



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EL FUSIBLE COMO DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN  
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**ING. ALFREDO JUÁREZ TORRES**  
**1986**

G-601093

**el fusible  
como dispositivo de  
protección en  
sistemas de distribución**

APUNTE  
89-B

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



\*601093\*

Ing. Alfredo Juárez Torres  
Estudios de Redes

Enero 1986

# EL FUSIBLE COMO DISPOSITIVO DE PROTECCION EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

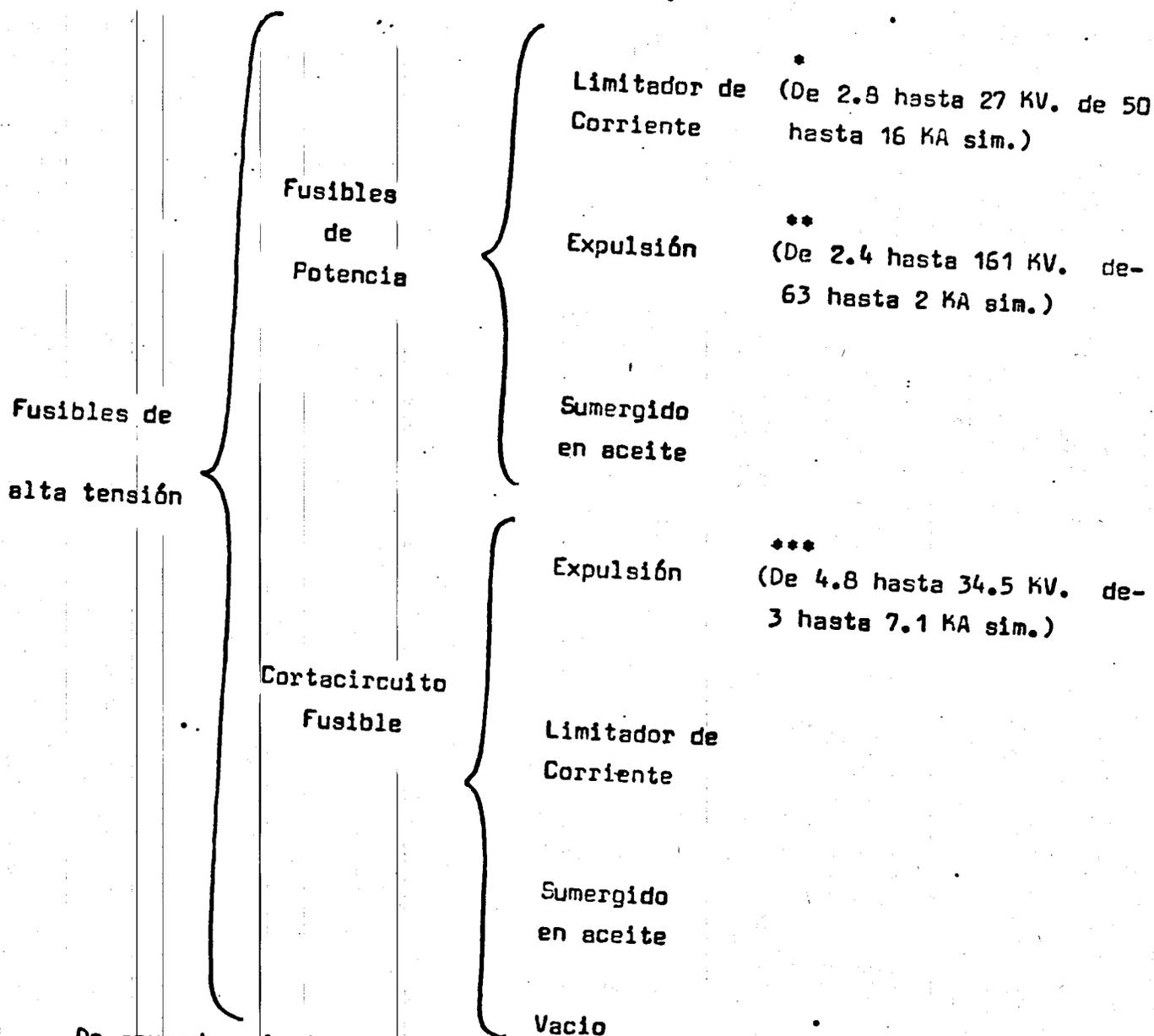
1. GENERALIDADES
  - 1.1 Definición del fusible
  - 1.2 Clasificación de los fusibles
  - 1.3 Principio de operación y construcción de los fusibles de alta tensión.
  - 1.4 Comparación general entre fusibles limitadores de corriente y de expulsión.
2. TIPO DE PRUEBAS A FUSIBLES DE ALTA TENSION.
3. APLICACION
  - 3.1 Protección de transformadores en A.T.
  - 3.2 Coordinación de protecciones
  - 3.3 Consideraciones de sobretensión
4. CAUSAS DE OPERACION DE LOS FUSIBLES

# EL FUSIBLE COMO DISPOSITIVO DE PROTECCION EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

## 1. GENERALIDADES

1.1 Definición del fusible.- Es un elemento eléctrico de protección o seguridad, de funcionamiento térmico, diseñado para interrumpir un circuito eléctrico cuando por él circula una sobrecorriente que pueda dañar a los conductores y dispositivos conectados al mismo.

1.2 Clasificación de fusibles.- En general se pueden dividir en fusibles de alta tensión y fusibles de baja tensión.



De acuerdo a la Norma americana ANSI C37-46

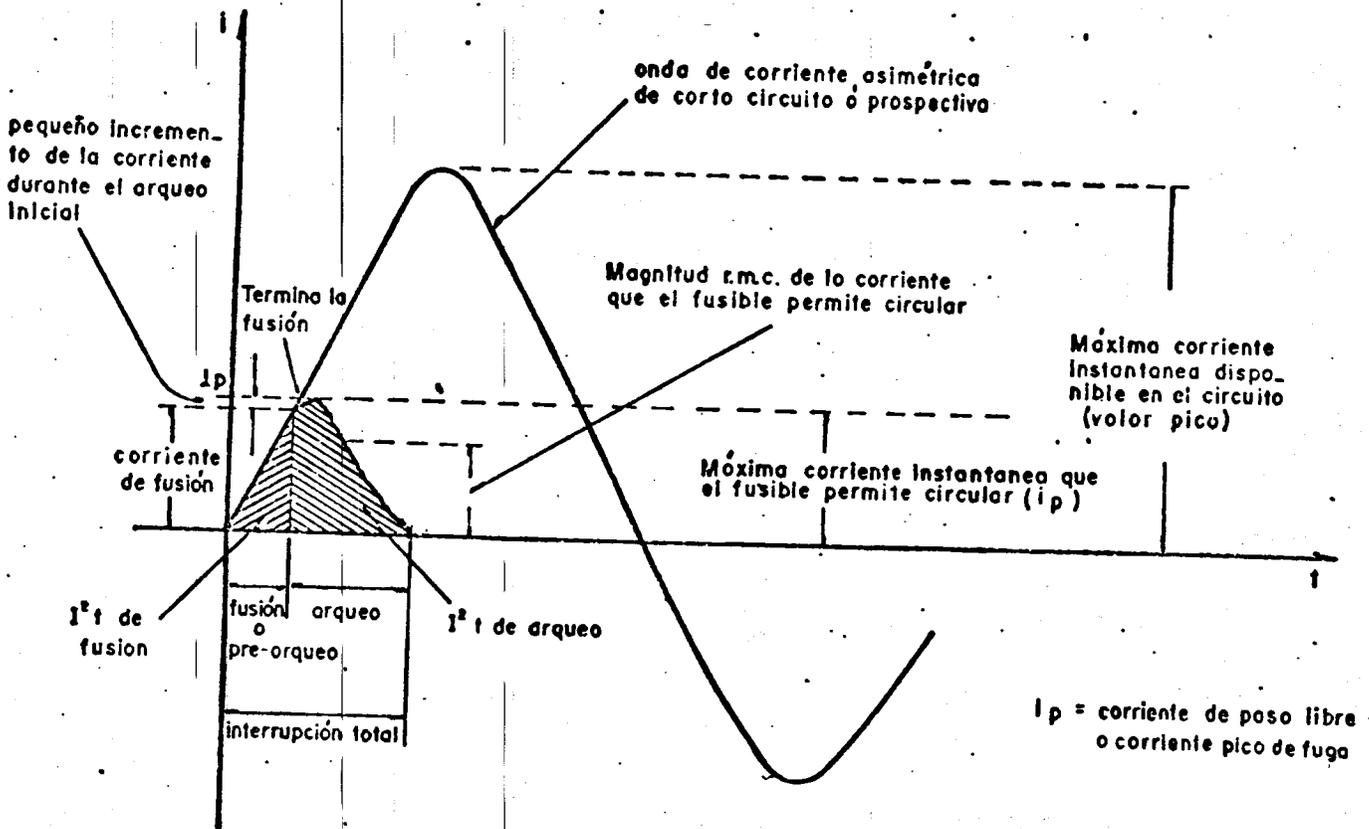
ANSI C37.47

ANSI C37.41

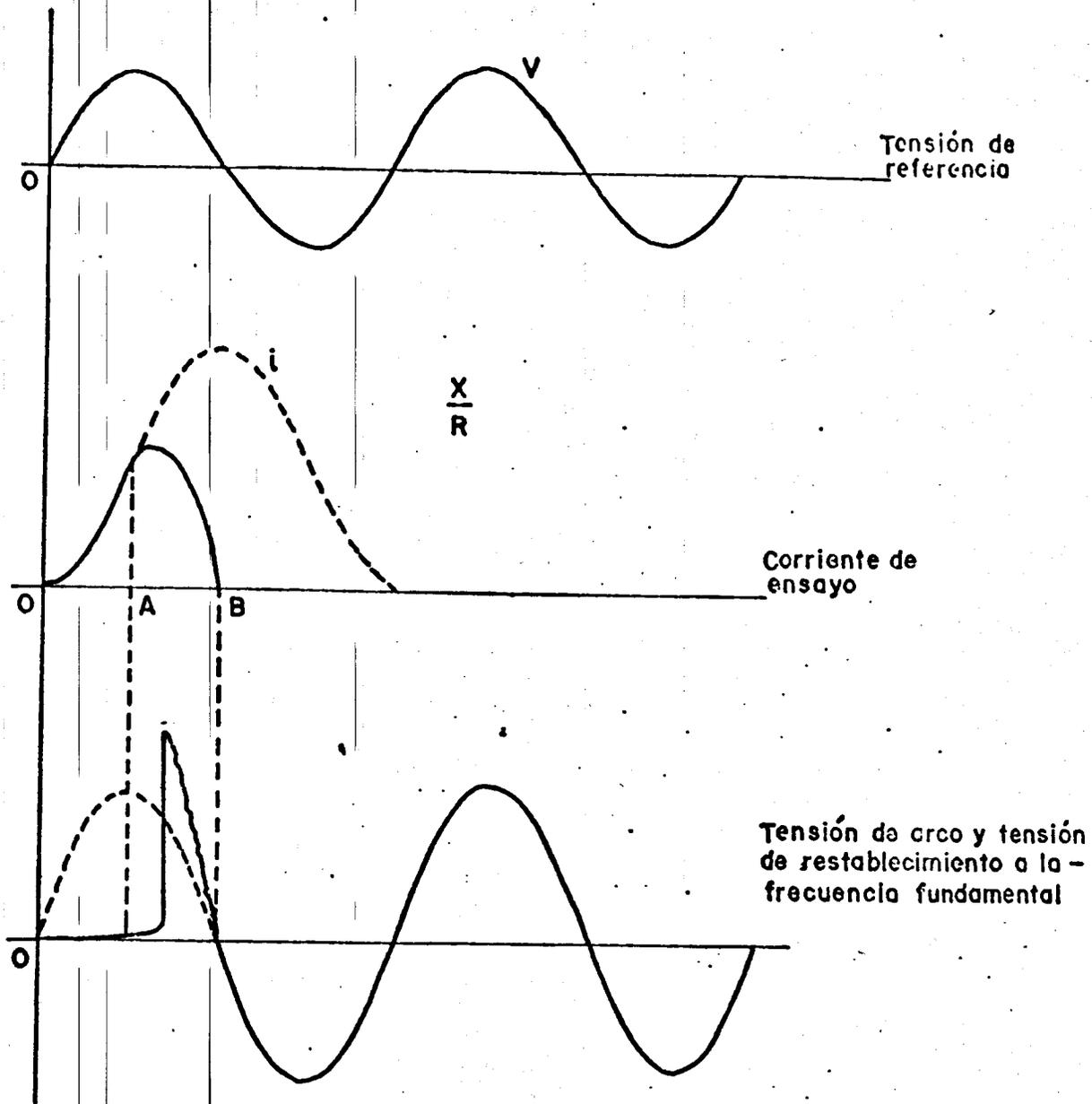
1.3 Principio de operación y construcción de los fusibles de A.T.

1.3.1 Principio de operación del fusible tipo limitador de corriente.

Se designa así al fusible que interrumpe una sobrecorriente, limitando la corriente de falla a valores inferiores que el valor pico que circularía por el circuito si el fusible no se instalara, en un tiempo menor a la duración del primer semiciclo de la onda de corriente de falla. El valor pico depende de la relación X/R del circuito y a medida que se reduce dicha relación la energía específica  $I^2t$ , que debe contemplar el fusible, también se reduce.



Representación gráfica del concepto de limitación de corriente



ANGULO DE CIERRE =  $0^\circ$   
 ANGULO DE ARQUEO = OA (TIEMPO DE FUSION)  
 TIEMPO DE ARQUEO = A B  
 TIEMPO DE INTERRUPCION TOTAL = OB

INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE TOTALMENTE ASIMETRICA POR UN FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE

## Definiciones aplicables a los fusibles.

- **Corriente mínima de fusión**  
Es la corriente mínima que provoca la operación del elemento sensible a la corriente en un tiempo especificado y bajo condiciones establecidas. Siempre es mayor que la corriente nominal.
- **Tiempo de fusión o prearqueo**  
Es el tiempo desde el instante en que el fusible detecta la sobrecorriente, hasta el momento en que ocurre la fusión y la separación del elemento sensible a la corriente.
- **Tiempo de arqueo**  
Es el tiempo inmediatamente después de haber terminado la fusión hasta la extinción total del arco.
- **Tiempo de interrupción total**  
Es la suma de los tiempos de fusión y de arqueo
- **Corriente de corto circuito o prospectiva**  
Es la corriente de corto circuito que fluiría en un circuito eléctrico, si no fuera limitada por la apertura de un fusible limitador.
- **Corriente instantánea de paso libre o corriente pico de fuga**  
Es la corriente máxima que circula por un fusible, durante el tiempo total de interrupción.
- **Característica  $I^2t$**   
Es la energía resultante del flujo de corriente a través del fusible y se aplica normalmente para el tiempo de fusión, el de arqueo o el de interrupción total que es la energía requerida por el fusible para operar.
- **Capacidad interruptiva**  
Es la máxima corriente simétrica r.m.c. o la más alta corriente directa que un fusible puede interrumpir satisfactoriamente.
- **Tensión de restablecimiento o de recuperación.**  
Es la tensión que aparece en las terminales de un fusible después que la corriente ha sido interrumpida y está formada por la tensión transitoria de restablecimiento y la tensión de restablecimiento a frecuencia industrial.
- **Tensión transitoria de restablecimiento (TTR)**  
Es aquella que aparece en condiciones transitorias inmediatamente después de-

la fusión del elemento sensible a la corriente y sus características dependen básicamente de los parámetros R, L y C del circuito en donde se encuentra instalado.

- Tensión de restablecimiento a frecuencia industrial

Esta, aparece, inmediatamente después de que termina la parte transitoria.

- Curvas características corriente - tiempo.

Son las curvas que muestran la relación entre la corriente alterna simétrica-r.m.c. o la corriente directa y el tiempo de operación de los fusibles, generalmente dentro del intervalo de 0.01 a 1000 segundos. También se le conoce como características de tiempo inverso.

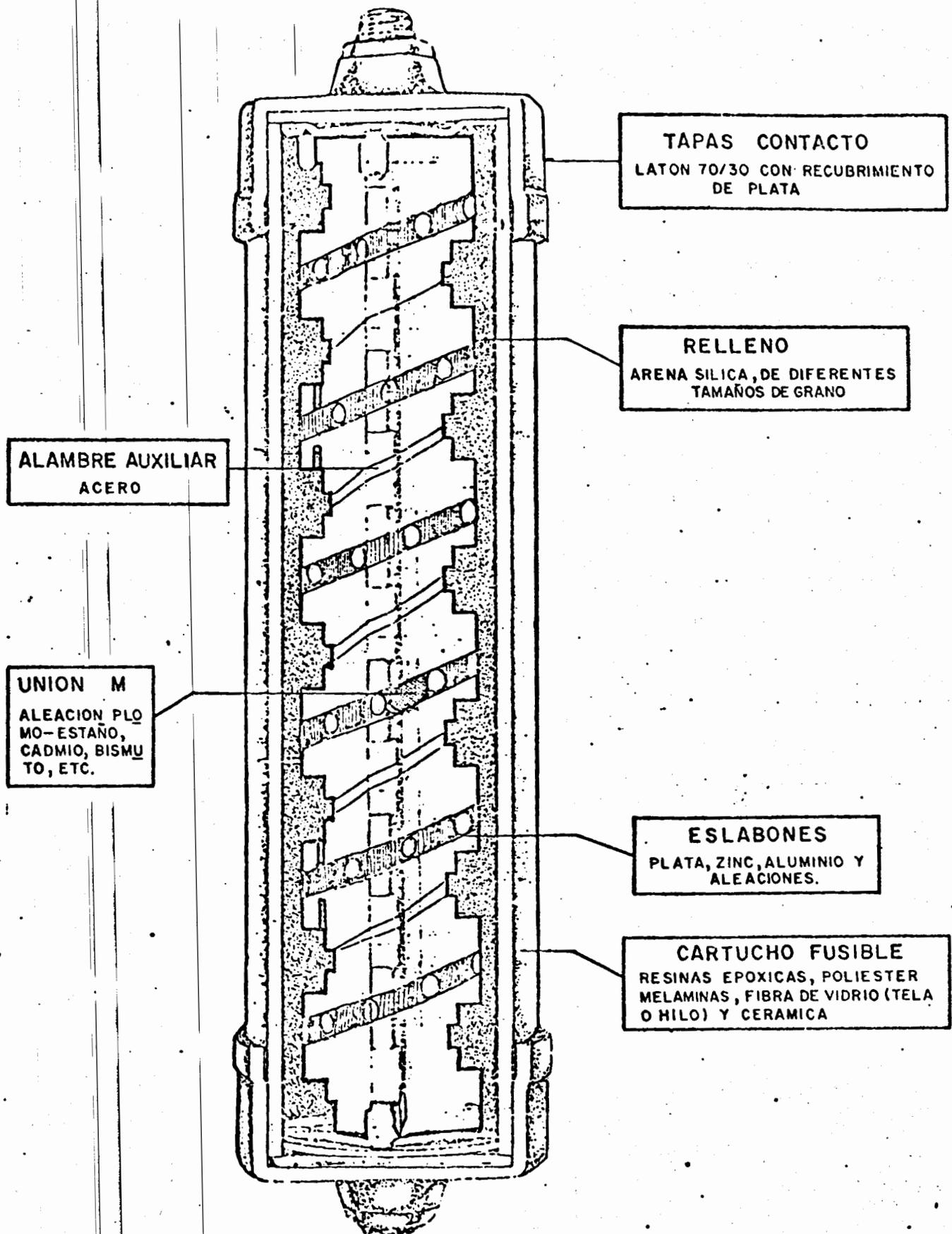
### 1.3.2 Construcción del fusible limitador de corriente

El fusible limitador de corriente está integrado por uno o más elementos de cintas metálicas perforadas o con determinada configuración dentro de un tubo aislante, resistente a grandes presiones provocadas por las energías térmicas generadas durante el arqueo. Las cintas metálicas (comúnmente de plata) o elementos sensibles a la corriente están rodeados íntimamente por arena sílica ( $\text{SiO}_2$ ) o de Cuarzo con la finalidad de extinguir el arco eléctrico producido por alguna falla y soportar la alta presión durante su operación.

Durante la operación por corto circuito, con valores de corriente comprendidos entre su rango limitador de corriente, el fusible operará (romperá) simultáneamente en todas las zonas que se diseñen para esta finalidad (perforaciones o secciones transversales reducidas) generando tensiones de arco, en cada una de estas secciones reducidas, de aproximadamente 50-volts (plata) que al reaccionar con la arena sílica que lo rodea se forman fulguritas, dando lugar a la inserción de una alta resistencia en un tiempo muy pequeño, originando así la aparición de una tensión de arco cuasi-instantánea a través del fusible de magnitud apreciablemente mayor a la tensión normal del sistema. Y puesto que la magnitud de resistencia óhmica del fusible, durante el arqueo y posterior a éste, es muy grande, origina en el circuito eléctrico un factor de potencia cercano a la unidad (durante el tiempo que toma el fusible para interrumpir la falla) y motiva a la corriente a alcanzar a la tensión, lográndose la

# FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE

## PARTES CONSTITUTIVAS

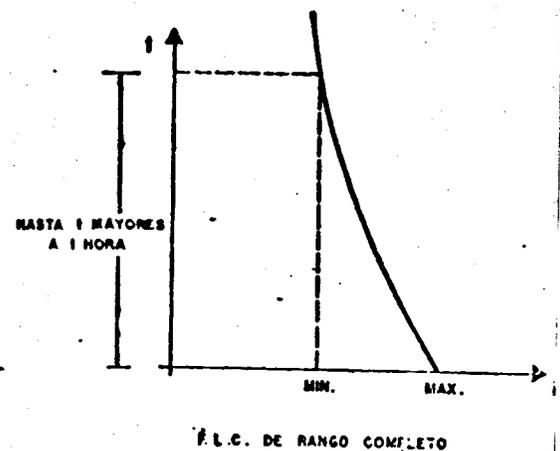
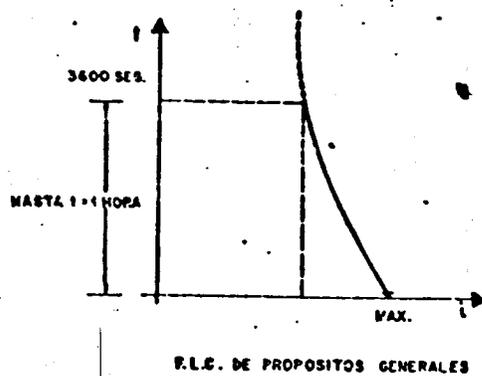
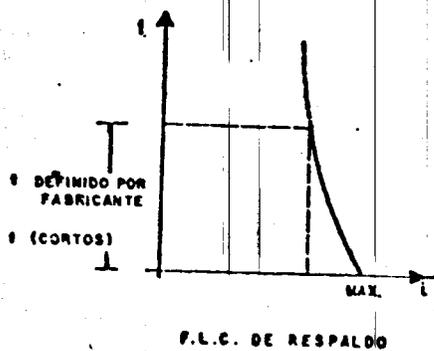


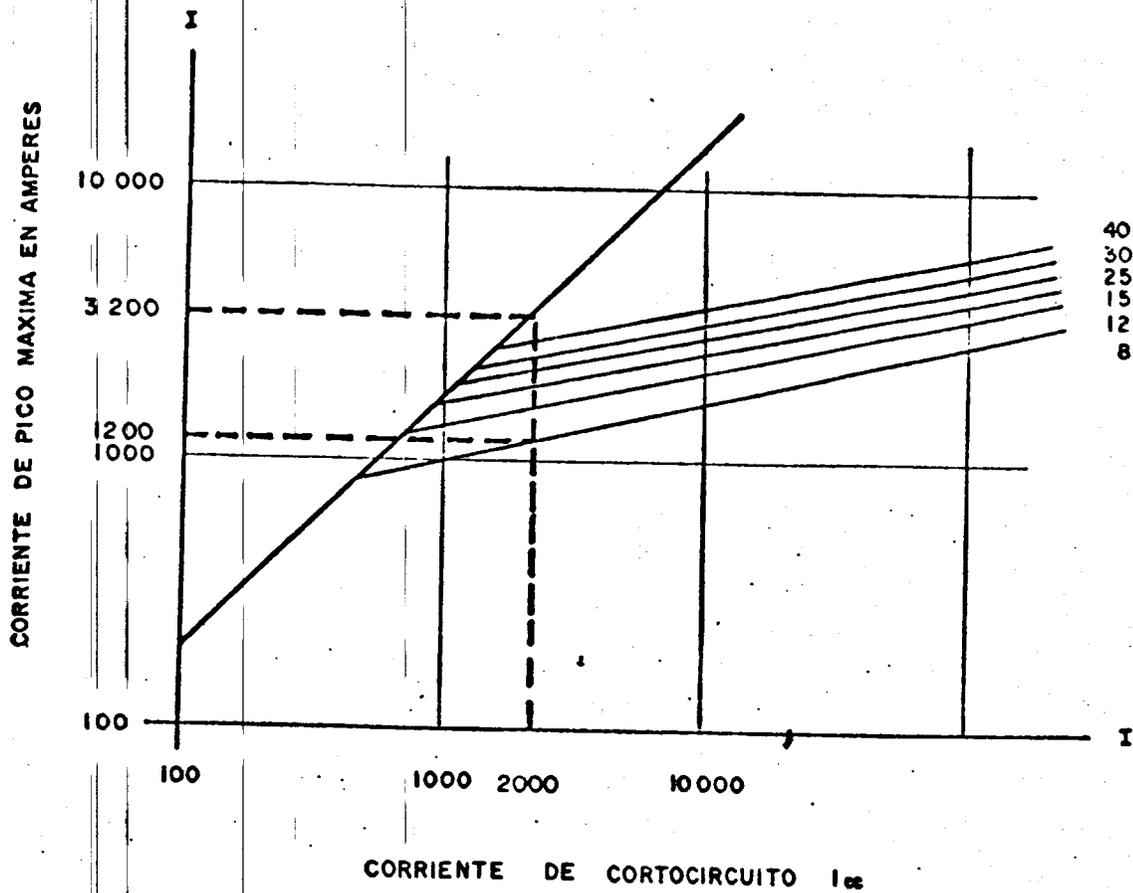
extinción total muy cerca del cero de tensión; por este motivo, los fusibles limitadores, son prácticamente insensibles a las condiciones de la T.T.R.

El éxito de un fusible limitador de corriente dependerá de la tensión de arco generada y mantenida a través de los múltiples arcos que se originan durante la operación del fusible.

Existen básicamente 3 tipos de fusibles limitadores de corriente en función del tipo de diseño: De respaldo, de propósitos generales y de rango pleno.

- **Fusible de respaldo (back-up)**  
Es aquel que puede interrumpir cualquier corriente desde su valor máximo hasta su corriente mínima de ruptura (diseñado para tiempos cortos).
- **Fusible de propósitos generales (general purpose)**  
Es el que puede interrumpir cualquier corriente desde su máxima nominal, hasta una corriente que funda el elemento en una hora (3600 seg.).
- **Fusible de rango pleno o rango completo**  
Puede interrumpir cualquier corriente desde su máximo valor nominal hasta cualquier corriente que funda el fusible en tiempos mayores a una hora.



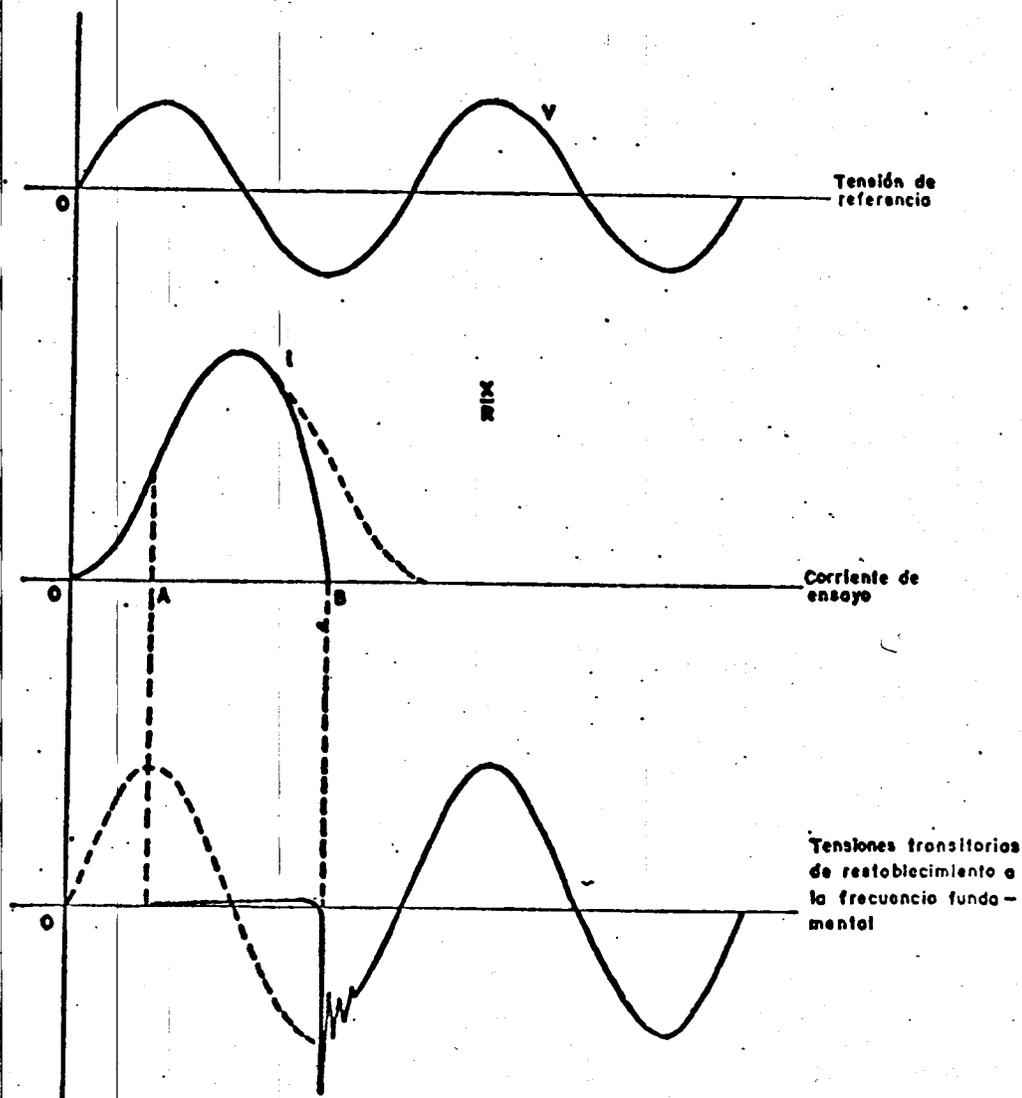


CURVAS DE LIMITACIONES DE CORRIENTE DE FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE.

Ejm. Para una  $I_{cc} = 2 \text{ KA}_{ef}$  el fusible de 8 A limita el valor de amplitud de la corriente de corto-circuito de 3.2 KA a 1.2 KA (corriente de paso  $i_p$ )

### 1.3.3 Principio de operación del fusible tipo expulsión.

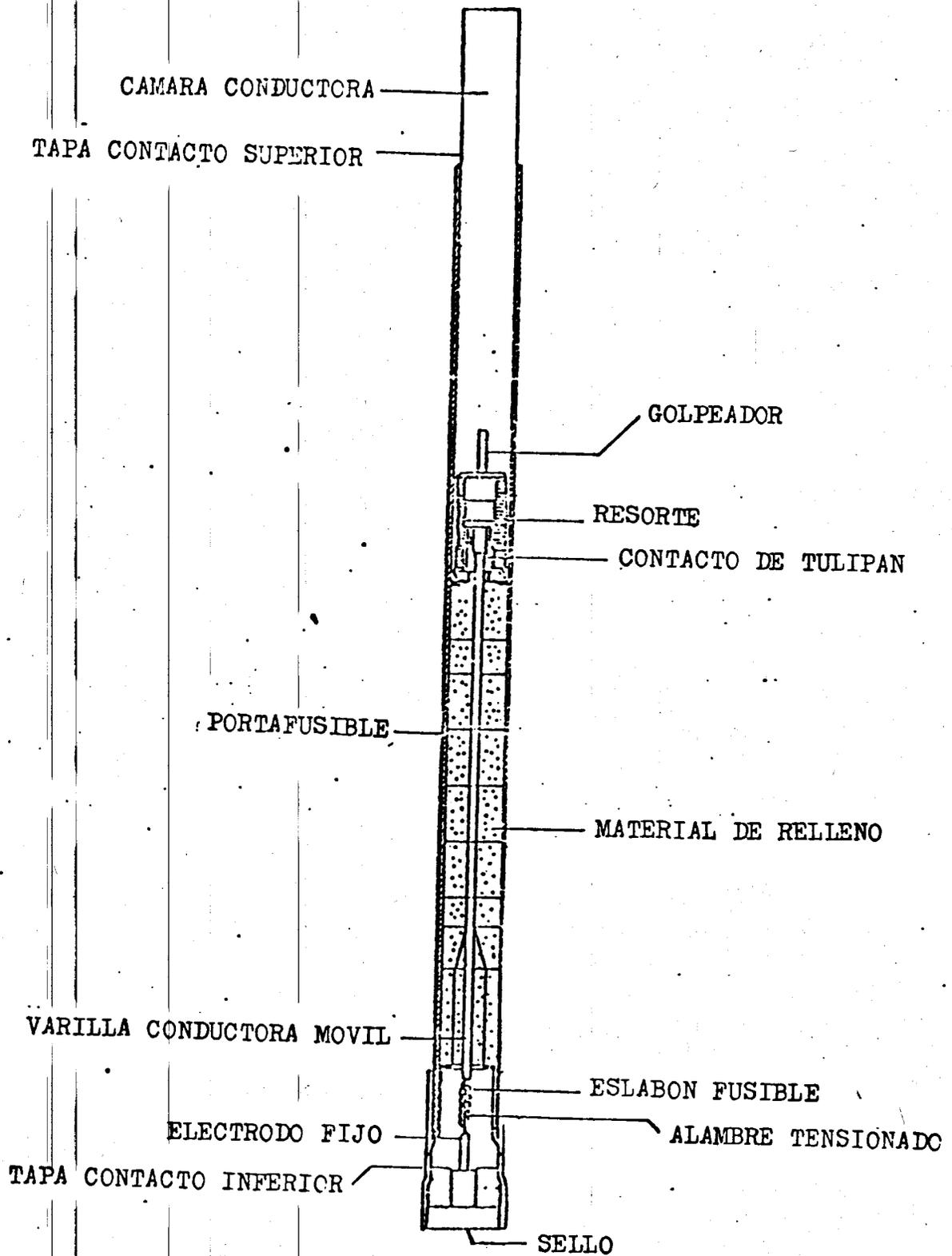
Está formado por un pequeño eslabón fusible, el cual al fundir provoca que el arqueo producido, genere gases des-icizantes del material vecino (ácido bórico, melanina, resinas fenólicas, fibra vulcanizada, resinas termo plásticas, tetracloruro de carbono, hexafloruro de azufre y otras), provocando una gran turbulencia alrededor del arco, de manera que cuando la corriente pasa por un valor natural cero, el canal del arco se reduce a un mínimo, quedando interrumpido el flujo de corriente, pudiendose expulsar los gases hacia el exterior del fusible.



ángulo de cierre =  $0^\circ$   
 ángulo de arqueo = OA (Tiempo de fusión)  
 Tiempo de arqueo = AB  
 Tiempo de interrupción total = OB

INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE TOTALMENTE ASIMETRICA POR UN FUSIBLE DE EXPULSION.

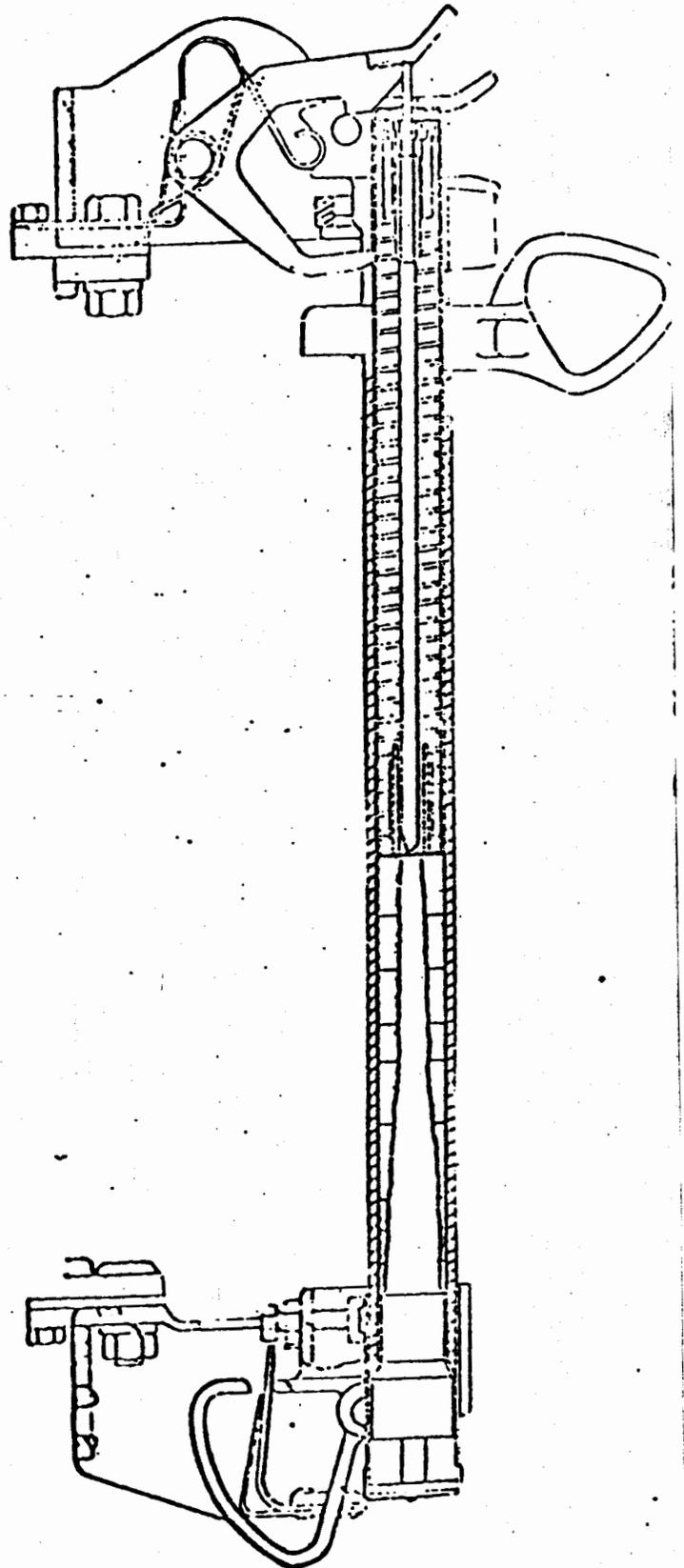
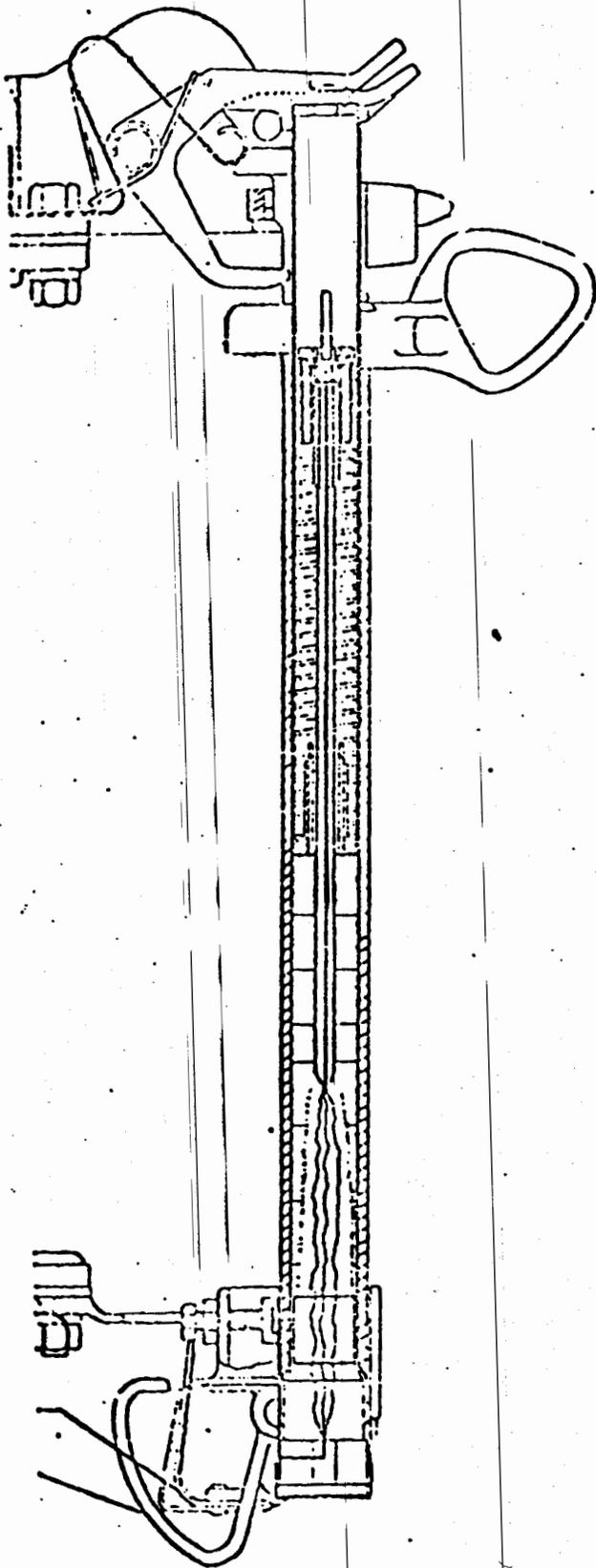
# PARTES CONSTITUTIVAS DEL FUSIBLE DE EXPULSION SMU-20



SMU-20

PRINCIPIO DE OPERACION

# PRINCIPIO DE OPERACION DEL FUSIBLE DE EXPULSION (SMD-20 ó SMU-20)



#### 1.3.4 Interpretación de las curvas corriente - tiempo

Estas curvas representan la relación entre la corriente simétrica r.m.c. - correspondiente a la frecuencia de 50 o 60 Hz y el tiempo en que operan - los fusibles.

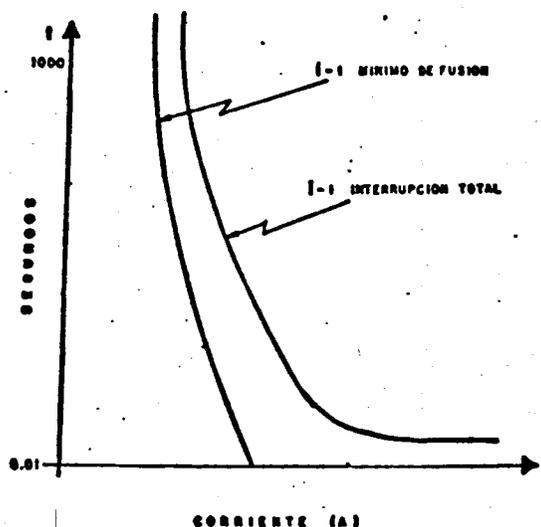
Existen 2 tipos de curvas que son:

- Corriente - tiempo mínimo de fusión (Minimum melting time current)

Estas curvas son determinadas restando los valores promedios determinados en las pruebas, las variaciones en menos debidas a las tolerancias de manufactura.

- Corriente - tiempo de interrupción total (Total clearing time)

Estas curvas incluyen el tiempo mínimo de fusión, más las tolerancias de manufactura (comprendidas comunmente entre el +5 y el +10% en valores de corriente) y el tiempo de arqueo.



Las características corriente - tiempo de operación de un fusible, se -- pueden afectar por diferentes factores que son: efecto del medio ambiente, efecto de la variación transitoria de la onda de corriente, factor - inherente al diseño.

#### 1.4 Comparación general entre los fusibles limitador de corriente y de expulsión.

En esta parte se quiere resaltar en terminos generales las ventajas y desventajas del fusible limitador de corriente y expulsión, sin embargo para un problema específico se tendrán que analizar otros factores que depen -

dan del tipo de instalación y carga.

#### 1.4.1 Fusible limitador de corriente

##### Ventajas

- Posee una excelente capacidad de limitación de corriente
- Su capacidad de limitación de corriente se mantiene aún cuando se incrementa la tensión del sistema.
- Interrumpe con seguridad aún cuando las condiciones de la tensión transitoria de restablecimiento sean muy severas.
- Algunos diseños pueden sumergirse en líquidos
- Operación silenciosa
- No contaminan.
- No contribuye a incrementar la presión del tanque del transformador.

##### Desventajas

- Costo alto del fusible
- Costo alto del portafusible
- Manejo delicado
- Cuidado en el ajuste del mecanismo de disparo del portafusible.
- Mayor peso y dimensiones.
- El diseño para operar a bajas corrientes de falla, es más complicado, al igual que su fabricación.
- No son fácilmente coordinables con otros tipos de protección, ya que poseen una característica corriente-tiempo muy inversa.

#### 1.4.2 Fusible de expulsión.

##### Ventajas

- Son de operación de rango pleno.
- Menor costo del fusible.
- Menor costo del portafusible.
- Menor peso y dimensiones.
- Fácil manejo.
- Menor tiempo en la reposición.
- Mayor rango de capacidades de corriente.

### Desventajas

- Operación ruidosa
- Generación de gases contaminantes.
- Diseños con menor capacidad interruptiva.
- Contribuye a incrementar la presión del tanque del transformador.

## 2. TIPO DE PRUEBAS A FUSIBLES DE ALTA TENSION.

Las pruebas mínimas a fusibles de alta tensión para asegurar su operación adecuada, se pueden realizar de acuerdo al criterio de la Normas Internacionales IEC-282.1 e IEC-282.2, aplicables a fusibles limitadores de corriente y de expulsión respectivamente, o al criterio norteamericano -- Norma ANSI-C37.41

### a) Prueba de capacidad interruptiva.

Esta tiene como objeto definir la capacidad máxima de interrupción, - al presentarse una falla de corto circuito y la tensión de restablecimiento que aparece en sus extremos, después de la interrupción de la corriente.

### b) Prueba de elevación de temperatura.

La finalidad es determinar la respuesta de los fusibles al conducir - su corriente nominal, sin sufrir deterioro alguno y sin exceder los - límites de temperatura establecidos por las Normas.

### c) Prueba de ciclos de calentamiento - enfriamiento.

Se aplican con el propósito de conocer la respuesta del elemento sensible a la corriente. En el período de calentamiento se aplica -- hasta lograr el equilibrio térmico, determinandose la constante de tiempo térmica del fusible, estableciendose el período de enfriamiento hasta alcanzar el valor de la temperatura ambiente, repitiendose - los ciclos indicados en la Norma.

### d) Prueba de fusión.

La prueba de fusión o prueba de corriente - tiempo, se efectua para conocer el tiempo de respuesta de operación del fusible a la circulación de corriente, considerando que la corriente nominal de un fusible es aquella, que debe ser capaz de conducir continuamente sin sufrir deterioro alguno.

### e) Prueba dieléctrica.

Tiene como objetivo determinar la respuesta de los fusibles a la --- aplicación de sobretensiones transitorias a 60 Hz en forma de impulsos y sobrecorrientes en forma de impulso como las originadas por -- descargas atmosféricas.

### 3. APLICACION

#### 3.1 Protección de transformadores por sobrecorriente en alta tensión.

La principal función en la protección de transformadores es la desconexión de éstos, del sistema de distribución, reduciendo los daños y disturbios al mínimo.

Los tipos de protección pueden abarcar los siguientes aspectos:

- Protección por sobrecarga.

Esta se requiere debido a la elevación de temperatura causada por las sobrecorrientes de gran duración, que pueden deteriorar el aislamiento en los devanados.

- Protección por corto - circuito.

Previene efectos electrodinámicos y térmicos debidos a las corrientes de corto circuito causadas por una falla exterior al transformador.

- Protección por fallas internas.

Esta trata de minimizar el área de daño dentro de un transformador fallado y aislarlo del resto del sistema.

Criterio de selección de un fusible.

El criterio de selección de un fusible está dado en función de las características del sistema de suministro como son: Tipo de red (aéreo o subterráneo), Tensión nominal, Nivel Básico de impulso, y Capacidad interruptiva en el punto de alimentación; así como de las Características propias del transformador tales como: Capacidad de carga y Sobrecarga, Curva de daño del transformador, Curva de energización inrush y Curva de restablecimiento de carga fría.

- Curva de daño del transformador.- Es la curva diseñada por el fabricante donde se indica la vida útil del transformador, la cual disminuye al alcanzar dichos valores de corriente y tiempo.

- Curva de energización o puesta en servicio.- Es la curva formada por 4 puntos básicamente, donde el transformador alcanza corrientes transitorias, formada por la corriente de excitación del transformador conocida como Corriente Inrush y la Corriente de Restablecimiento de Carga Fría. Una regla práctica es, considerar los siguientes valores:  
Corriente Inrush

25 veces la corriente nominal r.m.c. para 0.01 seg.

12 veces la corriente nominal r.m.c. para 0.10 seg.

