

"CAPACIDAD TERMICA DE CABLES
EN DUCTOS Y BANDEJAS.
METODO DIGITAL"

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL
TITULO DE INGENIERO ELECTRICO, EN LA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

LUIS E. TAFIA CALVOPIÑA

QUITO, NOVIEMBRE DE 1976

CERTIFICO que la presente tesis :
"Capacidad térmica de cables en
ductos y bandejas . Método digital"
ha sido realizada por el señor
Luis Tapia Calvopiña.



ING. VICTOR OREJUELA

Director de Tesis

AGRADECIMIENTO

Al señor Ingeniero Víctor Orejuela, Director de Tesis, quien con sus valiosas sugerencias hizo posible la mejor realización del presente trabajo.

Deseo también expresar mi agradecimiento al Ingeniero Raul Estrada , y por su intermedio a los miembros del Instituto Ecuatoriano de Normalización , en especial al personal del Departamento de Electrotecnia por su positiva ayuda en la ejecución de esta obra.

IV

DEDICADO

A MIS

PADRES

TEMA	PAGINA
CAPITULO I	
I.1 Objetivo	
I.2 Alcance	
I.3 Ejemplos de aplicación	1
CAPITULO II	
CONSIDERACIONES GENERALES	
II.1 Consideraciones para la selección de un cable de potencia.-Tensión nominal.-Carga eléctrica.-Calentamiento.-Regulación de voltaje.- Condiciones especiales.	3
II.2 Métodos de instalación	8
II.3 Conductor .- Material del conductor.- Número de conductores.-sección del conductor	9
II.4 Tipo de aislamiento.-Dieléctrico.- cálculo del espesor del aislante.-Materiales aislantes empleados en cables.	13
II.5 Pantalla electrostática	25
II.6 Cubiertas protectoras.-Recubrimientos de protección de material plástico.-Recubrimientos metálicos.-protección contra	

TEMA	PAGINA
la humedad.- Protección contra la corrosión.- Armadura.	28
II.7 Tipos de cables para alta tensión	35
II.8 Ejemplos constructivos de cables	38
CAPITULO III	
III.1 Cálculo de la corriente nominal de un cable en aire.	40
III.1.1 Cálculo de la corriente en cables monopolares .- Resistencias térmicas (del aislante, de las capas protectoras, del aire).-Relación de las pérdidas entre las capas metálicas protectoras respecto de las pérdidas en el conductor.-Caída de la temperatura en el dieléctrico.	48
III.1.2 Capacidad nominal de cables tripolares en aire.-Resistencias térmicas (internas, de las capas protectoras, del aire).	58
III.1.3 Capacidad nominal de cables apantallados en aire.	62

VII

TEMA	PAGINA
III.2 Corriente de cables en ductos	64
II.3 Método de enfriamiento	72

CAPITULO IV

PROGRAMA DIGITAL

IV.1 Diagramas de flujo.-Programa principal. Cálculo de la capacidad de cables monopola- res en aire.-Cálculo de la corriente de ca- bles tripolares en aire.-Corriente de ca - bles en ductos.-Caudal del aire refrigerante.	76
IV.2 Programa digital.- Datos de entrada.- Nombres de las variables.-Formatos de los datos de entrada.- Resultados del programa digital	83
IV.3 Programa digital	96

CAPITULO V

EJEMPLOS DE APLICACION

V.1 Ejemplo # 1 .-	102
V.II Ejemplo # 2 .- Datos de entrada.- Resultados de salida.	112

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

VI.1 Capacidad nominal de cables en aire	126
VI.2 Capacidad de cables en ductos y canales	128
VI.3 Número de cables por ducto	130
VI.4 Caudal del aire refrigerante	131

APENDICES

I Subrutina de conversión a la galga AWG	133
II Designaciones de los diferentes tipos de cables	136
III Tabla del espesor del aislamiento	138
IV Ejemplo # 3	139
Bibliografía	141

CAPITULO I

INTRODUCCION

I.1 Objetivo

Este trabajo tiene por objeto desarrollar un método digital para el cálculo de la capacidad de cables en ductos y bandejas.

El estudio y su método digital correspondiente comprende fundamentalmente dos partes:

- a) El cálculo de la capacidad nominal de cables de potencia aislados en aire; y
- b) El cálculo de la capacidad de los cables en ductos y canales.

En la aplicación del programa digital se consideraron ductos en tamaños comerciales, y, además canales en cuyo interior los cables se disponen sea directamente en el suelo, en las paredes - mediante abrazaderas, en rejas o en bandejas metálicas.

Se considera que los canales o ductos no tienen normalmente - ventilación razón por la cual el calor generado por los cables se disipa totalmente a través de las paredes de aquellos.

I.2 Alcance

El programa digital objeto de este trabajo permite determinar la capacidad nominal de cables de potencia aislados en aire, la capacidad en ductos y canales; así como también permite calcular - el número de cables que pueden ser instalados por ducto o canal, y evaluar el caudal de aire refrigerante en el caso de que la e

levación de la temperatura en el ducto sobrepase ciertos límites peligrosos que disminuyan la capacidad de conducción del cable - en el ducto o canal.

I. 3 Ejemplos de aplicación

En el capítulo V se dan dos ejemplos de aplicación que ilustran la manera de usar el programa digital.

El primero trata a cables de alta tensión (monopolares, tripolares con y sin apantallamiento) y de baja tensión; y, el segundo realiza el estudio de cables de baja tensión.

Se consideró como cables de alta tensión aquellos cuya tensión nominal es superior a 600 voltios, y de baja tensión aquellos cuyo voltaje nominal es inferior a 600 voltios.

CAPITULO II

CONSIDERACIONES GENERALES

Previamente al estudio de la capacidad térmica de cables en ductos y bandejas se bosquejan a continuación algunas ideas generales acerca de la selección de cables de potencia y luego se describen las distintas partes constitutivas de un cable aislado,

II. 1 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCIÓN DE UN CABLE DE POTENCIA

Los factores de diseño que influyen en la selección de un cable son:

Eléctricos (voltaje, carga, regulación de voltaje)

Mecánicos

Térmicos

Condiciones ambientales especiales

Capacidad de conducción

Capacidad de cortocircuito

Costos de inversión y de operación.

II.1.1 TENSIÓN NOMINAL

La tensión nominal de un cable es el voltaje para el cual ha sido diseñado y que se aplica a determinadas características de servicio y condiciones de ensayo.

Se emplean como tensiones nominales las siguientes:

La tensión que existe entre el conductor y su envoltura

Metálica o tierra (V_0), y, para cables a usarse en sistemas trifásicos la tensión entre fases (V_{ff}). Los valores de las tensiones son rms ya que aquellas se especifican para las condiciones de servicio en las cuales van a operar los cables. Para esta situación se cumple que (Ref. L1) ;

$$V_{ff} = \sqrt{3} \cdot V_0 \quad (F. 2.1)$$

Donde: V_{ff} = Tensión entre fases (kV)

V_0 = Tensión entre el conductor y la envoltura metálica o tierra (k V)

En cables usados en sistemas monofásicos y de corriente continua se toma como tensión nominal la que existe entre fases aisladas si una fase no esta puesta a tierra, o la que existe entre una fase y tierra, si hay una fase puesta a tierra; en este caso tenemos :

$$V_{ff} = 2 V_{fn} \quad (F. 2. 2)$$

Donde : V_{ff} = Voltaje fase fase (kV)

V_{fn} = Voltaje entre una fase y la fase puesta a tierra (kV)

La tensión nominal determina las siguientes características del cable:

Tipo de aislamiento

Espesor del aislamiento

Mínima sección del conductor (Para tensiones nominales superiores a 600 voltios, es la tensión la que determina

el tamaño mínimo del conductor, ya que si se usaran cables con secciones reducidas en altas tensiones la intensidad de campo superficial puede llegar a tomar valores tan altos que el aislamiento se perforaría).

Para cables a usarse con tensiones superiores a 15 kV se ha hecho la clasificación de cables con neutro puesto a tierra y cables para sistemas con neutro aislado.

II. 1.2 CARGA ELECTRICA

La carga eléctrica generalmente determina el calibre del cable, especialmente en líneas cortas y/o de alta tensión.

La capacidad de carga eléctrica de un conductor depende de la temperatura máxima admisible de éste y de las condiciones del ambiente para disipación del calor. Si estos factores toman valores inadmisibles para el cable, la vida útil de éste disminuye.

Dados: la tensión nominal del cable (V) y la potencia a transmitirse (P_t), la capacidad de carga eléctrica (I) expresada en amperios puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P_t}{n V \cos \phi}$$

(F. 2. 3)

En esta fórmula se tiene que :

P_t = Potencia total (kW)

N = Número de fases

V = Voltaje fase neutro (kV)

$\cos \phi$ = Factor de potencia

II. 1.3 CALENTAMIENTO

El aumento de la temperatura de un cable depende del medio en el cual va a instalarse, por esta razón para determinar lo deben conocerse los siguientes factores:

Temperatura del medio ambiente en el cual va a operar el cable,

Presencia de fuentes de calor cercanas al cable,

Número de cables en ductos o bandejas (y las dimensiones respectivas del ducto o bandeja),

Proximidad de otros cables , ductos o bandejas,

En el caso de cables subterráneos, debe especificarse la conductividad térmica del suelo,

Si el cable se instala al aire, debe darse la conductividad térmica del aire.

II.i.4 REGULACION DE VOLTAJE

La regulación de voltaje de una línea es la variación de tensión que se tiene al quitar de la línea la carga máxima

expresada en porcentaje del voltaje de la carga que se toma como referencia (Ref, L1).

$$Re (\%) = \frac{Es - Er}{Er} \cdot 100 \quad \text{§ F.2.4)}$$

Donde: Re = regulación de la línea

Es = Tensión de alimentación de la línea (kV)

Er = Tensión sobre la carga (kV)

De la fórmula F2.4 se desprende que la regulación es la relación de la pérdida de voltaje al voltaje de la carga.

En el caso de líneas largas y/o de bajo voltaje, la regulación de voltaje es el factor que determina la sección del conductor.

II. 1. 5 CONDICIONES ESPECIALES

Varios factores deben tomarse en cuenta para instalar cables aislados, entre ellos se pueden enunciar los siguientes:

Presencia de agentes corrosivos, en el lugar en el cual se instalará el cable,

Posible interferencia con circuitos telefónicos o de comunicaciones en general (radio- interferencia),

Lugares especiales de instalación (Minas, buques, etc.)

II.2

METODOS DE INSTALACION

Un cable puede instalarse de varias maneras :

A1 aire libre

Directamente enterrado en el suelo

Directamente en contacto con el agua (cables subfluviales, sub
marinos),

Dentro de ductos (con o sin ventilación),

Suspendido entre apoyos; Etc..

El método de instalación debe tomarse en cuenta para determinar - los elementos constitutivos del cable (características mecánicas, protección externa e interna contra la humedad, protección contra la corrosión, Etc.); así por ejemplo, un cable colocado en un ducto debe tener un aislamiento contra la humedad, el cual generalmente está formado por una cubierta de caucho o de un material termoplástico (este tema se tratará con más detalle en la sección II.6).

Tomadas en cuenta las consideraciones generales ya enunciadas, se determina el tipo de cable y sus partes constitutivas.

Para una instalación particular deben analizarse las siguientes características del cable :

Conductor (material, número de hilos, sección del conductor),

Tipo de aislamiento,

Cubiertas protectoras,

Pantalla electrostática.

II. 3

CONDUCTOR

II.3 . 1 MATERIAL DEL CONDUCTOR

Los materiales más comunes usados como conductores eléctricos son: cobre, aluminio, aleaciones de aluminio , aluminio reforzado con acero , Copperweld, alumoweld. Las características de los principales tipos de conductores se dan a continuación en la tabla 2.1 (Ref. L.2) .

Table 2. 1

Características de conductores

Material	Densidad a 20°C g/cm ³	Diámetro mm.	Carga de rotura Kg/mm ²	Resistivi- dad a 20 °C. Ω .mm ² /m	Conductivi- dad térmi- ca kcal/h.m°C
Cobre	8,89	1- 7,5	45-37	17. 10 ⁻³	3,31
Aluminio	2,67	1,3-5,5	20-16	28.10 ⁻³	1,72
Áleación de ⁺ Al	2,7	1,4-4.0	30	33.10 ⁻³	118-142
Acero(alma de cables)	7,78	1,25-4,8	133		25-31

+ Aldrey

II.3.2

NÚMERO DE CONDUCTORES

El tipo de sistema en el cual se va a usar el cable (monopolar o multipolar) determina el número de conductores de dicho cable. - las ventajas y desventajas para el uso de cables monopolares se - indican en la tabla 2.2

Tabla 2.2

Tipo	Ventajas	Desventajas
Multipolar	<p>Más barato que sus correspondientes monopolares</p> <p>Menor aumento de pérdidas inducidas en la lámina de plomo</p>	<p>Menor disipación de calor (decrece la capacidad de conducción de corriente)</p>
Monopolar	<p>Puede fabricarse y transportarse en longitudes mayores; instalación y corte sencillos</p> <p>Mayor disipación de calor (mayor conducción de corriente)</p>	<p>Las pérdidas inducidas en la lámina de plomo son mayores</p>

Se usan cables tripolares hasta voltajes y potencia de transmisión para los cuales el peso y el diámetro de los conductores no sean excesivos, ya que de lo contrario su instalación y transporte sería complicado.

Entre los cables multipolares más utilizados tenemos:=

Cables bipolares.- Destinados a transportar energía eléctrica por corriente continua o por corriente alterna monofásica (Fig. 2.1),

Cables tripolares.- Se utilizan para transportar energía eléctrica por corriente alterna trifásica si neutro (Fig, 2.2),

Cable tetrapolar. - Transporta energía eléctrica por corriente alterna trifásica con neutro (Fig. 2.3). En este tipo de cables el neutro es de menor sección que los conductores activos. Debe advertirse que en las redes trifásicas con neutro resulta más conveniente la instalación separada del conductor neutro, ya que éste generalmente se conecta a tierra, y esta operación sería difícil en caso de usar cables tetrapolares.

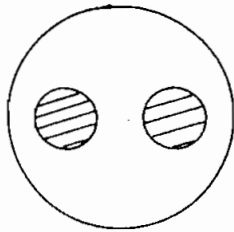


Fig. 2.1
Cable bipolar

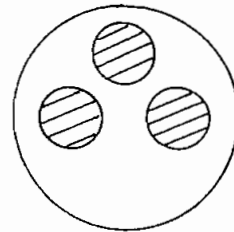


Fig. 2.2
Cable tripolar

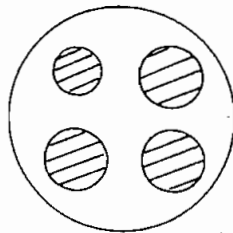


Fig. 2.3
Cable tetrapolar

II. 3.3 SECCIÓN DEL CONDUCTOR

La sección del conductor está determinada por los siguientes fac

tores:

- Corriente a transmitirse,
- Regulación de voltaje,
- Voltaje de operación del cable,
- Máxima corriente de corto circuito.

Como se indicó en la sección II. 1.2 la corriente es el principal factor que determina la sección del conductor; sin embargo, para voltajes bajos y longitudes grandes la regulación de voltaje y la tensión son los factores que fijan dicha sección.

Si el cable lleva pequeñas cargas desde una subestación grande - en la cual se generan corrientes altas de cortocircuito, es la corriente de cortocircuito la que determina el calibre del conductor .

Los conductores suelen estar formados por varios hilos, en este caso, el diámetro de la circunferencia circunscrita al conductor puede calcularse por la siguiente fórmula (Si los hilos son de igual diámetro) (Ref. L2) :

$$D = d(2n + k) \quad (F.2.5)$$

Donde : D = diámetro total del conductor (mm)

d = Diámetro de los hilos componentes (mm)

$k = 1$ (Para conductor unipolar)

$k = 2$ (Para conductor tripolar)

II.4 TIPO DE AISLAMIENTO - DIELECTRICO

Para determinar el tipo de aislamiento deben considerarse los siguientes factores:

Voltaje y corriente a transmitirse por el cable,

Condiciones físicas del medio en el cual va a instalarse el cable (Ambientes secos o húmedos, atmósferas corrosivas, esfuerzos mecánicos, temperatura del medio, atmósferas con gran concentración de ozono, etc.),

Costos relativos de los diferentes tipos de cables (aquí deben incluirse los costos debidos a instalación, uniones y terminales),

Duración

Propiedades dieléctricas,

Resistencia a la ionización (Efecto corona),

Resistencia a las altas temperaturas,

Resistencia a la humedad,

Flexibilidad.

En general puede afirmarse que no existe un aislante que cumpla con todas estas características por lo cual deben evaluarse varios tipos de aislantes, y se escoge el que más se ajusta a las condiciones especificadas.

A continuación se enunciarán ciertos conceptos relativos a los dieléctricos, los cuales deben determinarse para cada tipo de ellos .

RESISTIVIDAD.- La resistividad es el producto de la resistencia eléctrica por la sección, dividido por la longitud; para un metal en forma de alambre de cualquier longitud y sección uniforme (Ref. R1) .

La resistividad del cobre recocido a 20°C. (0,017241 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) se toma como referencia para los demás conductores. La resistividad para algunos tipos de conductores se dió en la tabla 2.1.

CONSTANTE DIELECTRICA.- Es un valor que relaciona la constante dieléctrica absoluta del material con la constante dieléctrica en el vacío, es decir:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} \quad (\text{ F.2.6 })$$

Donde: ϵ = Constante dieléctrica relativa del conductor

ϵ_a = Constante dieléctrica absoluta del material

($\text{Coul}^2/\text{new} \cdot \text{m}^2$)

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

($\text{Coul}^2/\text{new} \cdot \text{m}^2$)

Físicamente su valor define un fenómeno que se traduce por el calentamiento de los aislantes cuando son sometidos a una tensión alterna; en otras palabras es el número de veces que un cuerpo es más aislante que el vacío. El valor de esta constante depende de la temperatura, la frecuencia y la tensión aplicada. La constante dieléctrica de los materiales aislantes oscila entre 2 y 10 .

RIGIDEZ DIELECTRICA.- Es la relación entre la tensión de perforación (Vd) y la distancia entre las placas del aislante (Ref.L2):

$$\text{Rigidez dieléctrica} = \frac{Vd}{d} \quad (\text{kV/cm}) \quad (\text{F2.5})$$

Donde : Vd = Tensión de perforación (valor pico) (kV)

d = Distancia entre las placas del aislante (cm)

La rigidez dieléctrica de un material depende , además de la distancia entre las placas del aislante, de la temperatura. Sin embargo, para un rango de temperatura (-50 °C --+50 °C) la rigidez dieléctrica puede considerarse independiente de la temperatura.

La tensión de perforación se la mide en el momento en el que se produce la ruptura eléctrica del aislante y la corriente pasa a través de éste. Cuando la perforación eléctrica ocurre por debajo del valor de la temperatura límite, aquella ocurre únicamente por efecto de la tensión aplicada; si se produce sobre aquel valor de temperatura se llama perforación electrotérmica. La tensión de perforación depende del tiempo en el cual se aplica la tensión y de la forma de los electrodos entre los cuales está el aislante.

FACTOR DE PERDIDAS.- Es la relación que existe entre la corriente activa (corriente de fuga) y la corriente capacitiva (corriente de carga) que circula en un condensador . Su valor se determina mediante la siguiente fórmula (Ref. L3) :

$$\text{tangente } \delta = \frac{I_w}{I_{dw}} \quad (\text{f.2.8})$$

Donde: I_w = corriente activa (A)

I_{dw} = corriente capacitiva (A)

En el caso de que no existan pérdidas $I_w = 0$ y el factor de disipación dieléctrica también será cero; de esto se deduce que este factor es una medida de las pérdidas ocasionadas por la - circulación de la corriente activa por el dieléctrico del condensador.

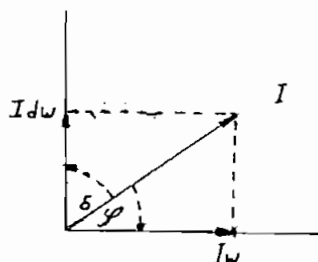


Fig. 3.4
Relación vectorial de las corrientes activa y capacitiva de un dieléctrico

En la figura 2.4 se ve que : $\text{Tag. } \delta = \frac{I_w}{I_{dw}}$ donde: δ es el ángulo de pérdidas ; generalmente este ángulo tiene un valor - pequeño razón por la cual : $\text{Tag } \delta = \text{sen}(90^\circ - \varphi) = \text{cos } \varphi$ por lo cual se concluye que el factor de disipación dieléctrica es aproximadamente igual al factor de potencia ($\text{cos } \varphi$) del dieléctrico.

Conocido el factor de potencia del dieléctrico ($\text{cos } \varphi$) pueden calcularse las pérdidas (Pd) (expresado en vatios)

En este mediante la siguiente fórmula (Rf. L3) :

$$P_d = 2 fV^2 C \text{Tag } \delta \quad (F.2.9)$$

$$P_d = 2 fV^2 C \cos \phi \quad (F.2.10)$$

Donde F = frecuencia (ciclos/segundo)

V = voltaje aplicado en las placas del condensador (V)

C = Capacidad del condensador (Faradios)

$\text{Tag } \delta$ = factor de pérdidas del dieléctrico

$\cos \phi$ = factor de potencia del dieléctrico

Las fórmulas 2.9 y 2.10 son aplicables al cálculo de las pérdidas en el dieléctrico de cables ya que estos actúan como condensadores, puesto que tienen capas alternadas de conductores y aislantes.

