}^2\text{]}$  de sección transversal.
- 3) Juntamente con la transposición física de las fases, es posible reducir las corrientes en las envolturas en cables dispuestos sobre un plano, arreglo con el cual se consigue una mejor disipación del calor, reduciéndose aun más la sección del conductor.

- 4) Con la reducción en el tamaño del conductor, las corrientes capacitivas serán menores.

Las desventajas que se presentan son:

- 1) Las envolturas y empalmes de los cables deben ser continuamente aisladas entre ellas y tierra.
- 2) Se necesitan uniones especiales con bridas aislantes entre tramos de cables.
- 3) Existe un voltaje permanente en la mayoría de los empalmes y a lo largo del cable. Este voltaje es mayor con un sistema de sólida unión y debe limitarse a valores no muy altos.
- 4) Debido a la posibilidad de reflexión en los puntos de transposición, los voltajes de impulso por maniobras y fallas serán mayores que en sistemas con sólida unión de las envolturas.
- 5) A causa de una menor sección de los conductores, las pérdidas en los mismos serán mayores.

Los voltajes permanentes que aparecen en las envolturas aisladas son proporcionales a la longitud del cable y se incrementan con el desplazamiento axial entre conductores, aunque la transposición para largos tramos actúa como un limitador de la magnitud de este voltaje.

#### 5.7.1 Descripción de un sistema transpuesto.

Se considera la parte de la ruta correspondiente a tres tramos iguales de cable, dispuestos en forma triangular, en la cual la continuidad de las envolturas y pantallas es interrumpida en cada empalme. El voltaje se induce en las tres fases en cualquier punto de la ruta del cable. Asumiendo que los conductores transportan corriente trifásica balanceada, habrá un defasamiento de  $120^\circ$  entre ellas. Si entonces se conectan las envolturas como lo indica la fig. 37, se verá que cada circuito de envoltura contiene un tramo de cada fase y el voltaje total en cada circuito es la suma de tres voltajes iguales, defasados  $120^\circ$ , esto es: cero. En los terminales de los cables, las envolturas se las puede poner a tierra sin que haya flujo de corriente hacia ella.

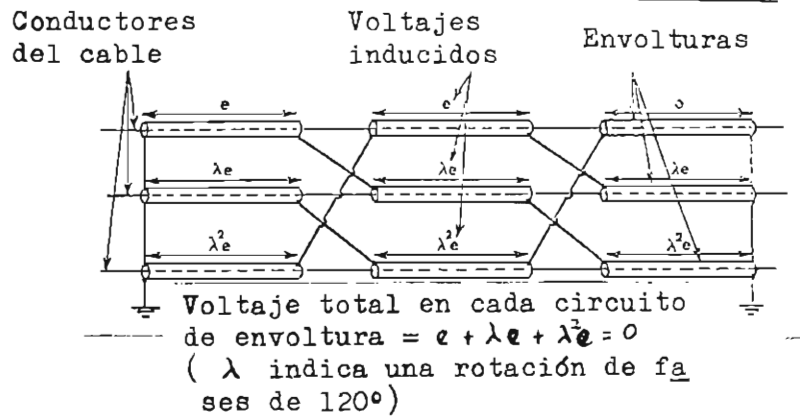


Fig. 37 - Diagrama básico de conexiones de transposición de la envoltura.

y por tanto sin pérdidas (excepto las de circulación que son usualmente pequeñas).

El proceso descrito se lo realiza a lo largo de toda la ruta. Existe de hecho, la presencia de un voltaje en las envolturas a lo largo de todo el cable, siendo máximo en las uniones; en Gran Bretaña este valor debe ser limitado a  $65 [V_{ef}]$  (a tierra), esta restricción obliga a una reducción del espaciamiento entre conductores a fin de cumplir con ella.

Las observaciones anteriores se referían a una disposición triangular, lo que redundaba en iguales voltajes inducidos en las envolturas. Es sin embargo más conveniente que los cables estén dispuestos en un plano. También es práctica normal transponer los cables en cada empalme (fig. 36) para reducir la radio interferencia en circuitos de comunicación paralelos a los cables de potencia (caso frecuente en distribución en ciudades) y también para preservar la simetría de los voltajes en cada circuito de envoltura.

Si no importara la limitación de voltaje, la transposición permite un incremento suficiente en el espaciamiento de los cables como para mejorar significativamente la disipación de calor, por esta razón, es-



te sistema va haciéndose más frecuente, a fin de obtener un aumento en la capacidad de conducción de corriente de los cables.

Los sobrevoltajes que se presentan en la falla trifásica simétrica son los de mayor valor, y son función de la corriente de cortocircuito; también estos sobrevoltajes se presentan en la envoltura, con un valor del orden de  $3.500 [V]$  para una corriente de falla de  $10 [KA]$ , valor que varía muy poco con corrientes más altas. Debido a que cuando se emplea un sistema con envolturas transpuestas tiene que existir un aislamiento entre envoltura y tierra en los empalmes donde no hay conexión a tierra, los sobrevoltajes mencionados son un peligro para la instalación. Para limitarlos se emplean resistencias no lineales entre envoltura y tierra que en el caso de cortocircuitos actúan en forma similar a los pararrayos, haciendo que los sobrevoltajes no excedan de los  $600$  u  $800 [V_{ef}]$ . En estado normal de funcionamiento no permiten el paso sino de unos pocos miliamperios. Con sobrevoltajes de maniobra o atmosféricos, aunque su valor es de difícil determinación, estas resistencias han operado eficientemente, por lo cual su empleo es recomendable.

## 6.- ANALISIS DE FALLAS EN LOS CABLES.

### 6.1 Causas.

En su origen las fallas pueden ser de dos tipos, internas y externas; en este último caso, generalmente se conoce la clase de falla y su ubicación, pudiéndose realizar una inmediata reparación. Cuando la falla tiene un origen interno, las causas son múltiples y por esto se requiere de un estudio más detallado.

### 6.2 Tipos generales de fallas.

En esta clasificación se pueden incluir los siguientes casos:

#### 6.2.1 Corte.

Esta falla puede presentarse por punción, trizadura o rotura de la envoltura, u otros defectos debidos a doblamiento o vibración del cable. La falla resulta usualmente por penetración de humedad, pero también puede ocurrir por debilitamiento del aislante como en el caso de la fuga de compuestos de relleno.

#### 6.2.2 Por corrosión o desgaste de la envoltura.

Esta causa puede provocar el rompimiento total de la envoltura o un deterioro tal que pierda su efectividad. Los efectos son los mismos que en el caso anterior. Su origen obedece en forma general a un proceso de electrolisis, debida a la oxidación de la envoltura o por la presencia de electrolitos que rodean al cable. El caso más común es la existencia de puestas a tierra cercanas que provocan una corriente en el electrolito, cuya consecuencia final es el desgaste de la envoltura.

#### 6.2.3 Por humedad dentro del aislante.

Esta causa se evidencia en aislamiento de papel por la dureza que muestran las capas al tratar de desarmarlas, por manchas en el papel y a veces por gotas dentro del aislante. Si existe duda se puede colocar parte del material con falla en parafina caliente, entre 125 y 160 [°C], la formación de burbujas o pequeños 'cristales' de la parafina indican la presencia de humedad. La determinación de este tipo de falla cuando

existe agua que rodea al cable o hay lluvia, no es posible.

#### 6.2.4 Disrupción eléctrica.

Sin evidencia de humedad, esta causa puede tener uno o más de los siguientes orígenes:

- a) Conductores defectuosos por la acción de algún agente mecánico;
- b) Hinchazón de la envoltura o hendiduras de la misma, debidas a presión interna;
- c) Pérdida general o fuga de aceite o compuestos de relleno de la aislación, especialmente en la falla;
- d) Polimerización de los compuestos de relleno; y
- e) Presencia de "árboles" (grietas con esta forma) carbonizados en el aislante.

Entre las razones expuestas, la existencia de presión interna en un cable ha sido comprobada como el origen más frecuente y evidente de fallas; otras en cambio, a pesar que pueden deberse a un deterioro provocado por esfuerzos dieléctricos, como filtración, polimerización o árboles carbonizados, no provocan necesariamente una falla, como se ha comprobado por el correcto funcionamiento de muchos kilómetros de cables con estas características.