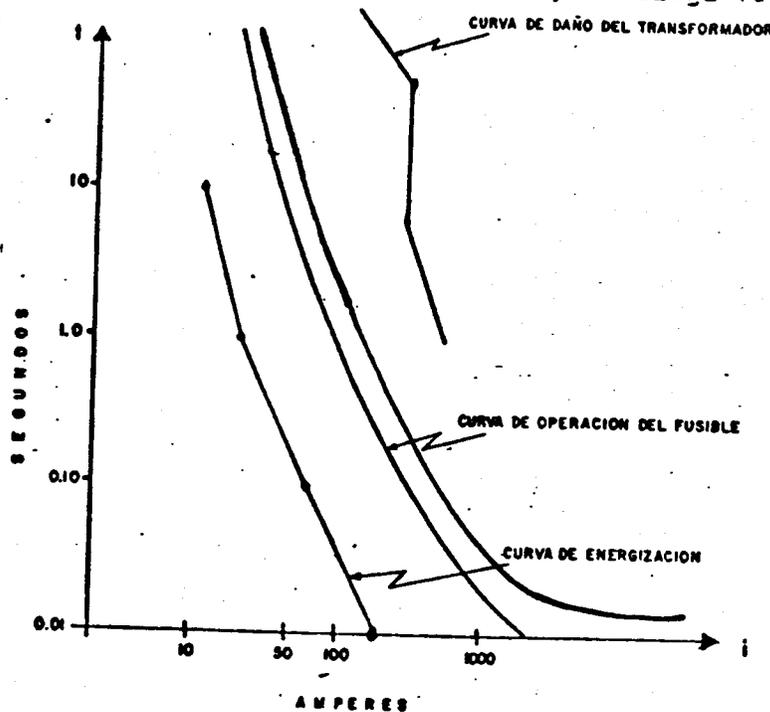
### Corriente de Carga Fría

6 veces la corriente nominal r.m.c. para 1.00 seg.

3 veces la corriente nominal r.m.c. para 10.00 seg.

• Curva de restablecimiento de carga fría.- Es la corriente que resulta de la reenergización de un transformador que anteriormente fue desconectado. *El valor de estas corrientes depende del tipo del sistema y del tipo de cargas conectadas a ella.*

Al seleccionar el fusible se debe verificar que las curvas I-t se encuentren entre la curva de daño del transformador a proteger desplazada a la derecha y las curvas de energización y de carga fría desplazadas a la izquierda.



La función básica del fusible es interrumpir cualquier falla por sobrecorriente que afecte al transformador o al sistema de alimentación del lado primario, teniendo que coordinar con la protección del lado secundario para complementar la protección del equipo.

Cuando un fusible seleccionado, se emplea para proteger un transformador contra sobrecargas, deben emplearse relaciones de fusión muy bajas (entre 1.0 a 1.5), definiéndose como:

$$\text{relación de fusión} = \frac{\text{Inom. del fusible}}{\text{Inom. del transf.}}$$

### 3.2 Coordinación de protecciones.

Es la relación corriente - tiempo entre fusibles, o entre estos y otros dispositivos de protección contra sobrecorrientes, que se encuentran -- conectadas en serie.

Cuando se aíslan únicamente la parte del sistema eléctrico con falla y el resto queda energizado, se dice que se tiene un sistema eléctrico coordinado selectivamente.

Existe una variedad de combinaciones típicas de protecciones de transformadores, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: fusible de expulsión único, fusible limitador de corriente único, 2 fusibles de expulsión en serie, 2 fusibles limitadores en serie, fusible de expulsión en serie con fusible limitador de corriente, restaurador en serie con fusible, fusible de alta tensión con fusible en baja tensión, etc., las cuales lógicamente presentan ciertas ventajas técnicas con la consecuente - respuesta económica, mencionándose algunas de ellas.

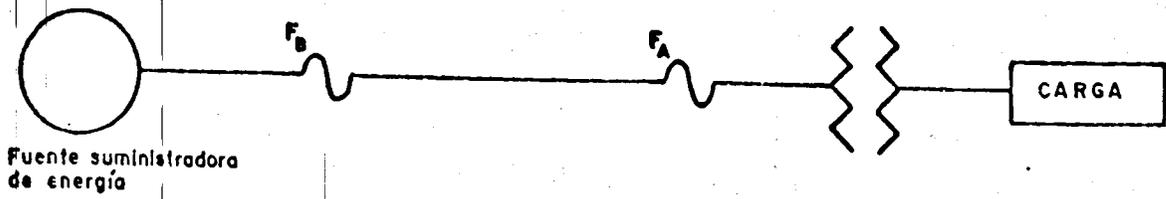
#### 3.2.1 Fusible - fusible.

Esta coordinación se refiere a dos fusibles conectados en serie, donde -- se denomina fusible protector a  $F_A$  y fusible protegido a  $F_B$ , de tal manera que se requiere que el fusible protector interrumpa el paso de la corriente sin que se dañe el fusible protegido  $F_B$ . Para esto es necesario hacer uso de las curvas características I-t, permitiendo la coordinación a partir de un tiempo de 0.016 seg. (un ciclo de onda senoidal de 50 o 60 Hz) como mínimo.

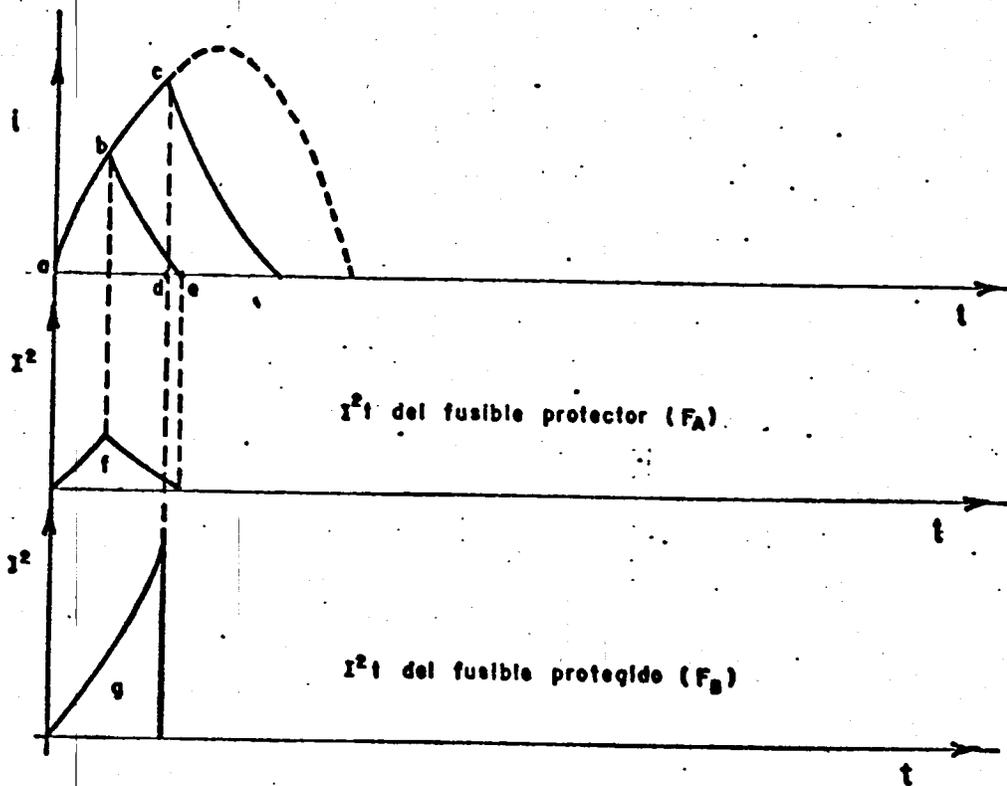
El efecto presentado en el momento de ocurrencia de la falla es de tipo energético, de aquí que se emplea un valor conocido como la integral de Joule  $\int_{t_1}^{t_2} i^2 dt = I^2 t$ , la cual se compara con valores de energía que puede soportar el fusible.

En fusibles de expulsión este valor de energía se compara con el valor correspondiente al tiempo mínimo de fusión del fusible protegido, de tal manera que el fusible pueda soportar dicha corriente.

Cuando se consideran fusibles limitadores de corriente su coordinación es posible, si el fusible limitador de corriente protector opera antes que el fusible limitador de corriente protegido, sin que éste sufra daño.



COORDINACION ENTRE DOS FUSIBLES



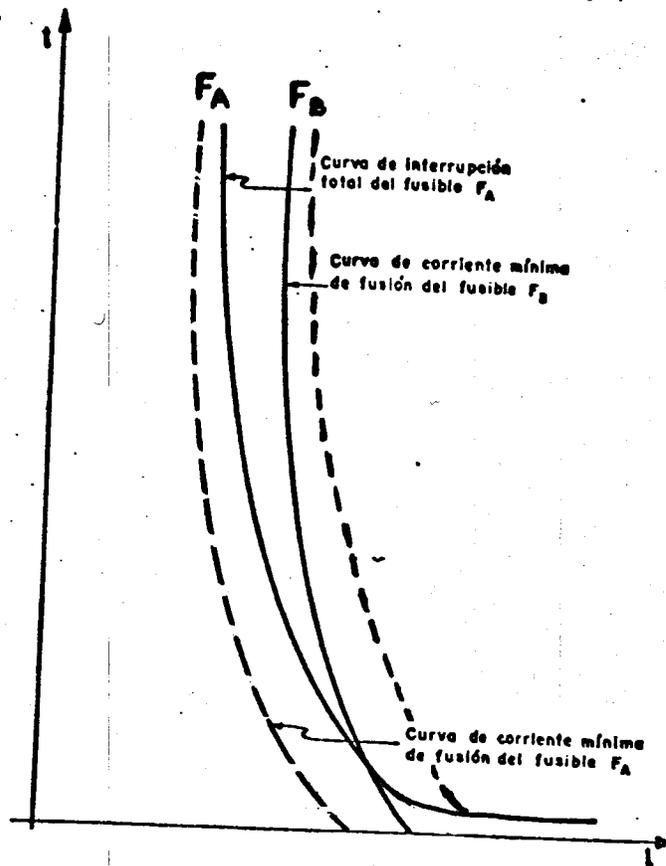
COORDINACION DE FUSIBLES TIPO LIMITADOR DE CORRIENTE

Para el caso de los fusibles limitadores de corriente, la corriente de falla se inicia en el punto "a", hasta que el fusible protector funde en el punto "b", haciendo que el flujo de corriente se interrumpa en "e", de tal forma que si no se instalara el fusible protector  $F_A$ , la corriente -- hubiera alcanzado el valor "c".

El tiempo a-d, necesario para que funde el fusible protegido  $F_B$ , es menor que el tiempo de interrupción total a-e del fusible protector  $F_A$ , pero -- la coordinación es posible si el valor de  $I^2t$  de fusión del fusible  $F_B$  -- (área g) es mayor que el valor  $I^2t$  de interrupción total del fusible  $F_A$  -- (área f).

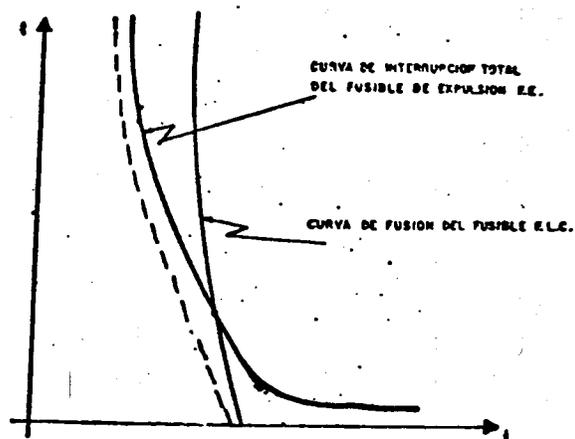
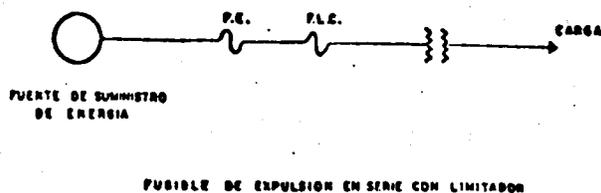
Cuando se coordinan dos fusibles tipo expulsión se requiere del empleo de las curvas características I-t, de tal forma que la curva de interrupción total del fusible protector  $F_A$ , se compare con la curva de corriente -- mínima de fusión del fusible protegido  $F_B$ .

Es práctica común recorrer la curva de  $F_B$  mencionada un factor de 75 % en tiempo hacia la derecha del fusible protector, para logra la coordinación adecuada.

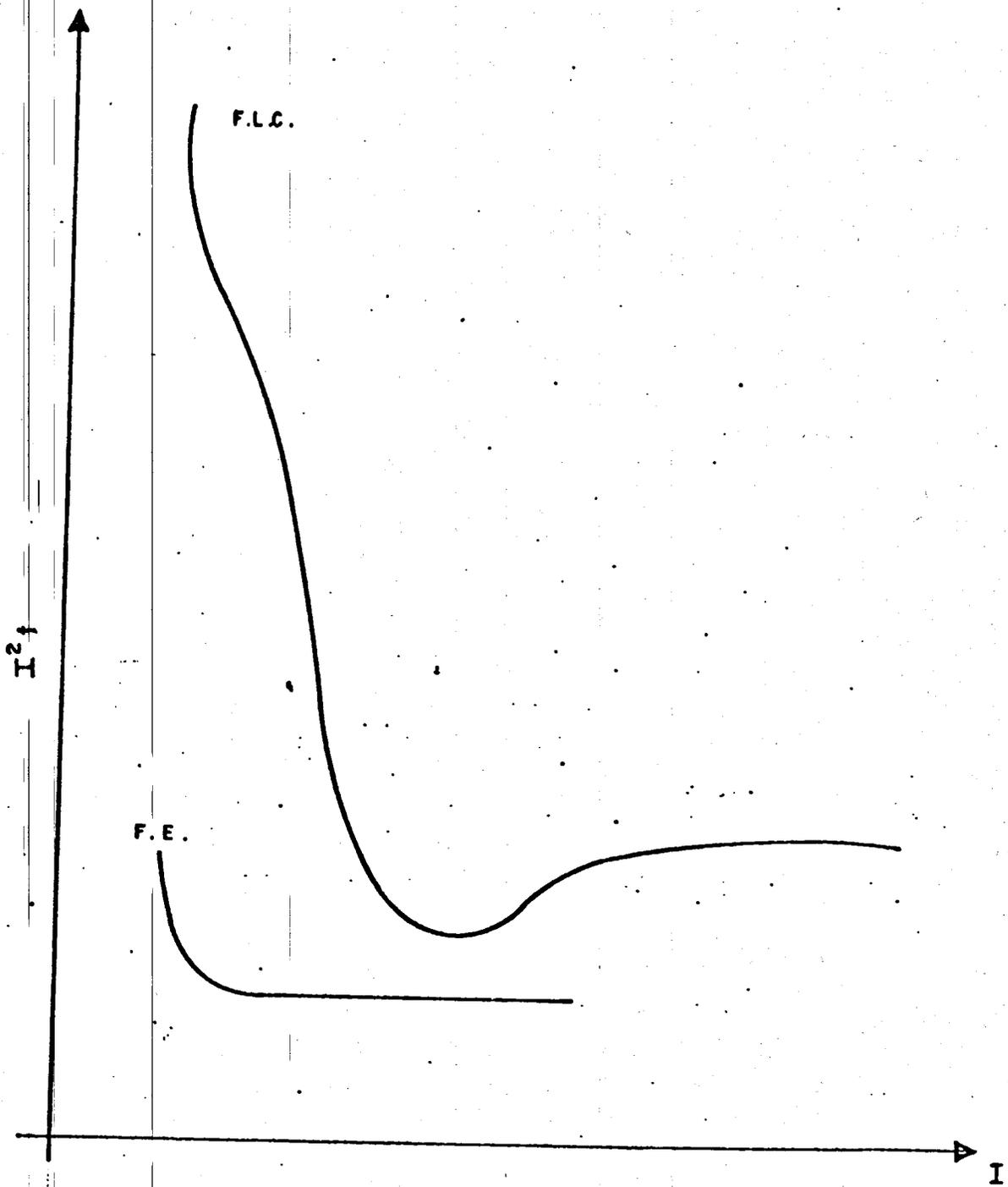


COORDINACION DE FUSIBLES TIPO EXPULSION

### 3.2.2 Fusible de expulsión en serie con limitador.



Analizando las curvas de operación de los fusibles, se observa que para sobrecorrientes menores (sobrecargas) hasta el punto de cruce de las curvas, opera el fusible de expulsión F.E. y para sobrecorrientes mayores (corto - circuitos) opera el fusible limitador de corriente F.L.C. Con este tipo de protección puede ser más confiable y a largo tiempo económico, ya que el mayor índice de fallas se presenta por sobrecargas, teniendo que reemplazar únicamente al fusible de expulsión. Se debe estar seguro que el F.L.C. deja pasar suficiente energía para que el fusible de expulsión sea capaz de operar. La coordinación puede ser verificada comparando la energía mínima  $i^2t$  del F.L.C. gráficamente con la máxima  $I^2t$  del F.E.



COORDINACION DE ENERGIAS ENTRE 2 FUSIBLES

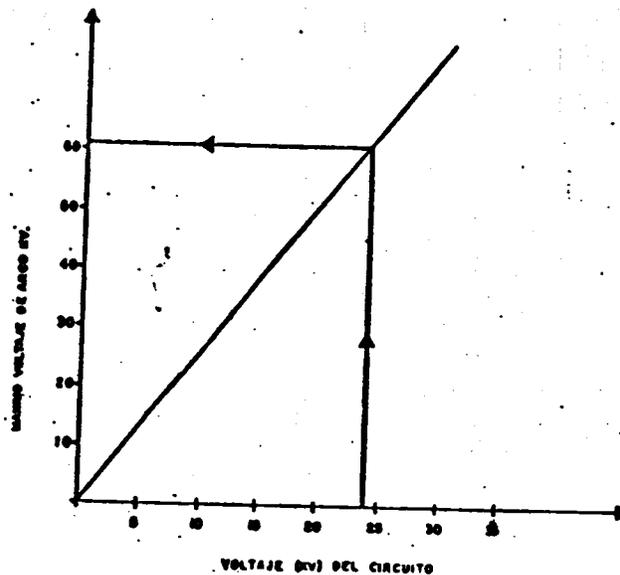
### 3.3 Consideraciones de sobretensión.

Quando un fusible limitador de corriente opera, siempre genera un voltaje de arco. Esta sobretensión depende tanto del tiempo o instante de iniciación de la falla sobre la onda de tensión del sistema, como del tipo de diseño del fusible. Cuando se aplica un fusible limitador de corriente, debe tomarse siempre en consideración esta sobretensión, pues existe el peligro de que se dañen los pararrayos con su operación.

Dado el diseño especial que tienen los fusibles limitadores de corriente, la sobretensión que se genera con su operación depende principalmente de la tensión del sistema.

En la mayor parte de los casos la coordinación se cumple, sin embargo, es necesario siempre comprobar esta condición; Para tal efecto se pueden seguir los siguientes pasos:

MAXIMO VOLTAJE DE ARCO PARA FLC NX-CAMPANION 12



1- El máximo voltaje de arco producido por el FLC NX de 23 KV será 61 KV  
 2- La mínima tensión de chispeo de un apartarrayos (Siemens) es de 46 KV-  
 (r.m.c) a 60 Hz.  
 Val. arco FLC < Y chispeo Apartarrayos  
 61 KV < 12 46 KV  
 61 KV < 65.02 KV

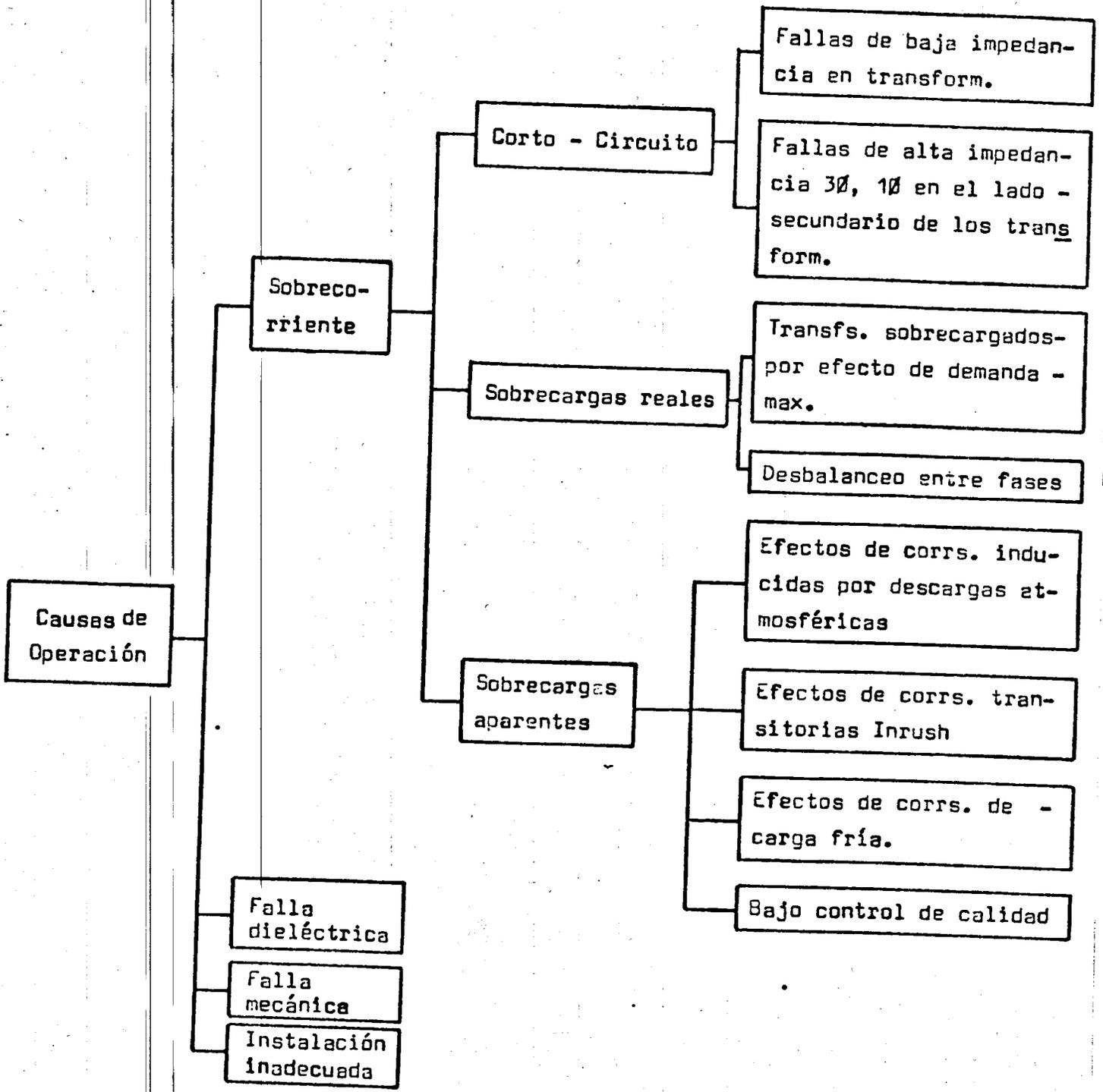
Se escoge sobre el eje de las abscisas la tensión del sistema (fase- neutro en sistemas Y aterrizados, fase - fase en otros sistemas).

Se extiende una línea vertical de ese punto hasta intersectar la recta diagonal, continuando la línea en forma horizontal hacia la izquierda hasta encontrar el eje de las ordenadas y ese será el correspondiente

voltaje de arco máximo o sobretensión máxima que tendrá que soportar el sistema. Se compara el valor de voltaje obtenido con los niveles de chispeo de los apartarrayos escogidos para la protección contra sobretensiones del transformador, de tal forma que para que exista una buena coordinación fusible - apartarrayos la tensión de arco máxima producida por el fusible limitador de corriente, siempre debe ser menor que -- mínima tensión de chispeo del apartarrayos.

4. CAUSAS DE OPERACION DE LOS FUSIBLES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

Las principales causas de operación de los fusibles en los sistemas de -- distribución son las siguientes:



TENSION EN 6 KV

DESCRIPCION	CAPACIDAD NOMINAL	U S O		INSTALACION
		PROTECCION DE TRANSFORMADORES	PROTECCION DIVERSA	
FUSIBLE K 2	2 A	5, 10 y 15 KVA	✦ ACOMETIDAS	✦ EN PORTAFUSIBLES 6105, 6110, 6112 y 6212 DE LINEA AEREA.
" K 6	6 A	20, 25 y 30 KVA	DE SERVICIOS.	
" K 10	10 A	37.5 y 50 KVA	BANCO DE	
" K 15	15 A	75 KVA	CAPACITORES.	
" K 20	20 A	100 y 150 KVA		
" K 30	30 A	200 KVA		
" K 50	50 A	300 KVA		
" K 80	80 A	500 KVA		
" K 100	100 A	700 KVA		
" K 140	140 A	1000 KVA		
FUSIBLE CS 6 - 50 GW	50 A	200 KVA		✦ EN PORTAFUSIBLE SUMERGIBLE CS-6200 DEL SISTEMA RADIAL SUBTERRANEO.
" CS 6 - 100 GW	100 A	400 KVA		

TENSION EN 23 KV

DESCRIPCION	CAPACIDAD NOMINAL	U S O		INSTALACION
		PROTECCION DE TRANSFORMADORES	PROTECCION DIVERSA	
FUSIBLE LIM. CTE. OF IH3 25 A GW	25 A	HASTA 995 KVA	✦ PROTECCION -	✦ EN EL INTERRUPTOR CS 23-3-600 F200.
" " " " IH3 40 A "	40 A	" 1593 KVA	DE CABLES DE	
" " " " IH3 65 A "	65 A	" 2590 KVA	23 EN DERI-	
" " " " KH3 80 A "	80 A	" 3187 KVA	VACION.	
" " " " KH3 100 A "	100 A	" 3983 KVA		
FUSIBLE LIM. CTE. DW TIPO DR	6 A	45, 75 y 112.5 KVA	✦ PROTECCION DE	✦ EN S.E. INTERIOR DE SISTEMAS EN ANILLO.
" " " " " DR 20/10S 10 A	10 A	150 KVA	TRANSFORMA-	
" " " " " DR 20/16S 16 A	16 A	225 y 300 KVA	DORES DE S.E.	✦ INTERRUPTORES DE TRANSFERENCIA AUTOMATICA TACI-CONEL.
" " " " " DR 20/25A 25 A	25 A	500 KVA	TIPO GABINETE	
" " " " " DR 20/40A 40 A	40 A	750 KVA	✦ PROTECCION -	
" " " " " DR 20/63A 63 A	63 A	1000 KVA	DE SERVICIOS.	
" " " " " DRVA 20/100S 100 A	100 A	1500 KVA		
" " " " " DRVAL 20/160S 160 A	160 A	2500 KVA		

TENSION EN 23 KV.

DESCRIPCION	CAPACIDAD NOMINAL	U S O		I N S T A L A C I O N
		PROTECCION DE TRANSFORMADORES	PROTECCION DIVERSA	
FUSIBLE 23 3K SC-SMD20 o SMU-20	3 A	HASTA 120 KVA.	◆ACOMETIDAS AEREAS	◆EN PORTAFUSIBLE 23-220
" " 6K " "	6 A	DE 121 A 260 KVA.		DE LINEA AEREA
" " 8K " "	8 A	DE 251 A 320 KVA.	◆ACOMETIDAS SUBTERRANEAS	
" " 10K " "	10 A	DE 321 A 400 KVA.		
" " 12K " "	12 A	DE 401 A 540 KVA.	◆BANCO DE CAPACITORES	
" " 15K " "	15 A	DE 541 A 600 KVA.		
" " 20K " "	20 A	DE 601 A 800 KVA.		
" " 25K " "	25 A	DE 801 A 1000 KVA.	◆DERIVACIONES PARA ALIMEN-	
" " 30K " "	30 A	DE 1001 A 1200 KVA.	TAR FRACCIONAMIENTOS Y UNI-	
" " 40K " "	40 A	DE 1201 A 1600 KVA.	DADES HABITACIONALES	
" " 50K " "	50 A	DE 1601 A 2000 KVA.		
" " 65K " "	65 A	DE 2001 A 2600 KVA.		
" " 80K " "	80 A	DE 2601 A 3200 KVA.		
" " 100K " "	100 A	DE 3201 A 4000 KVA.		
" " 140K " "	140 A	DE 4001 A 6200 KVA.		
" " 200K " "	200 A	DE 6201 A 10600 KVA.		
FUSIBLE 23 1E SC 4SM	1 A	HASTA 35 KVA.		◆EN PORTAFUSIBLES 23-2151
" " 3E " "	3 A	DE 36 A 100 KVA.	◆ACOMETIDAS SUBTERRANEAS	DE S.E. INTERIOR
" " 5 " "	5 A	DE 101 A 175 KVA.	Y TRANSFORMADORES.	
" " 10 " "	10 A	DE 176 A 350 KVA.		
" " 15 " "	15 A	DE 351 A 500 KVA.	◆DERIVACIONES DE GABINETE.	◆EN INTERRUPTORES DE TRANS
" " 20 " "	20 A	DE 501 A 700 KVA.		FERENCIA AUTOMATICA TACI
" " 25 " "	25 A	DE 701 A 850 KVA.		MARCA: S.C. Y G.W.
" " 30 " "	30 A	DE 851 A 1000 KVA.		
" " 40 " "	40 A	DE 1001 A 1400 KVA.		
" " 50 " "	50 A	DE 1401 A 1750 KVA.		
" " 65 " "	65 A	DE 1751 A 2300 KVA.		
" " 80 " "	80 A	DE 2301 A 2800 KVA.		
" " 100 " "	100 A	DE 2801 A 3500 KVA.		
" " 125 " "	125 A	DE 3501 A 4300 KVA.		
" " 150 " "	150 A	DE 4301 A 5000 KVA.		
" " 200 " "	200 A	DE 5001 A 7000 KVA.		
FUSIBLE LIM. CTE. TIPO NX MC. GRAW EDISON	30 A 2 x 30 A	1200 KVA 2400 KVA.	◆PROTECCION DE CABLES RADIALES DE REDES DE 23 KV.	◆EN INTERRUPTOR LOW PROFILE EN DERIVACIONES DE CABLES

## INSTALACION DE FUSIBLES DE A.T. y B.T.

DESCRIPCION DEL FUSIBLE					NOMBRE DEL PORTAFUSIBLE			
N O M B R E FUSIBLE DE EXPULSION	NORMA	TENSION NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	CAPACIDAD INTERRUPTIVA	N O M B R E	NORMA	TENSION NOMINAL	CORRIENTE MAXIMA
FUSIBLE 23-SC-SMD-20 ó " " SMU "	2.0137	23 KV.	3 ó 200 A	20 KA(Asim)	CORTACIRCUITO FUSIBLE D-23220	2.0161	23 KV.	200 A.
FUSIBLE 23-E-SC-4 SM	2.0081	23 KV.	1 ó 200 A	15 KA(Asim)	PORTAFUSIBLE 23-215	2.0051	23 KV.	200 A.
FUSIBLE 23-SC-5 SM	2.0136	23 KV.	1 ó 300 A	32 KA(Asim)	PORTAFUSIBLE 23-215 I	2.0080	23 KV.	200 A.
FUSIBLE K	2.0135	23 KV.	2 ó 100 A	10 KA(Asim)	PORTAFUSIBLE 23-332	2.0052	23 KV.	300 A.
FUSIBLE K	2.0135	23 KV.	2 ó 100 A	10 KA(Asim)	PORTAFUSIBLE 23-110	2.0159	23 KV.	100 A.
<b>FUSIBLE LIMITADOR</b>								
FUSIBLE D y W TIPO DR	S/N.	23 KV.	6 ó 40 A 63 ó 160 A	40 KA 25 KA	DESCONECTOR CON CARGA DE UN TIRO, TRIPOLAR LDTP 20400 SAE	S/N	23 KV.	400 A.
FUSIBLE OF-6W	S/N.	23 KV.	150 A	37.65 KA	INTERRUPTOR CS 23, 3.600 F 200	2.0017	23 KV.	200 A.
FUSIBLE NX-MC. GRAW EDISON	S/N.	23 KV.	12 A	34 KA(Sim)				
FUSIBLE K	2.0135	6 KV.	2 ó 50 A 2 ó 50 A 2 ó 50 A 80 ó 140 A	5 KA(Asim) 10 KA(Asim) 12 KA(Asim) 12 KA(Asim)	PORTAFUSIBLE 6-105 PORTAFUSIBLE 6-110 PORTAFUSIBLE 6-112 PORTAFUSIBLE 6-212	2.0158 2.0158 2.0158 2.0158	6 KV. 6 KV. 6 KV. 6 KV.	100 A. 100 A. 100 A. 200 A.
FUSIBLE CS 6-50	2.4950.10	6 KV.	50 A	7 KA	PORTAFUSIBLE CS 6200	2.7648.40	6 KV.	200 A.
FUSIBLE CS 6-100	2.4950.10	6 KV.	100 A	7 KA	PORTAFUSIBLE CS 6200	2.7648.40	6 KV.	200 A.
FUSIBLE CR-200	2.0253	250 V.	200 A	10 KA(sim)	CARTUCHO FUSIBLE	2.0253	250V.	200 A.
FUSIBLE CR-350	2.0254	250 V.	350 A	10 KA(sim)	CARTUCHO FUSIBLE	2.0254	250V.	350 A.
FUSIBLE LIM. CTE. BUSSMAN	S/N.	220 V. 220 V. 220 V. 220 V.		200 KA	BUS ABIERTO FS-8.1500 BUS ABIERTO FS-16-1500 BUS CUBIERTO 6.800 BUS CUBIERTO 8.800	2.0455 2.0456 2.0043 2.0440	220V. 220V. 220V. 220V.	1500 A. 1500 A. 800 A. 800 A.

# DESCRIPCION Y USO DE FUSIBLES EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCION

## BAJA TENSION

DESCRIPCION	CAPACIDAD NOMINAL	U S O	INSTALACION
FUSIBLE CR-200	200 A	✦ PROTECCION DE CABLES DE BAJA TENSION	✦ EN BUS ABIERTO FS-8-1500, FS-16-1500
" CR-350	350 A		
			✦ EN BUS CUBIERTO 6-800, 8-800, DE CABLES SUBT.
FUSIBLE LIM. CTE. CABLE BTC 150 BUSSMAN	1x 150 BTC	✦ PROTECCION DE CABLES TIPO SECO DE BAJA TENSION (EN AMBOS EXTREMOS)	✦ UNICAMENTE EN RED - AUTOMATICA.
" " " " BTC 250 "	1x 250 "		
" " " " BTC 400 "	1x 400 "		

ESTUDIOS DE REDES  
JULIO DE 1988

ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE OPERACION DE FUSIBLES DE DISTRIBUCION  
DE POTENCIA TIPO EXPULSION

A. AVILA R.

A. DOMINGUEZ B.

A. GARCIA R.

A. ARANDA M.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

MEXICO, D.F.

MEXICO

R. ESPINOSA L.

A. JUAREZ T.

F. GOMEZ V.

F. FLORES L.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO

RESUMEN

Los resultados de una investigación del comportamiento de los fusibles de potencia tipo expulsión usados en redes de distribución radiales aéreas para proteger transformadores trifásicos contra sobrecargas y cortocircuitos son presentados. En este estudio fueron consideradas las características de operación de las redes de distribución operadas por Compañía de Luz y Fuerza del Centro y la respuesta de los transformadores cuando son sometidos a sobrevoltajes inducidos producidos por descargas atmosféricas. Además, se realizaron trabajos de laboratorio para conocer los principales cambios del elemento sensible a la corriente de unidades fusibles, cuando se le aplican pulsos controlados de sobre corrientes de alta frecuencia y a 60 Hz.

La relación entre las características físicas de los elementos sensibles a la corriente de fusibles probados en laboratorio y las de fusibles recolectados del campo fue establecida, determinándose finalmente las causas de su operación temprana.

1. INTRODUCCION

En los últimos años, la Compañía de Luz y Fuerza del Centro (CLFC) ha tenido un incremento notable en el número de unidades fusibles operadas de 3A nominales. Estos fusibles son - -

usados para proteger transformadores trifásicos de 75 y 112.5 KVA conectados en delta estrella aterrizada en redes radiales aéreas. Debido a este hecho, la CLFC junto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), realizó un trabajo de investigación para determinar las causas de su operación temprana y para buscar las mejores soluciones posibles a este problema. CLFC tiene instalados más de 33000 transformadores en el área metropolitana.

La idea generalmente aceptada, es que los fusibles operaban debido a que los transformadores operaban sobrecargados. Sin embargo, como se demostró más tarde, las sobrecargas no son la característica de operación predominante de las redes radiales aéreas consideradas.

Hemos verificado que hay ciertas condiciones de operación, como operaciones de maniobra de las subestaciones de potencia y efectos externos, como las tormentas eléctricas, las cuales indirectamente favorecen la operación de las unidades fusibles. Por otra parte, en los alimentadores donde no hay apartarrays instalados, o se tienen altos valores de resistencias de tierras, los efectos de los sobrevoltajes sobre los fusibles, es la aplicación de al menos, niveles dañinos de la energía  $I^2t$  de fusión del fusible, debidos a la reducción drástica de la reactancia del transformador cuando éste es sobresaturado (1).

En lo que respecta a la protección primaria contra sobrecorrientes, los dispositivos estudiados tienen características constructivas tales, que el elemento sensible a la corriente tiene que experimentar simultáneamente esfuerzos mecánicos de tensión producidos por un resorte de operación comprimido de la unidad fusible y efectos térmicos producidos por la corriente eléctrica circulante a través de éste.

86MEX52

Ponencia revisada y aprobada por el IEEE para presentarse en el MEXICON 86 en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, del 26 al 30 de octubre de 1986.

Impreso en México

Se hicieron algunas pruebas a 23 KV aplicando sobrecorrientes de bajas magnitudes, para obtener muestras características operadas de unidades fusibles, para compararlas con las unidades operadas recolectadas de los alimentadores considerados en el estudio.

También, se investigó la variación de la resistencia óhmica y tiempos de fusión de estos dispositivos cuando se les aplica una cantidad dada de su energía  $I^2t$  de fusión, aplicando pulsos de corriente a 60 Hz y de alta frecuencia (2).

Además de la investigación de laboratorio, - usando el programa digital Electromagnetic - Transient Program, (EMTP), obtuvimos en transformadores monofásicos las magnitudes de sobrecorrientes producidas por efectos de saturación al aplicarle pulsos de sobrevoltajes de magnitudes y duraciones diversas.

Este artículo, resume 3 años de trabajos de investigación y sumaliza los hallazgos más relevantes sobre el comportamiento de este tipo de fusibles de expulsión.

## 2. CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED

Con el objeto de identificar con un buen grado de confiabilidad, las causas que determinan el alto índice de operación de fusibles, se hizo un estudio profundo de las condiciones de operación en la red y sus efectos en las características mecánicas y eléctricas de las unidades fusibles.

### 2.1. SOBRECARGAS REALES

Para obtener datos confiables acerca de la energía real demandada a transformadores aéreos se monitorearon un total de 91 transformadores en 5 diferentes alimentadores, durante periodos de 3 a 4 semanas, utilizando registros gráficos de corriente conectados al lado secundario de los mismos. Los criterios de selección de los alimentos monitoreados fueron:

- Longitud de los alimentadores.
- Densidad de carga por kilómetro cuadrado.
- Opinión de los ingenieros de campo, acerca de los alimentadores más problemáticos.

Los resultados obtenidos en el monitoreo de 65 transformadores de 75 KVA y 26 de 112.5 KVA son resumidos en la tabla I.

TABLA 1. DISTRIBUCION PORCENTUAL DE TRANSFORMADORES MONITOREADOS RESPECTO A SU CARGA PROMEDIO DIARIA DURANTE EL PERIODO DE DEMANDA MAXIMA (APROX.2 HORAS).

KVA DEL TRANSF.	CON RESPECTO A SU CARGA NOMINAL				
	%	%	%	%	%
	100	100-120	120-140	140-170	170-210
75	38.5	7.7	18.5	27.7	7.6
112.5	73.1	11.5	7.7	7.7*	---

\* Las sobrecargas máximas no rebasan el 150% de su carga nominal.

Con las sobrecargas máximas encontradas en los transformadores, su efecto único es el de envejecimiento sobre la unidad fusible, en un periodo de tiempo muy largo.

### 2.2. SOBRECARGAS APARENTES

Para los propósitos del proyecto aquí descrito, éstas estuvieron constituidas por: corrientes inrush, corrientes transitorias producidas por efectos de saturación en transformadores y cortos circuitos secundarios (1,4).

En el caso de energización individual o de grupo de transformadores, posterior a una interrupción en el servicio, se tendrán flujos de corrientes inrush a través de los fusibles primarios. Es práctica común considerar los efectos de calentamiento integrados sobre el fusible, tomando 12 veces la corriente nominal del transformador para una duración de 0.1 segundos para corrientes inrush de magnetización y 6 veces para una duración de 0.05 segundos al considerar las corrientes inrush de carga (3). El número máximo de interrupciones en el servicio por mes en alimentadores problemáticos de CLFC es de 28 durante los periodos de lluvias y su efecto sobre los fusibles de 3A bajo estudio, se determinó mediante pruebas, las que se describirán más adelante.

Aunque la energía  $I^2t$  asociada con las corrientes inrush no es suficiente para operar los fusibles, si produce efectos de envejecimiento en éstos, y después de un cierto número de aplicaciones, pueden operar aun en condiciones normales de operación.

Durante los periodos de lluvia, además de las fallas en el aislamiento de componentes y equipos del sistema de distribución, se tiene un muy alto índice de operaciones de fusibles, respensabilizándose de ello principalmente, a los sobrevoltajes inducidos por descargas atmosféricas (5).

La presencia de los sobrevoltajes inducidos por descargas atmosféricas y sus sobrecorrientes asociadas, fue verificada mediante la aplicación de detectores de corriente de rayo (5). El valor promedio de corriente de rayo medida fue de 5 KA. En conjunto con estos dispositivos se instalaron contadores de descargas en apartarrayos, los cuales se conectan a la guía de aterrizaje del mismo.

Los resultados obtenidos indicaron que debido a la alta impedancia característica del transformador (4,6), sólo una pequeña parte de la corriente de rayo se deriva hacia el grupo fusible-transformador y por tanto, su efecto sobre el fusible será el de envejecerlo gradualmente y a muy largo plazo (2,8). Adicionalmente la ausencia de apartarrayos y/o altos valores de resistencias de tierra, dejan expuestos a los transformadores a la acción de los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas. Así, de un estudio paralelo realizado en 75 transformadores fallados, se detectaron el 48% de éstos que mostraban fallas de aislamiento.

Para una gran cantidad de alimentadores secundarios, además de los periodos de demanda máxima en transformadores (140% o más de su capacidad nominal) es necesario tomar en cuenta características tales como: longitudes mayores de 350 m, vandalismo y fraudes. Bajo estas condiciones el aislamiento de los conductores secundarios puede dañarse fácilmente y producirse fallas secundarias, las cuales algunas veces alcanzan las terminales secundarias del transformador.

Las magnitudes de las corrientes producidas por fallas secundarias de una fase y de tres fases a tierra, referidas al lado primario van desde 3 a 54 amperes, dependiendo de la distancia del punto de falla, a las terminales secundarias.

Para el caso de corrientes primarias de 6A o más, los fusibles operan con muy alta dispersión en los tiempos de fusión. Esto permite que los aislamientos internos del transformador sean esforzados, térmicamente, reduciendo de esta forma su vida útil y a la vez su nivel básico de aislamiento.

### 2.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE CARGA

La influencia de la carga conectada al transformador sobre el comportamiento de la unidad fusible fué determinado midiendo la resistencia óhmica de unidades fusibles no operadas recolectadas de los alimentadores escogidos y con diferentes tipos de cargas.

Los alimentadores seleccionados fueron de los dos siguientes sectores:

- Sector Norte: Carga industrial y comercial.
- Sector Pantitlán: Carga doméstica.

En la figura 1 se muestra el cambio en la resistencia óhmica de los fusibles de 3A con los años de servicio.

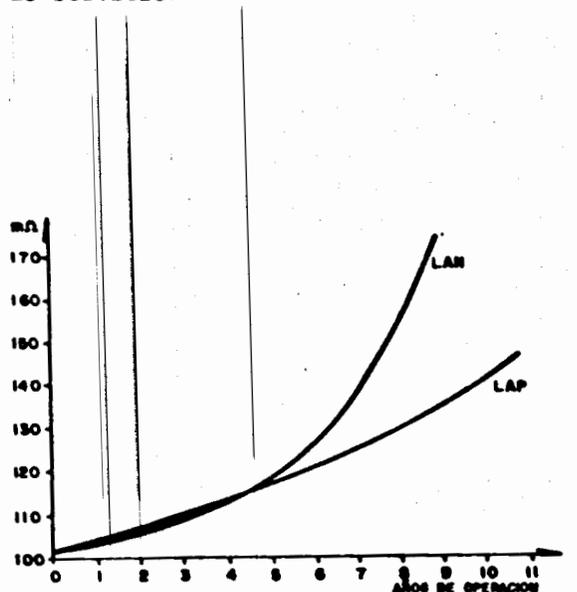


FIGURA 1 VARIACION DE LA RESISTENCIA OHMICA DE UNIDADES FUSIBLES DE 3A, TIPO K, CON LOS AÑOS DE SERVICIO.

### 3. COMPORTAMIENTO DE LOS FUSIBLES DE EXPULSION 3A, TIPO K, EN LABORATORIO Y CAMPO.

Aunque en el campo es posible recolectar fusibles operados por sobrecorrientes de cualquier magnitud, la mayoría de éstos son operados por sobrecorrientes pequeñas como se demostró con los resultados de una clasificación estadística realizada sobre fusibles operados recolectados de los alimentadores bajo estudio.

La clasificación estadística se basó en las características de las componentes internas de unidades fusibles operadas, las cuales son fáciles de extraer y que hemos denominado contactos fijo y móvil.

De los análisis de unidades operadas se observó que las partes residuales más significativas son las del contacto fijo y están relacionadas con el elemento sensible a la corriente y son: longitud residual, la parte fundida y la coloración del elemento fundido.

Por tanto, se realizaron una serie de pruebas de sobrecorrientes en unidades originales y nuevas. La primera serie de pruebas se realizó de acuerdo con los requerimientos de la norma internacional IEC 282-2 en los laboratorios de alta potencia de Hidro-Quebec en Canadá (IREQ), y la segunda serie de pruebas, se realizó en nuestro laboratorio de pruebas en Salazar Edo. de México.

#### 3.1. CARACTERISTICAS DEL ELEMENTO SENSIBLE A LA CORRIENTE.

Longitud: Por sí misma, esta dimensión no es un indicador confiable de la energía  $I^2t$  aplicada, a causa de que depende de su edad (tiempo instalado en la red antes de su operación) combinada con el esfuerzo de tensión axial permanente aplicado por el resorte de compresión contra éste.

La porción fundida. Si el elemento fusible es operado por sobrecorrientes de 3 a 4 veces su corriente nominal, en el punto más drástico se forma una gota del elemento fusible fundido cuyo diámetro depende de: magnitud de la sobrecorriente, energía  $I^2t$  de arqueo, duración y punto sobre la onda de voltaje donde se inicia el arqueo, y energía inductiva  $\frac{1}{2} Li^2$ .

Por ejemplo, hemos encontrado que cuando el arqueo inicia entre 45 y 85 grados sobre la onda de voltaje después del cero, la energía de arqueo es mayor y la masa de la gota adquiere su máximo valor, este caso se presenta en la figura 2. Se tiene también, que cuando el arqueo empieza entre 155 y 170 grados sobre la onda de voltaje después del cero, la masa de la gota es mínima, este caso se presenta en la figura 3.

### 3.2. ESTABLECIMIENTO DE PATRONES DE COMPARACION



FIGURA 2 - GOTA FORMADA CUANDO EL ARQUEO INICIA DE 45 A 85 GRADOS SOBRE LA ONDA DE VOLTAJE. I = 31.3 A

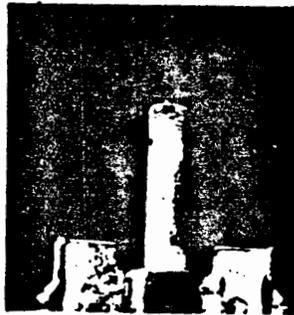


FIGURA 3 - GOTA FORMADA CUANDO EL ARQUEO INICIA ENTRE 135 Y 170 GRADOS SOBRE LA ONDA DE VOLTAJE. I = 11.5 A

Cuando la corriente aplicada es aproximadamente 10 veces la corriente nominal del fusible, comúnmente éste funde en más de un punto y la gota residual permanecerá próxima a la terminal inferior del contacto fijo del fusible.

Coloración: Observando esta característica, tendremos una idea acerca de la magnitud de la sobrecorriente y su duración. Un juicio como el anterior, requiere extraer el contacto fijo de la cámara de arqueo del fusible. Los casos más importantes que se tienen son: coloración azul oscura cerca del punto de fusión que corresponde a sobrecorrientes de 2 a 3.5 veces su valor nominal y tiempos de fusión desde 2.8 a 300 segundos aproximadamente; la coloración gris-oscuro cerca del punto de fusión, corresponde a la aplicación de más de un pulso de corriente con valores de energía del 60 al 85% de su energía  $I^2t$  nominal de fusión, antes de que funda.

Las características mecánicas presentadas por los elementos fusibles cuando son sometidos a la acción combinada de sobrecorrientes pequeñas a 50 Hz y corrientes impulsivas transitorias, son bien diferentes de las descritas anteriormente debido al efecto acumulado de envejecimiento durante su vida útil, lo cual cambia su microestructura (2,8) provocándose fallas aun cuando no se presenten sobrecorrientes de estado estable en el transformador.

Los casos más representativos son: terminación en punta sin huellas de fusión, figura 4; huellas de fusión parcial y fracturas, figura 5; reducción de su diámetro original y fusión, figura 6.



FIGURA 4 - MICROGRAFIA DE UNA TERMINACION EN PUNTA SIN HUELLAS DE FUSION



FIGURA 5 - MICROGRAFIA DE UNA PUNTA Y FRACTURAS



FIGURA 6 - MICROGRAFIA MOSTRANDO REDUCCION DE DIAMETRO Y FUSION

En adición a las pruebas de cortocircuito realizadas de acuerdo con las normas internacionales IEC.282-2, hicimos pruebas de interrupción en unidades fusibles nuevas y originales, aplicando bajas magnitudes de corrientes en un circuito de pruebas con un factor de potencia de 0.70 a 23 KV. El cierre del circuito fué aplicado aleatoriamente.

