

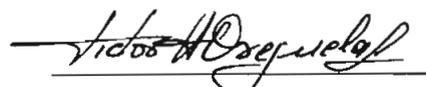
PROTECCION DE CABLES DE ALTA TENSION

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO  
ELECTRICO EN LA ESPECIALIZACION DE POTENCIA EN LA  
ESCUELA "POLITECNICA NACIONAL"



ROMULO IVAN CANTOS CASTILLO  
Quito, septiembre de 1983

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO FUE  
ELABORADO EN FORMA TOTAL POR EL SEÑOR  
IVAN CANTOS CASTILLO BAJO MI DIRECCION

  
ING. VICTOR OREJUELA

DEDICATORIA

A MIS PADRES Y HERMANOS  
DE QUIENES HE APRENDIDO  
LO MEJOR

A MARIA

MI ESPOSA, MI AMOR, MI AMIGA

IVAN

#### AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento al Sr. Ing. VICTOR OREJUELA, de quién fue tomado el presente trabajo de tesis, y por su ayuda prestada a lo largo del mismo.

Iván Cantos Castillo

## CONTENIDO

---

### CAPITULO I

1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Alcance.....	3
1.4	Descripción general de los cables de alto voltaje.....	4
1.4.1	Tensión nominal del cable.....	7
1.4.2	Grado de aislamiento de un cable.....	7
1.4.3	Nivel de aislamiento básico de un cable.....	7
1.4.4	Rigidez dieléctrica de un cable.....	7
1.5	Tipos de cables.....	9
1.5.1	Según su configuración.....	9
1.5.2	Según su campo eléctrico.....	9
1.5.3	Según su aislación.....	12

### CAPITULO II

2.0	Introducción.....	20
2.1	Parámetros de los cables.....	20
2.1.1	Impedancia de secuencia positiva y negativa....	20
2.1.2	Impedancia de secuencia cero.....	22
2.1.3	Capacitancia de los cables.....	25
2.1.4	Factor de pérdidas.....	28
2.2	Condiciones térmicas en estado estacionario....	30
2.2.1	Corriente permisible en un cable.....	31
2.2.2	Resistencia térmica del dieléctrico.....	34
2.2.3	Resistencia térmica del medio que rodea al cable.....	34
2.2.4	Cables en túneles no ventilados.....	37
2.2.5	Cables en túneles con ventilación forzada.....	39
2.3	Condiciones térmicas en estado transitorio....	40
2.3.1	Cortocircuito.....	40
2.3.2	Sobrecarga.....	43
2.3.2.1	Cable sin carga previa.....	45
2.3.2.2	Cable con carga previa.....	46

2.4	Conexión a tierra de las pantallas.....	47
2.4.1	Corrientes y voltajes en las pantallas.....	48
2.4.2	Conexión de un solo punto a tierra.....	52
2.4.3	Voltajes límites establecidos para las pantallas.....	53
2.4.4	Conexión para cables con longitudes largas.....	54
2.4.5	Conexión tipo transpuesta o "Cross bonding".....	54
2.4.6	Sobrevoltajes en las pantallas.....	56
2.4.7	Limitaciones de voltajes en las pantallas.....	57

CAPITULO III

3.1	Introducción.....	59
3.1.2	Características de los relés de protección.....	60
3.2	Protección contra sobrecargas.....	62
3.2.1	Relés térmicos directos.....	63
3.2.2	Relés térmicos secundarios.....	65
3.2.3	Corriente límite de desconexión.....	66
3.2.4	Selección de relés térmicos.....	67
3.3	Protección contra sobrevoltajes.....	67
3.3.1	El pararrayo.....	68
3.3.2	Selección de pararrayos.....	69
3.3.3	Efecto de un cable sobre el frente de onda.....	76
3.4	Protección contra cortocircuitos.....	77
3.5	Protección de sobrecorriente.....	78
3.5.1	Protección de sobrecorriente instantánea.....	80
3.5.2	Protección de sobrecorriente de tiempo definido.....	80
3.5.3	Protección por discriminación por corriente.....	82
3.5.4	Protección por discriminación de tiempo y corriente.....	83
3.5.5	Protección direccional.....	85
3.5.5.1	Relés direccionales y sus conexiones.....	85
3.5.6	Ajustes de relés de sobrecorriente.....	87
3.6	Protección diferencial.....	90
3.6.1	Protección diferencial longitudinal.....	91
3.6.2	Protección diferencial transversal.....	93

3.6.3	Ajustes de la protección diferencial.....	95
3.6.4	Protección por hilo piloto.....	96
3.6.5	Protección por corriente portadora.....	99
3.6.6	Protección por microondas.....	105
3.7	Protección de defectos a tierra en sistemas con neutro aislado.....	106
3.7.1	Detección de las puestas a tierra en los cables	107
3.8	Protección de distancia.....	109
3.8.1	Longitud mínima del cable a proteger.....	112
3.8.2	Ajustes de los relés de distancia.....	113
4.0	Resumen.....	115

#### CAPITULO IV

4.1	Descripción del sistema.....	116
4.2	Parámetros del cable.....	121
4.2.1	Conexión a tierra de las pantallas.....	121
4.2.2	Impedancia de secuencia positiva y negativa....	122
4.2.3	Impedancia de secuencia cero.....	124
4.2.4	Capacitancia.....	125
4.2.5	Impedancia característica.....	125
4.3	Condiciones de generación.....	126
4.4	Valores de cortocircuito.....	127
4.5	Selección de la protección contra corcocircuito	130
4.5.1	Protección principal.....	130
4.5.1.1	Ajustes de la protección.....	131
4.5.2	Protección de respaldo.....	135
4.5.2.1	Ajustes de la protección.....	137
4.5.3	Diagrama de las protecciones.....	139
4.6	Protección contra sobrevoltajes.....	140
4.6.1	Selección del pararrayo.....	140
4.6.2	Sobrevoltajes en las pantallas.....	150
4.7	Ventilación del túnel.....	152

#### CAPITULO V

	Conclusiones y recomendaciones.....	155
--	-------------------------------------	-----

Apendice A..... 155  
Apendice B..... 157  
Apendice C..... 162  
Referencias Bibliográficas..... 165

C A P I T U L O I

## 1.1

## I N T R O D U C C I O N

En los sistemas de potencia eléctrica, es cada vez más corriente el uso de cables que transporten energía a altas tensiones. Su uso se hace necesario por las siguientes razones:

- Por seguridad, ya que los cables ofrecen menos probabilidad de salir fuera de servicio que una línea aérea, conviene tener una idea de la frecuencia de incidencia de las fallas entre líneas aéreas y cables en un sistema de potencia, así tenemos que del total de fallas de un sistema, el 50% de las fallas ocurren en las líneas aéreas y solo el 10% ocurren en los cables (1).
- Actualmente existe una presión pública creciente para preservar las bellezas de las ciudades y zonas campestres, por lo que las líneas aéreas de alta tensión que podrían instalarse por razones económicas en esos lugares, son cambiadas por cables para el transporte subterráneo.
- La imposibilidad de usar líneas aéreas de alta tensión como sucede al transportar energía desde los generadores ubicados en cabernas, hasta los patios de las subestaciones ubicadas en el exterior, o al cruzar ríos de ancho considerable, obliga al uso de los cables de alta tensión.

Un cable de alta tensión, es un elemento importante dentro de un sistema de potencia como lo es un transformador o un generador, de ahí, que es importante realizar un estudio para su protección, ya que es un elemento de interconexión entre partes importantes del sistema; como ya se mencionó, en los cables las fallas ocurren con menor frecuencia que en las líneas aéreas, pero

la reparación de los daños que ocasionan, requiere mucho más tiempo y dinero que lo que se necesita para reparar - los daños debido a fallas en las líneas aéreas, las salidas de servicio del cable por destrucción, causará la suspensión del servicio de no existir otro camino de alimentación de energía.

Por las razones expuestas, conviene tener un mejor conocimiento de los cables y la manera de protegerlos.

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo, es el de realizar un estudio de los dispositivos de protección y su aplicación en la protección de los cables de alta tensión contra las fallas o anomalías que pueden presentarse en un sistema como son: sobrecargas, cortocircuitos y sobrevoltajes.

Para llevar a cabo este estudio, es necesario realizar una revisión de los parámetros de los cables y sus principales características.

El estudio de las fallas o anomalías que se presentan en el sistema, contribuyen a determinar cual dispositivo de protección es el más apropiado para la protección del cable en contra de una determinada falla o anomalía, que sin contar con la protección adecuada podría conducir a la destrucción del cable.

Debe entenderse que un dispositivo de protección no puede prevenir las fallas, solo puede actuar después que ésta se ha presentado. Sería muy conveniente que la protección pudiera anticipar y prevenir las fallas, pero obviamente esto es imposible, excepto cuando la causa origi-

nal de la falla produce alguna anomalía que haga funcionar un dispositivo de protección, como sucede con las sobrecargas. Las fallas más peligrosas para la integridad de los cables son el cortocircuito y el sobrevoltaje, ya que casi siempre causan la destrucción del cable por perforación del aislamiento.

### 1.3 ALCANCE

El presente trabajo está encaminado a realizar un estudio de la protección de los cables contra fallas o anomalías de carácter eléctrico, no abarca este estudio - la protección mecánica de éstos, como por ejemplo, contra esfuerzos electrodinámicos que se presentan en los cables - en el momento del cortocircuito, ni protección anticorrosión contra medios agresivos que afectan el aislamiento del cable, etc.

Se presenta un breve estudio del funcionamiento de los dispositivos de protección que servirán para la protección de los cables, éste estudio no se profundiza ya que éste no es el objetivo del trabajo.

El aislamiento en un cable es la parte más vulnerable del mismo, en la actualidad existen muchos materiales aislantes que se utilizan en los cables de alta tensión, un estudio minucioso de estos materiales sería un trabajo muy largo y no contribuiría en mayor grado el desarrollo del presente trabajo, por lo que en el capítulo 1 se realiza una descripción muy general de los cables.

Finalmente se realiza un ejemplo de aplicación en el cual se trata la protección de los cables de 230 KV. en aceite que conectarán la generación del Proyecto Pante Fase C ubicada en cabernas, con el patio de maniobras - de la subestación Molino ubicada en el exterior.

#### 1.4 DESCRIPCION GENERAL DE LOS CABLES DE ALTO VOLTAJE

La utilización de la energía eléctrica ha progresado en una forma acelerada que en la actualidad se necesita redes de interconexión con cable a tensiones superiores a los 60 KV.

Un problema fundamental en la tecnología actual, es el desarrollo de cables que no solo sean económicamente más atractivos sino, que físicamente puedan transportar las enormes potencias en uso actual y las que se proyectan para un futuro. La causa más normal de limitaciones de capacidad para transportar corriente en los cables, es la restricción de la elevación de temperatura del material aislante utilizado. En este capítulo se presenta un estudio de los cables más comunmente usados.

Se denomina cable en general, al conjunto formado por varios conductores cableados y adecuadamente aislados, casi siempre provistos de uno o más recubrimientos protectores, como se aprecia en la Fig. 1.1

El material conductor más generalmente usado es el cobre, pero también existe de aluminio, éste es más liviano y su costo es menor que el cobre, pero el volumen del aluminio es mayor entre secciones, para una misma resistencia, por lo que se requiere un mayor volumen de aislamiento, la mejor ventaja del cobre esta en ser mejor conductor que el aluminio.

Los parámetros del sodio (resistividad  $4.3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ . densidad  $0.97 \text{ g/cm}^3$ ) como material conductor indican que posee algunas ventajas sobre el cobre y el aluminio, además existe abundantemente en la corteza terrestre y se extrae de modo económico a partir del cloruro sódico por electrolisis. Para un valor nominal determinado de corriente, su

costo es menos de la mitad que si fuese de aluminio.

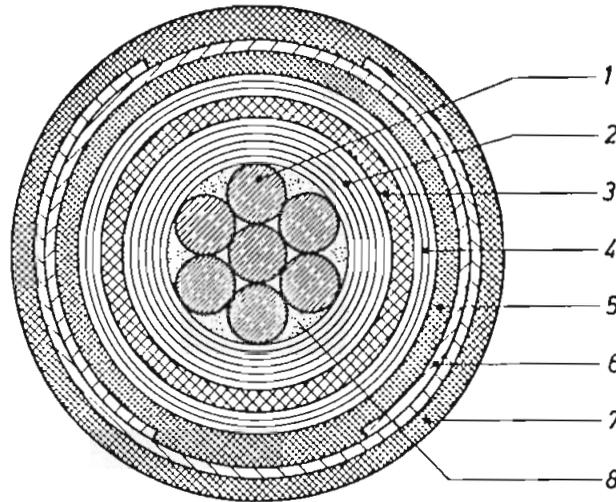


FIG. I.1 Sección transversal de un cable de alto voltaje unipolar de un cierto fabricante.

1. Conductor
2. Aislamiento
3. Envoltura metálica
4. Protección anticorrosión
5. Asiento de armadura
6. Armadura
7. Cubierta exterior
8. Relleno

Otras propiedades de interés son: Buena maleabilidad y ductilidad, obteniéndose gran flexibilidad cuando se encierra en aislamiento de polietileno. En el momento actual se han fabricado cables de sodio para tensiones de trabajo de hasta 15 KV. siendo el aislante de polietileno.

Las ventajas de costo y peso son tales que se ha otorgado una considerable importancia al empleo de conductores de sodio en los sistemas de distribución.

El aislamiento y el material de relleno constituyen los recubrimientos propiamente aislantes del cable, es decir, los que tienen por objeto evitar perforaciones a causa del campo eléctrico existente entre los conductores y entre estos y tierra.

Las pantallas de los cables, cuya función principal es mantener un campo electrostático radial a ser soportado por el dieléctrico, (además reducen la formación de corona al crear un campo eléctrico homogéneo) están constituidas por una fina capa conductora o semiconductor, aplicada en estrecho contacto con el aislamiento.

Las envolturas metálicas de los cables aisladas con sustancias higroscópicas (papel impregnado) están destinadas a evitar el paso de la humedad hasta estas sustancias cuya acción haría que perdieran sus propiedades aislantes. Generalmente, estas envolturas son de metal blando (plomo, aluminio, etc. ).

El papel aceitado constituye la protección anticorrosión, sobre esta protección anticorrosiva se aplica el asiento de armadura que puede estar constituido por una capa de fibras impregnadas con alquitranes, por cintas de papel crespado o por una funda de material termoplástico.

Las armaduras metálicas de metal duro (hierro, acero, etc.), están destinadas a proteger el cable contra las acciones mecánicas exteriores. Las cubiertas exteriores protegen contra los peligros de corrosión y otros agentes externos, recubren exteriormente al cable y están constituidas por materiales textiles, derivados del caucho, sustancias termoplásticas, etc.

Las siguientes definiciones sirven para indicar las características de funcionamiento, posibilidades

de utilización, condiciones de ensayo y condiciones límites. En lo que se refiere al funcionamiento del cable se puede definir los siguientes conceptos.

#### 1.4.1 TENSION NOMINAL DEL CABLE

Es la tensión nominal a frecuencia industrial para la cual el cable ha sido construido y a la cual debe poder funcionar continuamente en condiciones normales de servicio.

La tensión nominal del cable se designa por dos valores que corresponden respectivamente, a la tensión entre cada uno de los conductores y la pantalla ( $E_0$ ), y la tensión entre dos cualesquiera de los conductores ( $E$ ).

#### 1.4.2 GRADO DE AISLAMIENTO DE UN CABLE

Es una designación empírica que tiene en cuenta las características constructivas y de prueba de un cable. Su valor coincide con el valor de la tensión de prueba a frecuencia industrial al cual se somete al cable, expresado en KV.

#### 1.4.3 NIVEL DE AISLAMIENTO BASICO DE UN CABLE

Es también una designación empírica que tiene en cuenta las características constructivas y de prueba del cable en relación a posibles sobretensiones de origen atmosférico. Es un valor de referencia para la resistencia del aislamiento al impulso, expresado en términos del valor de cresta de la tensión permisible al impulso de rayo normalizado.

#### 1.4.4 RIGIDEZ DIELECTRICA DE UN CABLE

Es el cociente entre la tensión de perforación (valor de la tensión previa a la disrupción) o tensión disruptiva ( $E_d$ ) y la distancia ( $d$ ) que es el espesor del aislamiento, así tenemos que:

$$\mathcal{E} = E_d / d$$

se mide en KV/mm o en KV/cm, y se trata por lo tanto de una intensidad de campo eléctrico.

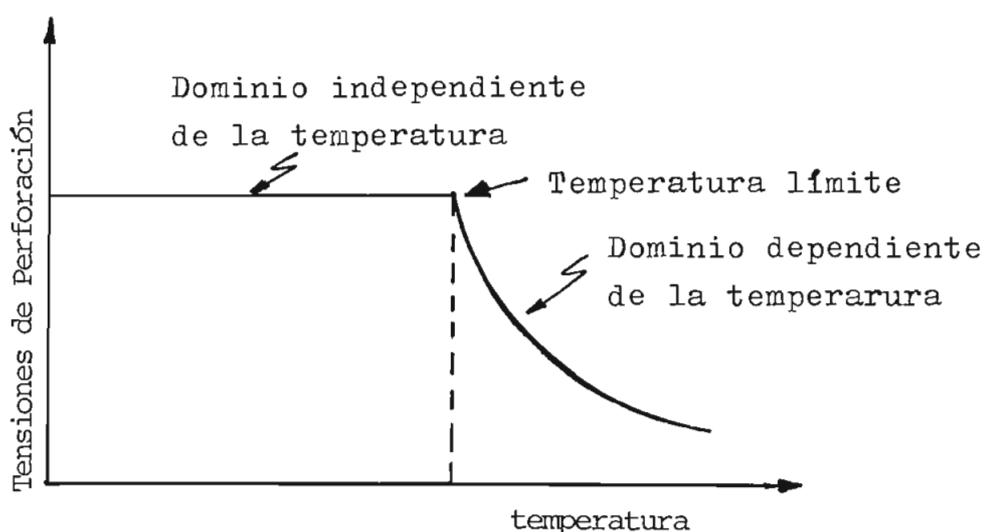


FIG. 1.2 Curva de la tensión de perforación de un dieléctrico en función de la temperatura.

Hasta cierta temperatura la rigidez dieléctrica es independiente de la temperatura hasta un valor límite, por encima de este límite ésta influye mucho en el valor de la rigidez dieléctrica que disminuye rápidamente si aumenta la temperatura, como se aprecia en la figura 1.2

Se habla de perforación eléctrica de un aislante, cuando la descarga disruptiva se produce por debajo del valor de la temperatura límite, en cuyo caso, la perforación es debida exclusivamente a la tensión aplicada.

Cuando la perforación se produce por encima de la temperatura límite, se denomina perforación electrotérmica.

## 1.5 TIPOS DE CABLES

Los cables de alta tensión se pueden clasificar de acuerdo a su configuración, campo eléctrico y aislación.

Tipos de cables	[	Según su configuración	[	Unipolar
				Multipolar
		Según su campo eléctrico	[	De campo radial
				De campo no radial
		Según su aislación	[	Aceite
				Gas
				Aislamiento sólido

### 1.5.1 SEGUN SU CONFIGURACION

Los cables de acuerdo a su configuración se dividen en unipolares y multipolares.

Los cables unipolares están constituidos por un solo conductor, con el correspondiente aislamiento y los recubrimientos protectores necesarios.

Los cables multipolares están constituidos por dos o más conductores independientes, incluyendo los eventuales conductores de neutro y de protección, cada conductor lleva su propio aislamiento, pantallas electrostáticas y recubrimientos protectores contra la corrosión, efectos químicos, eventuales esfuerzos mecánicos, etc.

### 1.5.2 SEGUN EL CAMPO ELECTRICO

Existen cables de campo radial y no radial. En un cable las líneas de fuerza del campo electrostático tie

nen el aspecto representado en la figura 1.3 , es decir se trata de un campo radial establecido entre el conductor y la envoltura metálica exterior o pantalla. Por lo tanto, los esfuerzos eléctricos a este campo electrostático solo son soportados por el aislamiento del conductor.

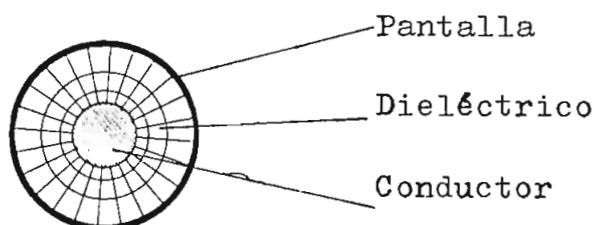


FIG. 1.3 Campo radial de un cable unipolar

En un cable tripolar, atravesando una corriente trifásica, con aislamiento conjunto de los tres conductores, el campo electrostático tiene la forma representada en la figura 1.4, ya no es un campo radial, sino que cada línea de fuerza tiene dos componentes, una tangencial y la otra perpendicular al aislante común. Esta desigualdad en la línea de fuerza es debida a que los potenciales existentes entre cada uno de los conductores y la pantalla no son simultáneamente iguales, debido al desfase existente en todo sistema trifásico, por ejemplo, si en un momento dado la tensión existente entre el conductor A es  $+E$ , la tensión existente en cada uno de los conductores B y C será precisamente  $-E/2$ . La capa existente común soporta perfectamente el esfuerzo eléctrico de la componente perpendicular, pero los esfuerzos debidos a la componente tangencial son soportados por la masa de relleno existente entre los tres conductores, la cual tiene una resistencia de perforación mucho menor que la del aislamiento, como consecuencia existe un riesgo de perforación. Los cables de campo no radial tienen aplicación solamente hasta tensiones de 15 KV. Un cable debería estar solicitado solamente en sentido perpendicular a la capa aislante, para lo que sobre la capa aislante de

cada conductor, se envuelve una banda de papel metalizado, o bién una finísima hoja metálica, lo que constituyen las pantallas como se aprecia en la figura 1.5, éstas deben - ponerse a tierra, para lo que el conjunto se envuelve en - una cinta de algodón tejida con algunos hilos de cobre, que aseguran el contacto eléctrico entre las capas metalizadas individuales y la envoltura metálica exterior la cual se po ne directamente a tierra.

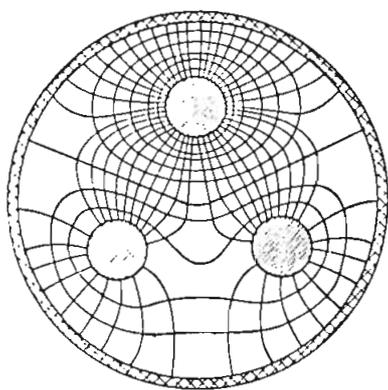


FIG. 1.4 Campo no radial de un cable tripolar no apantallado.

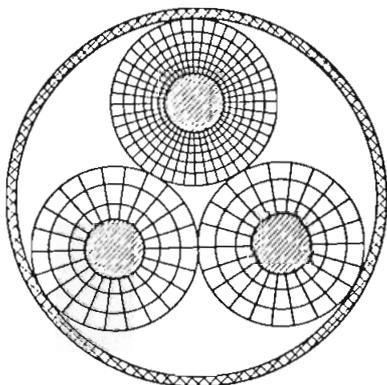


FIG. 1.5 Campo radial de un cable tripolar apantallado

### 1.5.3 SEGUN SU AISLACION

Existe una gran variedad de materiales aislantes para cables de alta tensión, se tratarán a continuación los aislantes que son de mayor uso.

Uno de los problemas que se presentan en los cables de alta tensión, es que, al aumentar la corriente de carga la temperatura aumenta, la masa de impregnación se dilata y ejerce una presión sobre la pantalla, ya que ésta tiene menor coeficiente de dilatación que la masa de impregnación. Al disminuir la corriente de carga, la temperatura en el conductor disminuye y la masa de impregnación se contrae, mientras que la pantalla que es prácticamente inelástica permanece extendida, el volumen exterior a la pantalla es mayor en relación al que tenía con las condiciones iniciales, y en el vacío que queda entre la envoltura metálica o pantalla y los aislamientos, puede introducirse aire con producción de ozono, lo cual puede conducir al deterioro del aislamiento.

Además sucede, que si los dos extremos del cable están situados a diferente nivel, la dilatación de la pantalla hace que la masa aislante de impregnación se deslice hacia el extremo inferior, con lo cual se tiene un empobrecimiento del aislamiento en la zona más elevada.

En los cables de alta tensión es de primordial importancia evitar la formación de vacíos, o si tal cosa no es posible, por lo menos hay que impedir que en éstos vacíos se produzcan fenómenos de ionización, para esto se han encontrado dos soluciones generales, que son los cables de aceite y gas a presión.

Cables de aceite a presión.- En estos cables, para el relleno de los vacíos que puedan producirse entre el aislamiento de papel impregnado y la en

voltura metálica, no se emplea masa de impregnación sino un aceite fluido a la temperatura normal que por diversos métodos puede inyectarse a presión.

Existen cables de aceite a baja y alta presión. En los cables de aceite a baja presión, se inyecta el aceite a una presión inferior a  $3 \text{ Kg/cm}^2$  para condiciones normales y puede aumentarse la presión a  $5 \text{ Kg/cm}^2$ .

Al calentarse el cable, el aceite se dilata y puede pasar a unos depósitos de expansión, distribuidos uniformemente a lo largo del cable. Estos cables se emplean para tensiones superiores a 60 KV. y puede ser interesante su aplicación a tensiones inferiores a la citada.

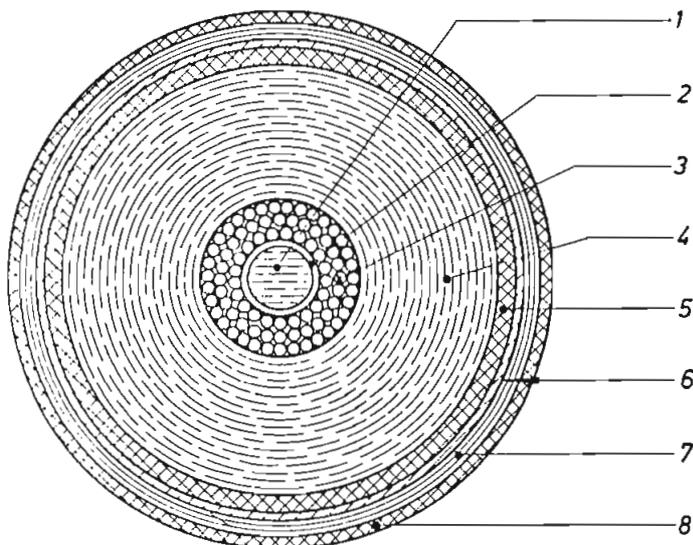


FIG. 1.6 Corte transversal de un cable unipolar fluido a baja presión para tensiones de servicio de hasta 220 KV.

1. Canal central de aceite
2. Espiral de cobre flexible
3. Conductor
4. Aislamiento (papel poroso impregnado de aceite fluido a presión)

5. Envoltura metálica
6. Armadura no magnética
7. Protección anticorrosiva
8. Cubierta exterior

El aceite debe ser previamente filtrado y - desgasificado e inyectado al vacío en el cable. En el caso de muy altas tensiones no basta con el canal central y se - tiene otro canal suplementario bajo la cubierta metálica.

Para tensiones superiores a 220 KV, hay que tener presiones superiores, del orden de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ , y procediendo con una fabricación cuidadosa es posible obtener - cables para tensiones de servicio de 400 KV.

Los cables de aceite a altas presiones son también conocidos como cables de presión exterior o cables oleostáticos. Están constituidos por cables macizos con - aislamiento de papel impregnado colocados en el interior de un tubo de acero. Al instalar el cable en el tubo de acero, se le retira una protección de plomo de que está provisto - temporalmente. Cuando el cable está instalado, se hace el - vacío en el sistema de tuberías, introduciendo el aceite a  $14 \text{ Kg/cm}^2$  de presión.

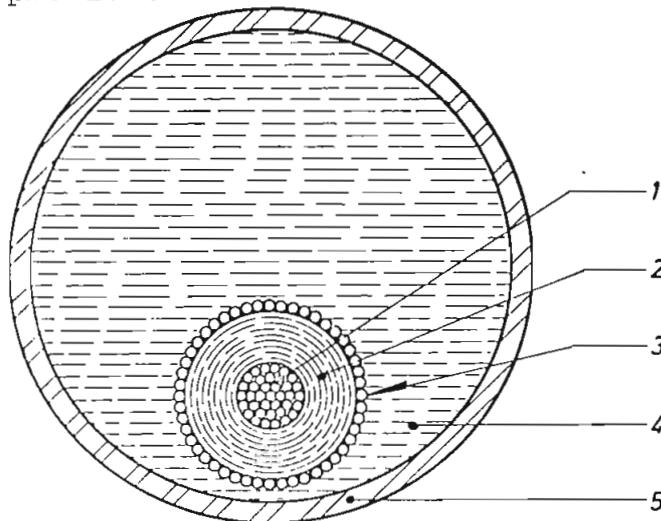


FIG. 1.7 Sección transversal de un cable de aceite fluido a alta presión.

1. Conductor
2. Aislamiento (papel poroso impregnado de aceite fluido a presión)
3. Envoltura metálica
4. Aceite fluido a alta presión
5. Tubo de acero

Estos tipos de cables admiten corrientes de carga más elevadas y no están sometidos a limitaciones de temperatura como en los cables convencionales. Los cables de aceite a presión suelen admitir sobretemperaturas de servicio de 60 y 80 °C. sobre la temperatura ambiental, los convencionales no pueden pasar de una sobretemperatura de 25 °C por lo tanto, para una misma sección, los cables de aceite a presión soportan una corriente de 50% mayor que los cables convencionales. (2).

Cables de gas a presión.- En estos cables se inyecta sobre el aislamiento un gas inerte a presión (generalmente nitrógeno), comparados con los de aceite a presión, tienen la ventaja de no necesitar depósitos de expansión.

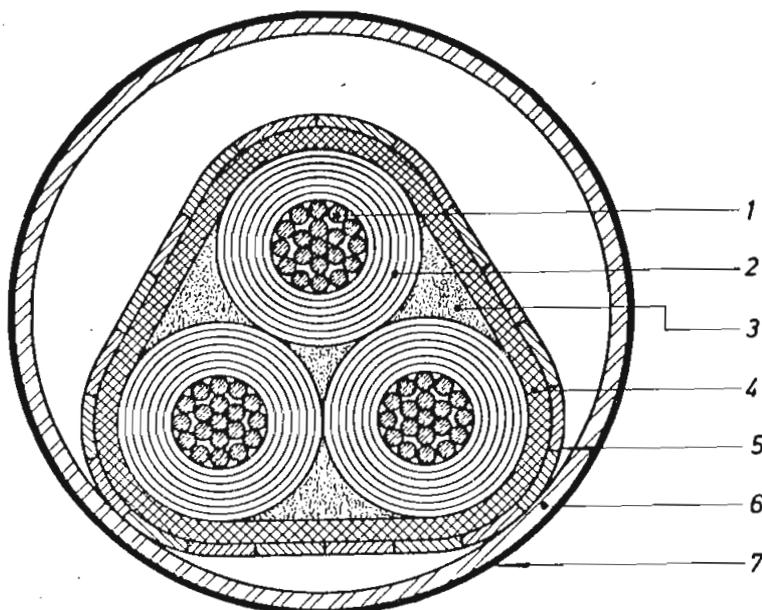


FIG. 1.8 Sección transversal de un cable tripolar de gas de presión exterior.

1. Conductor
2. Aislamiento
3. Relleno
4. Envoltura metálica
5. Armadura
6. Tubo de acero
7. Protección anticorrosión

Los cables de gas de presión interior se emplean para tensiones de servicio de hasta 225 KV. Consisten en cables con aislamiento de papel impregnado arrollado de forma especial y bajo una envoltura metálica; sobre el dieléctrico se inyecta directamente el gas a una presión de 15-kg/cm<sup>2</sup>.

En los cables de gas a presión exterior, se introducen los cables con aislamiento de papel impregnado - en un tubo de acero en el que se inyecta el gas a la presión de 14 a 15 kg/cm<sup>2</sup>, ya que esta presión, actuando desde el exterior sobre el aislamiento, impide la formación de espacios vacíos.

① Cables con aislamiento sólido.- Existen algunas variedades de aislamientos sólidos utilizados en cables de alto voltaje, así tenemos siliconas, fluorocarbonos, polietileno, caucho con etileno y propileno (EPR), etc.

- a) Caucho.- Los cables basados especialmente en caucho no son muy resistentes al agua, tienen una excelente flexibilidad pero es afectado por el ozono generado por las descargas en la superficie (corona), se lo usa en cables para instalaciones bajo los 24 KV en lugares secos.
- b) Butyl.- Es resistente al agua, al ozono, al calor, con altas temperaturas (sobre los 85 C) y en lugares hú -

medos las propiedades del butyl cambian muy lentamente. Aplicaciones típicas de cables con aislamiento de butyl son encontrados en distribución, plantas industriales, etc.

- c) Polietilenos.- Estos dieléctricos tienen excepcionalmente bajas pérdidas dieléctricas, pero se ablandan con temperaturas cercanas a  $110^{\circ}\text{C}$ . , son resistentes al agua y a otros elementos químicos incluyendo al ozono y son muy sensitivos a la descarga por corona. Son usados en cables de distribución para instalaciones residenciales subterráneas y son también aceptados para cables submarinos de potencia con voltajes sobre los 28 KV., la desventaja es que las uniones o empalmes resultan problemáticos.
- d) Cables con aislamiento EPR.- Ninguno de los dieléctricos está libre de deficiencias, es decir no existe un dieléctrico perfecto, pero podría desarrollarse en el futuro, sin embargo el EPR presenta algunas ventajas para el uso en cables de alto voltaje. Su fabricación es a base de caucho saturado con cantidades precisas de etileno y propileno. Es muy conocido que el caucho saturado es muy resistente al deterioro y es extremadamente resistente a agrietarse con la presencia de ozono y es muy resistente a la oxidación.

El EPR tiene una alta resistencia a la compresión y fracturación, además es muy flexible, ésta combinación de flexibilidad y antifracturación lo hace fácilmente maniobrable para la instalación, incluso bajo condiciones adversas. (3).

El EPR tiene muy poca expansión con el cambio de temperatura como se aprecia en la figura 1.9, puede soportar el EPR temperaturas del conductor de -

90 °C. para operación normal, 130 °C. para condiciones de emergencia y 250 °C. para condiciones de cortocircuito (4).

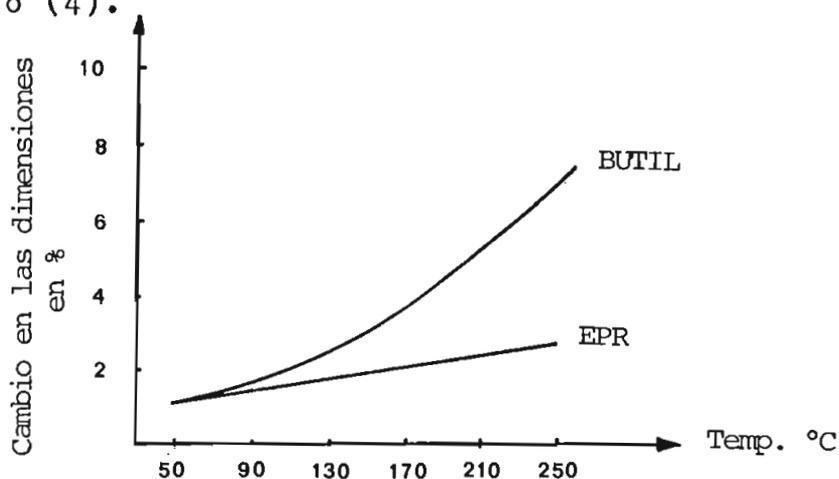


FIG. 1.9 Características de expansión del EPR y butyl

Sus mejores propiedades son:

1. Gran resistencia al agua y a la oxidación
2. Bajas pérdidas dieléctricas
3. Alto poder dieléctrico incluso a 125 °C. de temperatura del conductor.
4. Gran resistencia al ozono
5. Gran flexibilidad
6. Muy buena adhesión con elementos de empalme

El EPR es uno de los mejores dieléctricos sólidos disponibles en la actualidad para cables de alto voltaje comprendidos entre 28 y 138 KV.

e) Cables con aislamiento XLP.- Los cables con aislamiento XLP (cross-linked polyethylene) tienen algunas características similares a los cables con aislamiento EPR. Estos dos tipos de aislantes son los mejores hoy en día. Los rangos de temperatura del XLP son los mismos que el EPR, es decir:

- Para condiciones normales 90 °C.
- Para condiciones de emergencia 130 °C.

- Para requerimientos de cortocircuito 250 °C.

El XLP posee pérdidas dieléctricas muy bajas, su factor de potencia es extremadamente bajo (0.05 %) es un dieléctrico inherentemente rígido y los trabajos de empalme son muy dificultosos, posee gran resistencia a los productos químicos y es muy resistente al agua (5).

Observando la figura 1.10 se puede concluir que este dieléctrico sufre un cambio rápido en sus dimensiones con el aumento de la temperatura. Este tipo de aislamiento se usa para cables de hasta 138 KV (6).

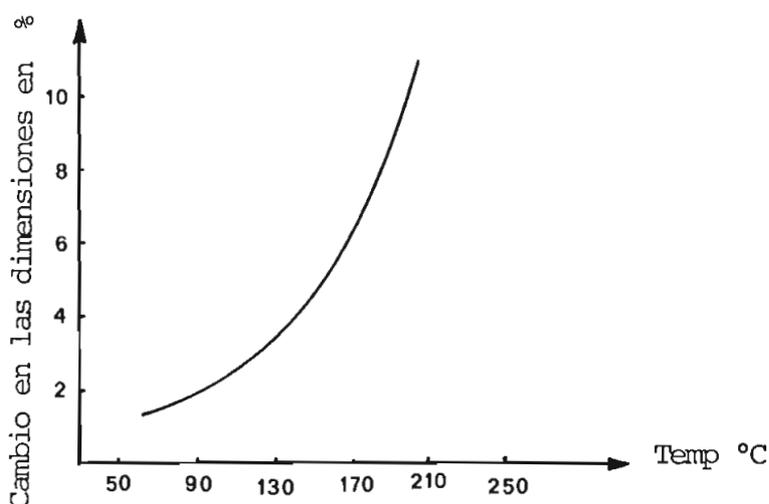


FIG. 1.10 Características de expansión del XLP.

C A P I T U L O    I I

## 2.0 INTRODUCCION

En este capítulo se trata primeramente los parámetros eléctricos de los cables más comunmente necesarios, para el cálculo de los diferentes valores que son de interés para la protección de los cables, como por ejemplo, las impedancias de secuencia para el cálculo de cortocircuitos aplicando las componentes simétricas.

Las conexiones adoptadas para las pantallas presentan variaciones en la reactancia y resistencia del conductor del cable, por este motivo se presenta también un estudio de las conexiones más usuales para las pantallas.

Las características térmicas de los cables, así como de los métodos de instalación adoptados (túneles, enterrados directamente, etc.), son de interés general y han sido incluidas en este capítulo a manera de información y - deben ser muy analizadas cuando se trate la selección de los cables.