#### 6.2.5 El calor como causa de falla.

Es un caso especial de punción sin humedad. La degradación del aislante puede incrementar las pérdidas dieléctricas en tal forma que la disrupción final se deba a un rápido deterioro de partes críticas del aislante por sobrecalentamiento. Las sobrecargas pueden también producir este mismo efecto, al igual que fuentes externas de calor. La comprobación de esta causa de fallas es la presencia de partes fundidas del aislante o, en el caso del papel, su tendencia a ser quebradizo.

Otras causas de fallas se las clasifica como inherentes al aislante y se las ha tratado en "el comportamiento", al estudiar cada uno de los aislantes en forma particular.

Entre las fallas por causas externas se pueden anotar aquellas debidas a fallas de cables adyacentes, este problema se presenta la mayoría de las veces en las cámaras subterráneas.

### 6.3 Identificación y localización de fallas.

En el análisis de fallas es muy importante detectar primero el tipo de falla que ha ocurrido, a fin de escoger el equipo más conveniente para su localización. Para esto en forma general las fallas pueden clasificarse en dos: a) Circuito abierto o falla en serie; y  
b) Cortocircuito o falla en paralelo.

#### 6.3.1 Análisis de la falla en serie.

Generalmente este tipo de falla, cuando tiene un origen interno, ocurre con un solo conductor, pues si dos o más conductores se hallaren comprometidos en el mismo lugar de la falla, ésta se transforma en la del tipo en paralelo. Cuando el origen de la falla es externo (por ejemplo, caso de excavaciones) puede ocurrir la rotura hasta de todos los conductores.

En el primer caso la detección se la realiza midiendo continuidad con un puente, midiendo la capacitancia del cable y comparándola con los valores originales (instalación nueva) o por el método de reflexión. Con falla de origen externo, su localización puede ser más fácil por la información que voluntariamente proporcionan quienes la originan; si esto no ocurre, se hace uso de los métodos antes mencionados.

#### 6.3.2 Análisis de la falla en paralelo.

Esta puede ser de dos tipos: contacto a tierra (de una fase) y cortocircuito entre fases, en este último caso puede o no haber daño del aislante. Su detección se la realiza por medio de un megóhmetro, entre fase y tierra y entre fases.

#### 6.3.3 Proceso de estudio y localización de las fallas.

No existe un sistema generalizado para proceder al análisis de una falla, pues la clase de cables, el tipo de instalación, los medios

disponibles tanto de aparatos como de personal, los datos existentes - sobre las instalaciones, etc., determinan la sistematización del análisis. Sin embargo, la adopción de tal sistema es muy importante por el ahorro de tiempo y la seguridad del personal.

Si se tratase de generalizar el proceso de análisis, éste puede ser descrito por una serie de pasos que han dado buenos resultados en la práctica y son:

- 1) Pruebas preliminares para identificar el problema, esto es si la falla es en serie o en paralelo;
- 2) Cuidadoso análisis de los datos existentes; permisos para excavaciones, existencia de cámaras subterráneas propensas a inundaciones, etc.
- 3) Medida de la resistencia de falla.
- 4) Selección del equipo disponible a base de los datos anteriores para proceder a la localización de la falla.
- 5) Si la resistencia de la falla fuese muy alta, proceder a su reducción hasta que los aparatos usados en su localización sean eficientes.
- 6) Prueba preliminar de localización a base de los métodos seleccionados y meticoloso análisis de los resultados.
- 7) Inspección del sitio probable de falla, sobre todo si coincide con lugares accesibles del cable.
- 8) Comprobación del punto exacto por medidas en el tramo considerado crítico.

Según lo expuesto, es necesario conocer los detalles de la instalación, lo cual se consigue por una adecuada recopilación de parámetros, cuando la instalación es nueva o los datos de pruebas de recepción, a lo cual se deberá adjuntar el historial de la instalación (fallas anteriores, permisos de excavación, etc). Además se necesitan conocer los diferentes métodos de análisis y localización de fallas para una adecuada selección de los mismos. Su estudio se lo presenta más adelante.

Gran parte de las ocasiones las fallas presentan una alta resistencia que es necesario reducirla a valores convenientes según el método de análisis, para el efecto existen aparatos, cuyas características principales se presentan en el punto 6.3.12

#### 6.3.4 Métodos de análisis de fallas.

A continuación se analizan los diferentes métodos para la detección y localización de las fallas, así como su aplicación específica y sus limitaciones.

En general estos métodos pueden clasificarse en dos: a) por medida en los terminales; y b) por utilización de trazadores.

El método por medida en los terminales involucra la determinación de algunas características eléctricas y su comparación con valores anteriores a la falla. Su efectividad depende de la precisión de estos últimos datos. En esta clasificación se incluyen: Método de Reflexión, medida de la Capacitancia y métodos de lazos.

El método por utilización de trazadores emplea señales eléctricas que son enviadas por el conductor dañado desde uno de los terminales y que permiten el análisis de la falla por un cambio en las características de la señal. En este grupo se incluyen los siguientes sistemas: Corriente Continua Modulada, Corriente Alterna Modulada, Audiofrecuencia e Impulso. En principio son semejantes al método de reflexión, pero la señal debe ser detectada a lo largo de la ruta del cable, para localizar la falla.

#### 6.3.5 Método de Reflexión.

Es uno de los métodos más modernos. Consiste en enviar pulsos característicos por un terminal del cable con falla y analizar la onda reflejada. Estos pulsos se reflejan en aquellos puntos donde existe un cambio de impedancia, como fallas o empalmes. Esta reflexión puede amplificarse y alimentar al eje vertical de un osciloscopio de rayos catódicos (ORC). El barrido de las ondas se consigue conectando al eje -

horizontal del ORC una base de tiempo, que apropiadamente seleccionada proporciona la distancia entre el terminal de prueba y la falla.

Dependiendo del tipo de aparato usado, pueden obtenerse oscilogramas como el de la fig. 38, que emplea una técnica de radar para la detección. Para encontrar la distancia a la falla se necesita conocer la velocidad de propagación de la onda. Esta depende del aislante del cable y puede obtenerse a base de la fórmula siguiente:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (63) \quad (L7)$$

en donde:  $v$  = Velocidad de propagación de la onda, [m/s]

$c$  = Velocidad de propagación de la luz, [m/s]

$\epsilon$  = Constante dieléctrica relativa del aislante

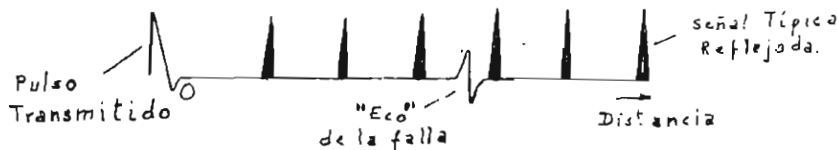


Fig. 38 Oscilograma de una falla obtenido por el método de reflexión, con técnica de radar

#### Usos y limitaciones:

Dependiendo del aparato empleado pueden detectarse fallas en serie o en paralelo, de baja resistencia (aprox. 600 ohms), aunque actualmente con un acoplamiento a un generador de pulsos de alta tensión, también se emplea para fallas en paralelo de alta resistencia (ver punto 6.3.11). El inconveniente que presenta este método es el error de interpretación por falsas señales que pueden obtenerse por cambios de impedancia en el cable debidos a empalmes, derivaciones o diferencia de calibre del conductor. Su utilización se complementa con el método descrito en el punto 6.3.11. (L7-L8)

### 6.3.6 Método de la capacitancia.

Este método emplea una técnica bastante simple y es la medida de la capacitancia entre conductor y tierra, según el circuito de la fig. 39.