Para cubrir las corrientes primarias en transformadores más significantes, producidas por los diferentes tipos de fallas secundarias, localizadas a diferentes distancias de las terminales del transformador, se escogieron sus valores entre 10 y 42A.

Los valores promedios de masa, longitud residual y diámetro de la gota del elemento fusible en su contacto fijo inferior son mostrados en la tabla II. En estos podemos ver, que para un rango de niveles de corriente, la masa residual total de los elementos fusibles es casi constante, por tanto, concluimos lo siguiente:

TABLA II. CARACTERISTICAS DEL ELEMENTO RESIDUAL DE UNIDADES OPERADAS DE 3A, TIPO K.

M	M	$I^2 t$	$I$ amperes	$t$ segundos	$I^2 t$	Angulo de Arqueo	CONCENTRACION DEL ELEMENTO RESIDUAL		
mg.	mm.	Am <sup>2</sup> -Seg.	Amperes	Seg.	Am <sup>2</sup> -Seg.	Grados	Long. mm.	Diámetro mm.	Masa Residual mg.
42.0	0.24	437.5	41.0	0.005	76.5	0	2.0	2.0	21.0
31.2	0.45	606.4	31.2	0.024	26.9	0	2.7	1.0	21.0
23.7	0.54	438.2	21.0	0.042	26.2	20	1.4	2.1	25.9
19.0	1.25	302.9	17.7	0.042	12.2	20	1.1	1.9	26.1
16.0	1.60	428.9	16.0	0.009	16.1	25	1.1	1.7	26.0
11.7	1.83	361.2	11.5	0.009	1.2	0	11.2	1.1	26.6
10.5	1.45	301.7	10.5	0.009	2.2	0	11.1	0	25.9

- Valores de masas residuales de 19 a 30 mg. implican corrientes de operación (fusión) de 9 a 45 amperes.
- Valores de masa más pequeños, tendiendo a cero, significan la aplicación de altas energías de arqueo y altas energías inductivas disponibles en el sistema.

En la figura 7 se muestra la relación encontrada entre corrientes de prueba y longitud residual de elementos fusibles.

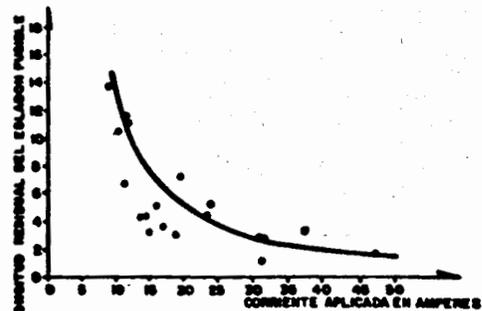


FIGURA 7 - RELACION ENTRE CORRIENTES DE PRUEBA Y LONGITUDES RESIDUALES DE ELEMENTOS FUSIBLES DE 3A, TIPO K.

Pruebas de cortocircuito: Bajo estas condiciones, ambos contactos fijo y móvil presentan una alta erosión, de acuerdo con las magnitudes de sobrecorrientes y siempre el elemento fusible desaparece completamente. Las excepciones son las longitudes residuales de las series 4 y 5.

En la tabla III son mostrados los resultados de las pruebas hechas a unidades fusibles de 3K en un circuito de pruebas de 27 KV indicándose la energía  $I^2t$  asociada en cada caso, el peso de los residuos de elementos fusibles en el contacto fijo y la reducción porcentaje promedio del mismo contacto.

Reducción en el tiempo de fusión: Para completar la investigación acerca del comportamiento de las unidades fusibles, se realizaron otras dos series de pruebas; aplicando pulsos de corriente a 60 Hz e impulsiones con formas de onda de 3 x 20.

TABLA III. CARACTERISTICAS DE ELEMENTOS FUSIBLES RESIDUALES, DE UNIDADES FUSIBLES PROBADAS AL CORTOCIRCUITO.

CORRIENTE DE ENSAYO EN AMPERES SINÉTRICOS rcm	ENERGIA $I^2t$ ASOCIADA, EN $(A^2-s)10^3$	EN EL CONTACTO INFERIOR Y SU VASTAGO	
		PESO DE LA PARTE RESIDUAL DEL ESLABON FUSIBLE (mg)	REDUCCION PORCENTUAL PROMEDIO EN SU PESO
12830	4935.00	0	22.585
9350	1220.00	0	11.273
3170	230.00	0	2.833
450	7.95	17.10	0
15	0.42	24.45	0

NOTA: - El peso promedio del contacto fijo sin elementos fusible es 28.59 grs.

- El peso promedio del elemento fusible de 3K, aleación Ni-Cr 80-20, es 0.058, grs.

#### Pulsos de Corriente a 60 Hz:

Usamos un circuito casi resistivo a 220V CA introduciendo un interruptor de cierre sincronizado capaz de cerrar el circuito en 0 ó 90 grados sobre la onda de voltaje asegurando de esta manera que tenemos siempre una corriente simétrica y que damos pulsos de corriente desde un medio ciclo hasta la operación continua.

En las tablas IV y V, los valores porcentuales de la energía de fusión aplicada, tomando como base 250 A<sup>2</sup>S de acuerdo con los valores publicados correspondientes a unidades fusibles de 3K, el número aplicaciones de pulsos y la reducción en el tiempo de fusión debido al envejecimiento de los elementos fusibles probados.

En las siguientes tablas IV y V, podemos ver que para el mismo nivel de energía, cuando se incrementa el número de pulsos, el tiempo de fusión es menor. Ambas tablas, fueron construidas usando el mismo criterio.

TABLA IV. APLICACION DE PULSOS DE CORRIENTE DE 66.72A.

% de la energía $I^2t$ de fusión	Número de pulsos aplicados	Tiempo de fusión en segundos	Reducción porcentual en el tiempo de fusión para el mismo número de pulsos aplicado
65	6	0.0957	-
	12	0.0955	-
	18	0.0931	-
75	6	0.0904	- 5.53
	12	0.0880	- 7.85
	18	0.0875	- 6.02
85	6	0.0735	-23.19

TABLA V. APLICACION DE PULSOS DE CORRIENTE DE 136.3A.

% de la energía $I^2t$ de fusión	Número de pulsos aplicados	Tiempo de fusión en segundos	Reducción porcentual en el tiempo de fusión para el mismo número de pulsos aplicado
65	6	0.025	-
	12	0.024	-
	18	0.0235	-
75	6	0.02385	- 4.60
	12	0.0224	- 6.67
	18	0.0200	- 14.89
85	6	0.0180	- 28.00

#### Incremento de la Resistencia Ohmica

Para determinar el Cambio de la resistencia eléctrica de las unidades fusibles, se formaron dos grupos de muestras las cuales correspondieron a las muestras usadas para construir las tablas IV y V.

En la figura 8 se pueden apreciar las variaciones de la resistencia eléctrica de las muestras probadas utilizando corrientes pico de 66.72A y 136.3A a 60 Hz, con el número de aplicaciones y para dos niveles de energía (65, 75 y 85% de su energía nominal de fusión).

En todos los casos, el mayor incremento de la resistencia óhmica se tiene para el primer pulso aplicado.

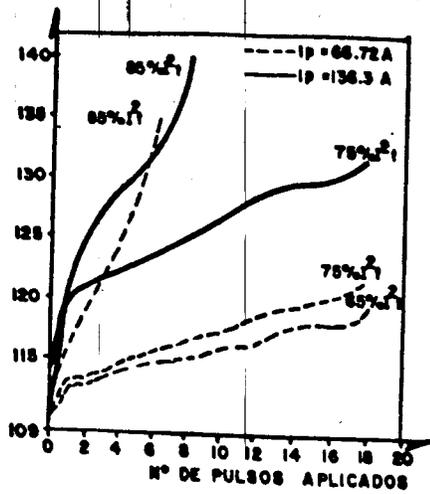


FIGURA 8-VARIACION PROMEDIO DE LA RESISTENCIA OHMICA CON EL NUMERO DE APLICACION DE PULSOS PARA DIFERENTES PORCIENTOS DE LA ENERGIA NOMINAL DE FUSION A 60 Hz.

Efectos de la Corriente Inrush de Magnetización.

Con el propósito de conocer la respuesta de las unidades fusibles bajo estudio ante la aplicación de corrientes de magnetización, correspondientes a transformadores de 75 KVA, considerando un promedio de 6 interrupciones mensuales, simulamos 10 años de servicio y 720 operaciones de maniobra aplicadas al azar.

Aun cuando la frecuencia de ocurrencia de los valores máximos de corriente fue de sólo el 0.7% del total, el incremento en la resistencia óhmica fue significativo. Los resultados son mostrados en la figura 9, en la cual se aprecia que para una unidad nueva, sólo se tienen incrementos del 12% en la resistencia óhmica.

Esto es, suponiendo que los fusibles se encuentran expuestos únicamente a la acción de estas corrientes.

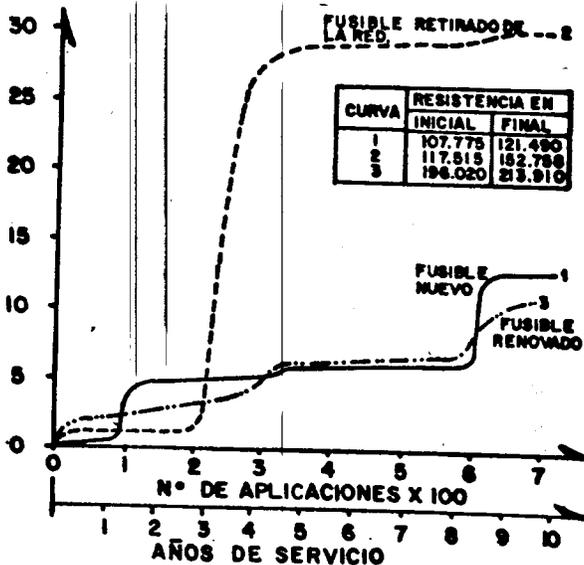


FIGURA 9-INCREMENTO DE LA RESISTENCIA OHMICA DE LAS UNIDADES FUSIBLES DE 3A TIPO K, CON LA APLICACION DE CORRIENTES IN RUSH DE MAGNETIZACION DE TRANSFORMADORES.

3.3. ANALISIS DE UNIDADES FUSIBLES RECOLECTADAS DE LA RED.

Durante 3 años de investigación, se estudiaron cuidadosamente 1070 unidades fusibles operadas, recolectadas de la red.

El primer grupo estuvo compuesto de 910 muestras reunidas en el periodo agosto 1980 - abril de 1981 y el segundo de 160 muestras correspondientes a los siguientes periodos: noviembre de 1983- enero de 1984 y abril de 1984 - mayo de 1984.

Estas muestras fueron clasificadas aplicando los criterios establecidos en las secciones 3.1 y 3.2 y en base a la información obtenida, se construyó el histograma mostrado en la figura 10, en él se relacionan la longitud residual del elemento fusible en el contacto fijo y el número de muestras analizadas.

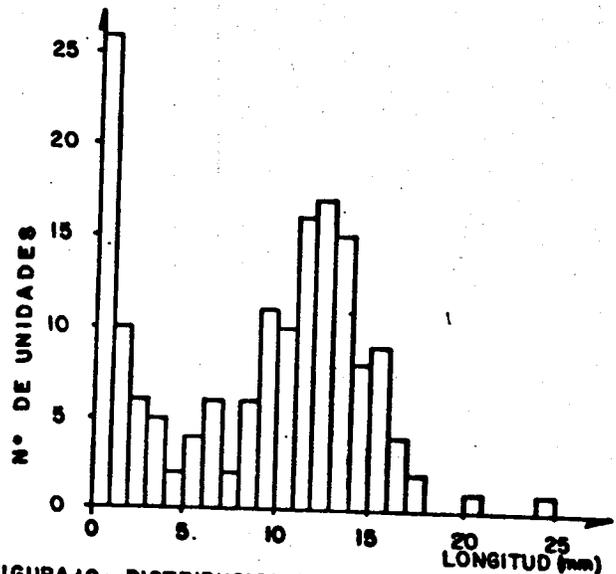


FIGURA 10- DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DE OPERACION DE LAS LONGITUDES RESIDUALES DE ELEMENTOS FUSIBLES EN LOS CONTACTOS FIJOS.

De la figura 10, es apreciable una distribución de doble frecuencia, la cual se describe enseguida:

Un primer grupo de 50 muestras presenta longitudes residuales entre 0 y 4 mm indicando que fueron operados por corrientes de falla primarias mayores de 30A, las cuales corresponden a:

- Corto-circuitos secundarios, trifásicos o bifásicos ocurridos a no más de 100 metros del transformador.
- Corto-circuitos primarios debidos a sobrevoltajes con frentes muy escarpados.

El segundo grupo de 110 muestras presenta una alta densidad de longitudes residuales, entre 9 y 16 mm las cuales corresponden a:

- Corto-circuitos secundarios menores de 30A, monofásicos o bifásicos, ocurridos a distan

cias mayores de 100 m, desde el transformador, siendo en total 73 muestras.

- El efecto combinado o simple de las corrientes transitorias producidas por sobrevoltajes en transformadores y de las corrientes inrush de magnetización, las cuales le producen al elemento fusible al menos envejecimiento. Estas fueron un total de 37 muestras.

Las características que presentan estas muestras son:

- Terminación en punta sin huellas de fusión.
- Huellas de fusión parcial y fracturas.
- Reducción de su diámetro original y fusión.

Habiendo determinado y clasificado las características de los grupos de unidades operadas, las cuales fueron semejantes, realizamos la clasificación final de las causas de operación de las mismas.

Los perfiles de operación fueron los mismos, - ésto es, la mayor parte de los fusibles operaron por sobrecarga. Sin embargo, como se indicó en la sección 2, las sobrecargas reales no existen en la red, y por tanto, los fusibles son operados por:

#### CAUSA:

- |  |      |
|--|------|
| - Corto-circuitos secundarios  | 64.1 |
| - Sobrecorrientes transitorias debidas a sobrevoltajes inducidos por descargas atmosféricas y corrientes inrush de magnetización en transformadores. | 32.4 |
| - Corrientes de corto-circuitos primarios de baja impedancia.  | 3.5  |

De los resultados obtenidos podemos concluir, que los fusibles estan operando correctamente en el caso de fallas primarias y con algunas magnitudes de corrientes de fallas secundarias, pero en la presencia de corrientes impulsivas transitorias, hay una cantidad relativamente alta de operaciones incorrectas de fusibles.

#### 4. EFECTOS DE SATURACION EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION DEBIDOS A SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS.

A semejanza de otras compañías distribuidoras de energía eléctrica en el mundo y particularmente en los E.U.A., la CLFC en la Ciudad de México experimenta un alto incremento en el número de operaciones de fusibles durante los periodos de lluvia. La experiencia particular de los ingenieros de operación de CLFC, indica que los responsables directos de esta situación son las descargas atmosféricas y particularmente los sobrevoltajes producidos por éstas.

El estudio de los mecanismos de operación de los fusibles, producidos por las descargas atmosféricas requiere considerar dos tipos de sobrevoltajes presentes en las redes de distribución.

#### Sobrevoltajes transitorios con frentes de onda muy cortos.

La presencia de estos sobrevoltajes ha sido verificada por investigadores japoneses (17) y los resultados obtenidos indican que se tienen impulsos de sobrevoltajes en las redes con frentes tan cortos como 0.1. Los efectos de estos sobrevoltajes y sobrecorrientes son las fallas en los aislamientos externos y/o internos de los transformadores y por tanto, la operación de los fusibles de protección. Las características de operación de los fusibles ya fueron descritas anteriormente.

#### Sobrevoltajes transitorios de larga duración.

Los estudios experimentales realizados para medir los sobrevoltajes y sobrecorrientes producidos por descargas atmosféricas en redes de distribución han estado orientados a determinar fundamentalmente las componentes de voltaje y corriente impulsivos de alta magnitud, sin considerar las componentes de baja magnitud y larga duración.

Algunos investigadores en Japón (12) se han avocado a la medición de los impulsos de corriente de larga duración y los resultados indicaron que se tienen duraciones tan grandes como 4.8 ms y de polaridad predominantemente positiva. Los sobrevoltajes asociados con estas sobrecorrientes son también de larga duración.

Los efectos más importantes de los sobrevoltajes de larga duración son el cambio de la reactancia de saturación del transformador y la generación de sobrecorrientes transitorias, las cuales fluyen a través de éste y de los fusibles primarios. En (1) son analizadas y discutidas las sobrecorrientes producidas en transformadores de distribución cuando se les aplican sobrevoltajes transitorios de larga duración. La energía  $I^2t$  asociada con las sobrecorrientes así producidas puede ser de magnitud suficiente como para producir la operación de los fusibles primarios y/o envejecerlos paulatinamente.

Las características de operación de los fusibles operados por sobrecorrientes de esta naturaleza son discutidas en la sección 3.

#### 4.1 SOBRECORRIENTES PRODUCIDAS POR LA SATURACION DEL NUCLEO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION.

Cuando se aplican sobrevoltajes transitorios de larga duración a transformadores de distribución se generan cinco componentes transitorias de corriente a través de éste.

Las dos componentes más importantes son: la corriente impulsiva posterior a la saturación del núcleo y la corriente de magnetización transitoria a la frecuencia de potencia.

#### Corriente Impulsiva Posterior a la Saturación del Núcleo.

Los sobrevoltajes transitorios de larga duración considerados son:

los producidos en la descarga del apartarrayos cuya magnitud y duración dependen de las características del mismo y los sobrevoltajes de -- magnitudes menores al voltaje de inicio de la descarga del apartarrayo.

Cuando se aplica un sobrevoltaje ( cualquiera de los mencionados anteriormente) a un transformador, después de un corto tiempo (algunos microsegundos) una pequeña corriente comienza a fluir en el devanado primario. El flujo producido por esta corriente cambia el flujo magnético de operación del núcleo del transformador.

El flujo resultante es la suma del flujo de estado estable del transformador y el flujo transitorio producido por la aplicación del sobrevoltaje. Si la magnitud y duración del sobrevoltaje son suficientes, el flujo transitorio producido cambia el flujo de operación de estado estable del transformador, llevándolo al nivel de saturación.

Las condiciones que favorecen esta situación ocurren cuando el pulso de sobrevoltaje es -- aplicado a un ángulo de 180 grados sobre la onda de voltaje y cuando el flujo transitorio tiene la misma polaridad que el flujo de estado estable. Si el sobrevoltaje aplicado produce un flujo transitorio de polaridad opuesta al de operación de estado estable, el tiempo requerido para alcanzar el nivel de saturación es mayor.

Cuando el núcleo del transformador ha sido saturado, su inductancia se reduce drásticamente, cambiando de una reactancia de núcleo de hierro a una reactancia de núcleo de aire. Bajo estas condiciones, la impedancia vista por el pulso de sobrevoltaje es pequeña, de modo que en el devanado primario del transformador fluirá una fracción de la corriente impulsiva que acompaña a la onda de voltaje. Su magnitud depende del tiempo de duración del sobrevoltaje y del tiempo requerido para alcanzar la saturación del transformador. La velocidad de crecimiento de la corriente es una función de la relación  $X/R$  del transformador (1).

#### Corriente de Magnetización Transitoria a la Frecuencia de Potencia.

Una vez que el sobrevoltaje transitorio ha desaparecido, el flujo de operación del transformador tiene un nivel que depende del grado de saturación alcanzado durante la aplicación del sobrevoltaje y del flujo de operación de estado estable cuando termina el impulso.

La naturaleza de la corriente resultante es idéntica a la del conocido fenómeno de corrientes inrush en transformadores aunque puede ser mayor.

Debido a que las distancias entre transformadores son cortas, puede considerarse que los sobrevoltajes son aplicados simultáneamente a -- todos los transformadores localizados en la cercanía del punto de aplicación del sobrevoltaje.

#### 4.2 ANALISIS DIGITAL DE LA RESPUESTA DE UN TRANSFORMADOR ENERGIZADO - ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS - DE VOLTAJE DE LARGA DURACION.

Para conocer las magnitudes aproximadas de sobrecorrientes producidas por efectos de saturación en transformadores, se realizaron simulaciones digitales usando el programa digital - EMTP (Electromagnetic Transient Program). La simulación consistió básicamente en la aplicación de sobrevoltajes de larga duración (5ms) de diferentes magnitud a un transformador energizado.

Se estudio un transformador monofásico de 25 - KVA 13.2/0.220/0.127 KV, 2.3% de impedancia. Se consideró además en la simulación la impedancia del sistema.

El transformador fue representado en la simulación por una inductancia no lineal en serie -- con una resistencia para considerar la resistencia de los devanados y su efecto en la respuesta del transformador. Se varió la inductancia del transformador en la región de sobre saturación.

El ángulo de aplicación del sobrevoltaje se -- consideró de 180 grados sobre la onda del voltaje de alimentación, condición que favorece la saturación del transformador.

De los resultados obtenidos podemos decir que las sobrecorrientes producidas después de la saturación del núcleo son de magnitudes y duraciones tales, que pueden operar los fusibles de protección primarios. El efecto de la impedancia del sistema es mínimo, por lo que puede no considerarse.

La impedancia del transformador saturado (resistencia del devanado primario e inductancia sobresaturada) afectan fuertemente la magnitud de las sobrecorrientes producidas después de la saturación del núcleo.

#### 5. CONCLUSIONES

- Los resultados del monitoreo de transformadores de distribución de 75 y 112.5 KVA, delta estrella aterrizada, en las redes aéreas de CLFC indicaron que las sobrecargas en los -- transformadores existen, pero su magnitud no es suficiente para operar los fusibles primarios.
- Los principales responsables de la operación temprana de los fusibles estudiados son los cortocircuitos secundarios, cuyos valores de corriente referidos al lado primario son iguales o mayores a 9A, porque con valores menores los fusibles operan con muy alta dispersión en sus tiempos de fusión. Su contribución con respecto al total de causas de operación fue del 64.1%.
- Como consecuencia, se recomienda, instalar -- en el secundario del transformador una protección apropiada en coordinación con la protección primaria, así como la reducción de la -- longitud del circuito secundario.

- Las unidades fusibles estudiadas sufren severos efectos de envejecimiento cuando son expuestas a la acción combinada de las corrientes transitorias de magnetización de transformadores y por el esfuerzo de tensión ejercido por el resorte de compresión de operación del fusible. El por ciento de fusibles operado por este concepto fué de 32.4.
- Como fué establecido por otros investigadores y de acuerdo con las simulaciones digitales realizadas, las corrientes transitorias producidas por sobrevoltajes transitorios de larga duración, en transformadores, pueden tener energías  $I^2t$  de valores próximos a la energía  $I^2t$  nominal de fusión de las unidades estudiadas, deñándolas paulatinamente o bien operándolas.
- Finalmente se recomienda, reducir el número de operaciones de maniobra en la red de distribución, así como efectuar un estudio más profundo de las sobretensiones transitorias y sus efectos en el conjunto apartarrayos-fusibles-transformador.

## 6. REFERENCIAS

- 1) G.L. Gaibrois, W.J. Huber, H.O. Stoelting, "Blowing of Distribution Transformer Fuses by Lightning". IEEE-PES, Summer Meeting, Vancouver, Can. July 1973.
- 2) S.L. Cress, "Electro-Thermal Damageability of fusible elements". International Conference on Fusing IREQ-LAB. Varennes, Quebec, Can. Nov. 2, 3, 4, 1981.
- 3) D.J. Glenn, "Protection of Transformers and Other Equipment Using Distribution Cutouts and Power Fuses". International Conference on Fusing, IREQ Lab. Vannes, Quebec, Can. Nov. 2, 3, 4, 1981.
- 4) J.M. Bryan, M. Newman, "Abnormal Currents in Distribution Transformers Due To Lightning". AIEE Transactions, Vol. 61, August 1942.
- 5) J.A. Mambuca, "Lightning Problems on Distribution System". EEI T & Meeting, Oct. 12, 1972.
- 6) A. Greenwood, "Electrical Transients in Power-Systems". Wiley-Interscience 1971, pp. 251-280.
- 7) N. Nagano, S. Masuda, M. Nera, H. Inoue, "Measurements of Steep-Front Lightning surge Voltages on Distribution Lines". IEEE Trans. on Power - Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1598-1606, June 1983.
- 8) W. Held, F.J. Pollmeier, "Les Fusibles Interieures Dans les Condensateurs a Haute Tension Modernes".
- 9) E.J. Twohy, T.H. Lee, H.P. Fullerton, "Transient Resistance of Conductors". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 2.
- 10) A.J. Erikson, J.F. Stringfellow, D.V. Meal, "Lightning Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982.
- 11) A. Shef, J. Huse, "Currents Through Surge Arresters Due to Lightning with Main Reference to Distribution Systems". Electra -- 1977.
- 12) K. Nakohori, T. Egawa, H. Mitani, "Characteristics of Winter Lightning Currents in Hokuriki District". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101 No. 11, November 1982.
- 13) H.M. Schneider, H.R. Stilwell, "Measurements of Lightning Currents Wave Shapes on Distribution Systems". IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Can. July 1979.
- 14) E.C. Sakshaug, "Influence of Rate of Rise on Distribution Arrester Protective Characteristics". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 2 March/April 1979.
- 15) K.E. Crouch. "Calibration tests on magnetic tape Lightning current detector" NASA Contractor Report 3270.

# PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES

ALFREDO JUAREZ Y SALVADOR HERNANDEZ

## Resumen

Se presenta la descripción de los dispositivos de protección, los diferentes arreglos de la subestación y alimentadores utilizados con más frecuencia, así como la coordinación de esquemas recomendados para la protección contra sobrecorrientes en las redes de distribución de media tensión.

## 4.1 INTRODUCCION

Un sistema de distribución debe estar diseñado para entregar energía a los puntos en que se va a utilizar, sin interrupciones ni restricciones y a un costo razonable. Para lograrlo, no se deben perder de vista las necesidades operacionales normales, y además se debe tomar una cantidad razonable de provisiones para proteger al sistema y al suministro contra fallas y condiciones anormales.

Un detalle aparentemente pequeño pero de gran importancia es el hecho de que la amenaza más grande al suministro de energía la constituye la falla de corto circuito, pues su incidencia implica un cambio violento en la operación del sistema debido a que la energía que previamente se estuviese entregando a la carga, se irá ahora hacia la falla.

Esta liberación incontrolada de energía puede ser destructiva, causando fuego y daños estructurales no sólo en el lugar original de la falla, sino también en otros puntos del sistema por los que circule energía hacia la falla. Sin embargo, el aislamiento del daño por los equipos desconectores más cercanos a él, limitará el daño en el punto de falla e impedirá que la misma y sus efectos se propaguen al resto del sistema; y es precisamente el equipo de protección quien tendrá la decisión de iniciar la apertura del equipo desconector primario.

"Equipo de protección" es un término que agrupa para definirlo a todo el equipo necesario para detectar, localizar e iniciar el aislamiento de una falla o condición anormal.

## 4.2 TIPOS Y CAUSAS DE FALLA

Las fallas en los sistemas de distribución, se pueden clasificar por su duración en dos grandes grupos que son:

- Fallas transitorias o instantáneas.
- Fallas permanentes.

En el sistema aéreo, las fallas transitorias (consideradas menores a cinco minutos) se presentan en un rango de 75 a 95 % y están relacionadas de algún modo con las condiciones climatológicas existentes, pudiendo ser en algunos casos autoeliminadas o ser eliminadas mediante dispositivos de interrupción instantánea (interruptor, equipo de recierre automático, etc.) generalmente en 1,2 ó 3 intentos y en un tiempo menor a 45 segundos, siendo las causas más comunes las siguientes:

- Contacto instantáneo entre conductores desnudos, debido generalmente a la acción del viento
- Contacto de objetos extraños al sistema (ramas de árboles, objetos colgantes, aves que disminuyan la distancia de aislamiento, etc.)
- Flameo de aisladores
- Falsos contactos
- Arqueos por contaminación ambiental
- Sobrecorrientes instantáneas

Se ha demostrado de acuerdo a estadísticas, que en el primer recierre se elimina hasta el 88 % de las fallas, en el segundo hasta un 5 % y en el último un 2 % adicional. A su vez las fallas permanentes se presentan en un 5 %, y son aquellas que persisten sin importar con que rapidez se abra el circuito, siendo las más comunes las siguientes:

- Contacto sólido entre conductores o de conductor(es) a tierra (corto circuito 3fases, 2fases, 1fase)
- Vandalismo (daño al equipo)
- Sobrecargas permanentes
- Degradación de aislamiento
- Falla de equipo
- Fraude
- Conexiones erróneas
- Mano de obra deficiente

En el sistema subterráneo, las fallas que se presentan son de tipo permanente, cuya interrupción es de duración prolongada, siendo las causas más frecuentes estas:

- Envejecimiento del aislamiento, debido a sobrecargas o cortos circuitos
- Esfuerzos eléctricos por sobretensiones, debido a voltajes transitorios
- Pérdida de aislamiento debida a la humedad, arborescencias, reducción por roedores, piquete mecánico en cables, mal manejo de equipo
- Mano de obra deficiente
- Falla de equipo

#### 4.3 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCION

##### 4.3.1 Interruptor

El equipo de protección está ayudado en la tarea de aislar el elemento defectuoso, por interruptores que son capaces de desconectar cuando el equipo de protección se los manda. Por lo que la función principal de un interruptor es la de separar de la red a la porción de ésta que contiene una falla, siendo sometido a la exigencia de la corriente de corto circuito y después de la interrupción a la tensión de restablecimiento; asimismo, los interruptores son requeridos para controlar las redes eléctricas de potencia, al conectar y desconectar los circuitos bajo la supervisión manual o automática

a) Medios de Interrupción.- Los interruptores más comunes utilizan como medio de interrupción lo siguiente:

- Aceite
- Gas
- Vacío

Para los niveles de distribución los más empleados son los de aceite y vacío.

b) Mecanismo de Operación.- El mecanismo de operación es el elemento que almacena y transmite la energía al elemento móvil del interruptor el cual abre o cierra sus contactos; en la actualidad lo tipos de mecanismos más utilizados son:

-Hidroneumático (eléctrico-hidráulico).- Utiliza la energía almacenada de un gas comprimido (nitrógeno), siendo comprimido hidráulicamente dentro de un acumulador a una presión aproximada de 300 kg/cm<sup>2</sup>. Una bomba de aceite de operación eléctrica controlada por un conmutador de presión, mantiene la presión en el acumulador. La energía del acumulador es aplicada a través de válvulas servo-operadas al sistema de contactos móviles, como respuesta a los comandos de las bobinas de cierre y apertura del interruptor.

- El Mecanismo Neumático.- Utiliza la energía del aire comprimido; que en la mayoría de los casos se utilizan a dos presiones (150/31 kg/cm<sup>2</sup>) y almacena en recipientes, los cuales cuentan con el volumen necesario para efectuar las operaciones exigidas al interruptor al igual que el mecanismo hidráulico, la presión es mantenida a través de un conmutador de presión que controla un motor compresor de operación eléctrica.

- El Mecanismo de Energía Almacenada.- Se utilizan resortes que son tensados o cargados por un motor operado eléctricamente, normalmente los resortes para cierre son cargados por motor y estos durante la operación de cierre transmiten la energía al interruptor y al mismo tiempo son cargados los resortes de disparo. Al finalizar la operación de cierre, el resorte de cierre es automáticamente recargado por el motor. Este mecanismo es el más empleado para los interruptores usados en los sistemas de distribución.

c) Ciclo de Operación.- En interruptores de potencia el ciclo de operación frecuentemente empleado es el siguiente:  
Apertura -0 (segundos) - cierre  
Apertura -15 (segundos) - cierre  
Apertura -15 (segundos) -cierre  
Apertura definitiva.

d) Especificaciones.- Las características nominales principales que se deben tomar en cuenta al especificar un interruptor son las siguientes:

- Tensión nominal
- Nivel de aislamiento nominal
- Frecuencia nominal
- Corriente nominal
  - \* permanente
  - \* interruptiva simétrica
- Tensión transitoria de restablecimiento
- Capacidad interruptiva en oposición de fases
- Corriente de cierre nominal
- Ciclo de operación
- Condiciones ambientales y atmosféricas

##### 4.3.2 Relevador

La protección de sobrecorriente es aquella que opera cuando una cierta cantidad de corriente, mayor que la nominal, fluye por una porción particular del sistema de potencia. EL número ANSI que le corresponde es el 50/51, ver fig.4.1

Clevo ANSI

- 50 - Instantáneo
- 51 - De tiempo
- 52 - Interruptor

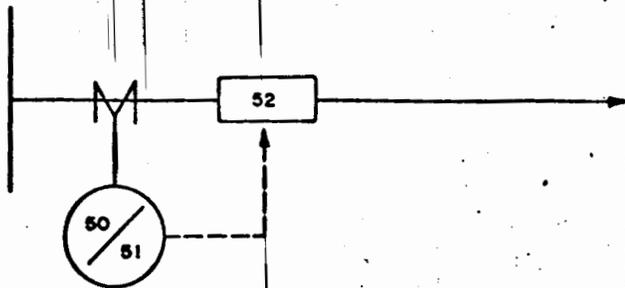


Fig. 4.1 Diagrama de protección de un alimentador.

El tipo de relevador más simple de sobrecorriente usa el principio de atracción electromagnética y es del tipo de solenoide. Los elementos básicos de este tipo de relevador es un solenoide, un núcleo de hierro y un émbolo de acero o armadura, la cual se mueve dentro del solenoide y soporta los contactos. Ver fig. 4.2.

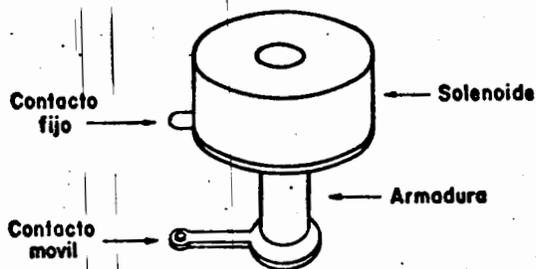


Fig. 4.2 Relevador tipo núcleo.

Otro tipo de relevadores que emplea el principio de atracción electromagnética es el de armadura, tipo bisagra. Ver fig. 4.3.

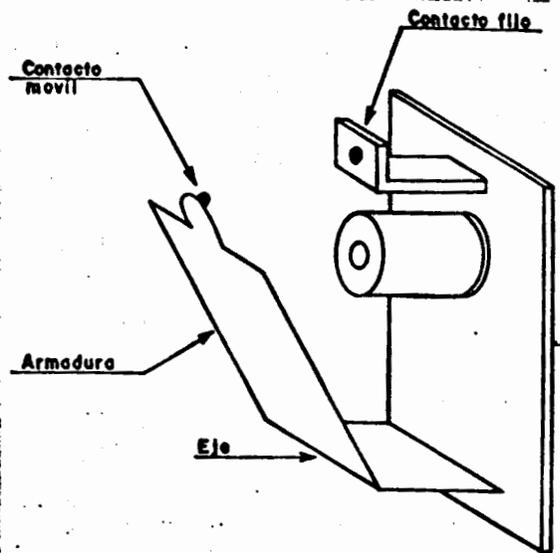


Fig. 4.3 Armadura tipo bisagra

Los relevadores de sobrecorriente también emplean el principio de inducción magnética, siendo el más usado para relevadores de sobrecorriente no direccionales el de armadura tipo disco de inducción de polos sombreados. Ver fig. 4.4.

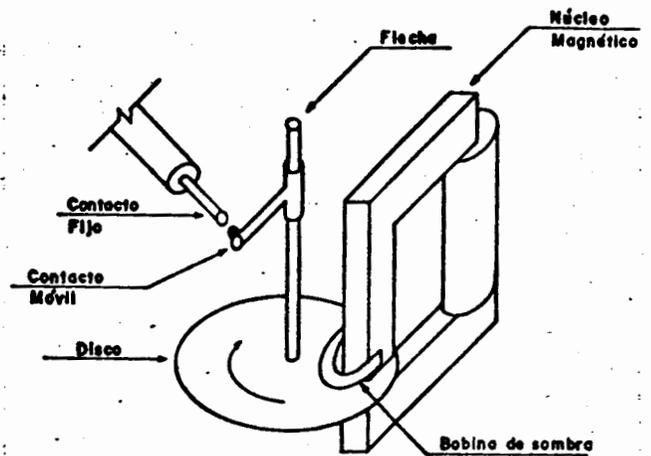


Fig. 4.4 Armadura tipo disco de inducción

Para una característica de sobrecorriente instantánea se usan, ya sea el tipo de émbolo o el de armadura tipo bisagra.

Cuando se desea obtener mayor retardo de tiempo al cerrar los contactos para propósitos de coordinación con otros relevadores de protección, se usa la construcción del tipo de disco de inducción. El tiempo de cierre de los contactos varía inversamente a la corriente. Tales características se representan gráficamente por una familia de curvas corriente-tiempo para variaciones múltiples de corriente de iniciación de operación (corriente de pick-up). Son tres los modelos más comúnmente usados para las características de corriente-tiempo, las cuales difieren en la relación en donde el tiempo de operación del relevador disminuye cuando la corriente aumenta. Estos modelos de curvas, se muestran en la fig. 4.5 y son conocidas como inversa, muy inversa y extremadamente inversa.

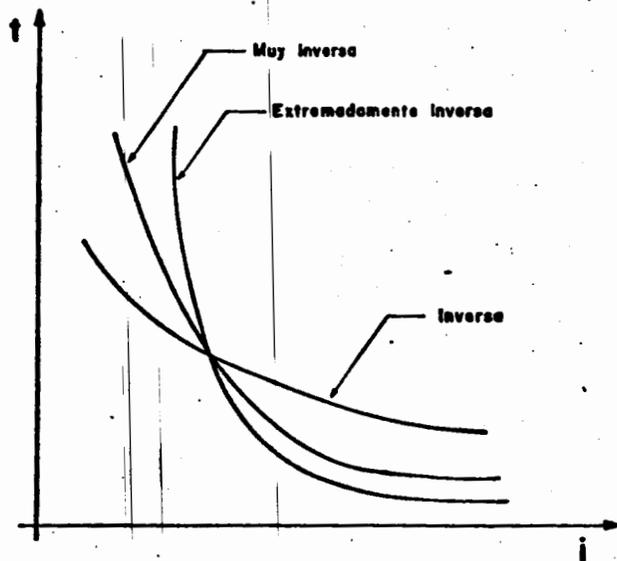


Fig. 4.5 Características de tiempo

**Característica de tiempo inverso.**— En los sistemas eléctricos en donde el valor de la corriente de corto circuito depende en gran parte de la capacidad de generación del sistema en el momento de la falla, se consiguen mejores resultados con relevadores de característica inversa.

**Característica muy inversa.**— En los sistemas eléctricos en donde el valor de la corriente de corto circuito que circula a través de un relevador, depende principalmente de la localización relativa respecto al punto en que se ha producido la falla y muy poco de las características del sistema de generación pudiéndose obtener una protección adecuada con relevadores de tiempo muy inverso.

**Característica extremadamente inversa.**— Esta característica hace a los relevadores particularmente adecuados para la protección en donde existen la necesidad de coordinarse con fusibles.

**Ajuste de un relevador de sobrecorriente.**— Es de vital importancia el tiempo que transcurre desde el momento en que el relevador cierra sus contactos hasta que el circuito controlado ha quedado desenergizado. Este tiempo depende del tamaño del interruptor por abrir, como de su ajuste mecánico.

La mayor parte del tiempo requerido se debe al tiempo necesario para energizar la bobina de disparo y vencer la inercia de las partes móviles del interruptor. En realidad el tiempo siempre se obtiene de las especificaciones del fabricante del interruptor.

Los intervalos de tiempo mínimos entre la actuación de relevadores sucesivos deben ser iguales al tiempo que tarda el interruptor en despejar la falla desde que recibe la señal de actuación del relevador, más el tiempo de sobremarcha o sobrecarrera del relevador y un margen de tiempo que está comprendido entre 0.25 y 0.4 segundos.

**Pasos a seguir en el ajuste de un relevador de sobrecorriente.**

Primero.— Se calcula  $I_{pmin}$  primaria mínima de operación

$$I_{pmin} = \text{Corriente primaria mínima}$$

Segundo.— Se calcula  $I_{secmin}$  secundaria mínima de operación (pick-up)

$$I_{Sain} = \frac{I_{pmin}}{RTC's} \quad \text{RTC's} = \text{Relación de TC's}$$

Esto nos determina la toma (tap) de corriente del relevador

Tercero.— Se calcula la corriente secundaria de cortocircuito

$$I_{SCC} = \frac{ICC}{RTC} \quad \text{ICC} = \text{Corriente primaria de cortocircuito.}$$

Cuarto.— Se calcula el múltiplo de corriente con respecto a la corriente de pick-up

$$I_M = \frac{I_{SCC}}{I_{Smin}} = N \text{ veces la } I \text{ de pick-up}$$

Quinto.— Con el número anterior se entra a la curva y se busca la intersección con el dato de tiempo. Esto nos da el punto de ajuste de tiempo del relevador.

#### 4.3.3 Restaurador

Es un dispositivo automático, diseñado para interrumpir corrientes de falla, el cual tiene la característica de discriminar las fallas instantáneas de las permanentes, a través de aperturas y recierres (normalmente de 3 a 4) quedando la última en estado de apertura definitiva bajo una secuencia predeterminada, sin necesidad de la participación del interruptor principal del alimentador, localizado en la subestación. Este se instala en alimentadores de tipo aéreo y suelen ser monofásicos y trifásicos, de control hidráulico o electrónico y de interrupción en aceite o vacío.

Asimismo, operan con base a la respuesta de dos curvas características de operación corriente-tiempo, de tipo definida o inversa. ver fig. 4.6.

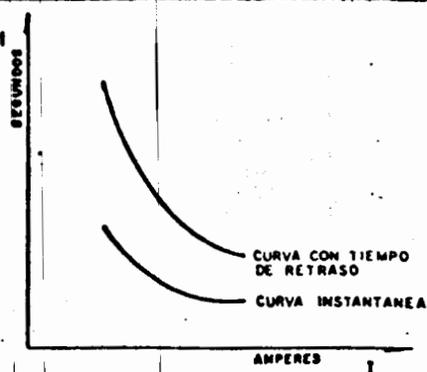


Fig. 4.6 Curvas características de un Restaurador

Con las operaciones rápidas, se busca eliminar las fallas transitorias, protegiendo así a los fusibles instalados del lado de la carga. Con los disparos con retraso de tiempo, se eliminan las fallas permanentes o se da el tiempo necesario para que operen los fusibles conectados en serie.

Las características eléctricas nominales del restaurador son:

- Tensión nominal
- Corriente nominal
- Corriente mínima actuante ( < 80 % del ajuste en el interruptor)
- Capacidad interruptiva
- Nivel básico de impulso
- Frecuencia
- Tiempo de liberación de falla ( tiempo de apertura conforme a las curvas de respuesta corriente-tiempo )
- Tiempo de restablecimiento ( para disponer al equipo hacia una nueva secuencia, al cabo de un recierre satisfactorio )
- Características de respuesta corriente-tiempo

Asimismo, para su aplicación se requiere conocer ciertos valores como : corriente de falla máxima en el punto de instalación y mínima en el punto más alejado a proteger, lapso entre apertura y recierre, cantidad de operaciones hasta alcanzar la condición de "apertura definitiva".

#### 4.3.4 Seccionizador

Es un equipo de seccionamiento automático, que se instala por lo general en los ramales de alimentadores de tipo aéreo, el cual se aplica en combinación con otro dispositivo de respaldo con recierre ( interruptor o restaurador ), ya que no está diseñado para interrumpir corrientes de falla.

5

Cuando se presentan fallas de naturaleza transitoria, el seccionizador registra el número de operaciones apertura-cierre del dispositivo de respaldo y después de un número previamente seleccionado, mientras el dispositivo de respaldo se encuentra abierto, el seccionizador abre sus contactos, aislando la sección del circuito fallado. Si la falla o fallas son transitorias ante las cuales el seccionizador las registra sin llegar a la condición de apertura definitiva, el equipo de control restablece su memoria, "olvidando" el conteo registrado después de transcurrir cierto tiempo.

En general los seccionizadores son del tipo: monofásico y trifásico, de control hidráulico, electrónico o seco. Estos no cuentan con capacidad interruptiva para una corriente de falla, ni curvas características de operación corriente-tiempo, aunque son de capacidad suficiente para cerrar sus contactos con carga. Es susceptible de ser ajustado fijando un valor igual o menor al tiempo de restablecimiento del interruptor o restaurador.

Las características eléctricas nominales son:

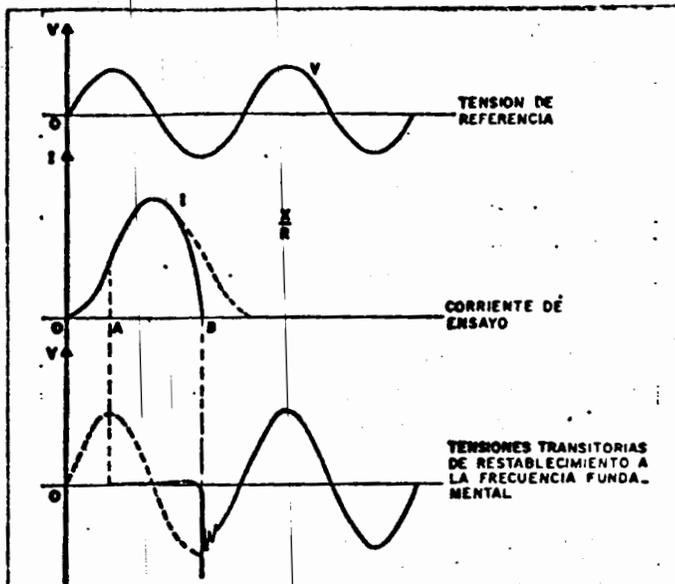
- Tensión nominal
- Corriente mínima actuante ( 160 %  $I_n$  )
- Corriente máxima de trabajo
- Nivel básico de impulso
- Resistencia de aislamiento en seco y húmedo
- Frecuencia

#### 4.3.5 Fusible

Es un elemento eléctrico de protección o seguridad, de operación térmica diseñado para interrumpir un circuito eléctrico, cuando por él circula una sobrecorriente que pueda dañar a los conductores y dispositivos conectados al mismo.

Por su operación, existen en general dos tipos de fusibles de media tensión, conocidos como fusible de expulsión ( F.E. ) y fusible limitador de corriente ( F.L.C. ).

a) Fusible de expulsión.- Está formado por un pequeño eslabón fusible, casi siempre de sección transversal constante ( a excepción de los fusibles de doble elemento o en ocasiones de los llamados fusibles fraccionarios de muy baja corriente nominal), y de longitud muy corta. El material de este elemento puede ser de plata, cobre, plomo, estaño o aleaciones de plata, cobre, níquel-cromo, plomo-estaño, el cual al fundirse por elevación de temperatura como consecuencia de una sobrecorriente, provoca un arqueo, generándose gases des-ionizantes del material vecino ( ácido bórico, melanina, resinas fenólicas, fibra vulcanizada, resinas termoplásticas, tetracloruro de carbono, hexafluoruro de azufre y otras ), provocando gran turbulencia alrededor del arco, de manera que cuando la corriente pasa por un valor natural cero, el canal del arco se reduce al mínimo, quedando interrumpido el flujo de corriente, pudiéndose expulsar los gases hacia el exterior del fusible. Ver fig.4.7 y fig. 4.8.



ANGULO DE CIERRE =  $\alpha$   
 ANGULO DE ARQUEO =  $\alpha_a$  (TIEMPO DE FUSION)  
 TIEMPO DE ARQUEO =  $t_a$   
 TIEMPO DE INTERRUPCION TOTAL =  $t_{ob}$

FIG. 4.7  
 Interrupción de una corriente totalmente asimétrica por un Fusible de expulsión

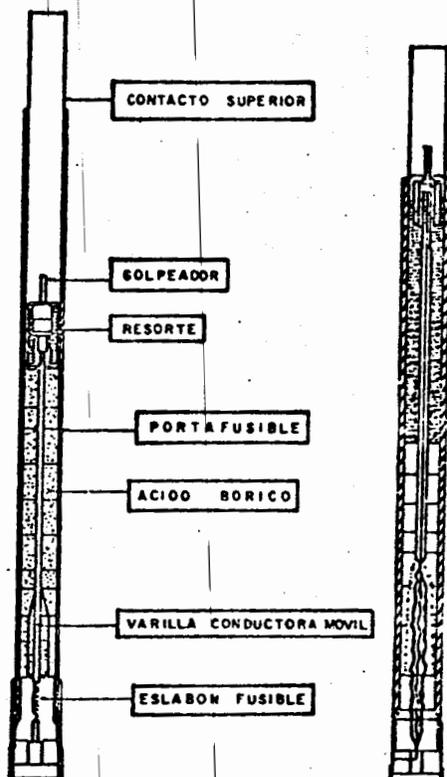


Fig. 4.8 Partes constitutivas del Fusible de expulsión y principio de operación

Por su capacidad interruptiva los fusibles de expulsión se pueden clasificar en fusibles de potencia ( alta capacidad interruptiva ) y fusibles tipo listón para cortacircuito fusible ( baja capacidad interruptiva ), aunque en la actualidad estos últimos los han desarrollado para alta capacidad interruptiva, conocidos como fusibles de listón tipo ablativo.

Las características de respuesta de un fusible están definidas por la curva corriente-tiempo mínimo de fusión ( minimum melting time current ) y curva corriente-tiempo de interrupción total ( total clearing time ), que pueden ser modificadas por efectos del medio ambiente, efecto de la variación transitoria de la onda de corriente, y factores inherentes al diseño.

En general los fusibles de listón más utilizados son los de respuesta rápida ( velocidad tipo K ) y respuesta lenta ( velocidad tipo T ), que se diferencian por sus curvas corriente-tiempo, las cuales, para una misma capacidad son idénticas en los puntos de 300 y 600 segundos, y para altas corrientes el fusible tipo T opera en mayor tiempo.

b) Fusible limitador de corriente.- Se designa al elemento que interrumpe una sobrecorriente, limitando la corriente de falla a valores inferiores que el valor pico que circularía por el circuito si el fusible no se instalara, en un tiempo menor a la duración del primer semiciclo de la onda de corriente de falla. El valor pico depende de la relación  $X/R$  del circuito y a medida que se reduce dicha relación de energía específica  $I^2t$ , que debe contemplar el fusible, también se reduce. Ver fig.4.9 y fig.4.10.