II. 4 . 1 CALCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE

Puesto que un cable se comporta como un condensador de láminas cilíndricas coaxiales puede aplicársele la siguiente fórmula (Ref L.3)

$$E = \frac{V}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \quad (F2.11)$$

Donde: E = intensidad de campo eléctrico (V/ cm)

V = Voltaje aplicado (V)

R_1 = Radio del conductor (cm)

R_2 = Radio sobre el dieléctrico (cm)

En el caso de un cable aislado V es el voltaje entre el conductor y la lámina de protección contra la humedad.

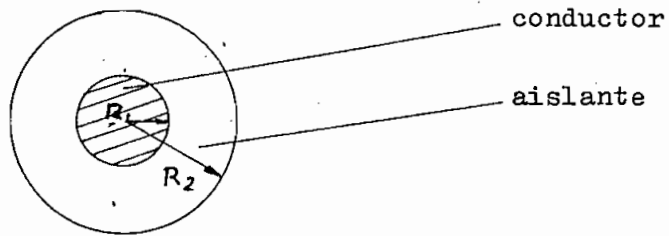


Fig. 2.5

Al examinar la figura 2,5 se deduce que:

$$\text{espesor del aislante} = R_2 - R_1 \quad (\text{ cm }) \quad (\text{ F2.12 })$$

Al despejar de la fórmula 2.11 el valor de R_2 se tiene que:

$$R_2 = R_1 \cdot e^{V/R_1 \cdot E} \quad (\text{ cm }) \quad (\text{ F 2. 13 })$$

Al reemplazar la fórmula 2.13 en la 2.12 se obtiene :

$$\text{espesor del aislante} = R_1 (e^{V/R_1 \cdot E} - 1) \quad (\text{ F2.14 })$$

El voltaje (V) depende del tipo de sistema a utilizarse; así, si dicho sistema es con neutro puesto a tierra, se tiene que:

$$V = V_{ff} / \sqrt{3} \quad (\text{ kV })$$

Donde: V_{ff} = voltaje entre fases (rms)

pero si el sistema no está puesto a tierra:

$$V = V_{ff} \quad (\text{ kV })$$

El valor de la intensidad de campo (E) expresado en KV rms por cm del espesor de un aislante determinado, depende del tiempo en el cual se aplica la tensión, de la temperatura del medio y de la forma de los electrodos entre los cuales está puesto el aislante. Por ejemplo para el papel impregnado en aceite, la tensión aplicada a un aislante que tiene un espesor de 0,1 mm, durante un minuto a 20°C o 90°C es de 10 kV ; y, por lo tanto la intensidad de campo es :

$$E = \frac{10 \text{ kV}}{0,1 \text{ mm}} = 100 \text{ kV/mm}$$

II.4.2 MATERIALES AISLANTES EMPLEADOS EN CABLES

Los materiales aislantes más usados para fabricar cables son los siguientes:

Papel impregnado en aceite,

Aislantes secos: Termoplásticos: PVC, polietileno,

Termoestables: polietileno reticulado,

Elastómeros: Caucho natural y sintético,

etileno - propileno

Aislantes especiales: Siliconas, aislantes minerales, hipalón,

teflón, telas varnizadas, poliamidas.

II.4.2.1 PAPEL IMPREGNADO

El papel impregnado en aceite fluido se lo emplea como aislante en cables ya que así posee excelentes características dieléctricas. Al impregnar en aceite el papel pierde sus propiedades higroscópicas.

Con el objeto de evitar la entrada de la humedad a los cables aislados con papel impregnado en aceite debe usarse una envoltura de plomo o de aluminio rodeando a las capas aislantes.

El papel impregnado en aceite se usa en cables de potencia para tensiones superiores a los 69 kV, ya que en esos casos resulta más económico.

Las propiedades del papel impregnado pueden resumirse en los valores dados en la tabla 2.3 (Ref. L3) :

Tabla 2.3

Densidad	1,43 (g/cm ³)
Rigidez dieléctrica (tensión eficaz para 1 mm de espesor, 50 HZ, 1 minuto)	10(kV rms)+
Constante dieléctrica	4,3
Factor de pérdidas a 20°C	0,0025
Conductividad térmica	0,004 (W/cm ² °C)
Temperatura de operación	20 o 90°C)

+ La forma de los electrodos es de placas paralelas.

Para temperaturas de operación superiores a 90°C se usa aceite de silicón, como medio impregnante("ste aceite puede operar satisfactoriamente hasta 150°C).

II.4.2.2 AISLANTES SECOS

a.- TERMOPLÁSTICOS

a.1 .- PVC (cloruro de polivinil) este material se lo utiliza mezclado con ciertos elementos para contrarrestar su falta de flexibilidad y envejecimiento a bajas temperaturas. De esta manera el PVC puede operar entre - 30°C y + 100°C. Es resistente al ozono y a la humedad, sin embargo, su factor de pérdida

das es elevado, y por ello en altas tensiones las pérdidas pueden ser grandes. En la actualidad se lo usa en cables para tensiones de servicio de hasta 20 kV .

a.2 POLIETILENO. En una exposición prolongada a la intemperie el oxígeno hace que el polietileno se endurezca y pierda sus propiedades , por esta razón se lo mezcla con aditivos antioxidantes. Es antihigroscópico y resistente a los ácidos. Soporta temperaturas comprendidas entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a su resistencia a la corrosión , el polietileno se lo usa no sólo como aislante sino también como complemento del plomo para proteger al cable contra acciones exteriores (contra la humedad , por ejemplo) . Se lo usa, además, en el revestimiento exterior de los cables para tensiones de servicio de hasta 30 kV (Cables subterráneos) .

Las propiedades del PVC y las del polietileno se resumen en la tabla 2.4 (Ref.L2) .

b. TERMOESTABLES . En este grupo de aislantes el más conocido es el polietileno reticulado. Este material conserva las características del polietileno inicial , pero su tensión de operación puede llegar a ser aplicada para temperaturas de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de hasta $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, en casos excepcionales. El polietileno reticulado puede soportar una temperatura de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 segundos y se carboniza sin previa fusión alrededor de los

300°C. Este aislante se lo puede usar en cables subterráneos de hasta 15 kV.

Las características del polietileno reticulado se las resume en la tabla 2.5 (Ref L2).

Tabla 2.4

Características del PVC y del polietileno		
Características	PVC	POLIETILENO
Densidad a 20 °C g/cm ³	1,3	0,92
Temperatura máxima de operación °C	30	70
Resistividad a 20°C Ω.mm ² /m	10 ¹⁹ -- 5 . 10 ¹⁸	10 ²²
Rigidez dieléctrica kV rms /mm	40	30
Constante dieléctrica a 20 °C (f=50 Hz)	5	2.3
Factor de pérdidas a 20 °C	9 . 10 ⁻²	2 -- 5 . 10 ⁻⁴

Tabla 2.5

Características del polietileno reticulado	
Densidad a 20 °C	1,2 g/cm ³
Temperatura máxima de trabajo continuo	90 °C
Resistividad a 20°C	10 ²⁰ Ω.mm ² /m
Rigidez dieléctrica a 20 °C	15 kV(rms)/mm
Constante dieléctrica a 50 Hz	3

c. ELASTOMEROS . Estos materiales se caracterizan porque tienen la propiedad de recuperar sus dimensiones iniciales al dejar de actuar la tensión mecánica que las había alterado (siempre que no se sobrepase el límite de elasticidad del material). El proceso de vulcanización da esta propiedad al caucho natural.

El primer elástómero usado como aislante fue el caucho, natural, mezclado con ciertos aditivos para mejorar sus propiedades dieléctricas. Es resistente a la humedad y su temperatura de operación alcanza hasta los 60 °C. Se lo usa como aislante y cubierta de cables de baja tensión y de alta tensión (para tensiones menores de 25 kV).

Las propiedades del caucho como aislante para cables se dan en la tabla 2.6 (Ref L2) :

Tabla 2.6

Características del caucho

Densidad a 20 °C	1,4 g/cm ³
Temperatura máxima de trabajo continuo	60 °C
Resistividad a 20 °C	10 ¹⁸ Ω mm ² /m
Rigidez dieléctrica a 20 °C	25 kV (rms)/mm
Constante dieléctrica	2,7
Factor de pérdidas	0,02

d. CAUCHOS SINTETICOS. Son elementos con características de elasticidad semejantes a las del caucho natural. Entre los principales tenemos:

Butadieno - estireno

Butadieno-acrilo nitrilo

Policloropreno

Poliisobutileno-isopreno

Estos pueden usarse como aislantes para tensiones de servicio de hasta 20 kV . En todo caso, para usarlos es necesario tomar ciertas precauciones (Con altas tensiones cuando sufren esfuerzos de tracción y en presencia de ozono se producen grietas que pueden dar lugar a la perforación eléctrica; para evitar esto, generalmente, se coloca en el lugar peligroso una capa de elastómero no vulcanizable; además debe evitarse el uso de este tipo de aislamiento en cables a instalarse cerca de calderos) . Las temperaturas máximas admisibles varían entre 60 °C y 110 °C. Los elastómeros tienen elevada constante dieléctrica (2 -- 15) Y un alto factor de pérdidas (0,02 -- 0,04).

Otro tipo de aislante usado es el etileno-propileno, que puede usarse como aislante propiamente dicho y como cubierta exterior. Es resistente a los aceites y a los disolventes , es infla-mable por lo cual se lo usa con cubiertas apropiadas de PVC. Su temperatura de operación varía entre -70 °C y 80 °C.

II.4.2.3 AISLANTES ESPECIALES/.En este grupo tenemos materiales que poseen excelentes propiedades eléctricas y mecánicas pero su uso se ve restringido de cierta manera por su elevado costo.Los aislantes que se agrupan en esta clase son los siguientes (Ref.L2) :

Tabla 2.7

Aislantes especiales

Polietileno sulfonado	(Hypalón; opera entre -50°C y 120°C)
Caucho de silicona	(opera entre -60 °C y 180°C)
Teflón	(opera entre -55 °C y 325°C)
Poliamidas	(opera entre -60 °C y 110 °C)

Las telas varnizadas presentan buenas características dieléctricas , pero los cables que usan dicho aislante deben instalarse en lugares secos,se los emplea para tensiones de servicio de hasta 15 kV,con temperaturas superiores a 60 °C e inferiores de 85 °C ; cuando los cables están instalados con telas varnizadas y deben operar en lugares húmedos deben estar provistos de una funda de plomo.

II.5 PANTALLA ELECTROSTATICA

001721

En un cable unipolar el campo electrostático entre el conductor y la envoltura metálica exterior es radial , por lo cual los esfuerzos eléctricos de dicho campo son soportados por el aislamiento exterior;pero en un cable tripliar las líneas de fuerza del

campo electrostático pueden descomponerse en dos partes , una perpendicular y otra tangencial al aislante común;ya que aquel campo no es radial;esto se debe a que los potenciales que existen entre cada conductor y la envoltura metálica exterior no son uniformes.Debe recordarse que el aislante está previsto para soportar la componente perpendicular de las líneas de campo,mientras que la otra componente es sostenida por la masa aislante de relleno la misma que tiene una resistencia a la perforación menor que la capa aislante propiamente dicha . Por esta razón los cables con campo no radial se los usa hasta tensiones de 15 kV,y para tensiones superiores debe tratar de tenerse un campo radial, para lo cual se coloca sobre la capa aislante una banda de papel metalizado o una fina capa metálica.Las hojas metálicas(pantallas electrostáticas) deben ponerse a tierra,para lo cual el conjunto se envuelve en una cinta de algodón tejida con hilos de cobre que aseguran el contacto eléctrico entre la pantalla y la envoltura metálica exterior;esta última se pone a tierra,directamente.Este tipo de cables , que tienen una pantalla electrostática,se los designa como cables "H" .

Con el apantallamiento se llega a tener una distribución uniforme del potencial en el cable y se evitan las descargas destructivas a tierra que causarían el envejecimiento del mismo.

En el caso de que un cable no esté en contacto con tierra y opere a tensiones altas la gradiente de voltaje inmediatamente fuera del aislamiento puede causar el efecto corona debido a la ionización

del aire, lo cual puede evitarse mediante el apantallamiento del cable.

El apantallamiento sirve, además, como protección eléctrica contra contactos accidentales (en cables con aislamiento de plástico para altas tensiones) ya que mantiene su superficie a potencial cero.

Otra de las funciones del apantallamiento, en los cables, es la de limitar la radiointerferencia.

El apantallamiento debe considerarse para cables que operan con tensiones superiores a los 3 kV.

Los materiales utilizados como pantallas electrostáticas, principalmente, son los siguientes:

Cintas metálicas (Cu)

Papeles metalizados

Papeles grafitados, etc.

Las pantallas electrostáticas son colocadas entre el conductor y el aislamiento, ó, sobre el aislamiento del conjunto de conductores, cada uno de los cuales ya tiene su pantalla individual.

La sección transversal mínima de la pantalla electrostática debe ser de 6 mm^2 (Ref.L4), si se compone de fleje o hilos de cobre. En cables multiconductores la pantalla es una armadura de hilos de acero rectangulares que satisfacen las condiciones eléctricas inherentes.

rentes a la función que desempeña la pantalla electrostática y aumentan la resistencia mecánica del cable, ya que pueden usarse como armadura.

II.6 CUBIERTAS PROTECTORAS

II.6.1 RECUBRIMIENTOS DE PROTECCION

El objeto del recubrimiento de protección es la de proporcionar al cable mayor resistencia mecánica y protegerlo contra la humedad y la corrosión. (Ref.L4) . Estos recubrimientos de protección se clasifican en materiales plásticos y metálicos.

II.6.1.1 RECUBRIMIENTOS DE PROTECCION DE MATERIAL PLASTICO

Los más importantes son:

Protodur

Poliamida y poliuretano

Recubrimientos de goma

Protofirm

NBK (a base de caucho nitrilo)

- a. PROTODUR/. Se lo emplea en cables con recubrimientos de PVC , tanto como aislante y como revestimiento ; presenta alta resistencia a la tracción y gran elasticidad, resistencia a la compresión a altas temperaturas, alta consistencia al envejecimiento al fuego y a los agentes químicos. El protodur puede también usarse como revestimiento exterior.

POLIAMIDA Y POLIURETANO . Se ponen sobre el aislamiento o sobre el revestimiento en los cables flexibles los cuales deben soportar condiciones mecánicas y químicas especiales, como por ejemplo : efectos de hidrocarburos (benzol, gasolina, aceites, etc.) .

Los recubrimientos de goma se utilizan como protección exterior en cables flexibles ; sus propiedades son similares a las del caucho pero más resistente a los agentes atmosféricos, químicos y térmicos.

Para cables que están en contacto con aceites se les provee de un revestimiento a base de caucho de nitrilo (NBK) .

Con caucho de silicona se han obtenido mezclas que presentan buenas características de resistencia a las influencias climáticas y al envejecimiento.

II.6.1.2 RECUBRIMIENTOS METALICOS

a . PROTECCION CONTRA LA HUMEDAD

En los cables subterráneos aislados con materiales higroscópicos deben emplearse revestimientos o envolturas metálicas sobre los aislamientos de los conductores interiores y sobre la cancha aislante con el objeto de evitar la

entrada de la humedad. Generalmente se emplea un tubo de plomo puro, aunque en ciertos casos, para aumentar la resistencia mecánica, se emplea el plomo en aleación con otros metales (Cobre o aluminio) .

Si se exponen los cables a fuertes vibraciones se usan aleaciones de plomo con telurio.

En la actualidad se usa revestimiento de aluminio que proporciona mayor flexibilidad y mayor resistencia mecánica a los cables, además no corre peligro de corrosión aún en las condiciones más desfavorables. Los cables con revestimiento de aluminio se puede utilizar , sobre todo, en los casos en los cuales se dispone de cables con aislamiento de papel impregnado en aceite.

La buena conductividad eléctrica del aluminio permite usar el recubrimiento como conductor neutro en redes de corriente alterna en los cuales el neutro de la estrella está puesto a tierra, y además disminuyen las interferencias en las líneas de mando y telecomunicaciones.

En general , en cables con revestimiento de aluminio se puede prescindir del uso de la armadura, y pueden utilizarse en lugares donde se esperen esfuerzos de tracción (puentes, cerca de líneas férreas, etc.) .

El espesor radial del revestimiento de plomo (cm) o de aleación de plomo que usa papel impregnado en aceite para cables monopolares y multipolares, se lo obtiene al aplicar la siguiente fórmula (Ref.L5) :

$$\text{Espesor} = 0,1016 D + 0,0635 \quad (\text{F2.15})$$

Donde : D = Diámetro bajo el revestimiento de plomo (cm)

Para cables de aceite de baja presión el espesor medio de la lámina de plomo (cm) está dada por (Ref. L4) :

1. Para una lámina simple :

$$\text{Espesor} = 0,0686 D + 0,1854 \quad (\text{F2.16})$$

2. Para láminas dobles (espesor de cada una)

$$\text{Espesor} = 0,0432 D + 0,178 \quad (\text{F2.17})$$

Donde : D = Diámetro bajo el revestimiento de plomo
(cm)

Para hallar el espesor de la lámina de aluminio debe recurrirse a las tablas , así por ejemplo (Ref.L4) :

Tabla 2.8

Espesor de la lámina de cubierta protectora de aluminio

Diámetro del cable sobre la aislación (cm)	Espesor de la lámina cm
1,27	0,0635
2,54	0,0864
5,08	0,124
7,62	0,155

Una desventaja en el uso de láminas de aluminio es que puede corroerse por acción galvánica con metales disímiles de él, en presencia de la humedad (tales como: cobre', acero, etc.) /.

b. PROTECCION CONTRA LA CORROSION

Los cables de potencia con revestimiento metálico, o con armadura, deben protegerse contra la corrosión. El tipo de protección depende del material utilizado como revestimiento (Ref.L4) .

Para cables con revestimiento de plomo, sin armadura, se usan varias capas de papel bituminado y una capa de yute preimpregnado, con capas intermedias de compuesto bitumínico neutro (asfaltado) .

También se utiliza una envoltura de plástico con la de plomo por medio de una capa de masa (aislamiento de papel impregnado en aceite) .

Para cables con revestimiento de plomo (con armadura) se disponen sobre aquel, un revestimiento formado por capas de fibra bituminada con capas intermedias de un compuesto bitumínico. Sobre la armadura se disponen la protección contra la corrosión que consta de capas de yute impregnada de compuesto bitumínico asfaltado, Sobre el cual está

una capa de talco. Si existe peligro de excesiva corrosión química o electrolítica debe cubrirse el cable con una capa de cinta elastomérica, en el caso de que no tenga una cubierta exterior de plástico .

El PVC se usa con gran éxito para proteger exteriormente al cable de la corrosión , la llama , el calor y la oxidación.

Para cables con revestimiento de aluminio la protección contra la corrosión está formada por una capa de material plástico a base de poliisobutileno y un revestimiento de protofur (un compuesto vinílico con excelentes propiedades aislantes) . En ciertos casos , en lugar de la banda de poliisobutileno se usa una lámina termoplástica.

Cuando se usan revestimientos metálicos corrugados éstos se llenan y se cubren con una mezcla adecuada de consistencia pastosa, sobre la cual se aplica la funda de material termoplástico.

II.6.2 ARMADURA

La armadura protege al cable contra acciones mecánicas y en el caso de cables con aislamiento plástico, para tensiones superiores a $V_0 / V = 0,6 / 1$, sirve también como

pantalla .

Los cables con revestimiento de plomo y aislamiento de papel impregnado en aceite usan flejes de acero de paso fijo en espiral como armadura. En el caso de que los cables tengan aislamiento de material plástico y una pantalla de cobre (para alta tensión) no necesitan de armadura.

Una armadura de alambres de acero sirve como pantalla para cables con aislamiento plástico que tengan conductores sin pantalla de cobre.

Cuando las sobrecargas mecánicas sean altas debe emplearse una armadura de alambres de acero galvanizado. Las características de la armadura dependen de su aplicación y del diámetro del cable .

Los cables monopolares, para corriente alterna monofásica o trifásica, no llevan armadura, o ésta es de material no magnético, con el objeto de evitar pérdidas adicionales.

La armadura se coloca sobre varias cintas de papel aceitado, arrollado helicoidalmente y sobre una capa de fibras preimpregnadas con alquitrán o betúnes, o sobre varias cintas de papel corrugado, o también sobre una funda de material termoplástico.

En general la armadura puede formarse de las siguientes maneras:

- Por flejes de hierro
- Por hilos de hierro galvanizado
- Por pletinas de hierro
- Por flejes de hierro galvanizado

Puesto que la armadura está dentro del campo de dispersión magnética de los conductores aparecerán en ella pérdidas por histéresis y por dispersión magnética . Estas pérdidas son pequeñas en el caso de conductores multipolares, ya que los campos de los conductores se compensan entre sí, pero en el caso de conductores monopolares éstas adquieren valores altos, ya que el campo magnético de cada conductor actúa independientemente del de los demás.