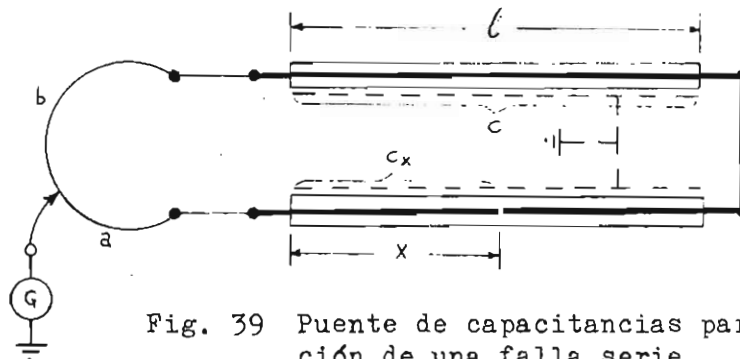


Fig. 39 Puente de capacitancias para localización de una falla serie.

Según este gráfico, las ecuaciones que darán la distancia a la falla son:

$$x = 2l \frac{b}{a+b} \quad (64)$$

o

$$x = l \frac{C_x}{C} \quad (65) \quad (L7-L8)$$

Una alternativa a este método es la medida de las corrientes de carga de un cable similar en buen estado y del cable con falla:  $i_1$  e  $i_2$  respectivamente; entonces, según la fig. 39:

$$x = l \frac{i_2}{i_1} \quad (66) \quad (L7)$$

Usos y limitaciones:

Es un método bastante exacto, aunque sirve solo para fallas en serie. Cuando se usa el método alternativo, se debe emplear corriente alterna y para obtener una buena exactitud, es necesario que el voltaje aplicado sea alto, pudiendo producirse un arco por debilitamiento de la resistencia de falla; por esto, la fuente debe tener un dispositivo de protección de alta velocidad. (L7-L8)



### 6.3.7 Método de los lazos.

En general consiste en formar dos ramas de un puente con un conductor sin falla y realizar medidas de resistencia. Entre estos métodos se tienen:

#### 6.3.7.1 Lazo de Murray.

Es un método muy usado hasta hoy, sobre todo por su sencillez y por cuanto no influye el valor de la resistencia de falla. Actualmente este método se ve complementado por el empleo de altas tensiones para formar el lazo, lográndose mayor precisión. Su descripción es la siguiente:

Las conexiones son tales que las resistencias  $x$  y  $\ell$  forman dos ramas similares a las de un puente de Wheatstone cuyas otras dos ramas son las resistencias variables. La fig.40 indica el esquema de conexiones.

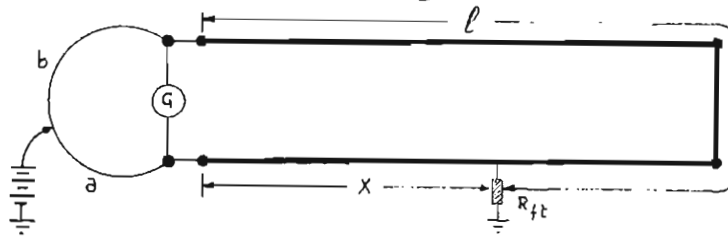


Fig. 40 Esquema de conexiones del lazo de Murray

Cuando se ha equilibrado el puente:  $\frac{b}{a} = \frac{\ell}{x}$  o'  $\frac{b+a}{a} = \frac{\ell+x}{x}$

entonces: 
$$x = (\ell+x) \left( \frac{a}{a+b} \right) \quad (67)$$

la resistencia total del lazo ( $\ell+x$ ) se obtiene por medida con el puente. Si los conductores son de igual calibre y material (resistividad y sección constantes), la distancia a la falla se encuentra multiplicando la longitud del lazo por el factor:  $\left( \frac{a}{a+b} \right)$

Una falla entre conductores se la localiza con la batería conectada a uno de los terminales de un conductor con falla, en vez de a tierra, y el otro extremo a un lazo completado con un conductor sano.

Usos y limitaciones:

Su empleo es muy generalizado, pero presenta inconvenientes como - la necesidad de un conductor en buen estado. Además como debe formar - ramas de un puente, no puede usarse para circuitos abiertos; así mismo, una alta resistencia en la falla puede inutilizar el método, a menos - que sea rebajada a valores convenientes, que dependen del voltaje emple - do en el puente. Por otra parte, el empalme de los conductores en el - un extremo debe ser del tipo sólido para no introducir errores en las medidas, esto ocasiona demoras que en el caso de líneas importantes son indeseables. (L8-L16)

### 6.3.7.2 Lazo de Varley

Es similar al lazo de Murray, únicamente que este método usa - una relación fija del puente y el balance se obtiene por la adición de resistencia a la sección menor del lazo, como en la fig. 41.

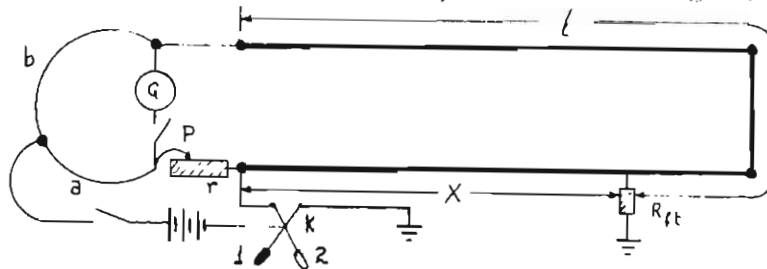


Fig. 41 Esquema de conexiones del lazo de Varley

Con la disposición indicada en esta figura y el interruptor K en - la posición 1, el balance del puente da las siguientes relaciones:

$$\frac{b}{a} = \frac{\ell}{X + r} \quad (68)$$

siendo  $r$  la resistencia añadida en P; y

$$X = \frac{(X + \ell) a - r b}{a + b} \quad (69)$$

La resistencia total del lazo  $(X + \ell)$  se mide con el interruptor K en la posición 2 por medio de un segundo balance, usando el aparato co mo un puente de Wheatstone.

Usos y aplicaciones:

Su empleo es el mismo que el del lazo de Murray, pero tiene la ventaja sobre éste que se consigue una medida directa de la resistencia total del lazo, reduciendo el tiempo de prueba. (L16)

Los puentes de Murray y de Varley deben tener una alta capacidad de corriente, del orden de 5[A], y su voltaje debe ser tal que permita el funcionamiento del puente.

### 6.3.8 Método de la Corriente continua modulada.

Cualquier señal de corriente continua a intervalos o de magnitud variable transmitida por el conductor que detecte la falla, se la considera incluida en este método; se excluye, sin embargo, la empleada para carbonizar la resistencia de falla.

En este método se emplea un galvanómetro u otro detector direccional, aplicado sobre la armadura (fig. 42) estando separados los contactos entre 0.5 y 1[m]. La localización exacta de la falla se consigue cuando el detector marque cero.

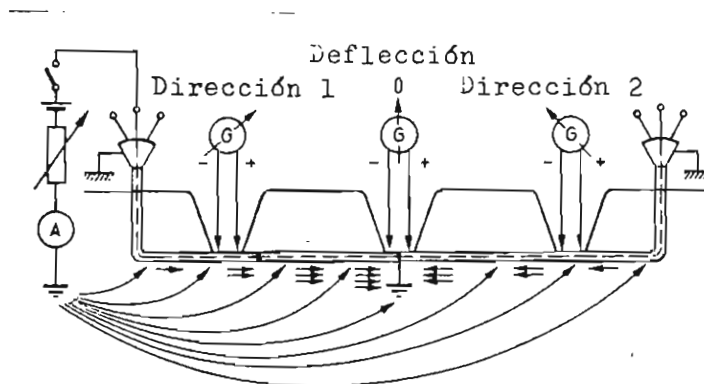


Fig. 42 Esquema de conexiones para la localización de fallas por el método de la corriente continua modulada.

Usos y aplicaciones:

Este método usado para fallas en paralelo, es muy conveniente para cables en conductos, con fácil acceso a los extremos de los tramos en donde se realizan las medidas, localizándose fácilmente el tramo fallado, pudiéndose realizar inmediatamente su substitución. Al realizar la prueba debe tenerse cuidado de interrumpir la fuente luego de una primera localización de la falla y proceder a verificar con solo el galvanómetro que no hayan corrientes parásitas que deformen la apreciación. (L7-L8)

La experiencia indica que el rango de corrientes que deben transmitirse por el conductor, para obtener una buena detección de la falla, deben ser del orden de los 5[A] y los voltajes hasta del 125 % del nominal al que opera el cable. En caso que no se logaran resultados satisfactorios, habrá que carbonizar la resistencia de falla, para reducirla a valores menores que la original.