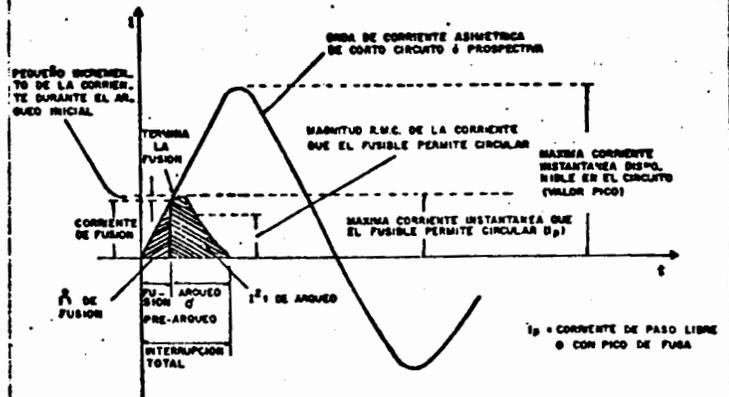


FIG. 4.9  
 Representación gráfica del concepto de limitación de corriente

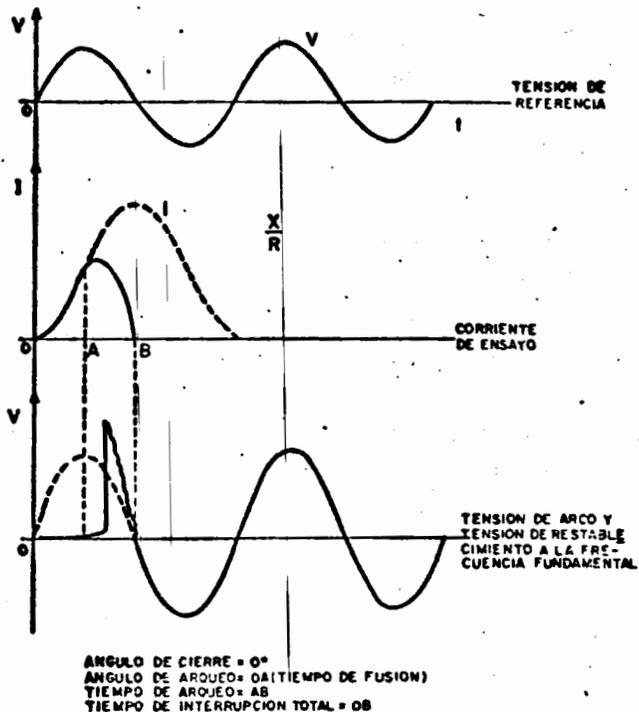


Fig. 4.10 Interrupción de una corriente totalmente asimétrica por un fusible limitador de corriente

El fusible está integrado por uno o más alambres de sección transversal circular constante o cintas metálicas ( plata, cobre o aleaciones ) perforadas o con determinada configuración, conectadas en paralelo entre sí, arrolladas en forma helicoidal sobre un núcleo de cerámica de alta pureza.

En fusibles modernos se usan núcleos de mica, y en desarrollos mas recientes ya no se utilizan los núcleos interiores, con objeto de absorber mas fácilmente la energía disipada. Todos estos van dentro de un tubo de cerámica de alta pureza o de fibra de vidrio, que contiene en su interior material de relleno formada por arena de cuarzo, cuya finalidad es la extinguir el arco eléctrico interno, absorbiendo la mayor parte de la energía  $I^2t$  generada, formándose las fulguritas. Ver fig. 4.11.

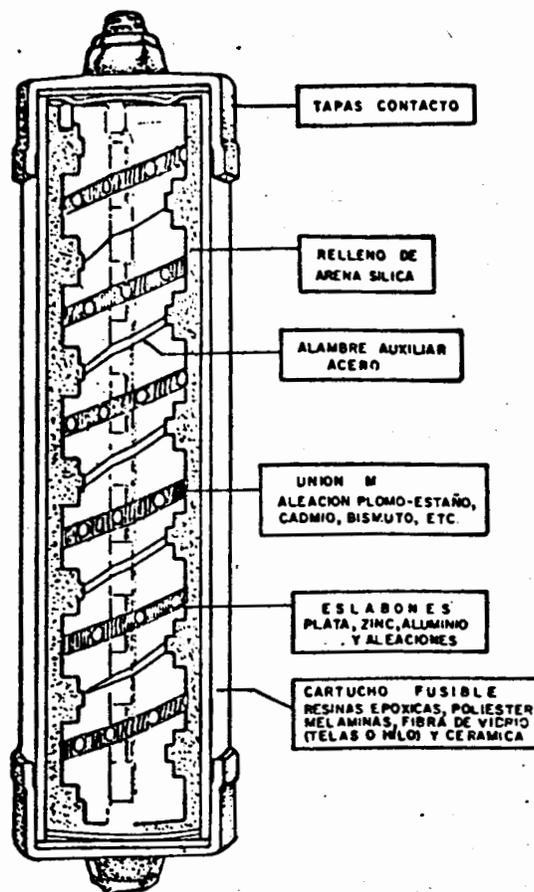


Fig. 4.11 Partes constitutivas de un Fusible limitador de corriente

Existen basicamente tres tipos de fusibles limitadores de corriente en función del tipo de diseño:

-Fusible de respaldo o rango parcial ( back-up )

Este fusible se conoce como de primera generación y es aquel que puede interrumpir cualquier corriente desde su valor máximo hasta su corriente mínima de ruptura ( diseñado para tiempos cortos ). Por tal motivo para obtener una protección completa, se tiene que combinar con una protección en serie que proteja contra sobrecorrientes de pequeña magnitud como sobrecargas. Ver fig. 4.12.

-Fusible de aplicación general ( general purpose )

De acuerdo a la norma ANSI C37.40, este fusible puede interrumpir satisfactoriamente cualquier corriente, desde su máxima nominal, hasta una corriente que funda el elemento en una hora ( 3600 segundos ). Ver fig.4.12.

**-Fusible de rango completo (full range)**

Este tipo de fusible, no está considerado en ninguna norma actualmente, pero se ha definido como aquel fusible capaz de interrumpir satisfactoriamente bajo condiciones específicas de uso y comportamiento todas las corrientes que causan la fusión del elemento sensible a la corriente. Los tiempos máximos de fusión que se tienen para este fusible son hasta de ocho horas. Ver fig.4.12.

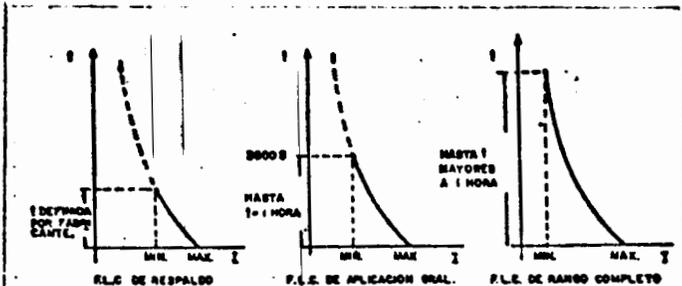
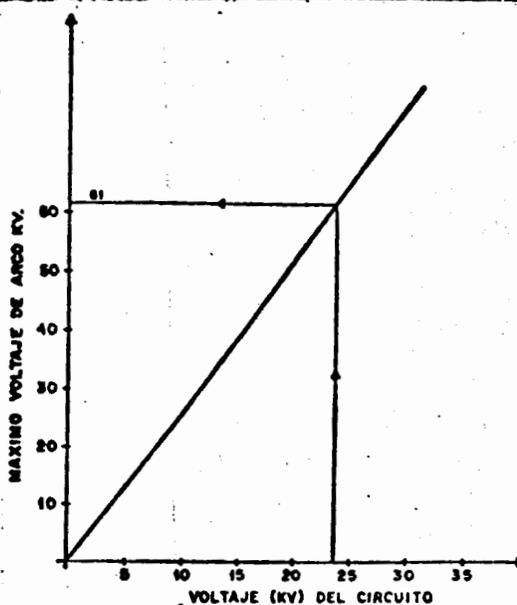


Fig. 4.12 Tipos de Fusibles limitadores de corriente

**Consideraciones de sobretensión.**— Cuando un fusible limitador de corriente opera, siempre genera una tensión de arqueo. Esta sobretensión depende tanto del tiempo o instante de iniciación de la falla sobre la onda de tensión del sistema, como del tipo de diseño del fusible. Cuando se instala un fusible limitador de corriente, debe tomarse siempre en consideración esta sobretensión, pues existe el peligro de que sean dañados los apartarrayos con su operación. Dado el diseño especial que tienen los fusibles limitadores de corriente la sobretensión que se genera con su operación depende principalmente de la tensión del sistema.

En la mayoría de los casos la coordinación se cumple, sin embargo, es necesario comprobar siempre esta condición. Para tal efecto se realiza lo siguiente:

De la fig. 4.13 se elige sobre el eje de las abscisas la tensión del sistema ( fase-neutro en sistemas Y aterrizados, fase-fase en otros sistemas ). Se extiende una línea vertical con el valor anterior hasta intersectar la recta diagonal, continuando la línea en forma horizontal hacia la izquierda hasta encontrar el eje de las ordenadas, obteniéndose el valor de voltaje de arco máximo o sobretensión máxima que tendrá que soportar el sistema. Se compara el valor de voltaje obtenido con los niveles de chispeo de los apartarrayos escogidos para la protección contra sobretensiones del transformador, de tal forma que para existir una buena coordinación fusible-apartarrayos, la tensión de arco máxima producida por el fusible limitador de corriente siempre debe ser menor que la mínima tensión de chispeo del apartarrayos.



1: EL MAXIMO VOLTAJE DE ARCO PRODUCIDO POR EL FLC NX DE 25 KV. SERA 61KV.  
 2: LA MINIMA TENSION DE CHISPEO DE UN APARTARRAYOS (SIEMENS) ES DE 46 KV (RMC) A 60 HZ.  
 Vmax. ARCO FLC <V CHISPEO APARTARRAYOS  
 81 KV <math>\sqrt{2}</math> 46 KV  
 61 KV <math>< 65.02</math> KV

Fig. 4.13 Máximo voltaje de arco para FLC NX—Compañón 12

Las características eléctricas que definen a un fusible son:

- Tensión nominal
- Corriente nominal
- Capacidad interruptiva ( simétrica y asimétrica )
- Nivel básico de impulso
- Respuesta de operación ( curva I-t )
- Velocidad de respuesta ( en el tipo expulsión )
- Frecuencia
- Servicio ( interior o intemperie )

Asimismo, los factores que definen la aplicación de un fusible, además de las características anteriores son:

- Corriente de corto circuito en el punto de instalación
- Relación X/R en la impedancia equivalente ( Ze )
- Curva de daño de los elementos a proteger (conductores, transformadores, etc.)
- Curva de energización del transformador ( inrush y carga fría )
- Costo

Con la relación X/R se determina el valor de asimetría correspondiente. Ver fig.4.14

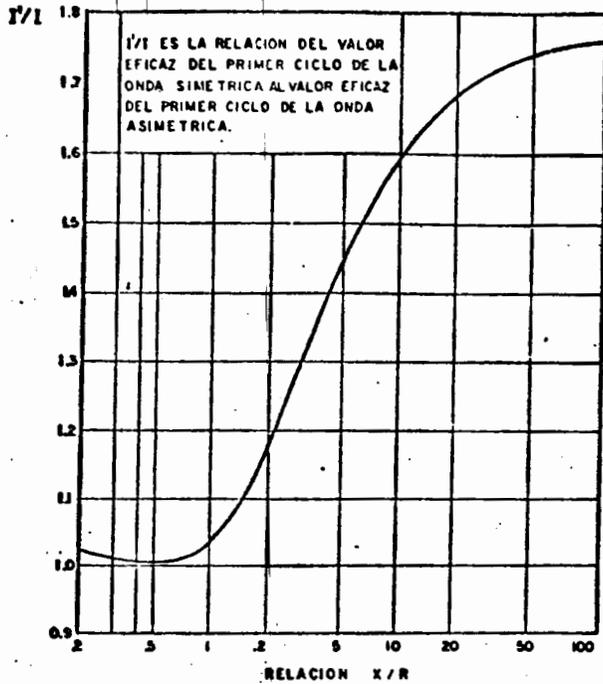


Fig. 4.14 Relación X/R vs relación I'/I

Entrando a la curva con el valor X/R de la falla correspondiente, se determina la constante de asimetría que al multiplicar por el valor de corriente simétrica, se obtiene el valor eficaz de la corriente asimétrica.

#### 4.3.6 Interruptor de transferencia

El interruptor de transferencia automática de carga, ha sido diseñado para operar principalmente en servicios de media tensión, que requieren una continuidad en el servicio de energía eléctrica, debido a su proceso de operación o importancia. Existen en la actualidad varios tipos de interruptores de transferencia; sin embargo se mencionan los más utilizados en la ciudad de México.

a) Interruptor de transferencia automática de doble tiro.- Este dispositivo está constituido por un interruptor trifásico de doble tiro autocontenido en un medio aislante que puede ser: en pequeño o gran volumen de aceite, en aire o gas SF-6, accionado por un control automático, para transferir carga del alimentador preferente al alimentador emergente en caso de ausencia de potencial del primero y el retorno del alimentador emergente al preferente cuando éste haya restablecido sus condiciones. Esta función puede efectuarse manualmente bloqueando al control automático. Ver fig.4.15.

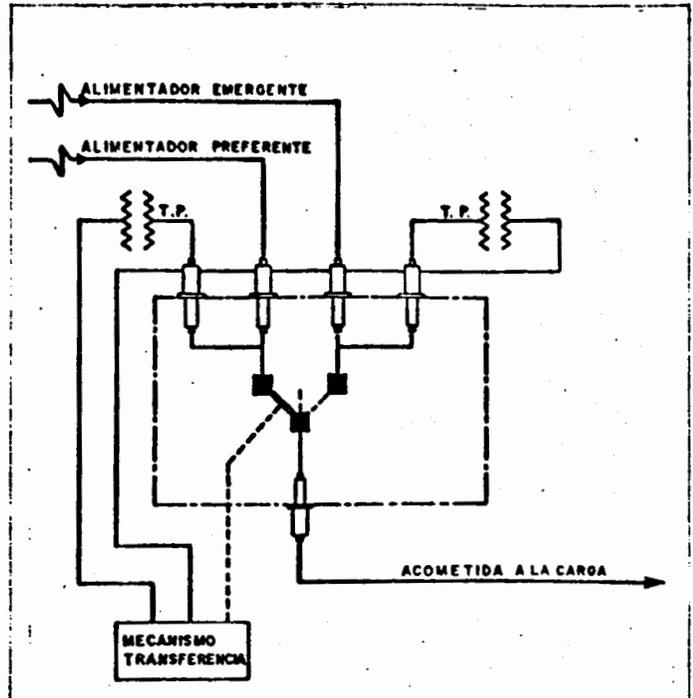


Fig. 4.15 Interruptor de transferencia automático de doble tiro

b) Interruptor de transferencia automática en gabinete.- Este es un equipo está constituido por dos juegos de interruptores monofásicos en pequeño volumen de aceite o vacío, un interruptor en aire, un juego de fusibles, cuchillas de puesta a tierra y equipo de control automático, contenidos dentro de un gabinete metálico. Ver fig.4.16.

#### CLAVE

- ① GABINETE
- ② INTERRUPTORES
- ③ FUSIBLES
- ④ CUCHILLAS DE PUESTA A TIERRA

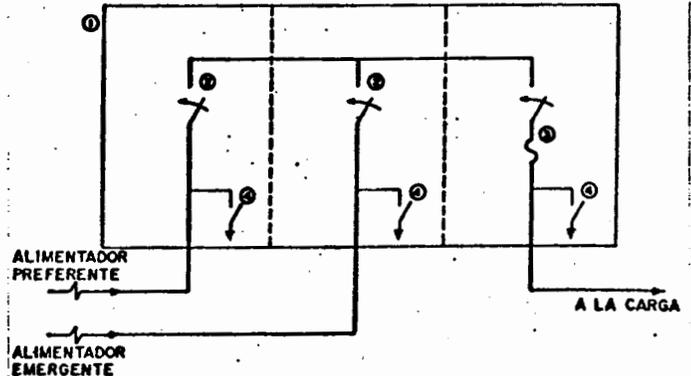


Fig. 4.16 Interruptor de transferencia automática en gabinete

Las características eléctricas son las siguientes:

- Tensión nominal
- Tensión máxima de diseño
- Corriente nominal
- Corriente de interrupción con carga
- Capacidad interruptiva
- Frecuencia
- Tensión de prueba en seco
- Tensión de prueba en húmedo
- Nivel básico de aislamiento
- Tipo de servicio

#### 4.4 ARREGLOS EN LA SUBESTACION Y ALIMENTADORES DE DISTRIBUCION

##### 4.4.1 Arreglos en la subestación

La selección del diagrama de conexiones o diagrama unifilar de una subestación depende de las características específicas de cada sistema eléctrico y de la función que realiza dicha subestación en el sistema.

Los criterios que pueden utilizarse para hacer la selección del diagram unifilar más adecuado, son los siguientes:

- Continuidad de servicio
- Flexibilidad de operación
- Facilidad para dar mantenimiento al equipo
- Cantidad de equipo eléctrico necesario

Los diagramas unilaterales de las subestaciones de distribución más empleados en el sector eléctrico son:

- a) Un juego de barras ( fig.4.17 )
- b) Un juego de barras con cuchilla de by-pass ( fig.4.18 )
- c) Juego de barras principales y auxiliares con interruptor comodín ( fig.4.19 )
- d) Anillo sencillo ( fig.4.20 )
- e) Anillo doble ( fig.4.21 )
- f) Doble barra, doble interruptor ( fig.4.22 )

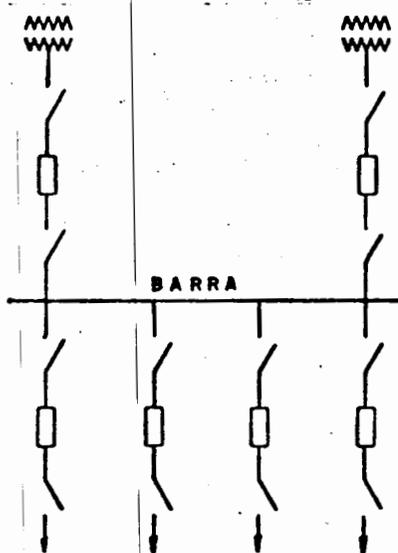


Fig 4.17 Un solo juego de barras

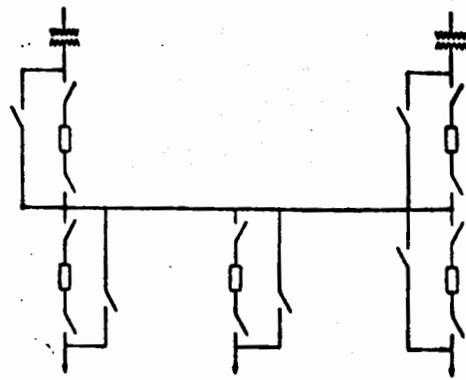


Fig. 4.18 Un juego de barras con cuchilla de BY-PASS

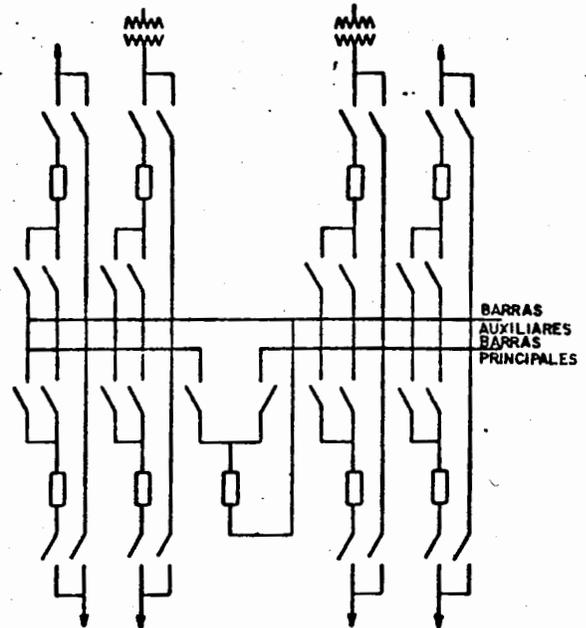


Fig.4.19 Juego de barras principales y auxiliares con interruptor comodín

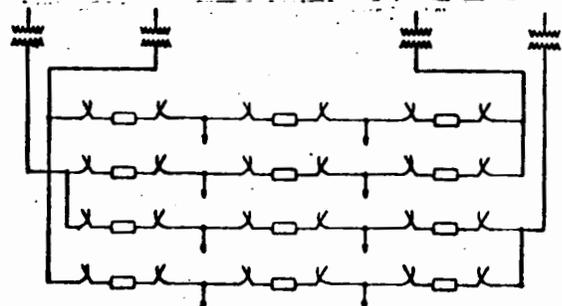


Fig. 4.20 Anillo sencillo

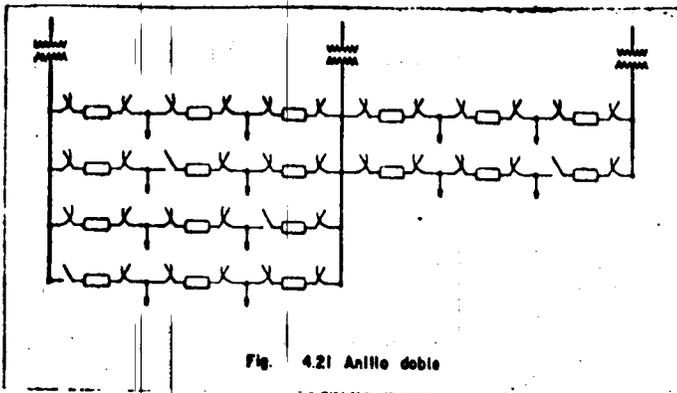


Fig. 4.21 Anillo doble

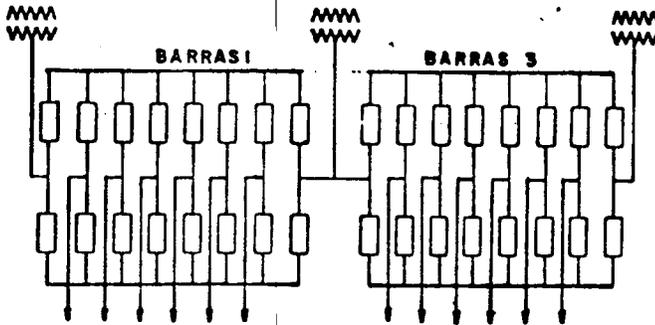


Fig. 4.22 Doble barra doble Interruptor

**4.4.2 Arreglos de los alimentadores de distribución**

En el sistema de distribución la energía es suministrada desde la subestación de potencia hasta el usuario a través de circuitos conocidos como alimentadores, que pueden ser de tipo aéreo, subterráneo o mixto, los cuales presentan configuraciones que permiten hacer movimientos de carga, trabajos de ampliación y en general funciones de operación que incrementen la continuidad del servicio.

Las redes primarias por el número de hilos se pueden clasificar en:

- a) Trifásico de tres hilos
- b) Trifásico de cuatro hilos
- c) Monofásico de tres hilos
- d) Monofásico de dos hilos
- e) Monofásico de un hilo

Las redes primarias trifásicas se utilizan en zonas urbanas, donde el sistema de tres hilos requiere una menor inversión inicial del alimentador con respecto a la de cuatro hilos; sin embargo, debido a que el primero tiene un coeficiente de aterrizamiento de 1.0 que es mayor que el especificado para cuatro hilos ( 0.75 ), se obliga a que los equipos instalados en estos sistemas sean de niveles de aislamiento mayores, con un costo más alto.

Una característica adicional de este sistema, es que los transformadores de distribución conectados a estas líneas son de neutro flotante en el lado primario; siendo la detección de fallas de fase a tierra más difícil que el sistema de cuatro hilos, ya que al ser mayor la impedancia de secuencia cero de las líneas, las corrientes de falla son menores.

El sistema de cuatro hilos se caracteriza por la conexión de transformadores trifásicos con neutro aterrizado en el devanado primario y conexión de transformadores monofásicos cuya tensión primaria es la de fase a neutro.

Las redes primarias monofásicas se utilizan en zonas rurales o de baja densidad de carga, debido a su bajo costo.

La red primaria monofásica de dos hilos se origina en una red trifásica, de hecho son derivaciones de líneas trifásicas de tres hilos, donde los transformadores monofásicos son conectados entre fases en el lado primario.

La red monofásica de un hilo o retorno por tierra ( sistema Swer ) ha probado ser una solución adecuada para electrificación de pequeñas cargas o poblados alejados de los alimentadores triásicos.

Los alimentadores de media tensión tipo aéreo, subterráneo o mixto, por lo general operan en forma radial cuya configuración se muestra a continuación:

a) Alimentador tipo aéreo o mixto.- El esquema de protección mas común de un alimentador tipo aéreo, está formado por un interruptor automático con elemento de recierre, localizado en la subestación de potencia, el cual está coordinado con otros elementos de protección en cascada como restauradores y fusibles. Asimismo se intercalan medios de seccionamiento como seccionalizadores y cuchillas para abrir con o sin carga, donde las características y uso particular de cada elemento depende del número de consumidores, tipo e importancia de las cargas, continuidad del servicio y costo. Ver fig.4.23.

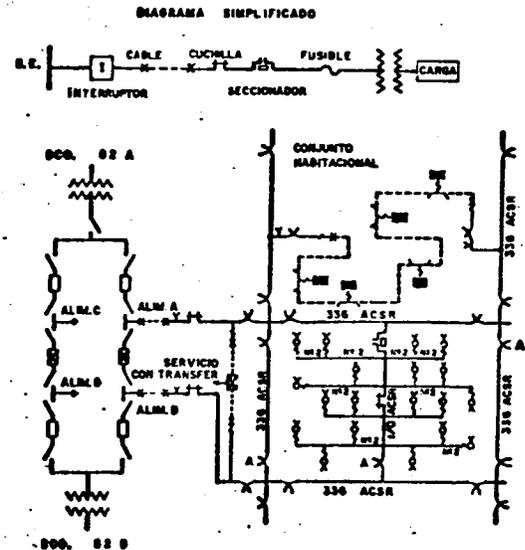


Fig. 4.23

Esquema de protección de un alimentador tipo aéreo de 23 KV

La sensibilidad de las interrupciones de servicio dependerá de los elementos de protección instalados, ya que a través de los elementos de recierre nos permiten discriminar las fallas instantáneas de las permanentes, ajustándolas de acuerdo a las necesidades. Dichos intervalos de tiempo entre apertura y cierre son de la magnitud suficiente para que una falla instantánea se autoextinga, permaneciendo el alimentador en servicio después de uno a tres operaciones de recierre; la cuarta apertura es definitiva por tratarse de una falla permanente, donde necesariamente se requiere la intervención del personal de mantenimiento para la restitución del servicio.

**b) Alimentador tipo subterráneo.** - El alimentador subterráneo más sencillo es el radial en derivación simple debido a su bajo costo y simplicidad, estando formado por un interruptor principal localizado en la subestación de potencia, y se desarrolla con cable troncal y cables en derivación en forma transversal, en los cuales se intercalan equipos de seccionamiento con o sin carga, hasta llegar a la carga; la cual está protegida por un interruptor con fusibles que son coordinados con el interruptor principal sin recierre. Ver fig. 4.24.

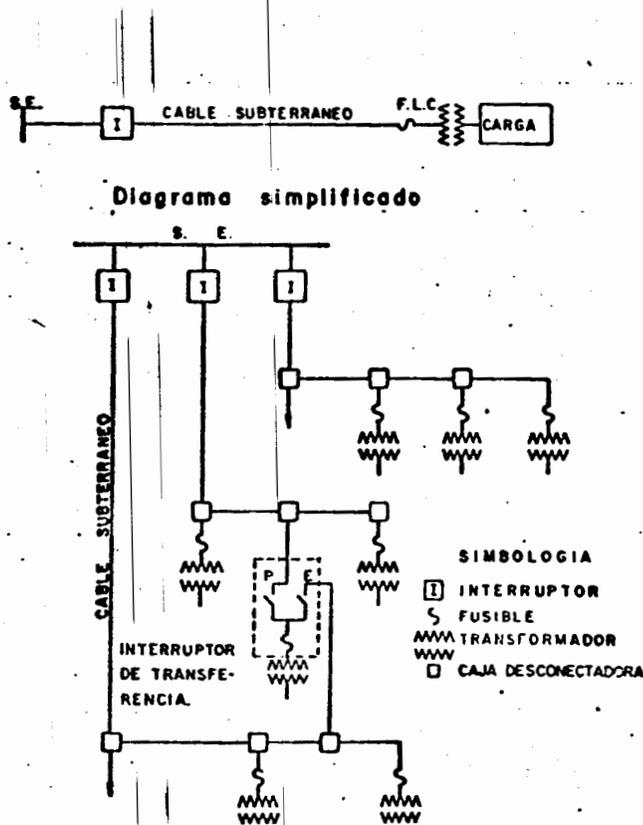


Fig. 4.24 Esquema de protección de un alimentador subterráneo

## 4.5 ESQUEMAS DE PROTECCION

### 4.5.1 Filosofía de la protección

Debido a la diversidad de las causas de falla que afectan a un sistema de distribución, no se pueden prescindir de una adecuada protección. De donde la aplicación y la coordinación selectiva de equipos de protección, requiere conocer la magnitud de la sobrecorriente en los puntos donde se aplican, dependiendo del tipo de falla que se presente y naturaleza de la carga. Por tal motivo la protección contra sobrecorriente se considera un "arte" que presenta aspectos de: seguridad, sensibilidad y selectividad.

**Seguridad.** - Esta se logra cuando el equipo de protección no efectue operaciones falsas que abran el circuito por corrientes de energización ( inrush, y carga fría ), condiciones transitorias o de estado estable no peligrosas para el sistema y sus equipos.

**Sensibilidad.** - El equipo de protección debe ser lo suficientemente capaz para detectar las fallas, dependiendo de su ubicación en el sistema.

**Selectividad.** - Se obtiene cuando el equipo está coordinado adecuadamente, con el objeto de que sólo opere el equipo de protección más cercano a la falla, quedando el inmediato anterior como dispositivo de respaldo.

Con lo anterior, se logra la función de la protección que es:

- Aislar las fallas del resto del circuito
- Reducir el número de fallas permanentes
- Incrementar la continuidad del circuito
- Reducir el tiempo para localizar las fallas
- Prevenir daños al equipo
- Reducir la probabilidad de falla disruptiva
- Reducir al máximo las situaciones peligrosas para el público en general

### 4.5.2 Selección

Para una adecuada selección del equipo, es necesario tomar en cuenta varios factores característicos del sistema a proteger, que son los siguientes:

- Tensión del sistema
- Corriente nominal de la carga
- Corriente mínima de operación en el punto de ubicación del equipo de protección

-Tipo de conexión del sistema

-Nivel de corto circuito en el punto a proteger

-Distancia y calibres de conductores a lo largo del circuito que se desea proteger

-Curvas características de operación corriente-tiempo y secuencia seleccionada en los equipos de protección

-Capacidad de los equipos de protección

-Márgenes de crecimiento de capacidad de las instalaciones en el futuro

-Costo

#### 4.5.3 Coordinación de protecciones

En la medida que crecen y se desarrollan los sistemas de distribución, aumenta la importancia de proveer de una buena protección eléctrica al equipo para dar seguridad a las personas que los operan, así como al usuario.

Una apropiada coordinación, implica una secuencia de operación adecuada de los dispositivos de protección instalados en cascada, ya que de lo contrario puede ocurrir una operación simultánea innecesaria.

Para la instalación correcta del equipo de protección, debe tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

Primero.- El dispositivo de protección más cercano a la falla ( dispositivo protector ), debe eliminarla antes de que el dispositivo de protección inmediato anterior de respaldo ( dispositivo protegido ) opere y abra el circuito. Ver fig.4.25.

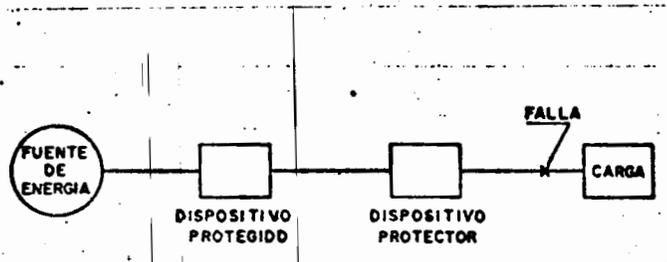


Fig. 4.25 Coordinación de los dispositivos de protección

Segundo.- Las fallas deben ser restringidas y aisladas de tal forma que afecten en el menor grado al resto del circuito.

Existen diferentes esquemas de protección, que se aplican en función de la importancia del suministro de energía, siendo los más comunes los siguientes:

#### a) Coordinación Interruptor-Restaurador

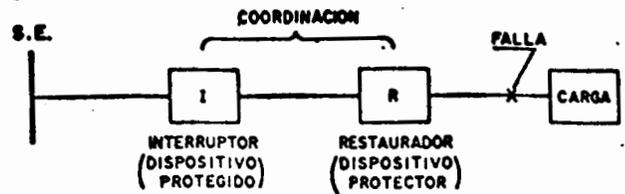


Fig. 4.26 Coordinación Interruptor-Restaurador

Una adecuada coordinación entre estos dos dispositivos, es cuando el restaurador opera con una falla en el lado de la carga, impidiendo que opere el interruptor a través del relevador de tiempo, es decir que la curva característica del restaurador no se cruce con la del relevador, dejando un tiempo mínimo de 0.3 segundos, eliminando asimismo el último recierre del restaurador. Ver fig.4.26. y fig 4.27.

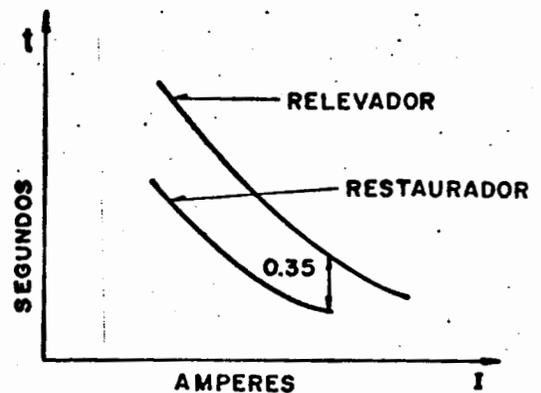


Fig. 4.27 Coordinación interruptor-restaurador

#### b) Coordinación Interruptor-Fusible

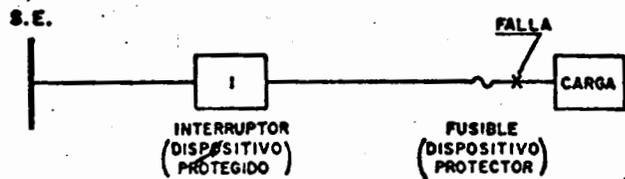


Fig. 4.28 Coordinación Interruptor-Fusible

Para esta coordinación, el fusible tiene la función de operar para una falla que se presente en el lado de la carga, impidiendo que opere el interruptor ( relevador de tiempo ), a menos que este último cuente con un relevador instantáneo que operará de inmediato y en caso de persistir la falla operará el fusible después de realizarse el recierre, quedando como respaldo nuevamente el interruptor, recomendándose un tiempo mínimo de 0.3 segundos entre la curva I-t de interrupción total del fusible y la curva I-t del relevador de tiempo del interruptor. Ver fig.4.28 y fig.4.29.

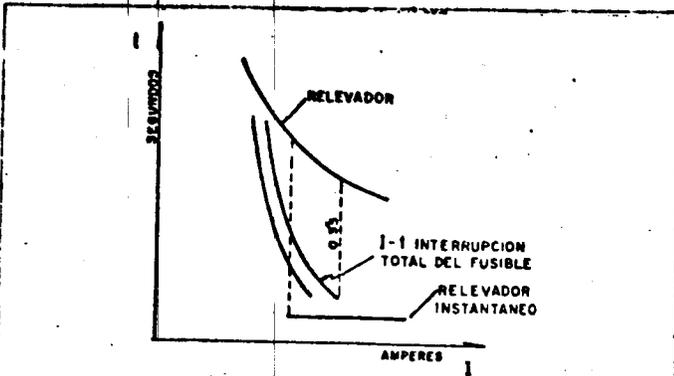


Fig. 4.29 Coordinación Interruptor-Fusible

c) Coordinación Restaurador-Restaurador

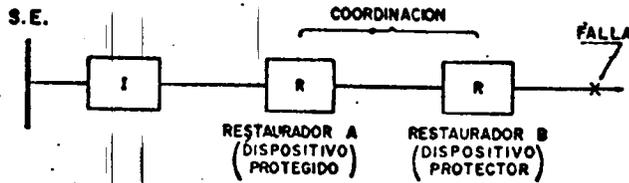


Fig. 4.30 Coordinación Restaurador-Restaurador

Debido a que los restauradores están diseñados para operar con una secuencia de hasta cuatro disparos y tres recierres con el objeto de eliminar una falla; de donde para una adecuada coordinación debe existir un retraso en la operación del restaurador A de por lo menos 12 ciclos ( para frecuencias de 60 Hz ), ya que un rango menor a éste hasta 2 ciclos pueden operar simultáneamente y menor a 2 ciclos ambos siempre operaran. Ver fig.4.30.

d) Coordinación Restaurador-Seccionador

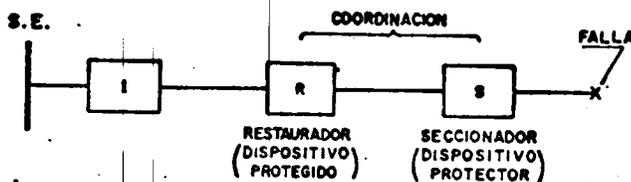


Fig. 4.31 Coordinación Restaurador-Seccionador

Siendo el seccionador un dispositivo automático de seccionamiento que no cuenta con curvas de operación I-t, y que simplemente sensa una corriente mínima actuante del 160 % de la capacidad nominal de su bobina, registrando las operaciones del dispositivo de respaldo ( restaurador o interruptor ), efectuando a su vez un conteo en caso de persistir la falla hasta llegar a una cantidad preseleccionada en que abre sus contactos, requiriéndose para una adecuada coordinación ajustarlo a un recierre menos que el dispositivo de respaldo. Ver fig.4.31.

e) Coordinación Restaurador-Fusible

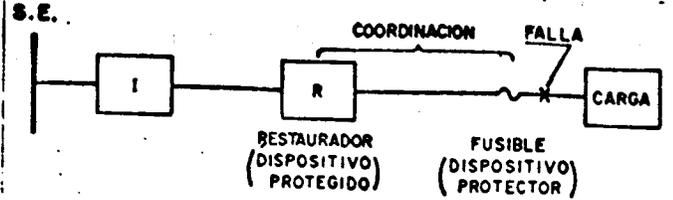


Fig. 4.32 Coordinación Restaurador-Fusible

En esta coordinación se busca que las operaciones rápidas del restaurador no provoquen daño a los fusible, incluyendo el efecto acumulativo de las operaciones rápidas considerando los intervalos de recierre. Asimismo los operaciones lentas del restaurador se deben retardar lo suficiente para asegurar la operación del fusible antes de la apertura definitiva del restaurador. Ver fig.4.32

La curva de interrupción total del fusible se utiliza para establecer el límite inferior de la coordinación de la curva de retraso de tiempo del restaurador ( punto a ). Ver fig.4.33.

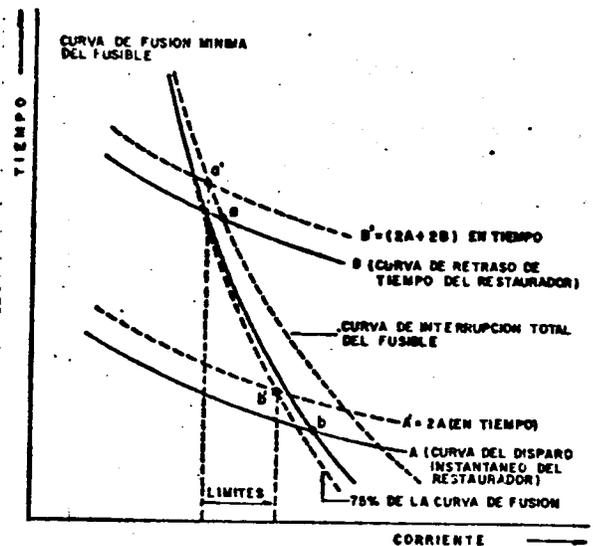


Fig. 4.33 Coordinación Restaurador-Fusible

La curva mínima de fusión se utiliza para establecer el límite superior de la coordinación con la curva de disparo instantáneo del restaurador ( punto b ). Sin embargo es necesario modificar las curvas del restaurador y fusible, para considerar los efectos de los ciclos de calentamiento-enfriamiento por la secuencia de operación del restaurador. Por lo anterior la curva A' es la suma de las dos aperturas instantáneas A, la cual se compara con la curva de fusión del fusible, que previamente se ha desplazado al 75 % en función del tiempo de fusión, encontrándose el nuevo límite superior de coordinación ( punto b' ).

La curva B' es la suma de las dos aperturas instantáneas y las dos de retraso de tiempo, que representan la cantidad total de calor aplicado al fusible, que al compararse con la curva de interrupción total del fusible se obtiene el límite inferior de coordinación ( punto a' ).

f) Coordinación Fusible-Fusible

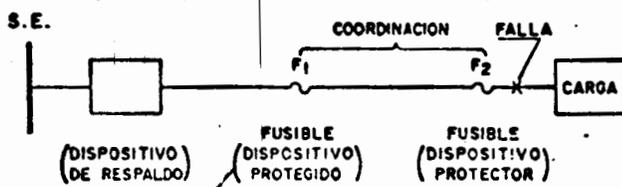


Fig. 4.34 Coordinación Fusible-Fusible

Para lograr una coordinación entre fusibles, se utilizan generalmente las curvas corriente-tiempo mínimo de fusión y las curvas corriente-tiempo de interrupción total de cada fusible empleado ( F1 y F2 ), de tal forma que para una falla en el lado de la carga debe operar el fusible ( F2 ), antes que se presente algún daño en el fusible protegido ( F1 ), el cual debe operar únicamente como respaldo para la misma falla o para alguna otra que se presente entre los dos fusibles en serie. Ver fig.4.34.

Debido a que en general se tienen dos tipos de fusibles en media tensión, se pueden hacer las combinaciones de coordinación siguientes: F.E.-F.E., F.L.C.-F.L.C., F.E.-F.L.C. y F.L.C.-F.E..

f.1) Fusible de expulsión ( F2 ) que protege a un fusible de expulsión ( F1 ).- La coordinación de los fusibles de expulsión se logra comparando la curva I-t de interrupción total del fusible protector ( F2 ), con la curva I-t mínima de fusión del fusible protegido ( F1 ), la cual previamente debe haberse reducido un 75 % en valores de tiempo, para asegurar la no operación o daño por efectos de precalentamiento debido a la carga y a la temperatura ambiente.

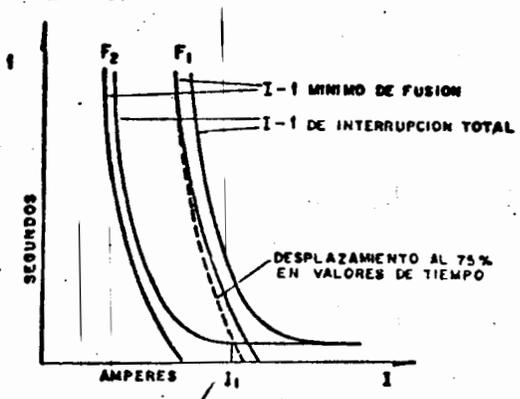


Fig. 4.35 Coordinación entre F.E. y F.E.

De la fig.4.35 se observa que I<sub>1</sub> es el valor máximo de corriente con el cual el fusible F2 protege al fusible F1, ya que en ese punto se cruzan las curvas.

f.2) Fusible limitador de corriente ( F2 ) que protege a un fusible limitador de corriente ( F1 ).- Para este tipo de coordinación además de cumplir con el requisito del caso anterior se requiere verificar, comparando que la energía I<sup>2</sup>t de interrupción F2, sea menor que la energía I<sup>2</sup>t mínima de fusión del fusible protegido F1; de esta forma se mantiene una coordinación apropiada para todas las corrientes de fallas. Ver fig.4.36 y fig.4.37.

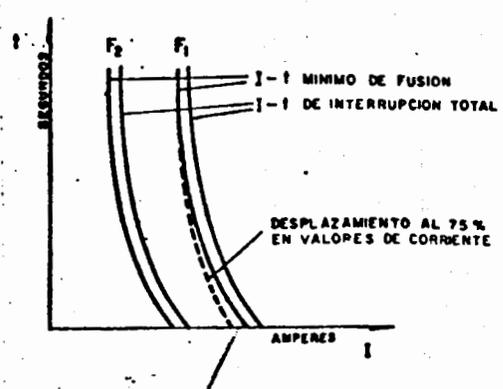
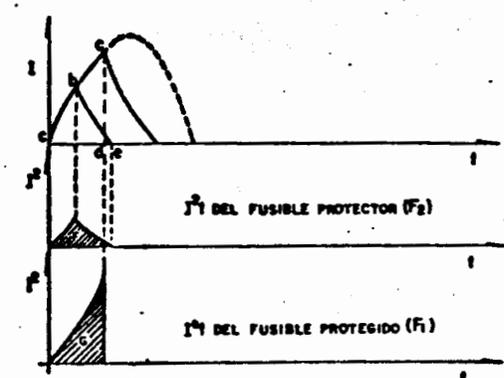
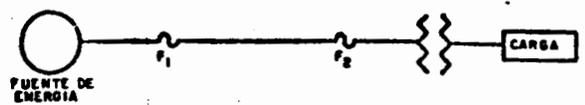


Fig. 4.36 Coordinación entre F.L.C. y F.L.C.



AREA DE F < AREA DE G ⇒ COORDINACION ADECUADA

Fig. 4.37 Coordinación entre Fusibles limitadores

f.3) Fusible de expulsión ( F2 ) que protege a un fusible limitador de corriente ( F1 ).- Un fusible de expulsión no puede interrumpir totalmente la corriente antes de 0.8 ciclos, de donde su coordinación sólo es posible para tiempos mayores que 0.0133 segundos, estando limitada como consecuencia a bajas corrientes de falla, hasta el punto I<sub>1</sub>. Ver fig.4.38.

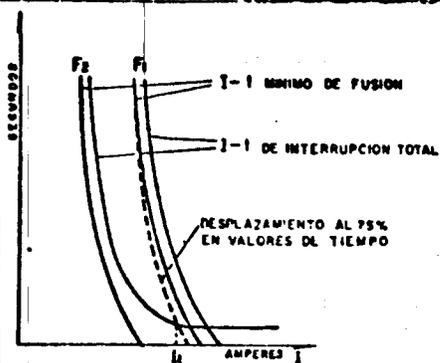


Fig. 4.38 Coordinación entre F.E. y F.L.C.

En este caso se compara la curva de interrupción total del fusible de expulsión (F2) con la curva mínima de fusión del fusible limitador de corriente (F1) previamente desplazada un 75% en valores de tiempo, para determinar el punto de coordinación.

f.4) Fusible limitador de corriente (F2) que protege a un fusible de expulsión (F1).- En este caso la coordinación se define con el mismo criterio establecido en la coordinación F.L.C.-F.L.C., debiéndose verificar que:

La energía  $I^2t$  de interrupción total del F.L.C. (F2)



La energía  $I^2t$  mínima de fusión del F.E. (F1)

Ver fig.4.39.

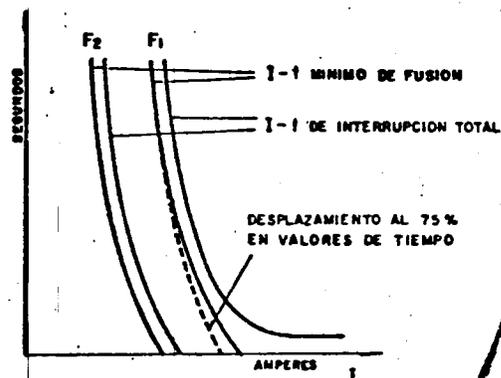


Fig. 4.39 Coordinación entre F.L.C. y F.E.

g) Fusible de A.T.-Interruptor termomagnético de B.T.- Este esquema se utiliza para la protección integral de transformadores, instalando en el primario fusibles tipo expulsión, limitadores de corriente o una combinación de estos y en el secundario un interruptor termomagnético de baja tensión (o fusibles renovables como sustituto). Ver fig.4.40.

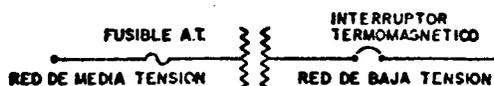


Fig. 4.40 Coordinación Fusible A.T.- Interruptor termomagnético

Dicho esquema aunque representa una mayor inversión, se obtienen mejores condiciones de protección en la red de baja tensión, ya que fácilmente se pueden detectar fallas secundarias (trifásicas, bifásicas, monofásicas) y sobrecargas reales.

Para obtener una adecuada coordinación, es necesario conocer las características del transformador a proteger como son: potencia, tensión, e intensidad de corriente en el primario y secundario, % de impedancia, tipo de conexión, número de fases así como otras consideraciones importantes como son las curvas de daño de conductores y transformadores, curva de corriente transitoria de energización (inrush y carga fría).