## 2.1 PARAMETROS DE LOS CABLES

Los parámetros eléctricos de un cable, son muy diferentes a los de una línea aérea, por ejemplo, la inductancia de un cable es mucho menor a causa de las pequeñas distancias entre los conductores, su orden de magnitud es de tres a cinco veces menor. Por el contrario, y debido a la misma causa, la capacitancia de un cable es de trece a veinte veces mayor que una línea aérea. Las distintas formulas presentadas para el cálculo de los parámetros han sido obtenidos de la referencia 1.

### 2.1.1 IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA

La resistencia y reactancia efectiva total

$R_e$  y  $X_e$  a la corriente de secuencia positiva y negativa incluyendo el efecto de la corriente por las pantallas al estar éstas conectadas es: (ver 2.4.1 corrientes y voltajes - en las pantallas).

$$R_1 = R_2 = R_e = R_c + R_p \frac{W^2 M^2}{R_p^2 + W^2 M^2} \quad (2.00)$$

$$X_1 = X_2 = X_e = W L_c - \frac{W^3 M^3}{R_p^2 + W^2 M^2} \quad (2.01)$$

y en donde

$$L_c = 0.2 \ln \frac{DMG}{RMG} \quad \text{mH/Km.} \quad (2.02)$$

con:

DMG = Distancia media geométrica

RMG = Radio medio geométrico del conductor

$L_c$  = Inductancia del conductor

M = Inductancia mutua entre el conductor y la pantalla

$R_1$  y  $R_2$  = Resistencia de secuencia positiva y negativa respectivamente.

$X_1$  y  $X_2$  = Reactancia de secuencia positiva y negativa respectivamente.

$R_c$  = Resistencia del conductor

$R_p$  = Resistencia de la pantalla

La corriente que fluye por la pantalla al estar éstas conectadas a tierra en los dos extremos, produce un campo magnético el cual es inverso al causado por la corriente en el conductor. La reactancia en cada conductor es entonces reducida por un:

$$\Delta X = - \frac{W^3 M^3}{R_p^2 + W^2 M^2} \quad (2.03)$$

y la resistencia de cada conductor incrementada por:

$$\Delta R = R_p \frac{W^2 M^2}{R_p^2 + W^2 M^2} \quad (2.04)$$

Si no fluye corriente por las pantallas -  $\Delta R$  y  $\Delta X$  son cero.

Para cables tripolares los efectos de la corriente que fluye por la pantalla son despreciables y la impedancia de secuencia positiva y negativa puede ser calculada con:

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j W L_c \quad (2.05)$$

### 2.1.2 IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO

La impedancia de secuencia cero de los cables ( $Z_0$ ) no es un parámetro fijo, puesto que no solo depende del tamaño del cable, sino también de las condiciones del ambiente, cables corriendo en paralelo, tuberías de agua o gas, es decir materiales conductores cercanos al cable invlucrado. Estas son las razones por las cuales la impedancia de secuencia cero de los cables no puede ser calculada con la suficiente precisión.

Cuando la naturaleza de los materiales conductores cercanos al cable no es conocida, puede obtenerse resultados precisos solamente por pruebas de campo, incluso si una medida es hecha hoy día, ésta variará cuando exista cambios en los materiales conductores cercanos al cable. - Sin embargo, cuando los elementos conductores ya mencionados que influyen en la determinación de  $Z_0$ , no son de importancia, ésta puede ser calculada en base a las siguientes consideraciones (2).

Cuando fluye la corriente de secuencia cero ( $I_0$ ) a lo largo de los conductores de un cable, ésta debe - retornar por tierra o por la pantalla o en combinación en - paralelo por ambas.

Como la corriente de secuencia cero fluye - por cada conductor, encuentra la resistencia de ese conduc- tor, y como retorna por tierra o por la pantalla encuentra la resistencia de esas partes, así tenemos que, para un ca- ble tripolar  $Z_0$  es:

$$Z_0 = Z_c - \frac{Z_m^2}{Z_s} \quad (2.06)$$

con

$$Z_c = R_c + R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \text{Ln} \frac{D_e}{\text{RMG}_{3c}} \quad \Omega / \text{KM.}$$

$$Z_s = 3 R_p + R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \text{Ln} \frac{2 D_e}{r_o + r_i} \quad \Omega / \text{Km.}$$

$$Z_m = R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \text{Ln} \frac{2 D_e}{r_o + r_i} \quad \Omega / \text{Km.}$$

Si la corriente retorna por tierra solamen- te, tenemos:

$$Z_0 = Z_c \quad (2.07)$$

Si la corriente retorna por la pantalla tenemos:

$$Z_0 = R_c + 3 R_p + j 0.2275 \frac{f}{60} \text{Ln} \frac{r_o + r_i}{2 \text{RMG}_{3c}} \quad \Omega / \text{Km.}$$

con

(2.08)

$$\text{RMG}_{3c} = \sqrt[3]{\text{RMG}_{1c} d^2}$$

Donde

$d$  = Distancia entre centros de los conductores (mm)

$RMG_{1c}$  = Radio medio geométrico de un conductor individual

$R_c$  = Resistencia ac de un conductor ( $\Omega/Km$ )

$R_e$  = Resistencia ac del retorno por tierra ( $\Omega/ Km$ ) (tabla.2.1)

$D_e$  = Distancia equivalente del retorno por tierra ( $\Omega/Km$ )  
(tabla 2.1)

$R_p$  = Resistencia de la pantalla ( $\Omega/Km$ )

$r_o$  = Radio exterior de la pantalla (mm)

$r_i$  = Radio interior de la pantalla (mm)

La impedancia de secuencia cero para conductores monopolares, difiere en algunos aspectos respecto de los tripolares, así tenemos que:

$$Z_o = Z_c - \frac{Z_m}{Z_s} \quad (2.09)$$

con

$$Z_c = R_c + R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{D_e}{RMG_{3c}} \quad \Omega/Km.$$

$$Z_m = R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{D_e}{DMG_{3c-3s}} \quad \Omega/ Km.$$

$$Z_s = R_p + R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{D_e}{RMG_{3s}} \quad \Omega/Km.$$

$$RMG_{3c} = \sqrt[3]{RMG_{1c} DMG_{3c}^2}$$

$$RMG_{3s} = \sqrt[3]{\frac{r_o + r_i}{2} DMG_{3c}^2}$$

$$DMG_{3c-3s} = \sqrt[9]{\frac{r_o + r_i}{2}^3 DMG_{3c}^6}$$

Si la corriente retorna solamente por la -  
pantalla tenemos:

$$Z_o = Z_c + Z_s - 2 Z_m \quad (2.10)$$

Si la corriente retorna solamente por -  
tierra tenemos:

$$Z_o = Z_c \quad (2.11)$$

donde

$DMG_{3c}$  = Distancia media geométrica entre conductores.

TABLA 2.1

Resistividad de tierra ( $\Omega - m$ )	Profundidad equi- valente del retor <u>o</u> no por tierra $D_e$ (mm)	(m)	Resistencia equivalente de tierra $R_e$ ( $\Omega/Km$ )	Reactancia equivalente de tierra $X_e$ ( $\Omega/Km$ )
1	$8.53 \cdot 10^4$	85.36	0.178	1.28
5	$18.9 \cdot 10^4$	189.02	0.178	1.46
10	$2.69 \cdot 10^5$	268.3	0.178	1.54
50	$6.09 \cdot 10^5$	609.7	0.178	1.72
100	$8.53 \cdot 10^5$	853.6	0.178	1.8
500	$18.9 \cdot 10^5$	1890.2	0.178	1.98
1000	$2.69 \cdot 10^6$	2682.9	0.178	2.06
5000	$6.09 \cdot 10^6$	6097.5	0.178	2.25
10000	$8.53 \cdot 10^6$	8536.6	0.178	2.33

### 2.1.3 CAPACITANCIA DE LOS CABLES

La capacitancia de los cables monopolares -  
se puede calcular de la siguiente manera.

$$C = \frac{q}{V}$$



$$V = \int_r^R E \, dx$$

$$V = \int_r^R \frac{q}{2\pi K x} \, dx$$

$$V = \frac{q}{2\pi K} \operatorname{Ln} \frac{R}{r}$$

$$C = \frac{q}{\frac{q}{2\pi K} \operatorname{Ln} \frac{R}{r}}$$

$$C = \frac{2\pi K}{\operatorname{Ln} \frac{R}{r}}$$

$$K = K_r K_0$$

$$K_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ fd/m.}$$

$$C = \frac{2\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} K_r}{\operatorname{Ln} \frac{R}{r}} \text{ fd/m.} \quad (2.12)$$

donde

R = Radio externo del dieléctrico

r = Radio interno del dieléctrico

K<sub>r</sub> = Permitividad relativa del dieléctrico (constante dieléctrica).

Tabla 2.2 Constantes dieléctricas de diferentes materiales

Dieléctrico	Rango de K <sub>r</sub>	Valor típico
Papel	3.0 - 4.0	3.7
Aceite	3.0 - 4.0	3.5
Gas	3.0 - 4.0	3.7
Caucho	4.0 - 9.0	6.0
P.V.C	5.0 - 8.0	6.3

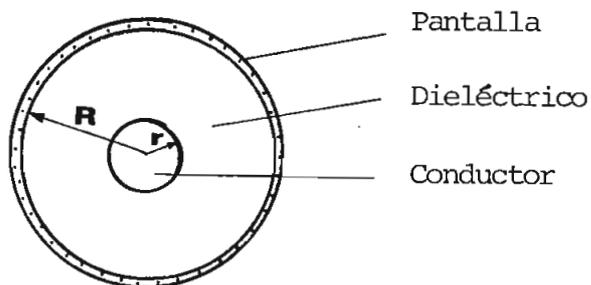


FIG. 2.1 Corte transversal de un cable monopolar.

Para cables tripolares, con pantalla individual la capacitancia de cada conductor se calcula como si se tratara de un cable monopolar, entonces se hace uso de la fórmula anterior (2.12).

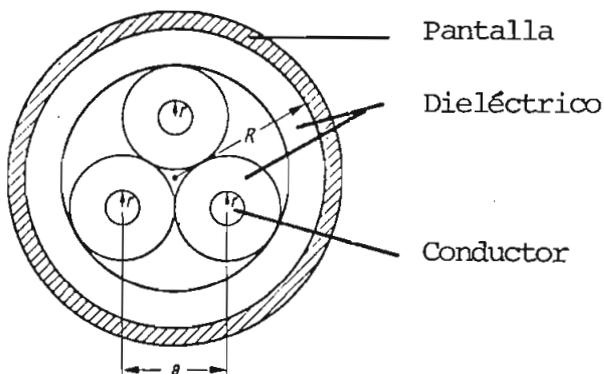


FIG. 2.2 Corte transversal de un cable tripolar con pantalla común.

Para cables tripolares con pantalla común, la capacitancia de los cables se puede calcular en base a la siguiente ecuación (3)

$$C = \frac{0.11 Kr}{\ln \frac{a^2 (3 R^2 - a^2)^3}{r^2 (27 R^6 - a^6)}} \quad \text{uf/Km} \quad (2.13)$$

donde

$R$  = Radio interno de la pantalla

$a$  = Distancia entre conductores

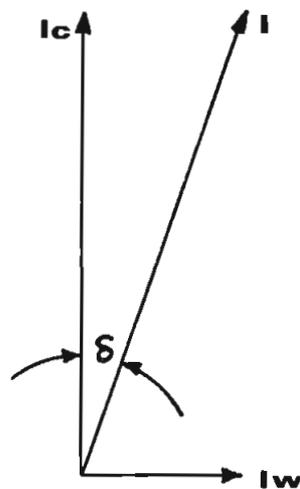
$r$  = Radio del conductor.

En todos los casos, la capacitancia de se -  
cuencia positiva negativa y cero es la misma que la capaci-  
tancia de un conductor, entonces se cumple que:

$$C = C_0 = C_1 = C_2$$

#### 2.1.4 FACTOR DE PERDIDAS

En la corriente capacitiva de carga de un -  
condensador, aparece siempre una componente activa  $I_w$  de pe-  
queño valor, debido a la conductividad eléctrica del propio  
condensador. Esta corriente activa provoca calentamiento por  
efecto Joule y por lo tanto, pérdidas de potencia; a la re-  
lación entre la componente activa y reactiva se la denomina  
factor de pérdidas, y al ángulo  $\delta$  se le llama ángulo de -  
pérdidas.



$$\text{tag } \delta = \frac{I_w}{I_c} \quad (2.14)$$

FIG. 2.3 Factor de pérdidas de un dieléctrico

Las pérdidas dieléctricas del condensador vienen dadas por:

$$P = V_{ln} I_w = V_{ln} I \text{ Sen } \delta$$

y como  $\delta$  tiene siempre un valor muy pequeño

$$\text{Sen } \delta = \text{tg } \delta$$

y por tanto

$$P = V_{ln} I \text{ tg } \delta$$

recordando que en un condensador

$$I = 2\pi f C V_{ln}$$

tendremos finalmente

$$P = 2\pi f V_{ln}^2 C \text{ tg } \delta \quad \text{Watts} \quad (2.15)$$

para una tensión  $V_{ln}$  (voltaje fase neutro), frecuencia  $f$  y capacitancia  $C$  dadas, el valor de  $\text{tg } \delta$  es un índice de las pérdidas dieléctricas.

Como las capas alternadas conductoras y aislantes de un cable actúan a manera de condensadores, es aplicable el concepto estudiado, y resulta de gran importancia el conocimiento del ángulo de pérdidas para saber los límites de funcionamiento de un cable, ya que si las pérdidas dieléctricas son elevadas el cable se calentará y disminuirá su rigidez dieléctrica con riesgo de perforación.

La curva del factor de pérdidas de un cable, presenta un codo (Fig. 2.4) para un determinado valor de la

tensión, denominado punto de ionización, y a partir de éste punto, el factor de pérdidas crece linealmente con la tensión, esto es debido al proceso de ionización de las inclusiones gaseosas del aislamiento. Naturalmente, se exige que el punto de ionización este situado por encima del valor de la tensión de servicio del cable.

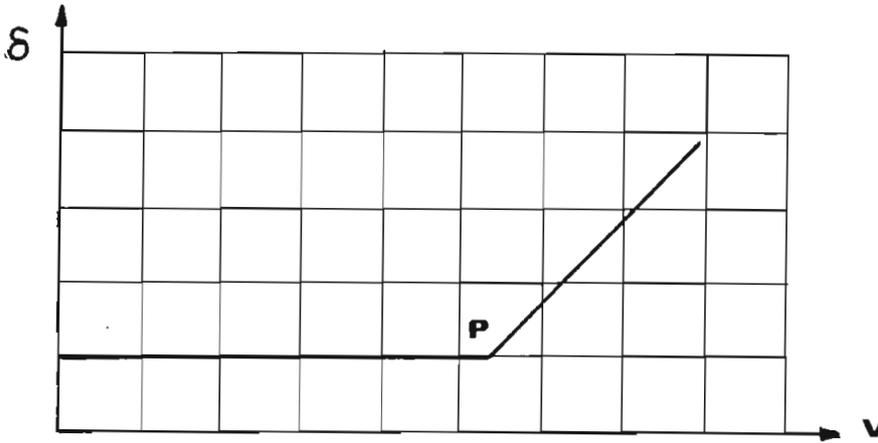


FIG. 2.4 Curva del factor de pérdidas de un dieléctrico en función de la tensión.

El factor de pérdidas de un cable depende - sobretodo del material aislante y de la forma de construcción, de esta forma, una variación de las propiedades del - aislante significará también una variación del factor de pérdidas.

## 2.2 CONDICIONES TERMICAS EN ESTADO ESTACIONARIO

Las limitaciones térmicas a la capacidad de transporte no son rígidamente fijas, y deben ser muy bien - determinadas para la utilización óptima de los cables.

El límite térmico de un cable, es aquel valor de temperatura (temperatura máxima o de "punto caliente") que no debe excederse. La elevación de temperatura crítica

es normalmente la correspondiente al aislamiento adyacente al conductor. Los factores que influyen en la máxima elevación de temperatura permisible en los cables son los siguientes:

- La dilatación diferencial entre el aislamiento, la pantalla que lo rodea y el conductor; para producir tensiones mecánicas, y el aislamiento se agrieta, esto se debe a los diferentes coeficientes de temperatura, y a las distintas elevaciones de temperatura de estos materiales.
- Variaciones de las propiedades eléctricas de los aislamientos, especialmente de las pérdidas del dieléctrico.
- Variaciones de las propiedades mecánicas, al ser expuesto o sometido el cable a esfuerzos indebidos.

Las temperaturas de funcionamiento en estado estacionario recomendado para los cables, son las siguientes:

- Cables con aislamiento de papel/aceite armados 65 °C.
- Cables con aislamiento de aceite o gas a presión 85 °C.
- Cables con aislamiento sólido de butyl 85 °C.
- Cables con aislamiento sólido EPR 90 °C.
- Cables con aislamiento sólido XLP 90 °C.

### 2.2.1 CORRIENTE PERMISIBLE EN UN CABLE

La corriente permisible en un cable, se determina al establecerse un equilibrio térmico, entre el calor generado por el conductor como consecuencia de las pérdidas ( $I^2 R$ ), y el calor disipado por el medio que rodea al conductor (dieléctrico, envoltura metálica, suelo, etc.).

Tres son los factores principales para que

un cable pueda llevar una corriente continuamente con seguridad.

- La temperatura máxima en el conductor, con la cual los componentes operan con un razonable factor de seguridad.
- Las propiedades de disipación de calor del cable
- Las condiciones de instalación, y las condiciones ambientales.

El flujo de calor entre el conductor y el medio que lo rodea, puede expresarse exactamente con las mismas leyes que para la corriente eléctrica causadas por una diferencia de potencial. Para cualquier conductor de una unidad de sección y una unidad de longitud, por la ley de Ohm - tenemos:

$$I = \frac{dv A}{\rho dl} \quad (2.16)$$

y para el correspondiente circuito térmico

$$Q = \frac{d\theta A}{g dl} \quad (2.17)$$

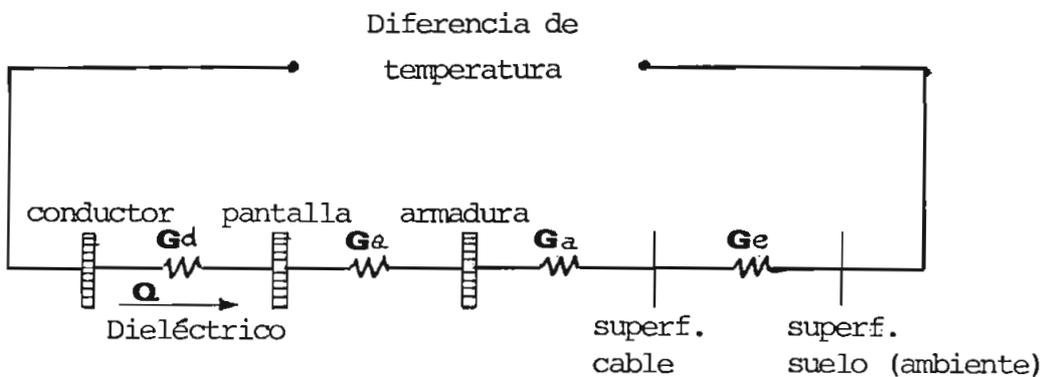


FIG. 2.5 Mecanismo del flujo de calor en un cable monopolar enterrado.

Los problemas de flujo de calor en general pueden ser transformados en problemas eléctricos y viceversa, Fig. 2.5, sustituyendo los términos análogos, así tenemos que:(4)

Tabla 2.3 Equivalentes entre circuitos térmicos y eléctricos

Circuito Eléctrico	Corriente (Amp) I	Diferencia de potencial (volts)	Resistencia específica (Ω/u vol)	Resistencia (ohms)
Circuito Térmico	Flujo de calor (watts) Q	Diferencia de temp. (°C) θ	Resistividad Térmica (°C cm/watt) g	Resistencia térmica (ohm term.) G

entonces se tendrá en general

$$Q = \frac{\theta}{\sum G_t} = \frac{\text{Diferencia total de temperatura}}{\text{Resistencia térmica total}} \quad (2.18)$$

Ahora el calor generado (Q) en un cable con n conductores es :

$$Q = n I^2 R_o \quad (2.19)$$

donde

$R_o$  = Resistencia óhmica de un conductor de 1 cm. de longitud a la temperatura máxima de operación.

Sustituyendo la ecuación 2.19 en 2.18

tenemos:

$$n I^2 R_o = \frac{\theta}{\sum G_t}$$

$$I = \sqrt{\frac{\theta}{n R_o \cdot \sum G_t}} \quad (2.20)$$

Donde  $I$  es la capacidad de corriente que puede llevar el cable con seguridad.

### 2.2.2 RESISTENCIA TERMICA DEL DIELECTRICO

La resistencia térmica, como su similar eléctrico, es la resistencia que ofrece un material al flujo de calor ( $Q$ ). Siendo la resistividad térmica del material dieléctrico  $g$  ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$ ), entonces considerando el anillo de espesor  $dx$ , para una longitud de un centímetro de cable, Fig 2.6 la resistencia térmica es:

$$dGd = g \frac{dx}{2\pi x l} \quad ^{\circ}\text{C}/\text{watt}$$

y la resistencia térmica total del dieléctrico es:

$$Gd = \int_r^R \frac{g dx}{2\pi x} = g \frac{l}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad ^{\circ}\text{C}/\text{watt} \quad (2.21)$$

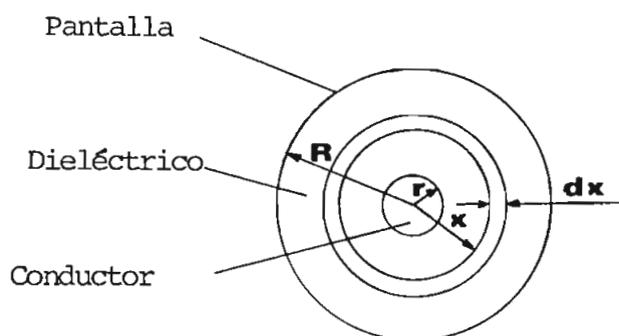


FIG. 2.6 Resistencia térmica del dieléctrico

### 2.2.3 RESISTENCIA TERMICA DEL MEDIO QUE RODEA AL CABLE

Cuando se trata de calcular la resistencia

térmica que rodea al cable, es necesario hacer una investigación de la resistencia térmica de la ruta propuesta. Esto - proporcionará el punto en que la resistividad térmica ( $g$ ) del suelo tiene su valor mayor, el cual deberá utilizarse en el cálculo del valor nominal o permisible de corriente.

Puede hallarse fácilmente la resistencia térmica externa del cable, para esto se considera que existe imágen del cable, que es fuente de calor en el campo térmico, - como se aprecia en la figura 2.7. Así tenemos que:

$$G = \frac{g}{2\pi} \operatorname{Ln} \frac{2h}{r} \quad (2.22)$$

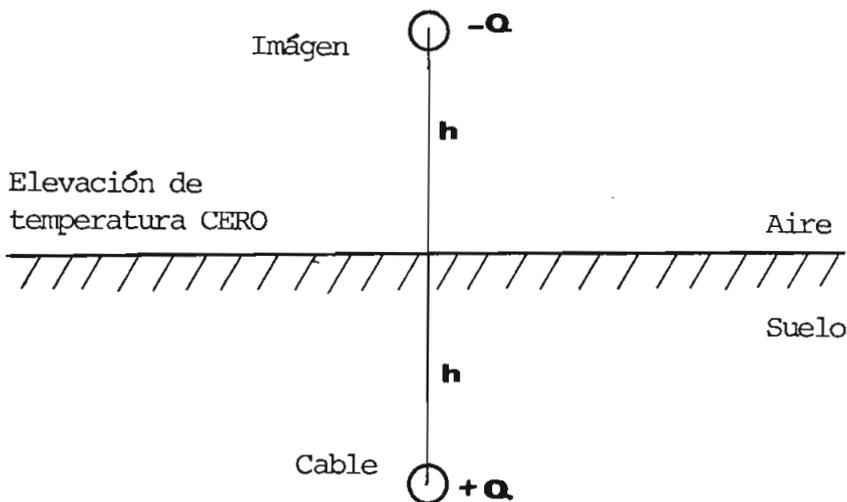


FIG. 2.7 Método de la imágen para determinar la resistencia térmica debido al suelo que rodea a un cable de radio  $r$ .

Si la pérdida total es de  $Q$  watts por cm. de cable, la diferencia de temperatura entre la superficie - externa del cable y la superficie del suelo (ambiente) es:

$$\Theta = \frac{Q g}{2\pi} \operatorname{Ln} \frac{2h}{r} \quad (2.23)$$

Con varios cables semejantes e igualmente cargados, en un grupo que no se tocan entre sí, se utiliza también el método de las imágenes como se aprecia en la figura 2.8

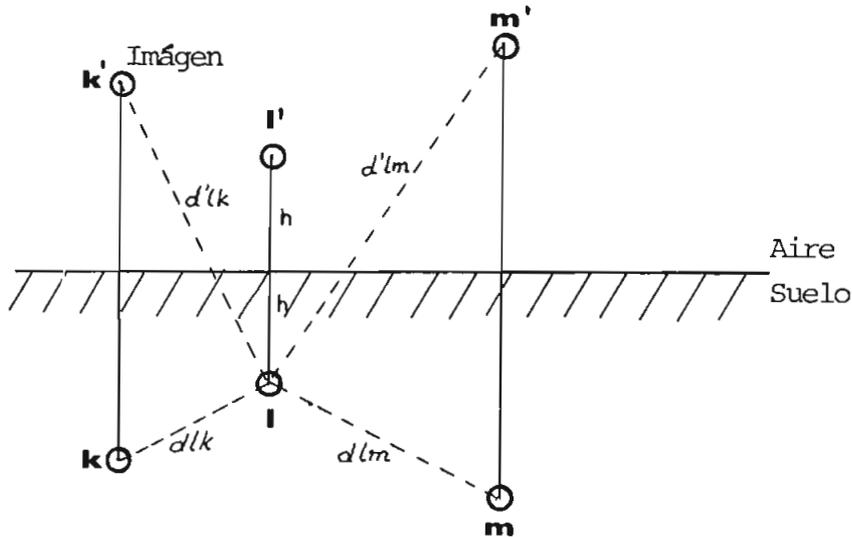


FIG. 2.8 Método de la imagen para determinar la resistencia térmica externa de un grupo de cables enterrados.

La elevación de temperatura de un cable de un grupo, es la suma de su propia elevación independiente, más la debida a los demás cables.

La elevación de temperatura en la superficie del cable l debido a una pérdida de Q watts por cm. en el cable k.

$$\theta_{kl} = \frac{Q g}{2 \pi} \operatorname{Ln} \frac{d'lk}{dlk}$$

Además, la elevación de temperatura de l debido a una pérdida Q en m

$$\theta_{ml} = \frac{Q g}{2 \pi} \operatorname{Ln} \frac{d'lm}{dlm}$$

De aquí que la elevación de temperatura - de l debido a k como a m es:

$$\theta_{klm} = \frac{Q g}{2 \pi} \ln \frac{d'lm d'lk}{dlm dlk}$$

La elevación de temperatura total del cable l vendra dado por:

$$\theta_t = \frac{Q g}{2 \pi} \ln \frac{2h}{r} + \frac{Q g}{2 \pi} \ln \frac{d'lm d'lk}{dlm dlk} \quad (2.24)$$

En el caso de cables pasados por conductos, la resistencia térmica externa se compone de la suma de la resistencia térmica desde la superficie del conductor, hasta la superficie de la tierra (ambiente), incluyendo la resistencia térmica del conducto.

Un aspecto importante del medio que rodea al cable, es el aumento de la resistividad del suelo cuando se seca. La humedad en el suelo que rodea al cable, emigra dejando aire en los espacios previamente ocupados por el agua, y en consecuencia la resistividad térmica aumenta, esto a su vez hace aumentar la temperatura del cable que aumenta las pérdidas del dieléctrico, y en menor escala las pérdidas en el conductor.

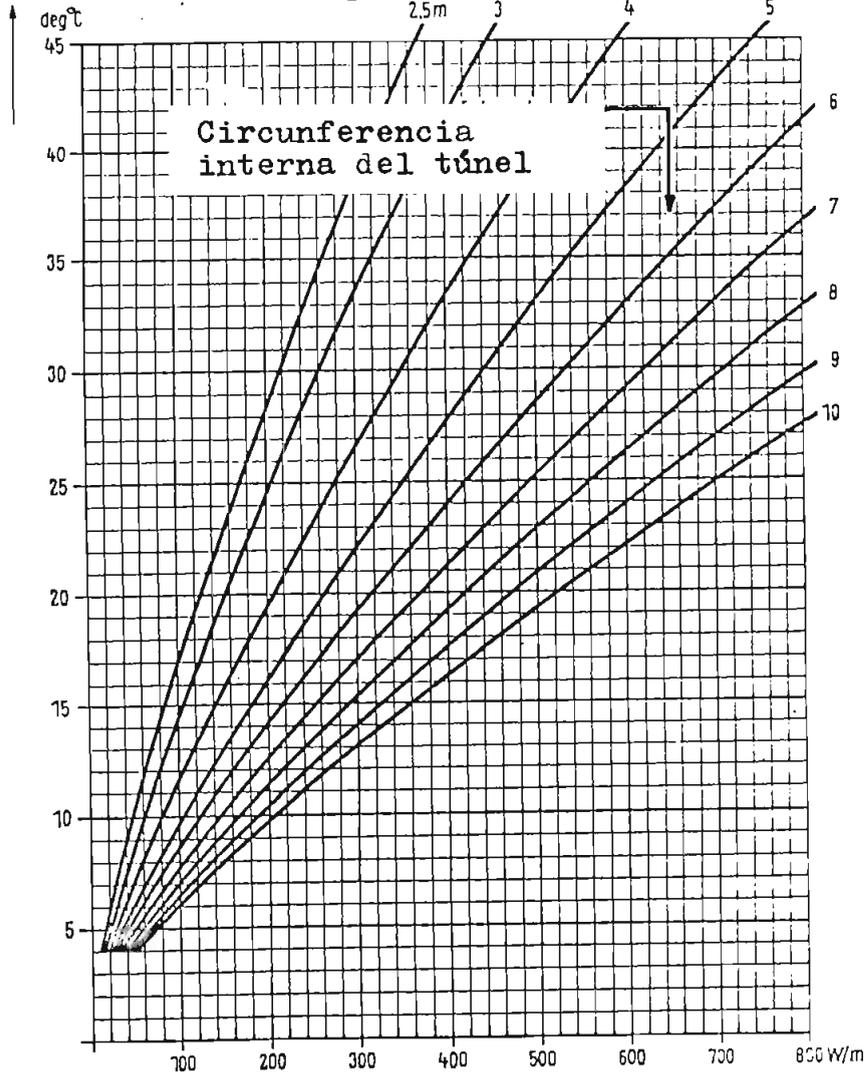
Aunque se ha prestado gran atención al calentamiento de los cables, resulta cada vez más evidente, que los puntos de mayor temperatura serán las uniones o empalmes. El análisis térmico de los empalmes es muy complejo y exige el uso de un computador (5).

#### 2.2.4 CABLES EN TUNELES NO VENTILADOS

En túneles no ventilados, el calor generado

en los cables, es disipado solamente por las paredes del túnel en todas las direcciones. El calor acumulado incrementa la temperatura del aire circundante al cable dentro del túnel lo cual significa que el rango de corriente es reducido comparado con la instalación al aire libre.

Incremento de la temp. del aire dentro del túnel



Pérdidas totales por un metro de longitud de túnel.

FIG. 2.9 Incremento de la temperatura del aire dentro del túnel como una función de las pérdidas de potencia por 1 m. de longitud de túnel.

El calor del aire dentro del túnel, depende solamente de la magnitud de las pérdidas de potencia ( $I^2 R$ ) de los cables.

La figura 2,9 muestra el incremento de la temperatura del aire dentro del túnel, como una función de las pérdidas de potencia por un metro de longitud de túnel, con la circunferencia interna del túnel como parámetro. (6)

### 2.2.5 CABLES EN TUNELES CON VENTILACION FORZADA

Si la disipación de calor a través de las paredes del túnel no es suficiente, y la temperatura del aire dentro del túnel llega a ser muy alta, la cual excede la temperatura máxima permisible del cable, entonces es necesaria una ventilación del túnel, pero otros métodos pueden ser practicados, tales como, aumentar si es posible la circunferencia del túnel.

En la mayoría de casos, el cálculo es basado sobre el total de calor generado por las pérdidas en los cables despreciando el calor disipado por las paredes del túnel. En este caso puede ser seleccionado un ventilador como medio de refrigeración. La cantidad de aire refrigerante ( $D_Q$ ) requerida depende del total de calor generado por las pérdidas en los cables  $\Sigma P$ , la longitud del túnel  $l$  y la elevación de temperatura del aire refrigerante  $\Delta \theta_{ku}$  fluyendo a través del túnel.

$$D_Q = 0.77 \cdot 10^{-3} \frac{\Sigma P \cdot l}{\Delta \theta_{ku}} \quad \text{m}^3/\text{seg.} \quad (2.25)$$

La velocidad del aire refrigerante es calculada en base a la sección transversal del túnel  $A$  en  $\text{m}^2$ .

$$v = \frac{D_Q}{A} \quad \text{m/seg.} \quad (2.26)$$

Esta velocidad no debe ser excedida de 5 m/seg para evitar molestias de ruido. (7).

En la mayoría de casos, la temperatura inicial del aire refrigerante, es la misma que la temperatura ambiente  $\theta_u$ , tomando en cuenta la temperatura máxima permisible del cable  $\theta_{ln}$ , se obtiene la elevación de temperatura del aire refrigerante como:

$$\theta_{ku} \leq \theta_{ln} - \theta_u - \Delta\theta \quad ^\circ\text{C}. \quad (2.27)$$

con

$$\Delta\theta = \Delta\theta_n \frac{I^2}{I_n^2} \quad ^\circ\text{C}. \quad (2.28)$$

en donde

$\Delta\theta_n$  = Elevación de temperatura para valores nominales

$I$  = Corriente de carga

$I_n$  = Corriente nominal

## 2.3 CONDICIONES TERMICAS EN ESTADO TRANSITORIO

En los cables se presentan regímenes de calentamiento transitorio producidos por cortocircuitos, y sobrecargas de emergencia.

### 2.3.1 CORTOCIRCUITOS

La corriente de cortocircuito y el tiempo que demora el cortocircuito pueden ser factores determinantes para la elección del cable, la sección del cable puede ser térmicamente suficiente para una determinada corriente de servicio, pero no pudiera ser suficiente para soportar la corriente de cortocircuito durante cierto tiempo. La corriente de cortocircuito que deben soportar los cables debe ser comparable con las soportadas por las demás partes de la instalación

o sistema.

En un cortocircuito, el calor se concentra en el conductor y éste puede alcanzar una temperatura superior a la admisible, ya que debido al corto tiempo de duración del cortocircuito, se impide la transmisión de calor al ambiente.

Como base para la determinación de la sección del conductor, se toma principalmente en cuenta el valor efectivo medio de la corriente de cortocircuito  $I_{km}$ , y el tiempo  $t$ , que transcurre desde la iniciación del cortocircuito hasta la desconexión de los disyuntores. Así tenemos que:

$$I_{km} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad \text{KA} \quad (2.29)$$

$$I_k'' = \frac{S''}{\sqrt{3} V_{ll}} \quad \text{KA} \quad (2.30)$$

en donde

$I_k''$  = Corriente de cortocircuito subtransitoria inicial en KA (valor r.m.s).

$m$  = Factor de influencia de la componente D.C (Fig. 2.10)

$n$  = Factor de influencia de la componente A.C (Fig. 2.10)

$I_k$  = Corriente permanente de cortocircuito KA (valor r.m.s)

$I_s$  = Corriente de cortocircuito asimétrica (valor pico)

$S''$  = Potencia de cortocircuito subtransitoria (MVA)

Para el cálculo de las diferentes corrientes de cortocircuito, se puede consultar la referencia 8

La sección del conductor viene determinada por:

$$A = K_1 K_2 I_{km} \sqrt{t} \quad (2.31)$$

con

$$K2 = \text{Ln} \frac{\theta + \theta_f}{\theta + \theta_i} \quad (2.32)$$

K1 = Coeficiente del material (tabla 2.4)

K2 = Coeficiente de temperatura

t = Tiempo de despeje de la falla (seg.)

$\theta_i$  = Temperatura inicial del conductor

$\theta_f$  = Temperatura final del conductor

$\theta$  = Coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica a cero grados centígrados (tabla 2.4)

A = Sección del conductor en  $\text{mm}^2$

Tabla 2.4 Constantes de materiales conductores (9)

Material	$\theta$ °C	K1 $\text{mm}^2/\text{KA} \cdot \text{seg}^{1/2}$
Cobre	234.5	4.41
Aluminio	228	6.9
Hierro	202	12.8
Plomo	230	24.2

Para la determinación de los factores de influencia m y n, se deberá determinar previamente las relaciones  $I_k''/I_k$ , el tiempo de despeje de la falla t y, el factor de asimetría  $x$  determinado por :

$$x = \frac{I_s}{\sqrt{2} I_k''} \quad (2.33)$$

y según la figura 2.10 se obtiene m y n

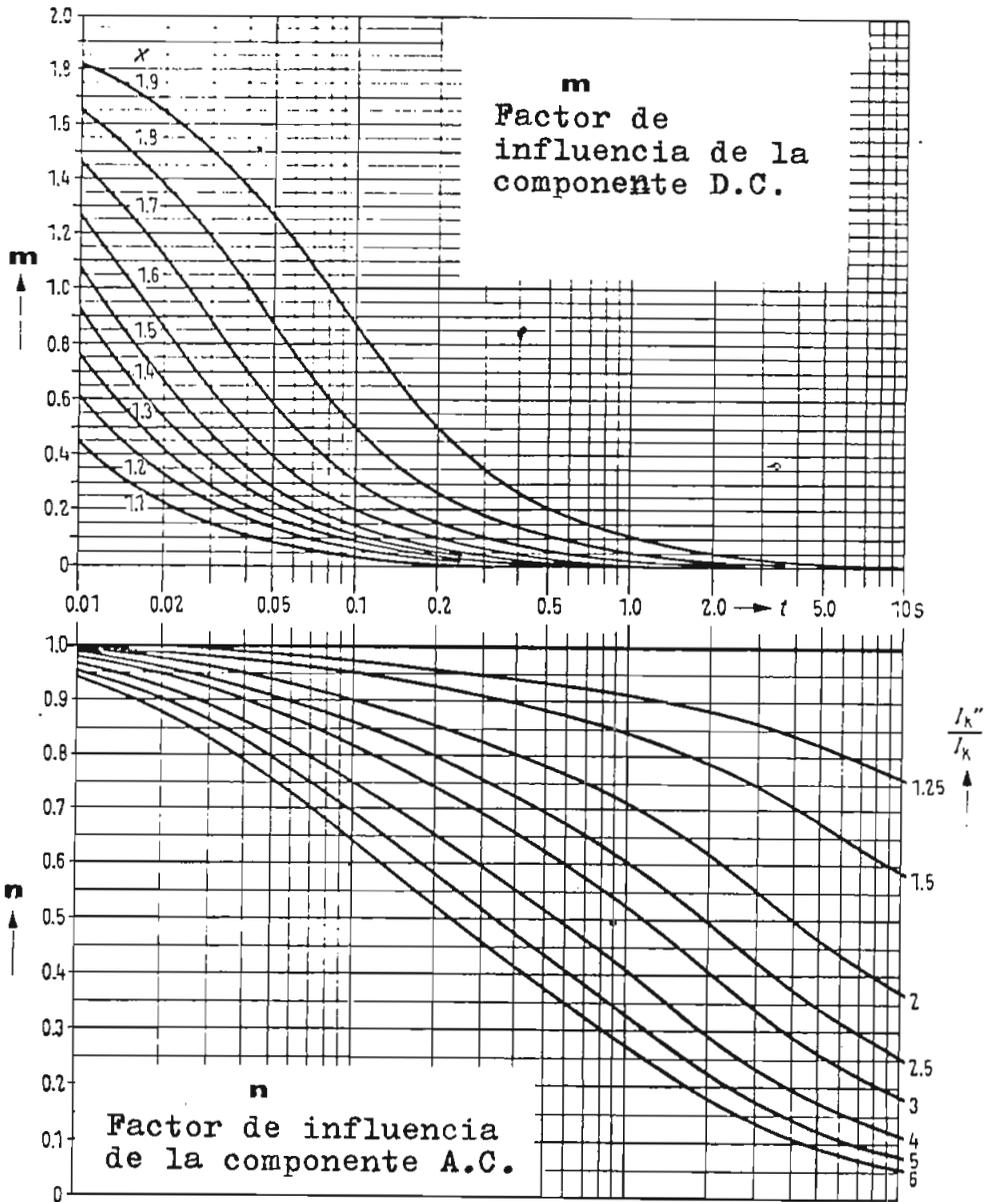


FIG. 2.10 Determinación de los factores de influencia  $m$  y  $n$

2.3.2 SOBRECARGAS

Los cables están diseñados para soportar - una carga continua con una elevación de temperatura específica, pero sin embargo, bajo condiciones de servicio son ca-

paces de soportar ciertas sobrecargas durante un tiempo determinado sin sufrir ningun daño.