Existen equipos que poseen la fuente de corriente continua para la prueba y que además sirve para carbonizar la falla.

Con cables con envoltura de plomo continua, este método no es adecuado, pues raras veces se tiene éxito; para este caso ver el método descrito en el punto 6.3.10 (L8)

6.3.9 Método de la corriente alterna modulada.

Este método considera una alimentación entre 25 y 60 Hz. Su funcionamiento es similar al de corriente continua, variando el sistema de detección, pues en este caso se emplea un transformador de corriente con núcleo partido y un amperímetro en combinación con un milivoltímetro. Su mejor eficiencia se ha logrado en cables en conductos. Este equipo no es útil para carbonizar fallas por la alta corriente que se necesitaría en este caso.

### 6.3.10 Método de audiofrecuencia.

Se introduce una señal entre 100 [Hz] y varios kilohertz en el cable y por medio de una bobina de exploración acoplada a un receptor de alta sensibilidad, que se recorre a lo largo de la ruta del cable, se detecta el punto de falla por el 'ruido' producido por la descarga en este sitio o por la perturbación que no logra ser apantallada por la envoltura.

#### Usos y aplicaciones:

Su empleo es muy eficiente con muy bajas resistencias de falla (cercas a cero ohms) y gracias al principio en que se basa es muy apropiado para emplearlo en sistemas de distribución, pues las ramas laterales o derivaciones no presentan inconvenientes; sin embargo puede presentarse como un problema, el tiempo empleado en rastrear la falla.

Actualmente, una combinación de este método con el de impulso, parece ser de gran eficacia en ciertos casos, sobre todo de altas resistencias de fallas. (L7-L8)

### 6.3.11 Método de impulsos.

Este método es una combinación del de reflexión y el de audiofrecuencia, en el que los impulsos son de alta tensión, venciendo el inconveniente de una alta resistencia de falla. La señal en el primer caso retorna al ORC por medio de un divisor de tensión y luego a base de la bobina exploradora se localiza exactamente el punto de falla, ya que la señal será mucho más nítida al producirse disrupción o contorneo en este punto. (L7-L8)

El voltaje de pico (o máximo) empleado, puede ser menor que el nominal de servicio del cable, pero suficiente para producir un arco detectable en el sitio de falla.

### 6.3.12 Reducción de la resistencia de falla por carbonización.

En los métodos descritos anteriormente para la localización de fallas, se encuentra que en muchas ocasiones es necesario reducir la resistencia de la falla a valores que permitan el uso de determinado método. Esto se consigue por medio de unidades especialmente diseñadas para el efecto.

La experiencia ha demostrado que el mejor medio para obtener una baja resistencia en la falla, es por carbonización del aislante. a base de una fuente de corriente continua, que debe proveer de altas corrientes momentáneas mientras dura el proceso de carbonización, hasta llegar a un arco voltaico luminoso, esto es, luego de pasar etapas previas de carbonización, se llega a un arco sostenido. En este instante, el propio aparato debe ser capaz de reconocer este estado y desconectarse. Esto se consigue por una autoregulación de la potencia de carbonización por control de la tensión aplicada al cable, así como de la corriente que puede llegar a los 30 ó 50[A]. Este procedimiento permite obtener bajas resistencias de falla, del orden de los 0.5 [ohms].

Con una fuente de corriente continua para este proceso, la potencia necesaria será del orden de 8 a 10 [KW]; si se empleara corriente alterna, la potencia sería de hasta 450 [KVA].

El aparato debe poseer un filtro en tal forma que no permita llegar hasta él ondas viajeras por reflexión, protegiendo así al propio aparato y al personal.

Para cables con voltaje nominal de 6.3 y 13.2 [KV], el voltaje máximo que deberá emplearse y que sirve de especificación para este aparato es de 25/50 [KV] C.D. (L7)

## 7.- PRUEBAS DE LOS CABLES

### 7.1 Generalidades.

La mayoría de las pruebas se las realiza en fábrica y en general son del tipo no destructivo, en tal forma que el cable probado no sea deteriorado por efecto de las exigencias a las que se lo ha sometido.

Sobre las pruebas mecánicas se ha explicado ya su significado, (Pág. 6) por lo que en esta parte únicamente se hará referencia a pruebas eléctricas.

Las especificaciones no revisten un carácter general para todos los tipos de cable, sino que cada uno, de acuerdo a la clase de aislación, espesor de ésta, calibre, voltaje nominal, altitud de servicio, etc., tiene su propia norma en cuanto se refiere al valor de voltaje aplicado, tiempo de prueba, etc.

Teniendo en cuenta esta diversificación, resultaría sumamente extenso explicar cada una de las diferentes posibilidades, por lo que posteriormente se tratará de los métodos de prueba y de su significado, antes que de los valores exigidos por éstos.

Las pruebas de campo dependen también de las características de los cables y su instalación y normalmente están constituidas por una serie de exigencias de la empresa propietaria de la instalación, entre las cuales se incluyen los valores mínimos que deben cumplirse.

### 7.2 Requerimientos de las pruebas.

Son esenciales o imprescindibles las pruebas de fábrica, que deben ser cumplidas en forma rígida, para asegurar la bondad de los cables. Existen tres categorías de pruebas que se realizan en fábrica, y son:

- 1) Pruebas de rutina: Se las efectúa en cada tramo de cable y en cada accesorio (empalmes, etc.). Está prevista para asegurar el cumplimiento de las normas bajo las cuales se han fabricado los cables y accesorios.

- 2) Pruebas sobre muestras: Se llevan a cabo sobre pequeños tramos de cable, tomados de cada lote de producción, siendo proporcionales en número a la cantidad de cable elaborada.
- 3) Pruebas tipos: Son pruebas que se realizan a solicitud expresa del comprador y se efectúan especialmente cuando se trata de un nuevo producto.

### 7.3 Pruebas de rutina.

#### 7.3.1 Resistencia eléctrica de los conductores.

Se la realiza para seguridad de que el conductor no ha sido dañado durante su fabricación y que cumple con las especificaciones de las normas.

#### 7.3.2 Resistencia de aislamiento.

Esta prueba asegura que el cable ha sido adecuadamente aislado, esto es, que el aislamiento no ha sufrido deterioro al ser colocado sobre el o los conductores; en el caso de cables con papel impregnado, se comprueba que el impregnante ha sido adecuadamente distribuido en todas las capas del papel y a lo largo de todo el cable.

La resistencia de aislamiento presenta muchas variaciones en su valor, llegando a magnitudes bajas, sin que esto signifique que un cable se halle en mal estado. Por esta razón las normas no fijan valores y es más bien un autocontrol de la fábrica que se fija valores mínimos, como un chequeo de la técnica de fabricación.

#### 7.3.3 Capacitancia.

Como la anterior, algunas normas no fijan valores; se la usa como un chequeo de los métodos de trabajo en la fábrica.

Su valor sirve para calcular la corriente de carga de un cable y en ocasiones para la localización de fallas por circuito abierto del conductor.



#### 7.3.4 Prueba de alto voltaje.

Los cables **modernos** soportan de 8 a 10 veces su voltaje nominal - y realmente esta prueba no da una guía definida sobre la calidad del cable, pues el valor empleado no es el máximo que puede soportar el cable, sino uno intermedio. Se la realiza para detectar algún daño que pudo ocurrir durante la fabricación.

#### 7.4 Pruebas sobre muestras.

##### 7.4.1 Característica (Voltaje/tiempo) de disrupción.

Se debe anotar que el voltaje de disrupción no es una magnitud - constante, sino que depende del tiempo de aplicación de voltajes críticos.