Las curvas de daño de los equipos y materiales son proporcionadas generalmente por los fabricantes; sin embargo, para el caso del transformador se puede aplicar el criterio establecido en la "Guía de duración de corrientes de transformadores" (P784/D4 de la norma ANSI C57.12.00 para transformadores autoenfriados en aceite de 1 a 500 kVA), que es la siguiente tabla 4.1.

TIPO DE DAÑO	Nº DE VECES LA CORRIENTE NOMINAL	TIEMPO EN SEGUNDOS
TÉRMICO	2	2000
	3	300
	4	100
	8	30
	6	25
	7	25
	8	20
	9	15
	10	12.5
	15	5.8
MECÁNICO	20	3.3
	25	2.0
	30	1.5
	40	0.8
	50	0.5

Tabla 4.1 Valores I-t para definir la curva de daño en transformadores hasta 500 kVA

Con referencia a la curva de corriente transitoria de energización inrush, se origina debido a la energización del transformador y cuando por alguna razón se abate momentáneamente la tensión en el lado de la fuente, cuya magnitud depende del flujo residual en el núcleo del transformador y el punto sobre la onda de tensión cuando ocurre la energización. Asimismo la corriente transitoria de carga fría se produce debido a la energización súbita del transformador con cierto tipo de carga, el cual experimentó previamente una interrupción.

El criterio que se utiliza en general es el indicado en la tabla 4.2.

CORRIENTE TRANSITORIA	Nº DE VECES LA CORRIENTE NOMINAL	TIEMPO EN SEGUNDOS
INRUSH	25	0.01
	12	0.10
CARGA FRIA	6	1.00
	3	10.00

Tabla 4.2 Valores I-t para definir la curva de energización

Grificando los valores de las dos tablas anteriores se obtiene la fig.4.41.

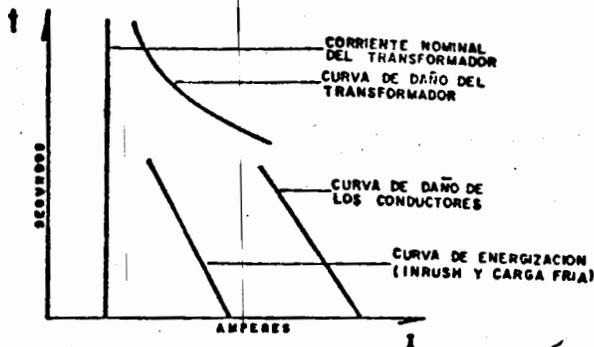


Fig. 4.41 Valores de I-T característicos de un transformador

Para seleccionar la capacidad de fusible del lado primario del transformador se debe tener cuidado de escoger las curvas I-t tales que se localicen entre la curva de energización y la curva de daño del transformador.

Asimismo, el interruptor termomagnético se debe seleccionar de acuerdo con la capacidad de corriente en el lado secundario del transformador y criterio de sobrecarga establecido, de tal forma que para lograr la coordinación deben referirse todos los valores de corriente al lado primario, vigilando que sean cubiertos todos los puntos de la curva de daño del transformador. Ver fig.4.42.

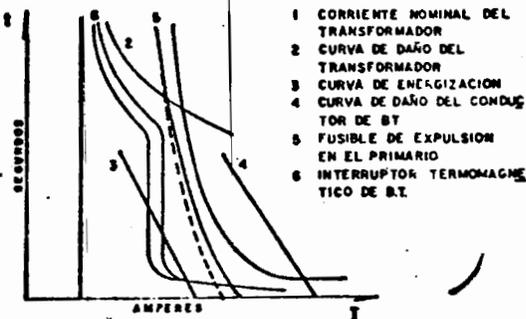


Fig. 4.42 Coordinación de protección del Transformador de distribución

En la actualidad este esquema de protección se está experimentando en la Compañía de Luz y Fuerza del Centro ( en liquidación ) a través de un Programa Piloto, con objeto de disminuir el índice de fallas en transformadores de la red aérea, originados por sobrecargas y fallas en la red de baja tensión.

Aunque en este momento el restablecimiento del interruptor es de tipo manual, se espera que en un futuro inmediato a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas se incorpore al esquema un dispositivo de recierre automático ( Prosec ), a efecto de discriminar las fallas instantáneas de baja tensión y en caso de persistir la falla, quede abierto en forma permanente.

**Ejemplo de aplicación.**- Debido a que en México actualmente la energía eléctrica se distribuye en mayor grado a través de redes de tipo aéreo, se presenta un ejemplo de coordinación para este caso.

El alimentador considerado es de tipo aéreo, radial, de 12 MVA, 23 kV, desarrollándose la troncal con conductor 336 ACSR, subtroncal de 1/0 ACSR y ramal No. 2 ACSR, que alimenta varios transformadores de diferentes capacidades conectados en forma radial; sin embargo se analiza la coordinación para un sólo transformador de 75 kVA, el cual está protegido contra sobrecorrientes en el lado primario por medio de un juego de fusibles de potencia, tipo expulsión ( dispositivo protector ), de capacidad interruptiva superior a la disponible en el punto de instalación y como respaldo se tiene un interruptor de potencia ( dispositivo protegido ), localizado en el interior de la subestación. Asimismo, se protege el lado secundario del transformador por medio de un interruptor termomagnético, como se indica en la fig.4.43.

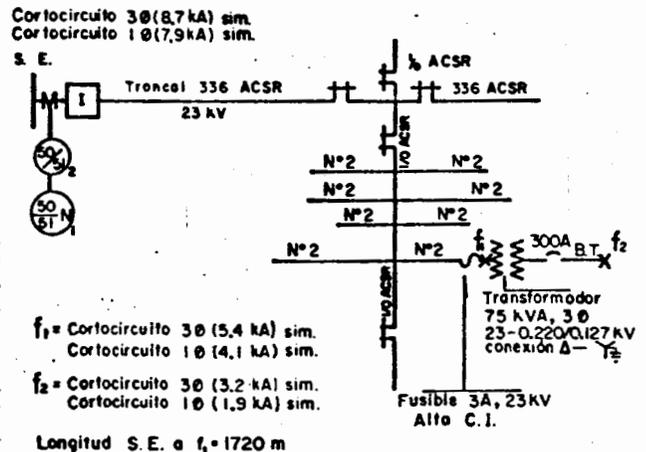


Fig. 4.43 Diagrama unifilar de alimentación de un transformador tipo aéreo.

**Características nominales del equipo material eléctrico**

- a) Interruptor de potencia  
 Relevador de tiempo inverso  
 Modelo 12IAC52B805 ( fase )  
 Unidad de tiempo 2-16 A  
 Unidad instantánea 20-160 A  
 Modelo 12IAC52B806 ( tierra )  
 Unidad de tiempo 0.5-4 A  
 Unidad instantánea 10-80 A
- b) Transformador  
 Capacidad 75 kVA  
 Fases 3  
 Conexión Delta-Estrella aterrizada  
 Tensión 23-0.220/0.127 kV  
 Corriente 1.88-196.8 A  
 Impedancia 2.3 %
- c) Fusibles de potencia  
 Tipo Expulsión  
 Tensión 23 kV  
 Corriente ( de acuerdo al criterio de sobrecarga )  
 Capacidad interruptiva 20 kA asim.  
 Velocidad 12.5 kA sim.  
 Servicio K ( rápida )  
 Intemperie

- d) Interruptor termomagnético  
 Capacidad ( de acuerdo al criterio de sobrecarga )  
 Tensión 600 V  
 No. de polos 3  
 Capacidad interruptiva 42 kA simétricos  
 Marco tipo LB

- e) Conductores ACSR  
 Calibre 336 MCM  
 Capacidad 470 A  
 Resistencia a 65°C 0.198 ohm/km
- Calibre 1/0 AWG  
 Capacidad 220 A  
 Resistencia a 65°C 0.696 ohm/km
- Calibre 2 AWG  
 Capacidad 160 A  
 Resistencia a 65°C 1.07 ohm/km

De acuerdo al criterio definido en la tabla 4.1 se determina los valores de la curva de daño del transformador de 75 kVA, como se indica:

TIPO DE DAÑO	TIEMPO EN SEGUNDOS	VALOR LIMITE DE CORRIENTE DE DAÑO
TERMICO	2000	2 In = 3.76 A
	300	3 In = 5.64 A
	100	4 In = 7.52 A
	50	5 In = 9.40 A
	35	6 In = 11.28 A
	25	7 In = 13.16 A
	20	8 In = 15.04 A
	15	9 In = 16.92 A
	12.5	10 In = 18.80 A
	5.8	15 In = 28.20 A
	3.3	20 In = 37.60 A
	2	25 In = 47.00 A
MECANICO	1.8	30 In = 56.40 A
	0.8	40 In = 75.20 A
	0.5	50 In = 94.00 A

Tabla 4.3 Valores I-t para definir la curva de daño de un transformador de 75 kVA

Asimismo, utilizando el criterio establecido en la tabla 4.2, se determina la curva transitoria de energización siguiente:

ENERGIZACION	TIEMPO EN SEGUNDOS	CORRIENTE DE ENERGIZACION
INFUSH	0.01	25 In = 47.00 A
	0.10	12 In = 22.96 A
CARGA FRIA	1.80	6 In = 11.28 A
	10.00	3 In = 5.64 A

Tabla 4.4 Valores I-t para definir la curva de energización de un transformador de 75 kVA

A continuación se grafican en una hoja de papel log-log los valores de corriente anteriores, escogiendo de la familia de curvas I-t ( mínima de fusión y de interrupción total ) proporcionada por el fabricante, la capacidad del fusible de A.T., así como la capacidad del interruptor termomagnético en función de la corriente del lado secundario y de acuerdo al criterio establecido en el inciso 4.5.3, subinciso g), cuidando además que las curvas de daño de los conductores se localicen del lado derecho de las curvas I-t mencionadas. Posteriormente se procede a definir la coordinación entre el fusible instalado en el lado primario del transformador y el interruptor de potencia, conociendo las curvas características de los relevadores proporcionadas por el fabricante y aplicando el criterio establecido en el inciso 4.5.3, subinciso b). Ver fig.4.44.

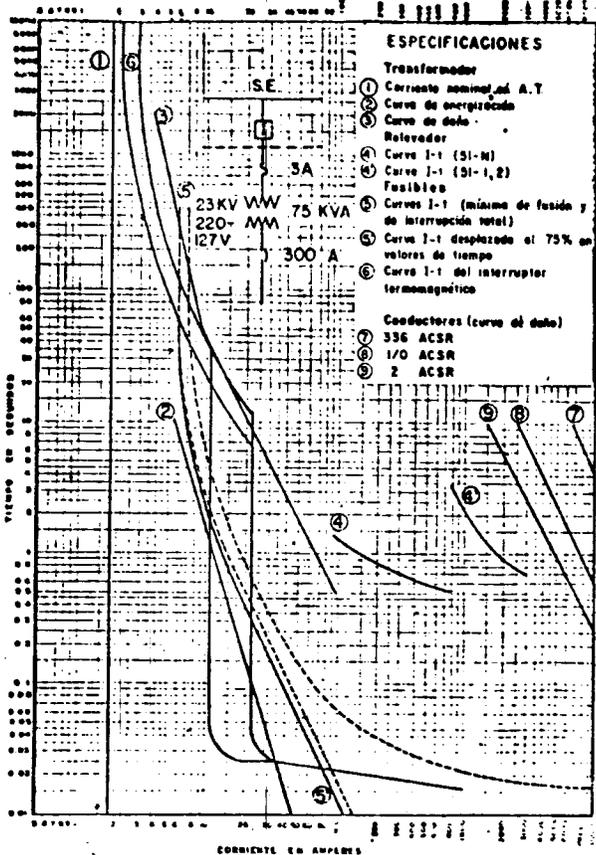


Fig. 4.44 Coordinación de protección del transformador de distribución de 75 kVA, 23-0.220/0.127 kV, - tipo aéreo.

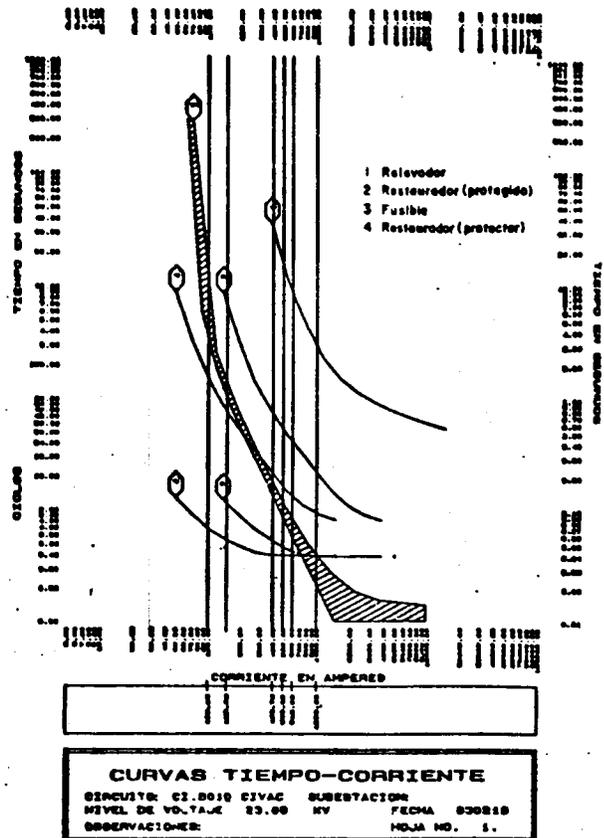


Fig. 4.45 Coordinación de protecciones por computadora

Coordinación de protecciones asistida por computadora digital.- La naturaleza repetitiva de los estudios de coordinación de protecciones las hace marcadamente adaptables para implementarse en computadora. Además, la programación que soporta a los nuevos sistemas de cómputo facilita su implementación, por ejemplo, sistemas gráficos, manipuladores de base de datos y compiladores de programación avanzada entre otros.

Las ventajas que ofrece un programa de cómputo digital que sustituya el procedimiento manual son evidentes; rapidez, precisión, posibilidad de análisis de diversas alternativas y la disponibilidad inmediata de la información de la red y del equipo de protección instalado así como del resto existente en el mercado.

La fig. 4.45 es una muestra del resultado gráfico del estudio por computadora de un típico circuito de distribución radial. En ella se muestra la curva de un relevador, dos restauradores y un fusible.

**REFERENCIAS**

- [1] IEEE Tutorial Course, "Application and coordination of Reclosers, Sectionalizers and Fuses". 80 EH0157-8-PWR, U.S.A., 1980.
- [2] Takach, D.S. "Distribution Transformer Primary Fuse Coordination" 1982 IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.7, July 1982. pp 2278-2285.
- [3] Mc Graw-Edison Power Systems Division, "Distribution Systems Protection Manual", U.S.A.
- [4] Cia. de Luz y Fza del Centro, "Manual de diseño de subestaciones, tomo I, México, D.F.
- [6] Avila, R.A.; Juárez, T.A.; Espinosa, L.R.; "Aplicación de interruptores termomagnéticos en la protección del lado de baja tensión en transformadores de distribución tipo poste". México, Guadaluajara Jal., México, Octubre, 1986.
- [7] Juárez, T.A.; Gómez, V.F.; "Estudio de coordinación de protección contra sobrecorrientes en transformadores de distribución aérea". C.L.F.C., Estudios de redes, Gerencia de Distribución y Transmisión, México, D.F., Mayo 1986.

[8] C.F.E., Subdirección de Operación, Gerencia de Distribución; "Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución". Libro 42 de ediciones de C.F.E. México, D.F. 1984.

[9] Vazquez, H.; "Generalidades de la protección contra sobrecorrientes en sistemas de distribución". C.L.F.C., Estudios y Mecanización, Gerencia de Distribución y Transmisión, México, D.F., Septiembre, 1986.

[10] Compañía de Luz y Fuerza del Centro (en liquidación), Superintendencia de Estudios y Normalización; "Cálculo de cortocircuito". Parte 3., México, D.F. 1984

[11] Avila, R.A.; "Protección de circuitos eléctricos de baja tensión". Mercury Electric Products, S.A., México, D.F., 1977.

6

# PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES POR MEDIO DE FUSIBLES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

ING. ALFREDO JUAREZ TORRES    ING. FERNANDO GOMEZ V.

## INTRODUCCION

Un sistema de distribución debe estar diseñado para entregar energía a los puntos en que se va a utilizar, sin interrupciones ni restricciones y a un costo razonable. Para lograrlo, no se deben perder de vista las necesidades operacionales normales, y además se debe tomar una cantidad razonable de provisiones para proteger al sistema y al suministro contra fallas y condiciones anormales.

Un detalle aparentemente pequeño pero de gran importancia es el hecho de que la amenaza más grande al suministro de energía la constituye la falla de corto circuito, pues su incidencia implica un cambio violento en la operación del sistema debido a que la energía que previamente se estuviese entregando a la carga, se irá ahora hacia la falla.

Esta liberación incontrolada de energía puede ser destructiva, causando fuego y daños estructurales no sólo en el lugar original de la falla, sino también en otros puntos del sistema por los que circule energía hacia la falla. Sin embargo, el aislamiento de la falla por los equipos desconectores más cercanos a ella, limitará el daño en el punto de falla e impedirá que la misma y sus efectos se propaguen al resto del sistema; y es precisamente el equipo de protección quien tendrá la decisión de iniciar la apertura del equipo desconector primario.

"Equipo de protección" es un término que agrupa a todo el equipo necesario para detectar, localizar e iniciar el aislamiento de una falla o condición anormal.

## 1 TIPOS Y CAUSAS DE FALLAS

Las fallas en los sistemas de distribución, se pueden clasificar por su duración en dos grandes grupos que son:

- Fallas transitorias o instantáneas.
- Fallas permanentes.

En el sistema aéreo, las fallas transitorias (consideradas menores a cinco minutos) se presentan en un rango de 75 a 95 % y están relacionadas de algún modo con las condiciones climatológicas existentes, pudiendo ser en algunos casos autoeliminadas o ser eliminadas mediante dispositivos de interrupción instantánea (interruptor, equipo de recierre automático, etc.) generalmente en 1, 2 ó 3 intentos y en un tiempo menor a 45 segundos, siendo las causas más comunes las siguientes:

- Contacto instantáneo entre conductores desnudos, debido generalmente a la acción del viento
- Contacto de objetos extraños al sistema (ramas de árboles, objetos colgantes, aves que disminuyan la distancia de aislamiento, etc.)
- Flameo de aisladores
- Falsos contactos
- Arqueos por contaminación ambiental
- Sobrecorrientes instantáneas

Se ha demostrado de acuerdo a estadísticas, que en el primer recierre se elimina hasta el 88 % de las fallas, en el segundo hasta un 5 % y en el último un 2 % adicional. A su vez las fallas permanentes se presentan en un 5 %, y son aquellas que persisten sin importar con que rapidez se abra el circuito, siendo las más comunes las siguientes:

- Contacto sólido entre conductores o de conductor(es) a tierra (corto circuito 3fases, 2fases, 1fase)
- Vandalismo (daño al equipo)
- Sobrecargas permanentes
- Degradación de aislamiento
- Falla de equipo
- Fraude
- Conexiones erróneas
- Mano de obra deficiente

En el sistema subterráneo, las fallas que se presentan son de tipo permanente, cuya interrupción es de duración prolongada, siendo las causas más frecuentes las siguientes:

- Envejecimiento del aislamiento, debido a sobrecargas o cortos circuitos
- Esfuerzos eléctricos por sobretensiones, debido a voltajes transitorios
- Pérdida de aislamiento debida a la humedad, arborescencias, reducción por roedores, piquete mecánico en cables, mal manejo de equipo
- Mano de obra deficiente
- Falla de equipo

## 2 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS FUSIBLES EN MEDIA TENSION

### 2.1 Fusible

Es un elemento eléctrico de protección o seguridad, de operación térmica diseñado para interrumpir un circuito eléctrico, cuando por él circula una sobrecorriente que pueda dañar a los conductores y dispositivos conectados al mismo.

Por su operación, existen en general dos tipos de fusibles de media tensión, conocidos como fusible de expulsión ( F.E. ) y fusible limitador de corriente ( F.L.C. ).

a) Fusible de expulsión.- Está formado por un pequeño eslabón fusible, casi siempre de sección transversal constante ( a excepción de los fusibles de doble elemento o en ocasiones de los llamados fusibles fraccionarios de muy baja corriente nominal), y de longitud muy corta. El material de este elemento puede ser de plata, cobre, plomo, estaño o aleaciones de plata, cobre, níquel-cromo, plomo-estaño, el cual al fundirse por elevación de temperatura como consecuencia de una sobrecorriente, provoca un arco, generándose gases des-ionizantes del material vecino ( ácido bórico, melanina, resinas fenólicas, fibra vulcanizada, resinas termoplásticas, tetracloruro de carbono, hexafloruro de azufre y otras ), provocando gran turbulencia alrededor del arco, de manera que cuando la corriente pasa por un valor natural cero, el canal del arco se reduce al mínimo, quedando interrumpido el flujo de corriente, pudiéndose expulsar los gases hacia el exterior del fusible. Ver fig.1 y fig. 2.

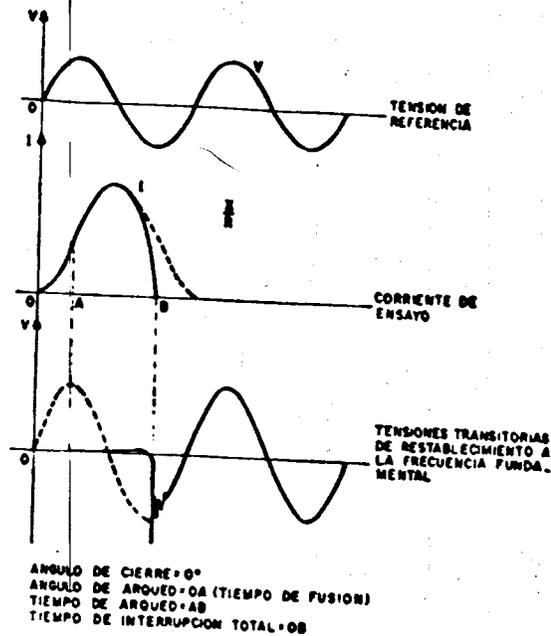


Fig. 1  
 INTERRUPTIÓN DE UNA CORRIENTE TOTALMENTE ASIMÉTRICA POR UN FUSIBLE DE EXPULSIÓN

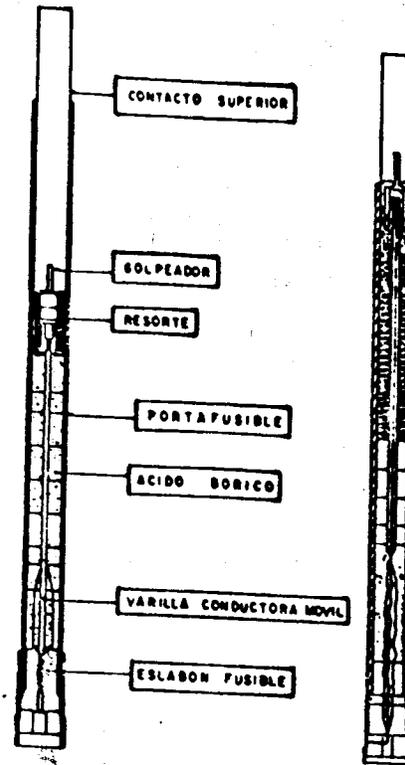


Fig. 2 PARTES CONSTITUTIVAS DEL FUSIBLE DE EXPULSIÓN Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

Por su capacidad interruptiva los fusibles de expulsión se pueden clasificar en fusibles de potencia ( alta capacidad interruptiva ) y fusibles tipo listón para cortacircuito fusible ( baja capacidad interruptiva ), aunque en la actualidad estos últimos los han desarrollado para alta capacidad interruptiva, conocidos como fusibles de listón tipo ablativo.

Las características de respuesta de un fusible están definidas por la curva corriente-tiempo mínimo de fusión ( minimum melting time current ) y curva corriente-tiempo de interrupción total ( total clearing time ), que pueden ser modificadas por efectos del medio ambiente, efecto de la variación transitoria de la onda de corriente, y factores inherentes al diseño. Ver fig. 3.

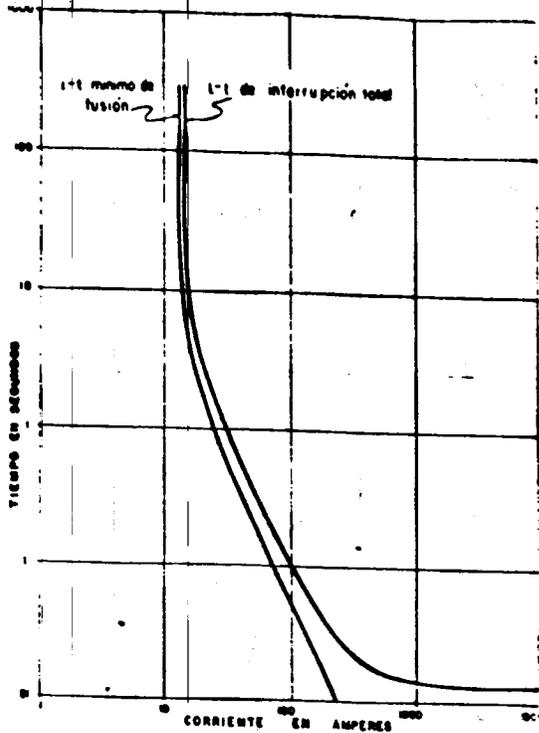


Fig 3 Curvas características Corriente - Tiempo de operación de un fusible tipo expulsión.

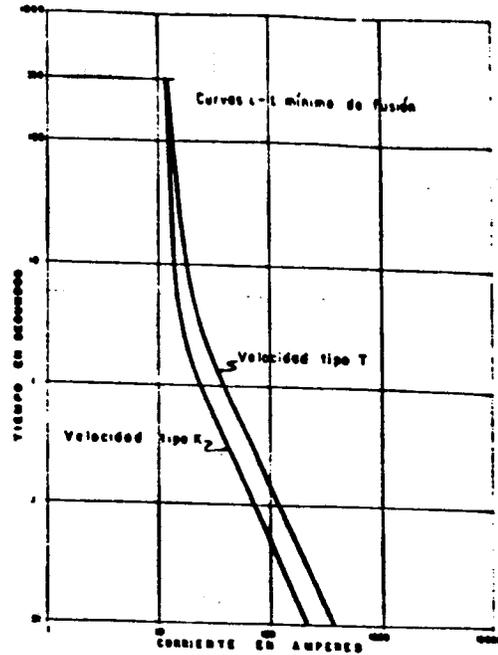


Fig 5 Fusibles tipo eslabón de una misma corriente nominal y diferente velocidad de respuesta.

En general los fusibles de eslabón más utilizados son los de respuesta rápida ( velocidad tipo K ) y respuesta lenta ( velocidad tipo T ), que se diferencian por sus curvas corriente-tiempo, las cuales, para una misma capacidad son idénticas en los puntos de 300 y 600 segundos, y para altas corrientes el fusible tipo T opera en mayor tiempo. Ver fig.4 y fig.5.

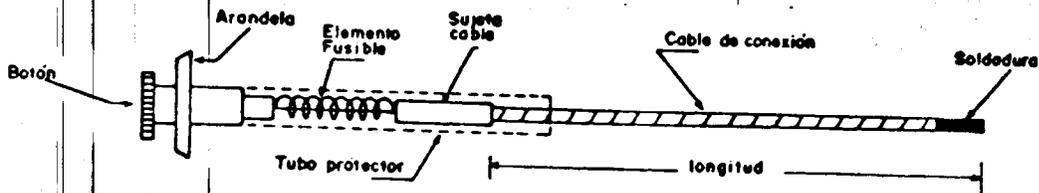


FIG. 4 Fusible de eslabón, tipo universal

b) **Fusible limitador de corriente.** - Se designa al elemento que interrumpe una sobrecorriente, limitando la corriente de falla a valores inferiores que el valor pico que circularía por el circuito si el fusible no se instalara, en un tiempo menor a la duración del primer semiciclo de la onda de corriente de falla. El valor pico depende de la relación X/R del circuito y a medida que se reduce dicha relación de energía específica  $I^2t$ , que debe contemplar el fusible, también se reduce. Ver fig.6 y fig.7.

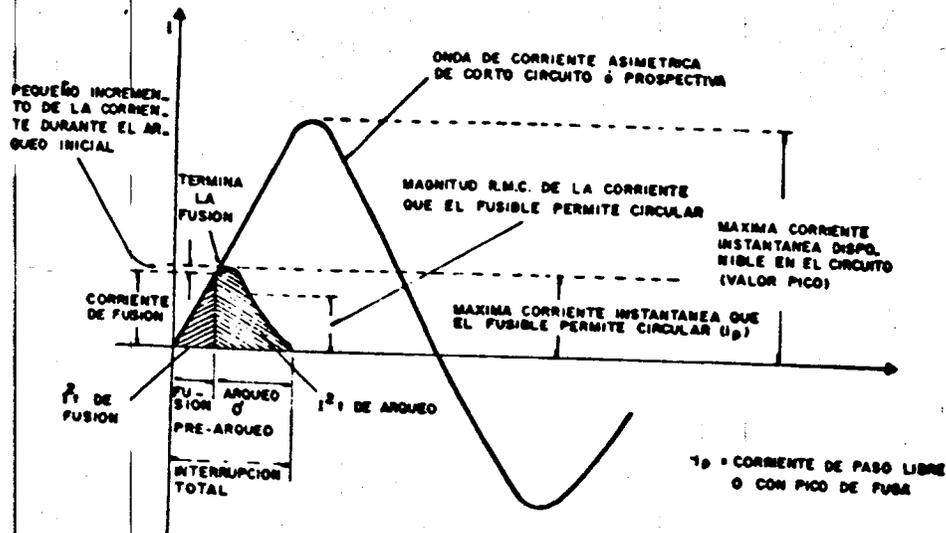


Fig.6  
REPRESENTACION GRAFICA DEL CONCEPTO DE LIMITACION DE CORRIENTE

El fusible está integrado por uno o más alambres de sección transversal circular constante o cintas metálicas ( plata, cobre o aleaciones ) perforadas o con determinada configuración, conectadas en paralelo entre sí, arrolladas en forma helicoidal sobre un núcleo de cerámica de alta pureza.

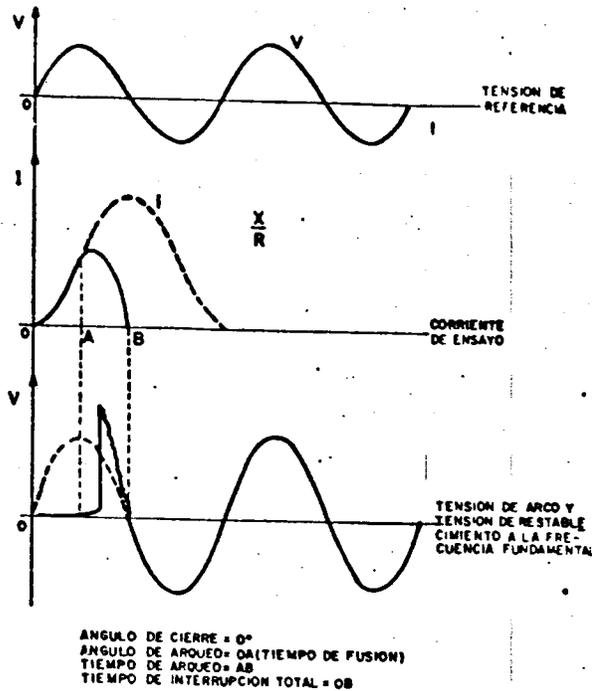


Fig. 7. INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE TOTALMENTE ASIMETRICA POR UN FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE.

En fusibles modernos se usan núcleos de mica, y en desarrollos mas recientes ya no se utilizan los núcleos interiores, con objeto de absorber mas fácilmente la energía disipada. Todos estos van dentro de un tubo de cerámica de alta pureza o de fibra de vidrio, que contiene en su interior material de relleno formada por arena de cuarzo, cuya finalidad es la de extinguir el arco eléctrico interno, absorbiendo la mayor parte de la energía  $I^2t$  generada, formándose las fulguritas. Ver fig. 8 y fig. 9.

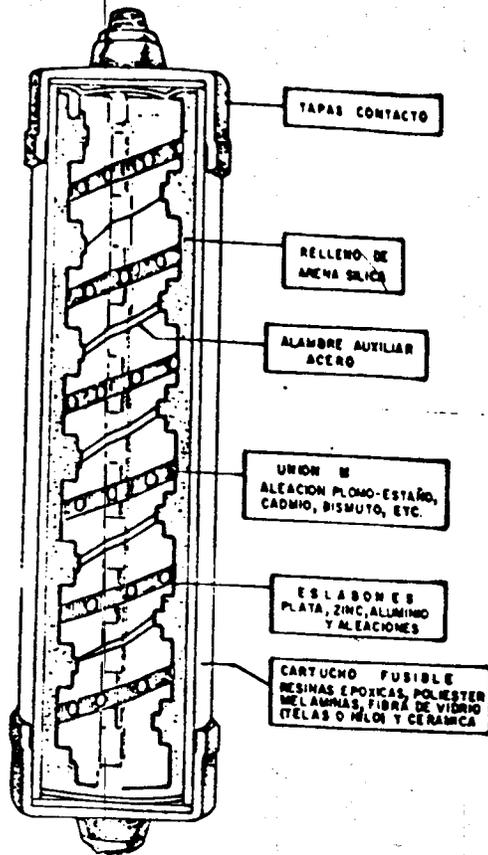


Fig. 8 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN FUSIBLE LIMITADOR DE CORRIENTE.

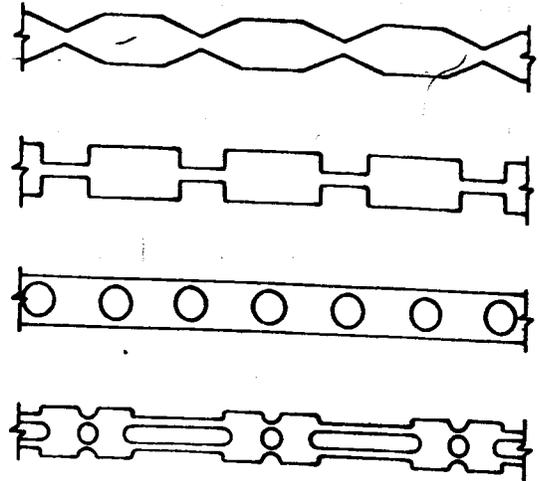


Fig. 9 Diferentes tipos de configuraciones de cintas fusibles

Existen básicamente tres tipos de fusibles limitadores de corriente en función del tipo de diseño:

-Fusible de respaldo o rango parcial ( back-up )

Este fusible se conoce como de primera generación y es aquel que puede interrumpir cualquier corriente desde su valor máximo hasta su corriente mínima de ruptura ( diseñado para tiempos cortos ). Por tal motivo para obtener una protección completa, se tiene que combinar con una protección en serie que proteja contra sobrecorrientes de pequeña magnitud como sobrecargas. Ver fig. 10.

-Fusible de aplicación general ( general purpose )

De acuerdo a la norma ANSI C37.40, este fusible puede interrumpir satisfactoriamente cualquier corriente, desde su máxima nominal, hasta una corriente que funda el elemento en una hora ( 3600 segundos ). Ver fig.10.

### -Fusible de rango completo (full range)

Este tipo de fusible, no está considerado en ninguna norma actualmente, pero se ha definido como aquel fusible capaz de interrumpir satisfactoriamente bajo condiciones específicas de uso y comportamiento todas las corrientes que causan la fusión del elemento sensible a la corriente. Los tiempos máximos de fusión que se tienen para este fusible son hasta de ocho horas. Ver fig.10.

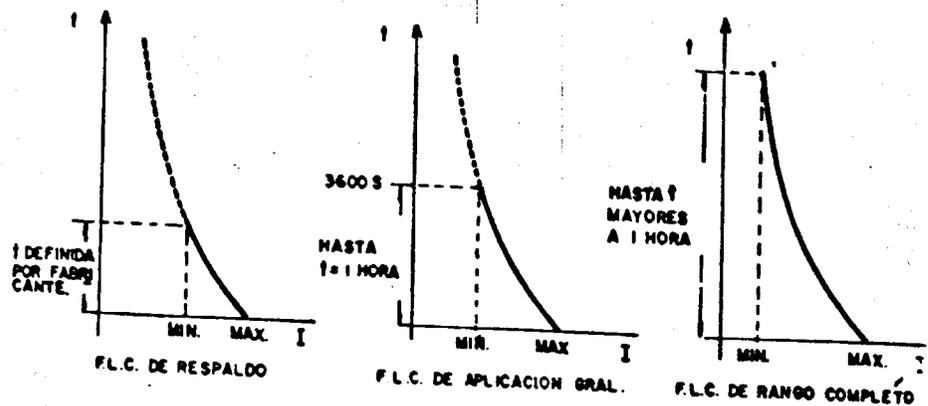


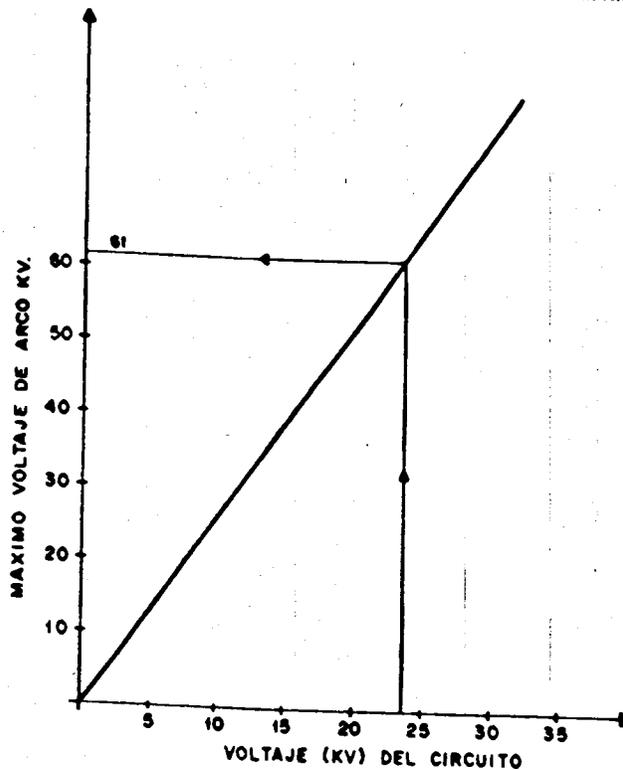
Fig.10 TIPOS DE FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE

**Consideraciones de sobretensión.-** Cuando un fusible limitador de corriente opera, siempre genera una tensión de arco. Esta sobretensión depende tanto del tiempo o instante de iniciación de la falla sobre la onda de tensión del sistema, como del tipo de diseño del fusible. Cuando se instala un fusible limitador de corriente, debe tomarse siempre en consideración esta sobretensión, pues existe el peligro de que sean dañados los apartarrayos con su operación.

Dado el diseño especial que tienen los fusibles limitadores de corriente la sobretensión que se genera con su operación depende principalmente de la tensión del sistema.

En la mayoría de los casos la coordinación se cumple, sin embargo, es necesario comprobar siempre esta condición. Para tal efecto se realiza lo siguiente:

FIG. 11 MAXIMO VOLTAJE DE ARCO PARA FLC NX-CAMPAÑON 12



- 1- EL MAXIMO VOLTAJE DE ARCO PRODUCIDO POR EL FLC NX DE 23 KV. SERA 61 KV.
  - 2- LA MINIMA TENSION DE CHISPEO DE UN APARTARRAYOS (SIEMENS) ES DE 46 KV. (RMC) A 60 HZ.
- $V_{max. ARCO FLC < V_{CHISPEO APARTARRAYOS}$   
 $61 KV < \sqrt{2} \cdot 46 KV$   
 $61 KV < 65.02 KV.$

De la fig. 11 se escoge sobre el eje de las abscisas la tensión del sistema ( fase-neutro en sistemas Y aterrizados, fase-fase en otros sistemas ). Se extiende una línea vertical con el valor anterior hasta intersectar la línea diagonal, continuando la línea en forma horizontal hacia la izquierda hasta encontrar el eje de las ordenadas, obteniéndose el valor de voltaje de arco máximo o sobretensión máxima que tendrá que soportar el sistema. Se compara el valor de voltaje obtenido con los niveles de chispeo de los apartarrayos escogidos para la protección contra sobretensiones del transformador, de tal forma que para existir una buena coordinación fusible-apartarrayos, la tensión de arco máxima producida por el fusible limitador de corriente siempre debe ser menor que la mínima tensión de chispeo del apartarrayos.

Las características eléctricas que definen a un fusible son:

- Tensión nominal
- Corriente nominal
- Capacidad interruptiva ( simétrica y asimétrica )
- Nivel básico de impulso
- Respuesta de operación ( curva I-t )
- Velocidad de respuesta ( en el tipo expulsión )
- Frecuencia
- Servicio ( interior o intemperie )

Asimismo, los factores que definen la aplicación de un fusible, además de las características anteriores son:

- Corriente de corto circuito en el punto de instalación
- Relación X/R en la impedancia equivalente (  $Z_e$  )
- Curva de daño de los elementos a proteger (conductores, transformadores, etc.)
- Curva de energización del transformador ( inrush y carga fría )
- Costo

Con la relación X/R se determina el valor de asimetría correspondiente. Ver fig.12

Entrando a la curva con el valor X/R de la falla correspondiente, se determina la constante de asimetría que al multiplicar por el valor de corriente simétrica, se obtiene el valor eficaz de la corriente asimétrica.

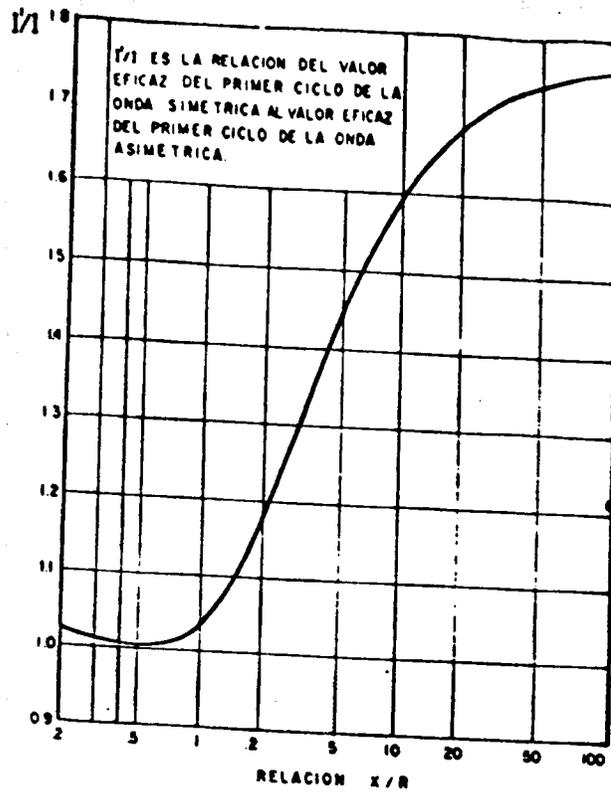


Fig.12 RELACION X/R VS RELACION  $I_1/I$

### 3 Arreglos de los alimentadores de distribución

En el sistema de distribución la energía es suministrada desde la subestación de potencia hasta el usuario a través de circuitos conocidos como alimentadores, que pueden ser de tipo aéreo, subterráneo o mixto, los cuales presentan configuraciones que permiten hacer movimientos de carga, trabajos de ampliación y en general funciones de operación que incrementen la continuidad del servicio.

Las redes primarias por el número de hilos se pueden clasificar en:

- a) Trifásico de tres hilos
- b) Trifásico de cuatro hilos
- c) Monofásico de tres hilos
- d) Monofásico de dos hilos
- e) Monofásico de un hilo

Las redes primarias trifásicas se utilizan en zonas urbanas, donde el sistema de tres hilos requiere una menor inversión inicial del alimentador con respecto a la de cuatro hilos; sin embargo, debido a que el primero tiene un coeficiente de aterrizamiento de 1.0 que es mayor que el especificado para cuatro hilos ( 0.75 ), se obliga a que los equipos instalados en estos sistemas sean de niveles de aislamiento mayores, con un costo más alto.

Una característica adicional de este sistema, es que los transformadores de distribución conectados a estas líneas son de neutro flotante en el lado primario; siendo la detección de fallas de fase a tierra más difícil que el sistema de cuatro hilos, ya que al ser mayor la impedancia de secuencia cero de las líneas, las corrientes de falla son menores.

El sistema de cuatro hilos se caracteriza por la conexión de transformadores trifásicos con neutro aterrizado en el devanado primario y conexión de transformadores monofásicos cuya tensión primaria es la de fase a neutro.

Las redes primarias monofásicas se utilizan en zonas rurales o de baja densidad de carga, debido a su bajo costo. La red primaria monofásica de dos hilos se origina en una red trifásica, de hecho son derivaciones de líneas trifásicas de tres hilos, donde los transformadores monofásicos son conectados entre fases en el lado primario.

La red monofásica de un hilo o retorno por tierra ( sistema Swer ) ha probado ser una solución adecuada para electrificación de pequeñas cargas o poblados alejados de los alimentadores trifásicos.

Los alimentadores de media tensión tipo aéreo, subterráneo o mixto, por lo general operan en forma radial cuya configuración se muestra a continuación:

a) Alimentador tipo aéreo o mixto.- El esquema de protección mas común de un alimentador tipo aéreo, está formado por un interruptor automático con elemento de recierre, localizado en la subestación de potencia, el cual está coordinado con otros elementos de protección en cascada como restauradores y fusibles. Asimismo se intercalan medios de seccionamiento como seccionalizadores y cuchillas para abrir con o sin carga, donde las características y uso particular de cada elemento depende del número de consumidores, tipo e importancia de las cargas, continuidad del servicio y costo. Ver fig.13.

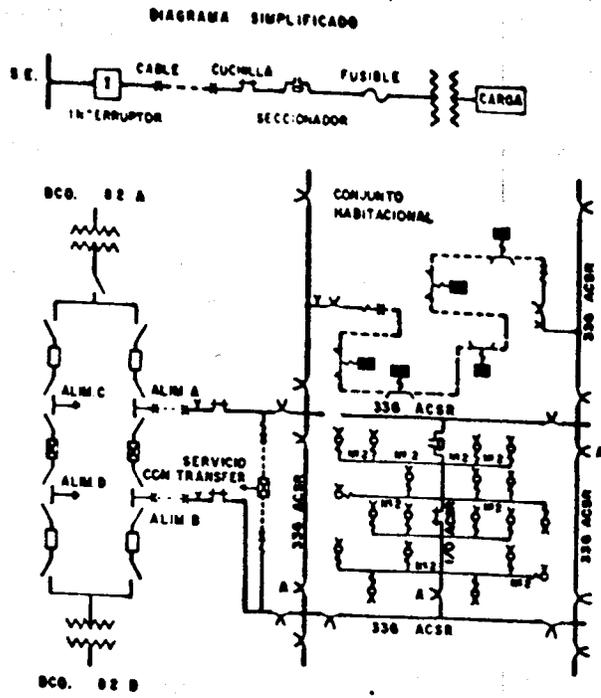


FIG.13 ESQUEMA DE PROTECCION DE UN ALIMENTADOR  
TIPO AEREO DE 23 KV

La sensibilidad de las interrupciones de servicio dependerá de los elementos de protección instalados, ya que a través de los elementos de recierre nos permiten discriminar las fallas instantáneas de las permanentes, ajustándolas de acuerdo a las necesidades. Dichos intervalos de tiempo entre apertura y cierre son de la magnitud suficiente para que una falla instantánea se autoextinga, permaneciendo el alimentador en servicio después de uno a tres operaciones de recierre; la cuarta apertura es definitiva por tratarse de una falla permanente, donde necesariamente se requiere la intervención del personal de mantenimiento para la restitución del servicio.

b) Alimentador tipo subterráneo.- El alimentador subterráneo mas sencillo es el radial en derivación simple debido a su bajo costo y simplicidad, estando formado por un interruptor principal localizado en la subestación de potencia, y se desarrolla con cable troncal y cables en derivación en forma transversal, en los cuales se intercalan equipos de seccionamiento con o sin carga, hasta llegar a la carga; la cual está protegida por un interruptor con fusibles que son coordinados con el interruptor principal sin recierre. Ver fig.14.

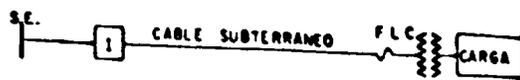


DIAGRAMA SIMPLIFICADO

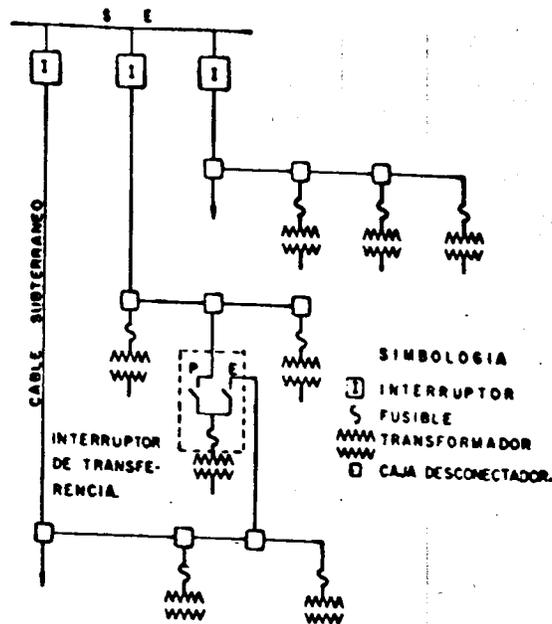


Fig.14 ESQUEMA DE PROTECCION DE UN ALIMENTADOR SUBTERRANEO

#### 4 ESQUEMAS DE PROTECCION

##### 4.1 Filosofía de la protección

Debido a la diversidad de las causas de falla que afectan a un sistema de distribución, no se pueden prescindir de una adecuada protección. De donde la aplicación y la coordinación selectiva de equipos de protección, requiere conocer la magnitud de la sobrecorriente en los puntos donde se aplican, dependiendo del tipo de falla que se presente y naturaleza de la carga. Por tal motivo la protección contra sobrecorriente se considera un "arte" que presenta aspectos de: seguridad, sensibilidad y selectividad.