La elevación de temperatura de los cables - es provocada principalmente por las pérdidas en el conductor ( $I^2R$ ). La temperatura del cable sube primero rapidamente y luego lo hace de una manera más lenta, hasta alcanzar un valor fijo, como se aprecia en la figura 2.11

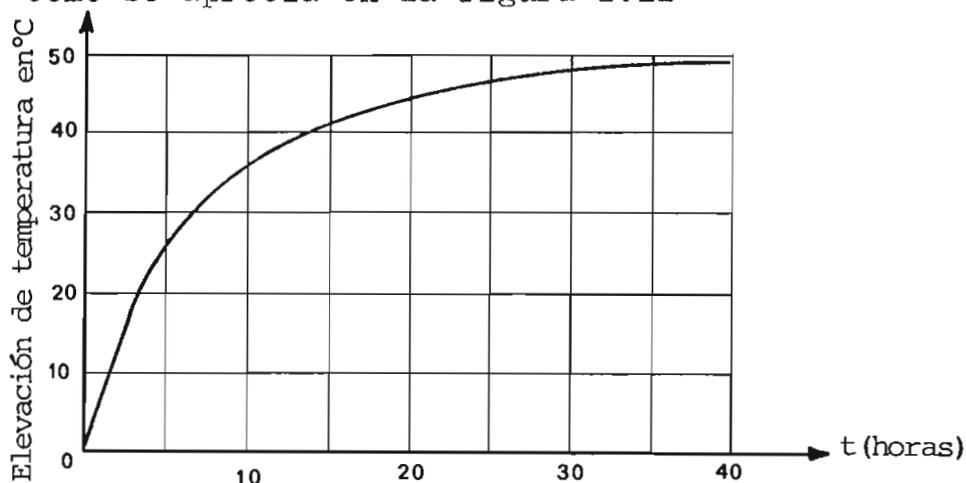


FIG. 2.11 Elevación de temperatura en función del tiempo de un cable tripolar directamente enterrado

La variación de temperatura incrementa y disminuye exponencialmente de acuerdo a la siguiente ecuación

$$\theta_t = \theta_f ( 1 + e^{-t/\tau} ) \quad (2.34)$$

donde

$\theta_t$  = Elevación de temperatura en un intervalo  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_f$  = Temperatura final ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  = Intervalo de tiempo (seg.)

$\tau$  = Constante de tiempo de calentamiento (seg.)

La constante de tiempo de calentamiento  $\tau$  se obtiene en forma experimental de la curva de calentamiento con valores nominales, al conseguir el aumento máximo de

temperatura para éste régimen. Es decir, cuando la generación de calor se iguala a la absorción por el medio refrigerante, permaneciendo por esto el calentamiento en estado estacionario en su valor máximo ( $\theta_{max}$ ) para esa condición de funcionamiento y refrigeración. Así, si en la ecuación anterior se hace  $t = \tau$ , resulta que  $\theta = 63.3\% \theta_{max}$ , vale decir el tiempo que demora el cable en llegar al 63.3% del calentamiento máximo de régimen permanente, corresponde a la constante de tiempo de calentamiento.(10)

Para los casos de sobrecarga se consideran dos casos:

- Cuando el cable no ha estado soportando previamente una carga.
- Cuando el cable ha estado soportando previamente una carga

#### 2.3.2.1 CABLE SIN CARGA PREVIA

Para los dos casos de sobrecargas, se necesita primeramente contar con la curva tiempo - temperatura - para el cable bajo consideración, cabe indicar que la curva obtenida "in situ" se separa un poco de la curva teórica, para estos casos es mejor contar con la curva "in situ", ésta se obtiene en forma experimental, al ser sometido el cable - al voltaje y corriente nominal, sin carga previa y en el lugar de instalación. La sobrecarga que puede soportar el cable sin que sufra ningún daño, viene determinada por:(11).

$$S_c = \left( \sqrt{\frac{\theta'}{\theta_c}} - 1 \right) 100 \quad (2.35)$$

$$\text{en donde} \quad \theta' = \theta_{max} - \theta_{amb} \quad (2.36)$$

$S_c$  = Sobrecarga en % permitida para un tiempo  $t$

$\theta_{max}$  = Máxima temperatura del conductor ( $^{\circ}C$ )

$\theta_c$  = Elevación de temperatura para el tiempo de sobrecarga a considerar ( $^{\circ}C$ ), obtenida de la curva tiempo - Temp.

$\theta_{amb}$  = Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.3.2.2 CABLE CON CARGA PREVIA

Si el cable ha estado previamente cargado - el primer paso es saber la elevación de temperatura como resultado de esa carga. Sabiendo que la temperatura para esa carga es  $\theta_i$ , y que se requiere encontrar  $S_c$  que es la sobrecarga máxima permisible para un período de sobrecarga ( $t_{sc}$ ) se procede de la siguiente manera.

Con  $\theta_i$  se obtiene un período de tiempo  $t_1$ , que es como que se considerara que el cable ha estado sopor-tando su carga nominal durante ese tiempo  $t_1$  sin carga pre-  
via. Finalmente se obtiene un tiempo  $t$  que considera el tiempo  $t_1$  y  $t_{sc}$  (tiempo de sobrecarga).

$$t = t_1 + t_{sc}$$

Con éste tiempo  $t$  se obtiene  $\theta_c$  de la curva como se puede apreciar en la figura 2.12

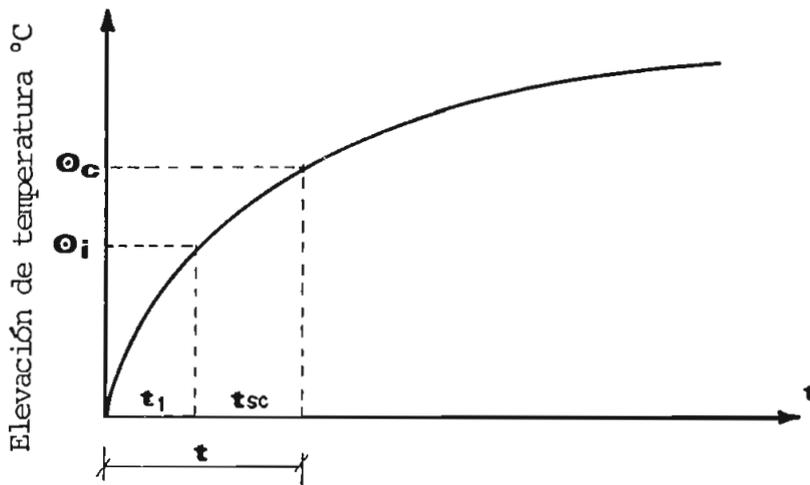


FIG. 2.12 Curva tiempo-temperatura

Entonces la sobrecarga viene determinada -

como el caso anterior por:

$$S_c = \left( \sqrt{\frac{\theta'}{\theta_c}} - 1 \right) 100 \quad (2.35)$$

## 2.4 CONEXION A TIERRA DE LAS PANTALLAS

Los cables de potencia son normalmente cons-  
truidos con pantalla concéntrica, la cual opera nominalmente  
al potencial de tierra.

Las pantallas pueden formar un circuito a -  
bierto o cerrado. Cuando los cables conducen corriente al -  
terna se induce un voltaje en las pantallas, y fluyen corrien-  
tes por ellas cuando existe un circuito cerrado, como por e-  
jemplo al conectar los dos extremos de la pantalla a tierra.  
Si las pantallas no forman un circuito cerrado, es decir no  
están conectadas, no fluye corriente por ellas (excepto las  
corrientes de Eddy que son despreciables) . Estas corrientes  
tienen que ser eliminadas, ó si esto no es posible, por lo me-  
nos reducirlas ya que causan pérdidas, lo cual reduce la ca-  
pacidad de conducción de corriente del cable, por lo tanto es  
necesario realizar conexiones especiales en las pantallas, pa-  
ra reducir ó eliminar las corrientes por ellos.

Cuando los cables conducen corrientes mayores  
a 500 amperios, es aconsejable realizar conexiones especiales  
en las pantallas para la reducción de pérdidas, lo cual permi-  
te tener una mayor capacidad de conducción de corriente por el  
cable ( 12 ).

No existe un punto claro que defina que co -  
nexión en las pantallas es más aconsejable, ya que depende -  
muchos factores, tales como; la longitud del cable, costo de  
las conexiones, etc. Para la conexión deberá tener en cuenta  
los siguientes aspectos :

- No siempre es posible suprimir la corriente por la pantalla debido especialmente a desbalances que existe normalmente en el sistema .
- La pantalla del cable debería operar nominalmente al potencial de tierra, pero pueden aparecer voltajes apreciables respecto a tierra , por lo tanto la pantalla debe estar provista de la adecuada aislación.
- Durante fenómenos transitorios y de falla, aparecen sobrevoltajes en la pantalla y por tanto podrían ser necesitados aparatos que eliminen estos sobrevoltajes.

#### 2.4.1 CORRIENTES Y TENSIONES EN LAS PANTALLAS

Se consideran dos cables como los de la figura 2.13 Si las pantallas están aisladas, es decir, sino están conectadas a tierra en los extremos el flujo que se establece en un cable corta a las pantallas de los demás e induce corrientes de Foucault como se ve en la figura 2.13 a.

Aunque las pérdidas en estas condiciones son muy pequeñas excepto en los cables que están próximos o tocándose se establecen tensiones a lo largo de las pantallas que pueden resultar excesivas. Para evitar este efecto, las pantallas se conectan en los extremos formando las conexiones terminales indicadas en la figura 2.13b.

El conductor y la pantalla tiene el mismo efecto que un transformador de bobinado 1 : 1 por lo tanto aparece un voltaje  $E_0$  en la pantalla respecto a tierra cuyo valor es :

$$E_0 = I W M 10^{-3} \text{ V/km} \quad (2.37)$$

donde

$I$  = Corriente por el conductor (A)

$\omega$  = Frecuencia angular

$M$  = Inductancia mutua entre el conductor y la pantalla (mH/Km)

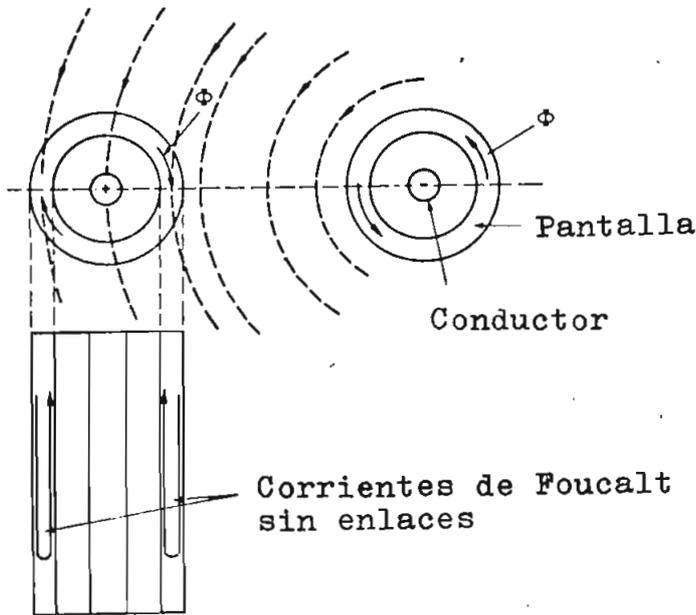


FIG. 2.13a Corrientes y Flujos en las pantallas sin conexión en los extremos

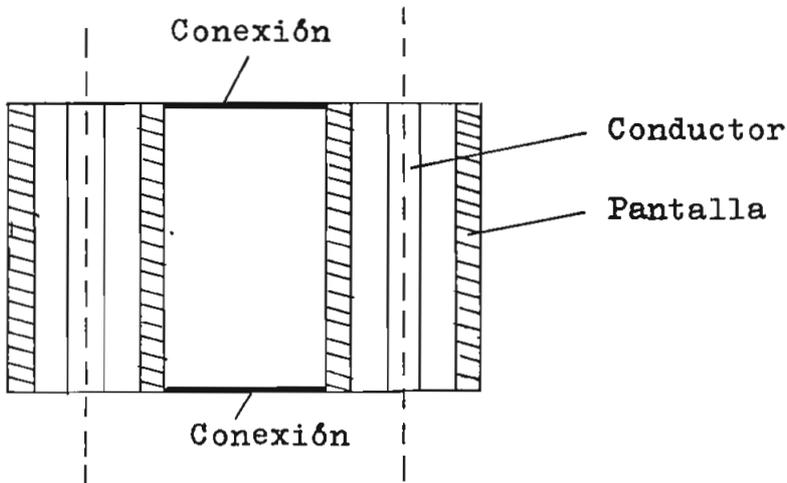


FIG. 2.13b Dos cables con las pantallas conectadas en los extremos.

El flujo a través del lazo (abcd) forma una inductancia mutua entre el conductor y la pantalla igual a:

$$M = 0.4 \operatorname{Ln} \frac{2 \operatorname{DMG}}{d_m} \quad \text{mH/Km} \quad (2.38)$$

$$d_m = d_M - \delta_M$$

$d_m$  = Diámetro promedio de la pantalla (mm)

$d_M$  = Diámetro exterior de la pantalla (mm)

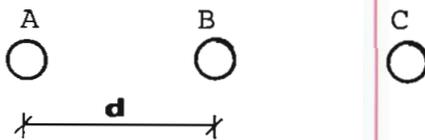
$\delta_M$  = Espesor de la pantalla (mm)

$\operatorname{DMG}$  = Distancia media geométrica entre los ejes de las pantallas (mm)

En el caso de un sistema trifásico con separación equilátera, el valor efectivo de  $M$  es:

$$M = 0.2 \operatorname{Ln} \frac{2 \operatorname{DMG}}{d_m} \quad \text{mH/Km} \quad (2.39)$$

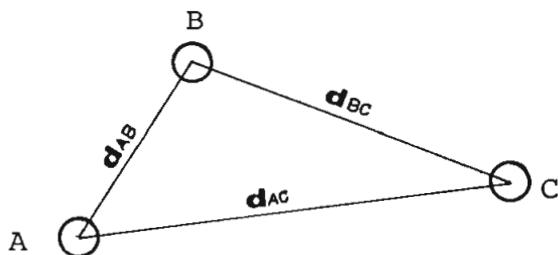
En el caso de una formación lineal (flat) de los cables tenemos que:



$$M = 0.2 \operatorname{Ln} \frac{2 \operatorname{DMG}}{d_m} \quad \text{mH/Km} \quad (2.40)$$

$$\operatorname{DMG} = \sqrt[3]{2} d$$

Con formación asimétrica tenemos que:



$$M = 0.2 \operatorname{Ln} \frac{2DMG}{dm} \quad \text{mH/Km} \quad (2.41)$$

$$DMG = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}}$$

Si las pantallas son interconectadas en los dos extremos, entonces una corriente fluye por la pantalla - como consecuencia del voltaje inducido  $E_o$  cuyo valor es:

$$I_p = \frac{E_o}{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}} \quad (2.42)$$

con

$X_p$  = Reactancia inductiva de la pantalla

$R_p$  = Resistencia de la pantalla

$$X_p = W M 10^{-3} \quad \Omega/\text{Km} \quad (2.43)$$

Si las pantallas están conectadas en un extremo solamente,  $I_p$  es cero, ya que las pantallas de ésta manera están formando un circuito abierto.

El circuito equivalente formado por el conductor y la pantalla es el de la figura 2.14

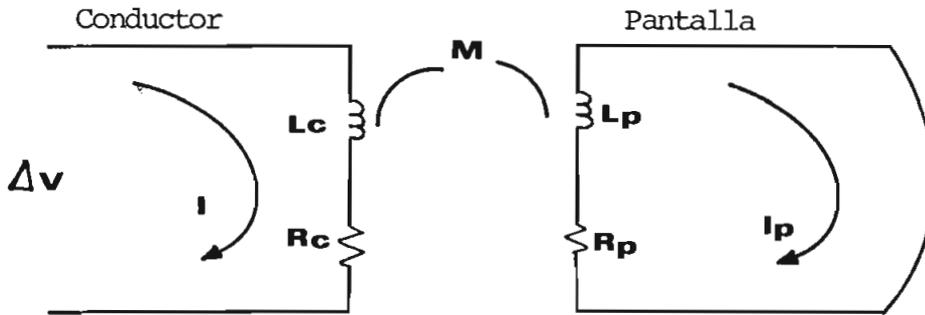


FIG. 2.14 Circuito equivalente conductor pantalla

Considerando una longitud de un metro de circuito, la caída de tensión por metro es:

$$\Delta V = I ( R_c + j \omega L_c ) + j I_p \omega M$$

$$0 = I_p ( R_p + j \omega L_p ) + j I \omega M$$

$$Z = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{y} \quad L_p \approx M$$

$$Z = \left( R_c + R_p \frac{\omega^2 M^2}{R_p^2 + \omega^2 M^2} \right) + j \left( \omega L_c - \frac{\omega^3 M^3}{R_p^2 + \omega^2 M^2} \right) \quad (2.44)$$

Las conexiones de las pantallas más comúnmente usadas son:

- Conexión de un solo punto a tierra
- Conexión transpuesta o "Cross Bonding"

#### 2.4.2 CONEXION DE UN SOLO PUNTO A TIERRA

La forma más simple de conexión de las pan-

tallas, consiste en conectar éstas en un solo punto y poner a tierra, el otro extremo queda aislado de tierra.

En todos los otros puntos, excepto en el punto puesto a tierra, es claro que existe un voltaje inducido, el cual es máximo en el extremo libre, el cual deberá ser adecuadamente aislado de tierra mediante terminales apropiados, así el circuito no está cerrado, excepto a través del pararrayo si es que existe.

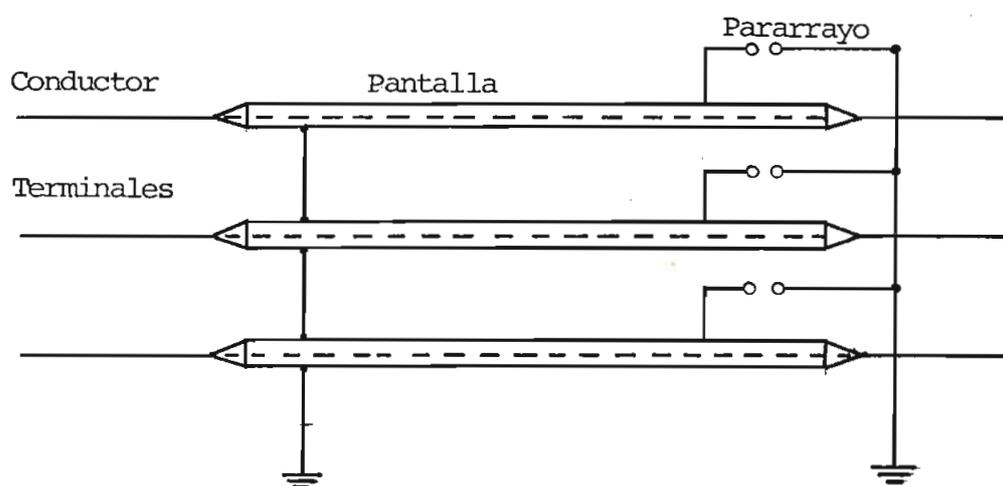


FIG. 2.15 Conexión de un solo punto a tierra

Es aconsejable utilizar ésta conexión cuando el cable tiene unos pocos centenares de metros (menores a 500m.)

#### 2.4.3 VOLTAJES LIMITES ESTABLECIDOS PARA LAS PANTALLAS

No existe internacionalmente un solo valor límite establecido para los voltajes inducidos en las pantallas, éstos límites de voltajes inducidos adoptados en algunos países están en el orden de 60 a 100 voltios r.m.s. esto para condiciones normales, es decir cuando fluye por el cable la corriente de plena carga, es evidente que para condiciones de cortocircuito éste voltaje será más alto (12).

#### 2.4.4. CONEXION PARA CABLES CON LONGITUDES LARGAS

Cuando el cable es muy largo, podría excederse la limitación de voltaje si el cable ha sido conectado a tierra en el un extremo, el voltaje inducido en el extremo libre deberá ser siempre menor que el límite de voltaje inducido adoptado (60 o 100 voltios), caso contrario, esta conexión puede ser realizada en otro punto, por ejemplo en la mitad de la longitud del cable y por lo tanto, en los dos extremos libres los voltajes han sido reducidos.

#### 2.4.5. CONEXION TIPO TRANSPUESTA O "CROSS BONDING"

Considerando una ruta que tiene una longitud  $L$  por fase, situados los cables en formación equilátera, en la cual la continuidad de la pantalla del cable es interrumpida en un tercio de la longitud  $L$ ; los voltajes inducidos en las pantallas en las tres fases en cualquier punto del cable, asumiendo que los cables llevan una corriente balanceada, serán iguales y desfasados  $120^\circ$ . Si, entonces las pantallas son conectadas como la figura 2.16 se puede ver que cada circuito de las pantallas contiene la longitud  $L$ ; aquí el voltaje en cada circuito es la suma de los tres voltajes inducidos, cuya suma da cero.

$$e_0 + a e_0 + a^2 e_0 = 0 \quad (2.45)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

En los terminales de los cables, las pantallas pueden ser ahora conectadas y puestas a tierra sin que ninguna corriente fluya por la pantalla, (excepto las corrientes de Eddy que son despreciables).

En caso de grandes longitudes de cable, que al aplicar la conexión tipo transpuesta, el voltaje límite

inducido adoptado es menor que el voltaje inducido en los puntos en los cuales se ha realizado la conexión de transposición de las pantallas, la longitud total del cable se divide en tres grupos iguales y cada uno de éstos es tratado como ya se ha descrito.

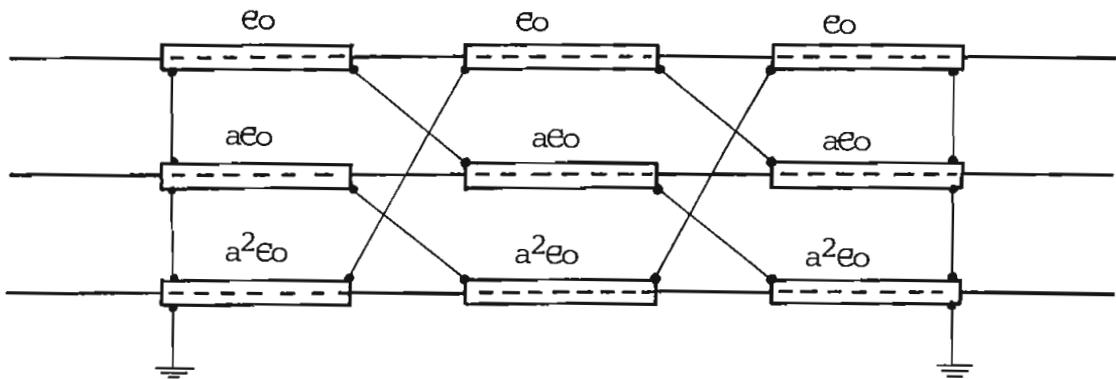


FIG. 2.16. Diagrama de conexiones básicas para el sistema transpuesto o "Cross bonding"

Las observaciones hechas anteriormente, asumen que los cables tienen una formación equilátera, sin embargo es usualmente más conveniente poner los cables en formación lineal, en este caso se hace también la transposición de los cables en cada juntura, como se aprecia en la figura 2.17 (13)

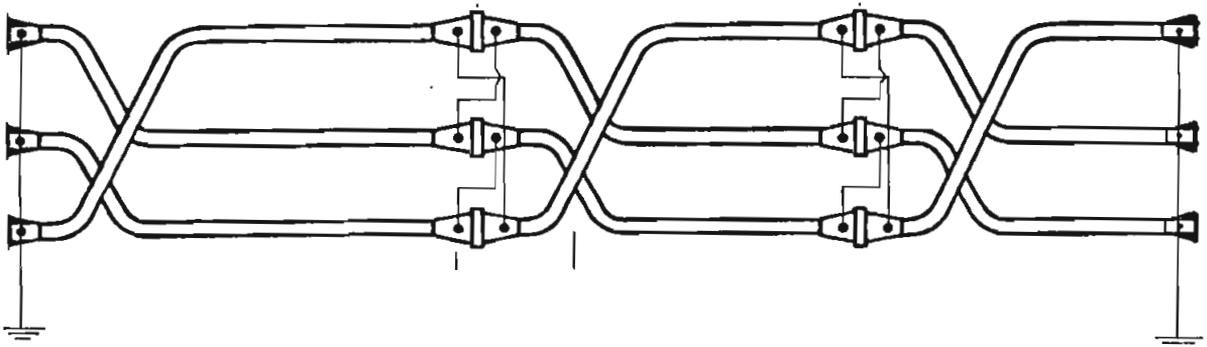


FIG. 2.17 Conexión transpuesta para formación lineal.

#### 2.4.6. SOBREVOLTAJES EN LAS PANTALLAS

En lo tratado anteriormente, se asume que los voltajes inducidos en la pantalla de los cables, son provocados por la corriente de plena carga fluyendo por el conductor, sin embargo una condición crítica es para casos de cortocircuito, ésta condición puede dar altos voltajes los cuales exceden los 60 o 100 voltios permitidos cuando fluye la corriente de plena carga (12).

Los voltajes inducidos en las pantallas son directamente proporcionales a la corriente que fluye por el conductor y, es evidente que cuando ocurre un cortocircuito, el voltaje inducido aumenta en la misma proporción que aumenta la corriente, para casos de cortocircuito el voltaje inducido se calcula con la ecuación 2.37 reemplazando la corriente  $I$ , por la corriente de cortocircuito.

Otra de las condiciones críticas es:

Cuando una onda de sobrevoltaje, ya sea de maniobra o de origen atmosférico fluye en el conductor del cable, se produce también un sobrevoltaje entre la pantalla y tierra cuyo valor está dado por: (15)

$$V_p = \frac{2 Z_b}{4Z_a - Z_b} V_i \quad (2.47)$$

con

$$Z_a = \sqrt{\frac{L_a - L_b}{C_a}} + Z_b$$

$$Z_b = \sqrt{\frac{L_b}{C_b - C_a}}$$

$V_p$  = Sobrevoltaje máximo entre pantalla y tierra

$V_i$  = Voltaje incidente en el cable

$Z_a$  = Impedancia característica conductor-tierra

$Z_b$  = Impedancia característica de la pantalla (generalmente  $< a 10 \Omega$ ).

$L_a$  = Inductancia entre conductor y tierra

$L_b$  = Inductancia entre pantalla tierra

$C_a$  = Capacitancia entre conductor pantalla

$C_b$  = Capacitancia entre conductor y tierra

La corriente de descarga para el caso en que se instale un pararrayos entre pantalla y tierra, ésta vendrá dada por la relación:

$$I_d = \frac{V_p}{Z_b}$$

#### 2.4.7 LIMITACIONES DE ONDAS DE VOLTAJE EN LA PANTALLA DE LOS CABLES

En cada punto que no sean los puntos puestos a tierra, existen voltajes inducidos entre las pantallas y entre éstas y tierra, los cuales tienen su máximo valor en las juntas donde las pantallas han sido cruzadas y conectadas, o en el extremo libre cuando el cable ha sido conectado en un solo punto a tierra. Por este motivo, es aconsejable conectar pararrayos en las juntas donde las pantallas han sido cruzadas y conectadas, o en el extremo libre.

La función de éstos pararrayos, es reducir a valores seguros las ondas de voltaje, las cuales pueden aparecer en la pantalla debido a la existencia de una corriente muy alta fluyendo por el conductor, como consecuencia de ésta, existe un voltaje inducido también alto, que podría causar la perforación del aislamiento de la pantalla, por lo general el material dieléctrico de la pantalla puede estar sujeto al 15% del nivel básico de aislamiento del cable (14)

Un tipo de pararrayo comunmente usado es el de resistencia no lineal, conectados en estrella a las pantallas y el punto central de la estrella puesto a tierra, como se aprecia en la figura 2.18

La característica de éste pararrayo de resistencia no lineal es, que bajo condiciones normales, la corriente por el pararrayo es de unos pocos miliamperios. Al incrementar el voltaje aplicado al pararrayo, la resistencia de éste disminuye rápidamente, permitiendo así, ofrecer un camino de descarga.

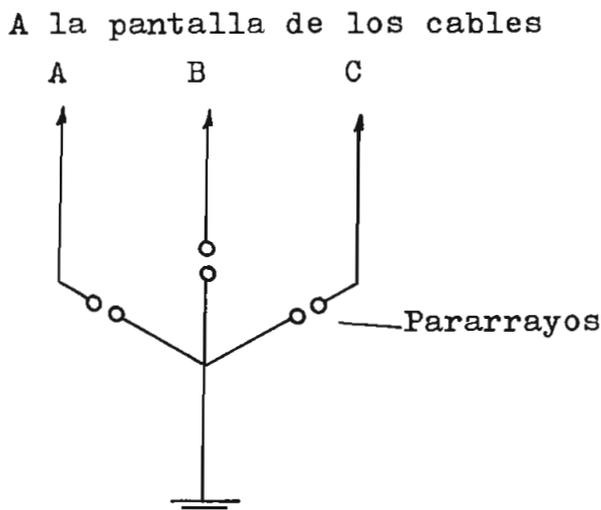


FIG. 2.18 Conexión de los pararrayos a las pantallas.

C A P I T U L O    I I I

### 3.1 INTRODUCCION

El objeto principal de la explotación de las redes eléctricas es asegurar la energía a los consumidores en todo tiempo y sin interrupción. Cualquier avería que afecte a las redes, perturba las exigencias normales del servicio y por tanto debe evitarse, o a lo menos, eliminar tan rápidamente como sea posible. Los daños que pueden afectar a los cables son debido a:

- Perforación de los aislantes producidos por mal diseño, mala construcción, corrosión o por calentamiento.
- Influencia de animales roedores
- Sobretensiones
- Cortocircuitos
- Destrucciones mecánicas de los cables producidos por trabajos en el terreno.
- Tiempo demasiado largo de detección del defecto a cargo de los relés de protección.

Con el fin de evitar daños a los cables o disminuir los efectos de éstos, son necesarios dispositivos de protección apropiados para cada caso.

Por lo general, cualquier dispositivo de protección consta de los elementos indicados en la figura 3.1 es decir:

Dispositivo de entrada.- Detecta las señales provenientes del circuito principal (corriente, tensión, etc.) y las convierte en señales aptas para el relé de protección, los dispositivos de entrada son los transformadores de corriente y tensión, que además sirven de aislamiento eléctrico entre las partes de alta y baja tensión.

Dispositivo de medida.- Es la parte más importante del dis-

positivo de protección, aquí se miden las señales provenientes del dispositivo de entrada, previamente adaptadas por éstos, y se decide de acuerdo con el valor de la medida, cuando debe entrar en funcionamiento el correspondiente dispositivo de protección.

Dispositivo de salida.- Es el elemento intermediario entre el dispositivo de protección y los equipos accionados por éste, engloba también los elementos necesarios para aumentar el número de señales de salida.

Dispositivo accionado.- Es generalmente la bobina de mando de los disyuntores, que produce la desconexión de éstos en caso de perturbación.

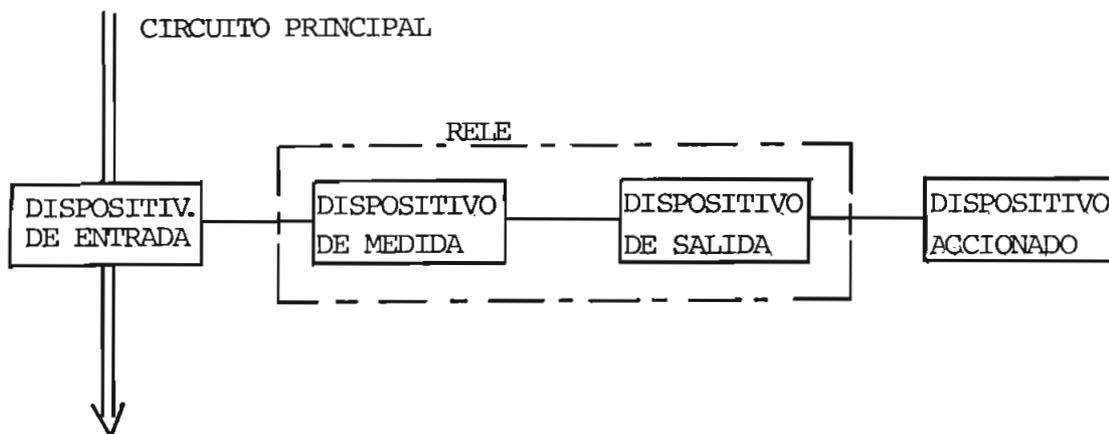


FIG. 3.1 Esquema de la disposición general de una protección

### 3.1.2 CARACTERISTICAS DE LOS RELES DE PROTECCION

Para cumplir las condiciones que les han sido asignadas, es decir, reaccionar a las perturbaciones producidas de manera eficiente, los relés de protección han de cumplir un conjunto de exigencias, de las que las más im

portantes son:

- **Confiabilidad.**- Es la seguridad que se debe tener para que el relé funcione al ocurrir un determinado defecto. Esta seguridad debe mantenerse aún para las más desfavorables condiciones de funcionamiento, operación de éste después de varios años de reposo, etc.
- **Sensibilidad.**- Los relés de protección han de ser sensibles, es decir, que su funcionamiento a de ser correcto - para el valor mínimo de la perturbación que pueda aparecer en el lugar del defecto.
- **Rapidez.**- Por lo general los defectos en los cables están caracterizados por un aumento de temperatura, que destruye los aislantes; éstas destrucciones son proporcionales a la duración de la perturbación, por lo que para su protección eficiente, el correspondiente relé debe separar - la parte afectada lo más rápidamente posible.
- **Selectividad.**- Las características y los valores de funcionamiento de los relés, han de elegirse de tal forma que a a ún para las condiciones más desfavorables, solamente quede desconectada la parte del sistema que sea afectada por el defecto.

Resumiendo, los valores más empleados para detectar un defecto son los que se citan a continuación:

- 1 Aumento de la intensidad de corriente
- 2 Variación de la tensión
- 3 Variación de la impedancia
- 4 Comparación de la fase o de la amplitud de la corrientes de entrada y salida.

### 3.2 PROTECCION CONTRA LAS SOBRECARGAS

Se debe tener presente que el cortocircuito se caracteriza por un aumento prácticamente instantáneo de la intensidad de corriente que pasa por un circuito, mientras que la sobrecarga esta caracterizada por un aumento de cierta duración de dicha intensidad de corriente. Las protecciones para los dos tipos de perturbación tienen diferentes características.

Son varias las causas por las cuales se origina una sobrecarga, entre ellas se puede citar a las sobrecargas causadas por fallas en el sistema, condiciones de emergencia, en las cuales los cables soportan una carga superior a la nominal por un determinado tiempo, etc.

Las causas de todas las sobrecargas son exteriores al cable, no existen causas internas que puedan provocar una sobrecarga, ya que los defectos interiores de los cables conducen muy rápidamente a cortocircuitos, que son detectados por protecciones apropiadas.

Las sobrecargas en los cables, disminuye la vida del aislamiento. En caso de una sobrecarga de larga duración, el calentamiento producido, puede ocasionar una perforación del aislamiento, provocando su destrucción total, entonces es necesaria la protección de los cables contra las sobrecargas.

Los relés térmicos tienen una característica muy dependiente de la intensidad de corriente, con gran constante de tiempo, por lo que constituye el dispositivo ideal de protección contra las sobrecargas, de esta manera se protegen los cables contra cualquier elevación peligrosa de la temperatura, que es la consecuencia más directa de las sobrecargas. Se trata esencialmente de una protección térmica, ba

sada en la medición directa o indirecta de la temperatura - del cable que se ha de proteger, permitiendo además la utilización racional de la capacidad de sobrecarga del mismo.

Los relés térmicos reproducen lo más fielmente posible la temperatura del cable, y entran en funcionamiento cuando se sobrepasa la temperatura admisible de éste. La constante de tiempo o de calentamiento del relé térmico, se elige aproximadamente igual a la del cable, de forma que el calentamiento de éste sea reproducido lo más fielmente. Siendo iguales las inercias térmicas del cable y del relé, resulta que el cable no se desconectará para sobrecargas admisibles de corta duración, por el contrario, gracias a la memoria térmica propia de los relés utilizados, el cable - queda fuera de servicio en caso de sobrecargas intermitentes que le llevan a su temperatura máxima admisible.

En caso de no tener el relé la constante térmica igual a la del cable, éste se deberá calibrar con una constante térmica menor que la del cable a ser protegido.

### 3.2.1 RELES TERMICOS DIRECTOS

El relé térmico directo es un relé de protección contra sobrecargas peligrosas de alternadores, motores transformadores y cables.

En servicio debe asegurar la plena utilización del cable a proteger, pero desconectar éste, cuando se sobrepase la temperatura admisible fijada como es natural previamente y de acuerdo a la capacidad térmica que pueda - soportar el cable. Si la temperatura del cable se dá sobre la temperatura ambiente, el relé esta provisto de dispositivo de compensación de ésta temperatura, es decir mide así - la diferencia de temperatura, aunque también es posible que el relé mida la temperatura efectiva del cable, cualquier - variación de la temperatura del ambiente, es cancelada por

el sistema de compensación, si el relé no tiene este sistema es necesario que el relé y el cable a protegerse estén expuestos a la misma temperatura ambiente.