Se aplican varios voltajes que provocan disrupción de la muestra, - determinándose el tiempo de aplicación hasta que ella ocurra. El nivel de estos voltajes va disminuyendo hasta que la disrupción ocurre entre 50 y 100 horas. Este valor de voltaje se considera como el mínimo de - disrupción.

Desafortunadamente, este valor no sirve como para dar un coeficiente de seguridad al cable, puesto que en el servicio, las características del mismo cambian constantemente debido a calentamientos, expansiones, etc. Por este motivo la relación 'voltaje/tiempo' de disrupción, solo da un valor para comparación con otros cables, pero da una información para selección de los mismos.

Actualmente el proceso de disrupción bajo diferentes condiciones, se halla en su etapa de investigación, y esta prueba, por su facilidad de ejecución está siendo muy usada para este efecto.

##### 7.4.2 Factor de pérdidas.

Esta prueba da la calidad del dieléctrico y permite detectar la presencia de cavidades dentro del mismo, por lo cual tiene mucha importancia. Actualmente se están efectuando pruebas en instalaciones existentes, tendientes a determinar la variación del factor de pérdidas -

relacionada con la posibilidad de fallas y con la vida útil de los cables. Por otra parte, esta prueba, permite analizar la calidad de nuevas versiones de aislantes, así como obtener diversos tipos de curvas, como 'factor de potencia/voltaje', 'factor de potencia/temperatura', etc., en las diferentes etapas de investigación, facilitando la comprensión de fenómenos y la comparación entre la calidad de diferentes aislantes.

### 7.5 Pruebas tipos.

Estas pruebas son de gran severidad y por lo tanto de naturaleza destructiva, y sirven para averiguar si el tipo de cable especificado, soportará las condiciones más desfavorables que ocurran durante su servicio o la protección que se debe impartir a la instalación.

Las pruebas tipo pueden destruir un cable que haya pasado las de rutina, por lo cual se acepta que los cables que no constituyen muestras de prueba, conservan sus características, si uno de ellos que ya ha sido probado las ha soportado.

#### 7.5.1 Prueba de Voltaje-flexibilidad.

Esta prueba consiste en dar una vuelta completa a un cilindro - cuyo diámetro tiene las siguientes exigencias, según normas británicas:

Cables hasta	Monopolares	Multipolares
11 KV	$15(D + d)$	$12(D + d)$
22 KV	$20(D + d)$	$15(D + d)$

siendo: D = diámetro externo del cable.

d = diámetro del conductor, o del conductor circular equivalente de todos los conductores que conforman un cable multipolar.

(L7)

Luego se estira el cable y se vuelve a envolver en sentido contrario; este proceso se lo realiza por tres ocasiones, cuidando que el cable no gire sobre su eje. Entonces se somete el cable a la prueba de voltaje, luego de observar que no presente daños físicos.

Esta prueba permite conocer si el cable soportará el embalaje en carretes, su manipulación durante la instalación y la disposición en ángulos al cambiar la dirección de la ruta, sin sufrir deterioro en el dieléctrico por estas causas.

#### 7.5.2 Prueba de impulso.

Consisten en aplicar a la muestra voltajes de impulso cuyo valor de pico sea de  $4.5(U + 10)$  KV, (según normas británicas), siendo U, el voltaje nominal del cable, o el valor que dispongan las normas del país, tanto con polaridad positiva como negativa. Las diferentes normas generalmente solo cambian el valor en números dentro del paréntesis.

Esta prueba permite determinar el nivel básico de aislamiento del cable ('BIL') y por lo mismo el nivel de protección contra sobretensiones de impulso, que por medio de pararrayos o descargadores, debe impartirse al cable y por otra parte realizar una adecuada coordinación del aislamiento con otros dispositivos de una instalación.

#### 7.6 Pruebas de recepción.

Dados que estas pruebas deben ser del tipo no destructivo, y considerando que los cables ha pasado las pruebas de fábrica, el sentido de las mismas es unicamente para comprobar que el cable y sus accesorios (empalmes y terminales) no han sufrido deterioro durante su transporte o instalación.

Las pruebas a realizarse dependen de la política de la empresa que usa los cables, pero en general se las efectua en las etapas siguientes: a) durante la instalación; b) al final de la misma, cuando el cable va ha entrar en operación; y c) durante el tiempo de garantía.

En la actualidad existe la tendencia a realizar unicamente pruebas con tensión continua, con valores de voltaje del orden del 150 % del valor del voltaje nominal del sistema. Este valor depende del tipo de cable y el de la instalación. Existen empresas que inclusive bajan es-

te valor del voltaje de prueba para no afectar la instalación.

El uso de tensión continua para este tipo de pruebas hace que la capacidad del equipo utilizado esté muy por debajo del que se requeriría con tensión alterna; este hecho es muy importante desde el punto de vista de costo del equipo, que evidentemente en el primer caso es bastante menor.

Con cables blindados o con envoltura metálica, es también necesario probar el aislamiento entre el blindaje y tierra; el voltaje empleado es del orden de los 150 [V] C.D., en todo caso, este valor debe coordinarse con el nivel de protección que se da al aislamiento entre blindaje o armadura y tierra para el caso de cortocircuitos en sistemas con transposición de armadura.

## 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 8.1 Importancia del tema.

El análisis realizado sobre los diferentes tipos de aislantes es - presentado en forma general, sin llegar a una determinación específica de servicio para cada material, pues la investigación actual permite - una constante mejora de los dieléctricos, en tal forma que uno de ellos considerado hoy como limitado para ciertas condiciones de servicio, en el futuro puede ser elaborado para soportar exigencias mucho más rigurosas. Sin embargo, se analizan los factores que afectan a cada clase de aislante, lo que servirá para la formación de criterios sobre el uso específico que se desea darle.

Por otra parte, en el país ha sido usual la selección de cables - únicamente a base de los datos de catálogos. Con los diferentes aspectos tratados en este estudio es posible realizar el cálculo de corriente de régimen de un cable y su comportamiento en casos de cortocircuito, sin necesidad de los datos mencionados. Esto abre la posibilidad - de que al instalarse fábricas en el país, puedan determinar las características de un cable considerando las condiciones de nuestro medio y que servirán como un paso positivo para la normalización, tanto de fabricación como de instalación de cables.

El presente estudio puede servir incluso para realizar el diseño - de nuevos tipos de cables, pudiendo en esta forma tener patentes propias, con la consiguiente economía para el país al no importar tecnología.

Así mismo el estudio detallado de cada uno de los parámetros que - intervienen en la determinación de las características de un cable, - abre nuevos campos de estudio e investigación, como por ejemplo el de resistividades térmicas de suelos, que redundará en un conocimiento más cabal de nuestro medio y que además permite un análisis de tipo económico para las diferentes posibilidades que se presentan y aunque pueda pensarse, que a los voltajes estudiados, la práctica suplirá los conoci-

mientos teóricos aquí vertidos, es indudable que el país al desarrollar se en el futuro, exigirá que se eleven los niveles de voltaje de servicio, lo que demanda tanto una profundización de conocimientos como mejores y mayores datos sobre las condiciones ambientales en el país, lo que se conseguirá sin dificultad, si desde el comienzo se realizan los cálculos y medidas pertinentes.

Las técnicas de instalación descritas, pueden servir como una orientación para quien deba trabajar en este campo, así como la interpretación de las pruebas que se realizan sobre los cables.

En conjunto este estudio demuestra (o trata de demostrar) la utilización real que puede tener un cable si se analizan los factores que lo afectan, y que las exigencias que debe satisfacer son un producto de la forma de instalación, las condiciones ambientales y su propia constitución.

## 8.2 Observaciones de normas para la instalación y mantenimiento de cables.

En este aspecto es muy importante que la empresa adopte un sistema general de instalaciones, que deberá respetarse tanto como sea posible, pues a más de ganar en una especialización del personal y tiempo en la instalación, evita confusiones al realizar análisis de fallas.

Cuando se emplean diferentes formas de instalación o varios tipos de cables, las cuadrillas de trabajadores deben ser especializadas para cada uno de los casos, ya que de esta forma se logra la máxima eficiencia.