II.7 TIPOS DE CABLES PARA ALTA TENSION

Para alta tensión los cables se construyen generalmente con hilos de cobre en forma de cordón flexible , rodeados de capas aislantes , capas de protección contra la corrosión, una envoltura continua de plomo, y en ciertos casos una protección mecánica formado por flejes de hierro o de acero, éstos últimos son los cables armados.

Los tipos de cables usados en media tensión son los siguientes

(Ref.L3) :

Hasta 10 o 15 kV; cables bajo cubierta de plomo, aislados con papel impregnado

Hasta 15 kV; cables con aislamiento termoplástico,

De 15 a 60 kV; cables bajo cubierta de plomo, con aislamiento de papel impregnado, cables apantallados,

Cables de alta tensión, para más de 60 kV,

Cables en aceite,

Cables en gas a presión exterior,

Cables con gas a presión interior,

Cables oleostáticos,

Cables con aislamiento sólido,

Cables con aislamiento de polietileno mejorado (Cables tipo XLPE , PEX) .

Los cables en aceite se los utiliza para la transmisión de grandes bloques de potencia para tensiones comprendidas entre 69 kV y 230 kV. El aislamiento es a base de papel impregnado y está lleno de aceite de baja viscosidad. Estos cables tienen cubierta de plomo y revestimiento metálico para evitar la corrosión. El aceite circula , por los cables , por medio de canales tubulares y refrigera al cable ; dichos canales se hallan en el interior del conductor.

Los cables de gas a presión exterior se usan para muy altas tensiones. Dichos cables están formados por una envoltura de

plomo con aislamiento de papel impregnado y el conjunto está dentro de un tubo de acero con nitrógeno ; el cual está a una presión de 14 a 15 kg/cm , con el objeto de impedir la formación de vacíos.

Los cables con gas a presión interior se usan para tensiones del orden de 225 kV, y constan de aislamiento de papel impregnado en aceite con cubierta de plomo ; el aislamiento está sometido a la presión del gas (nitrógeno) .

Los cables oleostáticos están formados por cables macizos que tienen aislamiento de papel impregnado y se hallan colocados en el interior de un tubo de acero , directamente enterrado en el suelo. Antes de ser instalado , el cable está provisto de una envoltura de plomo, pero luego de ser colocado en el tubo con aceite se retira dicha envoltura. El aceite circula mediante la acción de bombas colocadas en los extremos de los tramos tubulares . El tubo de acero está cubierto de una capa asfáltica para evitar la corrosión. Mediante este método es posible hacer circular por el cable cargas eléctricas elevadas, pudiéndose llegar a transportar corrientes de hasta 50 % mayores que aquella de los cables convencionales.

Ultimamente se han logrado mejorar las propiedades del polietileno para usarlo como aislante de cables, esto se ha logrado gra

cias a nuevos métodos de cobertura del cable con el polietileno. Estos métodos consisten en rodear al cable con el polietileno usando rayos infrarrojos y gases inertes en lugar de vapor saturado, con lo cual se evita la presencia de vacíos y agua en el aislamiento. Estos cables han dado excelentes resultados para tensiones comprendidas entre 66kV y 154 kV (Ref. L9). Estos son los cables XLPE.

Se utilizan cables especiales para transportar energía eléctrica bajo el mar o bajo los ríos . Estos cables generalmente tienen aislamiento de papel impregnado en aceite con doble cubierta de plomo o con aislamiento de polietileno. La armadura está formada por flejes de acero galvanizado y se refuerzan para que puedan soportar varios esfuerzos mecánicos (tales como vaivén de las mareas, acción de los instrumentos de pesca , anclas, salinidad del agua, etc.) .

Se fabrican cables especiales para pozos , minas y galerías, dichos cables tienen aislamiento de plástico y deben poseer una armadura de alambres de acero y una contraespiral de fleje de acero para su sujeción.

II.8 EJEMPLOS CONSTRUCTIVOS DE CABLES

En esta sección se dan gráficos que tienen por objeto dar una idea acerca de la forma de constitución de los cables.

Se dan ejemplos de cables monopolares y tripolares, ya que para ellos se desarrollará ,en el siguiente capítulo,el cálculo de la capacidad en ductos o canales.

CABLE MONOPOLAR

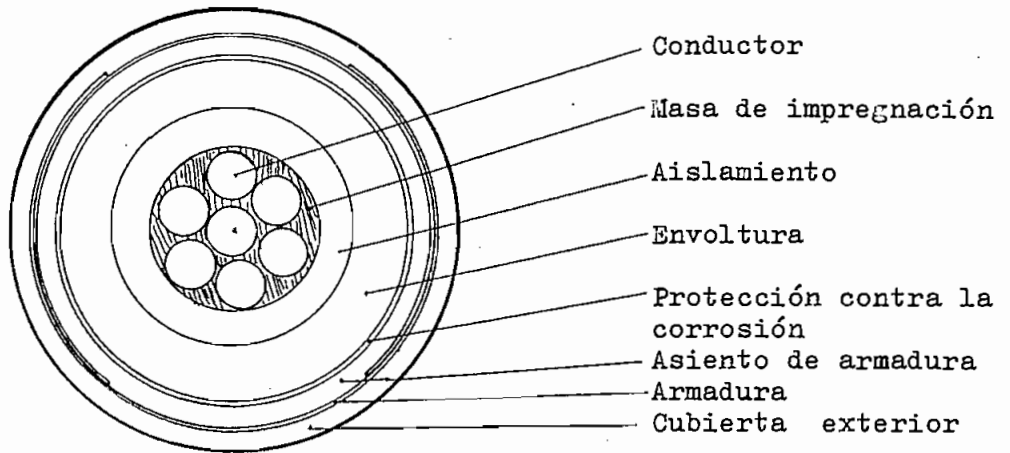


Fig. 2.6

CABLE TRIPOLAR

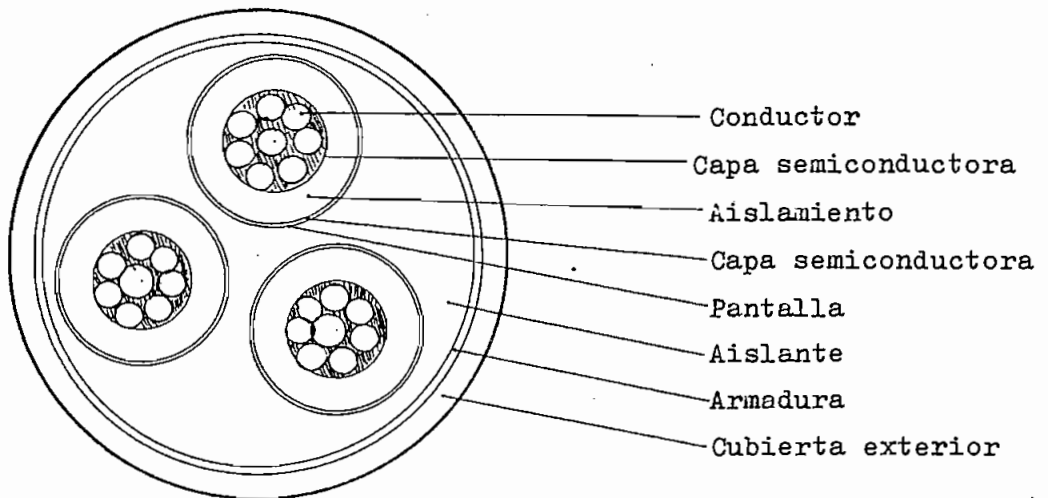


Fig. 2.7

CAPITULO III

En este capítulo se hará el desarrollo teórico de la capacidad nominal de cables en aire y luego el análisis de la corriente de cables en ductos y bandejas.

El estudio se concentrará a cables monopolares y tripolares (con y sin apantallamiento) puesto que éstos son los tipos más usados para el transporte de energía eléctrica. Luego de establecer las bases para calcular la capacidad de los conductores en ductos y bandejas se tratará el tema de ventilación forzada de aire como una alternativa para disminuir la temperatura final en el ducto y de esta manera obtener una mayor circulación de corriente en los cables colocados en dichos ductos.

III.1 CALCULO DE LA CORRIENTE NOMINAL DE UN CABLE EN AIRE

Los factores que determinan la corriente continua que con seguridad puede ser transportada por un cable son los siguientes :

La máxima temperatura permisible a la que sus componentes pueden operar con un razonable margen de seguridad,
Las propiedades de disipación de calor del cable,
Las condiciones de instalación y del medio ambiente,

La caída de voltaje (para cables de baja tensión).

En los cables con aislamiento de papel debe tenerse en cuenta la variación de temperatura entre el servicio a plena carga y en vacío .

El calentamiento se debe a las pérdidas óhmicas, a las pérdidas por histéresis y a las pérdidas de Eddy en el conductor y en las envolturas metálicas.

Desde el conductor el calor fluye hacia la envoltura metálica (lámina de plomo o de aluminio , usada para la protección contra la humedad) , y hacia las fundas usadas para protección mecánica y contra la corrosión, y, por último, de éstas hacia el medio ambiente .(Fig 3.1).

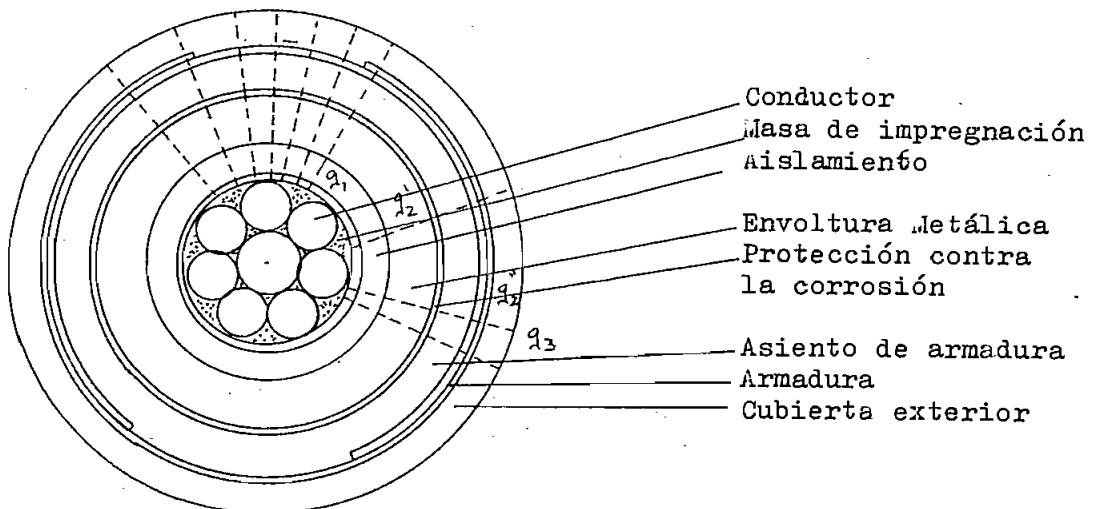


Fig 3.1 (a)

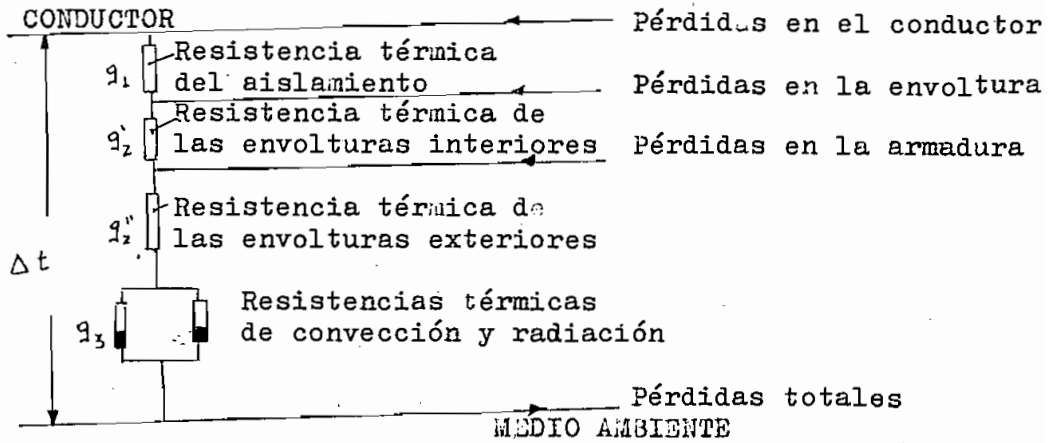


Fig 3.1 (b)

Diagrama del flujo de calor en un cable en aire

La cantidad de calor ,en cada una de las partes constitutivas del cable, depende de las resistencias térmicas de las envolturas, no metálicas; ya que el valor de dicha resistencia térmica es despreciable para las capas metálicas de protección.

El flujo de calor puede evaluarse por una ley análoga a la de Ohm; en efecto , si se considera que el calor transmitido en un cable (H) corresponde a la corriente eléctrica (I), la diferencia de temperatura (Δt) a la tensión (V) y la resistencia térmica total ($\sum Gt$) a la resistencia (R) , se puede establecer la siguiente relación (ref.L5) :

$$H = \frac{\Delta t}{Gt} \quad (F3.1)$$

Donde : H = Flujo de calor generado en los cables
(W/cm)

Δt = Diferencia total de temperatura entre el conductor y el medio
(°C)

$$\sum Gt = \text{Resistencia térmica total} \quad (^\circ\text{C cm/ W})$$

La resistencia térmica de un cuerpo se define como la diferencia de temperatura (°C) entre las caras opuestas de un cubo de un centímetro de arista , causada por la transferencia de un vatio de calor.

El calor generado en un cable se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$H = n I^2 Re \quad (\text{W/cm}) \quad (\text{F3.2})$$

Donde : n = Número de cables

I = Corriente nominal en cada cable (A rms)

Re = Resistencia de cada conductor a la temperatura máxima de operación. El valor de la resistencia debe tomar en cuenta las correcciones por efecto pelicular, de proximidad, de cableado, de circulación de corriente alterna. (Ω /cm).

El efecto del cableado en la resistencia se corrige, aproximadamente , añadiendo al valor de la resistencia a corriente continua un 2% de dicho valor.

El efecto Skin se toma en cuenta al aplicar la siguiente fórmula (Ref. L6) :

$$\text{Ref (ca)} = Rcc \cdot K \quad (\text{F 3.3})$$

Donde : Ref (ca) = Resistencia efectiva a corriente alterna (Ω)

Rcc = Resistencia a corriente continua (Ω)

K = Coeficiente de efecto pelicular o superficial. Este valor se da en función de X.

$$X = 2\pi r \sqrt{\frac{2f\mu}{\rho \cdot 10^9}} \quad (F3.4)$$

Donde : r = Radio del conductor en(cm)

f = Frecuencia (ciclos/s)

μ = Permeabilidad relativa. ($\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$, donde
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
(Weber/A.m))

ρ = Resistividad (Ω / cm^3)

Los valores de K en función de X se dan en la siguiente tabla (Ref Ll) :

Tabla 3.1

X	K
0,0	1.00000
0,1	1.00000
0,2	1.00002
0,3	1.00004
0,4	1,00013
1,0	1,00519
1,1	1,00758
1,2	1,01071
1,3	1,01470
1,4	1,01969

El efecto Skin puede corregirse, también, aplicando la siguiente fórmula:

$$R'' = R (1+y) \quad (F 3.5)$$

En la fórmula 3.5 tenemos que :

R'' = Resistencia a corriente alterna del conductor
(Ω)

R = Resistencia a corriente continua del conductor
(Ω)

y = Incremento de la resistencia por efecto Skin. Este valor se lo toma de la figura 3.2 (Ref.L5).

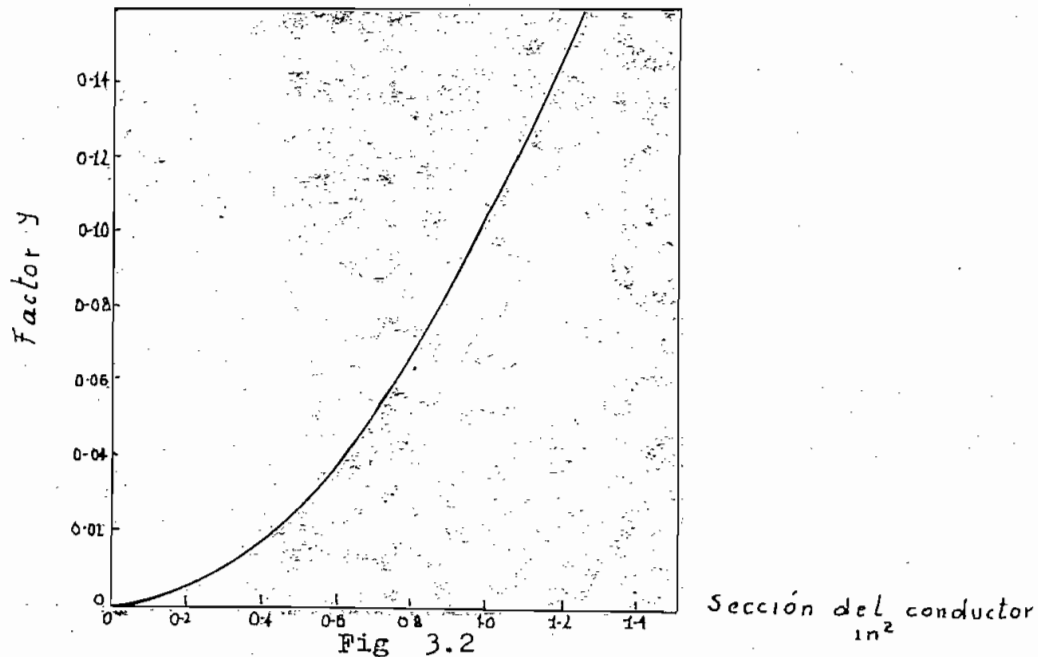


Fig 3.2
Efecto Skin en conductores circulares
(60 c/s)

El efecto de proximidad se lo toma en cuenta al aplicar la siguiente relación (Ref L5) :

$$R''' = R (1 + y_1) \quad (\Omega) \quad (F3.6)$$

El valor de y_1 se toma de la figura 3.3 (Ref L5).

De esta manera el valor de la resistencia a la máxima tempe

ratura de operación se evalúa mediante la siguiente fórmula (Ref L5) :

$$R_e = R (1 + 0,02 + y + y_1) \quad (\Omega) \quad (F3.7)$$

Donde: R_e = Resistencia efectiva del conductor (Ω)

R = Resistencia del conductor a corriente continua (Ω)

y = Corrección por efecto Skin

y_1 = Corrección por efecto de proximidad

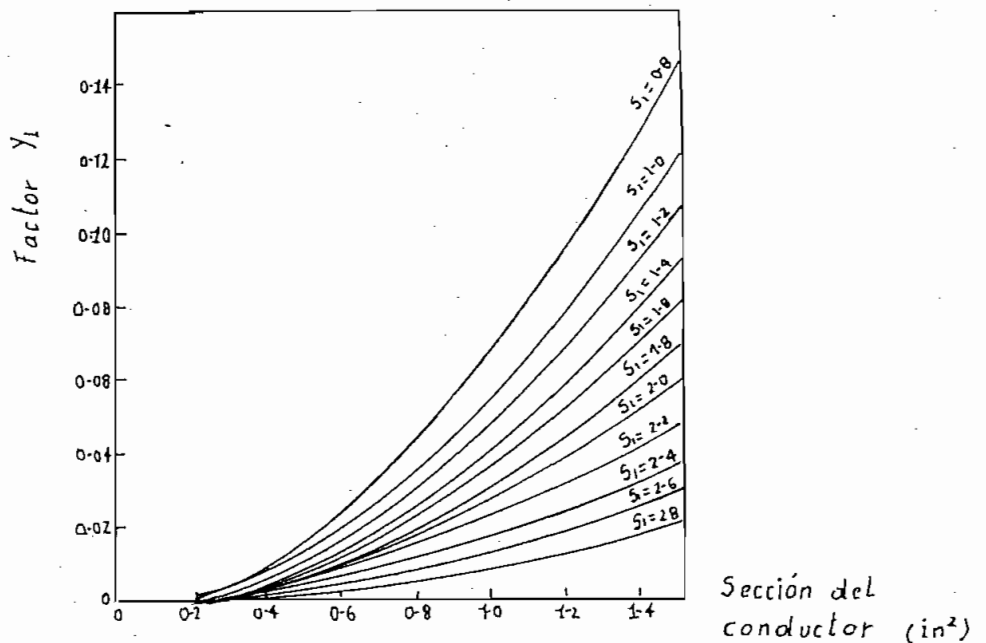


Fig 3.3

Factor de Corrección para conductores circulares

(50 c/s)

El valor de la resistencia térmica total se halla mediante la siguiente fórmula (ref.L5) :

$$G_t = G_1 + (1 + \lambda)(G_s + G_e) \quad (F3.8)$$

Donde : G_t = Resistencia térmica total (°C cm/W)

G_1 = Resistencia térmica del aislante (°C cm/W)

λ = Relación entre las pérdidas entre lámina y fleje con respecto a las pérdidas en el conductor

G_s = Valor combinado de las resistencias térmicas de las capas protectoras (°C cm/W)

G_e = Valor de la resistencia térmica del medio (del aire si el cable está instalado al aire libre o del suelo si está tendido bajo tierra) (°C cm/W).