En la figura 3.2 se observa las características de los tiempos de desconexión, en función de la intensidad  $I_{60}$  con constantes de tiempo de 15, 30 y 45 minutos de un relé térmico de un cierto fabricante.

Se denomina intensidad  $I_{60}$  a la corriente con la cual el relé alcanza en servicio continuo una sobreelevación de temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ ., ésta es una indicación estandar (1)

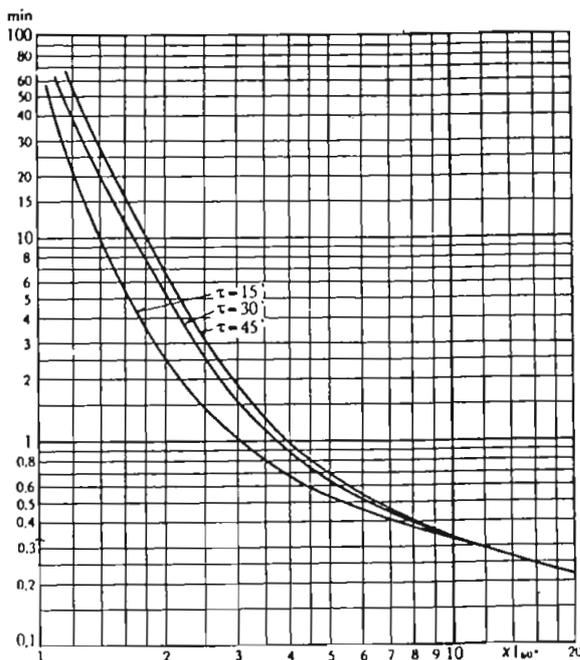


FIG. 3.2 Tiempos de desconexión de un relé térmico en función de la  $I_{60}$ .

Este tipo de relé esta constantemente reco-

rrido por la misma corriente que atraviesa el cable, y sometido al mismo calentamiento de éste, por lo tanto el relé - tiene en cuenta la carga previa. Por esta razón, para un cable frío, el relé puede tolerar cierta sobrecarga determinada, pero impedir esta misma sobrecarga, cuando haya un cable caliente.

El tiempo de desconexión del relé es tanto más corto, cuanto más elevada es la sobrecarga y cuando más pequeña sea la temperatura a la que deba efectuarse la desconexión.

El relé siempre está destinado a la protección de una parte bien determinada del sistema, y no puede ser por lo tanto utilizado con otros relés para el escalonamiento de tiempos. Su corriente nominal se regula de acuerdo con la del cable que va a protegerse. El relé térmico está construido de forma que pueda resistir las corrientes de corto circuito.

Cuando las constantes de tiempo del relé y del cable son iguales, se lo denomina imagen térmica, ya que el relé reproduce fielmente las variaciones de temperatura del cable. Si las dos constantes son diferentes, y la del relé es más pequeña que la del cable, el relé se calienta y se enfría más rápidamente que aquel. En estas condiciones cuando haya una sobrecarga, el relé desconectará el cable antes que el límite de temperatura fijada se haya alcanzado, lo cual resulta ventajoso, ya que dá un margen de seguridad, es decir :

$$\tau_{\text{relé}} \leq \tau_{\text{cable}}$$

### 3.2.2 RELES TERMICOS SECUNDARIOS

El relé térmico secundario tiene una cons-

tante de tiempo mayor a la del directo puede llegar hasta 110 minutos, estos relés son conectados a través de transformadores de corriente. Este relé lo mismo que el relé directo provoca la desconexión del cable cuando se alcanza la temperatura máxima admisible, o en estaciones vigiladas activan alarmas para que el personal pueda actuar de la forma más conveniente, además sirven como instrumentos medidores de la temperatura. Se construyen para una corriente nominal de cinco amperios, y debe ajustarse siempre a la corriente del cable protegido a través del transformador de corriente.

La corriente del primario del transformador de corriente, es generalmente igual o un poco más elevada que la corriente nominal del cable, de ello resulta que a la carga normal la corriente secundaria será 4 o 5 amperios, los taps de ajuste de éste relé están graduados para este tipo de regulación.

Los relés térmicos secundarios tienen las siguientes constantes de tiempo, 20, 30, 40, 80, y 110 minutos; ésta constante de tiempo como ya se mencionó, es el tiempo necesario para que en un ensayo de calentamiento con la corriente nominal, el conductor alcance el 63% de su temperatura final o máxima.

La constante de tiempo de éstos relés, también deberá ser menor o igual a la del cable protegido, por lo general siempre deberá ser menor para tener un mejor margen de seguridad.

### 3.2.3 CORRIENTE LIMITE DE DESCONEXION

No resultaría racional que en los relés térmicos directos, esperar en caso de cortocircuito, que la desconexión se produzca cuando el relé haya alcanzado la temperatura límite de desconexión.

Para corrientes muy superiores a la de servicio, se debe prever una desconexión instantánea por medio de un dispositivo adecuado; en éstos relés térmicos, se ajustará la desconexión instantánea por corriente límite, a un valor algo superior a la corriente de servicio más elevada que pueda aparecer en el cable.

#### 3.2.4 SELECCION DE RELES TERMICOS

Para la selección de los relés térmicos, se debe determinar principalmente las siguientes características:

- 1 Constante de tiempo
- 2 Corriente nominal

Constante de tiempo.- Debe elegirse una constante de tiempo que sea igual o inmediatamente inferior a la del cable.

Corriente nominal.- Dentro de la serie normalizada de los relés térmicos directos, se elegirá aquel cuya corriente nominal sea igual o inmediatamente inferior a la del cable. En este último caso, resultará siempre posible con la ayuda de los taps de ajuste, regular el relé de forma que se obtenga la misma elevación de temperatura para todas las corrientes comprendidas entre 1 y 2 veces la corriente nominal.

Los relés térmicos son muy variados y cada una de las firmas constructoras de relés, dispone de sus propios procedimientos para calibrarlos.

#### 3.3 PROTECCION CONTRA SOBREVOLTAJES

Cuando el aumento de tensión sobrepasa el máximo voltaje nominal del sistema, se dice que existe un sobrevoltaje, éstos sobrevoltajes pueden producir la per-

foración del aislamiento de los cables, con lo cual se tendría al cable en condiciones de falla.

Para evitar los daños como consecuencia de las sobretensiones, la mejor protección son los pararrayos. Los pararrayos deben estar conectados permanentemente al sistema, pero han de entrar en funcionamiento únicamente cuando la tensión alcance un valor igual o mayor al voltaje de descarga del pararrayo.

Los cables no están expuestos a descargas atmosféricas directas, todas las sobretensiones de origen interno o externo se propagan hacia los cables por medio de las líneas de transmisión aéreas, en forma de ondas viajeras. El estudio de sobretensiones de origen interno y externo pueden consultarse en las referencias 2.y 3.

### 3.3.1 EL PARARRAYO

Es un dispositivo para proteger aparatos eléctricos de altas tensiones transitorias, se encuentra conectado entre fase y tierra. Los pararrayos pueden ser clasificados en dos grupos:

- Pararrayo tipo expulsión
- Pararrayo tipo válvula

Pararrayo tipo expulsión.- Son aquellos equipos constituidos por electrodos dentro de una cámara que permite confinar el arco, y ponerle en contacto con material envolvente desionizadora del arco. Dentro de éste tipo se distinguen dos clases:

- Tubo protector, con rangos de voltaje nominal comprendido entre 13.8 KV y 138 KV.
- Clase distribución con rangos de aplicación entre 3 KV y 18 KV.

Pararrayo tipo válvula.- Son aquellos pararrayos constituidos por un resistor que, debido a sus características no lineales corriente-voltaje, limita el voltaje a través de los terminales del pararrayo, durante el flujo de corriente de descarga, y contribuye a limitar el flujo de corriente subsiguiente que puede fluir al voltaje normal de frecuencia industrial. Dentro de éste tipo de pararrayo se distinguen las siguientes clases:

- Pararrayo tipo estación.- Con rangos de voltaje nominal comprendidos entre 3 KV y 684 KV
- Pararrayo tipo intermedio.- Con rangos de voltaje nominal - comprendidos entre 3 KV y 120 KV.
- Pararrayo tipo distribución.- Con voltajes nominales entre 1 KV y 30 KV, pudiendo encontrarse hasta de 75 KV.

### 3.3.2 SELECCION DE PARARRAYOS

Básicamente la selección de pararrayos consiste en determinar las siguientes características:

- Voltaje nominal
- Corriente de descarga
- Localización

Voltaje nominal.- Es el valor efectivo de la tensión alterna a frecuencia industrial a la cual se efectúa la prueba de trabajo y que puede aparecer en el pararrayos en forma permanente sin dañarlo. La tensión nominal del pararrayo se obtiene como:

$$V_n = K_e V_{max} \quad (3.01)$$

en donde

$V_{max}$  = Tensión máxima del sistema entre fases

$K_e$  = Factor de conexión a tierra

En la práctica se obtiene, que para siste-

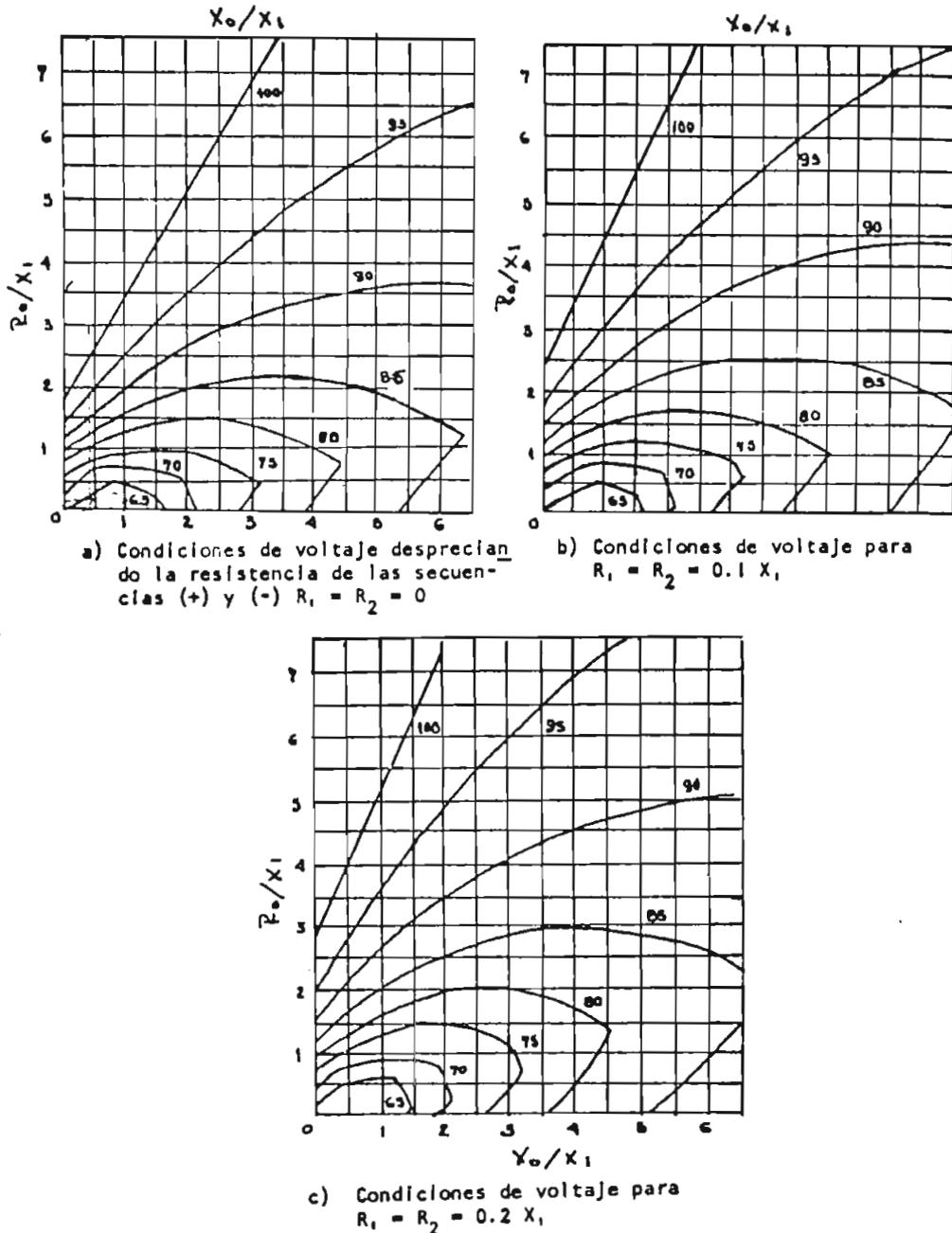


Fig. 3.3 Máximo voltaje de fase a tierra en localización de fallas para sistemas con neutro puesto a tierra bajo cualquier condición de falla.

"El coeficiente de puesta a tierra ( $K_e$ ) se define como la relación entre el voltaje fase-neutro que se presenta en las fases sanas durante una falla fase tierra - respecto del voltaje fase fase que se presenta una vez removida la falla. Este coeficiente puede ser calculado, mediante el empleo de componentes simétricas o usando las curvas indicadas en la figura 3.3 " (2).

mas con neutro sólidamente conectado a tierra,  $X_0/X_1 \leq 3$  y  $R_0/X_1 \leq 1$ , éstos valores se interceptan en la curva marcada - 80%, es decir  $K_e = 0.8$

Para sistemas con neutro flotante o conectado a tierra con una impedancia de alto valor  $X_0/X_1 \leq 0$ , entonces los valores se interceptan en la curva de 100% y  $K_e = 1.$ (2)

Magnitud de la corriente nominal de descarga.- La magnitud de la corriente de descarga, depende del grado de apantallamiento de la instalación, así tenemos:

- Efectivamente apantalladas
- No efectivamente apantalladas

Instalaciones efectivamente apantalladas.- Son aquellas instalaciones que tienen apantallamiento adecuado, y que además las líneas de transmisión que se conectan a la subestación, tienen apantallamiento en por lo menos 800 metros.

Para este caso la corriente de descarga puede determinarse como:

$$I_d = \frac{2BIL - ed}{Z_c'} \quad (3.02)$$

en donde

$I_d$  = Corriente de descarga

$BIL$  = Nivel básico de aislamiento

$ed$  = Voltaje de descarga del pararrayo

$Z_c'$  = Impedancia característica de la línea

Mediante la expresión se ha determinado que para voltajes del sistema entre 69 KV y 138 KV puede tomarse como corriente de descarga 5 KA, para voltajes entre 230KV y 345 KV puede emplearse 10KA, para voltajes de 500KV 15 KA -

y para 700 KV, 20 KA.

Instalaciones no efectivamente apantalladas.- La experiencia obtenida en este campo indica que un valor conservativo de corriente de descarga para coordinación del aislamiento, debe ser de 20 KA.(4)

Localización.- La localización del pararrayo es tan importante como seleccionar las características para proporcionar una protección efectiva.

La protección de un pararrayo, es máxima en el lugar de la instalación, y disminuye en forma gradual a medida que se aleja del pararrayo hacia los dos lados, de tal forma que hay una distancia que proporciona un valor de protección mínimo requerido, y que determina la zona de protección y para valores de distancia mayores, el pararrayo ya no protege en la medida que se requiere. En el caso de los cable, debe preocuparse que el pararrayo este lo más cerca posible de la unión línea cable.

El efecto de distancia, es despreciable para ondas causadas por maniobra de interruptores, debido a que el frente de onda tiene una pendiente muy baja (2).

Para el cálculo de la distancia de protección del pararrayo se parte de la ecuación:

$$V(x) = V_p + 2 S t \quad (3.03)$$

siendo

$$t = l/v$$

$$S = \frac{de}{dt}$$

entonces

$$V(x) = V_p + 2 S l/v$$

$$l = \frac{(V(x) - V_p) v}{2 S} \quad (3.04)$$

en donde

$l$  = Distancia de protección (m)

$V(x)$  = Máxima tensión permisible en el cable por proteger (KV)

$V_p$  = Nivel de protección del pararrayo (KV)

$S$  = Pendiente del frente de onda (KV/useg.)

$v$  = Velocidad de propagación de la onda en m/useg.

y siendo

$$S = \frac{100}{12} V_n \quad \text{KV/useg} \quad (3.05)$$

Esto hasta una tensión nominal de 240 KV. Para tensiones mayores el valor de  $S$  es 2000 KV/useg.

Además de éstas características básicas para la selección del pararrayo, es también importante tomar en consideración las siguientes:

- Determinación de los niveles de protección del pararrayo. Los niveles de protección frente a ondas de impulso y de manobra, deben ser obtenidas de los fabricantes de pararrayos. La tabla 3.1 indica las características eléctricas de protección de pararrayos tipo estación de un cierto fabricante.
- Determinar la rigidez dieléctrica del cable protegido. Conociendo los valores de voltaje que pueden presentarse en el cable protegido y el nivel de protección del pararrayo, es te margen de protección intenta cubrir las condiciones impredecibles, incluyendo aquellas circunstancias excepcionales tales como corrientes anormalmente altas o de frente muy escarpado.

CARACTERISTICAS DE PARARRAYOS TIPO ESTACION

Voltaje Nominal del Pararrayo	Maximo Voltaje Del Cir. fase-fase KV Rms.		Máxima descarga para el frente de onda.	Máxima descarga para una onda del 100 % 1.2 x 50	Máxima descarga para onda de maniobra.	Descarga mínima a 60 Hz Rms KV	Máximo Voltaje de descarga con corrientes de descarga de 8 x 20					
	Neutro no aterrizado	Neutro efectivamente aterrizado					100% Pararrayo	80% Pararrayo	1.5 KA KV Cresta	3 KA	5 KA	10 KA
60	60	75	170	144	136	81	102	110	113	132	150	198
72	72	90	204	173	163	97	122	152	141	159	180	226
90	90	112	255	216	203	122	153	166	176	199	225	283
96	96	121	272	231	218	130	163	177	188	212	240	301
108	108	136	305	260	245	146	183	199	212	238	270	339
120	120	150	339	289	272	162	204	221	235	265	300	377
152	132	166	373	317	299	178	224	243	259	291	330	414
144	144	180	407	346	326	194	244	265	282	318	360	452
168	168	200	475	404	381	227	285	309	329	371	420	528
180	180	225	509	430	408	243	305	331	353	397	450	565
192	192	240	543	460	435	259	326	353	376	424	480	605
204	204	255	577	490	462	276	346	375	400	450	510	640
216	216	270	611	519	490	292	367	397	424	476	545	678
228	228	285	640	547	515	308	387	419	446	503	570	716
240	240	300	679	577	542	324	407	441	470	530	605	754
258	258	322	693	620	584	348	438	474	505	569	650	810
254	264	330	709	635	597	356	448	485	517	582	663	829
276	276	345	742	664	624	375	468	507	540	609	690	867
288	288	360	774	692	651	389	489	529	564	635	725	904
300	300	375	806	721	678	405	509	551	588	662	755	942
312	312	390	838	750	706	421	530	574	611	688	780	980

Los mínimos márgenes de protección recomendables son, 20% para ondas de impulso, y 15% para ondas de maniobra. El margen de protección está definido por la siguiente relación. (4).

$$M_p = \frac{(\text{Rigidez dieléctrica del cable}}{\text{Nivel de protección del pararrayo}} - 1) 100 \quad (3.06)$$

La rigidez dieléctrica del cable se determina mediante pruebas de impulso.

- Evaluar el margen de protección que se presenta en el cable. Para evaluar si el aislamiento del cable está adecuadamente protegido, deben realizarse las siguientes comparaciones:

1 El máximo voltaje de frente de onda del cable, incluyendo un margen de protección del 20%, debe ser igual o menor que la rigidez dieléctrica del cable protegido frente a onda cortada.

2 El máximo voltaje de descarga en el cable, incluyendo un margen de protección del 20%, debe ser igual o menor que la rigidez dieléctrica del aislamiento del cable frente a onda completa (BIL).

3 El máximo voltaje de maniobra que se presenta en el cable, incluyendo un margen de protección del 15%, debe ser menor o igual que la rigidez dieléctrica del cable protegido, frente a sobretensiones de maniobra (SIL).

- Márgenes de protección no adecuados.- Cuando los márgenes de protección no resultan adecuados, es necesario reevaluar o tomar medidas alternativas como las siguientes:

- 1 Selección de un pararrayo de mejor clase o de mejores - niveles de protección.
- 2 Cambio de localización del pararrayo, en orden a reducir la distancia de separación al cable protegido.
- 3 Disminución de los valores de sobrevoltajes en el sistema.
- 4 Incremento del nivel de aislamiento del cable.

Estas dos últimas medidas deben ser analizadas con mayor detalle, pues afectan directamente al costo del sistema.

### 3.3.3 EFECTO DE UN CABLE SOBRE EL FRENTE DE ONDA

A la entrada de un cable, el frente de la onda experimenta lo mismo que la amplitud, una modificación. En efecto, sea  $v$  la velocidad de propagación de la sobretensión anterior al punto de transición  $m$ , (figura 3.4), y  $t$  la duración de su frente. La longitud del frente de la onda será:

$$l = v t$$

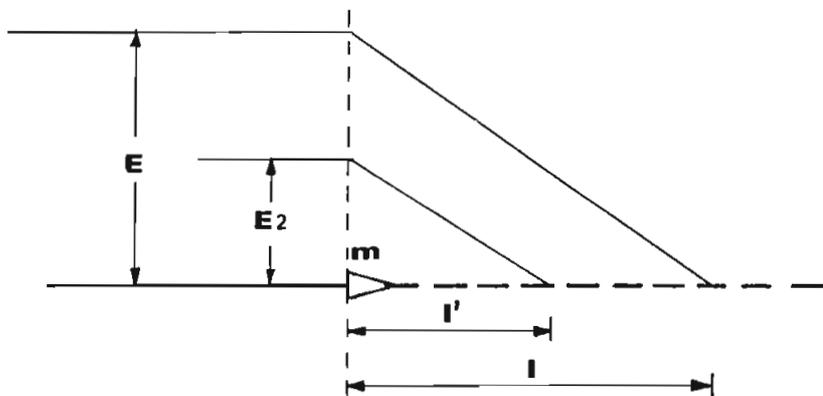


FIG. 3.4 Efecto que produce un cable sobre el frente de onda

Por otra parte, siendo E la amplitud de cresta, el gradiente de potencial de dicha onda incidente será  $dE/dl$ .

La cresta de onda incidente alcanzará, pues el punto de transición después de un tiempo  $t=l/v$ , y durante este mismo tiempo el comienzo de la onda transmitida, de amplitud  $E_2$  penetrará en el cable en una longitud  $l'=v'.t$ .

Ahora bien, como por las constantes dieléctricas del cable la velocidad de propagación en el cable es menor que la correspondiente a una línea aérea; así tendremos que:

$$l' = \frac{l}{\sqrt{K_r}}$$

por consiguiente, el gradiente de potencial de la onda transmitida resultará ser:

$$\frac{dE_2}{dl'} = \sqrt{K_r} \frac{2Zc_2'}{Zc_1' + Zc_2'} \times \frac{dE}{ds} \quad (3.07)$$

Se concluye entonces que un cable aplana el frente de la onda, reduciendo el gradiente de potencial.

### 3.4 PROTECCION CONTRA CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos tienen efectos desastrosos sobre los cables y por esta razón deben remediarse rápidamente, pues de lo contrario deterioran el aislamiento pudiendo hasta fundir los conductores y por consiguiente se produce la destrucción total del cable.

En los cables, los cortocircuitos se deben principalmente a la ruptura de la aislación causada

por el movimiento del terreno, infiltración de humedad, -  
corrosión química y electrolítica, etc.

### 3.5 PROTECCION DE SOBRECORRIENTE

Este método básico se utiliza ampliamente como protección primaria en cables de distribución y como protección de respaldo para cables de potencia o transporte; protegen contra fallas de fase y tierra. La protección de sobrecorriente es la más barata y simple aplicada a los cables.

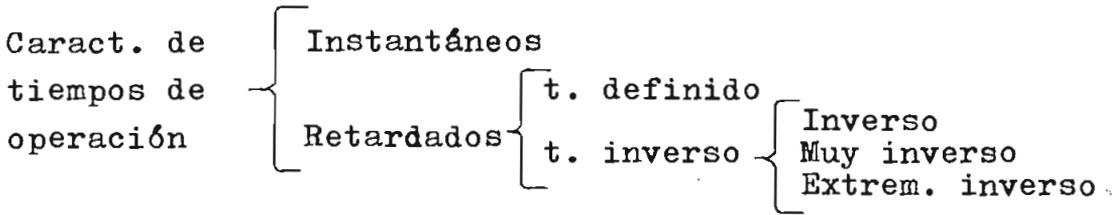
La práctica es utilizar generalmente un - conjunto de dos o tres relés de sobrecorriente para la - protección de fallas entre fases y un relé de sobrecorriente separado para fallas monofásicas, sin embargo, solo algunas veces se confía a los relés de fase para la protección contra todo tipo de fallas.

Los relés de sobrecorriente poseen básicamente dos variables que es necesario considerar para una correcta clasificación.

- 1.- Nivel de corriente mínima de operación y
- 2.- Características de tiempos de operación.

La corriente mínima de operación, se acostumbra a llamar "corriente de pick - up", es aquella que produce justamente el cambio de estado del relé.

Las características de tiempos de operación son variadas y se pueden resumir en el siguiente - cuadro.



Esto queda definido aproximadamente por las siguientes ecuaciones:

- Instantáneos..... $t \approx 0$  para  $I \geq I_{op}$ .
- Tiempo definido..... $t = K$  para  $I \geq I_{op}$ .
- Tiempo inverso..... $t = k/I$
- Tiempo muy inverso..... $t = k/I^2$
- Tiempo extremadamente inverso..... $t = k/I^3$

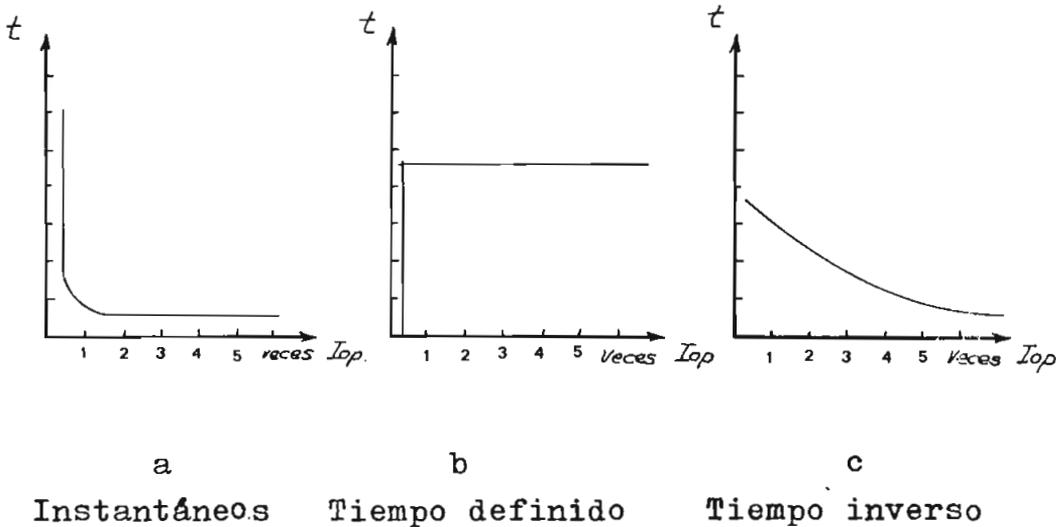


Fig. 3.5 Curvas de relés de sobrecorriente.

Para su calibración se necesita conocer la corriente máxima de falla, corriente mínima de falla y la corriente máxima de carga. La relación entre corriente mínima de falla y la corriente máxima de carga debe ser lo suficientemente alta para permitir que operen correctamente los relés accionados por sobrecorriente.

La máxima corriente de falla ( $I_{fmax}$ ) viene dada por:

- Máxima generación
- Máximo número de circuitos en paralelo
- Normalmente falla trifásica

La mínima corriente de falla ( $I_{fmin}$ ) viene dada por:

- Mínima generación
- Mínimo número de circuitos en paralelo
- Normalmente falla fase tierra

La máxima corriente de carga esta dada por:

- Máxima generación

### 3.5.1 PROTECCION DE SOBRECORRIENTE INSTANTANEA

En los sistemas eléctricos de potencia y - por tanto para cables de alto voltaje, la protección instantánea de sobrecorriente prácticamente no se usa como esquema de protección, sino como elemento constitutivo de otra - protección para combinar su característica con otro elemento, los tiempos de operación que se consigue son entre 10 y 60 mseg.

Una desventaja de este tipo de relé es que teniendo una operación tan rápida es probable que el relé - pueda operar con manifestaciones transitorias, más allá - del intervalo normal de ajuste. (5)

### 3.5.2 PROTECCION DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO DEFINIDO

Esta protección consta de un relé instantáneo seguido por un relé contador de tiempo, cuyos contactos energizan la bobina del disyuntor. Este relé tiene un

ajuste más preciso del tiempo.

Este tipo de protección es a menudo utilizado en cables de distribución con una sola alimentación, la figura 3.6 ilustra el principio.

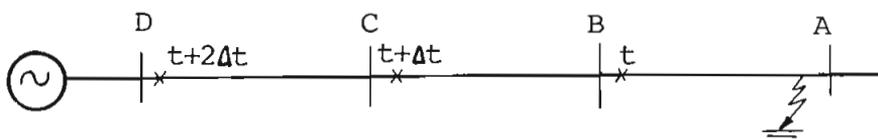


FIG. 3.6 Sistema radial con protección de sobrecorriente de tiempo definido.

Al aumentar el número de relés conectados en serie, aumenta hacia la fuente el tiempo de operación, en consecuencia, las fallas más severas, que se producen cerca de la fuente de generación se aíslan dentro de un intervalo de tiempo más largo, lo que constituye una desventaja.

Se aplica principalmente en sistemas donde no varía mucho los niveles de falla de los distintos lugares.

El ajuste de tiempo de los relés difiere en un intervalo conocido como paso de atraso en el tiempo ( $\Delta t$ ), el cuál es un factor de: tiempo de aislamiento de la falla por el disyuntor, tiempo de cierre del relé, etc. Normalmente se tiene que.

$$0.3 < \Delta t < 0.5 \text{ seg.}$$

Un valor típico de tiempo para  $t$  es 0.25 seg. (tiempo para el relé ubicado en B, figura 3.6).

### 3.5.3 PROTECCION POR DISCRIMINACION POR CORRIENTE

Los relés por discriminación por corriente aprovechan de que la corriente de falla varía con la posición de la falla, causados por la diferencia de impedancia entre la fuente y la falla.

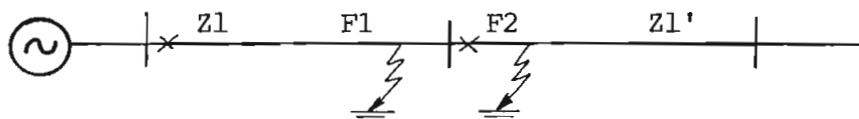


FIG. 3.7 Sistema radial con discriminación por corriente.

La discriminación puede ser aplicada solamente donde hay una diferencia apreciable de impedancia entre los disyuntores, es decir, según la figura 3.7  $Z1$  tendrá que ser diferente que  $Z1'$ .

Sin embargo, hay dos puntos importantes - los cuales afectan este método de protección.

- No se pueden distinguir entre una falla en  $F1$  y una falla en  $F2$ , ya que las distancias entre estos dos puntos puede ser de unos pocos metros, correspondiendo a un cambio en la corriente de falla muy pequeño.
- En la práctica podría haber variaciones en el nivel de - falla de la fuente (condiciones de máxima y mínima generación), por lo tanto, la corriente de cortocircuito también varía, de esta manera, el relé, si se encuentra calibrado para un nivel de falla alto de la fuente no podría

proteger para un nivel bajo de la misma fuente.

### 3.5.4 PROTECCION POR DISCRIMINACION DE TIEMPO Y CORRIENTE

Los dos métodos analizados anteriormente cada uno tiene una desventaja fundamental, en el caso de la protección de tiempo definido, vemos que para las fallas más severas el tiempo de despeje de la falla es mayor; la discriminación por corriente puede ser aplicada solamente donde hay una diferencia de impedancia notable entre los dos disyuntores concernientes.

La discriminación por tiempo y corriente se puede lograr con los relés de tiempo inverso.

Por la característica de tiempo de éstas protecciones, que mientras mayor sea la corriente con menor tiempo operan, tiene amplia aplicación. Esta característica se obtiene empleando elementos tipo disco de inducción.

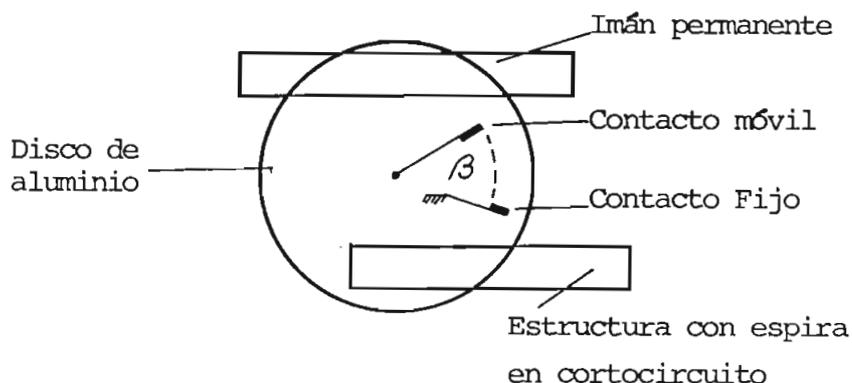


Fig. 3.8 Relé tipo inducción de sobrecorriente.

El ángulo  $\beta$  que muestra la figura 3.8 corresponde al recorrido del contacto móvil y sirve para ajustar la corriente mínima de operación. Mientras mayor es el ángulo  $\beta$  más se levanta la curva de la figura 3.5c

Los relés de tiempo inverso se usan cuando la impedancia entre la protección y la fuente de generación es pequeña comparada con la impedancia del cable a proteger, es decir, hay una apreciable diferencia entre la corriente de falla al final del cable.

$$I = \frac{V_f}{Z_s + Z_l} \quad (3.08)$$

y la corriente para fallas próximas al extremo cercano

$$I = \frac{V_f}{Z_s} \quad (3.09)$$

Como los relés que se usan tienen una característica inversa de la forma de operación,  $I_t = k$ , resulta que la razón entre el tiempo " $t_1$ " al comienzo del tramo del cable y al final " $t_2$ ":

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_l} \quad (3.10)$$

Cuando se emplea este tipo de protecciones para fallas a tierra, se consigue una mejor selectividad si se tienen puntos a tierra en cada una de las subestaciones.

Las desventajas en la aplicación de las protecciones de tiempo inverso son:

- Cuando la razón  $t_1/t_2$  no es apreciablemente menor que la

unidad, es decir cuando la corriente de cortocircuito no -  
varía grandemente.

- Cuando la impedancia de la fuente  $Z_s$  varía apreciablemente con la capacidad de generación conectada al servicio.

Cuando es difícil obtener un tiempo de paso-suficiente debido al bajo valor de la impedancia del cable - se hace necesario aplicar relés muy inversos.

### 3.5.5 PROTECCIONES DIRECCIONALES

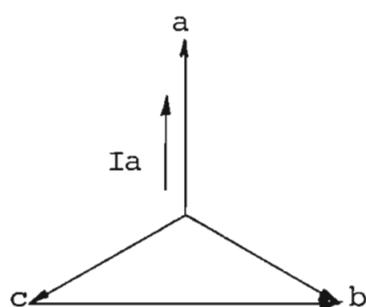
No puede lograrse protección selectiva con - sistemas de protección de sobrecorriente graduados con respec - to al tiempo, en los sistemas de anillo o de lazo, así como - tampoco en los circuitos radiales con alimentación de ener - gía en los dos extremos, el objeto de esta protección direc - cional, es reconocer en que dirección se encuentra un defec - to, generalmente constituye uno de los elementos de una pro - tección compuesta. Se emplean relés de potencia, que miden - una potencia monofásica ó trifásica; activa, reactiva o com - puesta, en los cuales el voltaje del sistema es usado como - referencia para establecer la dirección relativa de la co - rriente de falla. Estos relés direccionales solamente cie - rran sus contactos cuando la corriente de falla circula en - un sentido determinado.

#### 3.5.5.1 RELES DIRECCIONALES DE SOBRECORRIENTE Y SUS CONEXIO - NES.

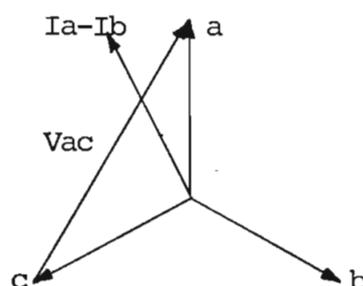
Las conexiones de los relés deben hacerse de tal manera que las corrientes y los voltajes aplicados al re - lé durante las diversas condiciones de falla que pueden ori - ginarse en el cable protegido, proporcionen al relé un par - de operación positivo y suficientemente grande. Para algu - nas fallas, el voltaje y el factor de potencia involucrado -

pueden ser extremadamente pequeños, condiciones que resultan en un par de torsión despreciablemente pequeño. Para superar esto y asegurarse de que siempre se tendrá disponible un par de torsión suficientemente grande, cada relé se alimenta con corriente y voltaje, como se describe a continuación.

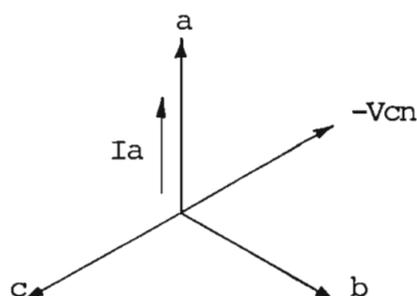
Las cuatro conexiones que más se utilizan se ilustran en la tabla 3.2, y sus diagramas vectoriales en la figura 3.9



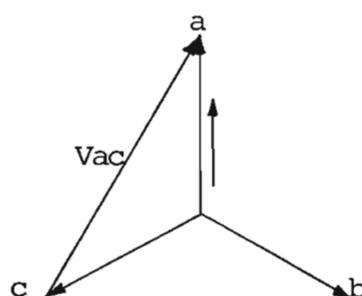
Conexiones en cuadratura  $90^\circ$



Conexiones a  $60^\circ$  N. 1



Conexiones a  $60^\circ$  N. 2



Conexiones a  $30^\circ$

FIG. 3.9 Diferentes conexiones de los relés direccionales monofásicos para el relé A.

Las conexiones de los elementos direccionales se describe en forma conveniente y accesible, en fun -

ción del ángulo, por el cual el factor de potencia unidad de la corriente de carga balanceada que pasa en la dirección - de disparo, está en adelanto con respecto al voltaje aplicado a la bobina de potencial del relé, dando debida consideración a la polaridad de las bobinas del relé.