Es además necesario que al terminar la instalación se recopilen todos los datos que posteriormente serán útiles, como resistencias y capacitancias reales del cable o tramos de él, la exacta ubicación de empalmes, cruces con otras instalaciones y la ruta misma. Entonces, cuando se presente una falla, ésta será mucho más fácil de identificarla y localizarla. También previendo que se presentarán fallas, es conveniente normalizar el equipo para analizarlas, juntamente con un procedimiento

to tal que el tiempo hasta terminar su reparación sea mínimo.

Por otra parte es muy importante analizar la posibilidad de realizar la instalación de un cable o sistemas de cables, para el siguiente nivel de voltaje normalizado dentro de la empresa, sobre todo si se trata de cables directamente enterrados, cuando el crecimiento del servicio sea tal que un cambio de cables se deba realizar luego de corto tiempo de instalación. Con este procedimiento es posible cambiar unicamente el nivel de voltaje de servicio en alta tensión, sin tener que cambiar todo el sistema. La decisión final será de orden económico y aspectos de relaciones públicas, por las molestias obvias que un cambio de instalación ocasiona a los usuarios y al público en general.

### 8.3 Recomendaciones a los interesados.

A base de la presente tesis, se pueden obtener las características propias para determinados cables, bajo condiciones patrones; luego estos valores pueden ser fácilmente cambiados para nuevas condiciones, sobre todo para los tipos de cables más utilizados en la empresa.

Luego es importante conocer las características más exactas sobre los materiales aislantes, con lo que las diferentes estimaciones que se hagan, serán más precisas.

Cuando ha fallado un cable es muy importante conocer el tipo de falla y analizar sus causas, pues de esa forma se logrará prevenir problemas futuros o llegar a una conclusión más exacta sobre los mismos. Estos datos deben ser convenientemente archivados para su aprovechamiento futuro.

APENDICE I

DEDUCCION DE LA CORRIENTE DE REGIMEN  
PERMANENTE DE UN CABLE.

Considerando una disposición triangular de los conductores de un cable, como lo indica el gráfico (a) y su equivalente eléctrico de la conducción térmica según el esquema (b), se pueden determinar las diferencias de temperatura entre el conductor y el medio ambiente; para esto se debe tener en cuenta que las superficies a, b, c y d son 'equitéticas' o superficies equipotenciales térmicas.

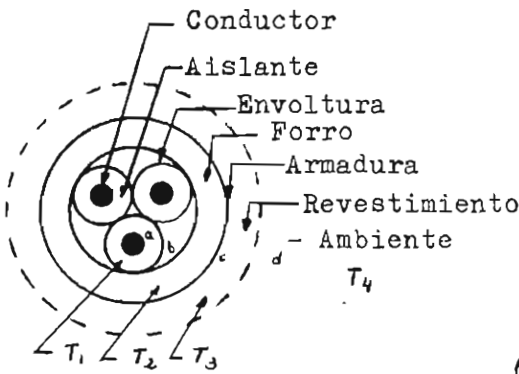


Fig. a

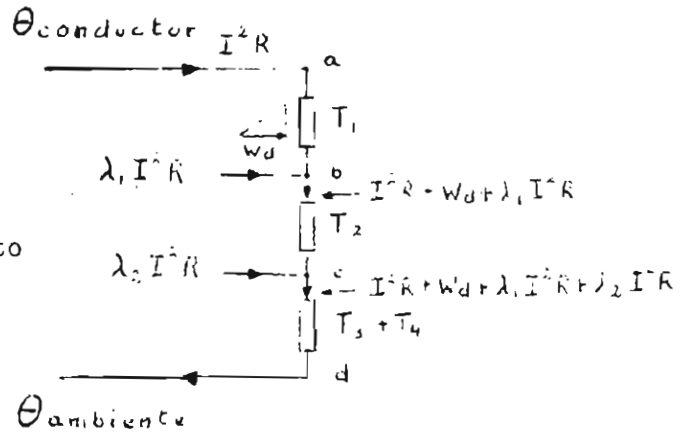


Fig. b

Según el esquema (b):  $\Delta\theta_{ab} = I^2 R T_1 + \Delta\theta_x$  (A)

en donde  $\Delta\theta_x$  considera que las pérdidas aumentan linealmente de 0 a  $W_d$ , al avanzar a lo largo de la resistencia térmica  $T_1$ , según lo indica la fig. c, sin importar el número de cables. Por lo tanto:

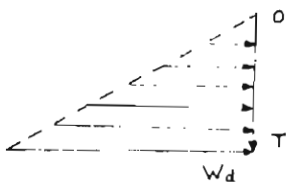


Fig. c

$$\Delta\theta_x = \int_0^{W_d} \frac{1}{2} T_1 dW_d = \frac{1}{2} T_1 W_d \quad (B)$$

con lo cual:  $\Delta\theta_{ab} = I^2 R T_1 + \frac{1}{2} W_d T_1$  (C)



$\Delta\theta_{bc}$ : A partir de la superficie equit rmica b hasta la c. y considerando las pérdidas producidas por todos los cables:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{bc} &= n T_2 (I^2 R + W_d + \lambda_1 I^2 R) \\ &= n T_2 [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d] \quad (D)\end{aligned}$$

$\Delta\theta_{cd}$ : Considerando en serie las resistencias térmicas del revestimiento exterior del cable y del medio ambiente  $T_3$  y  $T_4$ , y tomando en cuenta las pérdidas producidas por todos los cables:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{cd} &= n (T_3 + T_4) (I^2 R + W_d + \lambda_1 I^2 R + \lambda_2 I^2 R) \\ &= n (T_3 + T_4) [I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \quad (E)\end{aligned}$$

Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el conductor y el medio ambiente,  $\Delta\theta$  es:

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

De la fórmula (F) se puede deducir la corriente permisible o de régimen permanente  $I$ , que podrá llevar el conductor:

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

de donde:

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

que corresponde a la ec. 39

## APENDICE II

### CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

#### 1.- Generalidades.

Sin tratar de profundizar en un estudio de las corrientes de cortocircuito y tan solo por la necesidad de conocer ciertos valores para un adecuado cálculo de cables, en este apéndice se trata del cálculo de los parámetros imprescindibles.

Como en el análisis de los cables unicamente interesa el máximo valor de las corrientes que pueden presentarse en un cortocircuito, solamente estos valores serán materia de estudio en este apéndice.

#### 2.- Definiciones.

##### 2.1 Corriente de choque de cortocircuito $I_g$ .

Es el valor máximo instantáneo de la corriente después de ocurrir el cortocircuito y se indica por su valor de cresta. Su valor varía de acuerdo con el instante en que ocurre el cortocircuito. (L14)

##### 2.2 Corriente alterna subtransitoria de cortocircuito $I_k''$ .

Es el valor eficaz de la corriente alterna de cortocircuito en el instante en que éste ocurre. Su magnitud depende esencialmente de las impedancias efectivas de la red y de la reactancia inicial  $X_d''$  (reactancia subtransitoria de eje directo) de las máquinas. (Ver fig. A) (L14)

##### 2.3 Corriente permanente de cortocircuito $I_k$ .

Es el valor eficaz de la corriente alterna que se obtiene después del transcurso del fenómeno transitorio de estabilización. Su valor depende de la excitación de los alternadores. (Ver fig. A) (L14)

##### 2.4 Factor de choque $\mathcal{K}$ .

Es el índice de relación entre las corrientes de choque y alterna transitoria, en función de la relación de resistencia óhmica a impedancia ( $R/X$ ) existentes en el circuito. (Ver fig. B) (L15)

3.- La corriente de cortocircuito y el proceso de amortiguamiento.

El cortocircuito constituye un circuito cerrado a través de una impedancia. Entre todas las impedancias que intervienen en un cortocircuito, la del generador que lo alimenta ocupa un lugar principal. En efecto, la reacción del inducido provoca durante el desarrollo de un corto circuito un debilitamiento más o menos pronunciado del campo de exitación, disminuyendo en consecuencia la tensión en los bornes del generador. Este descenso en la tensión puede considerarse como un incremento de la impedancia del generador, suponiendo constante la fuerza electromotriz existente antes de producirse el cortocircuito.