**Seguridad.** - Esta se logra cuando el equipo de protección no efectúe operaciones falsas que abran el circuito por corrientes de energización ( inrush y carga fría ), condiciones transitorias o de estado estable no peligrosas para el sistema y sus equipos.

**Sensibilidad.**- El equipo de protección debe ser lo suficientemente capaz para detectar las fallas, dependiendo de su ubicación en el sistema.

**Selectividad.**- Se obtiene cuando el equipo está coordinado adecuadamente, con el objeto de que sólo opere el equipo de protección más cercano a la falla, quedando el inmediato anterior como dispositivo de respaldo.

Con lo anterior, se logra la función de la protección que es:

- Aislar las fallas del resto del circuito
- Reducir el número de fallas permanentes
- Incrementar la continuidad del circuito
- Reducir el tiempo para localizar las fallas
- Prevenir daños al equipo
- Reducir la probabilidad de falla disruptiva
- Reducir al máximo las situaciones peligrosas para el público en general

#### 4.2 Selección

Para una adecuada selección del equipo, es necesario tomar en cuenta varios factores característicos del sistema a proteger, que son los siguientes:

- Tensión del sistema
- Corriente nominal de la carga
- Corriente mínima de operación en el punto de ubicación del equipo de protección
- Tipo de conexión del sistema
- Nivel de corto circuito en el punto a proteger
- Distancia y calibres de conductores a lo largo del circuito que se desea proteger
- Curvas características de operación corriente-tiempo y secuencia seleccionada en los equipos de protección
- Capacidad de los equipos de protección
- Márgenes de crecimiento de capacidad de las instalaciones en el futuro

-Costo

#### 4.3 Coordinación de protecciones

En la medida que crecen y se desarrollan los sistemas de distribución, aumenta la importancia de proveer de una buena protección eléctrica al equipo para dar seguridad a las personas que los operan, así como al usuario.

Una apropiada coordinación, implica una secuencia de operación adecuada de los dispositivos de protección instalados en cascada, ya que de lo contrario puede ocurrir una operación simultánea innecesaria.

Para la instalación correcta del equipo de protección, deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

Primero.- El dispositivo de protección más cercano a la falla ( dispositivo protector ), debe eliminarla antes de que el dispositivo de protección inmediato anterior de respaldo ( dispositivo protegido ) opere y abra el circuito. Ver fig.15.

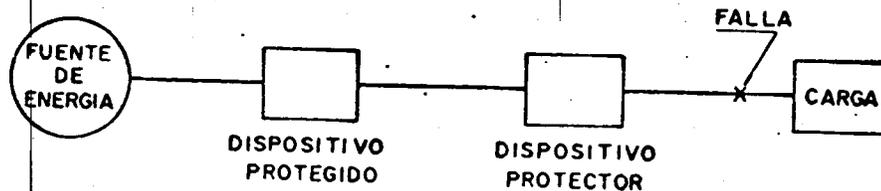


Fig.15 COORDINACION DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCION

Segundo.- Las fallas deben ser restringidas y aisladas de tal forma que afecten en el menor grado al resto del circuito.

Existen diferentes esquemas de protección, que se aplican en función de la importancia del suministro de energía, siendo los mas comunes los siguientes:

### a) Coordinación Interruptor-Fusible

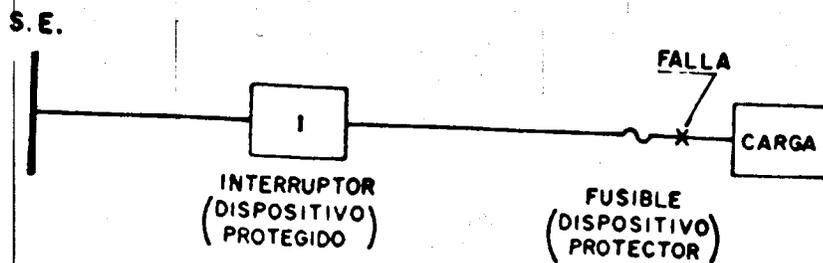


Fig.16 COORDINACION INTERRUPTOR - FUSIBLE

Para esta coordinación, el fusible tiene la función de operar para una falla que se presente en el lado de la carga, impidiendo que opere el interruptor (relevador de tiempo), a menos que este último cuente con un relevador instantáneo que operará de inmediato y en caso de persistir la falla operará el fusible después de realizarse el recierre, quedando como respaldo nuevamente el interruptor, recomendándose un tiempo mínimo de 0.3 segundos entre la curva I-t de interrupción total del fusible y la curva de I-t del relevador de tiempo del interruptor. Ver fig.17.

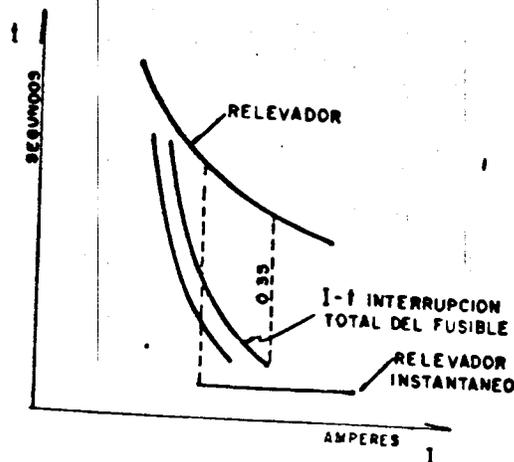


Fig.17 COORDINACION INTERRUPTOR-FUSIBLE

b) Coordinación Restaurador-Fusible

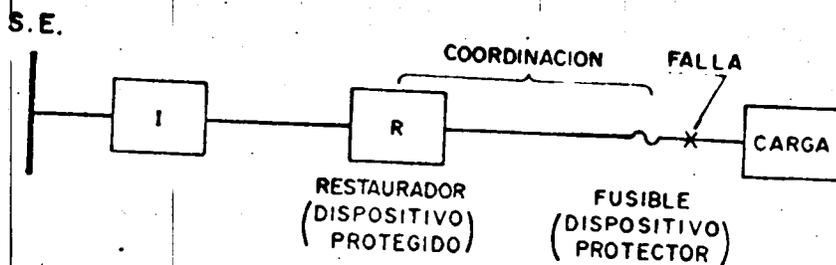


FIG.18 COORDINACION RESTAURADOR-FUSIBLE

En esta coordinación se busca que las operaciones rápidas del restaurador no provoquen daño a los fusible, incluyendo el efecto acumulativo de la operaciones rápidas considerando los intervalos de recierre. Asimismo las operaciones lentas del restaurador se deben retardar lo suficiente para asegurar la operación del fusible antes de la apertura definitiva del restaurador. Ver fig.18

La curva de interrupción total del fusible se utiliza para establecer el límite inferior de la coordinación de la curva de retraso de tiempo del restaurador ( punto a ). Ver fig.19.

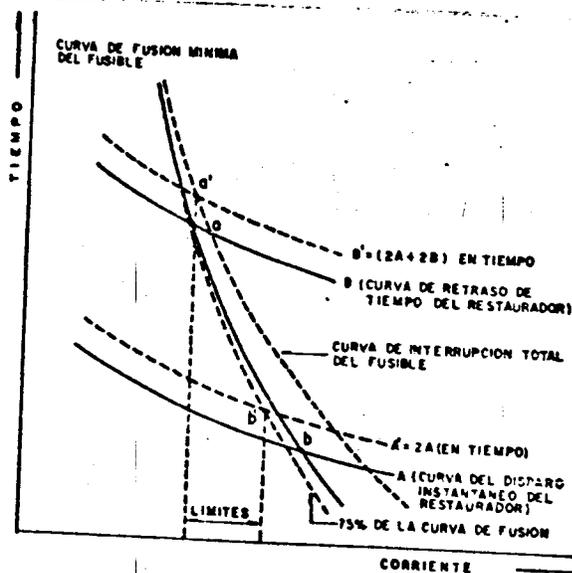


FIG.19 COORDINACION RESTAURADOR-FUSIBLE

La curva mínima de fusión se utiliza para establecer el límite superior de la coordinación con la curva de disparo instantáneo del restaurador ( punto b ). Sin embargo es necesario modificar las curvas del restaurador y fusible, para considerar los efectos de los ciclos de calentamiento-enfriamiento por la secuencia de operación del restaurador. Por lo anterior la curva A' es la suma de las dos aperturas instantáneas A, la cual se compara con la curva de fusión del fusible, que previamente se ha desplazado al 75 % en función del tiempo de fusión, encontrándose el nuevo límite superior de coordinación ( punto b' ). La curva B' es la suma de las dos aperturas instantáneas y las dos de retraso de tiempo, que representan la cantidad total de calor aplicado al fusible, que al compararse con la curva de interrupción total del fusible se obtiene el límite inferior de coordinación ( punto a' ).

### c) Coordinación Fusible-Fusible

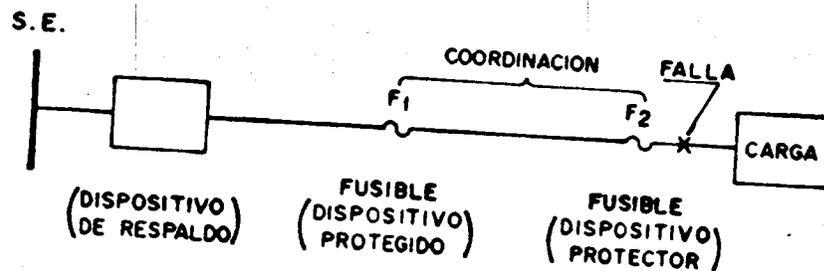


Fig.20 COORDINACION FUSIBLE-FUSIBLE

Para lograr una coordinación entre fusibles, se utilizan generalmente las curvas corriente-tiempo mínimo de fusión y las curvas corriente-tiempo de interrupción total de cada fusible empleado ( F1 y F2 ), de tal forma que para una falla en el lado de la carga debe operar el fusible ( F2 ), antes que se presente algún daño en el fusible protegido ( F1 ), el cual debe operar únicamente como respaldo para la misma falla o para alguna otra que se presente entre los dos fusibles en serie. Ver fig.20.

Debido a que en general se tienen dos tipos de fusibles en media tensión, se pueden hacer las combinaciones de coordinación siguientes: F.E.-F.E., F.L.C.-F.L.C., F.E.-F.L.C. y F.L.C.-F.E..

c.1) Fusible de expulsión ( F2 ) que protege a un fusible de expulsión ( F1 ).- La coordinación de los fusibles de expulsión se logra comparando la curva I-t de interrupción total del fusible protector ( F2 ), con la curva I-t mínima de fusión del fusible protegido ( F1 ), la cual previamente debe haberse reducido un 75 % en valores de tiempo, para asegurar la no operación o daño por efectos de precalentamiento debido a la carga y a la temperatura ambiente.

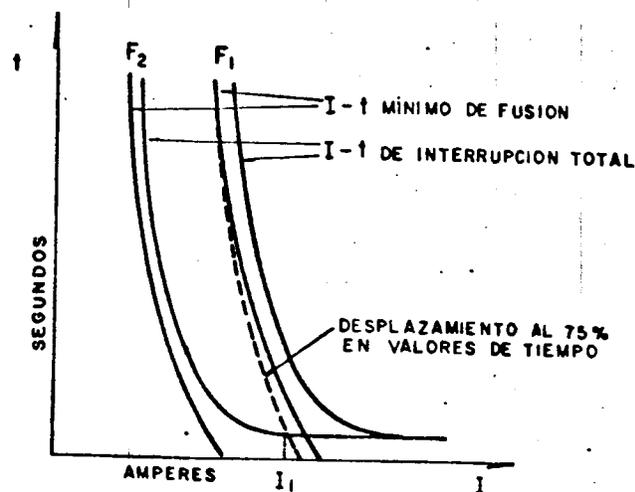


Fig.21 COORDINACION ENTRE F.E. Y F.E.

De la fig.21 se observa que  $I_1$  es el valor máximo de corriente con el cual el fusible F2 protege al fusible F1, ya que en ese punto se cruzan las curvas.

c.2) Fusible limitador de corriente ( F2 ) que protege a un fusible limitador de corriente ( F1 ).- Para este tipo de coordinación además de cumplir con el requisito del caso anterior se requiere verificar, comparando que la energía  $I^2t$  de interrupción F2, sea menor que la energía  $I^2t$  mínima de fusión del fusible protegido F1; de esta forma se mantiene una coordinación apropiada para todas las corrientes de fallas. Ver fig.22 y fig.23.

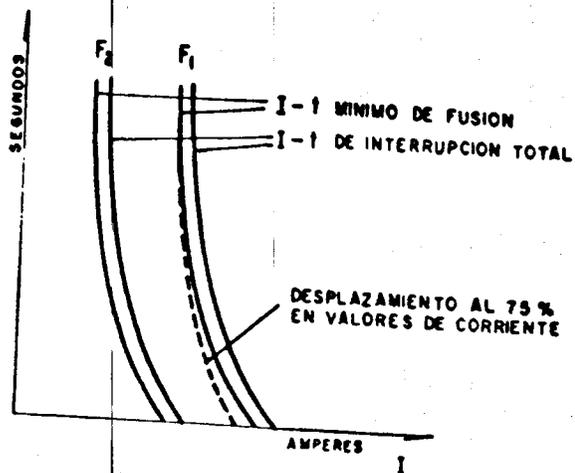
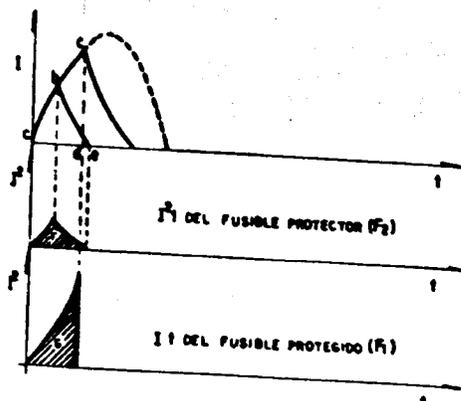
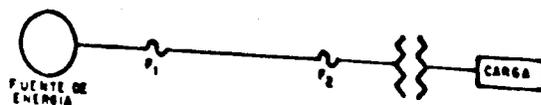


Fig.22 COORDINACION ENTRE F.L.C Y F.L.C.



AREA DE F < AREA DE G → COORDINACION ADECUADA

Fig.23 COORDINACION ENTRE FUSIBLES LIMITADOR

c.3) Fusible de expulsión ( F2 ) que protege a un fusible limitador de corriente ( F1 ).- Un fusible de expulsión no puede interrumpir totalmente la corriente antes de 0.8 ciclos, de donde su coordinación sólo es posible para tiempos mayores que 0.0133 segundos, estando limitada como consecuencia a bajas corrientes de falla, hasta el punto I<sub>1</sub>. Ver fig.24.

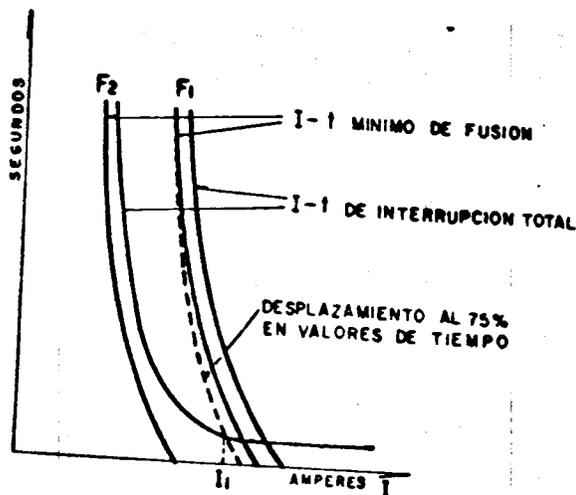


Fig.24 COORDINACION ENTRE F.E Y F.L.C.

En este caso se compara la curva de interrupción total del fusible de expulsión ( F2 ) con la curva mínima de fusión del fusible limitador de corriente ( F1 ) previamente desplazada un 75 % en valores de tiempo, para determinar el punto de coordinación.

c.4) Fusible limitador de corriente ( F2 ) que protege a un fusible de expulsión ( F1 ).- En este caso la coordinación se define con el mismo criterio establecido en la coordinación F.L.C.-F.L.C.,debiéndose verificar que:

La energía  $I^2t$  de interrupción total del F.L.C. (F2)



La energía  $I^2t$  mínima de fusión del F.E. ( F1 )

Ver fig.25.

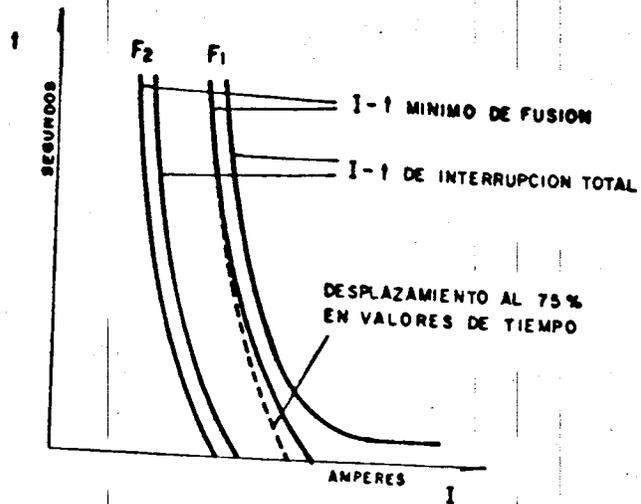


Fig.25 COORDINACION ENTRE F.L.C Y F.E.

d) Fusible de A.T.-Interruptor termomagnético de B.T.- Este esquema se utiliza para la protección integral de transformadores, instalando en el primario fusibles tipo expulsión, limitadores de corriente o una combinación de éstos y en el secundario un interruptor termomagnético de baja tensión ( o fusibles renovables como sustituto ). Ver fig.26.

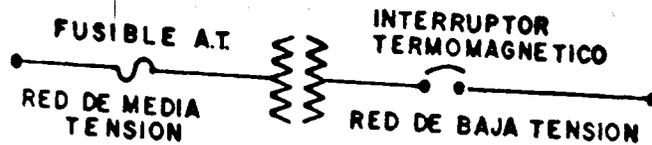


FIG. 26 COORDINACION FUSIBLE A.T.  
INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO.

Dicho esquema aunque representa una mayor inversión, se obtienen mejores condiciones de protección en la red de baja tensión, ya que fácilmente se pueden detectar fallas secundarias ( trifásicas, bifásicas, monofásicas ) y sobrecargas reales.

Para obtener una adecuada coordinación, es necesario conocer las características del transformador a proteger como son: potencia, tensión, e intensidad de corriente en el primario y secundario, % de impedancia, tipo de conexión, número de fases así como otras consideraciones importantes como son las curvas de daño de conductores y transformadores, curva de corriente transitoria de energización ( inrush y carga fría ).

Las curvas de daño de los equipos y materiales son proporcionadas generalmente por los fabricantes; sin embargo, para el caso del transformador se puede aplicar el criterio establecido en la "Guía de duración de corrientes de transformadores" ( F784/D4 de la norma ANSI C57.12.00 para transformadores autoenfriados en aceite de 1 a 500 kVA ), que es la siguiente tabla 1.

TIPO DE DAÑO	Nº DE VECES LA CORRIENTE NOMINAL	TIEMPO EN SEAJIOS
TERMINICO	2	2000
	3	300
	4	100
	5	50
	6	35
	7	25
	8	20
	9	15
	10	12.5
	15	5.8
	20	3.3
MECANICO	25	2.0
	30	1.5
	40	0.8
	50	0.5

Tabla 4 Valores I-t para definir la curva de daño en transformadores hasta 500 kVA

Con referencia a la curva de corriente transitoria de energización inrush, se origina debido a la energización del transformador y cuando por alguna razón se abate momentáneamente la tensión en el lado de la fuente, cuya magnitud depende del flujo residual en el núcleo del transformador / el punto sobre la onda de tensión cuando ocurre la energización. Asimismo la corriente transitoria de carga fría se produce debido a la energización súbita del transformador con cierto tipo de carga, el cual experimentó previamente una interrupción.

El criterio que se utiliza en general es el indicado en la tabla 2.

CORRIENTE TRANSITORIA	Nº DE VECES LA CORRIENTE NOMINAL	TIEMPO EN SEGUNDOS
INRUSH	25	0.01
	12	0.10
CARGA FRIA	.6	1.00
	3	10.00

Tabla 2 Valores I-t para definir la curva de energización

Graficando los valores de las dos tablas anteriores se obtiene la fig.27.

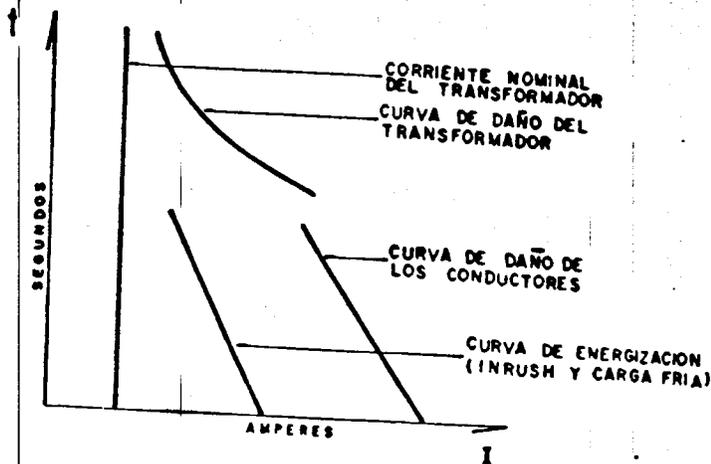


Fig.27 VALORES DE I-t CARACTERISTICOS DE UN TRANSFORMADOR

Para seleccionar la capacidad del fusible del lado primario del transformador se debe tener cuidado de escoger las curvas I-t tales que se localicen entre la curva de energización y la curva de daño del transformador. Asimismo, el interruptor termomagnético se debe seleccionar de acuerdo con la capacidad de corriente en el lado secundario del transformador y criterio de sobrecarga establecido, de tal forma que para lograr la coordinación deben referirse todos los valores de corriente al lado primario, vigilando que sean cubiertos todos los puntos de la curva de daño del transformador. Ver fig.28.

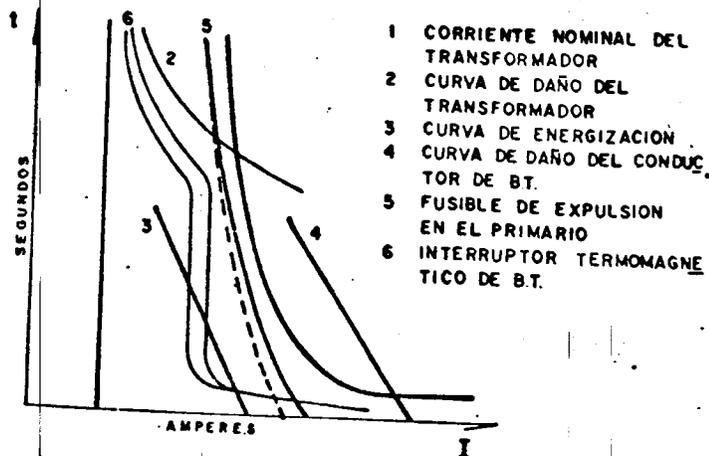


Fig.28 COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION.

En la actualidad este esquema de protección se está experimentando en la Compañía de Luz y Fuerza del Centro (en liquidación) a través de un Programa Piloto, con objeto de disminuir el índice de fallas en transformadores de la red aérea, originados por sobrecargas y fallas en la red de baja tensión.

Aunque en este momento el restablecimiento del interruptor es de tipo manual, se espera que en un futuro inmediato a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas se incorpore al esquema un dispositivo de recierre automático (Prosec), a efecto de discriminar las fallas instantáneas de baja tensión y en caso de persistir la falla, quede abierto en forma permanente.



## Características nominales del equipo y material eléctrico

- a) Interruptor de potencia  
Relevador de tiempo inverso  
Modelo 12IAC52B805 ( fase )  
Unidad de tiempo 2-16 A  
Unidad instantánea 20-160 A  
Modelo 12IAC52B806 ( tierra )  
Unidad de tiempo 0.5-4 A  
Unidad instantánea 10-80 A
- b) Transformador  
Capacidad 75 kVA  
Fases 3  
Conexión Delta-Estrella  
Tensión aterrizada  
Corriente 23-0.220/0.127 kV  
Impedancia 1.88-196.8 A  
2.3 %
- c) Fusibles de potencia  
Tipo Expulsión  
Tensión 23 kV  
Corriente ( de acuerdo al  
criterio de  
sobrecarga )  
Capacidad 20 kA asim.  
interruptiva 12.5 kA sim.  
Velocidad K ( rápida )  
Servicio Intemperie
- d) Interruptor termomagnético  
Capacidad ( de acuerdo al  
criterio de  
sobrecarga )  
Tensión 600 V  
No. de polos 3  
Capacidad 42 kA simétricos  
interruptiva LB  
Marco tipo
- e) Conductores ACSR  
Calibre 336 MCM  
Capacidad 470 A  
Resistencia 0.198 ohm/km  
a 65°C  
Calibre 1/0 AWG  
Capacidad 220 A  
Resistencia 0.696 ohm/km  
a 65°C

Calibre 2 AWG  
 Capacidad 180 A  
 Resistencia 1.07 ohm/km  
 a 65°C

De acuerdo al criterio definido en la tabla 1 se determina los valores de la curva de daño del transformador de 75 kVA, como se indica a continuación:

TIPO DE DAÑO	TIEMPO EN SEGUNDOS	VALOR LIMITE DE CORRIENTE DE DAÑO
TERMICO	2000	2 In = 3.76 A
	300	3 In = 5.64 A
	100	4 In = 7.52 A
	50	5 In = 9.40 A
	35	6 In = 11.28 A
	25	7 In = 13.16 A
	20	8 In = 15.04 A
	15	9 In = 16.92 A
	12.5	10 In = 18.80 A
	5.8	15 In = 29.20 A
	3.3	20 In = 37.50 A
2	25 In = 47.00 A	
MECANICO	1.5	30 In = 54.50 A
	0.8	40 In = 75.20 A
	0.5	50 In = 94.00 A

Tabla 3 Valores I-t para definir la curva de daño de un transformador de 75 kVA

Asimismo, utilizando el criterio establecido en la tabla 2, se determina la curva transitoria de energización siguiente:

ENERGIZACION	TIEMPO EN SEGUNDOS	CORRIENTE DE ENERGIZACION
INRUSH	0.01	25 In = 47.00 A
	0.10	12 In = 22.56 A
CARGA FRIA	1.00	6 In = 11.28 A
	10.00	3 In = 5.64 A

Tabla 4 Valores I-t para definir la curva de energización de un transformador de 75 kVA

A continuación se grafican en una hoja de papel log-log los valores de corriente anteriores, escogiendo de la familia de curvas I-t ( mínima de fusión y de interrupción total ) proporcionada por el fabricante, la capacidad del fusible de A.T., así como la capacidad del interruptor termomagnético en función de la corriente del lado secundario y de acuerdo al criterio establecido en el inciso 4.3, subinciso d), cuidando además que las curvas de daño de los conductores se localicen del lado derecho de las curvas I-t mencionadas. Posteriormente se procede a definir la coordinación entre el fusible instalado en el lado primario del transformador y el interruptor de potencia, conociendo las curvas características de los relevadores proporcionadas por el fabricante y aplicando el criterio establecido en el inciso 4.3, subinciso b). Ver fig.30.

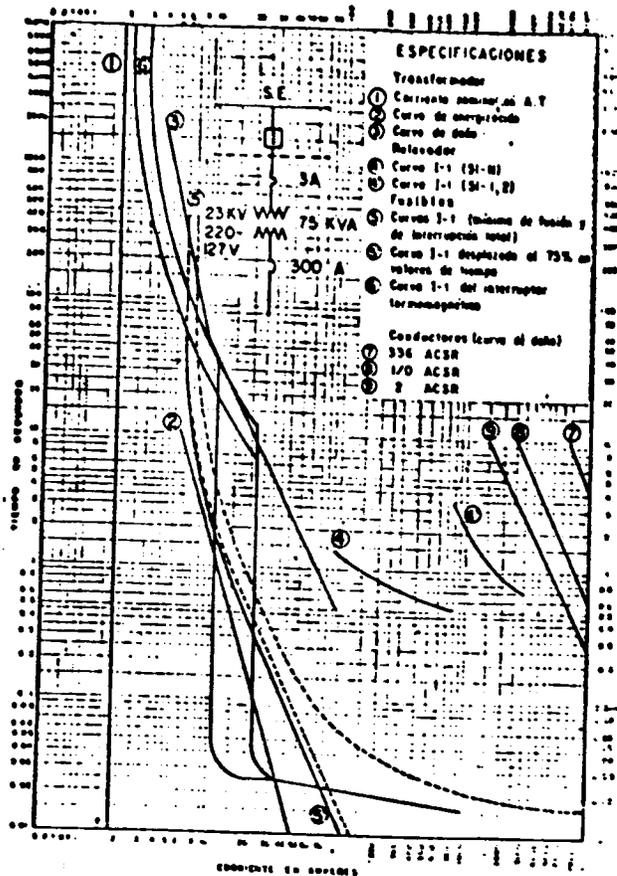


Fig. 30 Coordinación de protección del transformador de distribución de 75 kVA, 23-0.220/0.127 kV, - tipo aéreo.

**Coordinación de protecciones asistida por computadora digital.**- La naturaleza repetitiva de los estudios de coordinación de protecciones las hace marcadamente adaptables para implementarse en computadora. Además, la programación que soporta a los nuevos sistemas de cómputo facilita su implementación, por ejemplo, sistemas gráficos, manipuladores de base de datos y compiladores de programación avanzada entre otros.

Las ventajas que ofrece un programa de cómputo digital que sustituya el procedimiento manual son evidentes; rapidez, precisión, posibilidad de análisis de diversas alternativas y la disponibilidad inmediata de la información de la red y del equipo de protección instalado así como del resto existente en el mercado.

La fig. 31 es una muestra del resultado gráfico del estudio por computadora de un típico circuito de distribución radial. En ella se muestra la curva de un relevador, dos restauradores y un fusible.

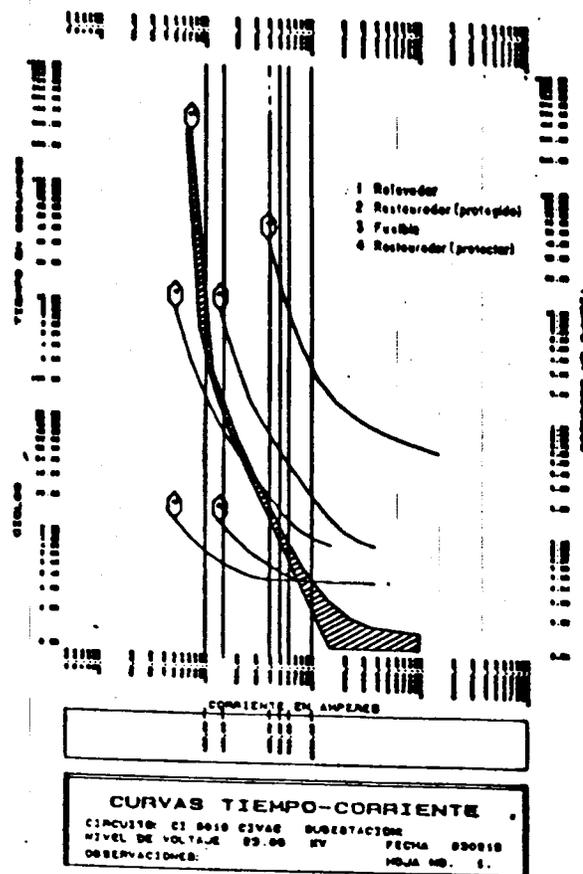


Fig. 31 Coordinación de protecciones por computadora

### REFERENCIAS

- [1] IEEE Tutorial Course, "Application and coordination of Reclosers, Sectionalizers and Fuses".80 EH0157-8-PWR, U.S.A., 1980.
- [2] Takach, D.S. "Distribution Transformer Primary Fuse Coordination" 1982 IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.7, July 1982. pp 2278-2285.
- [3] Mc Graw-Edison Power Systems Division, "Distribution Systems Protection Manual", U.S.A.
- [4] Cia. de Luz y Fza del Centro, "Manual de diseño de subestaciones, tomo I, México, D.F.
- [5] Avila, R.A.; Juárez, T.A.; Espinosa, L.R.; "Aplicación de interruptores termomagnéticos en la protección del lado de baja tensión en transformadores de distribución tipo poste". Mexicón, Guadalajara Jal., México, Octubre, 1986.

- [6] Juárez, T.A.; Gómez, V.F.; "Estudio de coordinación de protección contra sobrecorrientes en transformadores de distribución aérea". C.L.F.C., Estudios de redes, Gerencia de Distribución y Transmisión, México, D.F., Mayo 1986.
- [7] C.F.E., Subdirección de Operación, Gerencia de Distribución ; "Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución". Libro 42 de ediciones de C.F.E. México, D.F. 1984.
- [8] Vázquez, H.; "Generalidades de la protección contra sobrecorrientes en sistemas de distribución". C.L.F.C., Estudios y Mecanización, Gerencia de Distribución y Transmisión, México, D.F., Septiembre, 1986.
- [9] Compañía de Luz y Fuerza del Centro (en liquidación), Superintendencia de Estudios y Normalización; "Cálculo de cortocircuito". Parte 3., México, D.F. 1984
- [10] Avila, R.A.; "Protección de circuitos eléctricos de baja tensión". Mercury Electric Products, S.A., México, D.F., 1977.

# EXPERIENCIAS SOBRE PROTECCION SECUNDARIA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION TIPO POSTE DE 23 KV

ROBERTO ESPINOSA Y LARA  
CLFC

ALFREDO JUAREZ TORRES  
CLFC

RODOLFO E. GARCIA GARRO  
CLFC

## RESUMEN

Debido a que en la actualidad se ha incrementado el índice de transformadores dañados en la red de distribución aérea metropolitana de 23 kv de la C.L.F.C. se procedió a realizar una investigación a través de información estadística, determinándose que éste se presenta con mayor frecuencia en transformadores trifásicos de 75 y 112.5 kVA, por ser las capacidades más frecuentes de instalación, encontrándose que una de las causas más comunes es debido a sobrecargas por aumento de las demandas de los usuarios y cortocircuitos en la red de baja tensión.

Con objeto de lograr una protección integral que ayude a reducir el problema planteado, se presenta una alternativa al instalar interruptores termomagnéticos en el lado secundario de transformadores ubicados en la zona más conflictiva de la Ciudad de México, presentándose los resultados y experiencias obtenidas en los 2 años que tienen de instalados.

## 1.-INTRODUCCION

De los datos estadísticos de transformadores dañados, se determinó que el área más conflictiva se localiza en la zona oriente del área metropolitana del sistema de Compañía de Luz y Fuerza del Centro, presentándose en unidades con capacidad de 75 y 112,5 kVA, 23-0.220/0.127KV.  $Z = 2.3\%$ , tipo poste, cuya protección contra sobrecorrientes está normalizada por medio de fusibles tipo expulsión de 3 amperes, de fusión tipo K (rápido), con capacidad interruptiva de 12 kA simétricos (tipo potencia) para zonas de alta capacidad interruptiva o de 6.25 kA simétricos (tipo eslabón fusible), para zonas de baja capacidad interruptiva, instalados como protección primaria.

Con objeto de disminuir dicho índice de fallas y con base a estudios anteriores donde se analizaron diferentes alternativas de protección contra sobrecargas y cortocircuitos originados en la red de baja tensión, a través de fusibles, interruptores monopolares e interruptores trifásicos, instalados en el secundario del transformador se decidió realizar con el último esquema un programa piloto formado por 100 interruptores termomagnéticos.

## 2.-CONSIDERACIONES GENERALES DE LA RED

El esquema de protección más común de un alimentador tipo aéreo, está formado por un interruptor automático, con elemento de recierre, localizado en la subestación de potencia. Asimismo se intercalan medios de seccionamiento como restauradores, seccionadores, interruptores de aire y cuchillas para abrir con o sin carga, donde las características y uso particular de cada elemento depende del número de consumidores, tipo e importancia de las cargas, continuidad del servicio y costo, como se muestra en la siguiente figura:

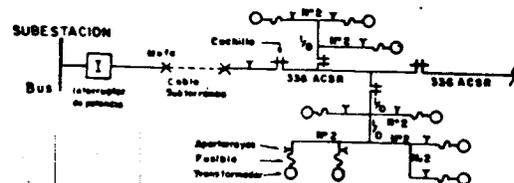


FIG N°1 Diagrama unifilar típico de un alimentador tipo aéreo de 23kv.

La protección de un transformador de distribución tipo poste, está formada por los elementos que se indican en la Fig. 2 de acuerdo a la norma de montaje No 4.0037 y 4.0038.



### 3.-ANÁLISIS DE LA PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES

Se ha demostrado que la protección contra sobrecorrientes proporcionada por el esquema presentado en la Fig. No. 2, es básicamente contra cortocircuitos originados en el transformador o dentro de los primeros 240 metros de la red de baja tensión aproximadamente, ya que para longitudes mayores el fusible no opera, debido a que los valores de cortocircuito 3Ø y 1Ø tienen magnitudes insuficientes a causa de la impedancia de la línea, reflejándose como simples sobrecargas en forma aparente; dañando consecuentemente a los conductores de B.T. y afectando la vida útil del transformador.

A continuación se muestra las gráficas que resumen los cálculos de cortocircuito 3Ø y 1Ø en B.T., en diferentes puntos, que permite determinar la longitud máxima en la cual se logra una respuesta adecuada de la protección primaria; ya que la magnitud de corriente está básicamente en función de los siguientes parámetros:

- Capacidad del transformador
- Tensión del secundario
- Impedancia del transformador
- Calibre y tipo de conductor de B.T.
- Distancia del punto de falla al transformador
- Tipo de falla (3Ø, 2Ø, 1Ø)

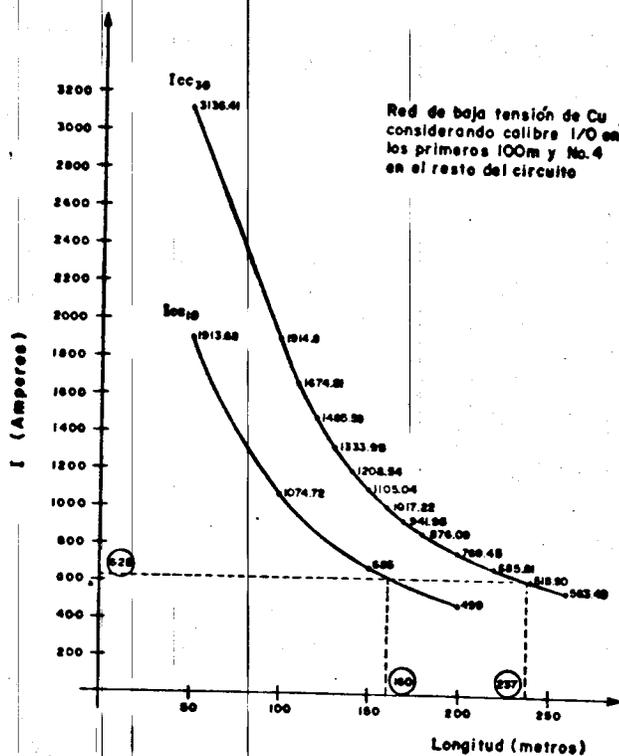


Gráfico nº 1. Corrientes de corto circuito trifásica y de fase a tierra en un transformador de 75 kVA

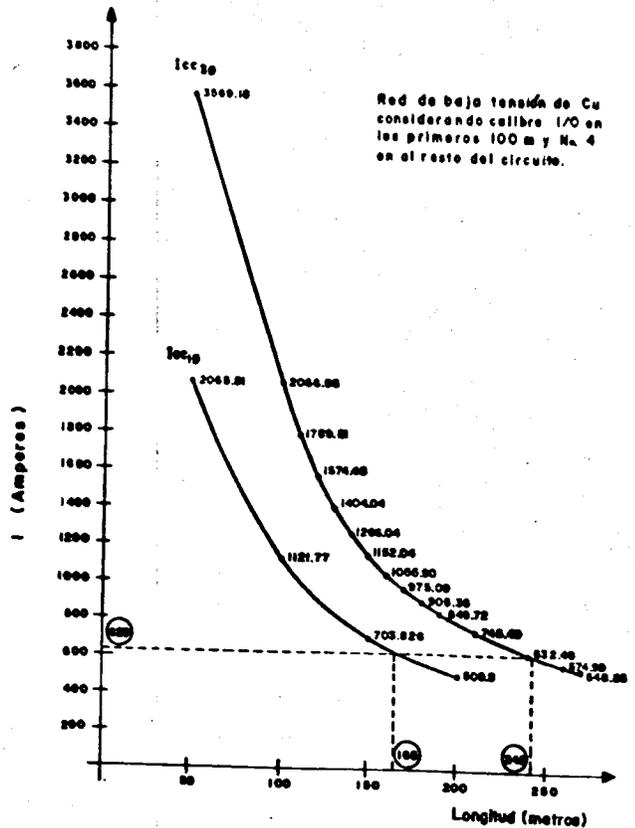


Gráfico nº 2. Corriente de corto circuito trifásica y de fase a tierra en un transformador de 112.5 kVA

En la tabla No. 2 se indican los valores y características de protección contra sobrecorrientes:

Capacidad del transformador		Protección Primaria			Longitud máxima de respuesta a la gráfica		
kVA	I <sub>p</sub>	I <sub>s</sub>	Corriente mínima de operación retardada o Primario Secundario	Tiempo mínimo de operación	Falla 3Ø	Falla 1Ø	
75	1800	197 A	3 A	6 A 620 A	5 min.	237 m	180 m
112.5	232 A	295 A	3 A	6 A 620 A	5 min.	242 m	185 m

Tabla No. 2 Características de la protección contra sobrecorrientes y longitudes máximas de respuesta.

Ante esta situación se determinó instalar interruptores termomagnéticos de B.T. en el lado secundario de los transformadores, ver Fig. 3, ya que ofrecen una protección contra sobrecorrientes con respuesta tanto térmica como magnética, cuyas características se indican a continuación:

Corriente nominal (definidas en la coordinación) (Transf. de 75 kVA)	300 A.
(Transf. de 112.5 kVA)	400 A.
Tensión máxima en C.A.	600 V.
Capacidad interruptiva	65 kA.
Marco	HLB
Disco de ajuste magnético	Bajo $\pm 25\%$ Alto $\pm 10\%$
No. de polos	3
Operación	Automática trifásica
Gabinete	Nema 3 R
Servicio	Intemperie

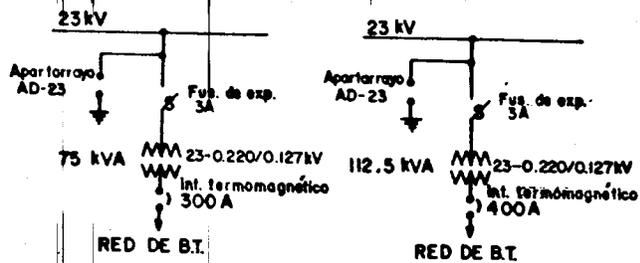


Fig. N° 3 Protección primaria y secundaria de transformadores tipo poste.

Con las características mencionadas, se presentan las gráficas de coordinación respectivas para cada caso. Ver Fig. 4 y 5.

#### 4.-PRUEBAS Y RESULTADOS DE CAMPO

Una vez definidos los puntos conflictivos, donde se han reemplazado los transformadores dañados con anterioridad, se elaboró un programa de instalación de 100 interruptores termomagnéticos (50 unidades de 300 A. y 50 unidades de 400 A.) para transformadores de 75 y 112.5 kVA respectivamente, elaborándose para el control, un reporte (forma F-2) de operación del dispositivo, con objeto de analizar las condiciones y causas que puedan originar la apertura del circuito antes del restablecimiento del mismo, corrigiendo las anomalías encontradas para dar continuidad al servicio.

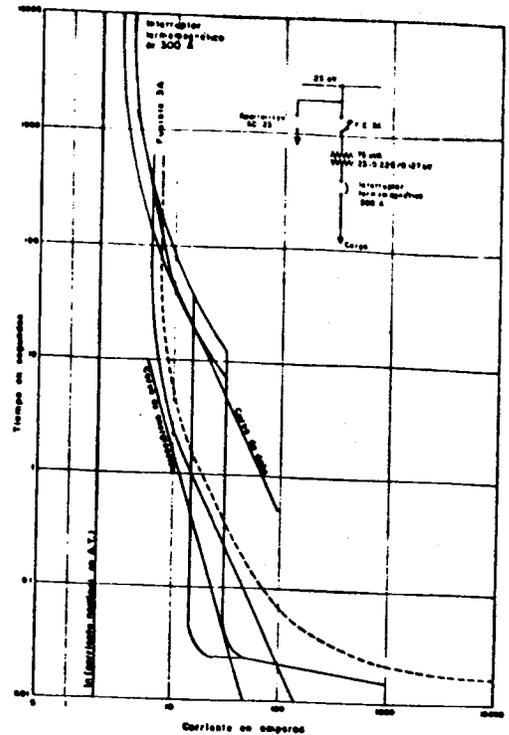


Fig. N° 4 Coordinación de protección del transformador de distribución de 75 kVA, 23-0.220/0.127 kV tipo poste

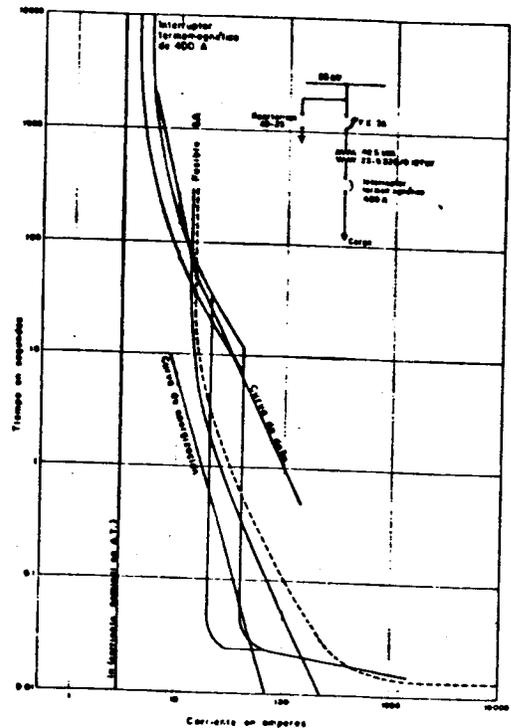


Fig. N° 5 Coordinación de protección del transformador de distribución de 112.5 kVA, 23-0.220/0.127 kV, tipo poste

Disparo	Intervalo de enfriamiento
1	Inicial
2	1.5 horas
3	1.0 horas
4	30 minutos
5	10 minutos
6	5 minutos

Tabla N° 3 Intervalos entre disparos sucesivos bajo 200% de sobrecarga.

Prueba No. 2 Prueba de sobrecarga al 135% a temperatura de 25°C.

Esta prueba consistió en aplicar a cada polo del interruptor una sobrecarga del 135% de In, a una temperatura ambiente de 25°C, registrándose los tiempos de operación.

Prueba No. 3 Prueba de sobrecarga al 200% a temperatura de 40°C.

Nuevamente se aplica a cada polo del interruptor, una sobrecarga del 200% de In, a una temperatura ambiente de 40°C, registrándose los resultados.

Prueba	TEMPERATURA °C			CORRIENTE A		TIEMPO	
	AMBIENTE	INTERRUPTOR		Inicial	Final	Al disparo	Enfriamiento
		Temperar 3	Temperar 4				
1	26	26	26	616	550	7'15"	Inicial
2	26	30	28	590	560	6'10"	1h:23'
3	25	30	28	590	560	5'00"	50'
4	25	32	25	590	550	4'55"	26'
5	28	34	27	580	550	3'10"	10'05"
	28	30	28	590	550	2'57"	9'50"
	28	30	28	590	560	2'54"	10'
	28	30	28	594	560	2'13"	10'37"
6	28	30	28	594	560	2'23"	9'
	28	30	28	594	550	2'04"	5'33"
	28	30	26	594	550	1'55"	5'
	28	30	28	594	550	1'50"	5'

TABLA 4. Resultados de la prueba de tiempo de respuesta térmico.

INT.	POLO	TEMPERATURA °C					CORRIENTE A	TIEMPO AL DISPARO	
		AMB.	INTERRUPTOR			Nota (1)		Nota (3)	Nota (3)
			TMP 1	TMP 2	TMP 4				
A	1	28	28	32	-	-	405	30'	17"
	2	25	32	32	-	-	405	21'	40"
	3	28	32	32	-	-	405	20'	08"
	3	28	28	32	-	-	405	31'	10"
B	3	28	-	-	33	30	405	32'	10"
	3	28	-	-	33	28	405	14'	33"
	1	28	-	-	34	29	405	14'	52"
	2	28	-	-	32	29	405	18'	11"
Nota (2)	3	28	-	-	32	32	405	23'	15"

Notas: (1) TMP indica termopar.  
 (2) El orden indicado de los polos es en el que se aplicó la corriente.  
 (3) El intervalo de enfriamiento considerado fue de aproximadamente una hora.

TABLA 5. Resultados de la prueba de sobrecarga al 135% A 25°C

POLO	INT.	TEMPERATURA °C		CORRIENTE A	TIEMPO AL DISPARO
		AMB.	INT.		
1	A	36	35	630	4'45"
	B	37	35	626	2'15"
2	A	37	37	720	2'20"
	B	37	37	720	3'15"
	A	38	38	620	4'10"
	B	38	38	600	4'49"

TABLA 6. Resultados de la prueba de sobrecarga la 200% a 40°C.

Los resultados de las pruebas son los siguientes:

Para la prueba No. 1 arrojó que existe dispersión en la respuesta, quedando fuera completamente de la zona de operación del interruptor para periodos de enfriamiento de 5 minutos.