Tabla 3.2 DIFERENTES CONEXIONES PARA LOS RELES DIRECCIONALES.

Conexiones	Relé A		Relé B		Relé C	
	V	I	V	I	V	I
90	Vbc	Ia	Vca	Ib	Vab	Ic
60 Nro. 1	Vac	Ia-Ib	Vba	Ib-Ic	Vcb	Ic-Ia
60 Nro. 2	-Vcn	Ia	-Van	Ib	-Vbn	Ic
30	Vac	Ia	Vba	Ib	Vcb	Ic

### 3.5.6 AJUSTES DE RELES DE SOBRECORRIENTE

Una vez elegido y aplicado un determinado tipo de protección de sobrecorriente, será necesario determinar los ajustes que deberá tener cada relé, de modo de obtener que el sistema de protecciones sea rápido y a la vez selectivo.

Es conveniente puntualizar algunos términos empleados en la aplicación de relés de sobrecorriente.

- a) Tap.- Terminales que permiten variar la sensibilidad del relé permitiendo que opere con diferentes valores de corriente. Normalmente, el Tap está designado en amperios, que indican el valor de corriente mínima que debe producir la operación del relé.
- b) Pick - up o corriente mínima de operación.- Es aquella corriente mínima que produce el cambio de posición de los contactos (cierre de los contactos) del relé.

- c) Lever.- Indicación de la posición del tope que controla la posición hasta la operación o cierre de contactos, y que por lo tanto permite variar los tiempos de operación.
- d) Sobrecarrera (overshoot) este concepto se deriva del hecho que los relés tienen cierta inercia y que una vez que ha desaparecido su corriente de operación, puede todavía producirse el cierre de contactos dependiendo de cuan cerca estén estos de su posición de cierre.

La sobrecarrera es, en el caso de los relés electromagnéticos, el tiempo que puede seguir girando el disco luego de que la falla ha sido despejada por otro relé, antes de cerrarse sus contactos. En el caso de los relés estáticos, es el tiempo tomado por el condensador del circuito de tiempo en descargarse bajo su nivel de operación, luego que la falla ha sido despejada.

Este tiempo varía por lo general de 0.03 a 0.1 segundos.

Tiempos de paso.- Para obtener selectividad en este tipo de protección, se superponen las curvas de operación de modo que los relés más lejanos a la fuente de generación operen en los tiempos más cortos. Como interesa que todos los tiempos de operación sean lo más cortos posibles, una de las características que deben cumplir una especificación de ajustes bien hecha, es que, la distancia entre curvas sea mínima pero sin posibilidades de tener superposición entre ellas.

A este tiempo mínimo que es necesario dejar entre las curvas es lo que se denomina "tiempo de paso" o "paso de coordinación".

Dependiendo del tipo de disyuntor usado y considerando los errores, se toma por lo general en la práctica este tiempo igual a 0.3 segundos.

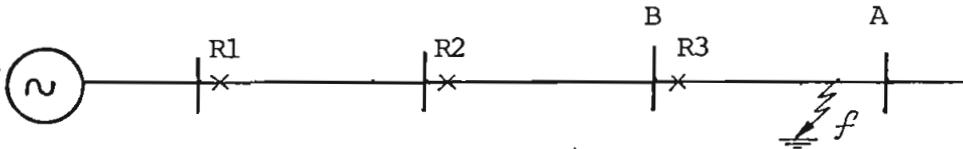


Fig. 3.10 Alimentador radial con protección de sobrecorriente.

El relé debe detectar fallas por lo menos - hasta el extremo final de la sección de circuitos siguiente a la que se está protegiendo. Por ejemplo, en la Fig. 3.10 el relé R1 deberá detectar fallas mínimas en B. es decir al final de la sección protegida por R2.

El Tap debe elegirse de modo que el Pick Up sea mayor que la corriente máxima de carga y detecte las fallas mínimas en respaldo.

$$I_{\text{operac. min}} (R3) = \frac{1}{3} (I_f \text{ min A}) \text{ y lever mínimo}$$

$$I_{\text{operac min}} (R2) = I_{\text{operac min}} (R3)$$

$$t_{\text{operac}} (R2) = t(R3) + 0.3 \text{ seg}$$

$t (R3)$  = tiempo del relé R3 para máxima corriente de falla en B.

0.3 seg = tiempo de retardo para coordinación ó tiempo de paso.

El lever (ajuste de tiempo) debe elegirse dando el tiempo más corto posible al relé más alejado de la fuente. Si éste no coordina con otros elementos (fusibles, relés térmicos, etc). Este lever se recomienda que sea  $1/2$ .

El resto de los relés deberá coordinarse con los que le anteceden, dándole el tiempo de paso (0.3 segundos) más el tiempo del relé con que se coordina, en el punto que corresponda a la máxima falla. Esta última se considera generalmente una falla trifásica, con máxima generación justo después de la siguiente barra. Por ejemplo en la figura 3.10, el lever del relé R2 debe calcularse con el tiempo del relé R3 más 0.3 seg., con una falla máxima en f (barra siguiente al relé R2).

t operac mín. (R2)      define lever de (R2)

### 3.6 PROTECCION DIFERENCIAL

La protección diferencial se emplea cuando se trata de proteger un equipo en particular, este es el caso de los cables.

Esta protección es la más importante que se puede aplicar a los cables para fallas fase-fase o fase-tierra.

Este tipo de protección es altamente selectiva, no tiene zona muerta y puede ser tan rápida como se quiera. Tiene aplicación esta protección para cables cuya potencia de transferencia sea superior a 8.000 KVA. (7)

### 3.6.1 PROTECCION DIFERENCIAL LONGITUDINAL

Una protección diferencial longitudinal compara magnitudes derivadas de la corriente de entrada y de salida del elemento protegido, en tal forma que, para condiciones de falla interna, el equilibrio se altera y la protección opera, esto se puede apreciar en las figuras 3.11 y - 3.12.

Al aplicar la protección diferencial a los cables, se precisa que todo el juego de transformadores de corriente sean idénticos.

Esta protección es totalmente independiente de cualquier otra, es decir no necesita estar coordinada - con ninguna.

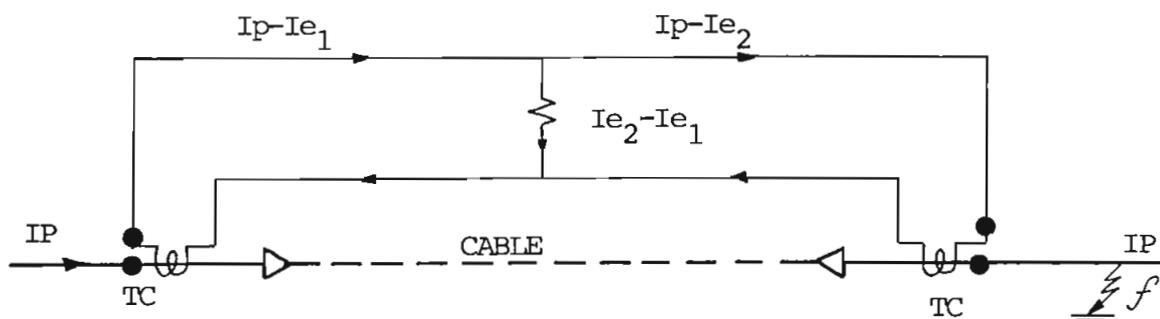


Fig. 3.11 Condiciones para una carga o falla externa.

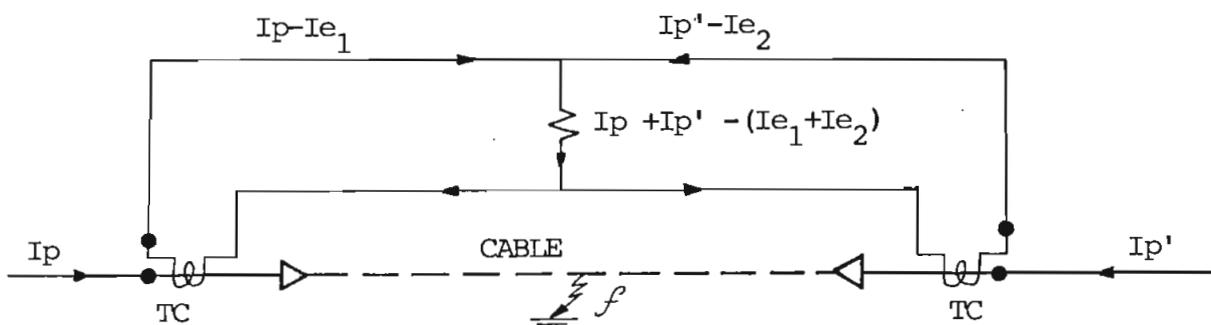


Fig. 3.12 Condiciones para una falla interna.

La corriente secundaria del transformador de corriente es igual a la corriente primaria menos la corriente magnetizante  $I_e$ .

La corriente que atraviesa el relé para condición de falla o carga externa es la diferencia de las corrientes magnetizantes ( $I_{e2} - I_{e1}$ ) con el mismo tipo de transformador de corriente se espera que  $I_{e2} = I_{e1}$ , con lo cual la corriente por el relé es cero y la protección no opera, si se produce una falla interna, las corrientes secundarias de los TC atravesarán el relé y lo harán operar.

En la práctica, sin embargo las TC no tiene el mismo primario y secundario, discrepan en variaciones de construcción, saturación, y las diferencias en la carga conectada al secundario causados por la diferente longitud del TC al relé, diferencia de burden de los instrumentos conectados en los secundarios de los TC con lo cual  $I_{e2} \neq I_{e1}$ , esta diferencia de corriente  $I_{e2} - I_{e1}$  normalmente pequeña, puede ser apreciable cuando ocurre un cortocircuito externo con lo cual un relé de sobrecorriente podría operar indebidamente.

El relé diferencial de porcentaje salva dicho problema sin sacrificar la sensibilidad, éste relé contiene bobinas de restricción y sensibiliza al relé para corrientes altas provocadas por fallas externas.

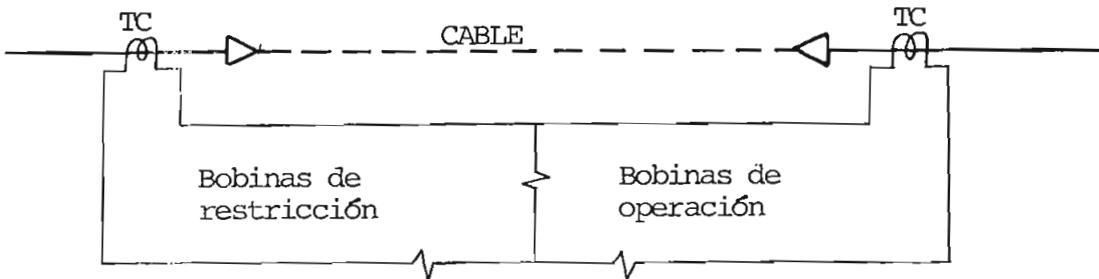


Fig. 3.13 Relé diferencial de porcentaje.

Las protecciones diferenciales hasta aquí enunciadas no pueden utilizarse para cables con longitudes que sobrepasan algunos centenares de metros, las razones - de esto son:

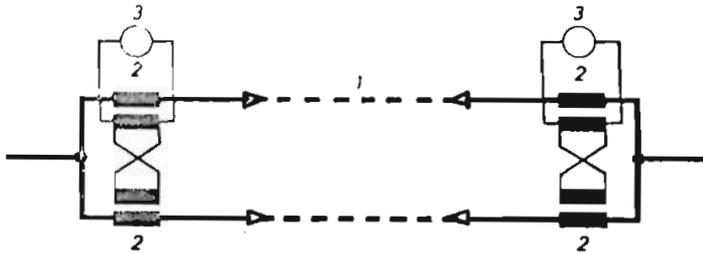
- a) A causa de la necesidad, para cables de gran longitud de instalar el relé diferencial de porcentaje en una de sus extremidades, el TC del extremo más alejado está - cargado por la resistencia de las líneas de conexión por lo que existe el peligro de saturación de éste transformador y de la consiguiente desconexión indebida.
- b) A causa de la diferencia de carga de los dos transformadores de corriente, las corrientes de magnetización son diferentes y la corriente de compensación resultante - circula por el circuito diferencial, lo que aumenta el peligro de desconexiones intempestivas.
- c) En caso de cortocircuito aparece, en los bornes del TC más alejado, una tensión que puede resultar peligrosa - para las líneas de conexión, ya que esta tensión es relativamente elevada.
- d) La probabilidad de una interrupción de las líneas de conexión, crece con su longitud, de lo que resulta no solamente una tensión elevada en los bornes del TC sino - que el dispositivo de protección funciona instantánea - mente y provoca la desconexión intempestiva.

### 3.6.2 PROTECCION DIFERENCIAL TRANSVERSAL

La protección diferencial transversal, llamada también equilibrada, compara las intensidades de dos o más circuitos en paralelo; como se ilustra en la Fig 3.14 está basada en que tratándose de dos o más circuitos en -

paralelo de iguales características debe circular por todos ellos la misma intensidad, de forma que no pasará corriente por el relé mientras no exista un desequilibrio, que será - indicio de avería.

Esta protección tiene la ventaja de que también funciona en caso de interrupción de un circuito, que - no quedaría protegido con el sistema diferencial longitudinal.



1. Cable a proteger
2. Transformadores de corriente
3. Relés diferenciales

Fig. 3.14 Esquema de principios de la protección diferen - cial transversal.

Cuando se aplica este tipo de protección a los cables, estos se construyen expresamente con conductores múltiples, tal como está representado en la Fig. 3.15 donde se muestra las secciones de dos cables trifásicos de 6 conductores, especialmente contruídos para este tipo de protección.

Los relés utilizados en la protección dife<sup>re</sup>ncial transversal pueden ser, como en el caso de la protección diferencial longitudinal, relés de máxima corriente o relés diferenciales compensados. Esta protección es esencialmente selectiva y puede ser tan rápida como se de-see.

### 3.6.3 AJUSTES DE PROTECCION DIFERENCIAL

Como en toda protección, la especificación de ajustes es una etapa importante para obtener un buen comportamiento de la misma. Nada se sacará con una correcta aplicación y conexión de la protección si se le especifican posteriormente ajustes que le hagan perder alguna de sus características esenciales. En este caso particular la especificación se simplifica bastante, ya que por ser inherentemente selectiva no necesita coordinar en tiempos con otra protección.

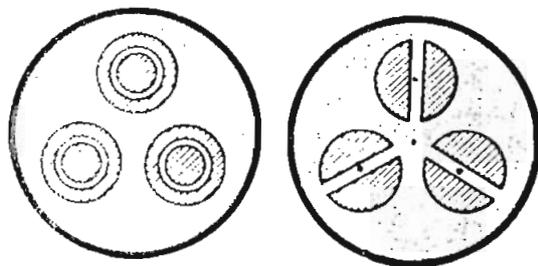


Fig. 3.15 Secciones de cables trifásicos de 6 conductores - especialmente contruidos para la protección diferencial transversal.

Esta puede ser instantánea.

En general, entonces, deberá especificarse las relaciones de TC principales y auxiliares, si los hubiera, taps, y sensibilidad.

Cálculo de Taps.- Para determinar el tap que debe fijarse el relé se lo hace en base a

$$\text{Tap X} = \frac{I_n}{\text{Relación del TC}}$$

Por lo general el tap no saldrá exacto y entonces será necesario elegir el más próximo superior.

Si se desea hacer más rápido la desconexión se puede aumentar la relación T/C, con lo cual se obtiene un tap menor, pero esto significa un gasto económico mayor.

Elección de la sensibilidad del relé.- la sensibilidad de los relés diferenciales pueden ser 15, 25, 40, 50 %.

Para elegir la sensibilidad de un relé diferencial se toman en cuenta los siguientes factores:

- % de error por Tap
- Error debido a saturación de los TC en fallas externas;- esto se obtiene conociendo el valor de la corriente máxima de falla externa y la característica de saturación de los TC.

La suma de estos errores permite elegir la sensibilidad del relé, sino es exacto deberá tomarse el inmediato superior.

#### 3.6.4 PROTECCION POR HILO PILOTO

En la actualidad se hace necesario aplicar protecciones a los cables que sean inherentemente selectivas para que operen en forma extremadamente rápida, sin que sea necesario coordinarlas (temporizarlas) con respecto a otras, es decir se precisa desconexión instantánea para el 100 % del cable.

La protección por hilo piloto es una adaptación de los principios de la protección diferencial. Se la utiliza siempre que se requiera protección de alta velocidad para todo tipo de fallas.

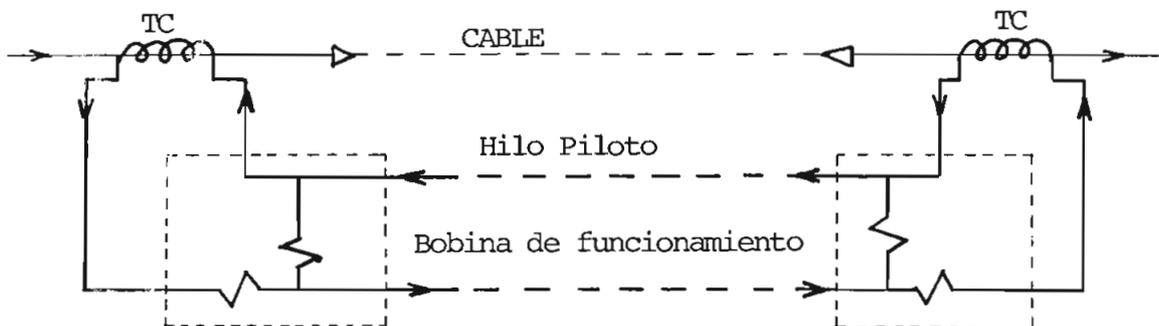
Este tipo de protección es muy empleada para longitudes cortas de cable, donde los relés de distancia

no podrían usarse.

Por estas razones, en la práctica se utiliza la protección por piloto para la mayoría de cables de alta tensión, por lo tanto, es necesario seleccionar entre hilo piloto, piloto por corriente portadora (carrier) y piloto por onda centimétrica (microondas).

En la protección por hilo piloto se debe distinguir dos casos: la de tipo de corriente circulante y la protección tipo de tensión de oposición. Brevemente, corriente circulante significa que la corriente circula normalmente por los terminales de los transformadores de corriente y el piloto, tensión de oposición significa que la corriente no circula normalmente por el piloto.

En la figura 3.16 se muestra un esquema de la protección de corriente circulante. Este esquema es el mismo que el tipo diferencial de porcentaje, excepto que se utiliza un relé de equilibrio de corriente en cada extremo del piloto, la única razón para tener un relé en cada extremo, es evitar que tenga que recorrer un circuito de disparo de la longitud total del piloto.



Bobina de retención

Fig. 3.16 Esquema del principio de protección tipo corriente circulante.

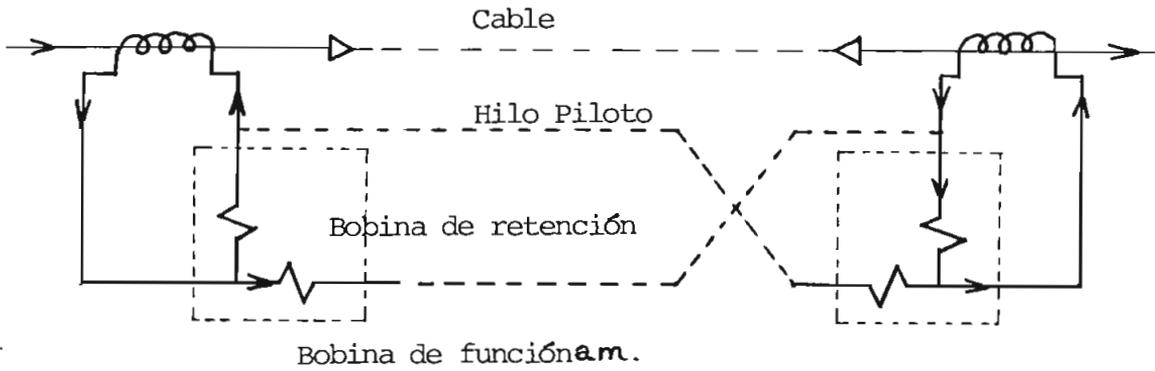


Fig. 3.17 Esquema del principio de protección tipo tensión de oposición.

En la figura 3.17 se muestra un esquema del principio de la tensión de oposición. Se emplea en cada extremo un relé del tipo de equilibrio de corriente, y los transformadores de corriente están conectados, de tal forma que las tensiones a través de las bobinas de retención en los dos extremos del piloto están en oposición para la corriente que fluye por la sección del cable como hacia una carga o falla externa. Por lo tanto, no fluye corriente en el piloto, excepto corriente de carga, si suponemos que no hay desequilibrio entre las salidas de los transformadores de corriente. Las bobinas de retención sirven para impedir el funcionamiento del relé debido a dichas corrientes de desequilibrio. Pero si ocurre un cortocircuito en la sección del cable protegido, la corriente circulará en el piloto y funcionarán los relés en ambos extremos. La corriente fluirá también por las bobinas de retención, pero esta corriente no será suficiente para impedir el funcionamiento del relé.

Los cortocircuitos o circuitos abiertos en los dos hilos pilotos tienen efectos opuestos en los dos tipos de equipo de protección, como se indica a continuación

	Efecto de los cortocircuitos	Efecto de los circuitos abiertos
Tensión de oposición	Origina el disparo	Bloquea el disparo
Corriente circulante	Bloquea el disparo	Origina el disparo

Los principios de tensión de oposición y corriente circulante permiten el disparo en ambos extremos del cable para corriente de cortocircuito que fluye hacia a dentro sólo en un extremo.

La protección por hilo piloto es mucho más aconsejable para los cables de potencia que la protección por corriente portadora, ya que la atenuación que presenta el cable es muy elevada para la corriente portadora. En cambio la protección por hilo piloto no se considera tan segura como la protección por corriente portadora, El circuito piloto ofrece demasiada exposición a la posibilidad de disturbio, por lo que deberá tenerse gran cuidado al optar por él y seleccionar la protección.

### 3.6.5 PROTECCION POR CORRIENTE PORTADORA

Los cables de potencia originan una atenuación muy elevada a la corriente portadora, por lo general es posible utilizar la corriente portadora, sólo en longitudes cortas de cable, y entonces con frecuencias únicamente cercanas al extremo inferior de la gama. (6)

Debe estudiarse cada aplicación proyectada para estar seguro de que las pérdidas en el canal de la corriente portadora se mantendrá dentro de límites permitidos por el equipo. Según sea el equipo, los fabricantes especifican estos límites.

En realidad no es necesario conocer a fondo

los detalles de los transmisores y receptores de la corriente portadora para comprender los principios fundamentales de la protección; a continuación se detalla en una forma muy breve los elementos de la protección por corriente portadora.

El Transmisor.- consiste en un oscilador y un amplificador, aquí solo se necesita saber que al aplicar una tensión de polaridad positiva en el circuito de control del transmisor, éste genera una tensión de salida de alta frecuencia (generalmente de 30 a 200 KHz). Esta tensión de salida se aplica entre un cable de fase de la línea y tierra o entre dos fases, siendo este último técnicamente mejor pero más caro.

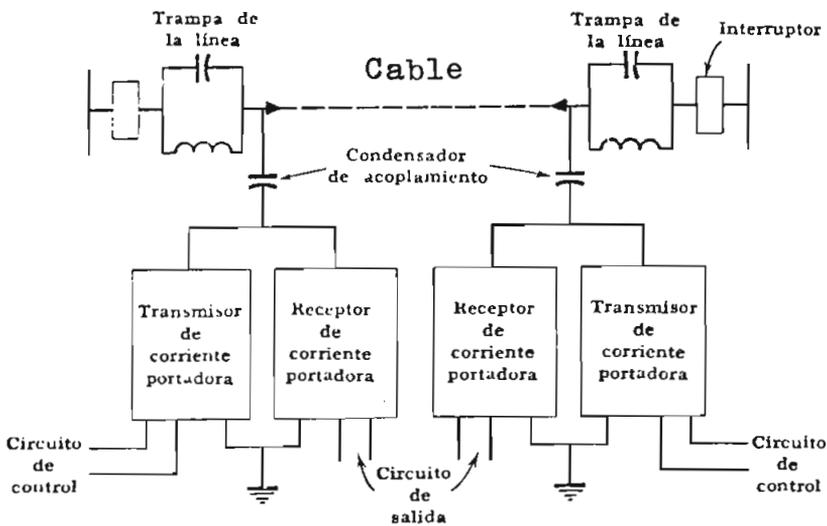


Fig. 3.18 dibujo esquemático del canal piloto por corriente portadora.

El Receptor.- Por lo común el receptor consiste en un atenuador que corresponde a un transformador, - un filtro de paso de banda y un amplificador detector; cada receptor de corriente portadora recibe esta corriente - de su transmisor local, lo mismo que del transmisor localizado en el otro extremo, el receptor convierte la corriente portadora recibida en una tensión de corriente directa que puede utilizarse en un relé; esta tensión es cero cuando no está recibiendo la corriente portadora.

Equipo de acoplamiento.- El acoplamiento de las unidades receptoras y transmisoras de alta frecuencia al cable de potencia se hace mediante capacitores de alta tensión.

Trampa de onda.- Son circuitos resonantes en paralelo que tienen una impedancia despreciable para frecuencia industrial, pero tienen impedancia elevada a - las frecuencias de las corrientes portadoras. Las trampas se usan para mantener las corrientes portadoras en el canal deseado; así como para evitar la interferencia con los otros canales adyacentes de corrientes portadoras que pudieran existir. La corriente portadora solo puede fluir a lo largo del cable entre las trampas.

Protección por comparación de fase.- La protección por comparación de fases, opera sobre el principio de comparación de la posición de - fase de las corrientes que pasan por los extremos del cable protegido.

Este tipo de protección solo proporciona - protección primaria; la protección de respaldo debe proporcionarse mediante un equipo de protección suplementario.

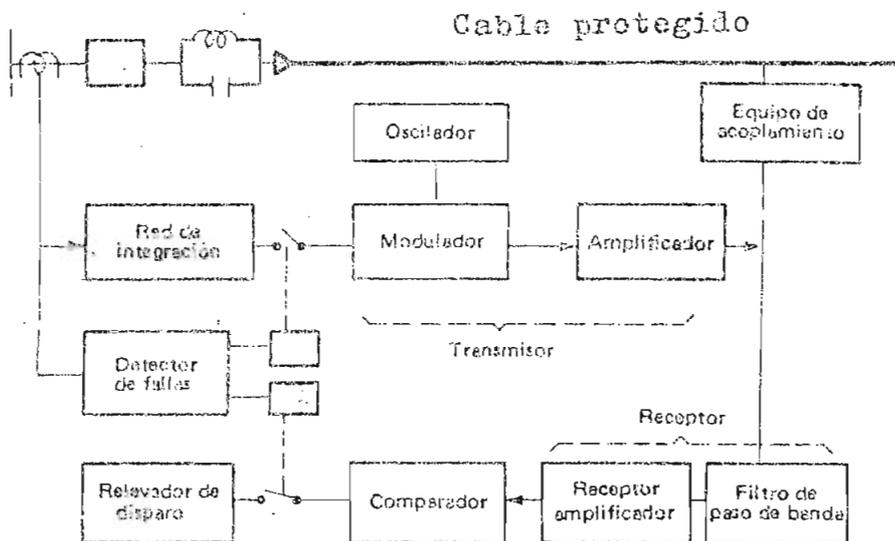


Fig. 3.19 Esquema de la protección por comparación de fases con portadora.

Durante las condiciones normales o de fallas externas, las corrientes que entran al cable en un extremo difieren en cuanto a fase en aproximadamente  $180^\circ$  de la corriente del otro extremo, esto se debe a que las conexiones de los transformadores de corriente en las dos estaciones están invertidas; por lo tanto, las cantidades para la relevación están separadas por alrededor de  $180^\circ$ . Sin embargo, durante una falla interna las cantidades de relevación en los extremos tienen una diferencia de fase de casi  $0^\circ$ .

La corriente que pasa a la sección del cable por los disyuntores A y B, se ilustra en las posiciones 1 y 2 separadamente, para fallas internas y para fallas Externas.

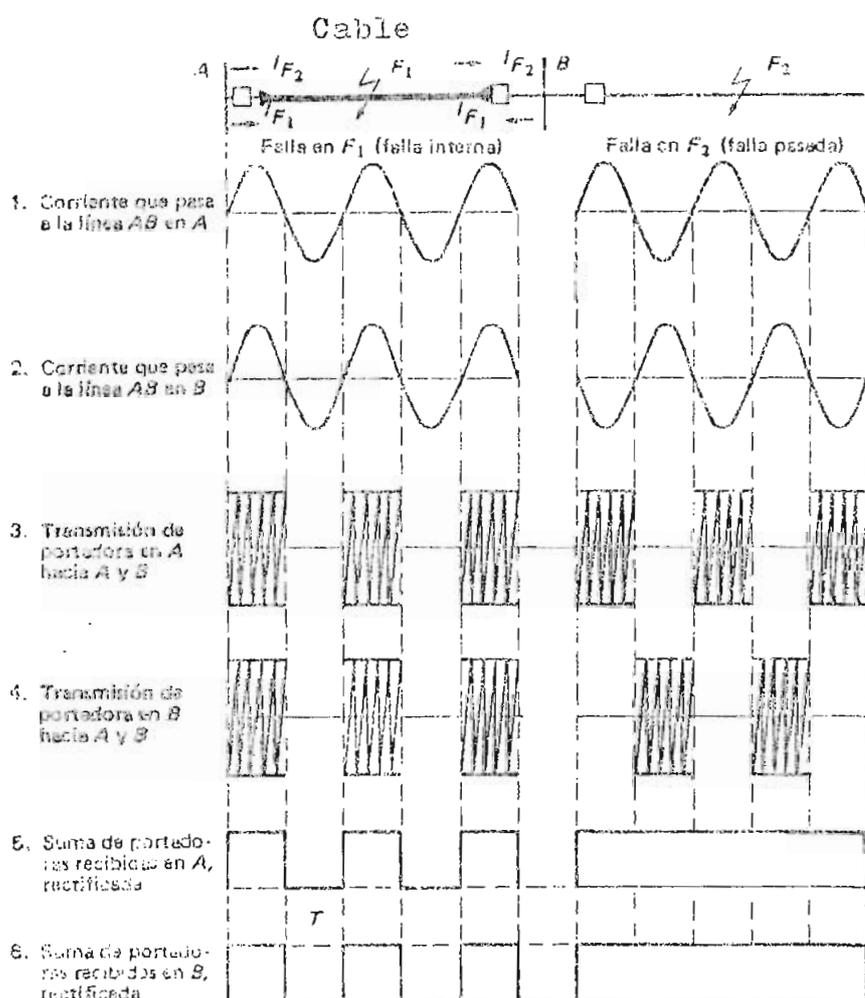


Fig. 3.20 Protección de fase por portadora.

La transmisión de la portadora en A y B, se ilustra en las posiciones 3 y 4 para las dos ubicaciones de la falla. Las transmisiones de la portadora en A, desde A y desde B, se suman y rectifican para dar una señal de salida, como se ilustra en la posición 5. Cuando la señal tiene un valor cero para un tiempo específico, como en  $T$ , el disyuntor se dispara mediante un equipo auxiliar. En cambio, para un valor de la señal, diferente de cero en todo el ciclo completo, se impide el disparo del disyuntor. Un comportamiento similar en el disyuntor B, produce una señal de disparo para la falla en  $F_1$  y ninguna señal hacia el circuito de disparo para una falla en  $F_2$ , como se ilustra en -

la posición 6. En consecuencia, para una falla ubicada entre A y B, disparan ambos disyuntoras, el de A y el de B, - mientras que para una falla ubicada fuera de A-B no disparará ninguno de los dos.

En el caso de falla del equipo de la portadora, se abrirá la sección de la línea afectada aún cuando no exista falla en ella.

Obtención de la sensibilidad adecuada.- Aparte de asegurarse de que la atenuación de la corriente portadora no es muy elevada, y de que el equipo asociado es apropiado para la aplicación, el paso principal es determinar si los ajustes disponibles del equipo de protección son tales que estén asegurados la sensibilidad y velocidad necesarias. Los instructivos de los fabricantes describen como hacer esto cuando se conocen las magnitudes de la corriente de falla máxima y mínima para las fallas de fase y tierra en cualquier extremo de la línea.

Protección de comparación direccional.- En este caso, se comparan las direcciones del paso de la corriente en los extremos del cable protegido, por medio de relés direccionales. En la figura 3.21 se ilustran las condiciones para fallas internas y externas.

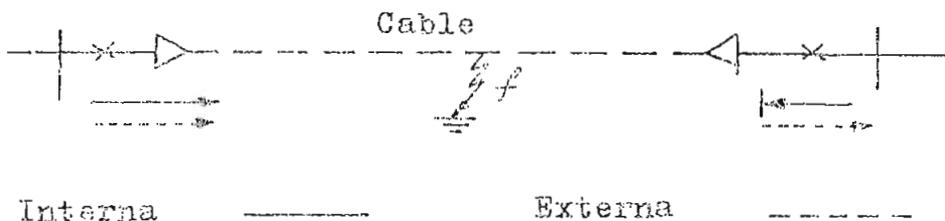


FIG. 3.21 Dirección de las corrientes para fallas interna y externa.

Los relés instalados en ambos extremos del cable protegido, responden a la potencia de la falla que fluye alejándose de la barra (dirección de disparo). Para las fallas que ocurren en el cable, la potencia, pasa en ambos extremos, en la dirección de disparo. La potencia fluye en direcciones contrarias si las fallas son externas. Durante las fallas, mediante el piloto portador se transmite una señal simple de un extremo a otro.

Las condiciones anormales que existen al ocurrir una falla, activan a los relés instalados en cada uno de los disyuntores cercanos a la falla. Estos relés, de no estar bloqueados para no operar, ocasionan el disparo de los disyuntores. La señal de bloqueo emiten los relés direccionales de cada disyuntor y se transmite desde un extremo de la sección protegida al otro, por la portadora. Si un elemento direccional determina que la falla no está dentro del cable protegido, se transmite una señal que bloquea la operación del disyuntor en ambos extremos de la sección. Si los elementos direccionales de ambos extremos indican que la falla está dentro del cable, no se transmite señal de bloqueo desde ninguno de los extremos y se dispararán ambos disyuntores.

### 3.6.6 PROTECCION POR MICROONDAS

Este sistema de protección utiliza un equipo de transmisión-recepción de ultra alta frecuencia (450 a 10.000 MHz) para conectar el equipo de relevación ubicado en los terminales del cable protegido. En este caso, el canal de comunicación es el espacio; en consecuencia, el cable no necesita equipo adicional. La transmisión se ejecuta generalmente por la línea visual y tiene que tomarse en cuenta la curvatura de la tierra y la topología de la ruta sobre la que se este efectuando la transmisión. Los canales para longitudes considerables utilizan técnicas de

relevación por radio, o bien, en otras palabras, las señales se emiten por medio de antenas de punto a punto.

Se utiliza la protección por microondas solo cuando el equipo de protección puede compartir el canal con otros servicios; no se justifica económicamente su empleo para la protección de cables si se puede aplicar la protección por corriente portadora o por hilo piloto.

La protección por microondas tiene teóricamente ciertas ventajas sobre la corriente portadora debido a que está desligada del cable de potencia.

En ocasiones, es útil la protección por microondas allí donde la atenuación sería muy elevada para la corriente portadora, tal como en el circuito de una cable de alto voltaje de potencia, pero aún ahí no se seleccionaría probablemente la protección por microondas a menos que se le diera otros usos además de la protección.

Las ventajas de estos equipos de protección piloto son las siguientes:

- Tiempo de desconexión extremadamente corto
- Selectividad rigurosa
- Protección del cable en un 100 % sin zona muerta.

Por el contrario su desventaja está en su elevado costo, además siempre es preciso instalar una protección de reserva.

### 3.7 PROTECCION DE DEFECTOS A TIERRA EN SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO

La conveniencia de poner o no poner el -

neutro a tierra es un asunto aún debatido por los ingenieros de los servicios eléctricos en los diversos países. Desde luego queda determinado que en las instalaciones de muy altas tensiones partiendo ya de 110 KV el neutro debe ponerse a tierra.

En las redes con neutro aislado o puesto a tierra con bobinas de extinción o con resistencias altas, el contacto de una fase con tierra no presenta el carácter de un cortocircuito; en este caso, el valor de la corriente de defecto es una fracción de la corriente de servicio del cable, que se lo ha de proteger. En esta circunstancia, resulta inoperante la protección contra los cortocircuitos.

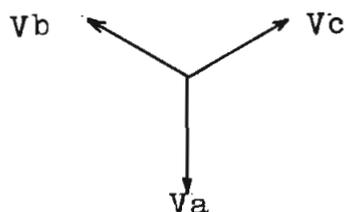
Si la corriente sobrepasa cierto valor - (unos 50 amperios), en el punto de puesta a tierra puede aparecer altas caídas de tensión de paso, que pueden ser peligrosas para los seres humanos.

A causa de estas tensiones de paso, resultan necesarios los sistemas de protección que detecten las fallas a tierra en los sistemas con neutro aislado.

### 3.7.1 DETECCIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA EN LOS CABLES

Este es el más sencillo de los sistemas de protección contra fallas a tierra en circuitos con neutro aislado. Un relé capta la tensión ( $V'$ ) existente en la delta abierta, por lo tanto mide la suma geométrica de las tensiones de fase que para condiciones normales éste valor es 0, no así en condiciones de falla en la cual el valor de la tensión es  $\sqrt{3} V_a$ , esto se lo puede apreciar de mejor forma en la Fig. 3.22. Cuando esta tensión ( $V'$ ) alcanza un valor elevado este relé provoca una señalización o la desconexión del disyuntor. La Fig. 3.23 expresa el esquema de este dispositivo.

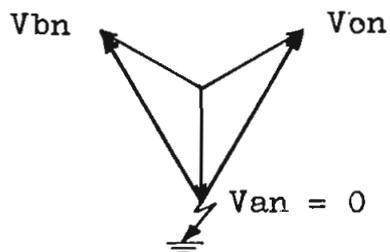
El relé 3a. es un relé de máxima tensión con contactor de mando temporizado de varios segundos, estos relés de máxima tensión actúan al sobrepasar la tensión el valor prefijado. La resistencia de protección 5, en paralelo con el relé 3a., sirve para el amortiguamiento de los fenómenos de ferresonancia que pueden producirse en algunos casos.



Servicio normal

$$|V_a| = |V_b| = |V_c| = |V|$$

$$V' = V_a + V_b + V_c = 0$$



Puesta a tierra de la fase a

$$V_{an} = V_a - V_a \quad V_{an} = 0$$

$$V_{bn} = V_b - V_a \quad V_{bn} = \sqrt{3} V$$

$$V_{cn} = V_c - V_a \quad V_{cn} = \sqrt{3} V$$

$$V' = V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = -3 V_a$$

FIG. 3.22 Defecto de tierra en una red con punto neutro aislado.