El efecto que lo anteriormente expresado tiene sobre la corriente de cortocircuito, se traduce en un aumento de esta corriente hasta alcanzar un valor elevado "de punta", denominado corriente de choque  $I_s$  (véase la fig. A). Luego la corriente decrece hasta un valor estacionario final llamado corriente permanente de cortocircuito  $I_k$ . Este proceso se expresa diciendo que la corriente de cortocircuito decrece desde la corriente subtransitoria hasta la corriente permanente de cortocircuito. El valor inicial de la corriente subtransitoria es el representado por  $I_k''$ . Según la fig. A, la corriente de cortocircuito es esencialmente alterna, pero analizando el desplazamiento en su eje de simetría puede verse que en conjunto está constituida por una corriente contínua amortiguada sobre la cual se superpone la alterna.

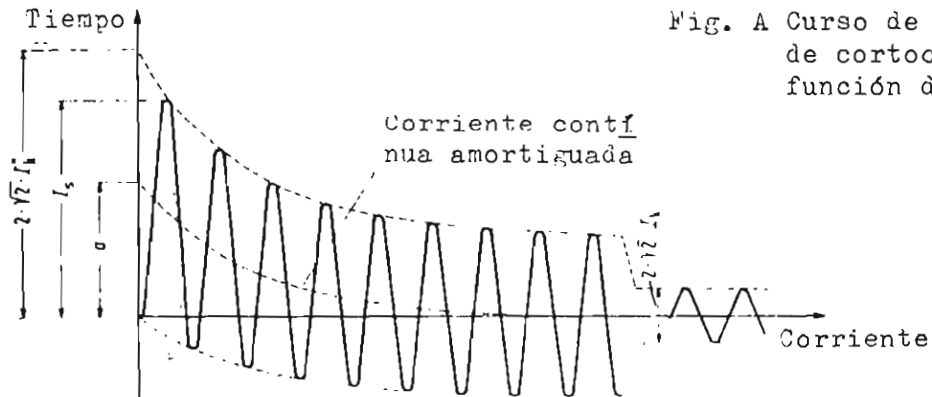


Fig. A Curso de la corriente de cortocircuito en función del tiempo.

La distancia entre el generador que alimenta el cortocircuito y éste, tiene influencia sobre el proceso de amortiguamiento. Generalmente se distinguen dos casos: el primero denominado cortocircuito cercano al generador, caso en el cual se presenta típicamente el proceso de amortiguamiento, y cortocircuito lejano al generador, en cuyo caso la componente alterna de la corriente de cortocircuito ya no es amortiguada. Esta influencia sobre los valores de cada una de las corrientes calculadas, se la hará particularmente en cada caso. (L14-L15)

#### 4.- Valores característicos del proceso de amortiguamiento.

Se dijo en el punto anterior que el amortiguamiento podía considerarse como un aumento en el valor de las impedancias; esto nos conduce a diferenciar dos tipos de reactancias (para el presente caso), que en la práctica constituyen dos reactancias:

Reactancia subtransitoria:  $X_d''$

Reactancia sincrónica:  $X_d$

La reactancia subtransitoria  $X_d''$  abarca la reactancia de dispersión de los arrollamientos del estator y rotor del generador, incluida la influencia de barras de amortiguamiento. Los valores promedios relativos son de 12 % y 18 % para turbogeneradores y generadores de polos salientes, respectivamente.

La reactancia simétrica  $X_d$  es la total del inducido (reactancia de dispersión del estator + reactancia de reacción del inducido) del generador. Su valor relativo es de 160 % en turboalternadores y de 100 % en máquinas de polos salientes. (L15)

Las resistencias óhmicas se las toma sin cambios por el amortiguamiento y un valor característico de los alternadores es:

$$R_G = 0.07 X_d'' \quad (A) \quad (L14)$$

### 5.- Cálculo de $I_k''$

La corriente de cortocircuito máxima, puede calcularse para cortocircuitos lejanos o cercanos, con mucha aproximación por medio de la ecuación:

$$I_k'' = \frac{1.1 U}{\sqrt{3} \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (B) \quad (L14-L15)$$

en donde:

$U$  = Tensión nominal de la red, [KV]

$R$  = Resistencia total del circuito (la del generador + la de la línea). Cuando  $R \leq 0.3X$  puede despreciarse.  $R$  = [ohm]

$X$  = Reactancia total del circuito, [ohm]

1.1 = Factor que incluye sobrecargas del generador, siendo un valor promedio para turboalternadores y generadores de polos salientes.

La ecuación (B) puede ser transformada para utilizar valores en porcentaje o por unidad, en vez de usar directamente valores reales.

Cuando en el trayecto del cortocircuito se hallaren transformadores con regulaciones de voltaje mayores al  $\pm 5\%$  del nominal, la ecuación (B) debe multiplicarse por la relación de transformación adecuada

### 6.- Cálculo de $I_s$

La corriente de choque por cortocircuito puede calcularse por medio de la ecuación siguiente:

$$I_s = \mathcal{K} \sqrt{2} I_k'' \quad (C) \quad (L14-L15)$$

El valor de  $\mathcal{K}$  puede hallarse por medio de la fig. B, en la que  $R$  y  $X$  tienen el mismo significado que en la ec. (B).

La lejanía o cercanía del cortocircuito respecto del generador se encuentra incluida en el gráfico de  $\mathcal{K}$ , por medio de sus curvas respectivas.

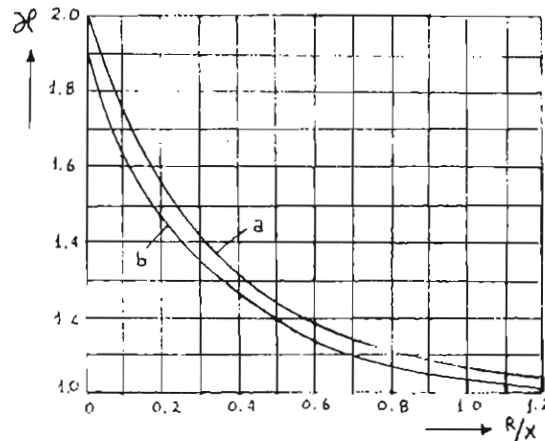


Fig. B Factor  $\mathcal{K}$  : a) Para cortocircuito lejano  
b) Para cortocircuito cercano.

### 7.- Cálculo de $I_k$ .

Hasta el momento no se ha mencionado la influencia que el tipo de falla tiene sobre las corrientes de cortocircuito, debido a que tanto  $I_k''$  como  $I_s$  dependen del valor instantáneo del voltaje al cual ocurre la falla; en cambio el máximo valor de  $I_k$  depende del tipo de falla, - por lo que este aspecto es considerado únicamente en este momento. Las fórmulas correspondientes para los diferentes casos de falla son:

$$\text{Cortocircuito trifásico: } I_k = \beta I \quad (D) \quad (L15)$$

$$\text{Cortocircuito bifásico: } I_k = \sqrt{3} \beta I \quad (E) \quad (L14)$$

$$\text{Cortocircuito monofásico: } I_k = 3 \beta I \quad (F) \quad (L14)$$

en donde:  $I$  = Corriente de régimen permanente.

$\beta$  = Coeficiente según las figs. C y D.

Las fórmulas (D) a (F) no consideran la influencia de la carga de los consumidores, pero en cambio sí la sobrecarga: 1.3 veces para - turboalternadores y 1.6 para generadores de polos salientes. Estas fórmulas por lo tanto son aproximadas, pero su precisión es suficiente en el estudio de cables; si se necesitara considerar las cargas por un in flujo muy grande sobre la corriente de falla, se lo puede hacer por medio de la inclusión de una impedancia en paralelo con la falla.