Para las pruebas No. 2 y 3, mostraron que las respuestas de operación son satisfactorias y caen en la zona de tolerancia del elemento térmico, mostrando una tendencia hacia la curva mínima.

#### 4.2.-RESULTADOS DE CAMPO

De los resultados obtenidos del Departamento ejecutante, a través de los reportes obtenidos de la forma F-2 se ha encontrado que los interruptores termomagnéticos han operado en 16 casos, presentando lo siguiente:

Interruptor	C A U S A S							Fuebles Operados	
	Corta Circuito en B.T.	Cable de B.T. dañado	Sobrecarga	Desbalanceo entre fases	Objetos extraños cargados	Otras	Fuebles Operados		
							SI	NO	
1			X					X	
2			X					X	
3			X					X	
4								X	
5			X					X	
6			X					X	
7			X					X	
8	X							X	
9				X				X	
10	X							X	
11			X					X	
12			X					X	
13			X					X	
14	X				X			X	
15			X					X	
16	X							X	
Totales	4	0	10	1	1	2			

Tabla No.7 Cuadro resumen de causas de operación de interruptores termomagnéticos de B.T.

Para el caso de sobrecarga, se han tomado nuevamente en los transformadores, gráficas del perfil de carga para verificar que el % sea el adecuado y balanceado en caso contrario ser reemplazado por otro de mayor capacidad.

En caso de operaciones frecuentes por causas desconocidas se manda instalar un graficador de carga en B.T. para determinar si existe sobrecarga o desbalanceo entre fases que requiera el reemplazo del transformador por otro de capacidad mayor o simplemente se balancean las fases.

REPORTE DEL RESTABLECIMIENTO DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE BAJA TENSION

No. DE INTERRUPTOR: \_\_\_\_\_

DIRECCION: \_\_\_\_\_

SECTOR: \_\_\_\_\_

CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR: \_\_\_\_\_ KVA

No. DE R.T. \_\_\_\_\_

FUSIBLES DE ALTA TENSION OPERADO(S)  SI  NO

SE RESTABLECIO EL SERVICIO SIN PROBLEMA  SI  NO

LA POSIBLE CAUSA DE OPERACION DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO FUE:

RED DE B.T. QUEMADA  CORTO CIRCUITO EN B.T.

CABLE DE B.T. CAIDO  OBJETOS EXTRAÑOS COLGADOS

DESCONOCIDA  OTRAS: \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

Nombre del operador que atendió la queja: \_\_\_\_\_

Nombre del jefe de cuadrilla de Líneas Aéreas: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_ Hora de restablecimiento del servicio: \_\_\_\_\_

Forma F-2

Como consecuencia se tuvo necesidad de elaborar la norma de montaje p. 4.0328 mostrada en la Fig. No. 6 y un instructivo de instalación y operación.

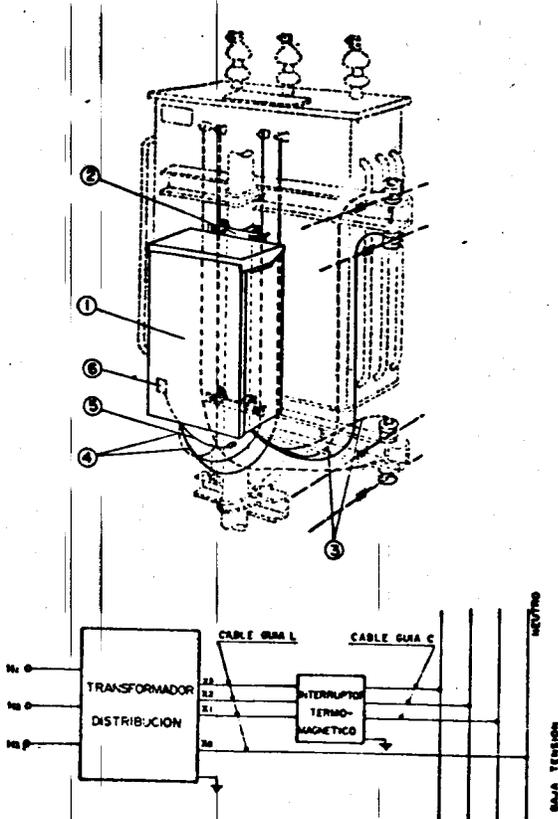


Fig. No. 6 Norma (4,0328) de montaje del interruptor termomagnético en B.T.

INTERRUPTOR T BT 300 y 400

NO. DE MONTAJE: 4.0328

2 de 2

Ref.	NOMBRE	Norma L-v	Unidad	Cantidad
1	INTERRUPTOR T BT 300 ó 400 Amp.		Pza.	1
2	SOPORTE TERMINAL SE 8	2.0200	Pza.	2
3	CABLE GUA TRANSFORMADOR 1/0 C 6	2.0570	Pza.	1
4	CABLE GUA TRANSFORMADOR 1/0 L 6	2.0570	Pza.	2
5	CABLE GUA 1/0	2.0102	m	2
6	CONECTOR CANAL C 2/0-2/0 CM	2.0107	Pza.	1
7	SAPATA TIERRA C 1-1/0	2.0560	Pza.	1

Instalado en Poste CB-12 E con montajes: Transformador trifásico tipo poste 23-07-75 y Transformador trifásico tipo poste 23-07-112. Se protege al transformador por el lado de baja tensión, contra sobrecorrientes.

CLAVE DEL MONTEJE:

T = Termomagnético.

BT = Baja Tensión.

300,400 = Capacidad nominal en amperes.

NOTA: En la instalación del Interruptor Termomagnético se debe usar los 4 cables guía existentes del transformador.

#### 4.1.-PRUEBAS INICIALES DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO

En forma paralela el IIE en su laboratorio de pruebas en Salazar, realizó pruebas de sobrecarga a los interruptores termomagnéticos de 300 A., para determinar el tiempo de respuesta del elemento térmico.

Las pruebas se aplicaron de acuerdo a la norma UL-489, Standard for Molded-case circuit breakers y circuit breakers enclosures, July, 1976, siendo las siguientes:

Prueba No. 1 Determinación del tiempo de respuesta térmica

Esta consistió en aplicar al interruptor a una temperatura de 25°C, una sobrecarga del 200% en seis ocasiones sucesivas con los intervalos de enfriamiento que se indican en la tabla No. 3.

Como consecuencia del reporte del interruptor No. 11, el equipo fue retirado, para verificar su operación, encontrándose que las diferentes operaciones del mismo se debían a que los elementos térmicos estaban descalibrados ya que al ser probados cada uno, abrían el circuito con diferentes tiempos de respuesta para una misma corriente de prueba.

#### CONCLUSIONES

La alternativa presentada, de proteger al transformador contra sobrecorrientes, debidas a sobrecargas o cortocircuitos originados en red de baja tensión, ha arrojado resultados favorables al sistema, ya que en el tiempo que se tienen de instalados no se ha vuelto a presentar falla en los transformadores, incrementándose la continuidad del servicio. Asimismo el esquema favorece el proceso de control de la demanda, ya que una de las causas de operación del dispositivo de protección puede ser el incremento de la demanda de los usuarios no detectada por la compañía suministradora. Sin embargo, la experiencia obtenida nos demuestra que todavía existen algunos problemas que corregir como son:

a) Exigir al fabricante un mejor control de calidad en su producto, específicamente en la calidad y calibración de los elementos térmicos y en el mecanismo de cierre y apertura (palanca), ya que el resorte interno se llega a desajustar de su posición original.

b) Apretar adecuadamente los conductores del circuito de B.T. con la herramienta idónea para evitar falsos contactos que repercuta en calentamientos innecesarios, que puedan hacer operar al equipo.

Debido a que el esquema en esta primera etapa no cuenta con dispositivo de recierre, el restablecimiento del equipo se realiza después de unas horas, lo cual permite que los elementos térmicos se enfrien y logren posteriormente su apertura de acuerdo a la curva de operación; sin embargo habrá que poner atención en los puntos anteriores, para cuando el recierre se requiera en forma automática debido a los problemas comentados.

#### BIBLIOGRAFIA

1) Ing. Alfonso Avila R., Ing. Alfredo Juárez T., "Indicación de interruptores termomagnéticos en la protección del lado de baja tensión de transformadores tipo poste." IEEE México 86, Guadalajara, Jal., Octubre de 1986.

2) Ing. Alfonso Avila R., Ing. Roberto Espinosa y L., Ing. Alfredo Juárez T., Ing. Fernando Gómez V., "Estudio de las características de operación de los fusibles de potencia tipo expulsión de 3 amperes nominales." IEEE México 86, Guadalajara, Jal., Octubre de 1986.

3) Ing. Ramón de la Rosa, Ing. Alfredo Juárez T., Ing. José Antonio Cerrillo, Ing. Alfonso Avila R. "Experiencias en un nuevo esquema de protección por sobrecorrientes para transformadores de distribución." IEEE Reunión de verano de potencia, Acapulco, Gro., Agosto de 1986.

4) Ing. Alfredo Juárez T., Ing. Fernando Gómez V. "Estudio de cortocircuito en la red de B.T. de transformadores de distribución." Estudios de redes, CLFC, México, D.F., Octubre de 1988.

5) SyC Electric Co., TCC Número 165-1 y 165-1-4 SMU Fuse Unit SyC "K" speed.

6) Catálogo IEM de interruptores termomagnéticos en gabinete intemperie Nema 3R de B.T.

ESTUDIO DE FALLAS DE FUSIBLES LIMITADORES EN  
SISTEMAS DE DISTRIBUCION SUBTERRANEAS EN 23 KV.

A. AVILA RAMIREZ

A. GARCIA RAMIREZ

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

A. JUAREZ TORRES

F. GOMEZ VARGAS

F. MENDEZ L.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S. A.

RESUMEN

Se presenta un estudio sobre las causas de falla de los fusibles limitadores de corriente, considerando fundamentalmente las condiciones de servicio y el criterio que se aplica en su selección. Para reforzar las conclusiones obtenidas se presentan una síntesis de diversas pruebas y mediciones realizadas en México y en el extranjero.

1.- INTRODUCCION

Se realizó una investigación sobre las causas de falla catastrófica de los fusibles limitadores de corriente, del tipo de respaldo en 23 KV, que se utilizan en la protección contra corto circuito de los puestos de rectificación de corriente, que alimentan el Sistema de Tracción de los convoyes del METRO de la Ciudad de México y el de las cabeceras del mismo Sistema de Transporte que sirven para alimentar diferentes servicios.

Con objeto de encontrar una explicación satisfactoria sobre las causas de falla, se realizaron pruebas de corto circuito aplicando el criterio de la Norma IEC 282.1, y de calentamiento en baja tensión. Así mismo se hicieron mediciones de la corriente de carga en estado estable y transitoria en los puntos donde se insta-

lan y de la temperatura generada en los fusibles.

Adicionalmente, se llevaron a efecto estudios metalográficos en cintas que se habían sometido previamente a ensayos de calentamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, determinamos que las fallas de estos equipos, obedecen a varias causas, algunas de las cuales se asocian entre sí para producir los resultados conocidos.

Sin embargo, por tratarse de fusibles que se fabricaron en épocas diferentes, además de las causas detectadas, pudo haber habido alguna otra, cuya influencia en la operación incorrecta de ellos, haya sido de efectos primarios o secundarios.

2.- COMPORTAMIENTO DE LOS FUSIBLES EN LA RED

En la actualidad, CLFC utiliza debido a sus necesidades diferentes capacidades y marcas de fusibles limitadores de corriente en las redes subterráneas de 23 KV, como medios de protección contra sobrecorrientes de corto circuito.

Siendo la CLFC una empresa suministradora de energía, en que la continuidad del servicio toma un papel muy importante por el suministro a cargas importantes como son el Sistema de Transporte Colectivo Metro, Hospitales, Centros Comerciales, Industrias, Centros Habitacionales, etc., toma un altísimo interés y preocupación

las fallas por explosión de los fusibles, ocurridos de acuerdo a la estadística de la Tabla No. 1 mostrando de marzo de 1982 a diciembre de 1984, alrededor de 20 casos (fallas 30 y 10 que reflejan 45 explosiones de fusibles y tres percutores de fusibles sin operar) algunos de ellos catastróficos, por las pérdidas materiales y los costos de labor que representa el restablecimiento de alimentación de energía.

Debido a la variedad de las cargas que representan los casos antes citados, se enfoca el presente trabajo a las fallas ocurridas en las instalaciones de acometida a los puestos de rectificación (P.R.) del Sistema de Transporte Colectivo Metro, que alimentan básicamente al sistema de tracción de los convoyes, mostrando en la figura 1, formado por dos circuitos. Uno en el que se encuentra instalado un transformador trifásico de 25 KVA, 23 KV -220/127V, protegido en el lado primario por fusibles limitadores de corriente de 2 amperes nominales, cuya función es alimentar los servicios propios del P.R. y el otro circuito, alimenta a un transformador de 4515 KVA, 23 KV-570 V, el cual está protegido por un interruptor en pequeño volumen de aceite, que suministra energía a los equipos de rectificación, que a su vez alimentan a las vías de tracción.

## 2.1.- DEMANDA DE ENERGIA.

De acuerdo a la información proporcionada por COVITUR a CLFC, la corriente que demandan los motores de tracción de un tren del Metro, alcanza una magnitud máxima de 1300 amperes a 720 volts de C.D., la cual se aplica gradualmente en forma tal, que dicho valor se alcanza siete segundos después de haberse conectado la carga, manteniendo esa magnitud durante 18 segundos, para volver a reducirse nuevamente. El valor correspondiente de la corriente en el lado de 570 volts de C.A. es de 1652 amperes, la cual referida al primario del transformador, equivale a 40.7 amperes en 23 KV. Sin embargo, con el objeto de complementar esta información, se recurrió al análisis de la carga máxima registrada en 23 KV durante 48 y 49 días en el P.R. Coyoacán y P.R. Miguel Angel de Quevedo respectivamente, efectuándose en este último en forma adicional mediciones de corriente máxima transitoria en 23 KV, durante dos días y en las horas de mayor flujo de trenes, indicadas en la Tabla No. 2 y Fig. 2.

En ambos casos, se observa que la probabilidad de que en periodos como los indicados se presenten las magnitudes máximas de 142 amperes en el P.R. Coyoacán y de 123.4 amperes en el P.R. Miguel Angel de Quevedo es del 2.04% y 2.08% respectivamente.

## Medición de corrientes transitorias en 23 KV.

Con objeto de definir con exactitud el perfil de la demanda en valores de corriente, desde que un tren o trenes inician su marcha en forma coincidente (caso más crítico), se registraron lecturas de corriente transitoria por medio de un oscilógrafo Honeywell y galvanómetro de 0 a 10 KHZ de ancho de banda, cuyos resultados se indican en tablas 3 y 4.

De los oscilogramas obtenidos como el mostrado en la fig. 3, se observó que en ningún caso, se obtuvieron corrientes instantáneas de alta magnitud, sino más bien de incremento gradual con una duración en los picos de la corriente transitoria de un segundo o menor.

De lo anterior se puede concluir que las magnitudes máximas de corriente de carga registradas, no sobrepasan la capacidad nominal de los fusibles de 160 amperes y por tanto, estos las deben soportar satisfactoriamente.

## 2.2.- SELECCION DE LA CORRIENTE NOMINAL DE LOS FUSIBLES.

Como se indicó anteriormente, la carga principal de un puesto de rectificación (P.R.) esta constituida por un transformador de 4515 KVA, por lo cual la selección de la capacidad de los fusibles limitadores de corriente del tipo de respaldo para la protección contra corto circuito a instalarse en el lado de 23 KV, está en función de las características de la carga, que en este caso son:

- a).- La magnitud de la corriente normal del circuito.
- b).- Las posibles sobrecargas.
- c).- La corriente transitoria de magnetización del transformador.

La selección de la corriente nominal de los fusibles, considerando la corriente nominal en estado permanente se basa en el valor promedio de corrientes de magnitud igual a 40.7 amperes en promedio que se presentan en los P.R. del Metro. La magnitud y duración de la corriente transitoria de energización del transformador del P.R., cuya capacidad es de 4515 KVA con impedancia del 12%, y el cual se energiza una sola vez diariamente dependen de los siguientes factores:

El valor instantáneo de la tensión de alimentación en el momento en que es energizado.

El flujo residual en el núcleo.

La impedancia de la fuente.

La resistencia del devanado.

Las características constructivas del transformador.

La curva de saturación del material de que está hecho el núcleo.

La condición más desfavorable que se presenta para los fusibles de protección primaria, ocurre cuando dicha corriente alcanza su valor máximo, que en el caso de los transformadores de potencia, se considera entre 8 y 10 veces su corriente nominal.

Sin embargo, desde el punto de vista de estadística, la probabilidad de que si se presenten corrientes de esa magnitud es muy baja.

Ahora bien, considerando el caso extremo de que durante la conexión del transformador se presenten con elevada frecuencia corrientes transitorias de magnetización severas, se puede conocer la relación entre la curva corriente-tiempo de operación del fusible y la curva de magnetización-tiempo del transformador, aplicando el criterio ampliamente utilizado, mostrado en la Tabla No. 5.

La curva obtenida debe quedar a la izquierda de la curva de operación del fusible escogido, desplazada hacia su izquierda al 75% en valores de corriente de sus relaciones corriente-tiempo, con el objeto de considerar el efecto de calentamiento provocado por la corriente de carga permanente y de sobrecargas transitorias.

De lo anterior se concluye entonces que desde el punto de vista del efecto de la corriente transitoria de magnetización del transformador, los fusibles adecuados son de 160 amperes, tal como se muestra en la figura No. 4.

### 3.- PRUEBAS REALIZADAS.

#### 3.1.- Corto circuito.

Estas pruebas se realizaron en los laboratorios de IREQ Canadá, con el objeto de conocer la respuesta de los fusibles cuando se les aplican corrientes de corto circuito, siguiendo el criterio establecido en la Norma IEC - 282.1

Se realizaron las siguientes series:

Serie 1: Capacidad interruptiva.

Serie 2: Capacidad de soporte de la máxima energía de arco.

Serie 3: Corriente mínima de interrupción.

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas: 6, 7 y 8.

De los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

Ensayo de corto circuito, series 1 y 2

- Fusibles de 6 amperes nominales.

Operan satisfactoriamente durante la prueba de verificación de su capacidad interruptiva, sin embargo, fallaron en la prueba de máxima energía estimando que esto ocurre porque su o sus elementos sensibles a la corriente (alambre redondo de plata electrolítica) responden básicamente a las variaciones de corriente, o sea que a menor cantidad de puntos de ruptura por la aplicación de una corriente de magnitud mas reducida, la presión que se acumula en la vecindad de los mismos, aumenta la susceptibilidad de falla por explosión.

- Fusibles de 25 amperes nominales.

Operan satisfactoriamente en todos los niveles de

corrientes de corto circuito, entre la corriente que produce la máxima energía de arco y la correspondiente a su capacidad interruptiva.

-Fusibles de 100 amperes nominales.

Este fusible falla en su respuesta al corto circuito en el rango comprendido entre los niveles de la serie 2 a la serie 1, deduciéndose que sus características constructivas no son capaces de soportar la energía de arco producida

Causas de falla.

- Espesor no uniforme del tubo.- Del análisis físico realizado a los fusibles, se encontró una diferencia en los espesores de la pared del tubo, que se traduce en una reducción de su resistencia mecánica, a los esfuerzos provocados por la presión interior que se genera durante la operación.
- Escasez de arena.- La falta de llenado total de la cámara del fusible con arena, durante el proceso de manufactura, se traduce en que al no tener presente arena extintora del arco, los estabones fusibles quedan al descubierto creciendo exageradamente la longitud del arco, hasta alcanzar la parte metálica interior de los contactos. Esto da lugar a un arqueo sostenido que provoca la falla posterior del fusible por explosión.
- Huellas de humedad.- En algunos fusibles, se han encontrado huellas de humedad, por lo que si ésta se encuentra frecuente en los fusibles que se someten a pruebas de sobrecorriente, pueden fallar explotando, debido al incremento de la presión en el interior del fusible, debido al vapor sobrecalentado que se genera durante el período de arqueo.

### 3.2.- Elevación de temperatura.

Esta prueba se realizó en el laboratorio del IIE, cuyo objeto es verificar su comportamiento a la aplicación de su corriente nominal en las condiciones prescritas en la Norma IEC 282.1.

Para la realización de esta prueba se utilizó un circuito formado por una fuente de alimentación en B.T. y una resistencia para la regulación de la corriente de prueba, en serie con los fusibles. Las terminales de los fusibles se conectan al circuito de prueba, de acuerdo a la Norma.

El ensayo se realizó en dos fusibles de 100A, a los cuales se les hizo circular su corriente nominal, hasta alcanzar una temperatura constante, lográndose cuando no hay una variación mayor de 1 °C por hora, en cualquiera de los puntos de medición.

Para la detección de la temperatura se utilizaron once termómetros, de los cuales cada fusible tenía colocado cinco en las posiciones que se muestran en la figura No. 5.

Las temperaturas medidas en el transcurso de la prueba y las gráficas obtenidas, se muestran en la tabla No. 9 y en las figuras No. 6 y 7.

De la tabla y gráficas anteriores, se observa que la temperatura máxima registrada, rebasó la magnitud máxima de 65 °C (sobre el ambiente) en los contactos superior e inferior, permitida por la Norma.

El incremento de temperatura anormal en los contactos de los fusibles, es el resultado de la escasa superficie de contacto entre las tapas interiores (superior e inferior) y la presión que ejercen sobre ella los tornillos de sujeción, de tal forma que si se tiene una escasa disipación de calor, variarán las características plásticas y elásticas del material, incrementándose la oxidación de las superficies con el consiguiente incremento de la resistencia. De esta forma ocurre la degradación acelerada de las propiedades mecánicas y eléctricas de las cintas fusibles, hasta llegar posiblemente a su destrucción total.

### 3.3.- Ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Estas pruebas no están especificadas en la Norma IEC 282.1, pero se conceptuaron para determinar las variaciones en la temperatura de los contactos metálicos y en el tubo de cerámica de los fusibles, realizándose estas pruebas en el laboratorio del IIE.

Se probaron cuatro unidades fusibles de 160A en total, clasificados como de dos tipos: largos y cortos, mostrándose los resultados en la tabla No. 10.

Nota: Los periodos de calentamiento (aplicación de la corriente nominal) y de enfriamiento (no aplicación de corriente) fueron de 4.5 horas cada uno correspondientes a la constante térmica de ambos tipos de fusibles.

De la tabla No. 10 se observa que 3 muestras explotaron, debido a la presión tan alta generada en el interior, la cual no pudo ser soportada por los tubos de cerámica.

En todos los casos, la temperatura alcanzada, fue superior a la máxima permitida de 65° C, siendo su variación desordenada con tendencia al incremento, observándose en 3 unidades la mayor temperatura en los contactos inferiores.

Una vez realizadas las pruebas, se analizaron los fusibles de 160 amperes, que están formados por cinco cintas de plata electrolítica conectadas en paralelo entre sí y devanadas en forma espiral sobre la araña del mismo. En paralelo a dichas cintas se tiene un alambre de acero, cuya función es retener el percutor alojado en el contacto superior.

De la observación se determinó que algunas cintas estaban muy tensionadas y en otras desoldadas del contacto interior, debido al efecto de dilatación y contracción. Así mismo se encontró huellas de arqueado incipientes en el punto de contacto, presentándose en una cinta un color amarillento, impregnada con arena en toda su longitud, por lo que se deduce que condujo corriente durante al menos un ciclo de aplicación de corriente, lo que implica una deficiencia en la manufactura.

#### 3.4.- Variación porcentual de la resistencia eléctrica de un fusible.

Con el objeto de soportar adecuadamente las conclusiones obtenidas en esta investigación, se llevaron a efecto los siguientes estudios y mediciones adicionales en una unidad fusible de 160A, debido a la variación de su resistencia eléctrica por fusión o rotura parcial o total de una (s) cinta (s) fusibles.

Obtenidas en esta investigación, se llevaron a efecto los siguientes estudios y mediciones adicionales en una unidad fusible de 160A, debido a la variación de su resistencia eléctrica por fusión o rotura parcial o total de una (s) cinta (s) fusibles.

Del análisis químico del material (plata electrolítica) de las cintas fusibles y sus dimensiones, se determinó el valor de la resistencia eléctrica en estudio, encontrándose un valor de  $R = 7588.85 \times 10^{-6}$

Cuando de una cinta, se rompe o funde un puente, permaneciendo las cuatro restantes en forma íntegra, se obtiene un nuevo valor de resistencia  $R = 7591.3396 \times 10^{-6}$  que implica un incremento porcentual  $R = 0.033\%$ .

Ahora bien cuando en una cinta, se rompen o se funden tres puentes en serie, estando íntegras las cuatro restantes, el valor de resistencia es  $R = 7596.3018 \times 10^{-6}$ , que implica un incremento potencial  $R = 0.982\%$ .

Estas variaciones indicadas, son muy difícilmente perceptibles aún con un doble puente de Kelvin.

Entonces, bajo la condición de la apertura de uno o más puentes en serie en una de las cintas de plata, el fusible no es capaz de conducir su corriente nominal y eventualmente falla por calentamiento.

Considerando ahora el caso de la rotura o fusión de dos puentes en paralelo de una cinta, el incremento porcentual de la resistencia del fusible, es de  $R = 25\%$  y la reducción aproximada de su capacidad de conducción es de 160 a 128 amperes. En este caso, cuando el fusible se le aplica su corriente nominal, la falla por calentamiento ocurre en un tiempo bastante corto.

#### 4.- Análisis metalográfico y morfológico del elemento fusible.

En las pruebas de elevación de temperatura a unidades fusibles de 160 A nominales, se observó que al apuclarles su corriente nominal en estado estable, la temperatura estable en los contactos superior e inferior y en-

el centro de la unidad fusible, era mucho mayor que la temperatura máxima permitida por la norma IEC-282-1.

Lo anterior implica que en el interior del fusible se generan temperaturas elevadas que traen como consecuencia variaciones fuertes en las propiedades eléctricas y mecánicas de los elementos fusibles (cintas de plata - electrolítica), provocando fracturas intercristalinas y fusión parcial de los mismos. El mecanismo de degradación y fractura de las cintas de plata es el siguiente:

Al aplicar una corriente eléctrica a la unidad fusible, el factor principal que gobierna la velocidad con que se mueven los límites cristalinicos es la temperatura.

El crecimiento de los cristales es función de la elevación de temperatura y se inicia con la recristalización primaria en la que se desarrollan nuevos granos a expensas de una matriz menos perfecta, continuando creciendo a base de comerse la matriz deformada que los rodea adoptando formas más o menos regulares, hasta entrar en contacto unos con otros; en este momento termina esta fase y se entra a la fase de crecimiento de los granos y recristalización secundaria.

A temperaturas altas y en condiciones de deformación bajas, los límites de grano pierden su resistencia con mayor rapidez que los cristales provocando fracturas en el metal, las cuales corren a lo largo de los límites de los granos.

La plata tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras y al ser sometida a una elevación de temperatura tiende a recristalizarse, al aumentar la temperatura, el tamaño del grano crece y a temperaturas mayores a la de recristalización, el material tiende a formar maclas y cristales de gran tamaño, provocando debilitamiento de sus propiedades físicas y mecánicas, originadas por la formación de múltiples fisuras orientadas en una dirección sobre el límite de los granos, terminando finalmente en la fractura de la sección transversal mínima.

Se realizó un análisis morfológico de muestras de cintas de plata, figura 8, mediante el cual se observó el daño que sufrió el material debido al calentamiento producido por la corriente eléctrica. En la micrografía mostrada en la figura No. 9, se observan ondulaciones en la superficie del metal lo cual indica que se presentó un calentamiento superficial que alcanzó un punto de fu-

sión y que al enfriarse dejó esta característica morfológica. En algunos puntos se ve que las ondulaciones tienen diferente orientación, debido a que se presentaron gradientes de calor diversos sobre cada uno de los cristales provocando con ello la fractura del grano a lo largo de los límites de los granos. En las figuras No. 10 y 11 se observa que en las secciones transversales (mínima y media) se formaron grietas; se puede decir que éstas pasan a lo largo del límite de grano, ocasionando así la fractura total de la sección transversal, figura No. 12.

En la figura No. 13, se puede apreciar el redondeamiento de las aristas del listón a la altura de la perforación, originada por la concentración de más calor en esos puntos (fusión parcial).

## 5.- ANALISIS DE LAS CAUSAS DE FALLA

### 5.1.- Calentamiento excesivo.

En todos los fusibles de 160 amperes nominales que se probaron en elevación de temperatura y en ciclos de calentamiento-enfriamiento, se rebasó la temperatura máxima permitida, y en los casos más críticos explotaron sin haber alcanzado el equilibrio térmico.

En función de los resultados obtenidos, se puede explicar porqué algunos fusibles que se retiraron de la red sin presentar huellas de operación por corto circuito, explotaron, o bien porqué la mayoría de los fusibles de alta corriente nominal fallaron en las pruebas de la serie 3 de la Norma IEC 282-1.

#### 5.1.1.- Fuentes generadoras de calor.

En la revisión detallada de los componentes de los fusibles en estudio se analizaron aquellas partes que siendo independientes entre sí, hacen contacto una con otra a través de cualquier medio.

Se tiene que la araña aislante interior al fusible, cuenta con dos tapas interiores de cobre con acabado plateado en las que se fijan los eslabones fusibles. A su vez estas tapas se fijan a otras tapas interiores que hacen contacto por presión con las tapas exteriores, por medio de dos tornillos en cada extremo. En la figura No. 14 se representa la unión que se describe.

En las pruebas de elevación de temperatura aplicando la

corriente nominal, se observó que la temperatura que se alcanza en los contactos exteriores rebasa el valor permitido de 65 °C en la siguiente forma:

Corriente nominal del fusible	INCREMENTO DE TEMPERATURA EN °C	
	Contacto superior	Contacto inferior
100 A	3.10	6.76
160 A	18.72	27.00

Los resultados anteriores acusan lo siguiente:

El calor generado se disipa con mayor rapidez en el contacto superior, lo cual es anormal, ya que estando el fusible instalado en posición vertical con el percutor hacia arriba, el contacto superior se debe calentar más debido a la transmisión de calor por convección.

Se observa que la superficie de contacto en cada par de tapas es escasa y esta formada por un anillo de dimensiones bien definidas, suponiendo que la presión que ejercen los tornillos es constante. Este anillo de contacto (figura No. 15) queda bien definido ya que las superficies que no estuvieron en contacto muestran una coloración oscura provocada por la oxidación debida al calentamiento excesivo.

El incremento de la resistencia de contacto en los puntos de contacto efectivo que forman el anillo es:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi n a} \operatorname{ang} \tan \frac{\sqrt{2-a^2}}{a} - 0.6 \rho \frac{\sqrt{2-a^2}}{A n}$$

en donde:

Los factores que afectan la magnitud de la resistencia de contacto  $R_c$ , son:

La fuerza aplicada.

En este caso, su magnitud queda determinada por el par de apriete aplicado y el efecto de fijación ejercido por las roldanas de presión utilizadas. No existe deformación elástica-plástica.

La variación (disminución) de la fuerza aplicada se debe al efecto de dilatación-contracción causado por los

ciclos de calentamiento-enfriamiento a los que queda sometido el fusible durante su operación en estado estable estando instalado en la red.

Durante el período de calentamiento se puede provocar el flujo del material aumentando así la superficie de contacto y reduciendo  $R_c$ , pero como los tornillos no se pueden respresar se aumenta la corrosión y por tanto  $R_c$ .

El contacto entre las dos tapas opone una resistencia  $R$  o la corriente  $I$  de estado estable que a su vez origina un efecto joule igual a  $R I^2 t$ .

La corrosión.

A la temperatura generada en los contactos, el recubrimiento de plata se recubre de capas de óxidos o sulfuros, con espesores de alrededor de 30 Å, lo cual implica que  $R_c$  se incrementa.

Si el calor generado es de alta magnitud ocurre que:

Los materiales se recocen o funden

Las reacciones químicas se aceleran.

La temperatura generada se puede calcular con la siguiente expresión.

$$T_f = \sqrt{\frac{U^2}{4L} + T_0^2}$$

en donde:

$L$  = constante de Wiedemann Franz.

$$L = \frac{\sigma \rho}{T} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma = \text{Conductividad Térmica} \\ \rho = \text{Resistividad} \\ T = \text{Temperatura en } ^\circ\text{K} \end{array} \right.$$

$$L = 2.4 \times 10^{-8} \left( \frac{V}{^\circ\text{K}} \right)^2 \text{ para metales puros.}$$

$T_f$  = Temperatura buscada

$T_0$  = Temperatura ambiente (239°K)

$U$  = Caída de tensión en los bornes (Volts)

- Repulsión electrodinámica.

Puesto que las líneas de corriente se cierran en los puntos de contacto, se genera una fuerza de repulsión expresada por:

$$F = 10^{-7} I^2 \ln \frac{A}{r} N$$

$I$  = corriente

$A$  = radio de banda de contacto (ancho del anillo)

$r$  = radio del punto del contacto.

Puesto que es difícil calcular  $r$  se puede establecer que:

$\ln \frac{A}{r}$  varia generalmente entre 5 y 10

### 5.1.2.- EFECTOS EN LOS ESLABONES FUSIBLES DEL CALOR GENERADO EN LAS TAPAS INTERIORES.

Las altas temperaturas generadas, traen como consecuencia el cambio de las propiedades mecánicas y eléctricas de las cintas fusibles. La resistividad del material se incrementa y su ductilidad se reduce substancialmente hasta llegar a la fusión parcial y la fractura o rotura del material.

Bajo estas condiciones, los fusibles fallan al aplicarseles su corriente nominal desarrollando altas temperaturas en los puntos de rotura o fusión parcial, los cuales al no estar distribuidos uniformemente en todo el volumen interior de la cámara del fusible provocan la generación de altas presiones que eventualmente los hacen explotar.

Una característica de los eslabones fusibles en estudio, que favorecen su degradación es el descentramiento de sus perforaciones, ver figura No. 16.

La cantidad de corriente que circula por cada puente es inversamente proporcional a su resistencia, es decir, que por el puente 1 circula una corriente menor y por tanto el efecto joule  $I_1^2 R_1$  será menor.

Sin embargo, bajo condiciones de aplicación de corriente en estado estable, en una región dada del eslabon fusible en el interior del fusible la temperatura se uniforma y es por tanto necesario considerar la capacidad térmica de cada puente.

Para el puente 1 se tiene:

$$CT_1 = mCe S_1 dx \frac{dT}{dx}$$

Para el puente 2:

$$CT_2 = mCe S_2 dx \frac{dT}{dx}$$

en donde:

$m$  = Densidad del material empleado en  $g/cm^3$

$Ce$  = Calor específico del material en  $\frac{\text{watts-seg}}{gr \text{ } ^\circ C}$

$dx$  = Longitud de cada puente

$\frac{dT}{dx}$  = Variación de la temperatura con respecto a  $x$ .

$S_1$  y  $S_2$  = Area de la sección transversal de cada uno de los puentes

puesto que:  $S_2 > S_1 \Rightarrow CT_2 > CT_1$

En consecuencia, el puente 1 tiene menor capacidad para soportar el calor generado y el almacenado en su masa.

Antes de alcanzar el estado estable se tiene que

$\frac{dT}{dx} \neq 0$  y las ecuaciones de equilibrio térmico son:

$$CT_1 = mCe S_1 dx \frac{dT}{dx} = \frac{I_1^2 \rho dx}{S_1} + KS_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx - \frac{T}{\theta} dx$$

$$CT_2 = mCe S_2 dx \frac{dT}{dx} = \frac{I_2^2 \rho dx}{S_2} + KS_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx - \frac{T}{\theta} dx$$

$\frac{T}{\theta} dx$

La capacidad térmica  $CT$  no es función únicamente del término  $I^2 dx \frac{\rho}{S}$  sino que esta afectada por la conducción axial y la disipación superficial que depende de la resistencia térmica de los materiales por unidad de longitud.

Cuando la temperatura generada rebasa mas de  $80^\circ C$ , la disipación superficie ya no es lineal sino que obedece a la ley de Stefan-Boltzmann.

## 5.2.- Fallas de corto circuito.

Además de las fallas provocadas por calentamiento excesivo, de los fusibles de 100 y 160 amperes nominales cuando a estos se les aplica su corriente nominal en circuitos de prueba de baja tensión y aproximadamente 2 veces aquella en pruebas a su tensión nominal, se han detectado fallas cuando se les aplican corrientes de corto circuito de magnitud comprendida entre el 30% de su capacidad interruptiva y el 100% de la misma.

### 5.2.1.- Las causas principales de falla que se determinaron son:

- La escasez de arena en la cámara del fusible, que implica el arqueo de otras partes metálicas diferentes a las cintas fusibles con el consiguiente incremento de presión interior.
- La presencia de humedad en la arena extintora del arco lo cual se traduce en un incremento adicional de la presión generada.
- La variación en el espesor de los tubos de cerámica empleados, principalmente en la parte central del cuerpo del fusible, lo cual origina que su resistencia mecánica a la componente radial de la presión generada no sea uniforme.

### 5.2.2.- Presión generada en el interior del fusible.

En este tipo de fusibles, la atmósfera en la columna de arco, se deriva de la evaporación del elemento fusible y de la ablación de la pared de relleno, desde su superficie interna hacia afuera.

La presión en la pared del tubo aislante difiere de la presión en la columna del arco, debido a las propiedades mecánicas del relleno.

Como resultado de la geometría cilíndrica, se establece la siguiente igualdad.

$$\left( \frac{P_c}{P_a} \right) = \left( \frac{r_a}{r_c} \right)^{r-1} \quad \text{en donde}$$

$r (< 1)$  es una constante para la arena.

$P_c$  = presión en el tubo aislante.

$P_a$  = presión en la columna de arco.

$r_a$  = radio de la columna de arco.

$r_c$  = radio del tubo aislante.

## 6.- CONCLUSIONES.

### 6.1.- Características de la carga del Metro.

Se encontró que las magnitudes de la corriente de carga tanto en estado estable como transitorio no rebasa la corriente nominal de los fusibles limitadores de corriente de 160 A empleados.

### 6.2.- Selección de los fusibles.

En el caso de los puestos de rectificación en donde se localiza la mayor carga instalada, se aplica el factor 1.8 a la corriente de carácter permanente del circuito y no a la nominal del transformador ya que se ha demostrado de que la probabilidad de que se presenten altas corrientes de magnetización es muy baja.

### 6.3.- Operación por corto circuito.

Tanto en pruebas de laboratorio como durante la operación de los fusibles en la red se comprobó que los fusibles de 100 y 160 A no pasan las pruebas estipuladas en la Norma IEC 282.1.

### 6.4.- Elevación de temperatura.

Los fusibles en estudio, tampoco satisfacen los requisitos de la Norma IEC 282.1. En la investigación realizada se encontró que la corriente nominal real de los fusibles de 160 amperes es de 135 amperes.

### 6.5.- Diseño y manufactura.

Se encontró que la superficie de contacto entre las tapas interiores que llevan soldadas las cintas fusibles y las tapas correspondientes alojadas en los contactos superior e inferior es muy escasa, condición que favorece el calentamiento excesivo.

Además se encontraron otras deficiencias tales como:

Escasez de arena en la cámara del fusible.

Presencia de humedad en la arena de cuarzo.

Variación en el espesor del tubo de cerámica.

Descentramiento de algunas perforaciones en las cintas fusibles.

Todos estos defectos de diseño o manufactura, contribuyen en mayor o menor grado a la falla de los fusibles en estudio.

## BIBLIOGRAFIA

- (1).- Westinghouse Electric Corp. "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", chapter 5, page 126.
- (2).- Greenwood A. "Electrical Transients in Power Systems", Wiley Interscience, March 1970, página 91, capítulo 5.
- (3).- Avila R. A. "Defauts des fusibles limiteurs de courant" Electricite de France, HM51-1-984 MA/TL, marzo 1980.
- (4).- Huber F. "Courant d'enclenchement dans les transformateurs de distribution" Revue Brown Boveri, Tome 52, No. 11/12 pp 903-915.
- (5).- Huber W.J. "Transformer Inrush considerations for current limiting fuses", IEEE PES, Summer and Energy Resources Conf. Anaheim C L., July 14-19, 1974. C. Paper 74 386.9.
- (6).- ANSI Standard C 37.48-1969, " Guide for application, operation and maintenance of distribution cutouts and fuse links, secondary fuses distribution enclosed single pole air switches, power fuses, fuse disconnecting switches and accesories".
- (7).- Mikulecky HW., "Current Limiting fuse arc-voltage characteristics", IEEE trans. Power Apparatus and Systems, Paper 31 TP 67-136.
- (8).- Turner H.W. and Turner C., "Phenomena occurring during the extinction of arc in fuses", Electrical Research Association, Leatherhead, England.
- (9).- Holm: R.. "Electric Contacts", fourth edition Springer Verlag chapters 4 and 5 of part I.
- (10).- Cress S. L. "Electro-Thermal damageability of fusibles elements", International Conference on Distribution fuses IREQ-Montreal. November 1981
- (11).- Tanaka T. Homoshima H. Takzoka N. Fguchi I. Watanabe A. Sekine C., "Metalographic study of dual type current limiting fuse element", IEEE transaction on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS- 101, No. 6 june 1982.
- (12).- Held W., Pollmeir F.J., "Internal fuses in modern high voltage capacitors", Electra Review, pp. 33-47,1974.
- (13).- IEC Standard 282.1-1985" High voltage fuses, Part 1: Current limiting fuses".
- (14).- ESTUDIO DE FUSIBLES DE DISTRIBUCION. PRO YECTO C.L.F.C.-IIE 1985.

FALLA NO	TIPO FALLA	FECHA	CORRIENTE NOMINAL DEL FUSIBLE	NO DE FUSIBLES EXPLOTADOS	TIPO DE DAÑO EN EL FUSIBLE
1	3Ø	25-03-82	160A	3	EXPLOTO
2	2Ø	05-11-82	160A	2	EXPLOTO
3	2Ø	29-11-82	160A	2	EXPLOTO
4	2Ø	11-12-82	160A	2	EXPLOTO
5	2Ø	05-01-83	160A	2	EXPLOTO
6	3Ø	20-06-83	160A	3	EXPLOTO
7	3Ø	22-07-83	160A	3	EXPLOTO
8	3Ø	22-07-83	160A	3	EXPLOTO
9	3Ø	08-08-83	160A	3	EXPLOTO
10	2Ø	11-10-83	160A	2	EXPLOTO
11	3Ø	15-12-83	160A	3	EXPLOTO
12	3Ø	25-12-83	160A	3	EXPLOTO
13	3Ø	26-12-83	160A	3	EXPLOTO
14	1Ø	31-12-83	160A	1	EXPLOTO
15	3Ø	22-02-84	160A	3	EXPLOTO
16	2Ø	02-05-84	160A	2	NO OPERO PERCUTOR
17	1Ø	17-06-84	160A	1	NO OPERO PERCUTOR
18	2Ø	14-08-84	160A	2	EXPLOTO
19	3Ø	05-09-84	160A	3	EXPLOTO
20	2Ø	23-12-84	160A	2	EXPLOTO

TABLA Nº 1 ESTADISTICA DE FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE FALLADOS EN LA RED SUBTERRANEA DE 23 kV.

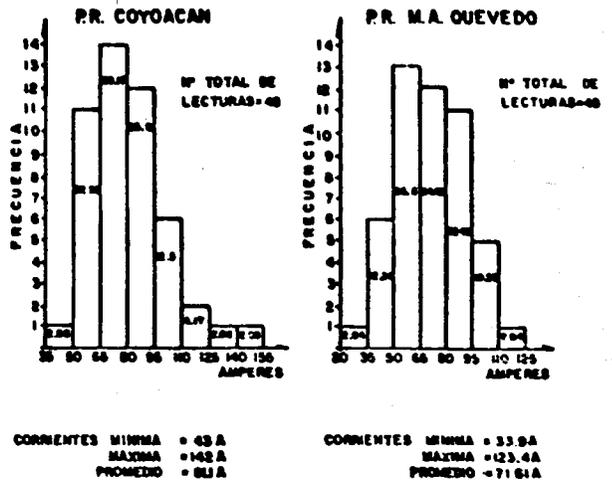


FIG Nº 2 DISTRIBUCION DE LA DEMANDA MAXIMA DE CORRIENTE EN P.R. DEL METRO.

FECHA	P.R. COYOACAN		P.R. M.A. QUEVEDO		FECHA	P.R. COYOACAN		P.R. M.A. QUEVEDO	
	HORA	CORR. MAX.	HORA	CORR. MAX.		HORA	CORR. MAX.	HORA	CORR. MAX.
01-I-84	18:00	55.6A	17:00	61.3A	01-II-84	11:00	116.8A	10:00	97.8A
02-I-84	10:00	73.8A	19:00	57.8A	02-II-84	9:00	142.3A	20:00	107.0A
03-I-84	20:00	105.4A	16:00	61.5A	03-II-84	20:00	91.6A	13:00	49.4A
04-I-84	7:00	104.8A	-----	-----	04-II-84	21:00	82.3A	8:00	82.4A
05-I-84	6:00	66.7A	18:00	56.7A	05-II-84	13:00	68.2A	19:00	33.9A
07-I-84	8:00	88.4A	21:00	39.2A	06-II-84	12:00	68.5A	16:00	82.0A
08-I-84	13:00	63.2A	-----	-----	07-II-84	18:00	55.3A	8:00	65.2A
09-I-84	13:00	55.6A	20:00	57.4A	08-II-84	20:00	86.1A	10:00	75.5A
10-I-84	12:00	109.8A	17:00	89.6A	09-II-84	19:00	89.0A	14:00	64.8A
11-I-84	12:00	62.1A	11:00	83.0A	10-II-84	22:00	96.6A	8:00	86.5A
12-I-84	21:00	86.7A	-----	-----	11-II-84	7:00	53.3A	10:00	73.8A
13-I-84	13:00	75.0A	8:00	91.9A	12-II-84	16:00	69.1A	16:00	43.1A
14-I-84	15:00	91.6A	19:00	49.0A	13-II-84	20:00	79.6A		
15-I-84	21:00	102.8A	9:00	83.2A	14-II-84	15:00	75.2A		
16-I-84	9:00	72.9A	9:00	61.9A	15-II-84	23:00	54.1A		
17-I-84	17:00	102.8A	21:00	104.1A	16-II-84	9:00	94.9A		
18-I-84	11:00	75.8A	20:00	51.5A	17-II-84	20:00	75.8A		
19-I-84	20:00	71.1A	17:00	52.7A	18-II-84	21:00	88.7A		
20-I-84	10:00	111.0A	23:00	76.3A	19-II-84	10:00	43.0A		
21-I-84	22:00	55.0A	13:00	65.8A	20-II-84	13:00	82.0A		
22-I-84	24:00	83.7A	22:00	39.8A					
23-I-84	17:00	75.8A	15:00	69.1A					
24-I-84	20:00	62.9A	12:00	101.5A					
25-I-84	17:00	78.2A	14:00	78.5A					
26-I-84	19:00	93.7A	17:00	57.9A					
29-I-84	13:00	65.2A	19:00	50.7A					
30-I-84	11:00	62.1A	14:00	123.4A					
31-I-84	12:00	127.1A	9:00	60.1A					

TABLA Nº 2.- LECTURAS MAXIMAS DE CORRIENTE EN 23KV CORRESPONDIENTES AL P.R. COYOACAN Y P.R. M.A. DE QUEVEDO.

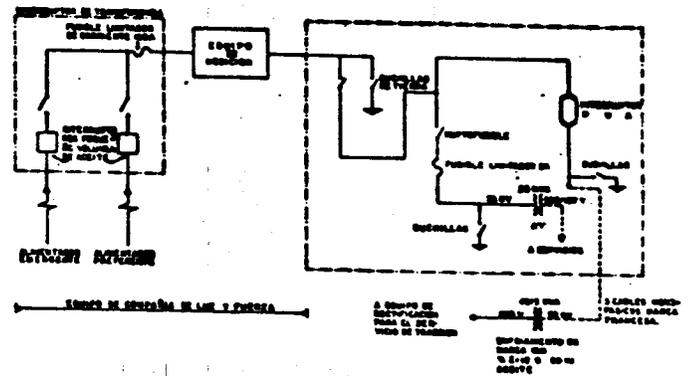


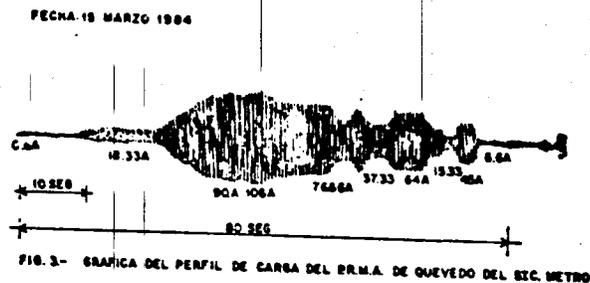
FIG Nº 1 ALIMENTACION AL PUESTO DE RECTIFICACION (PR) DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO

14 de marzo de 1984.		15 de marzo de 1984.	
HORA	CORRIENTE	HORA	CORRIENTE
5:10	82.40A	19:14.5	96.13A
5:14.8	91.20A	19:44.9	111.18A
5:14.9	107.20A	19:15	107.00A
5:30	94.80A	19:54	104.00A
5:41.7	102.00A	19:56.3	103.00A
8:12.9	103.60A	19:58.7	96.80A
8:15	85.00A	20:00	94.80A
8:16.9	99.70A	20:02	95.00A
8:16.6	97.11A	20:03	80.00A
		20:05	83.00A
		20:07.2	93.50A
		20:07.5	97.40A
		20:09.3	92.50A

TABLA N° 3.- MAGNITUDES DE CORRIENTE TRANSITORIA EN EL P.R. M. A. DE QUEVEDO

HORA DE ARRANQUE DE UN TREN	HORA DEL VALOR MAXIMO MEDIDO	CORRIENTE MAX. REGISTRADA
19h 56' 00"	19h 56' 20"	103.0A
19h 58' 43"	19h 58' 50"	96.8A
20h 00' 21"	20h 00' 37"	94.8A
20h 02' 02"	20h 02' 10"	95.0A
20h 04' 06"	20h 04' 22"	78.5A
20h 06' 55"	20h 07' 32"	97.4A
20h 08' 58"	20h 09' 17"	92.5A
20h 09' 43"	20h 10' 37"	87.0A

TABLA N° 4.- MAGNITUDES DE CORRIENTE DE CARGA DURANTE EL ARRANQUE DE LOS TRENES.