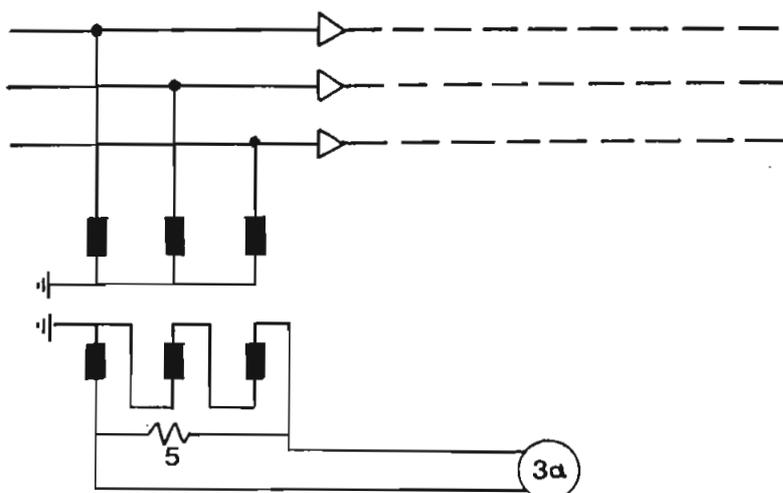


FIG. 3.23 Protección de los defectos a tierra de una red.

### 3.8 PROTECCION DE DISTANCIA

El empleo de relés de distancia de alta velocidad en los sistemas modernos, se ha vuelto imperativo debido a la complejidad de los sistemas que tienen varias alimentaciones procedentes de distintas estaciones generadoras, la necesidad de tiempos más breves en el aislamiento de la falla conforme aumenta el nivel de ésta y también, por la dificultad que presenta el graduar los relés de tiempo/sobrecorriente con un número creciente de estaciones.

Los esquemas de distancia proporcionan, automáticamente, protección de respaldo a las secciones de alimentadores adyacentes. Con frecuencia la selectividad - que se logra por medio de una característica direccional, que ó bien es inherente al relé de distancia mismo o lo proveen relés complementarios.

La protección de distancia tiene considerables ventajas técnicas, ésta forma de protección es comparativamente fácil de aplicar y es de alta velocidad de operación.

La impedancia de un cable es proporcional a la longitud; para la medida de la distancia es apropiado usar un relé capaz de medir la impedancia del cable hasta un punto dado; tal relé es denominado relé de distancia, y está diseñado para operar solamente para fallas que ocurren entre la localización del relé y el punto seleccionado, esto da una discriminación para fallas que pueden ocurrir fuera de la zona establecida.

El principio básico de medida involucra la comparación de corriente de falla vista por el relé con el

Voltaje en el punto que está situado el relé, por comparación de éstas dos cantidades es posible medir la impedancia del cable hasta el punto de falla, esto se lo puede apreciar de mejor forma en la figura 3.24.

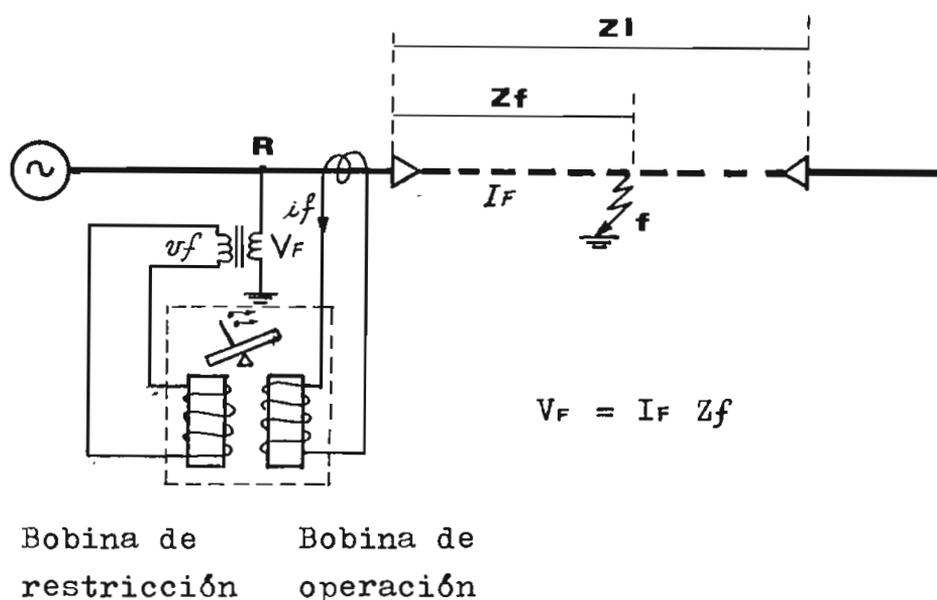


FIG. 3.24 Esquema de protección de distancia.

El relé está conectado en la posición R y recibe una corriente secundaria proporcional a la corriente primaria y un voltaje secundario igual al producto de la corriente de falla y la impedancia hasta el punto de la falla.

Si el relé es diseñado, tal que, el torque de operación es proporcional a la corriente y el torque de restricción proporcional al voltaje, entonces acorde a un relativo número de amperios vueltas aplicados a cada bobina se puede definir una relación en la cual los torques son iguales, éste es el término de balance del relé.

Un incremento en los amperios vueltas de corriente sin un correspondiente incremento en los amperios vueltas de voltaje produce un desbalance, tal que, bajo una dada relación de  $V/I$  el torque de operación será más grande

que el de restricción y el relé cerrará sus contactos; en otro caso, un valor sobre la relación  $V/I$  el troque de restricción será mucho más grande que el de operación y el relé permanecerá con sus contactos abiertos.

Mediante los cambios de la relación de amperios vueltas de las bobinas de operación y restricción es posible seleccionar la longitud del cable a ser protegido.

Estrictamente la impedancia detectada por el relé no es proporcional a la distancia comprendida entre el relé y la falla en general por las siguientes razones:

- Presencia de una resistencia en el lugar de ubicación de la falla.
- Presencia de cargas y/o fuentes de generación entre el relé y el lugar de la falla, etc.

Para operación selectiva, en muchas ocasiones el relé requiere no sólo de la medición de la magnitud sino también del ángulo de impedancia del cable hasta el punto de la falla. Sin embargo la denominación relé de distancia se usa para designar el grupo completo formado por los relés de impedancia, reactancia, mho, etc.

El campo de aplicación de los diversos relés de distancia se traslada en gran medida, y por tal motivo no pueden trazarse líneas divisorias fijas que definen sus campos de aplicación respectivo. Siendo los cables de alto voltaje por lo general de longitud moderada, se prefiere para la protección de éstos a los relés de reactancia, por la razón de que la mayor parte del cable puede protegerse a gran velocidad. Esto se debe a que el relé de reactancia prácticamente no es afectado por la resistencia del arco que pudiera ser grande comparada con la impedancia del cable.

En realidad hay mucha superposición, además los cambios que se hacen en los sistemas, tales como la adición de terminales a una línea, puede cambiar el tipo de relé que resulte más adecuado a un equipo en particular.

### 3.8.1. LONGITUD MINIMA DE CABLE A PROTEGER

Para determinar la mínima longitud del cable a proteger por un relé de distancia se deben tomar en cuenta dos requisitos. (8)

1. Que el mínimo voltaje visto por el relé para una falla - en la primera zona esta comprendido en la zona declarada de sensibilidad del relé, y
2. Que la impedancia secundaria ( $Z_{sec}$ ) vista por el relé en la zona 1 pueda ser calibrado en éste.

Considerando  $Z_1$  como el 80% de la longitud total del cable a proteger, a este alcance se acostumbra a llamar primera zona, así tenemos que:

$$VR = 0.8 Z_{sec} \cdot I_{fsec}$$

$$VR = 0.8 Z_p \cdot \frac{TC}{TP} \cdot I_{fsec}$$

$$VR = 0.8 \cdot Z_1$$

$$VR = 0.8 \cdot \sqrt{3} \cdot 110 \cdot Z \cdot L \cdot \frac{I_f}{VII} \cdot 10^3$$

y la longitud mínima

$$L = \frac{V_s \cdot V_{LL} \cdot 10^3}{0.8 \cdot \sqrt{3} \cdot 110 \cdot Z \cdot I_f} \quad (3.14)$$

en donde

- L = Longitud mínima a ser protegida (Km)
- V<sub>s</sub> = Sensibilidad (Voltios)
- V<sub>ll</sub> = Voltaje fase fase (KV)
- Z<sub>1</sub> = Impedancia de secuencia positiva (  $\Omega$ /Km)
- I<sub>f</sub> = Corriente de falla (amperios)

### 3.8.2 AJUSTES DE LOS RELES DE DISTANCIA

Los elementos de medida de los esquemas de distancia contra fallas entre fases, deben ajustarse teniendo como base la impedancia de secuencia positiva entre el punto de ubicación del relé y el alcance que se desea obtener.

Para convertir la impedancia primaria a valor secundario para usar en el ajuste del relé se emplea la siguiente relación.

$$Z_{sec} = Z_{pri} \times \frac{\text{Razón TC}}{\text{Razón TP}}$$

En la actualidad se acostumbra a adoptar un método de protección de distancia definida aplicada en tres zonas (pasos), se emplean varios relés cuyas características básicas con las que cuentan éstos son: medición de la impedancia o reactancia, unidad direccional y control de tiempo.

Dependiendo principalmente de la calidad de los elementos de medida y de las condiciones de su aplicación, el alcance de las tres zonas puede ser:

Zona 1 = 90% u 80% de la longitud del cable a proteger.

El saldo de 20 % o 10% queda protegido - por la segunda zona.

Zona 2 = longitud del cable protegido más el 50% de la segunda sección.

El propósito principal de la unidad de - segunda zona es proporcionar protección para el resto del cable más allá del alcance de la unidad de primera zona; resulta también una protección de respaldo para la primera zona.

Zona 3 = cable protegido más segunda sección más el 25 % de la tercera sección.

Esta unidad proporciona protección de - respaldo a la primera y segunda zona.

Graduación del tiempo.- La zona 1 del relé proporciona un disparo instantáneo para cualquier falla que ocurra dentro de esta zona.

El tiempo de aislamiento de la falla para la segunda zona se toma como:

$$t_2 = t_1 + \Delta t$$

en donde

$t_1$  = tiempo de liberación de la zona 1

$\Delta t$  = paso de atraso  $\approx 0.5$  seg.

$t_2$  = tiempo de liberación de la zona 2.

Para la unidad de tercera zona es de igual forma.

$$t_3 = t_2 + \Delta t$$

#### 4.0 RESUMEN

Para proceder a aplicar las protecciones a los cables, se debe contar con los datos que se requiere en general para la protección de cualquier equipo eléctrico, - como son: parámetros y diagramas del sistema, corrientes de corto\_circuito máxima y mínima, etc.

Se debe adoptar un método de conexión de las pantallas, ya que esto proporcionará la influencia o no influencia de la corriente por la pantalla en los parámetros del cable, además de éstos requerimientos, es necesario conocer la longitud y ruta del cable a protegerse.

Los cables de alto voltaje deberán contar - siempre con protecciones contra cortocircuitos y sobrevoltajes, en la protección contra cortocircuitos es necesario contar con protección principal y de respaldo, es recomendable que la protección de respaldo sea aplicada a las pantallas de los cables, es decir protección a tierra. La protección contra sobrecargas, se instalará siempre y cuando exista la posibilidad de sobrecarga del cable.

C A P I T U L O    I V

## EJEMPLO DE APLICACION

### 4.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA

El presente ejemplo de aplicación trata la protección de los cables en aceite de 230 KV. del proyecto Paute "fase C".

El proyecto Paute está ubicado, en el límite de las provincias de Cañar, Azuay y Morona SÁntiago, a 125 km. de Cuenca la capital Azuaya. Es una de las grandes centrales hidroeléctricas de América Latina. Aprovecha el caudal del río Paute, cuyas aguas se precipitan en el sector denominado Cola de San Pablo, en una recta de 13 km. produciendo una caída de 1.000 metros.

El proyecto comprende tres etapas como se especifica en la tabla 4.1 y figura 4.1b (1)

Tabla 4.1

ETAPA	FASE	PRESA	CENTRAL	CAPAC. (MW)
I	A y B	Amaluza	Molino	500
I	C	Amaluza	Molino	500
II		Mazar	Mazar	200
III		Marcayacu	Sopladora	450

Al término de la construcción de todas sus etapas y fases, Paute alcanzará una cifra equivalente a 1.650.000 KW. de potencia instalada que nutrirán al Sistema Nacional Interconectado. (Fig. 4.1a).

Los cables a protegerse interconectarán los transformadores de elevación de los cinco grupos generadores de 100 MW. cada uno, ubicados en la casa de máquinas

subterránea, con la subestación en SF<sub>6</sub> (patio de maniobra) situada al exterior, como se aprecia en las figuras 4.2 y 4.3.

Los cables de alta tensión, siempre deberán tener protecciones contra sobrecorriente y sobrevoltajes, - las protecciones contra sobrecargas se instalarán siempre - que exista la posibilidad de sobrecarga de los cables. En éste ejemplo de aplicación, vemos que los cables conectan a una sola central a la vez (Fig. 4.2), por la configuración del sistema no existe la posibilidad de que dos o más centrales se interconecten a un mismo grupo de cables, es decir aquí la posibilidad de sobrecarga del cable vendrá dada por la sobrecarga del generador.

Siendo cada uno de los generadores de 127 MVA. la corriente de plena carga del cable es de 320 A. la corriente máxima de régimen continuo especificada para el cable es de 350 A (Apendice A), entonces existe un rango - del 9.3% de sobrecarga del generador para que los cables - alcancen su máxima corriente de régimen continuo. La posibilidad de una sobrecarga peligrosa en el cable no existe, por lo que la protección de éste tipo no es necesaria para éste caso.

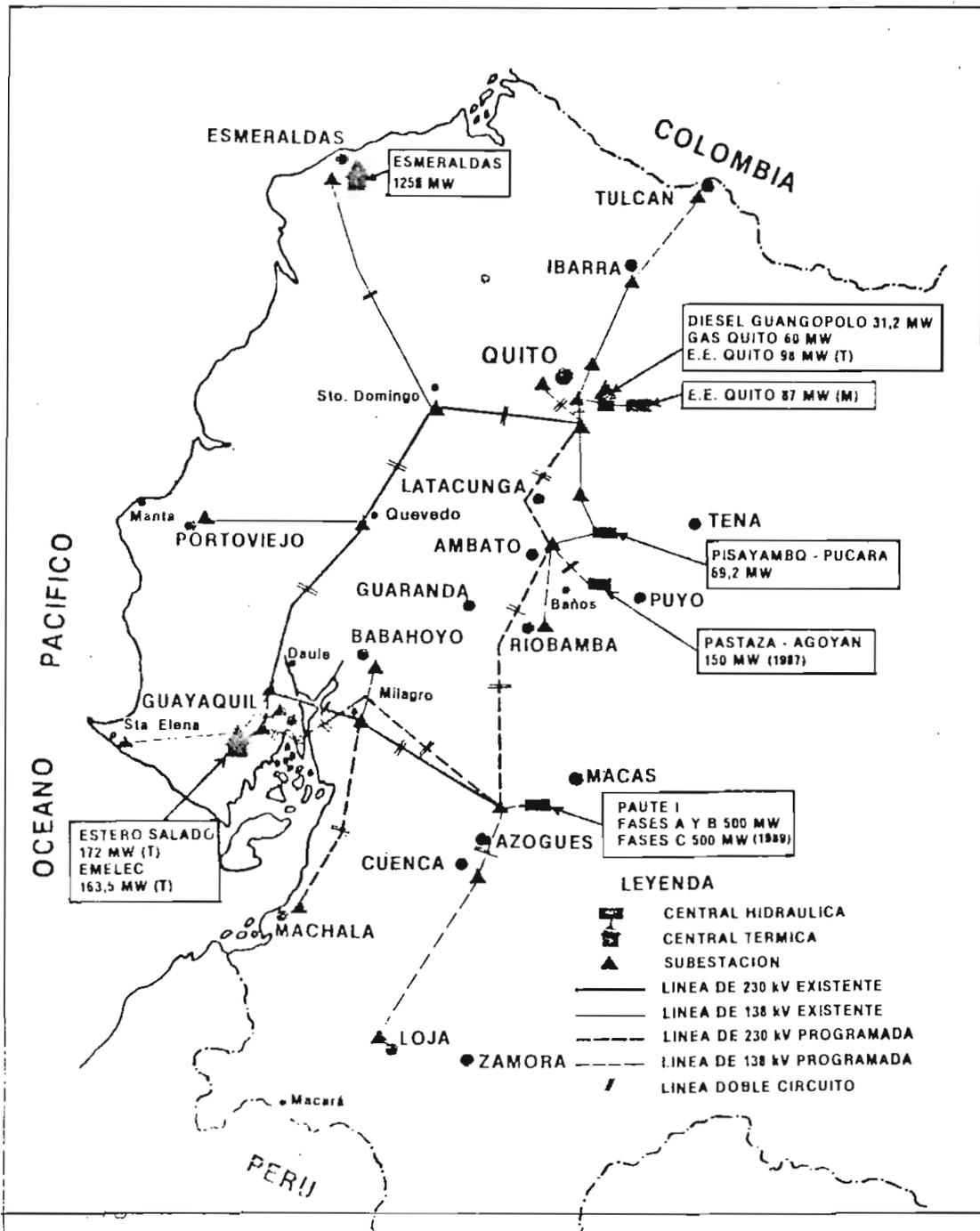


FIG. 4.1a Conformación del Sistema Nacional Interconectado



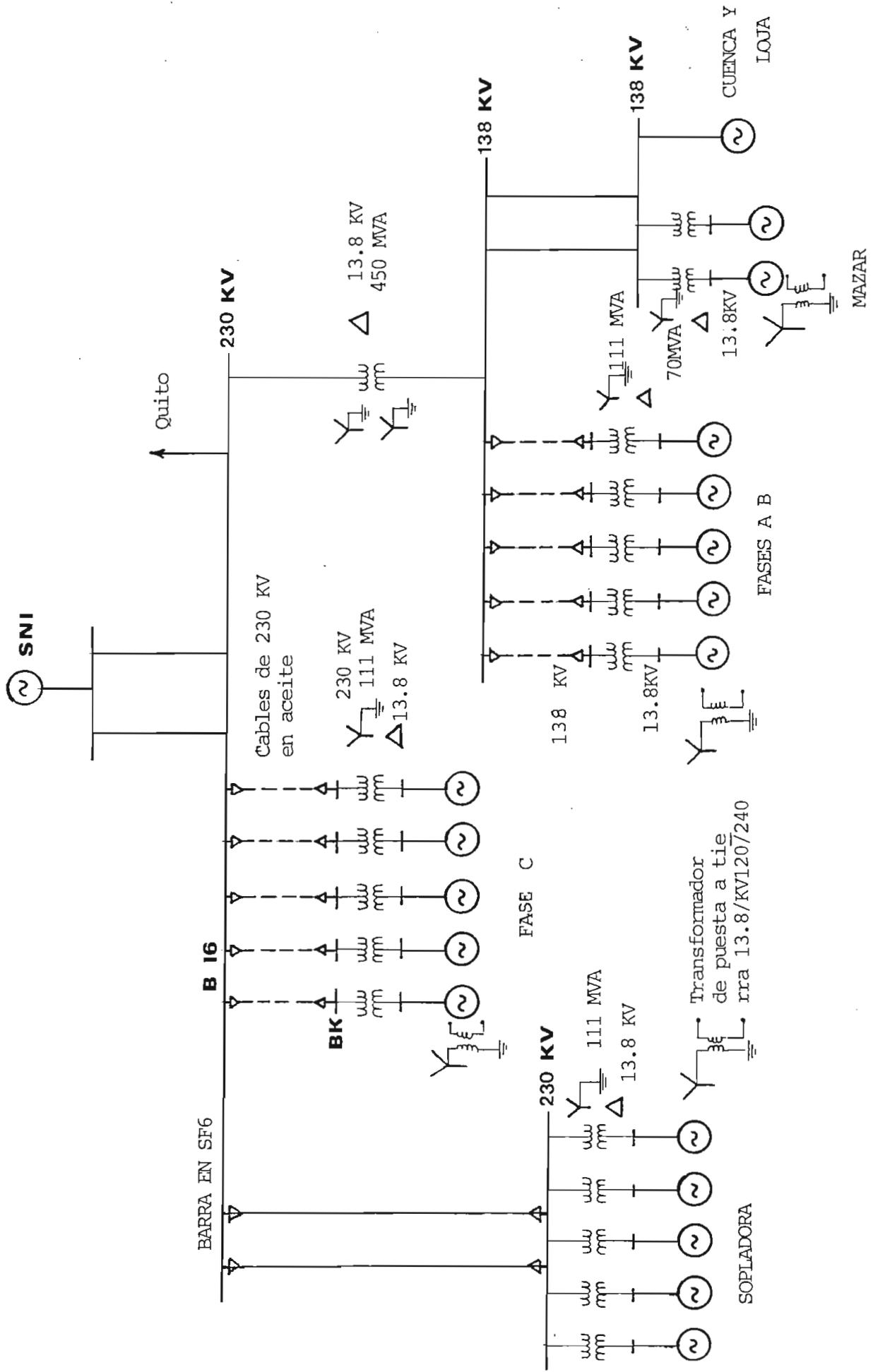
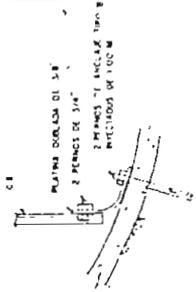
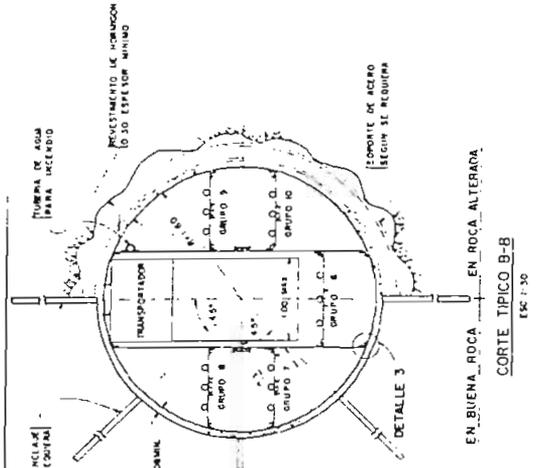


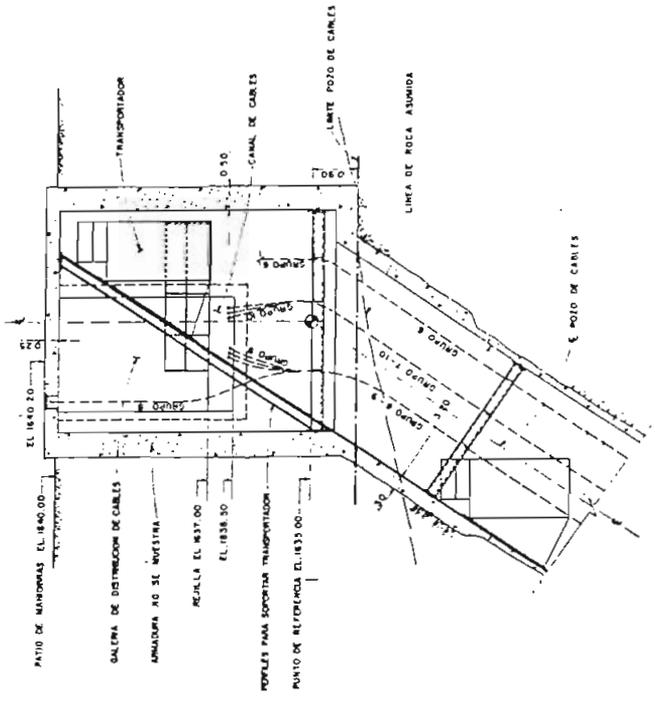
FIG. 4.2 ESQUEMA DEL PROYECTO PAUTE Y SNI, AÑO HORIZONTALTE.



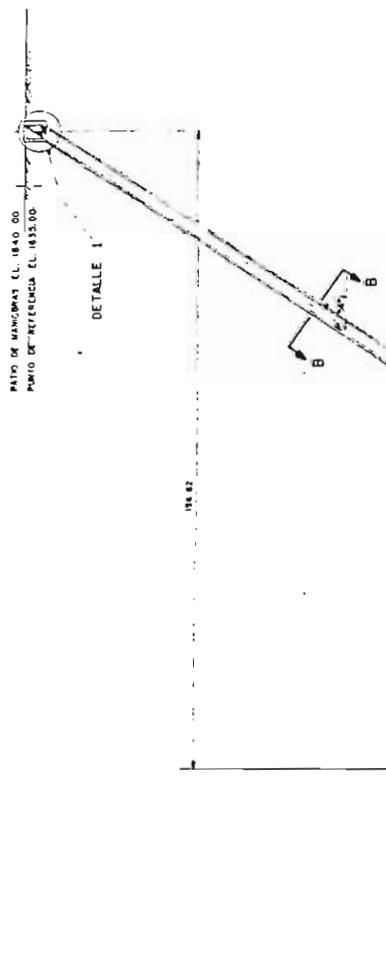
DETAILLE 3  
ESC 1:10



CORTE TIPICO B-B  
ESC 1:30



DETAILLE 1  
ESC 1:30



DETALLE 2 (C-4101)  
UNIDADES

CORTE A-A  
VER PLANO C-1000

PLANOS DE REFERENCIA  
PARA PLANOS DE REFERENCIA VER PLANO C-1000



INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY, INC  
Y ASTEC-ICA - INELIN  
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTIFICACION  
QUITO - ECUADOR  
PROYECTO: PUNTO - FASE C  
POZO DE CABLES Y VENTILACION  
CORTES Y DETALLE  
HOJA N.º 2  
PROYECTO: PUNTO - FASE C  
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTIFICACION  
QUITO - ECUADOR

FIG. 4.3 Disposición de los cables dentro del túnel

## 4.2 PARAMETROS DEL CABLE

Los datos del cable que no han sido especificados en el apendice A, se han tomado de la tabla Nro. 11 de la Referencia 2, cable en aceite de 230 KV y 750.000 CM que es el más similar al especificado en los datos del Apendice A. La separación y disposición entre cables está dada en la figura 4.3.

Radio del conductor.....	16.33	mm
Radio interno de la pantalla.....	39.83	mm
Radio externo de la pantalla.....	43.89	mm
Radio externo del dieléctrico de la pantalla.....	51.3	mm
Radio medio geométrico.....	13.37	mm
Separación entre conductores.....	240	mm
Espesor de la pantalla.....	4.06	mm
Espesor del dieléctrico exterior de la pantalla...	7.4	mm
Longitud del cable.....	428	mts
Resistencia de la pantalla.....	0.23	$\Omega$ /km

### 4.2.1 CONEXION A TIERRA DE LAS PANTALLAS

Para adoptar un método de conexión de las pantallas, debemos proceder primeramente a calcular el voltaje inducido en la pantalla, como consecuencia de la circulación de la corriente máxima de carga que es 350 Amperios, entonces

$$E_o = I \cdot W \cdot M \cdot 10^{-3} \quad \text{V/Km} \quad (2.37)$$

con la inductancia mutua (M) igual a

$$M = 0.2 \ln \frac{2DMG}{dm} \quad \text{mH/km.} \quad (2.40)$$

$$y \quad d_m = d_M - \delta_M$$

$$d_m = 2 \times 43.89 - 4.06 = 83.72 \text{ mm}$$

Distancia media geométrica para una formación lineal  
( $d = 240$  mm figura 4.3)

$$DMG = \sqrt[3]{2} \cdot d = \sqrt[3]{2} \cdot 240 = 302.38 \text{ mm}$$

$$M = 0.2 \ln \frac{2 \times 302.38}{83.72} = 0.3954 \text{ mH/km}$$

$$M = 0.3954 \frac{\text{mH}}{\text{km}} \times 0.428 \text{ km} = 0.169 \text{ mH}$$

$$E_o = 350 \times 377 \times 0.169 \times 10^{-3} = 22.3 \text{ Voltios}$$

Si adoptamos como un límite de voltaje inducido de 100 Voltios, vemos que el voltaje inducido  $E_o = 22.3$  voltios es menor que éste límite, por lo tanto las pantallas de los cables pueden ser conectadas y puestas a tierra en un solo extremo. (conexión de un solo punto a tierra, ver fig. 4.7 )

#### 4.2.2 IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA

La resistencia del conductor para el cable - especificado es de  $0.0556 \Omega/\text{km}$  (2) este valor no sufre ninguna alteración, es decir  $\Delta R$  es cero, ya que la pantalla está formando un circuito abierto, de tal manera que no fluye corriente por éstas, excepto las corrientes de Eddy que como ya se mencionó son despreciables, de igual forma sucede con la inductancia donde  $\Delta L$  también es cero.

$$R = R_c + \Delta R$$

$$R = R_c = 0.0556 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 0.428 \text{ km} = 0.0238 \Omega$$

y

$$X = wLc \leftarrow W \Delta L$$

$$X = WLc$$

$$Lc = 0.2 \ln \frac{DMG}{RMG} \text{ mH/km} \quad (2.03)$$

$$Lc = 0.2 \ln \frac{302.38}{13.97} = 0.616 \text{ mH/Km.}$$

$$Lc = 0.616 \frac{\text{mH}}{\text{Km}} \times 0.428 \text{ km} = 0.263 \times 10^{-3} \text{ H}$$

Entonces  $X = 377 \times 0.263 \times 10^{-3} \Omega$

y  $Z_1 = Z_2 = R + jX$   
 $= (0.0238 + j 0.1) \Omega$

Valores por unidad (3)

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{VLL^2 \text{ (KV)}}{S_{base} \text{ (MVA)}} = \frac{230^2}{100} = 529$$

$$Z_{pu} = \frac{0.0238 + j0.1}{529} = 0.000045 + j0.0002$$

$$Z\% = 0.0045 + j0.02$$

### 4.2.3 IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO

La resistividad del suelo especificada es de  $3000 \Omega - m$ , al tener el suelo una resistividad muy alta, se asume que toda la corriente de secuencia cero fluiría por la pantalla, de tal manera que:

$$Z_0 = Z_c + Z_s - 2 Z_m \quad (2.11)$$

$$Z_c = R_c + R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{DE}{RMG_{3c}} \quad \Omega / Km$$

$$RMG_{3c} = \sqrt[3]{RMG_{1c} DMG_{3c}^2} = \sqrt[3]{13.97 \times 302.3^2} = 108.5 \text{ mm.}$$

Interpolando los valores de la tabla 2.1 se obtiene para una resistividad del suelo de  $3000 \Omega - m$  un valor de:

$$DE = 4.39 \times 10^6 \text{ mm.}$$

$$Z_c = 0.0556 + 0.178 + j 0.2275 \ln \frac{4.39 \times 10^6}{108.5} \quad \Omega / km$$

$$Z_c = 0.2336 + j 2.41$$

$$Z_m = R_e + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{DE}{DMG_{3c-3s}} \quad \Omega / km$$

$$DMG_{3c-3s} = \sqrt[3]{\frac{r_o + r_i}{2} DMG_{3c}^2} = \sqrt[3]{\frac{43.89 + 39.83}{2} \times 302.3^2}$$

$$DMG_{3c-3s} = 156 \text{ mm}$$

$$Z_m = 0.178 + j 0.2275 \ln \frac{4.39 \times 10^6}{156}$$

$$Z_m = 0.178 + j 2.33 \quad \Omega / Km$$

$$Z_s = R_p + R_c + j 0.2275 \frac{f}{60} \ln \frac{DE}{RMG_{3s}} \quad \Omega / Km$$

$$RMG_{3s} = \sqrt[3]{\frac{r_o + r_i}{2} * DMG_{3c}^2} = 156 \text{ mm}$$

$$Z_s = 0.23 + 0.178 + j2.33 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_s = 0.408 + j2.33 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_o = Z_c + Z_s - 2Z_m$$

$$Z_o = 0.2336 + j2.41 + 0.408 + j2.33 - 2(0.178 + j2.33) \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_o = 0.2856 + j0.08 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{o_{pv}} = 0.00023 + j0.0000647$$

$$Z_o \% = 0.023 + j0.00647$$

#### 4.2.4 CAPACITANCIA

El cable a instalarse es del tipo monopolar, entonces la capacitancia puede ser calculada con:

$$C = \frac{2 \pi \cdot 8.85 \cdot kr}{\ln \frac{R}{r}} \cdot 10^{-12} \frac{\text{fd}}{\text{m}} \quad (2.12)$$

Para cables en aceite tenemos que  $Kr = 3.5$  (tabla 2.2)

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \cdot 3.5}{\ln \frac{39.83}{16.33}} \cdot 10^{-12} \text{ fd/m}$$

$$C = 218.33 \times 10^{-12} \frac{\text{fd}}{\text{m}} \times 428 \text{ m}$$

$$C = 0.0934 \times 10^{-6} \text{ fd}$$

#### 4.2.5 IMPEDANCIA CARACTERISTICA

La impedancia caracterfstica  $Z_c'$  se define como la relación

$$Z_c' = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega$$

$$Z_c' = \sqrt{\frac{0.263 \times 10^{-3}}{0.0934 \times 10^{-6}}} = 53 \Omega$$

#### 4.3 CONDICIONES DE GENERACION

**Máxima Generación.**- Para las condiciones de máxima generación se considera que todas las centrales descritas en la figura 4.2 entrarán en operación en el año horizonte, que se prevee será para el año 2000, además el SNI para este caso tendrá una impedancia de  $Z' = 0.501 + j5.573$  y  $Z_0 = 2.38 + j11.26$ .

**Mínima Generación.**- Para las condiciones de mínima generación se considera que las centrales operan con las siguientes unidades (Apendice A).

Paute Fases	A-B	3 unidades
Paute Fase	C	2 unidades
Sopladora		3 unidades
Mazar		1 unidad
SNI		1.3 Z equiv.

#### 4.4 VALORES DE CORTOCIRCUITOS PARA AJUSTES DE LA PROTECCION

Como se trata la protección de los cables - entre las barras 16 y BK (figura 4.2). Los cálculos de - cortocircuitos se han realizado para máxima y mínima genera - ción en esas barras para el año horizonte (año 2000).

Los resultados de tales cálculos se presen - tan en la tabla 4.2.

Para el cálculo de los cortocircuitos tri - fásicos y monofásicos se hace uso de los diagramas y datos dados por las figuras 4.4 y 4.5 que contienen las impedan - cias de secuencia positiva, negativa y CERO.

TABLA 4.2 RESULTADOS DE CORTOCIRCUITOS

GENERACION DEL SISTEMA	FALLA EN LA BARRA	TIPO DE FALLA	CORRIENTE QUE FLUYE POR EL CABLE (AMP).
MIN	16	3 $\emptyset$	959
MAX	BK	3 $\emptyset$	17.015
MIN	BK	3 $\emptyset$	9842
MIN	16	1 $\emptyset$	1270
MAX	BK	1 $\emptyset$	20474
MIN	BK	1 $\emptyset$	11924

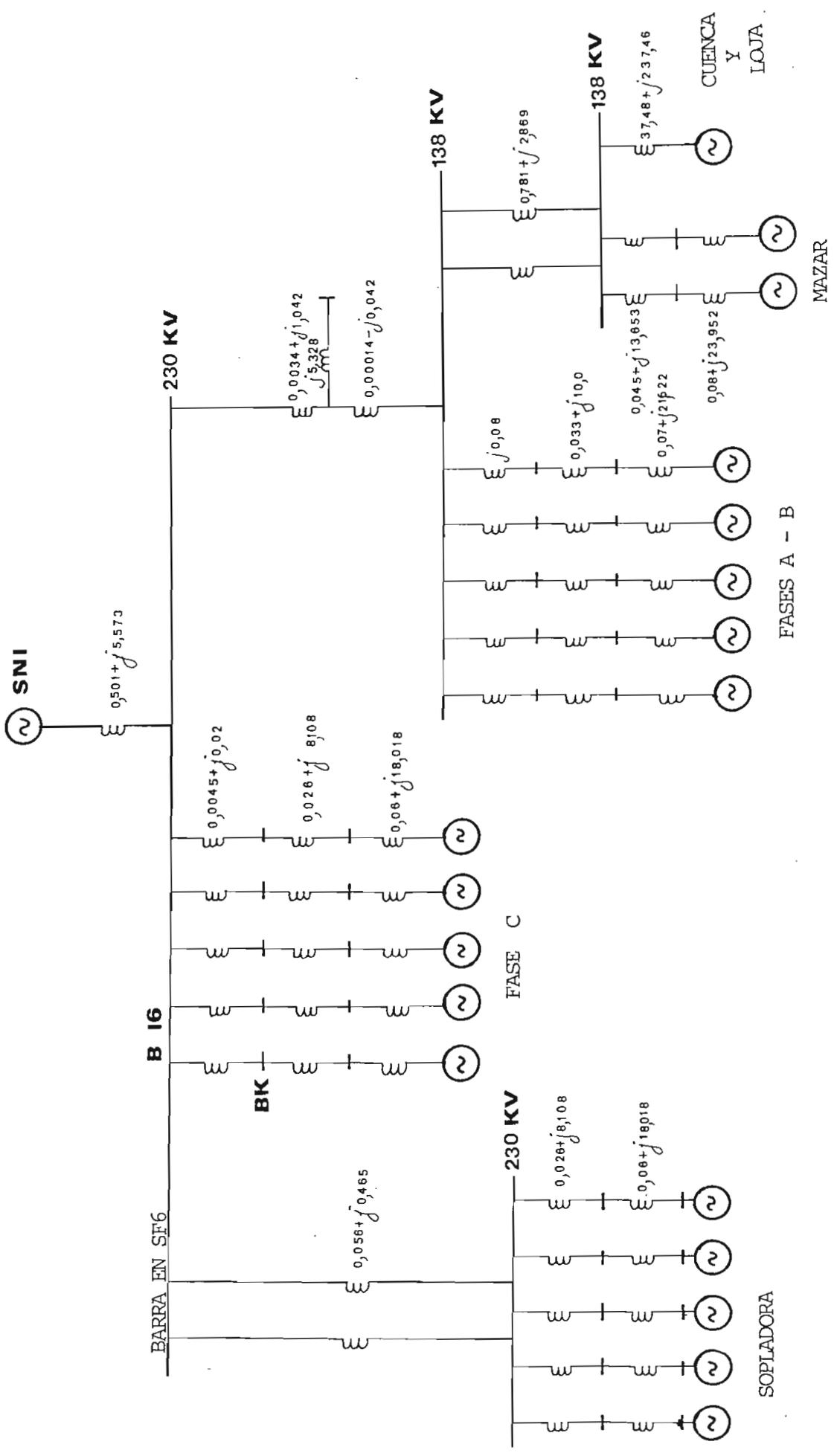


FIG. 4.4 Diagrama de Secuencias positiva y negativa, año horizonte Z% BASE 100 MVA



## 4.5 SELECCION DE LA PROTECCION CONTRA CORTOCIRCUITOS

Por lo general, los relés operan debido a co rrientes y voltajes derivados de transformadores de corriente o de potencial, también es usual que la batería de una es tación proporcione la corriente de disparo del disyuntor. La operación efectiva del equipo de protección depende de la condición de la batería, de la continuidad del alambrado y de la bobina de disparo, así como de la correcta operación mecánica y eléctrica del disyuntor y del cierre de los con- tactos de disparo del relé.