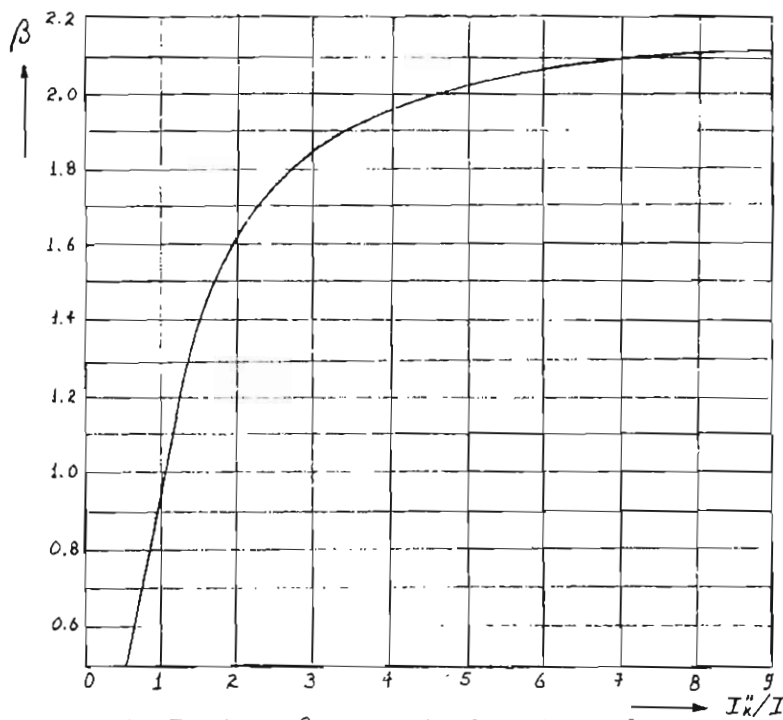


Fig. C - Factor  $\beta$  para turboalternadores.

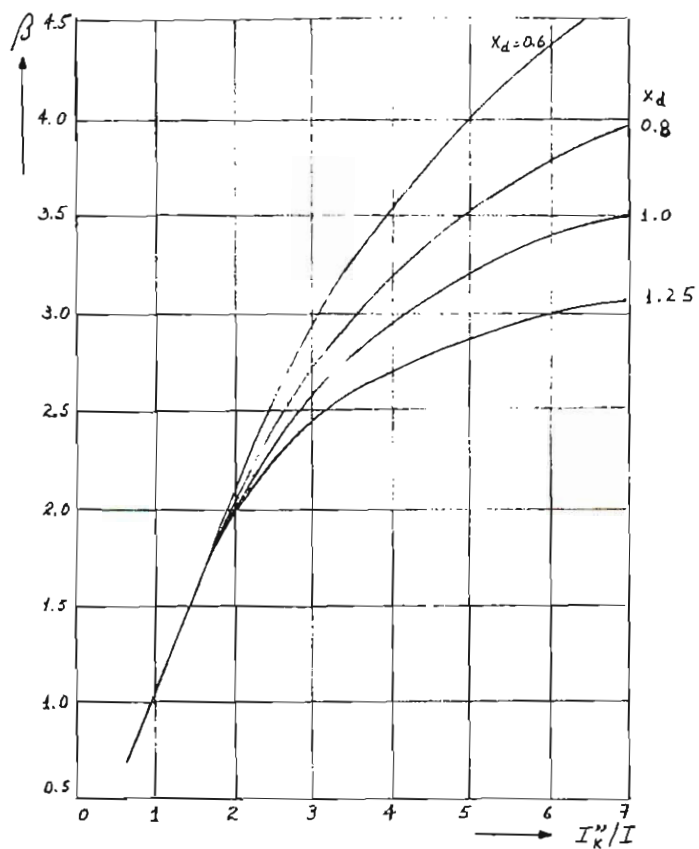


Fig. D - Factor  $\beta$  para alternadores de polos salientes.

Cuando se trata del caso de mallas, en donde hay varias alimentaciones hacia el cortocircuito, habrá que realizar transformaciones - adecuadas (como del tipo estrella-triángulo o viceversa), hasta llegar a un circuito simple, en el cual el cálculo de la corriente de falla - permanente total  $I_V$ , sea posible realizarlo fácilmente.

Es así mismo posible y en gran número de casos muy conveniente, emplear analizadores de redes para la determinación de esta corriente; - en el caso de redes de distribución, los de corriente continua son suficientes. (L14-L15)



APENDICE III

VOCABULARIO Y ABREVIATURAS

- Abrasivo: Material áspero.
- Aislación: (Ver pág. 24)
- Bastidores: Dispositivos en los cuales se colocan los cables; se enclavan en determinado sitio, por medio de los estribos.
- 'Carbon Black': (Ver pág. 9)
- Catalizador: Elemento que sin intervenir en un proceso directamente, - acelera el mismo.
- Copolímero: (Ver pág. 4)
- Elongación: Alargamiento de un material, como porcentaje del original. (Ver pág. 6)
- Estrucción: Proceso de revestimiento de cables.
- Flejes: Cinta helicoidal de bordes separados.
- Higroscópico: Material que facilmente absorbe agua.
- Radio Medio Geométrico: Raiz enésima del producto de los radios de n conductores.
- Resiliencia: Efecto de elasticidad.
- 'Shock Eléctrico': Electrización de una persona.
- C.E.I.: Comisión Electrotécnica Internacional.
- C.O.P.A.N.T.: Comisión Panamericana de Normas Técnicas.
- E.R.A.: 'Electric Research Association'
- I.P.C.E.A.: 'Insulated Power Cable Engineers Association'
- N.E.M.A.: 'National Electric Manufacturer Association'
- C.R.P.: Cobre Recocido Patrón. (Según 1a CEI)
- O.R.C.: Osciloscopio de Rayos Catódicos.

BIBLIOGRAFIA

- L1 C. C. Barnes.- Power Cables. Their Design and Installation.- Chapman and Hall Ltd. 2nd edition.- Great Britain.- 1966.
- L2 COPANT: Comision Panamericana de Normas Técnicas.- Tercera Reunión Técnica de Materiales Eléctricos.- Sao Paulo, Brasil. (ABNT).- 1969.
- L3 CIGRE: The International Conference on Large Electric Systems 21 st meeting. Vol. I.- París.- 1966
- L4 CEI: Comisión Electrotécnica Internacional.- Publicación 189- - 7. Primera edición: Low-frecuency Cables and Wires with P. V.C. Insulation and P.V.C. Sheath, Part 7.- Geneve, Suisse.- 1971.
- L5 C. C. Barnes.- Electric Cables.- Sir Isaac Pitman & Sons Ltd- 1 st edition.- Great Britain.- 1964.
- L6 Frank M. Clark.- Insulating Materials for Design and Engineering Practice.- John Wiley and Sons Inc.- New York, U.S.A.- 1970
- L7 Lothar Heinhold.- Power Cables and their Application.- Pub. by Siemens Aktiengesellschaft.- Berlin and München, Alemania-Federal.- 1970.
- L8 EEI: Edison Electric Institute.- Underground System Reference Book.- New York, U.S.A.- 1957.
- L9 William H. Kayt, Jr.- Engineering Electromagnetics.- McGraw Hill Inc. 2nd edition.- New York, U.S.A.- 1967.
- L10 W. D. Stevenson.- Elements of Power Analysis.- McGraw Hill Inc. New York, U.S.A. 1955.
- L11 CEI: Comisión Electrotécnica Internacional.- Publicación 287 . Primera edición: Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100 % Load Factor).- Geneve, Suisse.- 1969.
- L12 Westinghouse Electric Co.- Distribution Systems.- U.S.A.- 1965.
- L13 General Electric Publication C M - 646: Wirw and Cable Handbook.- Conn., U.S.A.- 1958.

- L14 V.D.E.: Traducciones de las Normas VDE (Alemania Federal): VDE 0102(Esp.); por M. L. Tejada.- Directrices para el cálculo de las corrientes de cortocircuito; parte 1/9.62.- Berlin, Alemania Federal.- 1966.
- L15 Richard Røeper.- Las Corrientes de Cortocircuito en las Redes Trifásicas.- Traducción.- Pub. por Siemens Aktiengesellschaft.- Berlin y München, Alemania Federal.- 1970.
- L16 Frank A. Laws, S.B.- Electrical Measurements.- McGraw Hill Book Company Inc.- New York and London.- 1938.