La diferencia de la temperatura (Δt) entre el conductor y el medio ambiente se la encuentra al aplicar la siguiente fórmula (ref.L5) :

$$\Delta t = T_c - T_a - T_d \quad (F3.9)$$

Donde : T_c = Temperatura máxima de operación del conductor (°C)

T_a = Temperatura del medio ambiente (°C)

T_d = Caída de temperatura en el dieléctrico (°C)

De las ecuaciones enunciadas se llega a obtener la siguiente, que se utiliza para calcular la capacidad nominal de los cables:

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a - T_d}{Re(G_1 + (1 + \lambda)(G_s + G_e))}} \quad (F3.10)$$

La ecuación 3.10 permite calcular la capacidad nominal (I) de un cable, tanto si está al aire libre como si está bajo tierra . Si el cable esta al aire libre el valor de la resistencia térmica del medio es la del aire y su valor se determina según se indica en la sección (III.1.1.1.a). Si el cable está enterrado bajo el suelo el valor de la resistencia térmica del medio es la del suelo y se la calcula mediante la siguiente fórmula (Ref.L4) :

$$G_e = \frac{g_e}{2\pi} \ln \frac{4h}{d} \quad (F 3.11)$$

Donde : g_e = Resistividad térmica del suelo
(°C cm/W)

h = Profundidad a la que está tendido el
cable (cm)

d = Diámetro del cable (cm)

En el presente estudio sólo se tratarán cables que están al aire libre y no se considerará la influencia del suelo. Si un cable está dentro de un ducto o canal se lo considera como si estuviera al aire libre y luego se hacen las reducciones respectivas de la capacidad nominal, según se describe en la sección II.2 .

III.1.1 CALCULO DE LA CORRIENTE NOMINAL DE CABLES MONOPOLARES

Para calcular la capacidad nominal de cables monopolares es necesario conocer ciertas características propias de los cables (materiales de sus partes constitutivas, di-

mensiones de sus componentes , etc .) , así como también datos del medio (temperatura del medio circundante, etc.).

La capacidad nominal de los cables monopolares se evalúa mediante la fórmula 3.10 , y en esta sección se analizará la forma de calcular las distintas variables que ella contiene.

III.1.1.1 RESISTENCIAS TERMICAS

De la fórmula 3.10 se deduce que la capacidad nominal de un cable varía inversamente con la raíz cuadrada de la resistencia térmica total . El valor de la resistencia térmica de un material es función de la resistividad térmica de aquel. La resistencia térmica total es la suma de las resistencias térmicas individuales.

La resistencia térmica de las capas metálicas tienen un valor despreciable y por ello no se las toma en cuenta.

a . RESISTENCIA TERMICA DEL AISLANTE

El valor de la resistencia térmica del aislante (G_1), se lo puede evaluar mediante la fórmula 3.12 (Ref I5);

$$G_1 = \frac{g_1}{2 \pi} \ln \frac{D_1}{d_1} \quad (F 3.12)$$

En la fórmula 3.12 tenemos que :

G_1 = Resistencia térmica del aislante (°C cm/W)

g_1 = Resistividad térmica del aislante (°C cm/W)

D_1 = Diámetro sobre el material (cm)

d_1 = Diámetro bajo el material (cm)

b. RESISTENCIA DE LAS CAPAS PROTECTORAS (G_2)

El valor total de la resistencia térmica de las capas protectoras es la suma de los valores de cada capa protectora no metálica (polietileno , yute, PVC, etc.), y se las determina mediante una fórmula semejante a la 3.12, así :

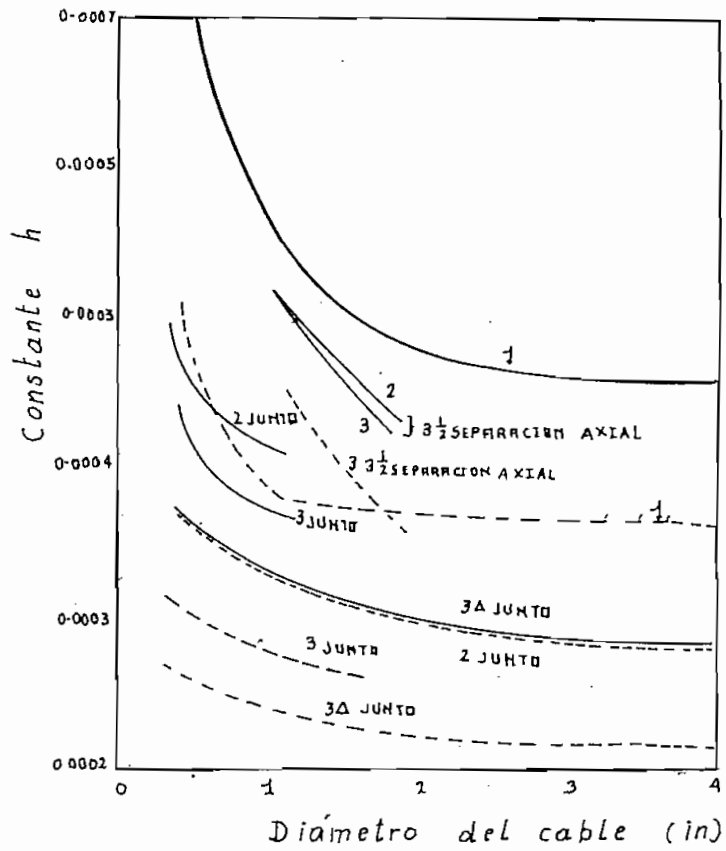
$$G_2 = \frac{g_2}{2\pi} \ln \frac{D_2}{d_2} \quad (F 3.13)$$

Los significados de estas variables son similares a los dados en la fórmula 3.12.

c . RESISTENCIA TERMICA DEL AIRE

La resistencia térmica del aire es función de la temperatura del medio ambiente , del diámetro del cable, y de una constante h ,la cual depende de la disposición de los cables y del color de su superficie.

El valor de h puede encontrarse de la figura 3.4 (Ref. L5).



Superficie negra ———
 Superficie brillante - - - -

- 1 Cable monopolar
- 2 Dos cables monopolares
- 3 Tres cables monopolares (fig a)

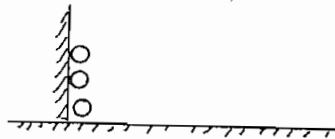


Fig a

- 3Δ Tres cables monopolares (fig b)



fig b

Fig 3.4

La fórmula para calcular la resistencia térmica del aire (G_3), expresada en ($^{\circ}\text{C cm / W}$), es la siguiente (Ref.L5) :

$$G_3 = \frac{1}{7\sqrt{Dc} \cdot h \cdot T_a^{0,25}} \quad (\text{F } 3.14)$$

Donde : Dc = Diámetro exterior del cable (cm)

T_a = Temperatura del medio ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

h = Coeficiente de disipación de calor por radiación y convección (fig. 3.4)
($\text{W / cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

III.1.1.2 RELACION DE LAS PERDIDAS ENTRE CAPAS METALICAS PROTECTORAS RESPECTO DE LAS PERDIDAS EN EL CONDUCTOR

Por las láminas metálicas (plomo y aluminio) circulan corrientes que producen pérdidas Ohmicas y pérdidas de Eddy, estas últimas (resultantes de las corrientes de Eddy inducidas en la lámina metálica) son pequeñas en comparación con las pérdidas Ohmicas . De la figura 3.1 dada en la sección III.1, se deduce que el calor generado en las láminas metálicas atravieza solamente las capas exteriores a éstas .

Las pérdidas relativas en las capas metálicas se obtienen al aplicar la siguiente expresión (Ref.L5) :

$$\lambda = \frac{R_s}{R_c} \left[\frac{X^2}{R_s^2 + X^2} + \frac{0,0025}{R_s^2} (r_l/s)^2 \right] \quad (F3.15)$$

Donde : λ = Pérdidas de las capas metálicas respecto a las pérdidas del conductor.

R_s = Resistencia equivalente de las capas metálicas (Ω /cm)

R_c = Resistencia del conductor (Ω /cm)

X = Reactancia de la lámina (Ω /cm)

r_l = Radio medio de la lámina (cm)

s = Separación axial de los centros de los cables (cm)

La fórmula 3.15 se aplica para la siguiente disposición de los cables:

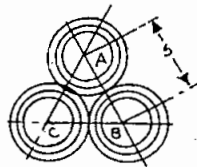


Fig 3.5

Para cables en formación plana (Fig 3.6) las pérdidas relativas de las capas metálicas (λ) se obtienen por la fórmula (F 3.16) (Ref. L5) :

$$\lambda = \frac{R_s}{R_c} \left[\frac{(X+X_m)^2}{R_s^2 + (X+X_m)^2} + \frac{(X-1/3X_m)^2}{R_s^2 + (X-1/3X_m)^2} + \frac{0,0025}{R_s} \left(\frac{r_l}{s} \right)^2 \right] \quad (F 3.16)$$

Donde : $X_m = 5,25 \cdot 10^{-7}$ (Ω /cm)

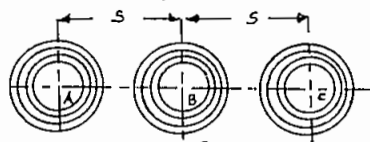


Fig 3.6

El valor de la resistencia equivalente de las capas metálicas (Rs) , expresada en Ω/cm , se encuentra mediante la siguiente fórmula :

$$R_s = \left(\sum_{i=1}^n 1/R_i \right)^{-1} \quad (F3.17)$$

Donde: Ri = Resistencia de cada una de las capas metálicas(lámina de plomo o aluminio, fleje de acero,etc.) (Ω/cm)

El valor de Ri se obtiene con la siguiente expresión (Ref.L5) :

$$R_i = \frac{0,3878 (1+\alpha (t-20))}{(D_e^2 - D_i^2)} \quad (F 3.18)$$

Donde : El valor de Ri es la resistencia Ohmica por 1000 yardas de longitud .Si se quiere el valor en (Ω/cm) , la cantidad 0,3878 debe reemplazarse por $4,26 \cdot 10^{-6}$.

α = Coeficiente de temperatura de cada capa metálica (1/°C)

De = Diámetro sobre la capa metálica respectiva (cm)

Di = Diámetro bajo la capa metálica respectiva (cm)

t = Temperatura de operación de las capas metálicas (°C)

El valor de la temperatura de operación de las capas metálicas viene dado por la siguiente relación (Ref.15)

$$t = t_o \cdot G_3 / (G_1 + G_2 + G_3) \quad (F 3.19)$$

En la relación anterior se tiene que :

t_p = Variación permisible de temperatura (tabla 4.1)
(°C)

G1 = Resistencia térmica del aislante (°C cm/W)

G2 = Resistencia térmica de las capas protectoras
(°C cm/W)

G3 = Resistencia térmica del aire (°C cm/W)

El valor de la reactancia del cilindro equivalente de radio medio geométrico correspondiente a los radios de las láminas metálicas (X), expresado en (Ω/cm), viene dado por la siguiente relación (Ref L7) :

$$X = 0,173 \cdot 10^{-5} \log_{10} \frac{GMD}{RMG} \quad (F 3.20)$$

Donde : GMD = Distancia media geométrica, que puede obtenerse mediante la siguiente fórmula (Ref. L7) : (cm)

$$GMD = \sqrt[3]{S1 \cdot S2 \cdot S3} \quad (F3.21)$$

S1, S2, S3 = Distancias axiales entre los cables en un sistema trifásico (cm)

RMG = Radio medio geométrico de las capas metálicas. Si estas capas son una lámina metálica y un fleje, el radio medio geométrico se halla mediante la siguiente fórmula (Ref L7) : (cm)

$$RMG = \ln R2 - \frac{R1^4}{(R2^2 - R1^2)} \ln(R2/R1) - \frac{3 R1^2 - R2^2}{4(R2^2 - R1^2)} \quad (F 3.22)$$

En la fórmula (3.22) se tiene que :

R_1 = Radio medio de la lámina (cm)

R_2 = Radio medio del fleje (cm)

La figura 3.7 ilustra la disposición de los cables para hallar la reactancia equivalente de las láminas metálicas.

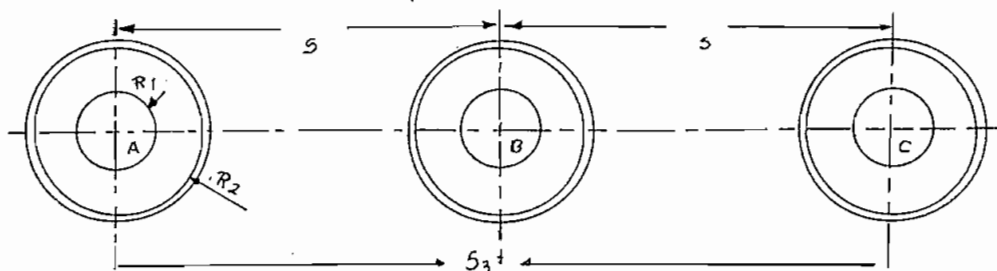


Fig 3.7

III.1.1.3 CAÍDA DE LA TEMPERATURA DEL DIELECTRICO

Para tensiones superiores a los 22 kV deben tomarse en cuenta las pérdidas ocasionadas por el calentamiento del dieléctrico.

Para tensiones inferiores a los 22 kV se ha encontrado experimentalmente (Ref.L5) que dichas pérdidas son despreciables, esto se debe a que éstas son función de la tensión y de la capacidad del dieléctrico, las cuales tienen valores bajos en dicho rango de tensiones.

Las pérdidas en el dieléctrico se calculan mediante la siguiente fórmula (Ref L8) :

$$P_d = \frac{w \cdot C \cdot V^2}{3 \cdot 10^6} \cos \phi \quad (F 3.23)$$

Donde : P_d = Pérdidas en el dieléctrico (W/fase.km)

w = 377 rad/s para(60 c/s)

V = Voltaje rms entre fases (V)

C = Capacitancia del cable (µF/fase.km)

$\cos \phi$ = Factor de potencia del dieléctrico

El valor de la capacitancia (C) ,expresado en µF/ fase.km , (Fig.3.8) ,se calcula mediante la siguiente relación (Ref L8) :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln (R_3/R_4)} \quad (F3.24)$$

Donde: $\epsilon_0 = (1/36 \cdot \pi) \cdot 10^9$ (Faradio/m)

ϵ = Permitividad del aislante (Faradio/m)

L = Longitud del cable (m)

R_3 = Radio sobre la pantalla del aislante (m)

R_4 = Radio bajo la pantalla del conductor (m)

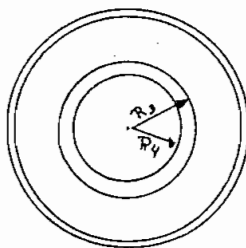


Fig 3.8

Con el valor hallado de las pérdidas en el dieléctrico se puede calcular la elevación de la temperatura(T_d) en este elemento mediante la siguiente fórmula (Ref L5)

$$T_d = P_d (G_1 + G_2 + G_3) \quad (^\circ\text{C}) \quad (F 3.25)$$

Los valores de esta fórmula fueron definidos anteriormente.

Una vez hallados los valores de los cuales consta la fórmula 3.10 se puede determinar la capacidad nominal de cables monopolares en aire al aplicar dicha relación.

III.1.2 CAPACIDAD NOMINAL DE CABLES TRIPOLARES EN AIRE

El cálculo de la capacidad nominal de cables tripolares en aire tiene un proceso similar al indicado para cables monopolares ; es decir, deberá aplicarse la misma fórmula 3.10 . Sin embargo , la diferencia radica en la evaluación de las resistencias térmicas internas las cuales se obtienen mediante fórmulas experimentales . En todos los demás aspectos el desarrollo es similar al de la sección anterior.

Puesto que los cables tripolares generalmente son usados para tensiones inferiores a 22 kV , puede despreciarse el efecto de las pérdidas en el dieléctrico (P_d); y por lo tanto, no se toma en cuenta la caída de temperatura en éste.

Las fórmulas experimentales ya toman en cuenta las pérdidas en las capas metálicas, razón por la cual la ecua-

ción de la capacidad nominal de los cables tripolares en aire se reduce a la siguiente expresión (Ref L5) :

$$I_n = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{3R_e (G_1 + G_2 + G_3)}} \quad (F 3.26)$$

Donde ; I_n = Capacidad nominal de cables tripolares en aire (A)

T_c = Temperatura máxima que puede soportar el conductor (°C)

T_a = Temperatura del medio ambiente (°C)

R_e = Resistencia efectiva del conductor a la temperatura máxima que puede soportar el mismo (deben tomarse en cuenta los efectos de : cableado, Skin, proximidad) (Ω /cm)

G_1 , G_2 , G_3 = Resistencias térmicas interna, de las capas protectoras y del aire, respectivamente. (°C cm/W)

III.1.2.1 RESISTENCIAS TERMICAS

a . RESISTENCIA TERMICA INTERNA G_1

El valor de la resistencia térmica interna se lo puede obtener mediante curvas experimentales (RefL5) (Fig 3.9) .Para la elaboración del programa digital se ha hecho una aproximación de estas curvas a la siguiente fórmula :

$$G1 = (a \cdot Es)^b \quad (F 3.27)$$

Donde: G1 = Resistencia térmica interna para un cable tripolar (°C cm/W)

$$Es = \frac{Ea}{Dci} \quad (F 3.28)$$

Ea = Espesor total del aislamiento (cm)

Dci = Diámetro de cada conductor (cm)

Los valores de a y b se toman de la siguiente tabla :

Tabla 3.2

Valores de las constantes a y b		
	Para tensiones mayores de 1.5 kV	Para tensiones menores de 1.5 kV
a	9271,76	10552,26
b	0,569	0,592

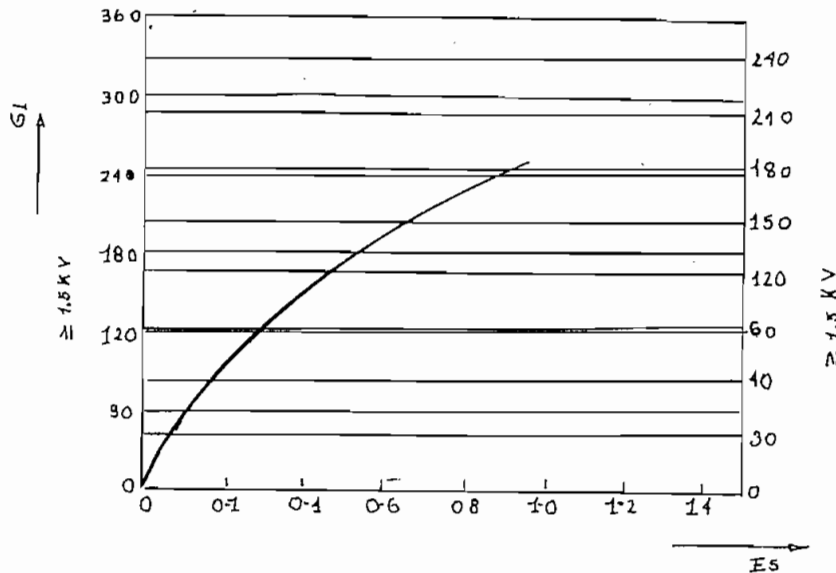


Fig 3.9 Resistencia térmica interna de cables tripolares

b. RESISTENCIA TÉRMICA DE LAS CAPAS PROTECTORAS (G2)

El valor de la resistencia térmica de las capas protectoras no metálicas (°C cm /W) se calcula mediante la siguiente fórmula (Ref. L5) :

$$G_2 = \frac{g_2}{2\pi} \ln \frac{(r_6 + r_e + \tau)}{(r_6 + r_e - \tau)} \quad (F 3.29)$$

Donde ; g2 = Resistividad térmica de la capa protectora (°C cm/W)

r6 = Radio externo sobre la lámina de plomo o de aluminio (cm)

re = Radio del cable (cm)

τ = Espesor radial sobre las capas protectoras (cm)

El valor de la resistencia térmica de las capas de protección puede obtenerse, también, fácilmente mediante la Fig 3.10 .