En caso de que falle uno de estos elementos, la falla en una zona dada no se elimina por medio de la protección primaria o principal, por lo que es necesario contar con alguna protección de respaldo o secundaria.

Dada la importancia de los cables dentro del sistema tratado, éstos deben tener protección principal y de respaldo.

### 4.5.1 PROTECCION PRINCIPAL

Los cables de alta tensión, presentan fallas solo en raras ocasiones, pero las consecuencias de una falla por esporádica que sea, puede ser grave si el cable no se - desconecta rápidamente del sistema, en consecuencia es necesario contar con una protección de alta velocidad.

Para la selección de la protección de todo - equipo, se debe tomar en consideración aspectos principalmente técnicos y económicos. Para este caso en que se trata ex clusivamente de la protección de los cables (es decir como - si se tratara de un equipo en particular), la mejor protec- ción para estos casos como se mencionó en el capítulo III es

la protección diferencial, o protección piloto, ya que estos dos tipos de protección son altamente selectivos, sin zona muerta, y son de alta velocidad.

La protección piloto por onda portadora es la más segura de todas las protecciones piloto, ya que por el mismo cable de potencia se transmite la señal; para inyectar la señal portadora y restringirla a la zona de protección se emplean aparatos de acoplamiento adecuados y trampas de onda, como ya se describió en el Capítulo III, esto hace que el sistema de protección sea muy costoso, además la alta capacitancia que presentan los cables produce una gran atenuación a frecuencias altas.

No es conveniente emplear para este ejemplo de aplicación, la protección piloto por microonda, ya que la topografía de la ruta de los cables no lo permite (ver figura 4.3).

La protección diferencial y la protección por hilo piloto son similares por tener el mismo principio de funcionamiento, la diferencia está, en que la protección diferencial requiere de seis hilos pilotos es decir dos por fase para su esquema de protección, en cambio la protección por hilo piloto requiere solamente de dos pilotos. El mayor número de hilos piloto de la protección diferencial, constituye una desventaja que presenta este esquema, ya que de esta manera ofrece mayor exposición a fallas en los hilos piloto. Por lo tanto por condiciones técnicas y económicas se escoge a la protección por hilo piloto como protección principal para los cables del presente ejemplo de aplicación.

#### 4.5.1.1 AJUSTES DE LA PROTECCION PRINCIPAL

##### PROTECCION POR HILO PILOTO TIPO CORRIENTE CIRCULANTE

- Tipo de relé a ser utilizado  
HCB-6 Mitsubishi ó similar (Ver apendice B)

El sistema a ser protegido cumple con los requierimientos dados en la página 1 del apéndice B, es decir.

- a) El sistema es efectivamente puesto a tierra (Ver 4.6.1)
- b) Longitud del cable a protegerse menor a 40 km (longitud del cable 428 mts.)
- c) Sistema de dos terminales.

- Corrientes fluyendo por el cable de 230 KV entre las ba -  
rras 16 y BK.

Corriente mínima de cortocircuito, valor obtenido con una -  
falla trifásica con mínima o máxima generación en la barra  
16.

$$I_{min} = 959 \text{ A.}$$

Corriente máxima de cortocircuito, valor obtenido con una -  
falla monofásica con máxima generación en la barra BK.

$$I_{max} = 20474 \text{ A.}$$

Corriente máxima de régimen continuo (Ver apendice A).

$$I = 350 \text{ A.}$$

- Transformadores de corriente

La clase de precisión empleada para los transformadores de -  
corriente para uso en protecciones es de 5 y 10 %. Técnica-  
mente, se debería utilizar los transformadores de corriente-  
más přecisos que se dispongan, pero no siempre sería justifiq  
cable economicamente. Para este caso en que el relé utilizaq  
do opera en 20 milisegundos (Ver apendice B) para todo tipo  
de fallas, lo más conveniente es utilizar el transformador -

de corriente de precisión 10 % que es más económico.

Como la corriente máxima de cortocircuito es de 20474 A. el transformador de corriente no debe saturarse para este valor, para que las protecciones puedan operar satisfactoriamente, de tal manera que se puede elegir un transformador de relación 1200/5 y clase de precisión 5P20 tipo boquilla (4), de esta manera se garantiza la no saturación del núcleo para valores menores a 20 veces la corriente nominal del transformador de corriente, es decir valores menores a 24.000 A.

- Calibración del relé (Apendice B pág. 5)

#### 1.- Tap de corriente

La siguiente condición debe cumplirse

Valor del tap (factor de multiplicación, valor central de la tabla 3)  $<$  (1/2 corriente mínima de falla)

$$\text{Valor del Tap} < \frac{1/2 I_{\text{min de falla}}}{\text{factor de multiplicación}}$$

$$\text{Valor del Tap} < \frac{1}{2} * 959 * \frac{5}{1200} * \frac{1}{1.5}$$

$$\text{Valor del Tap} < 1.33$$

Entonces usamos el valor del Tap 1.2

#### 2.- Tap de compensación

Para un alambre piloto de  $r = 0.9$  mm tenemos que

$$R_p = 29 \Omega / \text{KM}$$

$$C_p = 0.05 \text{ uf/KM}$$

Considerando que la longitud del piloto es igual a la longitud del cable de potencia (428 m) entonces tenemos que :

Resistencia total del piloto

$$R_p = 2 \times 29 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 0.428 \text{ km} = 24.82 \Omega$$

Capacitancia total del piloto

$$C_p = 0.05 \frac{\text{uf}}{\text{km}} \times 0.428 \text{ km} = 0.0214 \text{ uf}$$

Ecuaciones para la calibración

$$R_B = 60 - R_p \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$\left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \frac{1}{7.8}$$

$$R_B = 60 - \frac{24.82}{7.8} = 56.8 \Omega$$

$$C_R = 2.65 - C_p \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$C_R = 2.65 - 0.0214 \times 7.8 = 2.48 \text{ uf}$$

Resistencia  $R_B$  de 0 - 60 (con taps de  $5\Omega$  de intervalo)  
por lo tanto el tap de ajuste es  $55\Omega$

Capacitancia  $C_R$  de 0 - 3.5 uf (con taps de 0.5 uf de intervalo), entonces tap de ajuste en 2.5 uf.

### 3.- Tap de restricción

Tap STD usado para sistemas de dos terminales

Tap LOW usado para sistemas de tres terminales

Por lo tanto se debe usar el tap STD ya que

los cables a proteger corresponden a dos terminales. El diagrama de conexiones de la protección, puede consultarse en el apendice B figura 17.

El burden especificado en la tabla 2 del apendice B para un Tap de corriente de 1.2 del relé HCB - 6 es de 7.4; además se deberá incluir a este burden la resistencia de los conductores que interconectan el transformador de corriente con el relé, así como de la resistencia que presentan los contactos, así tenemos que: para un conductor de cobre de 3mm de diámetro y una longitud total de 100 mts - (50 mts longitud desde el relé hasta el T/c) tenemos una resistencia total de  $0.24\Omega$ , a este valor debemos añadir la resistencia de los contactos que generalmente es de  $0.05\Omega$ , con lo que se tiene una resistencia de  $0.31\Omega$ . Asumiendo un  $\text{Cos } \phi = 0.9$  tenemos que el burden es 8.5 VA para el conductor y los contactos, con lo que el burden total sería

$$(7.4 + 8.5) \text{ VA} = 16 \text{ VA}$$

De tal manera que podríamos escoger de los burden estandarizados el de 22.5 VA que es el más próximo a 16 VA, de esta manera la distancia entre el relé y los T/C- podría ser aumentada.

#### 4.5.2 PROTECCION DE RESPALDO

Las medidas que se toman para proporcionar la protección de respaldo varían mucho, dependiendo del valor y de la importancia de la instalación así como de las consecuencias de la falla.

Normalmente la protección de respaldo es diferente de la protección principal, y por lo general es una protección de sobrecorriente o de distancia (3). Por-

razones económicas, por lo general, ésta no es tan rápida ni tan discriminativa como la protección principal.

En los cables lo más usual es que se dé un cortocircuito entre el conductor y la pantalla cuando el aislamiento ha fallado, es decir se trata de una falla monofásica a tierra, una falla bifásica ó trifásica en los cables es muy remota, ya que para que exista este tipo de cortocircuito, en que los conductores de fase tienen una conexión directa, previamente debe haber existido un contacto entre la pantalla y uno de los conductores de fase, es decir constituye una falla a tierra.

"La protección de distancia se utiliza por lo general para la protección primaria o de respaldo para fallas de fase. La protección de sobrecorriente ha sido utilizada por lo general para la protección primaria o de respaldo para las fallas a tierra." (4) De esta forma se toma a la protección de sobrecorriente como protección de respaldo para el presente ejemplo de aplicación, para lo cual el transformador de corriente de la protección se instalará sobre la conexión a tierra de las pantallas, o fundas metálicas como se aprecia en la figura 4.6 y 4.7.

A las pantallas de los cables

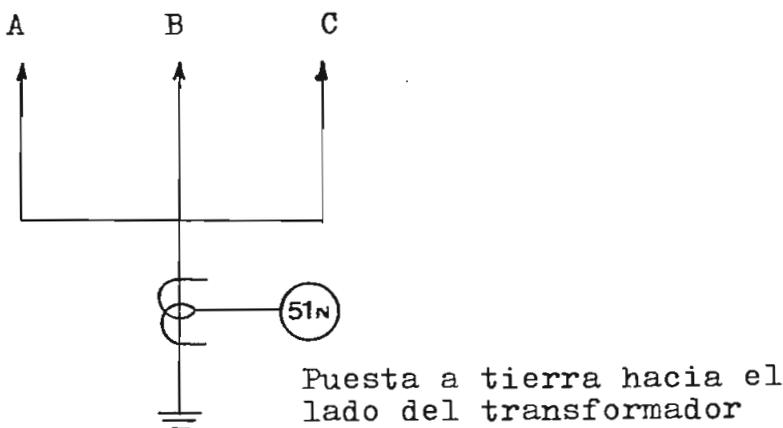


FIG. 4.6 Esquema básico de la protección de respaldo.

#### 4.5.2.1 AJUSTES DE LA PROTECCION DE RESPALDO

##### PROTECCION DE SOBRECORRIENTE

- Tipo de relé a ser utilizado  
CO-2 Mitsubishi ó similar (apendice C)
- Corrientes fluyendo por el cable de 230 KV entre las barras 16 y BK

$I_{min}$  de cortocircuito = 1270 A (Valor con una falla 1  $\phi$  en la barra 16).

$I_{max}$  de cortocircuito = 20.474 A (Valor obtenido con una falla 1 $\phi$  con máxima generación en la barra BK).

$I_{max}$  de régimen continuo = 350 A

- Transformador de corriente  
Se usará 1 transformador de corriente igual que el de la protección principal, es decir

Relación 1200/5

Precisión 10P20 Transformador tipo ventana

- Calibración del relé  
Para la calibración del relé, seguimos los pasos dados en el capítulo III numeral 356 (Ajustes de la protección de-sobrecorriente).

$$I_{oper \ min} = \frac{1}{3} I_{cc}$$

$$= \frac{1270}{3} = 423$$

- Tap de corriente

$$\text{TAP} = 423 \cdot \frac{5}{1200} = 1.76$$

Rango del tap 2 ~ 6

Tap de corriente en 2.0

Con dial mínimo por no tener que coordinarse con ningún otro.

DIAL 1/2

$$\text{Relación } \frac{I_f}{I_{op}} = \frac{1270}{423} = 3$$

Tiempo de operación del relé

$$t = 0.076 \text{ seg.}$$

El Burden especificado para un tap de corriente de 2 es de 5.04 VA, Valor dado por la tabla 5 del apéndice C, de igual forma que para la protección principal, se deberá añadir a este burden la resistencia de los conductores y de los contactos; de tal forma que tendremos:

$$(5.04 + 8.5) \text{ VA} = 13.5 \text{ VA}$$

Escojemos el burden inmediato superior estandarizado que es 22.5 VA.



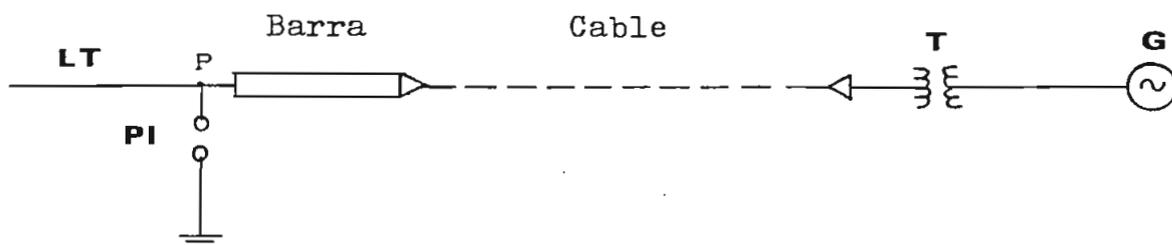
#### 4.6 PROTECCION CONTRA SOBREVOLTAJES

La mejor protección contra sobrevoltajes constituyen los pararrayos; los capacitores también constituyen un medio de protección contra sobrevoltajes, al modificar el frente de onda de la sobretensión (aplanarlo), que para sobrevoltajes de origen atmosférico es de frente muy escarpado.

En este ejemplo de aplicación se protege a los cables contra las sobretensiones con pararrayos, y el cable mismo siendo un capacitor contribuye a modificar el frente de onda.

##### 4.6.1 SELECCION DEL PARARRAYO

Para la selección del pararrayo se ha considerado como el caso más crítico, cuando solo una de las unidades de generación de la "Fase C" estaría conectada a la barra en SF6 y a la línea de transmisión, es claro que en este caso los cables no están expuestos a descargas directas de origen atmosférico, todas las sobretensiones se transmitirán a través de la línea, entonces tenemos el siguiente esquema.



Procedemos a evaluar si el pararrayo ubicado en P (al final de la línea) es suficiente para la protección del cable.

- Determinación del máximo voltaje fase neutro de frecuencia

industrial en el punto de localización del pararrayo.

$$V_n = K_e \times V_{max} \quad (3.01)$$

El voltaje máximo del sistema especificado en el apéndice A es de 245 KV. Los valores de  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $R_0$  y  $R_1$  se han obtenido a partir de las figuras 4.4 y 4.5; de tal manera que

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.00575}{0.01378} = 0.41$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.00007}{0.01378} = 0.005$$

$$\frac{R_1}{X_1} = \frac{0.0001}{0.01378} = 0.006$$

Es decir  $R_1$  es muy pequeña comparada con  $X_1$  por lo que  $R_1$  puede ser despreciada, es decir  $R_1 = 0$  y obtenemos el valor de  $K_e$  de la figura 3.3a, cuyo valor para los datos dados es:

$$K_e = 0.64$$

y

$$V_n = 0.64 \times 245 = 157 \text{ KV}$$

Se escoge el pararrayo tipo estación de voltaje nominal de 168 KV, que es el más cercano a 157 KV (ver tabla 3.1).

- Magnitud de la corriente de descarga

$$I_d = \frac{2 \text{ BIL} - E_d}{Z_c'} \quad (3.05)$$

El nivel básico de aislamiento solicitado es de 1050 KV y la impedancia característica  $Z_c'$  es de  $365 \Omega$  - (Apéndice A) En el caso más crítico, es decir con  $ed = 0$  - tenemos.

$$I_d = \frac{2 \times 1050}{365} = 5.7 \text{ KA}$$

Se escoje el inmediato superior que es 10 KA.

Además se debe comprobar, si el pararrayo - protege en forma adecuada al cable al producirse las reflexiones y transmisiones de ondas, como consecuencia de las sobretensiones.

La impedancia característica de la barra en SF6 es de  $54.5 \Omega$  , es decir que es muy similar a la del cable que es de 53, con lo que se puede asumir que entre la barra y el cable no existe fenómenos de reflexión y transmisión.

Además para el análisis se considera que el transformador de potencia conectado al cable se lo puede representar como un circuito abierto, ya que éstos tienen una impedancia característica muy alta (5) (6).

También se desprecia las reflexiones de la línea en su extremo mas alejado. De tal manera que el diagrama reticular es el de la figura 4.8.

Los coeficientes de transmisión y reflexión son los siguientes:

$$\text{Coeficiente de transmisión } \beta = \frac{2 Z'_{c0}}{Z'_{cl} + Z'_{co}}$$

Coeficiente de reflexión  $\alpha = \frac{Z_{co} - Z_{cl}}{Z_{co} + Z_{cl}}$

Coeficiente de transmisión línea a cable

$$B_1 = \frac{2 \times 53}{365 + 53} = 0.253$$

Coeficiente de transmisión cable a línea

$$B_2 = \frac{2 \times 365}{365 + 53} = 1.746$$

Coeficiente de reflexión línea a cable

$$\alpha_1 = \frac{53 - 365}{365 + 53} = -0.746$$

Coeficiente de reflexión cable a línea

$$\alpha_2 = \frac{365 - 53}{365 + 53} = 0.746$$

Coeficiente de reflexión en el cable

$$\alpha = 1$$

La tensión total en un punto P del cable en un instante (t), será la suma de las tensiones en P durante el tiempo t; es decir  $V_i B_1 (2 + 2\alpha_2 + 2\alpha_2^2)$  y la tensión en un tiempo infinito será:

$$2 V_i B_1 (1 + \alpha_2 + \alpha_2^2 + \alpha_2^3 + \alpha_2^4 + \dots)$$

y la tensión terminal se aproximará a dos veces el voltaje incidente al cable ( $2V_i$ ). (7)

Si consideramos que no está instalado el pararrayos, **PI** y tomando el **Bil** de la línea (1050 KV) como onda incidente de origen atmosférico, la tensión en el cable como consecuencia de las reflexiones y transmisiones -

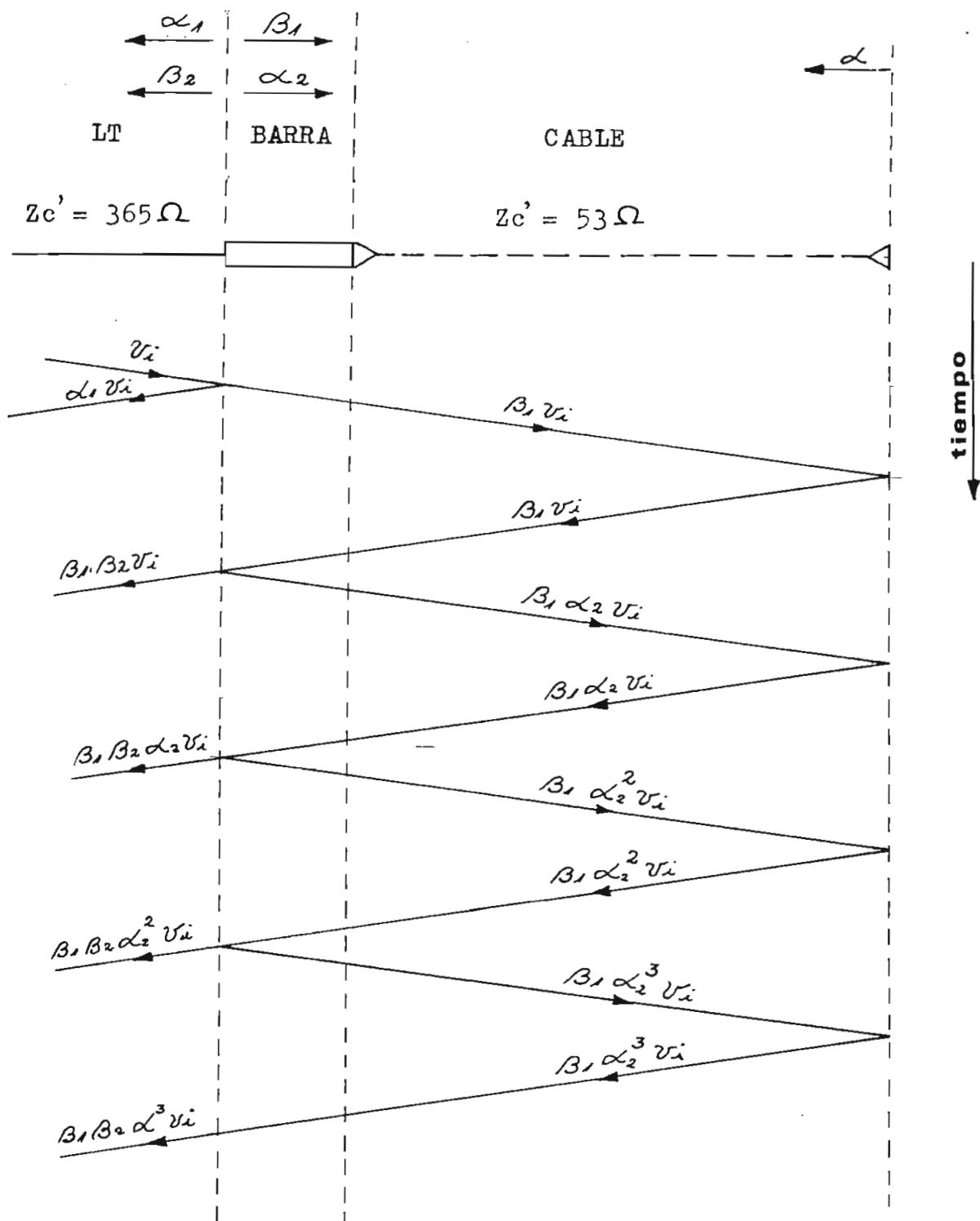


FIG 4.8 Diagrama reticular para la línea y el cable.

de las ondas se aproximará a  $2V_i$ , o sea 2100 KV, con lo cual el aislamiento del cable que es de 1050 KV fallará.

Estando instalado el pararrayo **PI** el voltaje incidente al cable como consecuencia de una sobretensión de origen atmosférico en la línea, es el voltaje máximo de descarga para el frente de onda, que para el pararrayo especificado es de 475 KV (tabla 3.1), por lo tanto el voltaje terminal  $V_t$  en el cable tenderá a

$$V_t = 2 \cdot V_i$$

$$V_t = 2 \cdot 475 \text{ KV} = 950 \text{ KV}$$

Como se indicó en el capítulo III, se deberá cumplir que: El máximo voltaje de descarga, en el equipo protegido, incluyendo un margen de protección del 20% debe ser igual o menor que el BIL del equipo protegido, así tenemos que:

$$V_{\text{max de descarga}} \cdot 1.2 \leq \text{BIL}$$

El BIL especificado para los cables es de 1050 KV (Apéndice A), así tenemos que:

$$950 \cdot 1,2 \neq 1050$$

$$1140 \text{ KV} \neq 1050 \text{ KV}$$

Entonces el pararrayo **PI** ubicado al final de la línea, no protege en la manera que se requiere al cable.

De esta manera se deberá instalar otro pararrayo ubicado lo más cerca posible a la unión barra-cable, que deberá tener el mismo voltaje nominal del anterior, es decir  $V_n = 168 \text{ KV}$ .

La primera onda de sobrevoltaje que fluye - por el cable es como se indica en el diagrama reticular:

$$V = \beta_1 V_i$$

El  $V_i$  sería el voltaje de descarga del primer pararrayo  $V_i = 475$  KV, entonces,

$$V = 0.253 \times 475 = 120 \text{ KV}$$

con lo cual no se produce ninguna descarga en el pararrayo; la descarga se producirá en el pararrayo, cuando la onda incidente en el cable alcance el voltaje de descarga del pararrayo, que para este caso es de 475 KV .

El máximo voltaje en el cable es el voltaje de descarga del pararrayo incluyendo el incremento de 67 KV que es el correspondiente a la quinta reflexión que se produce en el cable, esto lo podemos apreciar mejor en las figuras 4.9 y 4.10, entonces  $V_{\max} = a 542$  KV. (475 + 67).

El tiempo que demora la onda en el cable para alcanzar el voltaje de descarga del pararrayo, se produce en 12.33 useg., es decir cuando la onda se ha reflejado cuatro veces como se aprecia en la figura 4.9, de tal manera que el voltaje antes de la descarga del pararrayos es de 487 KV.

Ahora comprobamos si se cumple que:

$$V_{\max} \times 1.2 \leq BIL$$

$$542 \times 1.2 \leq 1050$$

$$650 \leq 1050$$

De esta manera vemos que el cable está co-

rectamente protegido; pero sería muy conveniente usar el BIL recomendado para 230 KV, que es de 900 KV, con lo cual se obtiene un ahorro económico, todo este análisis se lo puede apreciar mejor en la Figura 4.10.

La velocidad de la onda en un cable viene dada por:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{kr'}} \text{ m/seg}$$

constante dieléctrica del cable (aceite)  $Kr = 3,5$   
 Constante dieléctrica de la barra (SF6)  $Kr = 1,002$   
 Velocidad de la onda en el cable

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{3.5}} \text{ m/seg} = 1.6 \cdot 10^8 \text{ m/seg}$$

Velocidad en la barra en SF6

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{1}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/seg}$$

tiempo que demora la onda en recorrer la barra ( $l=100\text{mts}$ ).  
 ver apéndice A.

$$t = \frac{e}{v} = \frac{100 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/seg}} = 0,33 \text{ useg}$$

tiempo que demora la onda en recorrer el cable (428 mets)

$$t = \frac{428}{1.6 \cdot 10^8 \text{ m/seg}} = 2.63 \text{ useg.}$$

el tiempo que demora la onda en recorrer barra y cable es de 3 useg.

El cable además contribuye a reducir el frente de onda, así tenemos que:

$$\frac{dE2}{dt'} = \sqrt{Kr'} \cdot \beta l \cdot \frac{dE}{ds} \quad (3.07)$$



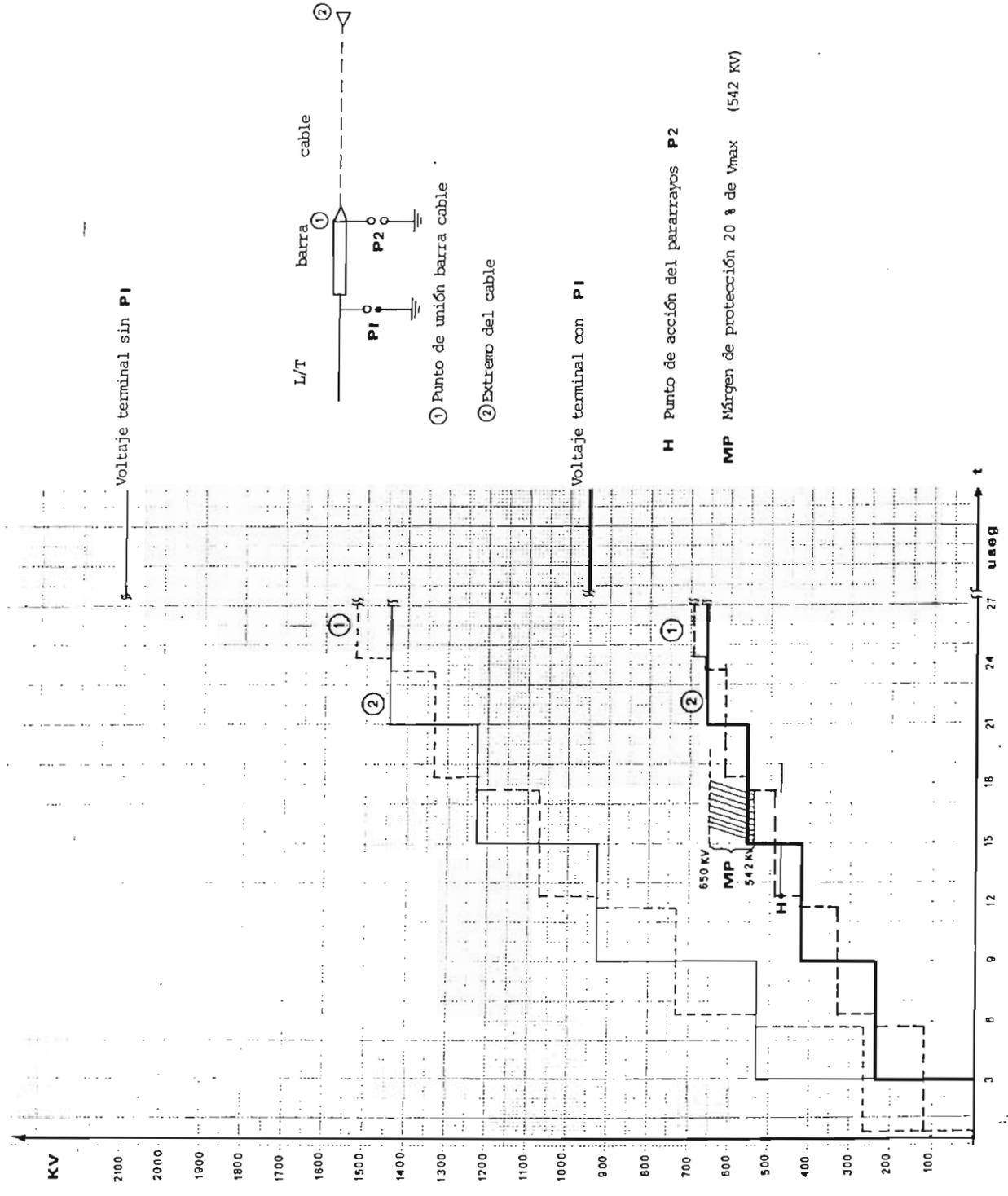


FIG. 4.10 Diagrama tiempo-voltaje con consecuencia de las reflexiones de la onda en el cable.

H Punto de acción del pararrayos P2

MP Margén de protección 20 % de Vmax (542 KV)

Voltaje terminal sin PI

Voltaje terminal con PI

1 Punto de unión barra cable

2 Extremo del cable

$$\frac{dE2}{dl'} = \sqrt{3.5} \times 0,253 \frac{dE}{ds}$$

$$\frac{dE2}{dl'} = 0.47 \frac{dE}{ds}$$

Entonces, el gradiente de potencial para - este caso es reducido prácticamente en un 50%.

#### 4.6.2 SOBREVOLTAJES EN LAS PANTALLAS

Estando las pantallas de los cables puestos a tierra en el un extremo, en el extremo libre se presentará el mayor valor de voltaje.

El voltaje inducido con la corriente máxima de cortocircuito es:

$$E_o = W \cdot I \cdot M \quad (2.37)$$

$$E_o = 377 \times 20.474 \times 0,169 \times 10^{-3} = 1304 \text{ voltios}$$

Cuando en el conductor del cable se presenta un sobrevoltaje de maniobra o de origen atmosférico el voltaje que se presenta entre la pantalla y tierra es:

$$V_p = \frac{2Z_b}{4Z_a - Z_b} v_i \quad (2.47)$$

$$\text{con } Z_a = \sqrt{\frac{L_a - L_b}{c_a}} + Z_b$$

$$Z_b = \sqrt{\frac{L_b}{c_b - c_a}}$$

$$L_a = 0.2 \ln \frac{5.15}{1.6} \frac{\text{mH}}{\text{Km}} = 0.233 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L_b = 0.2 \ln \frac{5.15}{4.35} \frac{\text{mH}}{\text{Km}} = 0,0317 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C_a = \frac{2\pi \cdot 8.85 \cdot 3.5 \cdot 10^{-12} \text{ fd}}{\ln \frac{395}{4.35} \text{ m}} = 0.22 \cdot 10^{-9} \text{ fd/m}$$

El dieléctrico entre pantalla y tierra es PVC con  $K_r = 6.3$

$$C_b = C_a + \frac{2\pi \cdot 8.85 \cdot 6.3 \cdot 10^{-12} \text{ fd}}{\ln \frac{5.15}{4.35} \text{ m}} = 2.29 \cdot 10^{-9} \text{ fd/m}$$

$$Z_b = 3.9 \text{ n}$$

$$Z_a = 34 \text{ n}$$

$$V_p = \frac{2 \cdot 3.9}{4 \cdot 34 - 3.9} = 0.06 \text{ Vi}$$

El voltaje máximo incidente en el cable es 542 KV con lo que:

$$V_p = 0.06 \cdot 542 \text{ KV} = 32.5 \text{ KV}$$

Si consideramos, como indica la referencia (\*) que el nivel de aislamiento entre la pantalla y tierra es el 15% del BIL del cable, vemos que el máximo voltaje entre la pantalla y tierra (32.5KV), es menor que el 15% del BIL del cable (157 KV); con lo cual no es necesario instalar los pararrayos entre pantalla y tierra,

\* Referencia número 14 del capítulo II

4.7 VENTILACION DEL TUNEL

## DATOS

Número de cables .....	15
Radio del tunel.....	1.6 m (Fig.4.3)
Temperatura ambiente.....	30 °C(Apendice A)
Temperatura máxima del conductor en régimen continuo.....	70 °C
Factor de carga .....	100%

Circunferencia interna del tunel

$$C = 2.\pi. r$$

$$C = 2.\pi.1,6$$

$$C = 10 \text{ m}$$

Pérdidas totales por metro con factor de carga 100%

$$P = n.I^2.R$$

$$R = 5,563.10^{-5} \Omega / \text{m}$$

Corriente de plena carga (Ipc)

$$I_{pc} = 127.700/\sqrt{3} = 230$$

$$I_{pc} = 320 \text{ A.}$$

$$P = 15.320^2 \cdot 5,563.10^{-5} \text{ W/m}$$

$$P = 85.44 \text{ W/m}$$

De la figura 2.8 se obtiene un incremento de la temperatura del aire dentro del tunel de  $5.5^\circ\text{C}$

Temperatura total

$$T_t = \text{Temp. ambiente} + \text{Increm. de la temp. del aire}$$

$$T_t = 30^\circ\text{C} + 5.5^\circ\text{C}$$

$$T_t = 35.5^\circ\text{C}$$

Comparación con la máxima temperatura del conductor

$$T_t(35.5^\circ\text{C}) < \text{Temp. máx. del conductor } (70^\circ\text{C})$$

Como no se sobrepasa la temperatura máxima del conductor el tunel no necesita ventilación.

C A P I T U L O V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE ESTE TRABAJO

Este trabajo se presenta como un aporte para la protección de los cables de alto voltaje.

Las conclusiones y recomendaciones generales obtenidas al elaborar el presente trabajo, pueden resumirse en los siguientes puntos :

### CONCLUSIONES

- Para la protección de los cables como un equipo en particular, los mejores tipos de protecciones que se pueden adoptar son las protecciones piloto o la protección diferencial.
- Teniendo una configuración cable-transformador, el cable contribuye a tener un menor nivel de aislamiento entre capas del transformador, ya que el cable contribuye a bajar el frente de onda, de tal manera que en el transitorio el voltaje entre capas contiguas no es tan elevado, como al tener la onda un frente escarpado.
- El cable no contribuye a bajar el voltaje incidente al transformador, ya que si bien es cierto, que la primera onda por el cable es mucho menor que el voltaje incidente al mismo, el voltaje terminal tiende a dos veces el voltaje incidente, este voltaje sería el mayor voltaje incidente al transformador.
- La protección secundaria o de respaldo de los cables es aconsejable que sea solo una protección fase-tierra ya que una falla entre fases es muy remota, y además para que ocurra esto, el conductor tendría que hacer contacto con la pantalla primero, con lo que resulta una falla fase tierra.

## RECOMENDACIONES

- Ya que no existe a nivel nacional ni internacional un límite para el voltaje inducido en las pantallas, sería muy conveniente adoptar un valor límite, para de esta manera tener este valor como norma o patrón.
- Siendo el estudio de la impedancia de secuencia cero ( $Z_0$ ) de los cables muy complejo, convendría realizar un estudio más completo, que bien podría ser un tema de tesis.
- Se recomienda al INECEL, que el BIL del cable sea de 900KV; por cuanto después de haber hecho el análisis en el ejemplo de aplicación, se concluye que el máximo voltaje en el cable es de 542 KV.
- Para la protección fase-tierra de los cables, resulta muy conveniente que el relé de detección esté conectado a través del TC, intercalado entre tierra y el punto neutro de la conexión estrella de las pantallas.

A P E N D I C E A

- Número de tramos de cable a ser suministrados para los cinco (5) circuitos trifásicos de las unidades generadoras. 15
- Longitud media aproximada de las rutas de los cables. 428
- Tensión nominal del sistema (entre fases) 230 KV
- Tensión máxima de servicio (entre fases) 245 KV
- Tensión nominal del cable 133/230 KV
- Frecuencia nominal 60 Hz
- Tensión de impulso que debe resistir el cable. 1050 KVp
- Corriente máxima de régimen continuo. 350 A
- Factor de carga 100 %
- Conexión del neutro del sistema Sólidamente a tierra.
- Temperatura máxima de trabajo del conductor a la corriente máxima en régimen continuo. 70 °C
- Temperatura del aire ambiente 30 °C
- Resistividad del suelo 3000  $\Omega$  - m
- Condiciones de mínima generación
  - Fases A - B 3 unidades
  - Fase C 2 unidades
  - Sopladora 3 unidades





## FEATURES

1. Only one pair of pilot wires is required for complete phase and ground protection of two- and three-terminal lines.
2. Simultaneous tripping of the relay at each terminal is effected in about 20msec for all faults.

## PERFORMANCE CHARACTERISTICS

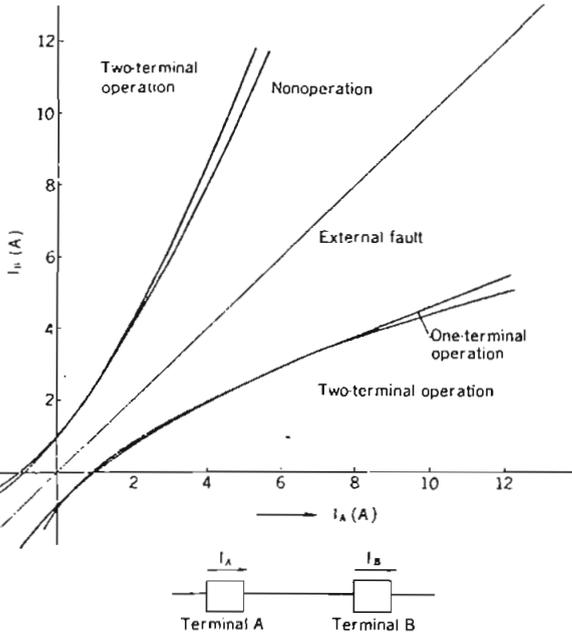


Fig. 2 Ratio-differential characteristics

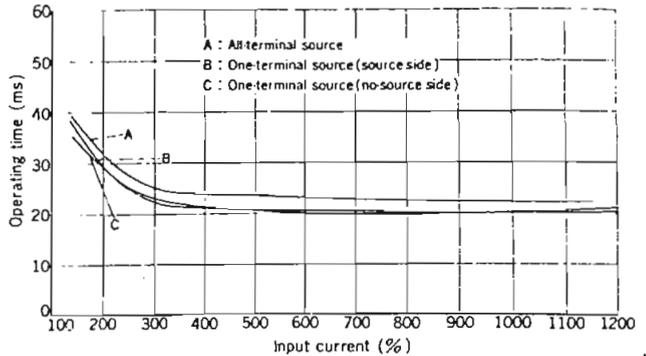


Fig. 3 Operating speed

Table 2 VA Consumption

Tap (A)	Rating Burden (VA)		
	1st phase	2nd phase	3rd phase
1	8.05	4.65	5.4
→ 1.2	7.4	3.35	4.1
1.5	6.5	2.3	3.05
2	5.25	1.35	2.05
3	3.8	0.55	1.25

## APPLICATIONS

In principle, the relay is designed for application to systems under the following conditions:

1. Total resistance of both pilot wires ..... less than 1000Ω
- Capacitance between Pilot wires ..... Less than 3μF at 50Hz  
less than 2μF at 60Hz

For example, the transmission distance should be less than 30km when a 0.9mm pilot wire is used.