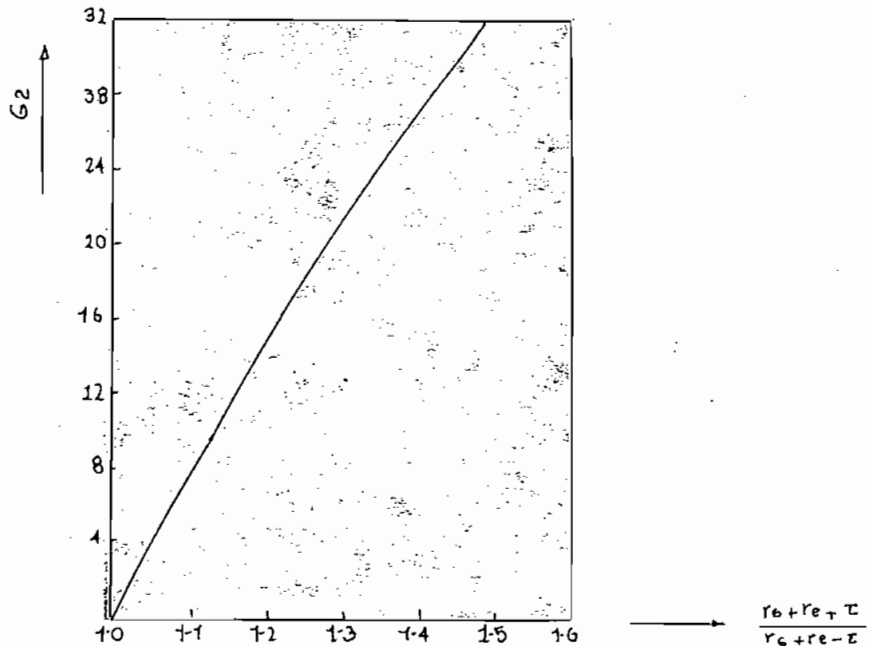


Fig 3.10
Resistencia térmica de las capas protectoras (g2=500)

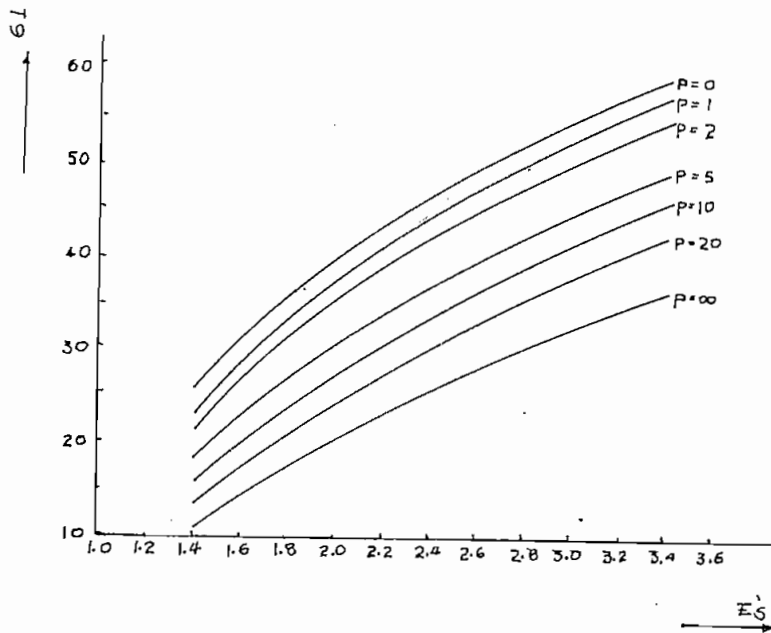


Fig3.10

Curvas de la resistencia térmica interna
para un cable tripolar apantallado (H)

c RESISTENCIA TÉRMICA DEL AIRE

El valor de la resistencia térmica del aire se obtiene mediante la fórmula 3.14 , y en la manera indicada en la sección III.1.1.1.c.

Con los resultados obtenidos mediante el proceso descrito y al aplicar la fórmula 3.26 se puede calcular la capacidad de los cables tripolares en aire (cables sin apantallamiento) .

III.1.3 CAPACIDAD NOMINAL DE CABLES TRIPOLARES APANTALLADOS . EN AIRE

Este tipo de cables se usan para tensiones iguales o mayores a 30 kV . El apantallamiento reduce la resistencia térmica interna del cable ya que provee de caminos adicionales al flujo de calor que están en paralelo con el dieléctrico.

El cálculo de la resistencia térmica interna para este tipo de cables se lo hace mediante fórmulas experimentales basadas en el método electrolítico desarrollado por Konstantinowsky. Los resultados del mencionado método se presentan en las curvas que se dan en la figura 3.10(Ref L5).

Para realizar el programa digital se aproximaron estas curvas a la siguiente fórmula :

$$G1 = (a \cdot E's)^b \quad (F 3.30)$$

Donde: G1 = Resistencia térmica interna (°C cm/W)

a , b = Constantes , cuyo valor depende de un parámetro (Ps) el cual puede hallarse mediante la siguiente fórmula (Ref L5) :

$$Ps = \frac{Ep \cdot gl}{2 \cdot Rci \cdot gp} \quad (F 3.31)$$

Donde: Ep= Espesor de la pantalla (cm)

gl=Resistividad térmica del dieléctrico (°C cm/W)

Rci= Radio de cada conductor (cm)

gp = Resistividad térmica de la pantalla (°C cm/W)

$E's = \frac{Dp}{Dci}$; Donde :

Dp = Diámetro sobre la pantalla (cm)

Dci= Diámetro sobre el conductor(cm)

Conocido el valor del parámetro Ps la siguiente tabla indica las cantidades correspondientes a (a) y (b).

Tabla 3.3

Ps	20	10	5	2	1	0
a	6	12.5	14	18,3	19,5	60,2 78,3
b	1,21	1	0,99	0,94	0,96	0,76 0,73

El resto del proceso para calcular la capacidad nominal de un cable tripolar apantallado es similar al seguido para un cable tripolar sin apantallamiento (Sección III.1.2), en efecto, dicha capacidad se calculará con la fórmula

$$3.26 \quad (I_n = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{3 R_e (G_1 + G_2 + G_3)}} \quad (A) \quad)$$

La capacidad nominal de los cables tripolares se la obtiene considerando que los cables tienen sección circular, sin embargo, la mayoría de los cables tienen conductores de forma sectorial, con lo cual se reduce su diámetro externo y por ello los elementos auxiliares del conductor (láminas, armadura, capas de protección) disminuyen de espesor; sin embargo, la corrección de la corriente no excede del 3 % (mayor) para cables de 1,1 kV hasta 33 kV inclusive , para tensiones mayores el factor de corrección es mucho menor . El mencionado aumento en la capacidad de los cables se debe a que la resistencia térmica interna es menor , per esta variación tiende a compensarse con el valor de la resistencia térmica externa.

III.2 CORRIENTE DE CABLES EN DUCTOS

Cuando un cable está instalado en un ducto o canal, sin ventilación el calor por él generado se disipa a través, de sus paredes , y en todas direcciones. Sin embargo , se acumula ca-

lor en el interior del ducto o canal con lo cual se incrementa la temperatura del medio y por lo tanto se disminuye la capacidad del cable . La mencionada elevación de temperatura depende solamente de la magnitud de la potencia calorífica irradiada y del perímetro del ducto o canal, y no de la disposición de los cables en el interior.

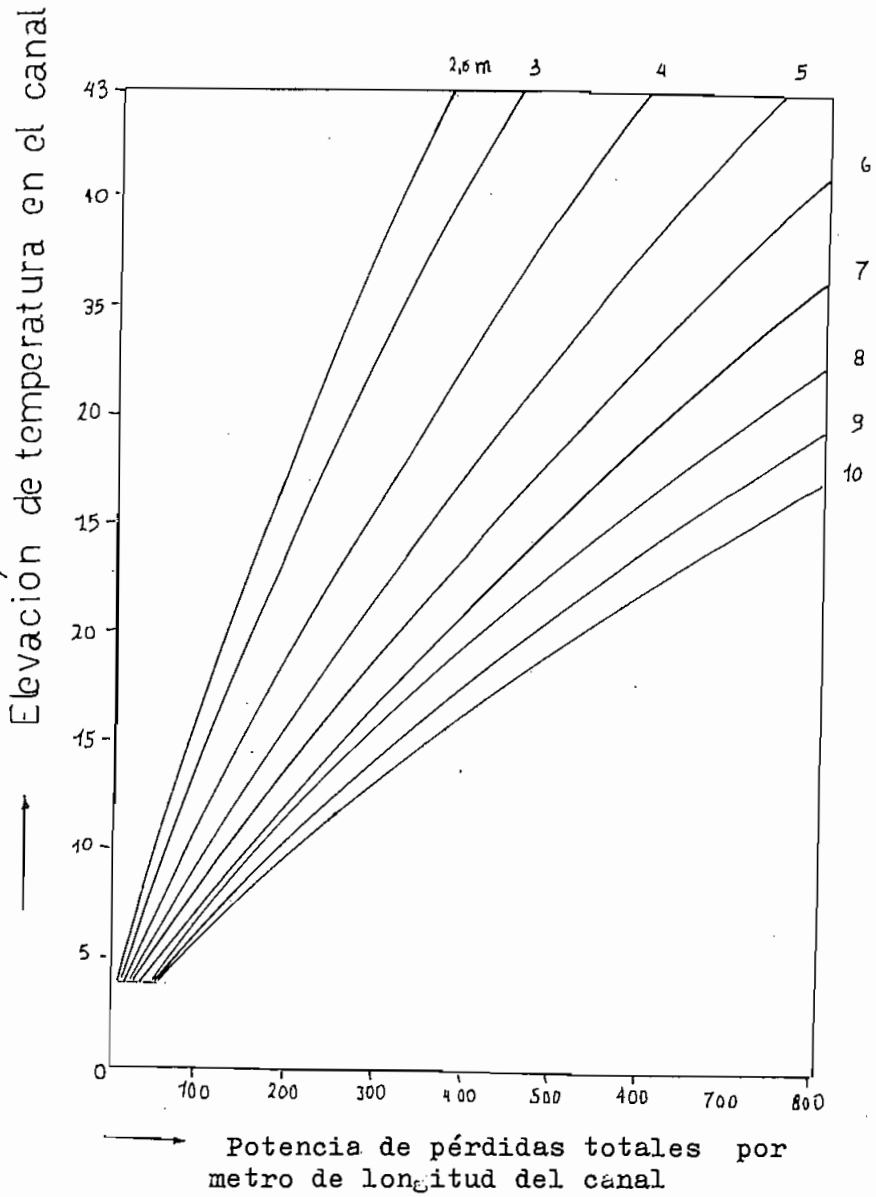
El incremento de la temperatura en el interior del ducto o canal se obtiene a partir de las curvas experimentales dadas en la Fig 3 .11 (Ref L4).

Para el programa digital se aproximó a la siguiente fórmula, las curvas dadas en la Fig 3.11:

$$\Delta t_d = (1,062 \cdot P_c / P_e)^{0,7467} \quad (F 3.32)$$

Donde: P_c = Potencia total disipada por los cables en el ducto o canal (W/m)
 P_e = Perímetro del ducto o canal (m)
 Δt_d = Incremento de temperatura en el interior del ducto o canal (°C)

El perímetro mencionado en la fórmula 3.32 corresponde solamente a las paredes que pueden disipar el calor hacia el exterior, así por ejemplo, no se tomarán en cuenta las paredes y techos que estén cerca de la casa de máquinas , de los lugares donde estén los transformadores , etc .



Cada curva corresponde a un perímetro interior determinado de canal (en metros)

Fig 3.11

Elevación de temperatura en el interior del canal

El valor de la potencia disipada por los cables se calcula mediante la siguiente fórmula (Ref L5):

$$P_c = n \cdot I_q^2 \left[R_e + \frac{X^2 R_s}{(R_s^2 + X^2)} \right] \quad (F 3.33)$$

Donde : P_c =Potencia total disipada por los cables (W/m)

n = Número de cables

R_e = Resistencia del conductor (Ω /m)

X = Reactancia equivalente de radio medio geométrico correspondiente a los radios de las cubiertas metálicas (lámina y fleje , por ejemplo) (Ω /m)

R_s = Resistencia equivalente de las cubiertas metálicas (Ω /m)

I_q =Corriente media geométrica que circula por el cable en 24 horas ,su valor está dado por la siguiente fórmula:

$$I_q = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{24}} \quad (A) \quad (F3.34)$$

Donde : I_1 , I_2 , I_n , son las corrientes que fluyen en los tiempos : t_1 , t_2 , t_n (h)

Si se da como dato el tiempo de duración del servicio continuo que se requiere a plena carga,el valor de la corriente media geométrica para un período de 24 horas (I_q) se lo puede hallar mediante la siguiente relación (Ref L4) :

$$I_q = I_n \sqrt{\frac{t}{24}} \quad (F 3.35)$$

Donde: I_n =Capacidad nominal del cable (A)

t =Duración del servicio a plena carga (horas)

Tomando en cuenta el incremento de la temperatura en el interior del ducto (F 3.32), la fórmula 3.10 se transforma en la siguiente :

$$I_d = \sqrt{\frac{T_c - T_a - T_d - \Delta t_d}{Re(G_l + (1 + \lambda)(G_s + G_e)}} \quad (F 3.36)$$

La relación anterior permite determinar la capacidad de un cable en un ducto (I_d), en amperios, Los significados de las variables en la fórmula 3.36 fueron ya definidos.

Al dividir la fórmula 3.36 por la 3.10 se llega a establecer la siguiente relación:

$$I_d = \left[\sqrt{\frac{T_c - T_a - T_d - \Delta t_d}{T_c - T_a - T_d}} \right] \cdot I_n \quad (F 3.37)$$

La fórmula 3.37 permite obtener el valor de la capacidad nominal de un cable en un ducto (I_d), en amperios, como una función de la capacidad nominal del cable en aire (I_n). El valor de la capacidad nominal de un cable en aire se obtiene en la forma indicada en la sección III.1 .

Los cables se instalan en ductos o canales . Si se instalan en canales pueden, a su vez , disponerse directamente en el suelo o en las paredes mediante abrazaderas o bandejas.

La potencia disipada por los cables en el interior de un ducto o canal se transmite por radiación y convección principalmente.

La cantidad de calor transmitida en forma de radiación se calcula con la siguiente fórmula (Ref L9) :

$$q = \sigma \cdot F_{1,2} \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (F3.38)$$

Donde : q = Cantidad de calor transmitida en forma de calor (Calorías)

σ = Constante de Stefan Boltzman

$$(4,92 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/hora m}^2 \cdot \text{°K}^4)$$

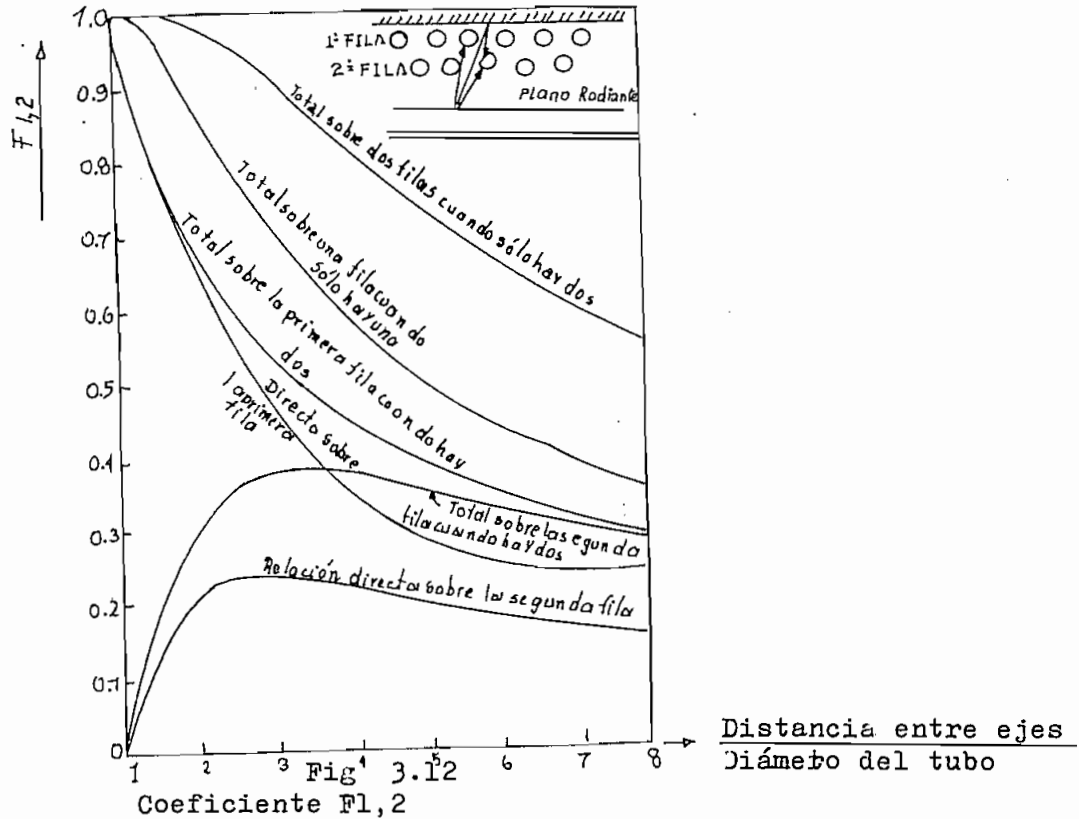
A = Superficie externa del cable (m²)

T_1 = Temperatura de la superficie del conductor (°K)

T_2 = Temperatura del medio (°K)

$F_{1,2}$ = Constante que puede determinarse de la Fig 3.12

(Ref L9)



De la figura 3.12 se deduce que se tendrá la mínima transferencia de calor para una separación entre ejes de tubos de una misma fila igual al diámetro de cada cable , puesto que la cantidad de calor emitida por radiación es proporcional al factor $F_{1,2}$.

Otra de las formas de transmisión de calor que debe tomarse en cuenta para evaluar la elevación de la temperatura en el ducto es la de convección. Las fórmulas para determinar la transmisión de calor mediante convección son experimentales y dependen, entre otros factores (Número de Reynolds, Número de Stanton, Número de Nusselt, Número de Prandtl, Número de Peclet, Número de Graetz) de la forma de las superficies emisoras y receptoras del calor . Para el presente trabajo es interesante conocer la siguiente relación (Ref L10) , la misma que permite calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_s), expresado en $\text{kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, para cilindros paralelos que tienen un diámetro menor de 30 cm :

$$h_s = 0,358 \left[\frac{T_c - T_a}{D_c} \right]^{0,25} \quad (F3,39)$$

Donde: T_c = Temperatura de la superficie del cable ($^\circ\text{C}$)

T_a = Temperatura del aire ($^\circ\text{C}$)

D_c = Diámetro externo del cable (cm)

La fórmula 3.39 indica que mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre el conductor y el medio ambiente mayor será la transmisión de calor , y por lo tanto , aumen-

tará la temperatura en el ducto o canal. La transmisión de calor por convección depende también , en forma inversa de la raíz cuarta del diámetro del cable.

Del estudio anterior se deduce que un cable situado junto a una pared recibe tanto el calor reflejado por aquella como el transmitido por convección por el o los cables que están junto a él, mientras que un cable que está situado entre otros recibe el calor irradiado por otros cables , en forma directa (y no por reflexión como es el caso de la situación anterior) y la energía calorífica transmitida por convección por los conductores vecinos y los alejados . Es decir que para cables situados entre otros la capacidad disminuirá en relación con aquel que se encuentra junto a una pared. La situación se complica cuando se consideran un conjunto de bandejas.

De estudios experimentales (Ref L4) se ha deducido que la acumulación de calor proveniente de la radiación y convección de este tipo de energía disminuye si se colocan los cables a una distancia mayor de 2 cm de la pared del canal , y separados entre ellos una distancia mayor o igual a su diámetro . Además las bandejas deben estar separadas , por lo menos, 30 cm para que la capacidad de los cables en el ducto no disminuya de una manera notoria. Esto se visualiza en la Fig 3.13.

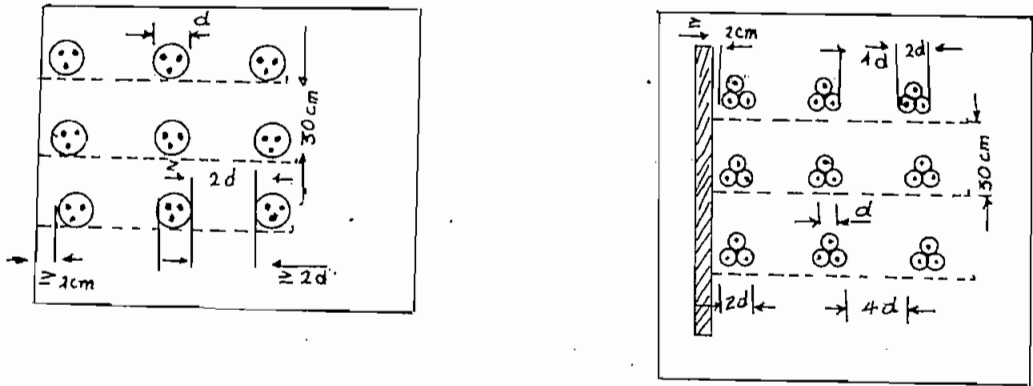


Fig 3.13

Disposición de los cables en bandejas

Si la corriente en los cables colocados en ductos o canales disminuye ostensiblemente del valor deseado deben aumentarse el número de cables o sus secciones y el perímetro del ducto o canal . Si esto no es posible debe recurrirse a la ventilación forzada de aire.

III .3 METODO DE ENFRIAMIENTO

Quando la temperatura en el ducto o canal sobrepasa ciertos límites que determinan una disminución considerable de la capacidad de los cables una de las alternativas es recurrir a la ventilación forzada de aire.

El cálculo del caudal del aire refrigerante se basa en la evaluación de las pérdidas óhmicas . Los ventiladores deben sobredimensionarse con el objeto de tener una adecuada reserva en el

caso de que se prevean ampliaciones.

El caudal del aire necesario se calcula mediante la siguiente fórmula (Ref L4) :

$$Q = 0,77 \cdot 10^{-3} \frac{Pt \cdot L}{t_1} \quad (\text{F 3.40})$$

Donde : Q = Caudal del aire refrigerante (m³/s)

L = Longitud del ducto o canal (m)

t₁ = Calentamiento del aire refrigerante (°C)

El valor del calentamiento del aire refrigerante se lo obtiene mediante la siguiente fórmula (Ref L4) :

$$t_1 = (Tc - Ta) \cdot (1 - Id/In)^2 \quad (\text{F 3.41})$$

Donde : Tc = Temperatura máxima de operación del conductor (°C)

Ta = Temperatura del medio (°C)

Id = Corriente que se desea llevar por el cable en el ducto o canal (A)

In = Capacidad nominal del cable (A)

La velocidad de circulación del aire en el ducto o canal se calcula mediante la siguiente fórmula (Ref L4) :

$$\text{Vel} = Q/A \quad (\text{F3.42})$$

Donde Vel = Velocidad del aire refrigerante en el ducto o canal (m/s)

Q = Caudal del aire refrigerante (m³/s)

A = Sección transversal del ducto o canal (m²)

El aire refrigerante circula por el canal o ducto y ayuda a una

mejor disipación del calor y por ello permite que la capacidad de los cables aumente. Además tiende a contrarrestar la transmisión del calor por convección y radiación.

Los ductos o canales deben construirse con materiales que no reflejen el calor entre sus paredes, y, deben tener buenas propiedades de absorción de calor para que éste sea disipado por sus paredes.

CAPITULO IV
PROGRAMA DIGITAL

En este capítulo se analiza el programa digital utilizado para calcular la capacidad de cables en ductos y bandejas.

En la sección IV.1 se dan los diagramas de flujo del programa principal y luego se detallan cada una de las partes importantes de las cuales está formado.

Las partes más importantes del programa digital son las siguientes:

IV.1.2 Cálculo de la corriente de cables monopolares en aire,

IV.1.3 Cálculo de la corriente en cables tripolares en aire, con y sin apantallamiento,

IV.1.4 Cálculo de la capacidad de cables en ductos,

IV.1.5 Cálculo del caudal del aire refrigerante.

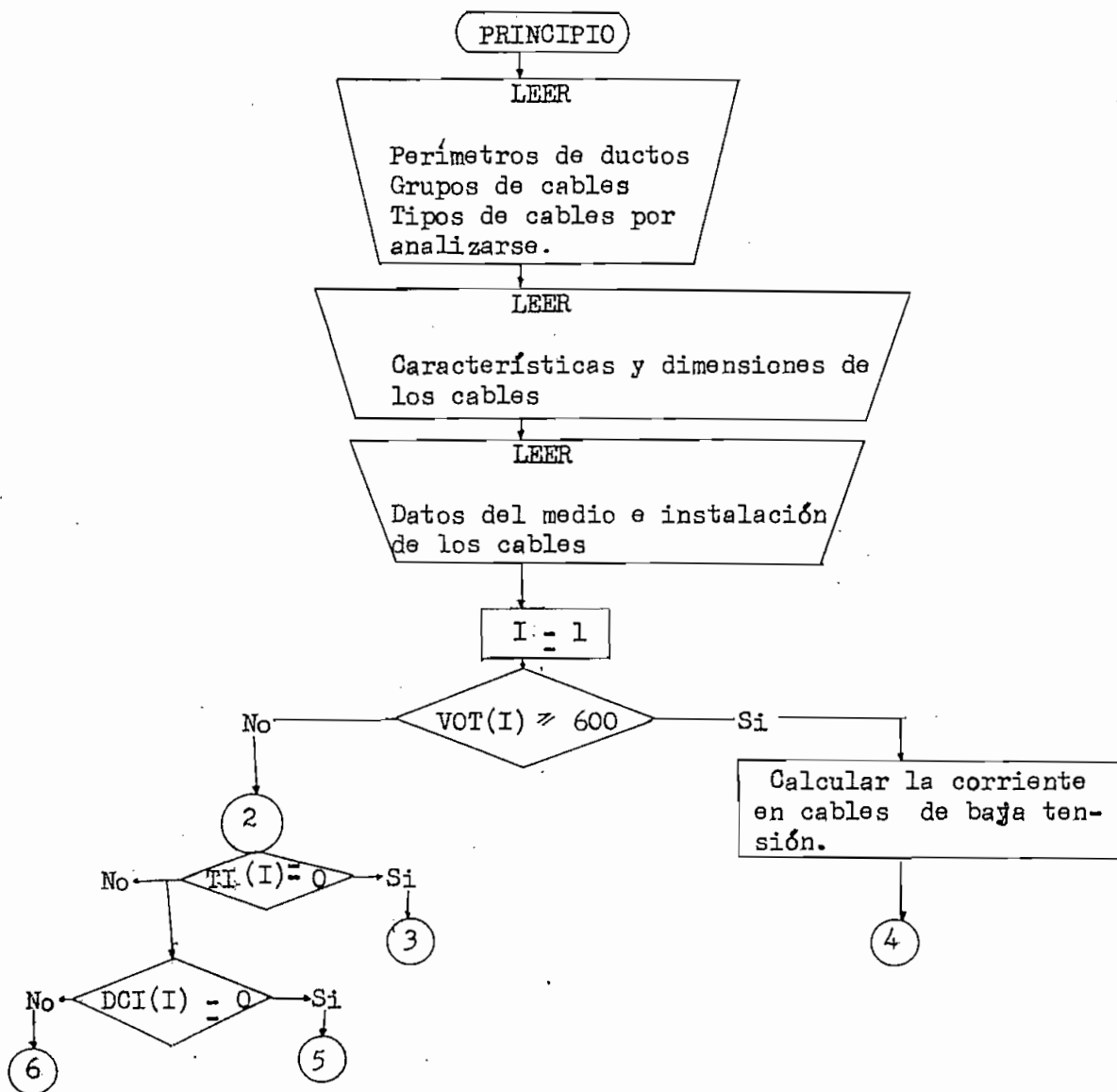
En el punto IV.2 se describe detalladamente el programa digital y para ello ,primero, se da una lista de los datos de entrada con su respectiva equivalencia de los nombres utilizados; para al final de este capítulo indicar las características del método digital.

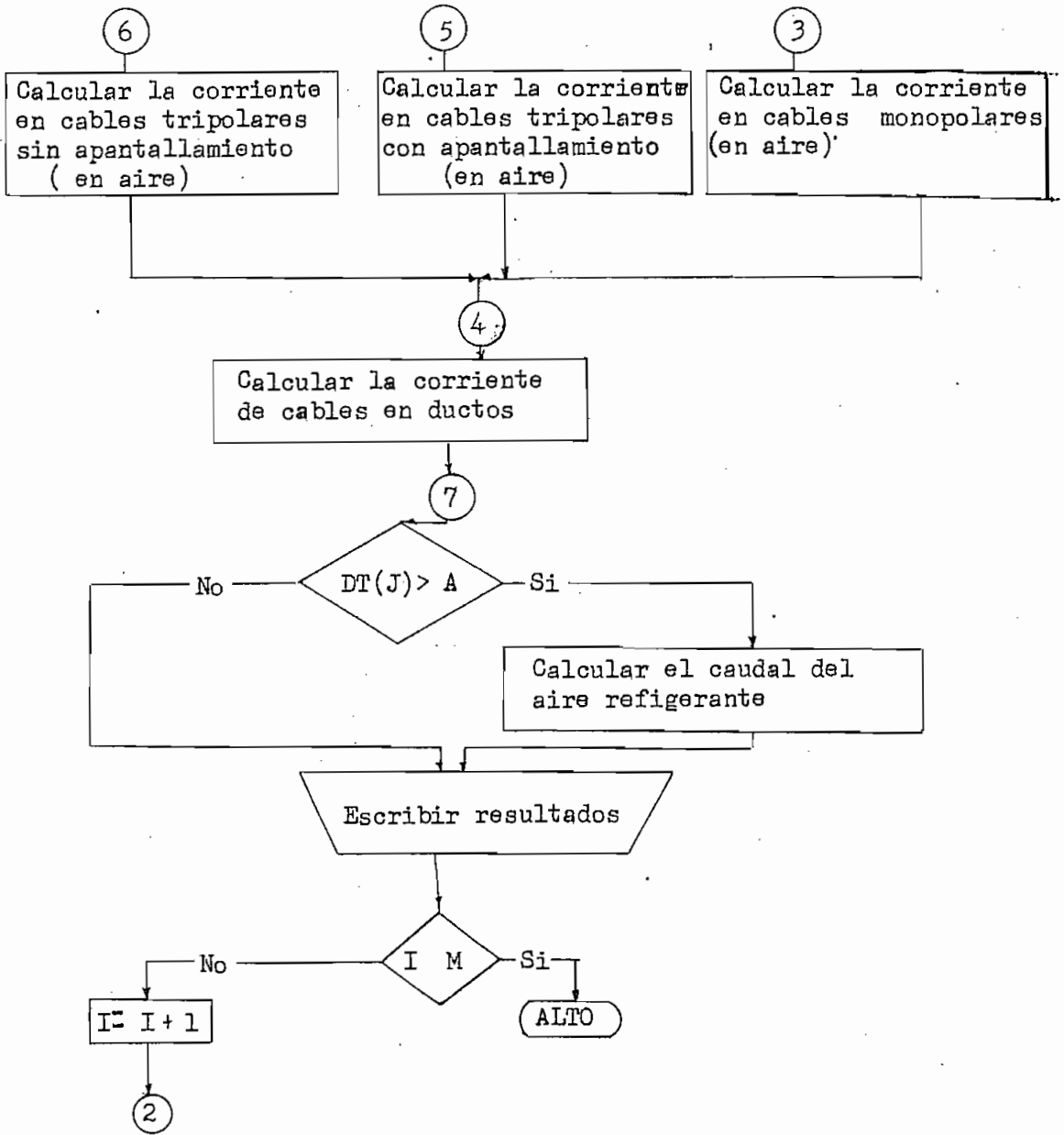
IV.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Los diagramas de flujo que se describen a continuación contienen los pasos a seguirse durante el proceso de cálculo. Las fórmulas utilizadas, para el estudio que es objeto de la presente tesis, fueron enunciadas en el capítulo III

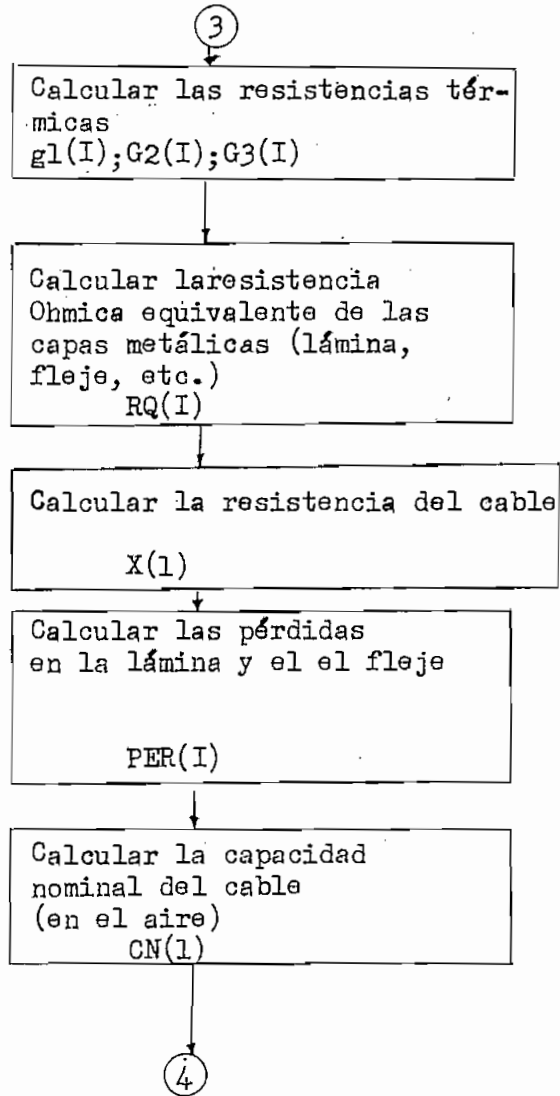
IV.1.1

PROGRAMA PRINCIPAL

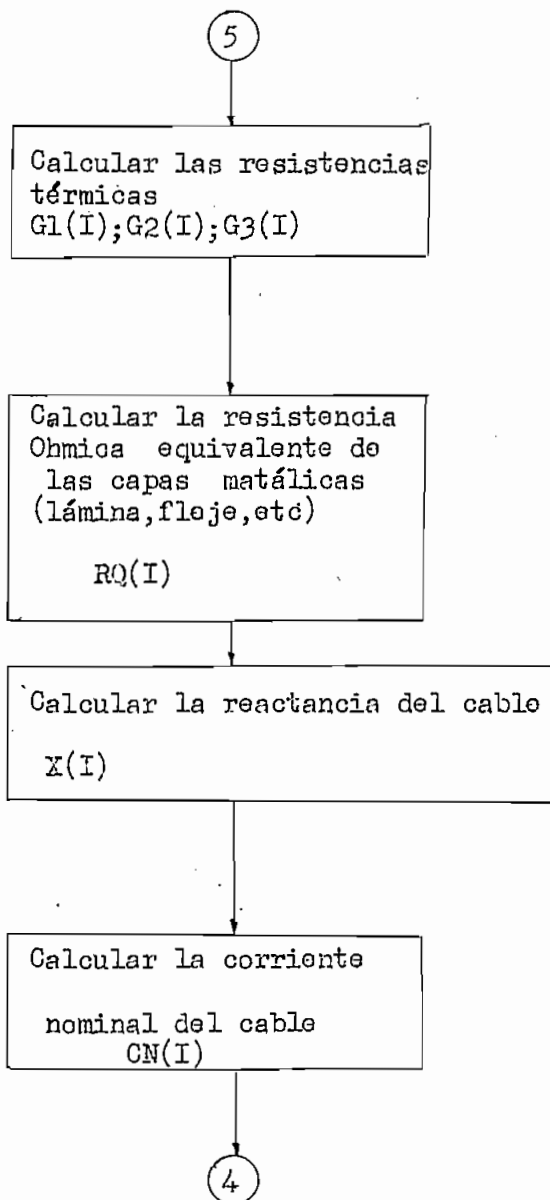




IV.1.2 CALCULO DE LA CAPACIDAD DE CABLES MONOPOLARES
EN EL AIRE

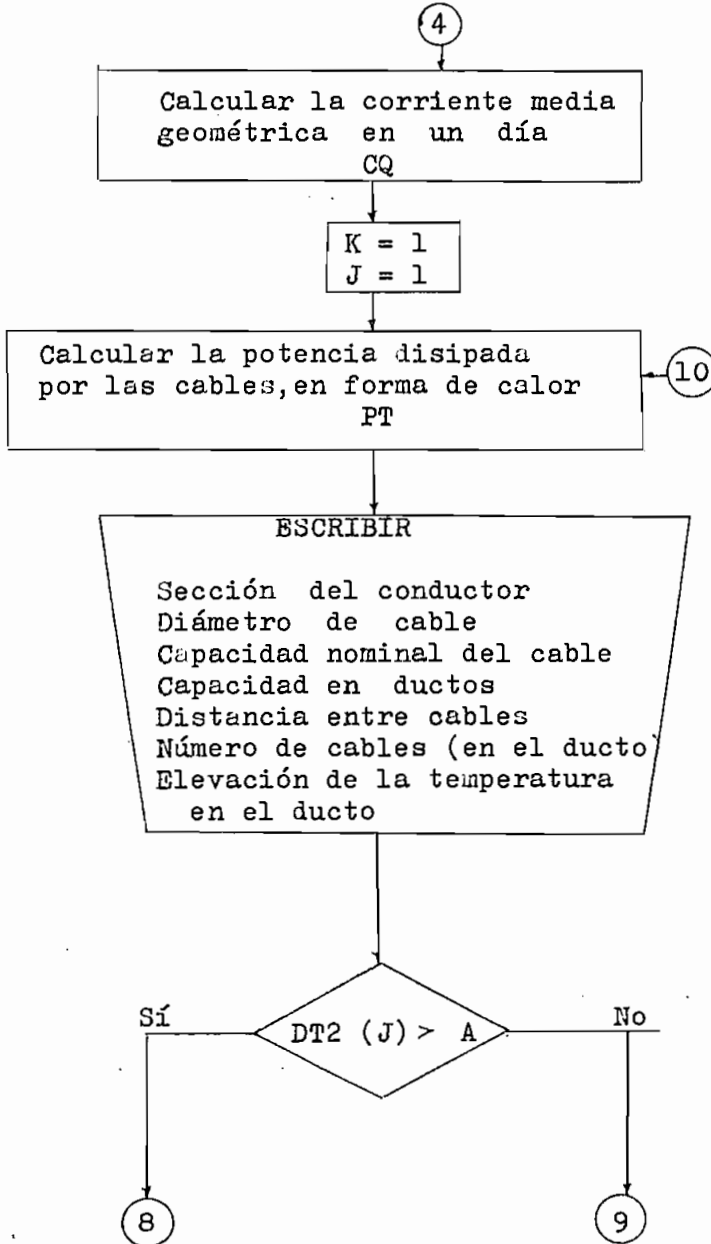


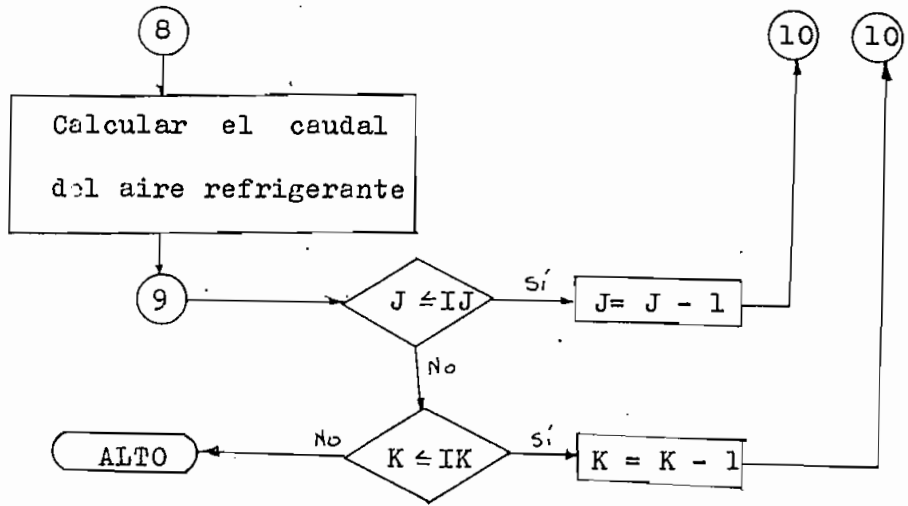
IV.1.3 CALCULO DE LA CORRIENTE NOMINAL DE CABLES
TRIPOLARES AL AIRE



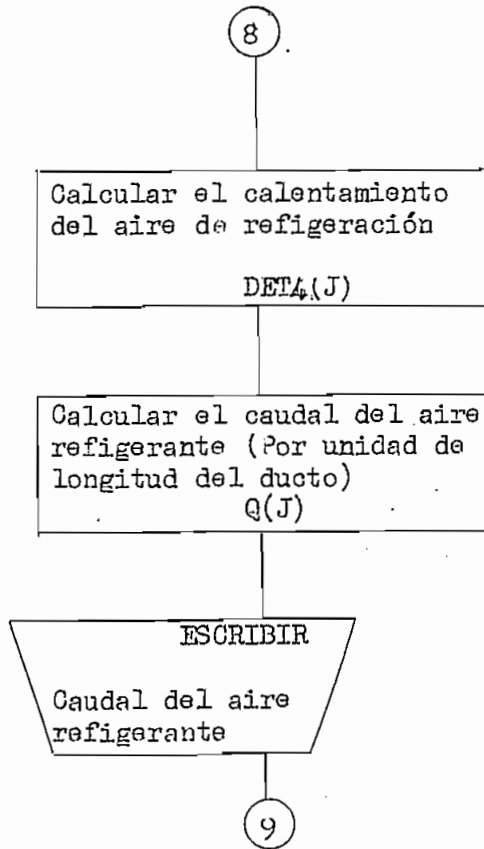
Las fórmulas para calcular los distintos valores de las cantidades indicadas en este diagrama, son semejantes para los dos tipos de cables tripolares (con o sin apantallamiento), difieren solamente en la forma de evaluar la resistencia térmica interna (ver sección III.1.2 y III.1.3).