2. A positive-sequence or zero-phase-sequence power

source should be provided at one or both terminals of the protected zone.

3. When pilot wire supervision is required, a separate power supply of 110 or 220VAC must be made available.
4. The pilot wire induced voltage should be less than 10kV.
5. The CTs installed at both terminals of the protected zone should have equal current ratios.
6. As a rule, the power system to be protected should be either a 2-terminal or 3-terminal type.

## OPERATION AND CONSTRUCTION

### 1. Operating Principle

The Type HCB-6 pilot-wire protection relay is a differential relay that effects line-fault detection at both terminals of a transmission line. In this system, a part of the secondary current of the CT installed at each terminal is supplied to the pilot wire for fault detection.

The Type HCB-6 relay uses the "normal current circulation system," employing a restraining coil that is always

energized by the normal load current.

A saturation transformer at the input provides the relay with ratio-differential and phase-comparison characteristics. The combination of these characteristics positively prevents the relay from operating at the occurrence of an external fault, and infallibly actuates the relay in the case of a fault within the protected zone of the transmission system.

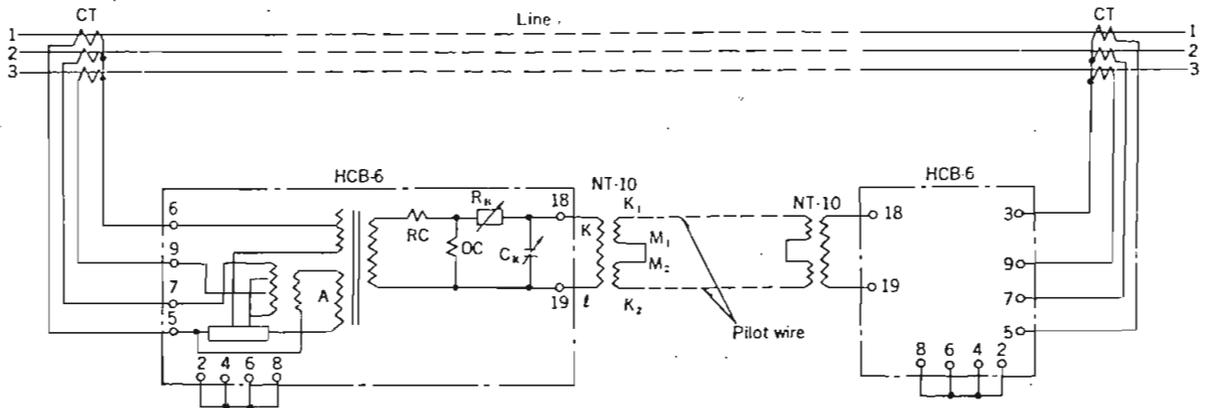


Fig. 4 HCB-6, two-terminal protection system

The arrangement of a 2-terminal protection system is shown in Fig. 4. As shown in the figure, a unit consisting of a Type HCB-6 pilot-wire relay and a Type NT-10 isolation transformer are used at each terminal.

The current distribution and operating conditions of the relay in case of a fault are as follows:

**1) Internal Power Source Fault (Two-Terminal)**

In case of an internal fault where the same magnitude of current flows in from both terminals (Fig.5) the voltages at both terminals are equal and in phase. No current flows in the pilot wire; current flows only in the restraining coil (RC) and the operating coil (OC) of the Type HCB-6 relay. In this case, the torque produced by the OC is far greater than that produced by the RC, causing the relay to operate instantaneously.

**2) Internal Power Source Fault (Single-Terminal)**

When a fault current flows in from only one terminal, the current flows as shown in Fig. 6, and an operating current is supplied to the Type HCB-6 relay, and tripping is effected at both terminals almost simultaneously.

**3) External Fault**

In the case of an external fault on normal load, the output voltages of the input units installed at both terminals become cumulative, as shown in Fig. 7. The current therefore circulates within the pilot wire, causing a condition as if the pilot wires were short circuited at the neutral point. As a result, almost no current flows through the OC, only through the RC, thus causing the restraining force to increase so that the relay does not operate.

In the case of such external faults, a voltage of about one-half the voltage drop on the pilot wire appears across OC. An input due to the difference between the current ratios of both CTs is also supplied to the OC. These inputs cause the operating force to act on the moving element of the relay. At the same time, however, the pilot-wire circulating current flows through the RC, producing a restraining force much greater than the operating force, positively preventing the relay from misoperation.

The input unit of the Type HCB-6 relay is equipped with a saturation transformer that suppresses the relay input, to give an overall saturation ratio-differential (or phase-comparison) characteristic (see Fig. 8), thus preventing misoperation of the relay, even though there may be a considerable difference in the CT characteristics. In addition, the saturation transformer protects the system against excessive input. And the relay is stable against DC or pulse transient inputs, preventing misoperation due to chattering regardless of the magnitude of an external fault.

The Type HCB-6 relay is also insensitive to such abnormal currents as the transient surges typical of ground faults in cable power systems.

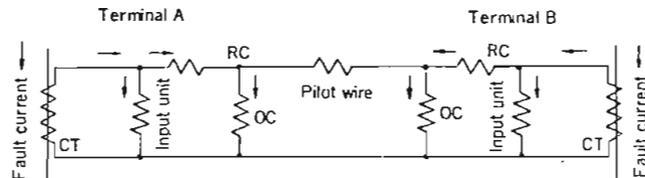


Fig. 5 Current distribution in case of internal fault in a two-terminal power-source system

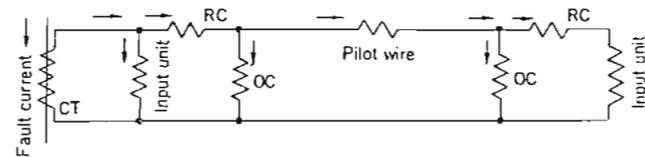


Fig. 6 Current distribution in case of internal fault in a single-terminal power-source system

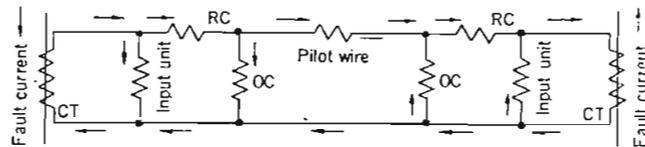


Fig. 7 Current distribution in case of external fault

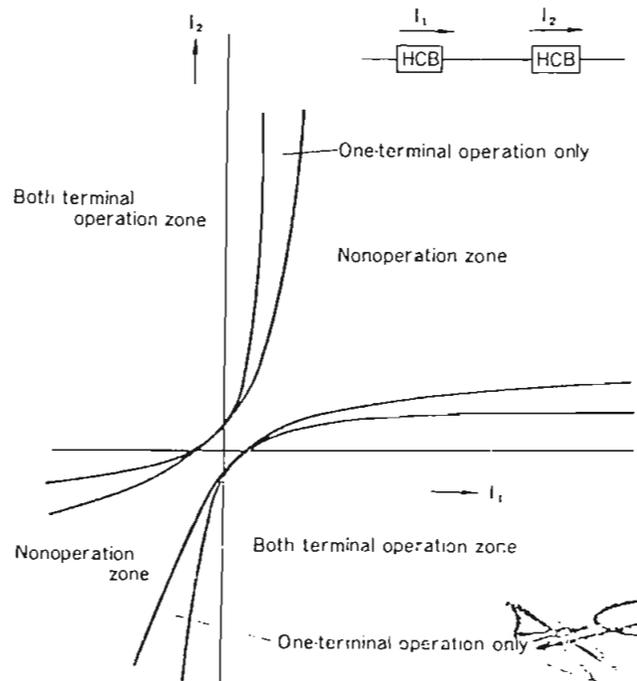


Fig. 8 Type HCB-6 pilot-wire relay differential characteristic in a 2-terminal system

## 2. Construction

The main components of the relay are: 1) the input circuit section, which produces a single-phase output voltage as a resultant of the CT positive-phase sequence current ( $I_1$ ) and residual circuit current ( $I_0$ ), and 2) the Type MP polarity element. The relay may be divided into the restraining-force selection-tap section, and the relay-circuit section, which consists of a Type ICS operation indicator and other elements.

### 1) Input Circuit

The input circuit is shown in Fig. 9. The main elements in the circuit are resistors, an air-gap transformer and a saturation transformer. In this circuit, the input is converted into a single-phase output that is proportional to the positive-phase sequence component and the zero-phase sequence component, as expressed by the following equation:

$$V = K_1 I_1 + K_0 I_0 \quad (K_1 \text{ and } K_0 \text{ are constants})$$

where,  $I_1$  = Positive-phase sequence current

$I_0$  = Zero-phase sequence current

(See Appendix 1 for a detailed explanation of the above formula.)

### 2) Relay Circuit

As shown in Fig. 9, this circuit consists primarily of a polarity element, and such other components as a surge-absorbing varistor, diodes for rectification, and impedance-adjusting resistors.

When an input is supplied to this circuit, with the input circuit disconnected, the relay operates when a current of 8mA ( $\pm 10\%$ ) flows through the OC and RC.

#### • Restraining force tap

STD: 2-terminal system

LOW: 3-terminal system

#### • Circuit impedance

Restraining circuit  $Z \approx 230\Omega$  (at 8mA)

Entire circuit  $Z \approx 1690\Omega$  (at 8mA)

### 3) Pilot Wire Impedance-Compensation Device

A resistor ( $R_B$ ) and capacitor ( $C_R$ ) are inserted between terminals 18 and 19. These are used for maintaining constant resistance and capacitance of the pilot wire, looking from the relay side.

The setting should be made in accordance with the directions given under Settings, page 5.

Resistance  $R_B$  0~60 $\Omega$  (with taps at 5 $\Omega$  intervals)

Capacitance  $C_R$  0~3.5 $\mu F$  (with taps at 0.5 $\mu F$  intervals)

## 3. Type NT-10 Isolation Transformer

1) The isolation transformer, for protection of the pilot wire, performs the following functions:

a) Protects the relay from the high voltage induced in the pilot wire.

b) Insulates the pilot wire from the CT circuit so that the former can be separately grounded at a suitable point for effective limitation of the pair-to-ground potential of induced voltages.

c) Reduces the pilot-wire current, thus lightening the load on the main CT and adjusting the effect of the pilot-wire resistance on the relay to a suitable value.

d) Compensates for the capacitance of the pilot wire.

e) Permits DC supervision of the pilot wire (i.e., isolation of DC).

### 2) Type

#### a) Turns ratio

$$\left. \begin{aligned} k-l: (K_1 - M_1) + (M_2 - K_2) &= 1: 2.8 \\ k-l: (K_1 - L_1) + (L_2 - K_2) &= 1: 2.0 \end{aligned} \right\} \text{ double ratio}$$

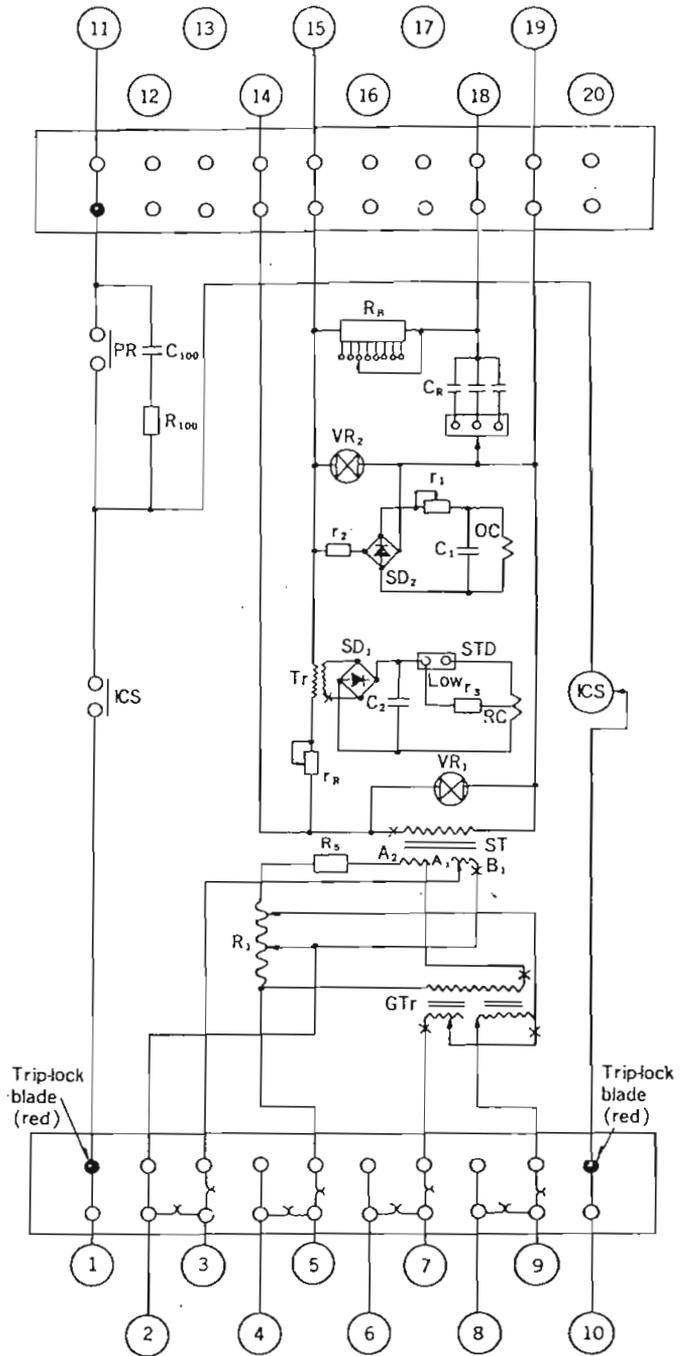


Fig. 9 Type HCB-6 connection schematic

b) Excitation impedance (between k and l, at 10V)

60Hz 1k $\Omega$   $\pm 20\%$

50Hz 0.92k $\Omega$   $\pm 20\%$

c) Insulation strength

Between k-l and core: 2,000VAC for one minute

Between k-L-M and core: 10kVAC for one minute

Between K-L-M and k-l: 10kVAC for one minute

d) Note

The transformer can be used with either 50Hz or 60Hz supply.

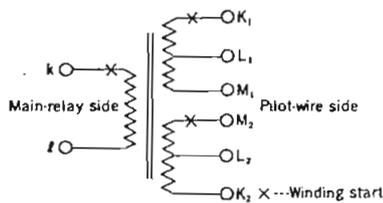


Fig. 10 Type NT-10 internal connections

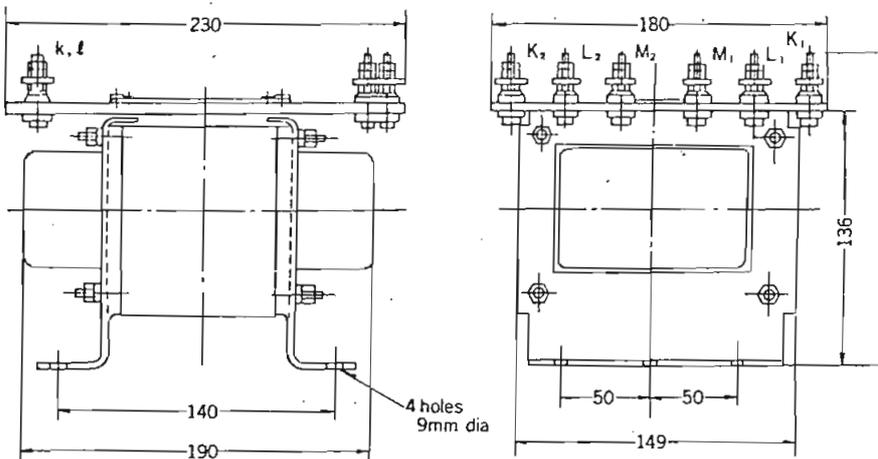


Fig. 11 Type NT-10 outline and dimensions

### 4. Pilot-Wire Supervision Equipment

A variety of relays and other equipment are used for pilot-wire supervision. The operating power is generally obtained from the AC power supply of the station through the isolation transformer and the rectifier circuitry of the supervision power supply unit.

Selection of the most suitable supervision equipment from the two types available should be made by review of the overall sequence diagram of the pilot-wire protection-relay system.

#### 1) Direct autosupervisory method

Supervision is effected by passing direct current through the pilot wire. This method is recommended when the pilot wire is an overhead line.

#### 2) Representative autosupervisory method

The pilot wires are supervised by direct current in separately installed supervisory pilot wire which is not connected to the pilot-wire relay. This method is simple in construction and operation and it can easily be standardized for manufacture; but it does not always provide satisfactory supervision when the pilot wire is of the overhead type.

## SETTINGS

### 1. Current Tap

The minimum fault current of the system should be determined, and the tap selected in accordance with Table 3. The following condition must be satisfied:

$$(\text{Tap value}) \times (\text{Multiplying factor—i.e., center value in Table 3}) < \text{Minimum fault current} \times \frac{1}{2} \dots \dots \dots (4)$$

To prevent spurious operation of the relay due to pilot wire breakage, the following condition should be satisfied:

$$\text{Max. load current} \leq (\text{tap value}) \times (2.5 \text{ to } 3) \dots \dots \dots (5)$$

(This condition need not be checked when a fault-detection relay is conjointly used.)

### 2. Compensation Tap

Typical values of pilot wire resistance and capacitance are indicated below:

$$0.9\text{mm: } R_P = 29\Omega/\text{km (one way), } C_P = 0.05\mu\text{F}/\text{km}$$

$$1.2\text{mm: } R_P = 15.6\Omega/\text{km (one way), } C_P = 0.05\mu\text{F}/\text{km}$$

Equations for Setting

$$50 \text{ and } 60\text{Hz } R_B = 60 - R_P \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$60\text{Hz } C_R = 2.65 - C_P \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \dots \dots \dots (7)$$

$$50\text{Hz } C_R = 4 - C_P \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \dots \dots \dots (8)$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2.8}\right)^2 = \frac{1}{7.8}$$

### 3. Restraining Tap

An SID tap should be used in a two-terminal system and a LOW tap in a three-terminal system.

Table 3 Operating Sensitivity (in combination with the pilot wire)

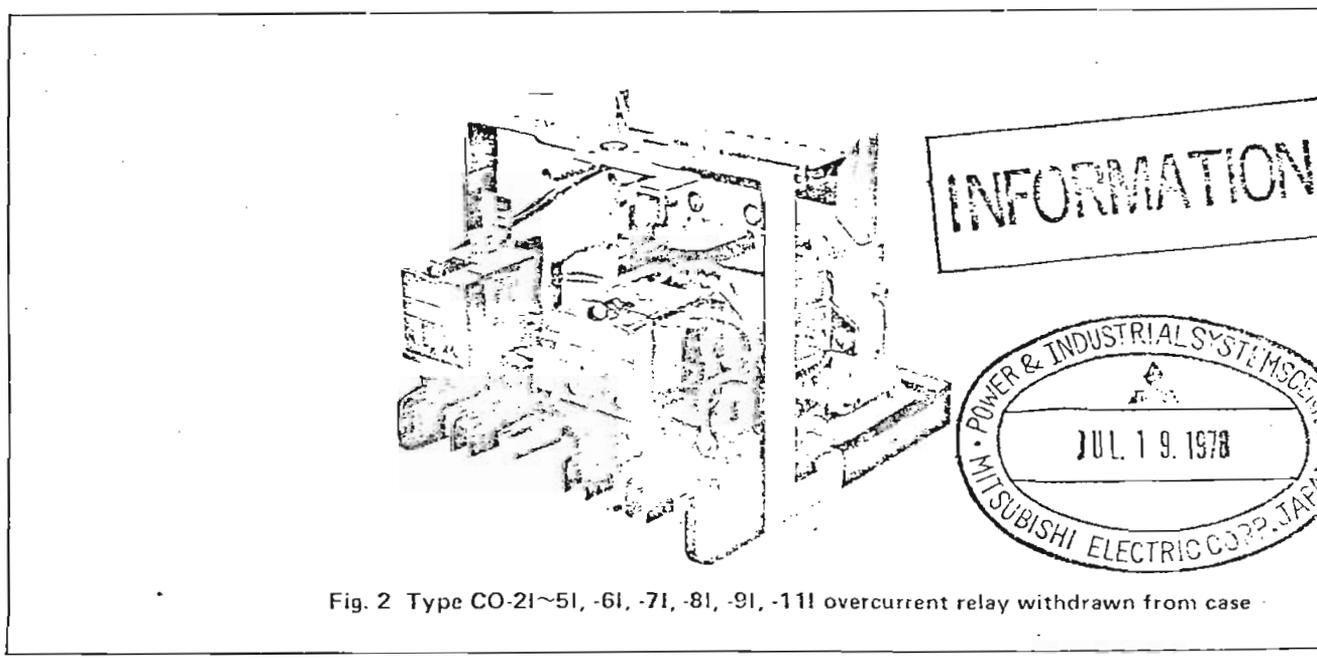
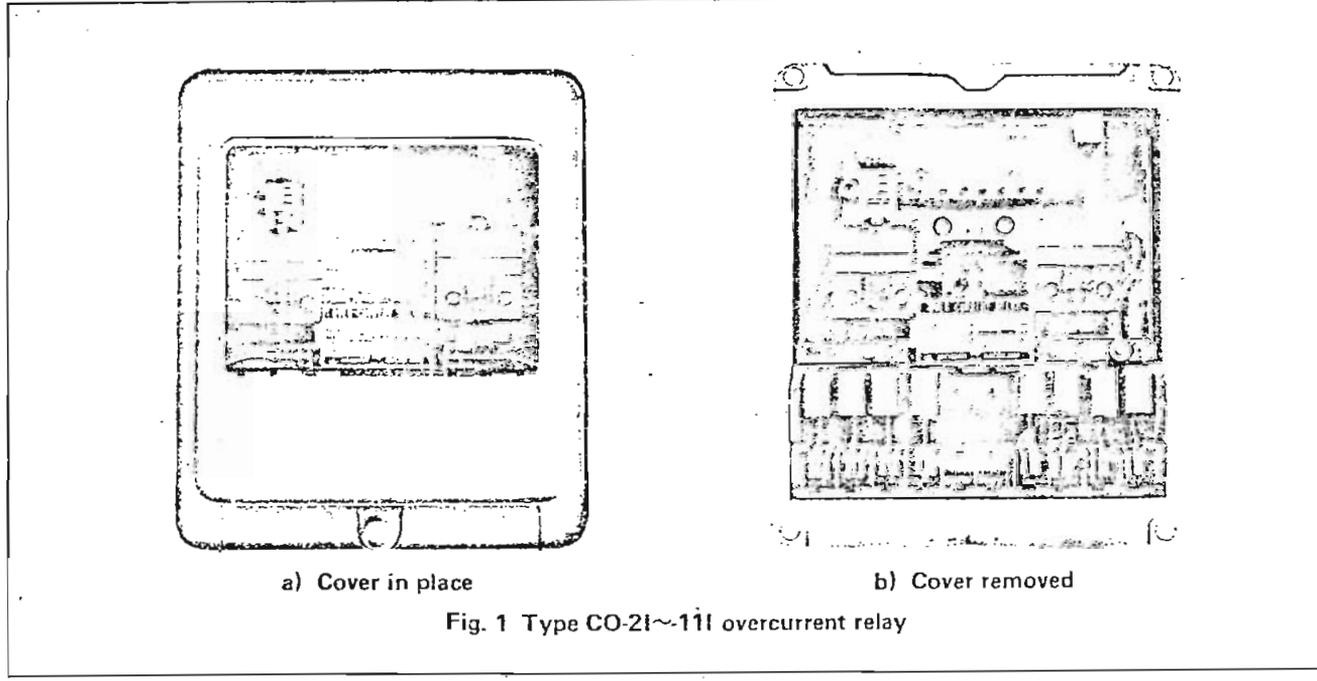
Condition		Center value (operating range)*		
		Three-terminal power source	Two-terminal power source	Single-terminal power source
Two-terminal protection	Power-source terminal	—	1.5(1.3~1.7)	3.5(3.0~4.0)
	Nonpower-source terminal	—	—	2.9(2.5~3.3)
Three-terminal protection	Power-source terminal	1.5(1.3~1.7)	2.3(1.9~2.7)	5.8(5.0~6.6)
	Nonpower-source terminal	—	2.2(1.9~2.5)	4.4(3.6~5.2)

\*The operating value attains several times the tap values.

## AC Overcurrent Relays

Type CO-2~-11

### A P E N D I C E C



Type CO induction disk overcurrent relays are used when operation is required at currents

above a predetermined value with delays which vary according to these current values.

Revised publication, effective Oct. 1976, superseding publication L-A3671-A of Oct. 1975. Specifications subject to change without notice.

## Coil Ratings and Burden Data (60Hz; somewhat smaller on 50Hz lines)

Table 5 Type CO-2 Coil Ratings and Burden Data

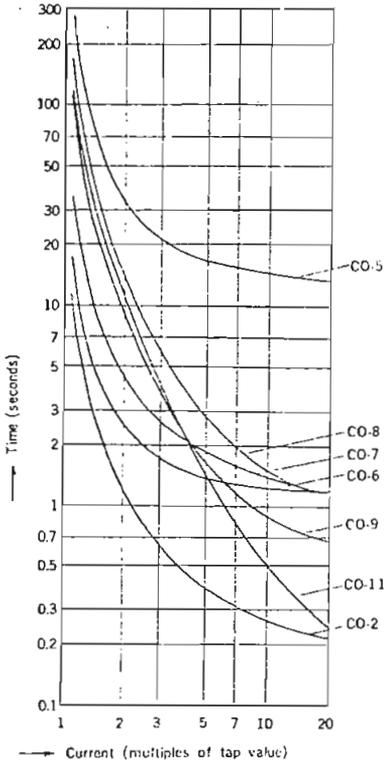
Tap range	Tap (A)	Ratings (A)		DC resistance ( $\Omega$ )	Burden data @ tap value					Z ( $\Omega$ ) @ 10 x tap	Z ( $\Omega$ ) @ 20 x tap
		Cont.	1 sec.		Z ( $\Omega$ )	P.F. angle	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	VA		
0.5~2.5	0.5	0.75	28	5.6	19.2	58	10.15	16.5	4.8	10.25	7.9
	0.6			4.69	10.4	57	5.66	8.75	4.9	7.5	5.9
	0.8			3.44	7.3	53	4.69	5.6	5.0	4.81	4.0
	1.0			2.86	5.3	50	3.40	4.06	5.3	3.48	3.05
	1.5			1.95	2.76	40	2.11	1.769	6.2	1.935	1.932
	2			1.50	1.8	36	1.456	1.058	7.2	1.448	1.425
	2.5			1.22	1.26	29	0.875	0.61	7.9	1.12	1.14
2~6	2	3	110	0.35	1.26	59	0.648	1.08	5.04	0.655	0.50
	2.5			0.29	0.821	55	0.472	0.673	5.13	0.448	0.368
	3			0.25	0.596	51	0.375	0.463	5.37	0.347	0.28
	3.5			0.22	0.452	47	0.308	0.330	5.53	0.268	0.229
	4			0.19	0.357	45	0.264	0.264	5.72	0.225	0.19
	5			0.16	0.236	41	0.1785	0.1551	5.90	0.168	0.15
4~12	6	6	200	0.14	0.1815	37	0.1408	0.1092	6.54	0.1315	0.1252
	4			0.103	0.307	65	0.130	0.283	4.92	0.1675	0.1325
	5			0.086	0.208	50	0.1335	0.1593	5.20	0.122	0.1020
	6			0.074	0.1482	47	0.1008	0.1032	5.34	0.0918	0.0784
	7			0.066	0.1091	46	0.0758	0.0786	5.35	0.0743	0.0643
	8			0.060	0.0916	43	0.057	0.0625	5.86	0.0625	0.050
	10			0.052	0.066	37	0.0527	0.0397	6.6	0.047	0.043
12	0.046	0.0487	34	0.0404	0.0272	7.0	0.0367	0.358			

Table 6 Types CO-5, CO-6 and CO-7 Coil Ratings and Burden Data

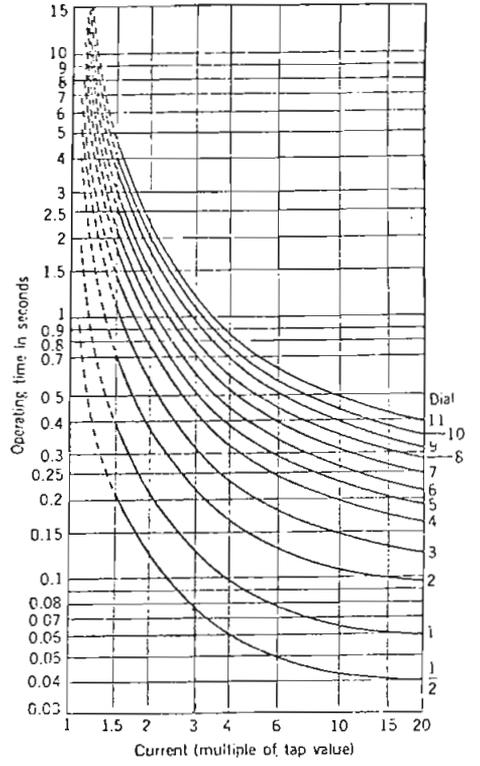
Tap range	Tap (A)	Rating (A)		DC resistance ( $\Omega$ )	Burden data @ tap value					Burden data @ 5A				Z ( $\Omega$ ) @ 10 x tap	Z ( $\Omega$ ) @ 20 x tap
		Cont.	1 sec.		Z ( $\Omega$ )	P.F. angle	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	VA	Z ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )*	R ( $\Omega$ )*	VA		
0.5~2.5	0.5	1.5	56	0.78	15.7	69	5.64	14.7	3.92	4.12	1.47	3.84	102.8	4.12	2.70
	0.6			0.65	11.0	68	4.10	10.2	3.96	3.3	1.23	3.06	82.5	2.95	2.0
	0.8			0.487	6.2	67	2.46	5.7	3.96	2.35	0.93	2.16	58.5	1.78	1.27
	1.0			0.39	4.07	66	1.66	3.71	4.07	1.78	0.722	1.62	44.4	1.22	0.90
	1.5			0.26	1.86	62	0.87	1.64	4.19	1.1	0.515	0.972	27.5	0.654	0.513
	2.0			0.195	1.07	60	0.54	0.93	4.30	0.78	0.39	0.675	19.5	0.42	0.342
	2.5			0.156	0.70	58	0.37	0.59	4.37	0.54	0.286	0.455	13.5	0.288	0.252
2~6	2	6	230	0.090	0.97	67	0.38	0.89	3.88	0.6	0.235	0.552	15	0.275	0.192
	2.5			0.072	0.62	66	0.252	0.565	3.87	0.52	0.212	0.475	13	0.189	0.137
	3			0.060	0.436	64	0.192	0.392	3.93	0.392	0.171	0.35	9.35	0.14	0.106
	3.5			0.052	0.334	63	0.152	0.295	4.09	0.295	0.132	0.265	7.4	0.111	0.085
	4			0.045	0.045	62	0.12	0.226	4.08	0.244	0.115	0.215	6.1	0.09	0.07
	5			0.036	0.168	59	0.037	0.144	4.20	0.168	0.087	0.144	4.19	0.062	0.043
4~12	6	12	460	0.030	0.122	57	0.0665	0.1022	4.38	0.146	0.08	0.11	3.4	0.051	0.0289
	4			0.034	0.25	65	0.107	0.226	4.00	0.232	0.10	0.21	5.81	0.0786	0.0567
	5			0.027	0.166	63	0.075	0.085	4.15	0.165	0.075	0.148	4.14	0.057	0.045
	6			0.023	0.12	61	0.058	0.105	4.32	0.157	0.061	0.11	3.92	0.045	0.037
	7			0.0195	0.087	59	0.045	0.0745	4.27	0.0985	0.05	0.085	2.47	0.0374	0.0312
	8			0.017	0.096	56	0.0386	0.0571	4.40	0.075	0.045	0.06	1.875	0.0318	0.0272
	10			0.0135	0.046	53	0.0276	0.0367	4.60	0.0588	0.038	0.045	1.47	0.0247	0.0222
12	0.011	0.034	47	0.0232	0.0248	4.92	0.0484	0.032	0.035	1.209	0.02	0.0147			

\* Calculated from power factor angle of tap value impedance.

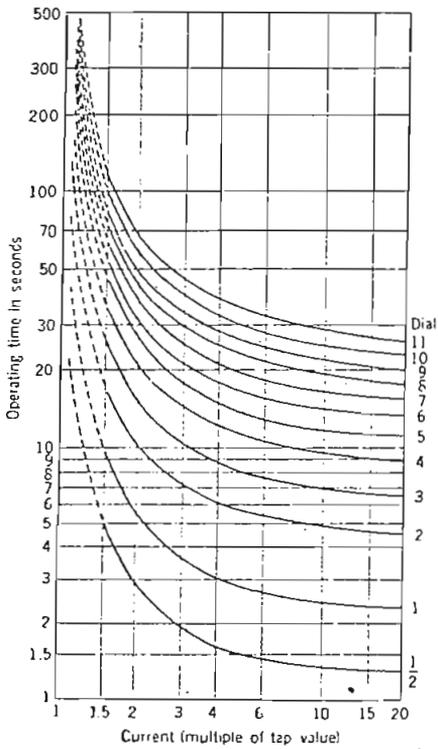
# TIME CURVES



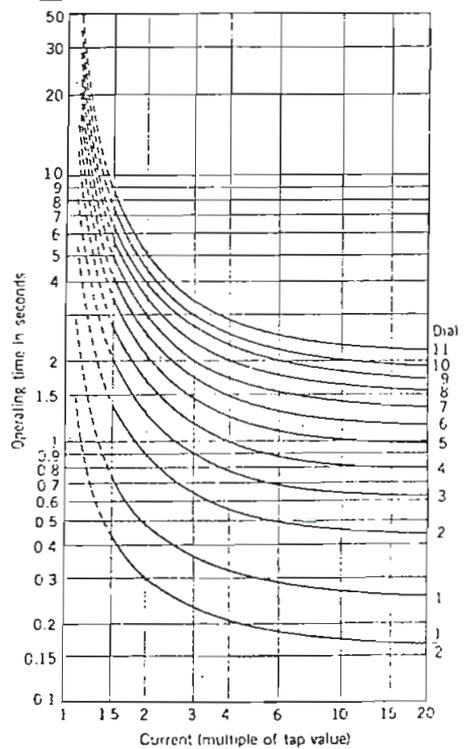
**Fig. 3** Comparative time curves of the CO-2, -5, -6, -7, -8, -9, -11 overcurrent relays (at #6 time dial setting)



**a) CO-2**



**b) CO-5**



**c) CO-6**

**Fig. 4** Typical time curves of CO overcurrent relays

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- (1) Protección de sistemas de potencia e interruptores  
- B. Ravindranath - M. Chander Capitulo I Pag. 22
- (2) Cables subterráneos - Monografías CEAC - José Ramirez Vázquez - Págs. 53 - 86
- (3) A New Corona - and Heat - Resistant cable Insulation based on Ethylene Propylene Rubber - AIEE Transactions - R. B. Blodgett - R. G. Fisher - Diciembre de 1963 Págs. 980 - 990.
- (4) A Comparison of Medium - Voltage cable insulation IEEE - Transactions on Industry application Vol IA 8 #5 Sept/oct 72 - Robert S. Sinatra - Págs. 554 - 558
- (5) Design & Development of 138 KV solid dielectric - Cable for test at Walter Mill Station - Robert R. Howard - Jorge G. Valdes - Reynolds Metals Company - Pág. 1457 - 1453.
- (6) Development and Installation of 138 KV for test at EEI Waltz mill station : Cable 22  
George S. Eager - David A. Silver - General Cable corporation - New York Pág. 1434 - 1442

### Capitulo II

- (1) Transmission and Distribution - Westinghouse  
Cap. IV - Pág. 64 - 94
- (2) Circuit Analysis of A.C. Power Systems - Edith Clarke  
Vol. II Cap. III Pág. 76.
- (3) Power Cables - Simens - Pág. 325.

- (4) Power Cables Desing and Instalation-C.C. Barnes Cap IX  
Pág. 86.
- (5) Sistemas Eléctricos de gran potencia - B.M. Weedy Cap.  
VIII Pág. 327.
- (6) Power cables - Simens - Pág. 228.
- (7) Power cables - Simens - Pág. 230.
- (8) Short - Circuit Currents in theree - Phase Networks Pit\_  
man-Simens-Variation of short-Circuit with Time Pág.44.
- (9) Power cables - Simens Pág. 287.
- (10) Protecciones de Sistemas Eléctricos - Moncada Branda Pág.  
129.
- (11) Power cables - C.C. Barnes - Cap. X Pág. 124.
- (12) The desing of specially bonded cable systems - Cigre  
study committec 21 - Mr A.S. Brookes - Part I  
Electra Nro. 28 - May 1973 - Pág. 55 - 75.
- (13) Power Cables - C.C. Barnes 2da. Edición - Pág. 240.
- (14) Self - contained - oil filled cables - Pirelli.
- (15) Surge Potentials on Underground Cable Sheath and Joint  
Insulation - W. Watson - C.C. Erven -  
IEEE PAS PP 239 - 249 (1963).

### Capítulo III

- (1) Brown Boveri - Catalogo BBC - Relé térmico primario  
tipo HT.
- (2) Enriquez Harper - Estudio de las sobretensiones.

transitorias en sistemas eléctricos y coordinación del aislamiento - Cap. II y III.

- (3) Alfredo Mena - Estudio de fenómenos transitorios en líneas de transmisión mediante el uso de modelos Escuela Politécnica Nacional - Febrero de 1972.
- (4) Apuntes de Distribución - V. Orejuela - EPN 1982
- (5) B. Ravindranath - M. Chander - Protección de sistemas de potencia e interruptores - Pág. 80.
- (6) Russell Mason - El arte y la ciencia de las protecciones - Cap. 15.
- (7) Luis Brand - Juan Moncada - Protección de Sistemas de potencia - Pág. 154.
- (8) English Electric - Capítulo 11 - Pág. 214 Protección.

#### Capítulo IV

- (1) Folletos emitidos por el INECEL en la inauguración del Proyecto Paute Fases A - B.
- (2) Westinghouse, Electrical Transmission and distribution Reference Book - Pág. 84.
- (3) Ravindranath B. Protección de sistemas de potencia e interruptores.
- (4) C. Russell Mason, El arte y la ciencia de la protección por relevadores - Cap. 14.
- (5) Técnica de la alta tensión - Arnald Roth - Pág. 413

- (6) Electrical Transients in Power systems - Allan Greenwood - Pág. 303.
- (7) B.M. Weedy, Sistemas Eléctricos de Gran Potencia Propagación de las sobretensiones Pág. 413 - 425.