IV . 1. 5 CORRIENTE DE CABLES EN DUCTOS





IV.1.6 CAUDAL DE AIRE DE REFRIGERANTE



IV.2 PROGRAMA DIGITAL

IV.2.1 DATOS DE ENTRADA

IK= Número de diferentes perímetros

II= Número de elementos tomados para elaborar la tabla de equivalencias entre la sección de un conductor en mm² y su correspondiente valor en la galga AWG o en MCM (mil circular mil)

N= Número de diferentes tipos de cables cuyos datos van a leerse

IV.2.1.2 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES Y DIMENSIONES DE LOS CABLES

(Para las dimensiones ver figura IV.1)

TC= Temperatura máxima que puede soportar el conductor °C

ET= Elevación normal de temperatura que puede soportar el cable °C

GS= Resistividad térmica de la pantalla eléctrica °C cm/W

GA= Resistividad térmica del dieléctrico °C cm/W

GPE= Resistividad térmica del aislante interior (Polietileno u otro material plástico) °C cm/W

GPI= Resistividad térmica del aislante exterior (aislamiento de material plástico) °C CM/W

CPL = Coeficiente específico de la temperatura de la lámina	1/°C
CPF = Coeficiente específico de temperatura del fleje	1/°C
H = Coeficiente que agrupa la transmisión de calor por convección y radiación de la superficie	W/°C cm ²
REL = Resistividad de la lámina	Ω .cm
REF= Resistividad del fleje (cable monopolar)	Ω .cm
RC=Resistencia del conductor a su máxima temperatura de operación (valor corregido por efecto Skin, de proximidad, de cableado)	Ω /cm
TI= Señal para indicar si el cable es monopolar(1) tripolar con o sin apantallamiento(3) y (2)	
Tensión nominal del cable = VOT	V
VAR = Un valor diferente de cero calcula la capacidad de los cables en ductos para diferente número de éstos en un ducto determinado.	

DIMENSIONES DEL CABLE

DCI = Diámetro interno del conductor	cm
DAE=Diámetro exterior del dieléctrico	cm
DAI=Diámetro interno del dieléctrico	cm
DPI=Diámetro interno del aislamiento central	cm
DAPI=Diámetro exterior del aislamiento central	cm
DF= Diámetro exterior del fleje	cm
DC= Diámetro exterior del cable	cm
RAF= Resistividad del fleje (cable tripolar)	Ω .cm
SEC=Sección del conductor	mm ²

IV.2.1.3 DATOS DEL MEDIO E INSTALACION DEL CABLE

T=	Tiempo de funcionamiento continuo del cable	Horas
A=	Elevación máxima permisible de temperatura en el ducto	$^{\circ}\text{C}$
TA=	Temperatura normal del medio en el cual se instala el cable	$^{\circ}\text{C}$
P=	Perímetro del ducto	m
B=	Señal que indica como debe calcularse la corriente media geométrica en 24 Horas	
W=	Corriente media durante una hora (valor tomado de la curva de carga)	Amperios
TO=	Tiempos en los cuales la corriente alcanza su valor W	Horas

IV.2

NOMBRES DE LAS VARIABLES

G1=	Resistencia térmica del dieléctrico	$^{\circ}\text{C cm /W}$
G21=	Resistencia térmica del aislante interior	$^{\circ}\text{C cm/W}$
G31=	Resistencia térmica del aislante exterior	$^{\circ}\text{C cm/W}$
G2=	Resistencia térmica total interna	
G2=	$G21 + G31$	$^{\circ}\text{C cm/W}$
G3=	Resistencia termica del aire	$^{\circ}\text{C cm/W}$
TI=	Temperatura de operación de la lámina	$^{\circ}\text{C}$

RI= Resistencia Ohmica de la lámina	Ω / cm
RF= Resistencia Ohmica del fleje	Ω / cm
RQ= Resistencia Ohmica equivalente de la lámina y el fleje.	Ω / cm
X=Reactancia del cable	Ω / cm
PER= Pérdidas de la lámina y el fleje	W/M
CN= Capacidad nominal del cable en aire	A
ES= Relación entre el espesor total del aislamiento y el diámetro del cable	
PS=Parámetro , que en los cables tripolares apantallados , permite calcular la resistencia térmica del dieléctrico	
CQ= Corriente media geométrica del cable en un día	A
PT=Potencia total disipada por los cables en el ducto	W
DT2=Elevación de temperatura en el ducto	$^{\circ}\text{C}$
CD=Corriente del cable que continuamente fluye por el cable	A
DET4=Calentamiento del aire de refrigeración	$^{\circ}\text{C}$
Q= Caudal del aire refrigerante	m^3 / seg
V,K= Dimensiones del ducto en largo y alto	m
S=Diámetro de un ducto circular	Pulgadas

IV.2.3 CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA DIGITAL

IV.2.3.1 DATOS DE ENTRADA

a. CONSTANTES GENERALES

IK = Número total de perímetros a tomarse en cuenta en el programa. Los perímetros corresponden a varios tipos de ductos o canales.

II = En el programa hay una sección que tiene por objeto determinar el número AWG o el tamaño KCM que corresponde a un cable cuya sección en mm^2 , se conoce. Este proceso se realiza por interpolación de tablas, el valor de II indica el número de elementos que se tomaron en cuenta para elaborar la tabla de interpolación. (Este proceso se describe en el apéndice I).

N = Número de cables con los cuales se va a trabajar.

b. CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y DIMENSIONES DE LOS CABLES

ET = Máxima elevación admisible de temperatura que el conductor puede soportar en condiciones normales. Este valor puede tomarse de la tabla IV.1 (Ref L4).

Tabla IV.1

TIPOS DE CABLES	TENSION NOMINAL V /V *	TEMPERATURA ADMISI- BLE DEL CONDUCTOR	ELEVACION DE TEMPERA- TURA
Cables con ais- lamiento de pa- pel y envolturas de metal	: VOT (KV) 0,6/1 3,5/6 5,8/10 8,7/15 11,6/20 17,3/30	TC (C) 80 70 65 60	ET (C) 50 40 35 30
Cables con ais- lamiento plásti- co.	0,6/1 3,5/6 5,8/10 8,7/15 11,6/30 17,3/30	70 65 60 55	40 35 30 25

(*) V= Tensión entre fases KV

V = Tensión entre el conductor y la envoltura
metálica o tierra KV

TC es la máxima temperatura que puede soportar el conductor sin que pierda sus características. Este valor se da en la tabla IV.1
GS GA GPE GPL Son los valores de las resistividades térmicas de las diversas capas de protección del cable. Estos valores son característicos de cada material, algunos ejemplos se dan en la tabla IV.2 (L11)

Tabla IV . 2

Nombre	Material	Resistividad térmica (°C cm /W)
GA	Papel impregnado en aceite	550
GA	Aislamiento para cables OF	500
GA	Aislamiento para cables con gas a presión	500
GA	Aislamiento para cables con gas a alta presión	500
GA	Masas de relleno	500
GS	Cobre	0,26
GS	Aluminio	0,25
GS	Latón	0,92
GS	Plomo	2,9
a	Recubrimiento de yute	500-700
a	Polietileno	300
a	PVC (Sarán)	1300
a	Caucho natural	683
a	Caucho butyl	341
a	Neopreno	520
a	Hypalón	886
a	Teflón	399

a son los valores para GPE y GPI

CPL CPF Son coeficientes específicos de temperatura e indican la variación relativa de la resistividad al al incrementar la temperatura en 1 °C .Algunos valores se dan en la tabla IV.3 (Ref L4)

Tabla IV.3

Material	Coeficiente específico de temperatura 1/°C
Cobre	4,2 . 10 ⁻³
Aluminio	4,38 . 10 ⁻³
Acero	5 . 10 ⁻³
Latón	2 . 10 ⁻³
Plomo	4,3 . 10 ⁻³

H Esta constante de radiación y convección del calor depende del color de la superficie del cable, de la disposición y del diámetro de éste. Algunos valores importantes se dan en la tabla IV.4 (Ref L5)

Tabla IV.4 (Ref L5)

Color de la superficie	Número de Cables	Diámetro del cable	Emisividad (H) (W/°C cm ²)
Negra	1	1,27	6,65
	1	2,54	5,52
	1	3,81	5,0
	1	6,35	4,55
	1	6,35	4,55
	1	7,62	4,53
	1	8,89	4,52
	1	10,16	4,5

COLOR DE LA SUPERFICIE	NUMERO DE CABLES	DIAMETRO DEL CABLE	EMISIVIDAD H W/°C cm ²
Negra	3	1,27	3,52
	3	2,54	3,25
	3	3,81	3,1
	3	6,35	2,9
	3	7,62	2,7
	3	8,89	2,6
	3	10,16	2,55

REL REF RAF RC Son valores de las resistividades de los componentes metálicos del cable (lámina, Fleje, fleje en cable tripolar, conductor) .En la tabla IV.5 se dan ciertos valores importantes.

TABLA IV.5

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ω mm ² /m)
Cobre	0,0172
Aluminio	0,0284
Plomo	0,215
Acero	0,1

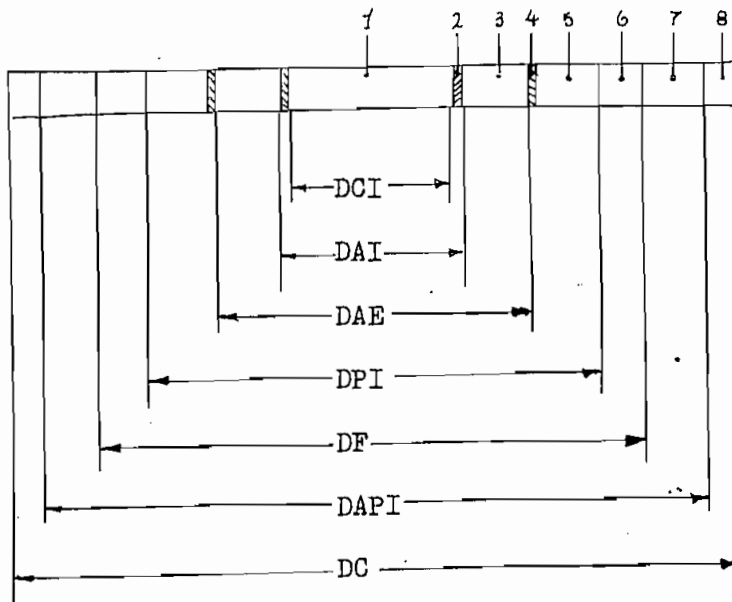
T1 Esta señal se coloca para distinguir si un cable es tripolar o monopolar ; en el caso de que el cable muestra sea tripolar debe ponerse un número 3 si es apantallado, si no es apantallado 2 y si es monopolar se pondrá 1 . En cables de baja tensión el campo puede dejarse vacío .

VOT Es la tensión eficaz nominal del cable expresado en voltios

DIMENSIONES DEL CABLE

DCI DAE DF DAI DPI DAPI DC EA SEC

La siguiente figura ilustra el significado físico de cada una de estas dimensiones.



En la figura IV.1 tenemos lo siguiente ;

- 1 Conductor
- 2 Pantalla electrostática
- 3 Dieléctrico (aislante del conductor)
- 4 Lámina de refuerzo
- 5 Aislante interior (Poliétileno u otro material termoplástico)
- 6 Fleje (Generalmente platinas o alambres de acero)
- 7 Aislante exterior (Poliétileno u otro material termoplástico)
- 8 Recubrimiento de protección exterior (Yute por ejemplo)

El valor del diámetro del conductor DCI es el valor total sobre todos los alambres que forman dicho conductor Fig. IV.1

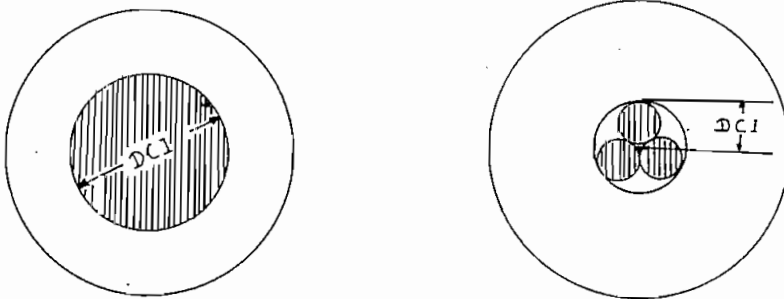


FIG. IV.2

Aún cuando el cable no tenga de aislamiento central (poliétileno o cualquier material aislante), en el espacio correspondiente a DAPI se coloca un número diferente de cero.

IV.2.3.2 FORMATOS DE LOS DATOS DE ENTRADA

En esta sección se darán los formatos para los datos de entrada utilizando los valores correspondientes del primer ejemplo de aplicación para ilustrar su escritura . El ejemplo citado desarrolla el cálculo para cuatro tipos diferentes de cables ,estos son:

- a) Cable monopolar (11,6/20KV)
- b) Cable tripolar (Sin pantalla electrostática)
 (0.6/1KV)
- c) Cable de baja tensión (200 V)

- d) Cable tripolar apantallado (17/30 KV)

Los datos correspondientes a este tipo de cables se dan en las hojas de codificación (PAG 94a-b) Allí se dan falton los valores correspondientes a GW TO ,en cuyo lugar deberán colocarse tarjetas vacías , ya que en el ejemplo en consideración la corriente media geométrica I_g se lo obtiene a partir del tiempo de funcionamiento continuo a plena carga del cable (T)

IV.2.3.3 RESULTADOS DEL PROGRAMA

COLUMNA 1 Indica la sección del cable expresada tanto en mm^2 como en su correspondiente valor en números AWG o en MCM (mil circular mil)

COLUMNA 2 Corresponde al diámetro del cable expresado en cm

COLUMNA 3 Da el valor de la corriente nominal del cable en amperios. Dicha capacidad es la de un tipo de cable a instalarse en contacto con aire.

COLUMNA 4 En esta columna está localizado el valor de la capacidad continúa del cable (expresada en amperios) en un ducto determinado.

COLUMNA 5 Da el diámetro del ducto en (cm)

COLUMNA 6 Esta columna señala las dimensiones en ancho por alto (m) que tiene un canal cuyo perímetro es equivalente al que corresponde al ducto cuyo diámetro se da en la columna 5.

COLUMNA 7 Aquí está localizado el número de cables que pueden colocarse en un ducto determinado.

COLUMNA 8 Indica el aumento de temperatura en el ducto debido a la circulación de corriente en el cable, este es el factor que señala si debe o no darse ventilación forzada de aire al ducto o canal; si el valor de dicha temperatura sobrepasa un valor límite fijado por el diseñador (dato A) se calculará aquel caudal de aire.

COLUMNA 9 Aquí aparece el valor del caudal del aire de refrigeración que ha sido calculado en caso de que la temperatura en el ducto o canal hubiere alcanzado un límite considerado peligroso por el diseñador. Se expresa en m^3/seg por metro de longitud del ducto o canal.

IV.3 PROGRAMA DIGITAL

En las siguientes páginas se da una copia del programa digital corrido en la computadora de la Escuela Politécnica Nacional.

Además del programa respectivo para calcular la capacidad nominal de cables en ductos se presenta una subrutina para transformar e identificar el número AWG de un cable cuya sección se conoce.

CAPITULO V

EJEMPLOS DE APLICACION

En este capítulo se dan varios ejemplos de aplicación para ilustrar la forma en la cual se utiliza el programa digital.

Para estos ejemplos se consideran como cables de alta tensión aquellos cuyo voltaje nominal es superior a 600 V (rms) ; y son cables de baja tensión los cables de tensión nominal igual o inferior a 600 V (rms).

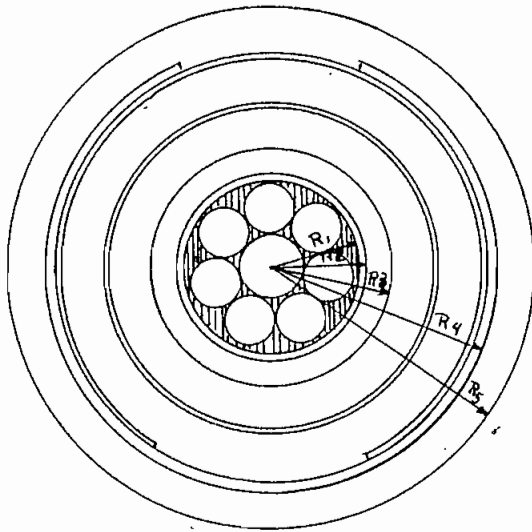
V.1 EJEMPLO N° 1

En este ejemplo se tratan cuatro tipo de cables , estos son:

- a . Monopolar de alta tensión (11,6/20 kV)
- b . Tripolar para alta tensión (0,6/1 kV)
- c . Tripolar con pantalla electrostática para
alta tensión (17 / 30 kV)
- d . De baja tensión (200 V)

Los datos que corresponden a dimensiones y características de los materiales de las diferentes partes constitutivas de los cables fueron obtenidos de la referencia bibliográfica (Ref L4) y de las tablas consignadas en el capítulo VI .

En la figura 5.1 se indica el significado físico de las dimensiones de cables monopolares y tripolares.



$$\begin{aligned} DCI &= 2 R1 \\ DAI &= 2 R2 \\ DAE &= 2 R3 \\ DF &= 2 R4 \\ DC &= 2 R5 \end{aligned}$$

Fig 5.1 a

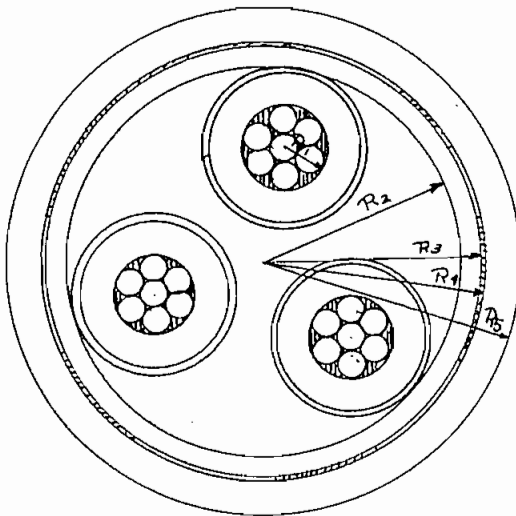


Fig 5.1 b

Fig 5.1

Dimensiones de cables . a) monopolares
b) tripolares

Los datos necesarios para el programa digital se dan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

Nombre del dato	Valor del dato			
	Monopolar	Tripolar	Tripolar H	Baja tensión
Diámetro del conductor (cm)(DCI)	0,798	0,798	0,67	0,564
Diámetro exterior del dieléctrico (cm)(DAE)	1,94	2,11	5,7	--
Diámetro interno del dieléctrico (cm)(DAI)	0,84	--	--	--
Diámetro exterior del aislamiento central (cm)(DAPI)	--	--	6,05	--
Diámetro interno del aislamiento central (cm)(DPI)	--	--	6,35	--
Diámetro exterior del fleje (cm)(DF)	2,2	2,25	6,634	--
Diámetro del cable (cm)(DC)	2,6	2,6	6,8	1,35
Elevación normal de temperatura (°C)(ET)	35	50	35	60
Voltaje entre fases (V)(VOT)	20000	1000	30000	200
Resistencia efectiva del conductor (Ω/cm) (RC)	$4,57 \cdot 10^{-6}$	$4,48 \cdot 10^{-6}$	$6,14 \cdot 10^{-6}$	$7,58 \cdot 10^{-6}$
Indicador del tipo de cable(TI)	1	2	3	
	Valores comunes para los tres tipos de cables			
Número de perímetros (IK)		10		
Valores para elaborar la tabla de equivalencia de sección con # AWG o KCM		48		

Datos de entrada para el ejemplo # 1	
Nombre del dato	Valor del dato
Resistividad térmica del dieléctrico (°C cm/W) (GA)	550
Resistividad térmica del aislante interior (°C cm/W) (GPE)	341
Resistividad térmica de la pantalla (°C cm/W) (GS)	0,50
Coefficiente específico de temperatura del fleje (1/°C) (CPL)	0,004
Coefficiente de radiación y convección (W/°Ccm ²) (H)	5,7
Resistencia específica de la lámina (Ω/cm) (REL)	2,2 · 10 ⁻⁵
Temperatura máxima de operación del conductor (°C) (TC)	75
Temperatura ambiente (°C) (TA)	25
Tiempo de operación continua a plena carga del cable (h) (T)	20
Temperatura del ducto sobre cuyo valor debe calcularse el caudal del aire refrigerante (°C) (A)	10
Perímetros de los ductos (m) (P)	0,04 0,06 0,08 0,1 0,12 0,16 0,2 0,24 0,28 0,32

Puesto que no se dieron los valores de la curva de carga , los datos respectivos se dejarán en blanco en las tarjetas corres-

pondientes, estos valores son los siguientes:

G , W , T0

En este ejemplo se trata un sólo número determinado de cables en un ducto dado, por esta razón el campo correspondiente a VAR debe dejarse vacío.

Las hojas de codificación dadas en la sección 4.2.3.2 ilustran la forma de perforar los datos.

V.1.1 RESULTADOS DE SALIDA

En las páginas 107 y 108 se dan los resultados de salida del programa digital aplicado al ejemplo # 1.

5.1.1.1 Análisis de los resultados de salida

La tabla 5.2 compara los resultados del programa digital con los valores dados en la referencia bibliográfica I4.

Tabla 5.2

Capacidad nominal de cables en aire					
Sección		Capacidad nominal		Diferencia	
		Programa	Tabla		
mm ²	AWG	(A)	(A)	%	
50	0	201	200	1.	Monopolar
50	0	187	180	1.	Tripolar
35	1	131	130	1	Tripolar H
25	3	211	215	1	Baja Tensión

Las diferencias en los valores de los resultados se deben a los siguientes factores:

a.1 Los resultados obtenidos mediante el programa digital son valores en los cuales se aproximó sólo la parte decimal ; mientras que los datos dados en la tabla (Ref L4) son cifras redondeadas a 0 ó 5 de la última cifra.

a.2 La capacidad de los cables, de acuerdo al análisis hecho en la sección III.1, depende de varios valores, tales como:

Dimensiones exactas de cada parte del cable,

Resistividades exactas de cada parte del cable (aislantes y capas protectoras);

Coefficientes de convección y radiación de la superficie del cable,

Temperatura del medio , etc. ,

sin embargo , no fue posible conseguir los datos exactos de estos valores, por lo cual se justifica la diferencia entre los resultados del programa digital y los de la referencia L4.

b. Capacidad de cables en ductos

En la tabla 5.3 se dan los resultados de salida de la capacidad de los cables en ductos de diámetros determinados, y además el número de cables que con cierto factor de seguridad pueden instalarse en aquellos.

Tabla 5.3

Capacidad de cables en ductos

# AWG	Capacidad		Reducción de la capacidad	Diámetro del ducto	Número de cables	
	Nominal	Ducto			(1)	(2)
	(A)	(A)	(%)	(cm)		
MONOPOLAR						
0	201	--	--	1,27	0	
0	201	--	--	1,91	0	
0	201	--	--	2,55	0	
0	201	138	31,3	3,18	0,8	1
0	201	135	32,8	3,82	1,1	1
0	201	128	36,3	5,09	1,6	2
0	201	120	40,3	6,37	2,2	2
0	201	113	43,8	7,64	2,9	3
0	201	105	47,8	8,91	3,6	4
0	201	96	52,2	10,19	4,5	4

(1) Valor del número de cables calculado

(2) Valor aproximado del número de cables .

En la tabla 5.3 se dan solamente los resultados de salida para los cables monopolares ya que a partir de ellos se analizará la capacidad de cables en ductos. Para el resto de cables del ejemplo 1 pueden apreciarse los resultados en las páginas 107 y 108 , en las cuales constan las copias de la salida del programa digital.

La columna que se titula "Reducción de la capacidad " se refiere al porcentaje en el cual se reduce la capacidad nominal de un cable cuando está instalado en un ducto.

La columna nombrada como "Número de cables " se ha dividido en dos partes:

(1) Da el número de cables calculado, sin aproximar la parte decimal,

(2) Expresa el valor del número de cables luego de haber se aproximado la parte decimal.

Esta división se ha hecho puesto que la elevación de temperatura y la capacidad en ductos se ha hecho sin aproximar la parte decimal del número de cables calculado.

c. Elevación de la temperatura en el ducto y caudal del aire refrigerante.

Las dos últimas columnas de los resultados de salida (pág 107, 108) se refieren a la elevación de la temperatura en el ducto y al caudal del aire refrigerante. El caudal del aire refrigerante se ha calculado sólo si la temperatura en el ducto sobrepasa un valor dado como dato (en el ejemplo se supuso 10 °C, esta cantidad puede, variarse a criterio del diseñador).

El caudal del aire refrigerante se da en m^3/s por metro de longitud del canal, y, es el caudal necesario para contrarrestar la elevación de la temperatura en el ducto y con ello tratar de restaurar la capacidad nominal de los cables.

V.2 EJEMPLO II

En este ejemplo se tratan cables de baja tensión (200 V).

Los datos correspondientes a dimensiones y características de las diferentes partes constitutivas de este tipo de cables fueron tomados de las referencias bibliográficas L11 , L12,L13 .

Para cables de baja tensión no se necesitan los siguientes datos , descritos en la sección (VI .2.1.1) :

TI DAE DAI DAPI DPI DF W TO VAR

Las tarjetas correspondientes a estos datos deben dejarse en blanco.

Los datos correspondientes a este ejemplo se dan en las hojas 113 , 114

El programa se corrió para ejecutar 10 cables por vez, sin embargo, se se desearan correr más de este número en una sola pasada del programa;debe hacerse lo siguiente:

- a. Colocar en el campo del número de cables (N) el valor deseado.
- b . Perforar todos los datos necesarios en número de 10 por tarjeta.

V.2.1 RESULTADOS DE SALIDA

Los resultados de salida del programa digital se dan en las hojas 118 119, 120 121 , 122 123. En las páginas 124 y 125 se da el programa utilizado.

En la siguiente tabla se comparan los valores de la capacidad nominal de cables en aire obtenida mediante el programa y la encontrada en tablas (Ref L11).

Tabla V.4

Capacidad nominal de cables		
AWG o KCM	Capacidad Programa (A)	Capacidad nominal tablas (A)
18	7	7
16	10	10
14	19	20
12	25	25
10	39	40
8	55	55
6	79	80
4	105	105
3	120	120
2	140	140
1	165	165
0	193	195
00	225	225
000	262	260
0000	300	300
250	340	340
300	376	375
350	419	420
400	457	455

Tabla V.4

Capacidad nominal de cables		
AWG o KCMil	Capacidad Programa (A)	nominal Tabla (A)
400	457	455
500	515	515
600	580	575
700	637	630
750	658	655
800	685	680
900	734	730
1000	788	780
1250	897	890
1500	984	980
1750	1079	1070
2000	1164	1155

La tabla 5.5 Compara el número de cables por ducto hallado mediante el programa digital y el encontrado en las tablas (Ref L11). El primer valor es el encontrado por el programa (+) y el segundo es el de tablas (++).

Tabla V.5

Número de cables por ducto															
Tamaño AWG o KCMil	Número de cables por ducto														
	Diámetro del ducto (cm)														
	1,27		1,91		2,55		3,18		3,82		5,09		6,37		
	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	
18	7	7	12	12	18	20	35	35	47	49	78	80	116	176	
16	5	6	10	10	15	17	29	30	40	41	67	68	102	98	
14	3	4	7	6	11	10	18	18	25	25	42	41	63	58	
12	3	3	5	5	9	8	14	15	20	21	33	34	50	50	
10	2	1	4	4	7	7	12	13	17	17	29	29	45	41	

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

VI.1 CAPACIDAD NOMINAL DE CABLES EN AIRE

El análisis hecho en la sección 3.1 explica la forma en que puede calcularse la corriente nominal de un cable que está instalado libremente en aire. De este estudio se concluye lo siguiente:

a. La corriente nominal de un cable depende de la máxima temperatura admisible del conductor la cual , a su vez , se toma de acuerdo a la vida útil que desee darse al cable , pues mientras mayor sea su valor aumentará el valor de la corriente para él designada con lo que se incrementará la potencia disipada en forma de calor y se estará acelerando el envejecimiento del cable ya que las cubiertas protectoras tenderán a destruirse.

b. La capacidad del cable depende del lugar a instalarse y del tipo de servicio que desee dársele ya que estos factores determinan la temperatura ambiente.

El valor de la temperatura ambiente no tiene un valor fijo por lo que deberá tomarse un promedio durante un tiempo suficientemente largo , como por ejemplo un año.

c. Mientras mayor sea el número de cables colocados juntos menor será la capacidad de cada uno de ellos , esto se debe a que se incrementa la temperatura del medio en el cual están instalados.

d. La resistencia del conductor afecta en forma inversa a la capacidad que éste puede conducir, esta es una consecuencia de la ley de Ohm ($I = V/R$ (A)) .

e. Mientras mayor valor tengan las resistividades térmicas de las capas de aislación y protección del cable menor será la corriente que un cable podrá conducir (F3.10). Debe recordarse que un menor valor de la resistencia térmica ayudará a evacuar mejor el calor generado en el cable . En la tabla 4.2 se dan algunos valores de dichas resistividades térmicas ; y , de ella se ve que el polietileno , el teflón, el caucho tienen valores bajos ; sin embargo, para escogerlos como aislantes debe tomarse en cuenta , además otros factores (rigidez dieléctrica , factor de pérdidas , resistividad , constante dieléctrica , etc .) .

Como se consideró que el cable está instalado libremente al aire debe evaluarse la resistencia térmica del aire (F3.14). La resistencia térmica del aire depende de la constante de radiación y convección (H) (estas formas de evacuación del calor tienen mayor importancia en esta disposición del cable).

El valor de (H) es bajo para superficies de color negro por lo cual este valor debe ser preferido en el diseño de las cubiertas exteriores del cable .

El valor del diámetro del cable es otro parámetro que influye en la resistencia térmica del aire, ya que , cuando el cable tiene una mayor superficie de disipación térmica su valor es menor.

Cuando la evaluación de la corriente nominal de un conductor se la hace debe tomarse en cuenta si éste se halla en contacto con superficies con el objeto de ver si aquellas influyen en el aumento de temperatura del cable; es esta la razón por la cual se recomienda que los cables se instalen en lugares de tamaño suficientemente grande y con buena ventilación de tal manera que la elevación de la temperatura en el medio no se incremente en forma notable .

Al diseñarse un cable de alta tensión debe evaluarse con la mayor precisión posible la corriente que puede conducir ya que si ésta fuera mayor de la que realmente puede hacerlo el cable tendería a destruirse al deteriorarse sus capas de protección.

VI.2 CAPACIDAD DE CABLES EN DUCTOS

Se consideró que los ductos son recintos cerrados cilíndri-

cos en los cuales se disponen los cables unos junto a otros tantos como la elevación de la temperatura en el ducto y el espacio físico lo permitan.

Se consideró como canal un recinto generalmente más grande que un ducto que tiene una forma rectangular, en cuyo interior se pueden disponer los cables ya sea directamente en el suelo, en las paredes mediante abrazaderas, en bandejas o en rejillas metálicas, de tal manera que el calor disipado no eleve la temperatura interior en forma excesiva.

El estudio de la capacidad de los cables en ductos y canales se basa en la elevación de la temperatura en su interior debida a la potencia disipada por aquellos cuando conducen carga eléctrica.

A los factores tomados en cuenta para calcular la capacidad nominal de los cables en aire deben agregarse los siguientes cuando éstos se disponen en ductos o canales:

Elevación de la temperatura en el ducto,
Perímetro del ducto o canal,
Corriente media geométrica del cable (función del tiempo de servicio continuo a plena carga (F3.35); o, de la curva de carga del cable (F3.34)),

De los resultados obtenidos del programa digital se obtienen

las siguientes conclusiones:

a. La capacidad de un cable en un ducto se reduce respecto a su valor nominal y esto se debe principalmente a la elevación de la temperatura en el ducto.

b. Mientras mayor sea el tiempo de funcionamiento continuo del cable a plena carga la capacidad del cable en un ducto o canal es menor (ya que a mayor tiempo de servicio las pérdidas en forma de calor son mayores).

c. Al calcular la corriente de un cable en un ducto debe considerarse la presencia de fuentes de calor cercanas al cable, ya que éstas incrementarían la temperatura del medio.

d. De los resultados obtenidos se observa que cuando la temperatura en el ducto se eleva en un valor cercano al del medio ambiente la capacidad del cable disminuye en un 30%. Para valores sobre 40 °C, de elevación de temperatura en el ducto, la capacidad del cable llega a tomar valores menores que el 50 % de su corriente nominal.

e. Al aumentar el diámetro del ducto el número de cables que pueden instalarse en él se incrementa.

VI.3 NÚMERO DE CABLES POR DUCTO

a. La elevación de la temperatura en el interior en el interior de un ducto o canal determina el número de cables que

con un factor de seguridad pueden instalarse en él.

b. El número de cables por ducto ,en forma aproximada, se cuadruplica al duplicarse el diámetro del ducto. Esta regla es válida cuando en el ducto de menor diámetro pueden instalarse más de un cable,

VI.4 CAUDAL DEL AIRE REFRIGERANTE

Puesto que para valores superiores a 30 % de la elevación de temperatura la corriente de un cable en un ducto disminuye a valores bajos se asumió , en el segundo ejemplo ,este valor para calcular el caudal de aire refrigerante para contrarrestar el efecto de aquella,y, restaurar de esta manera su capacidad nominal.

De acuerdo a la fórmula 3.37 , descrita en la sección III.2 , la corriente en un ducto tiene un valor igual a :

$$I_d = \sqrt{\frac{T_c - T_a - T_d - \Delta t_d}{T_c - T_a - T_d}} \quad (A)$$

De esta relación se tiene que el límite de conducción de corriente se obtiene cuando:

$$T_c - T_a - T_d = \Delta t_d \quad (^\circ C) \quad (F6.1)$$

es decir, que si la elevación de la temperatura en el ducto (Δt_d) llega a igualar a la elevación normal de temperatura

del conductor no se puede conducir corriente por el cable. Si la condición indicada en la fórmula 6.1 se cumple una posible solución es la ventilación forzada de aire en el ducto o canal.

APENDICE I
SUBROUTINA DE CONVERSION A GALGA AWG

Esta subrutina tiene por objeto hallar el número AWG o el tamaño KCM de un cable cuya sección en mm^2 se conoce. En el programa principal se calcula el valor de la sección en mm^2 teniendo como dato el diámetro interno del conductor (DCI).

Un diagrama de flujo correspondiente a esta subrutina se da en la figura I.1 .

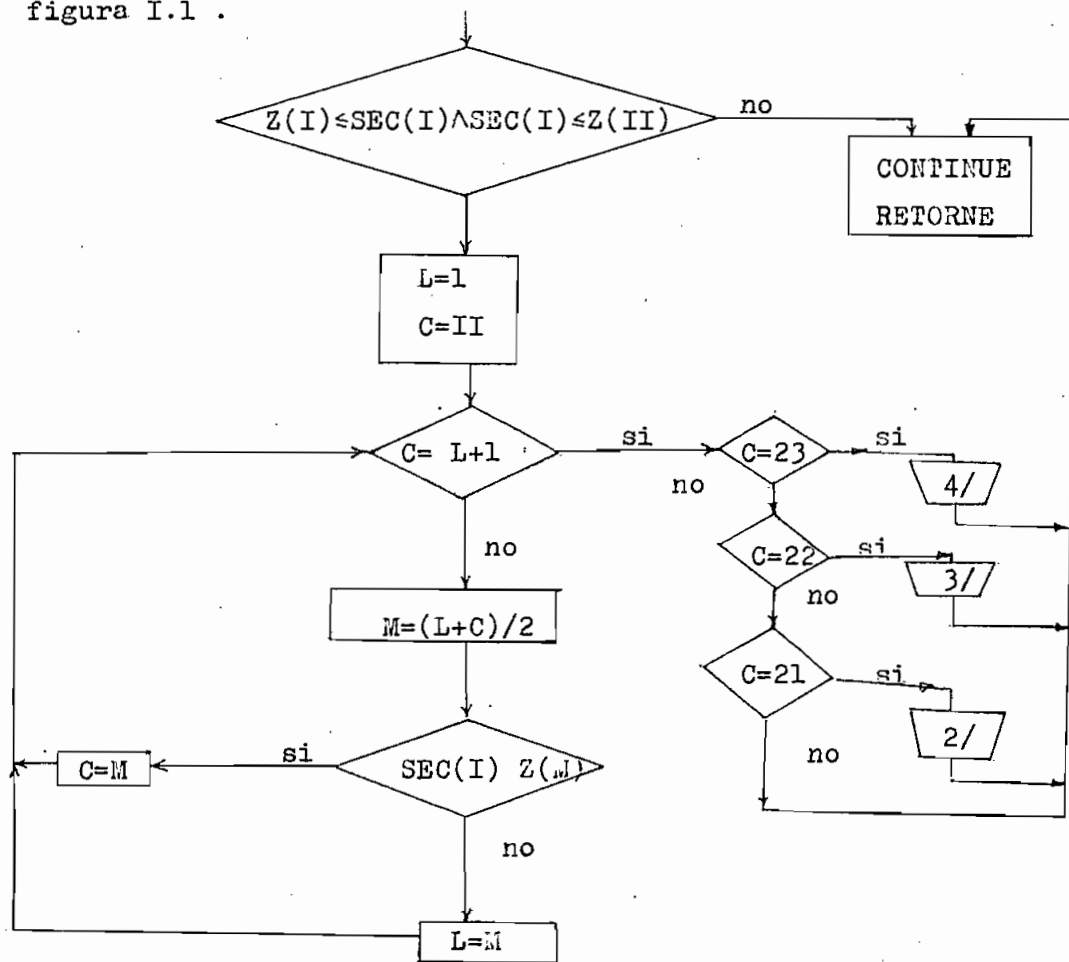


Fig 1.1

Diagrama de flujo para la subrutina de
conversión a galga AWG

La subrutina almacena 48 datos referentes a los cables desde el número 19 hasta los 5000 KCM.

Cuando el valor de C sea de 21 , 22 , o 23 se tratará de los cables # 2/0 , 3/0 , 4/0 .respectivamente .Para el valor de C igual a 1 el número del cable es 19 y para C igual a 48 es 5000 KCM.

Los datos para la sección de los cables en mm^2 se perforaron en formato (16 F5.0) y para los números AWG o tamaño KCM en formato (16 I5). Los valores correspondientes se dan en la tabla I.1 (Ref L13).

Tabla I . 1

AWG o KCM	Sección mm^2	AWG o KCM	Sección mm^2
19	0,65	5	16,8
18	0,82	4	21,2
17	1,04	3	26,6
16	1,31	2	33,6
15	1,65	1	42
14	2.1	0	53,5
13	2,6	00	67,7
12	3,3	000	85,2
11	4,2	0000	107,5
10	5,2	250	126
9	6,6	300	152
8	8,4	350	178
7	10,6	400	203
6	13,3	450	228

Tabla I.1

AWG o KCM	Sección mm ²	AWG o KCM	Sección mm ²
500	254	1250	633
550	278	1500	760
600	304	1750	887
650	329	2000	1013
700	355	2500	1276
750	380	3000	1250
800	405	3500	1773
850	431	4000	2027
900	456	4500	2280
1000	507	5000	2533

APENDICE 11

DESIGNACIONES DE DIVERSOS TIPOS DE CABLES

Los nombres de los diversos tipos de cables fueron tomados de la referencia bibliográfica L11.

Tabla 11.1

Designacion	Temperatura de Operación(°C)	Tipo
R	60	Aislamiento de goma
RH	75	Aislamiento de goma resistente al calor
RHH	90	Aislamiento de goma resistente al calor
RW	60	Aislamiento de goma resistente al calor y la humedad
RH-RW	60	Aislamiento de goma resistente al calor y la humedad
RHW	75	Aislamiento de goma resistente al calor y la humedad
RU	60	Aislamiento de latex
RUH	75	Aislamiento de latex resistente al calor
RUW	60	Aislamiento de latex resistente al calor y la humedad
T	60	Aislamiento termoplastico
TW	60	Aislamiento termoplástico resistente a la humedad
THW	75	Aislamiento termoplástico resistente al calor y la humedad
THWI	75	Aislamiento termoplástico resistente a la humedad y el calor
TA	90	Aislamiento termoplástico y amianto
TBS	90	Aislamiento termoplástico (trenza fibra exterior)
MI	85	Aislamiento mineral y funda metálica
SA	90	Aislamiento amianto-silicón
Y	85	Aislamiento de batista barnizado

Tabla II.1 (continuación)

Designación	Temperatura de Operación (°C)	Tipo
AVA	110	Aislamiento de amianto y batista barnizado
AVL	110	Aislamiento de amianto y batista barnizado
AVB	90	Aislamiento de amianto
A	200	Aislamiento de amianto
AA	200	Aislamiento de amianto
AI	125	Aislamiento de amianto
AIA	125	Aislamiento de amianto
	85	Aislamiento de papel
RF1 RF2	60	Aislamiento de goma (flexible)
FF1 FF2	60	Aislamiento de goma (flexible)
RFA1 RFA2	75	Aislamiento de goma (rígido)
FFA1 FFA2	75	Aislamiento de goma (flexible trenzado)
TF	60	Aislamiento termoplástico (rígido y trenzado)
TFF	60	Aislamiento termoplástico (flexible trenzado)
CF	90	Aislamiento de algodón
AF	150	Aislamiento de amianto
GF1 GF2	200	Aislamiento de goma y silicón
SFF1 SFF2	150	Aislamiento de goma silicón (flexible trenzado)

APENDICE III

ESPEJOR DEL AISLAMIENTO PARA ALAMBRES TIPOS :

T TW TBS

(datos proporcionados en CABLEC)

Tabla III

Tamaño del conductor	Espesor del aislamiento	
	mil	mm
14 - 10	30	0,76
8 -	45	1,14
6	60	1,52
4 - 2	60	1,52
1 - 4/0	80	2,03
213- 500	95	2,41
501 - 1000	110	2,79
1001 - 2000	125	3,17

APENDICE IV
EJEMPLO # 3

En los ejemplos dados en el capítulo V se calcula la capacidad de cables para un solo número determinado de ellos en un ducto de diámetro dado , en esta sección se evalúa la capacidad de diferentes números de cables en un mismo ducto, para lograr este objetivo debe perforarse en el campo correspondiente a VAR un número diferente de cero (campo F5.0).

Los datos para este ejemplo fueron los del correspondiente al # 1 . Se trabajó con el cable monopolar como muestra.