Tiempo en segundos	Multiplos de la corriente nominal del transformador
0.01	25 In = 2834 A
0.10	12 In = 1360 A
1.00	6 In = 680 A

TABLA N° 5.- PUNTOS DE LA CURVA DE MAGNETIZACION DEL TRANSFORMADOR DE 4515 KVA

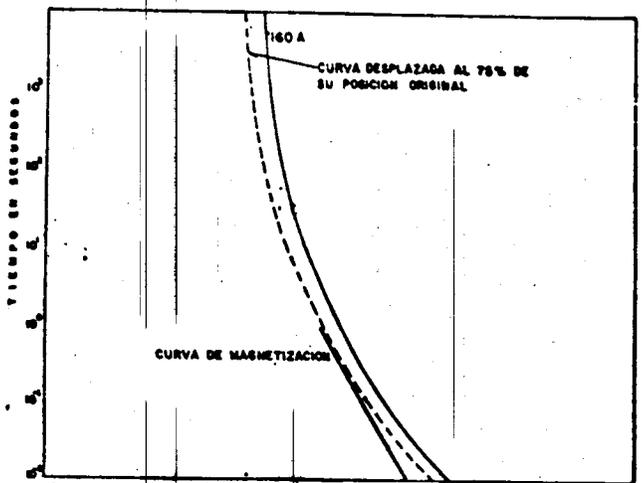


FIG. Nº 4 DETERMINACION DE LA CORRIENTE NOMINAL DEL FUSIBLE

Fusible No	Prueba No	In (Amp)	Capacidad interruptiva KA.	Iprueba KA.	Resultados y comentarios
1-2	6	6	40	40.22	Arqueo a través de las maderas de montaje (falla de montaje IRQ)
3	7	6	40	40.22	Prueba exitosa
4	8	25	40	40.22	Prueba exitosa
5	9	25	40	40.22	Prueba exitosa
6	11	25	40	40.22	Prueba exitosa
7	15	100	25	24.64	Falla por rearqueo, abrió el circuito el interruptor de respaldo.
8	16	100	25	24.64	Similar al anterior.

TABLA Nº 6 SERIE 1: VERIFICACION DE LA MAXIMA CAPACIDAD INTERRUPTIVA

Fusible No	Prueba No	In (amp)	Capacidad interruptiva KA.	Iprueba KA.	Resultados y comentarios
24	36	6	40	1.0182	Falla por rearqueo, ángulo de cierre benigno.
24	37	6	40	1.0182	Similar al anterior.
26	38	6	40	1.0182	Falla por rearqueo.
27	39	25	40	1.0182	Prueba exitosa
28	40	25	40	1.0182	Prueba exitosa
29	41	25	40	1.0182	Prueba exitosa
29A	42	6	40	1.0182	Falla por rearqueo, explotó.
30	45	100	25	8.380	Explotó.

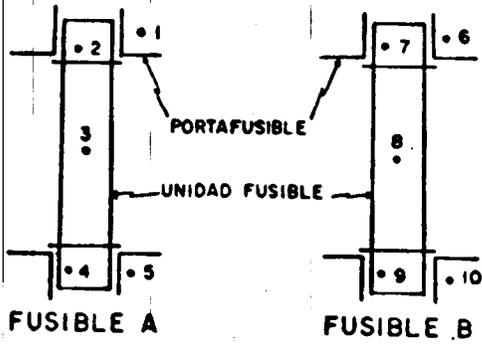
TABLA Nº 7.-SERIE 2: CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA MAXIMA ENERGIA DE ARCO

Fusible No	Prueba No	In (Amp)	Capacidad interruptiva KA.	Iprueba KA.	Resultados y comentarios
44	59	6	40	0.0155	El fusible operó instantáneamente, debiendo haber soportado la corriente durante al menos 100 seg.
48	79	25	40	0.0474	El fusible operó después de 30 min. 30 seg.*
49	80	25	40	0.0474	El fusible operó después de 3 min. 46 seg.*
52	86	100	25	0.1980	El fusible operó después de 8 min. 45 seg.*
53	87	100	25	0.1980	El fusible operó después de 6 min. 35 seg.*

\* En todos los casos, quedó el arco establecido hasta la destrucción del fusible, debiendo abrir el circuito de pruebas el interruptor de respaldo.

TABLA Nº 8.-SERIE 3: CORRIENTE MINIMA DE INTERRUPCION.

TERMOMETRO DEL MEDIO AMBIENTE



Ciclo	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura (°C)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	22	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
3	23	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
4	24	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
5	25	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
6	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
7	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
8	28	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
9	29	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
10	30	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
11	31	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

TABLA Nº 9 - VALORES MEDIDOS DURANTE LA PRUEBA DE ELEVACION DE TEMPERATURA

FIGURA Nº 5 LOCALIZACION DE LOS TERMOPARES EN LA PRUEBA DE ELEVACION DE TEMPERATURA



FIGURA Nº 9 LAS LINEAS ONDULADAS OBSERVADAS EN LA SUPERFICIE MUESTRAN SIGNOS DE FUSION PARCIAL.

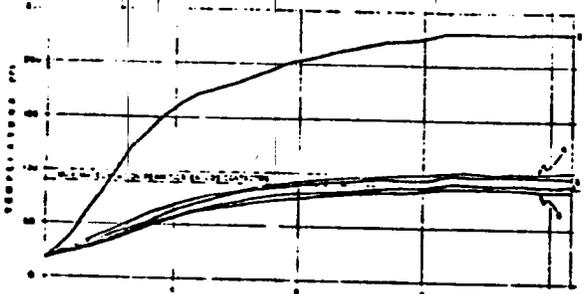


FIG Nº 6 PERFIL DE TEMPERATURA DEL FUSIBLE A

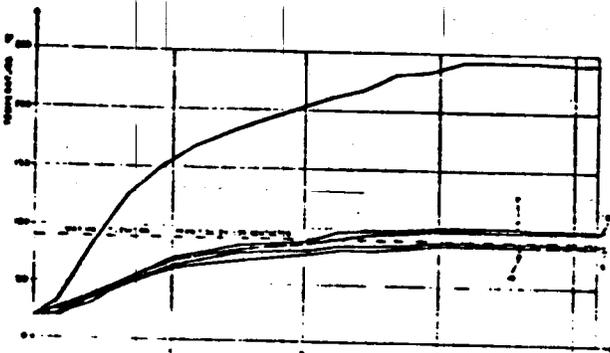


FIG Nº 7 PERFIL DE TEMPERATURA DEL FUSIBLE B

Ciclo	Temperatura y localización	Temperatura (°C)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Puntito corto 1 contacto superior	127.0	128.0	128.0	124.4	113.0	107.2	121.4	119.0	113.0
2	Puntito corto 1 contacto inferior	127.0	128.0	127.0	127.0	123.0	122.0	122.0	119.0	110.0
3	Puntito corto 2 contacto superior	128.0	127.0	123.0	113.0	112.0	112.0	122.0	121.0	119.0
4	Puntito corto 2 contacto inferior	128.0	128.0	121.0	128.0	119.0	116.0	118.0	119.0	111.0
5	Puntito largo 1 contacto superior	127.0	128.0	-	-	-	-	-	-	-
6	Puntito largo 1 contacto inferior	128.0	128.0	-	-	-	-	-	-	-
7	Puntito largo 2 contacto superior	128.0	128.0	121.0	127.0	123.0	124.0	-	-	-
8	Puntito largo 2 contacto inferior	128.0	128.0	121.0	128.0	123.0	123.0	-	-	-

Tabla Nº 10 - MEDICIONES HECHAS EN LOS CONTACTOS DE LOS PUNTIOS

\* Ciclo en el que se aplicó el fusible

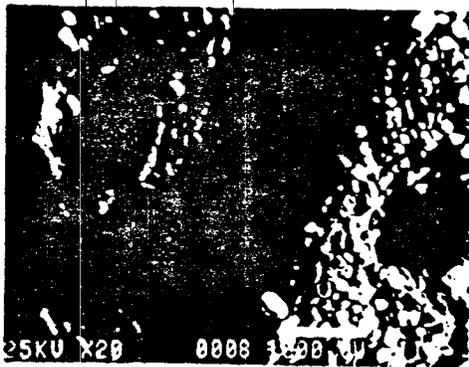


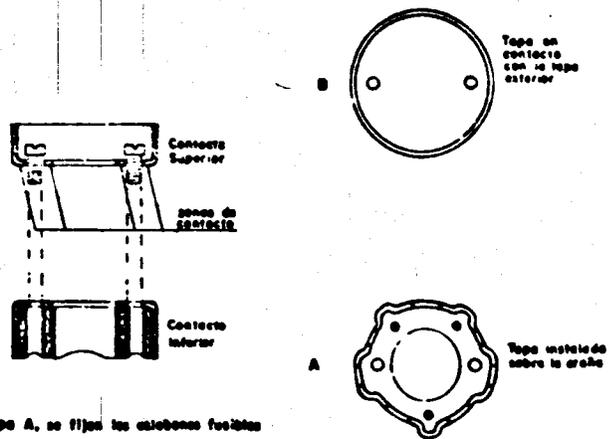
FIGURA Nº 8 VISTA GENERAL DEL ESLABON FUSIBLE DE PLATA (X 20)



FIGURA Nº 10 ORIENTACION DE LAS FISURAS Y FORMACION DE LINEAS ONDULADAS (FUSION PARCIAL) EN DIFERENTES DIRECCIONES POR CADA UNO DE LOS GRANOS (X 330).



FIGURA N°11 VISTA DE UNA SECCION EN DONDE SE APRECIAN LAS GRIETAS SOBRE EL LIMITE DE LOS GRANOS.



En la tapa A, se fijan los eslabones fusibles

FIG. N° 14 Zonas de contacto en cada par de tapas interiores de cobre plateado



FIGURA N°12 FRACTURA EN UNA DE LAS SECCIONES MAS DELGADAS Y UNIDO EL ESLABON SOLO POR LA SECCION AL OTRO EXTREMO.

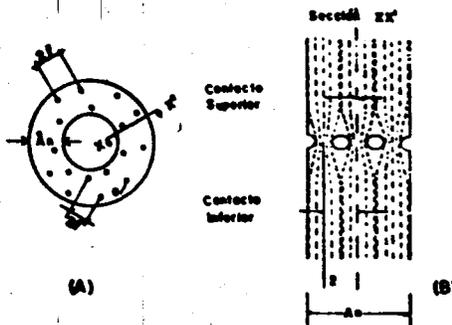


FIG. N°15 Esquemática de los puntos de contacto en el anillo de contacto operante (A) y constitución de las líneas de corriente en los puntos de contacto (B).

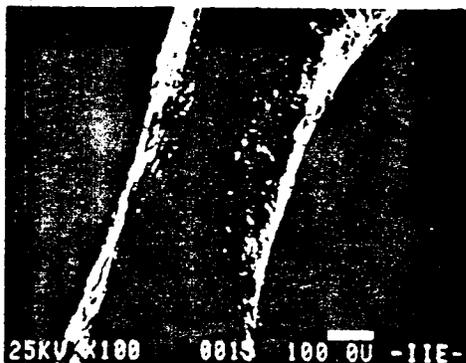


FIGURA N°13 REDONDAMIENTO QUE SUFRE EL MATERIAL EN ESTA SECCION POR LA CONCENTRACION DE CALOR.

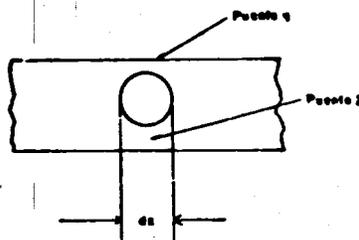


FIG. N°16 Geometría de los eslabones fusibles en estudio

# COORDINACION DE PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES EN TRANS- FORMADORES DE DISTRIBUCION AEREA.

## OBJETIVO

En este estudio se analiza la coordinación adecuada entre fusibles de media tensión (23 kV) e interruptor -- termomagnético en el lado de baja tensión, de transformadores aéreos de distribución de 75 y 112.5 kVA de 23 kV-220/127 V.

## INTRODUCCION

Debido a que actualmente se ha presentado un alto índice de fallas en transformadores aéreos de distribución, originados por: sobrecargas y fallas en la red de baja tensión, se instalarán interruptores termomagnéticos en el lado de baja tensión de los transformadores de 75 y 112.5 kVA localizados en zonas conflictivas.

En este estudio se determinan las combinaciones -- más adecuadas, de fusibles e interruptores termomagnéticos.

## DATOS DEL EQUIPO

a).- Características de los transformadores tipo -- aéreo.

Capacidad: 75 kVA	112.5 kVA
Tensión: 23-0.220/0.127 kV	23-0.220/0.127 kV
Corriente en A.T.: 1.88 A	2.82 A
Corriente en B.T.: 196.82 A	295.2 A
Fases: 3 $\emptyset$	3 $\emptyset$

b).- Características del cortacircuito fusible de potencia de alta tensión.

Cortacircuito: D-23220

Capacidad: 200 A

Tensión: 23 kV  
BIL: 150 kV  
Norma L y F: 2.0161  
Servicio: Intemperie  
Expulsión: Simple  
Marca: S y C  
Catálogo: 92123

c).- Características de los fusibles de potencia en alta tensión.

Fusible tipo SMD-20 o SMU-20.  
Capacidad: 3 A y 6 A  
Tensión: 23 kV  
Capacidad interruptiva: 20 kA (Asim.), 12.5 kA(Sim.)  
Norma L y F: 2.0137  
Marca: S y C  
Velocidad: K  
Catálogo: 543003 o 703003  
543006 o 703006

d).- Características del cortacircuito fusible de baja capacidad interruptiva de alta tensión.

Cortacircuito fusible 23110  
Capacidad: 100 A  
Tensión: 23 kV  
Capacidad interruptiva: 12.5 kA (Asim.), 7.5 kA(Sim)  
BIL: 150 kV  
Norma L y F: 2.0159  
Servicio: Intemperie  
Expulsión: Simple  
Marca: S y C  
Catálogo: 89052R8  
Estilo: U.H.D.

e).- Características de los elementos fusible S y C Positrol.

Elemento: fusible tipo listón

Capacidad: 3A y 6A

Norma L y F: 2.0135

Marca: S y C Positrol

Velocidad: Estandard

f).- Características de los elementos fusibles Electramex.

Elemento: fusible tipo listón

Capacidad: 3A y 6A

Norma L y F: 2.0135

Marca: Electramex

Velocidad: K

g).- Características del interruptor en baja tensión.

Tipo: Termomagnético

Capacidad: 225 y 350 A

Tensión: 600 V max.

Nº de polos: 3

Tipo: LB

Cap. interruptiva: 10 kA

Marca: IEM o similar

Catálogo: 83200600

Valores de energización de los transformadores de 75 y 112.5 kVA, 23-0.220/0.127 kV, tipo aéreo.

Energización	Tiempo en segundos	Corriente de energización	
		75 kVA	112.5 kVA
INRUSH	0.01 s	25In = 47.00 A	25In = 70.50 A
	0.1 s	12In = 22.56 A	12In = 33.84 A
CARGA FRIA	1.0 s	6In = 11.28 A	6In = 16.92 A
	10 s	3In = 5.64 A	3In = 8.46 A

Valores de daño de transformadores de 75 y 112.5 kVA, 23-0.220/0.127 kV, tipo aéreo.

TIPO DE DAÑO	TIEMPO EN SEGUNDOS	VALOR LÍMITE DE CORRIENTE DE DAÑO	
		75 kVA	112.5 kVA
TERMICO	2000 s	2In = 3.76 A	2In = 5.64 A
	300 s	3In = 5.64 A	3In = 8.46 A
	100 s	4In = 7.52 A	4In = 11.28 A
	50 s	5In = 9.40 A	5In = 14.10 A
	35 s	6In = 11.28 A	6In = 16.92 A
	25 s	7In = 13.16 A	7In = 19.74 A
	20 s	8In = 15.04 A	8In = 22.56 A
	15 s	9In = 16.92 A	9In = 25.38 A
	12.5 s	10In = 18.80 A	10In = 28.20 A
	5.8 s	15In = 28.20 A	15In = 42.30 A
	3.3 s	20In = 37.60 A	20In = 56.40 A
2 s	25In = 47.00 A	25In = 70.50 A	
MECANICO	1.5 s	30In = 56.40 A	30In = 84.60 A
	0.8 s	40In = 75.20 A	40In = 112.80 A
	0.5 s	50In = 94.00 A	50In = 141.00 A

Valores de corriente de baja tensión de los transformadores y dispositivos de protección referidos a la alta tensión.

CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR	CORRIENTE EN B.T.	CORRIENTE EN A.T.	RELACION DE TRANSFORMACION	CAPACIDAD INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO	
				B.T.	A.T.
75 kVA	196.82A	1.88 A	104.68	225 A	2.15 A
112.5 kVA	295.2 A	2.82 A	104.68	350 A	3.34 A

10<sup>2</sup> 0.11

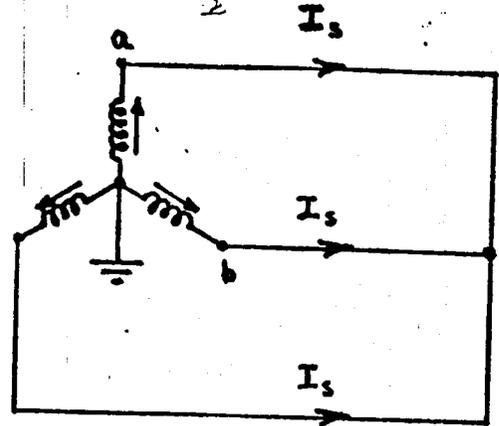
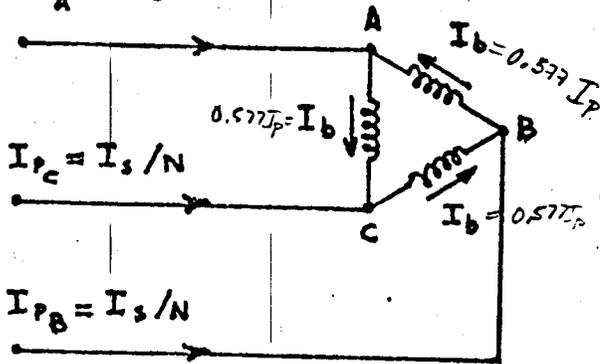
Relación de las corrientes de falla en el lado primario y secundario de un Transformador  $\Delta - Y_f$

a).- Falla 3  $\emptyset$

$$I_{pA} = I_s / N$$

$$I_{pC} = I_s / N$$

$$I_{pB} = I_s / N$$



$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_s}{N} = 0.577 \frac{I_s}{N}$$

$$I_p = \sqrt{3} I_b ; I_b = \frac{I_p}{\sqrt{3}} \quad I_b$$

$I_p$  = Corriente de línea en el primario

$I_b$  = Corriente en la bobina primaria

$I_s$  = Corriente de línea en el secundario

$N$  = Relación de transformación

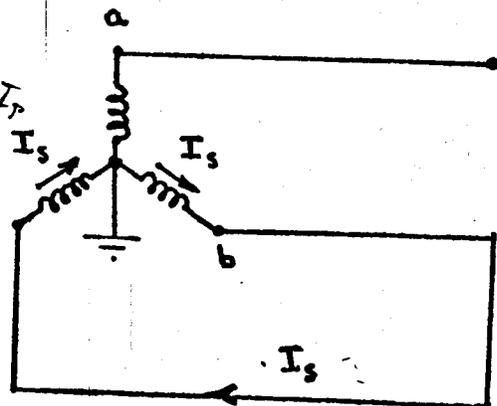
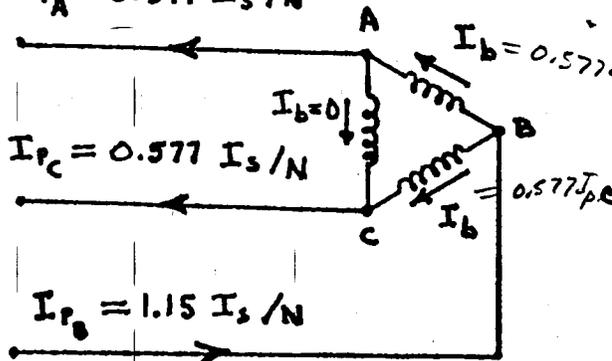
b).- Fallas 2  $\emptyset$

$$I_{pA} = 0.577 I_s / N$$

$$I_{pC} = 0.577 I_s / N$$

$$I_{pB} = 1.15 I_s / N$$

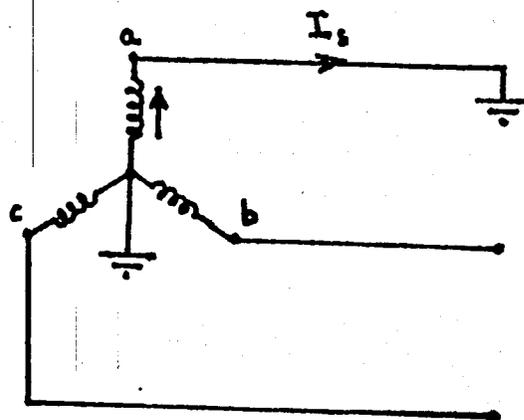
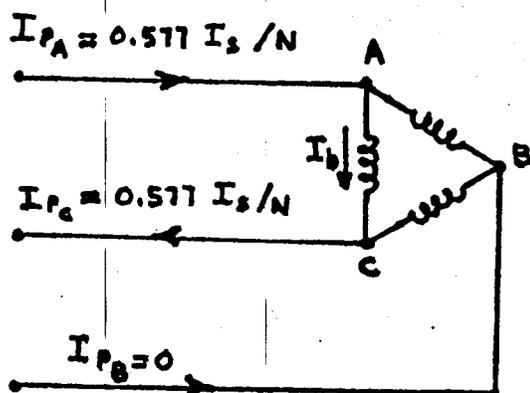
$$I_p = 2 \times 0.577 I_b$$



$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_s}{N} = 0.577 \frac{I_s}{N}$$

$$I_{pA} = I_{pC} = I_b = 0.577 I_s$$

c).- Falla 1  $\phi$ .



$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_s}{N} = 0.577 \frac{I_s}{N}$$

$$I_{P_A} = I_{P_C} = I_b$$

$$I_{P_B} = 0$$

De lo anterior se observa que al ocurrir una falla entre fases (b y c) del lado secundario del transformador, representa un incremento de corriente en el primario del 15 % adicional en la línea B, que es el caso más desfavorable, de tal forma que - con respecto a la curva característica de daño con falla trifásica se debe desplazar 15 % hacia la derecha. Asimismo para una falla monofásica (fase "a" - tierra) en el lado secundario del transformador, representa un equivalente del 57 % de la corriente nominal del lado primario en las líneas A y C; como consecuencia es necesario desplazar hacia la izquierda la curva de daño con falla trifásica un 57 %.

Una vez conocidas las características nominales de cada transformador considerando, así como los valores correspondientes que detienen las curvas de energización, daño térmico y mecánico, así como el efecto de las fallas del lado secundario del transformador reflejadas en el lado primario del mismo, se trazan estos valores sobre una hoja log-log, con el objeto de definir la capacidad del fusible de alta tensión e interruptor ----

termomagnético de baja tensión que sean los más adecuados para la protección contra sobrecorrientes por sobre carga y corto circuito. Para realizar este estudio se hace uso de las curvas - características corriente-tiempo de respuesta de los elementos de protección (mínima de fusión y máxima de interrupción) referidas todos al lado de alta tensión en las diferentes marcas y tipos, se escogen para tal caso aquellos elementos que presentan la mejor coordinación, de tal forma que operen únicamente para la función antes mencionada protegiendo satisfactoriamente al transformador y aislando la falla.

### CONCLUSIONES

De acuerdo a las gráficas indicadas en la hoja de --- coordinación, la protección más adecuada para el transformador de 75 kVA, es instalar un fusible de alta tensión de 3 amperes y un termomagnético de 225 amperes en baja tensión, pudiéndose observar que una sobrecorriente por sobrecarga mayor al 15 % - (225 A en B.T. o 2.15 A en A.T.) hará operar el mismo en forma satisfactoria en un tiempo mínimo de  $10^4$  segundos o también -- por cortocircuito en baja tensión, protegiendo al transforma-- dor o aislando la falla sin que se llegue a operar el fusible de alta tensión, debido a que la corriente mínima de fusión -- es de 6 amperes en A.T., en un tiempo mínimo de 50 segundos, - operando éste último básicamente por cortacircuito en A.T.

Para un transformador de 112.5 kVA, la protección más adecuada es la de instalar un fusible de 6 amperes en alta tensión y un interruptor termomagnético de 350 amperes en baja -- tensión, permitiendo una sobrecarga límite de 18.5 % (350 A -- B.T. o 3.34 A en A.T.) y arriba de este valor lo hará operar - en un tiempo mínimo de  $10^4$  segundos o un cortocircuito en baja tensión, protegiendo al transformador o aislando la falla. Asi mismo el fusible de 6 amperes, operará únicamente con un corto circuito en alta tensión y una corriente mínima de 12 amperes

en un tiempo de 50 segundos.

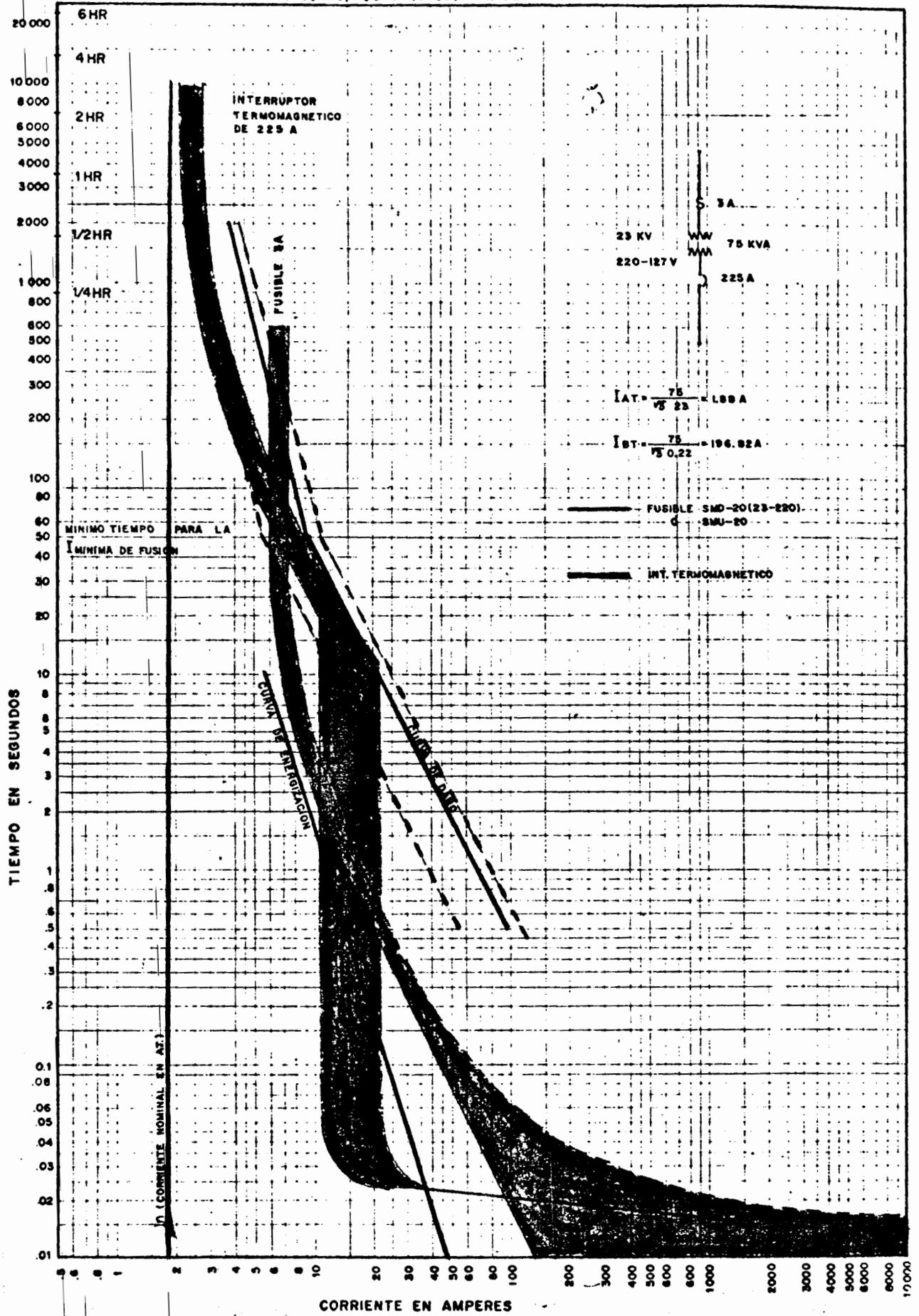
Con este esquema de protección se obtiene una adecuada protección del transformador contra sobrecorrientes, lo--  
grandose una mayor continuidad del servicio y una alta reduc  
ción de los costos por reemplazo de equipo, material y mano  
de obra.

ESTUDIOS DE REDES SUBTERRANEAS.

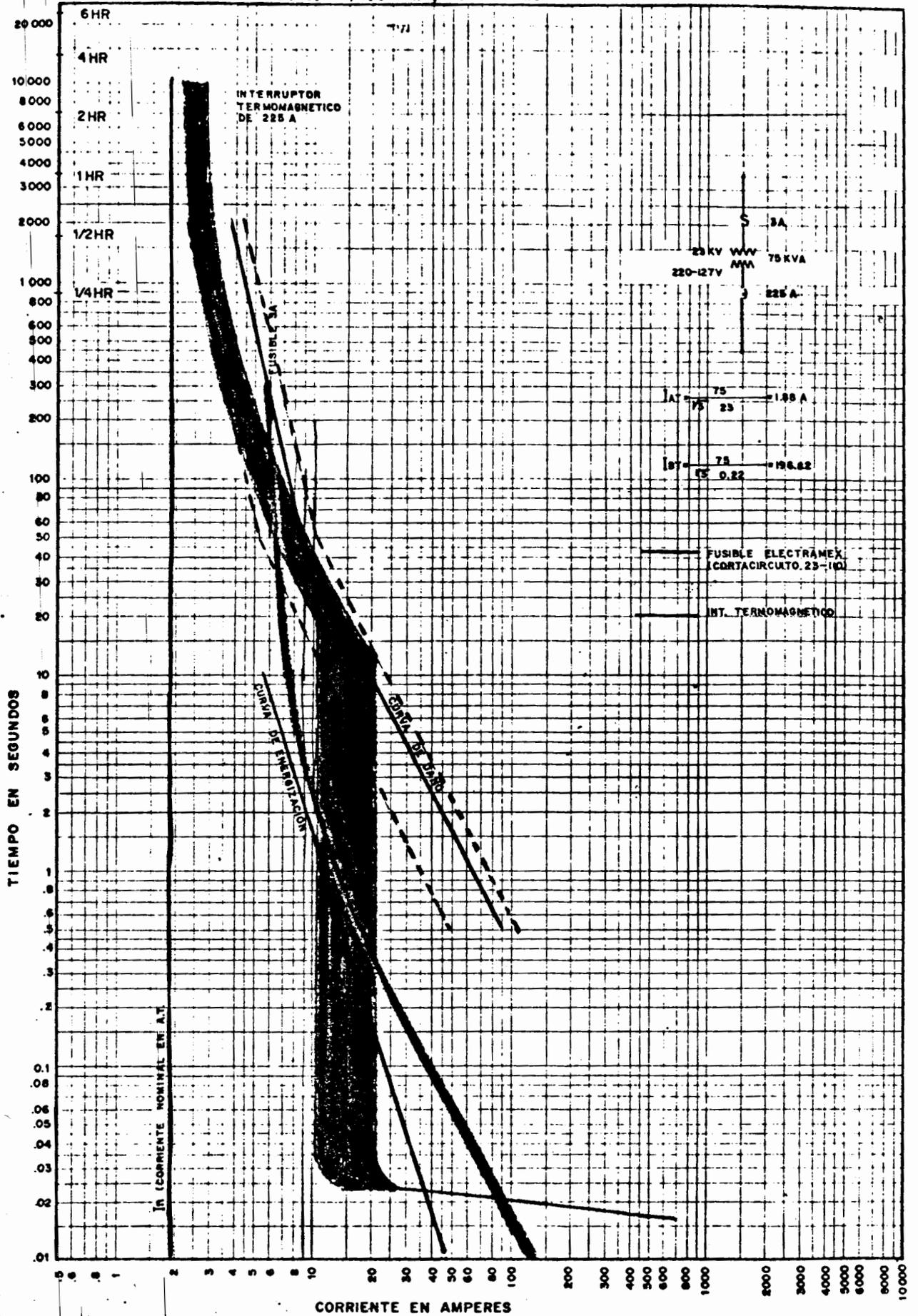
ING. ALFREDO JUAREZ TORRES.

MAYO DE 1986.

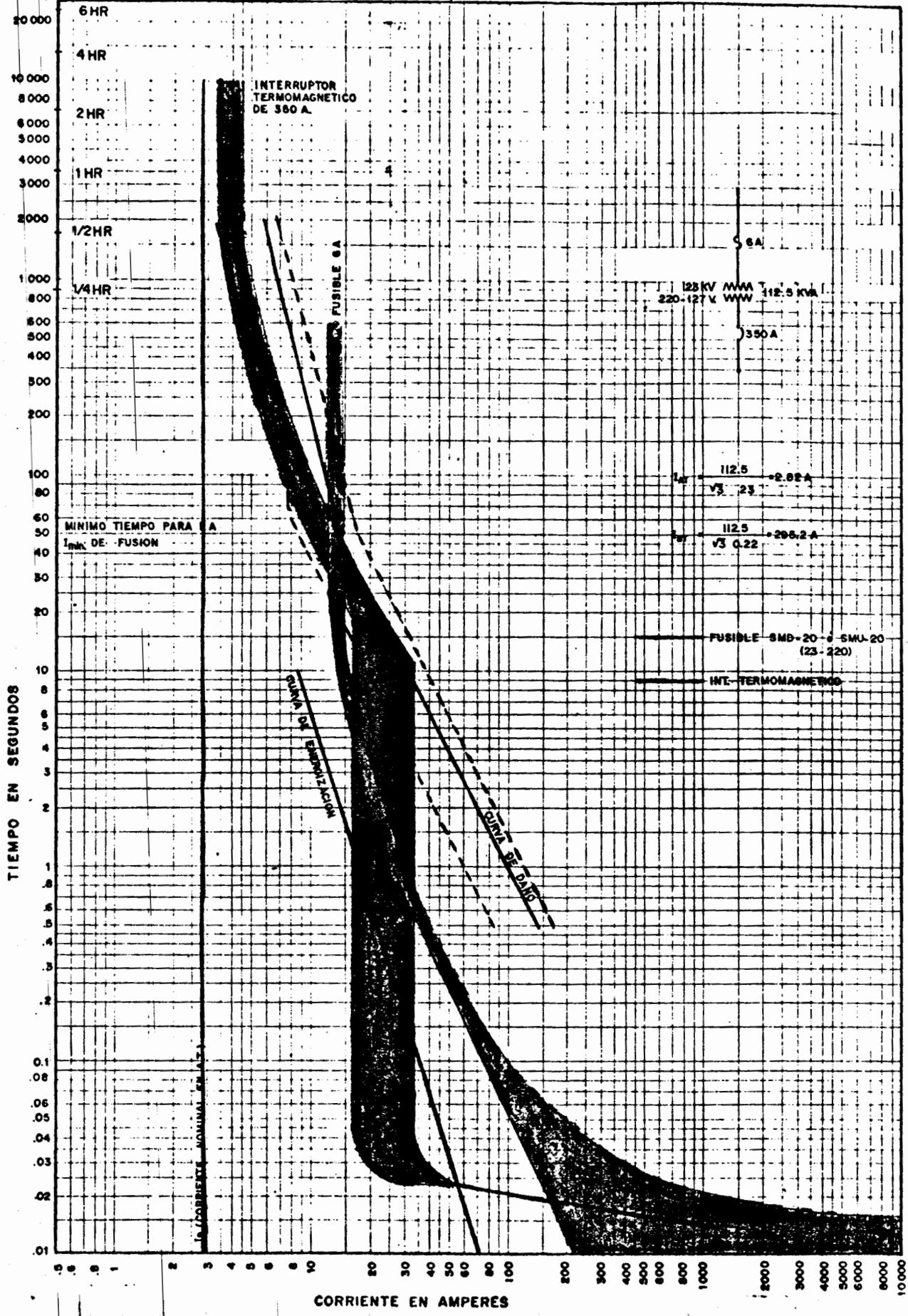
COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DE 75 KVA,  
23-0.220/0.127 KV TIPO AEREO



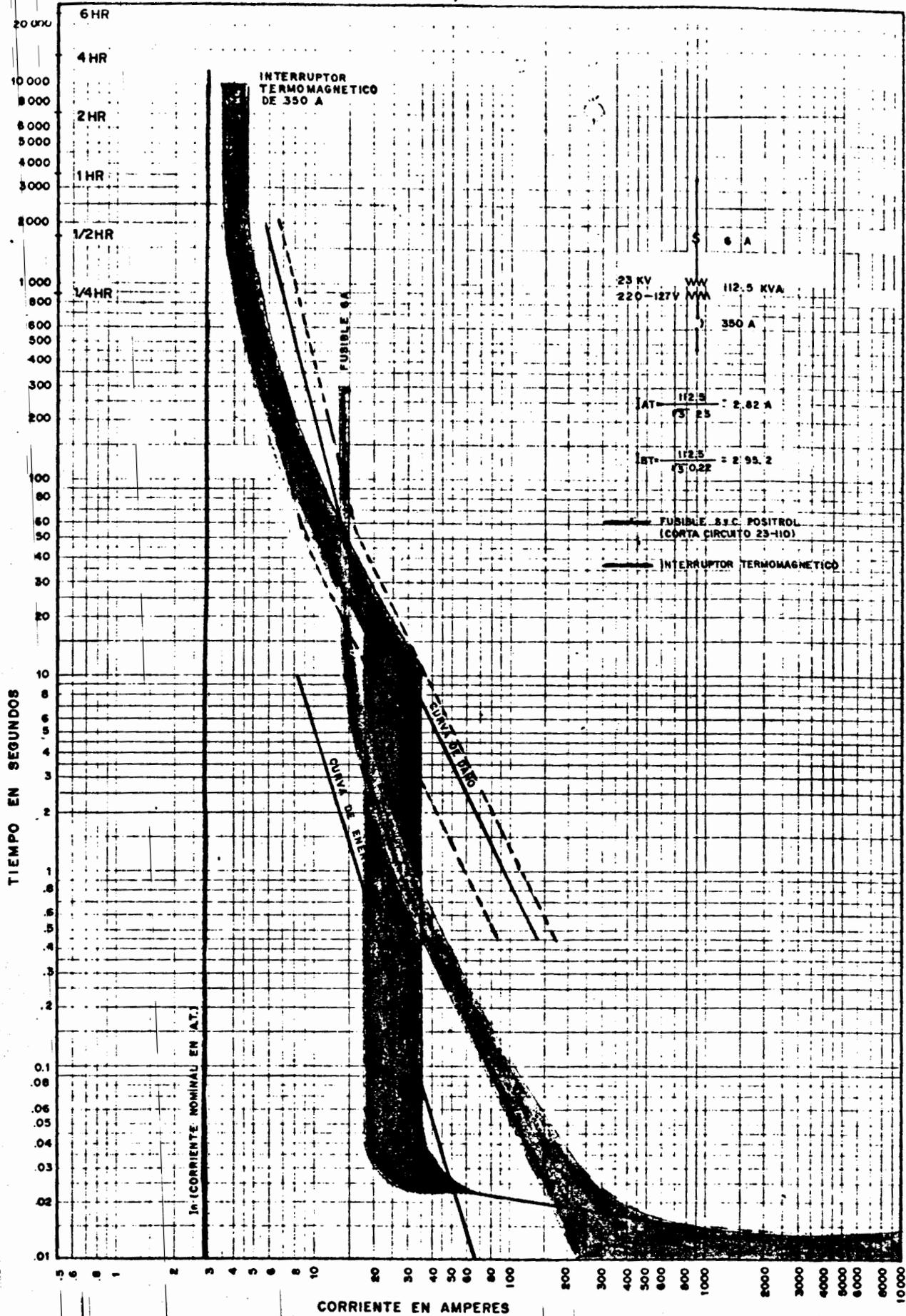
COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DE 75 KVA,  
23-0.220/0.127 KV, TIPO AEREO



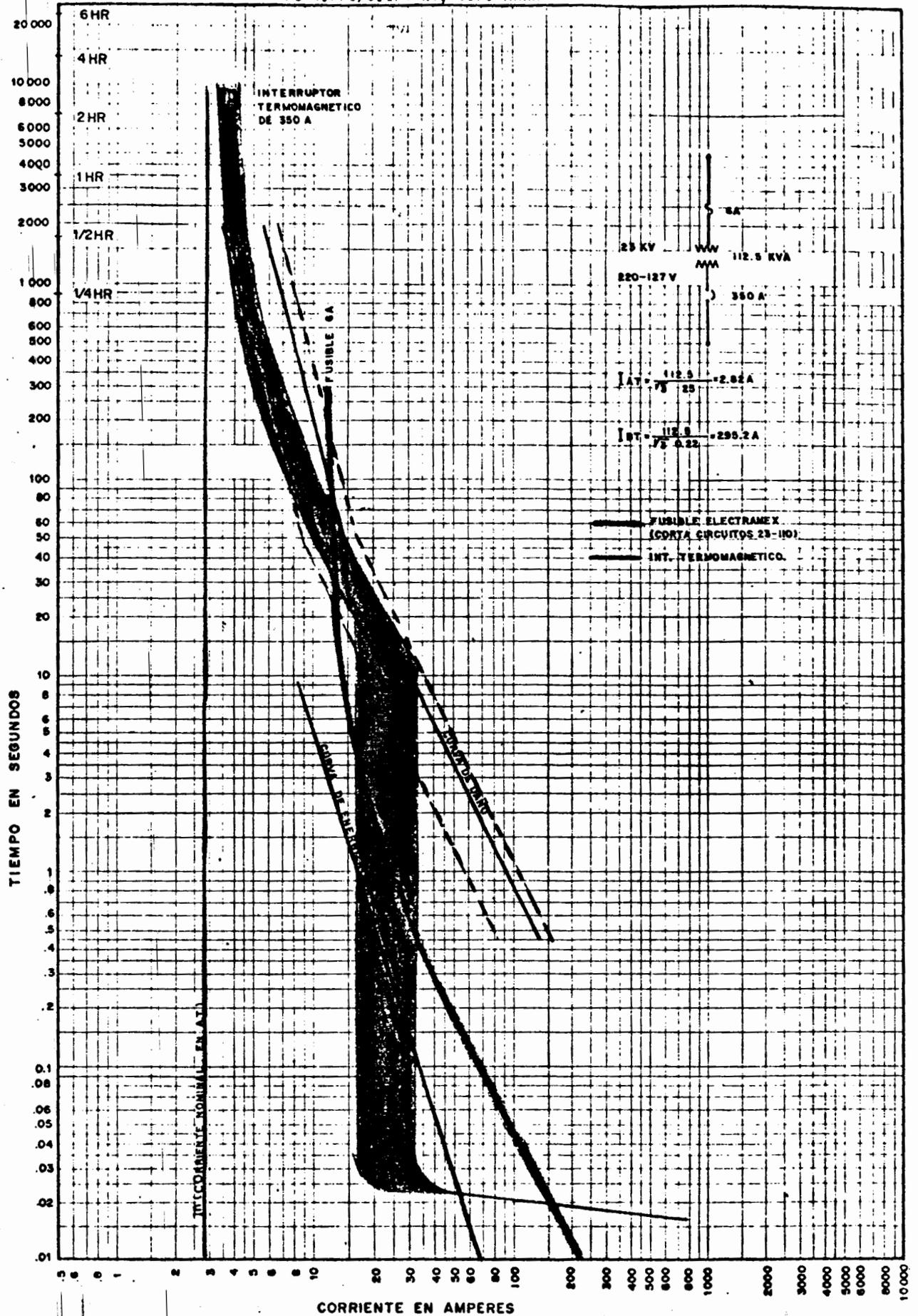
COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DE 112.5 KVA,  
 23-C.220/0.127 kV, TIPO AEREO



COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DE 112.5 KVA,  
23-0.220/0.127 kV, TIPO AEREO



COORDINACION DE PROTECCION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION DE 112.5 KVA,  
23-0.220/0.127 KV, TIPO AEREO



A. ARANDA N.

A. GARCIA R.

A. DOMINGUEZ B.

A. AVILA R.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

A. JUAREZ T.

R. ESPINOSA Y L.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO S.A.

(EN LIQUIDACION).

## RESUMEN

En este documento, se presenta una alternativa de protección contra sobrecorrientes para los transformadores de distribución tipo poste, de 75 y 112.5 KVA, instalados en las redes de distribución aéreas de 23 KV de la zona metropolitana. Este es el resultado de un estudio de coordinación, realizado durante el desarrollo de un proyecto de investigación conjunto entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y Compañía de Luz y Fuerza del Centro, cuyo objetivo principal era determinar las causas de la operación frecuente de los fusibles de potencia de expulsión, que constituyen la protección actual de los transformadores contra sobrecorriente.

Se realizaron pruebas experimentales de investigación en diversos laboratorios, para conocer con buen grado de exactitud, los grados de dañabilidad de la protección actual. Los resultados de estas pruebas se tomaron como base para determinar la confiabilidad de dicha protección y para establecer un esquema que proporcione una protección integral al transformador.

Finalmente se dan recomendaciones importantes para optimizar el esquema de protección propuesto.

### 1.- INTRODUCCION

El esquema de protección actual contra sobrecorriente de los transformadores de distribución tipo poste de 75 y 112.5 KVA., instalados en las redes aéreas de distribución de 23 KV del área metropolitana, consiste únicamente de fusibles de potencia tipo expulsión de 3 amperes, con velocidad de fusión K y capacidad interruptiva de 12 KA simétricos, los cuales se instalan en el primario de dichos transformadores. Los resultados de la aplicación de este esquema de protección, han demostrado deficiencias bien marcadas tales como, número elevado de

fusibles operados y de transformadores fallados así como de gran cantidad de tramos de conductor secundario (Neutranel) quemado debido principalmente a las fallas secundarias. Se ha demostrado, por pruebas de laboratorio y de campo, que las ventajas supuestas de la protección integral del esquema descrito, está limitado a ciertos rangos de corriente, descuidándose otros de suma importancia, como son: las sobrecargas y los diversos tipos de fallas secundarias que originan diferentes magnitudes de corriente en el lado primario del transformador.

Dadas las limitaciones actuales de recursos económicos y de los problemas operativos del sistema, es imposible implantar el uso de transformadores autoprotegidos en el área metropolitana. Con estas restricciones y ante una necesidad imperiosa de proteger adecuadamente a los equipos de distribución de energía eléctrica, se propone y se discute el uso de interruptores termomagnéticos con características corriente-tiempo, de sus dispositivos térmicos, bien definidas, para proteger el lado de baja tensión de los transformadores de distribución tipo poste y sus circuitos de distribución, en coordinación con su protección primaria; dando como resultado un esquema de protección confiable.

### 2.- ANTECEDENTES EN EL ESTUDIO DE PROTECCION.

En la actualidad, se han desarrollado y puesto en operación, en varias partes del mundo, diversos esquemas de protección contra sobrecorrientes para los transformadores de distribución. Los problemas con los que se han enfrentado los estudios de coordinación de dichos esquemas, son múltiples y de diversa naturaleza y que tienen su origen en tres fuentes principales, como son:

- Las características propias al transformador.
- Los fenómenos operativos del sistema de distribución de media y baja tensión.
- Las características de operación de los equipos de protección asociados.

Los compromisos a los que se sujetan los esquemas de protección de transformadores de distribución son los siguientes.

- Desconectar rápidamente un transformador fallado del sistema de distribución.

86MEX117

Ponencia revisada y aprobada por el IEEE para presentarse en el MEXICON 86 en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, del 26 al 30 de octubre de 1986.

Impreso en México

- Prevenir una falla catastrófica (cualesquiera que sea su origen) en el transformador fallado.
- Proteger al transformador contra cargas severas.
- Soportar las sobrecargas admisibles de cualquier magnitud.
- Soportar las corrientes transitorias de energización (inrush) y las llamadas corrientes de carga fría (Cold Load pick up currents).
- Soportar las corrientes transitorias debidas a la inducción de sobretensiones por descargas atmosféricas.
- Coordinar con los dispositivos de protección más próximos conectados en serie.

### 2.1 CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR.

Para la elaboración del estudio de coordinación, y puesto que se desconocen las características reales de operación de los transformadores, es por lo que se tomó los criterios establecidos en la "Guía de duración de corrientes de falla de transformadores" (P784/D4, - Agosto 6, 1984) de la Norma ANSI C57.12.00, para definir, en las hojas de coordinación, lo que se ha dado por llamar "Curva de daño del transformador"; ESTA, NO ES UNA CURVA DE FALLA PROPIAMENTE, SINO QUE ES UNA INDICACION DE LA PERDIDA DE VIDA, por operaciones ocasionales del transformador, a la derecha de ella. En este caso específico, se tomó la categoría I (1 a 500 KVA) para transformadores autoenfriados en aceite, con las características de la tabla 1. siguiente:

TABLA 1.

CARACTERISTICAS PARA DEFINIR LA CURVA DE DAÑO EN TRANSFORMADORES DE LA CATEGORIA I. (1 a 500 KVA.)

TIPO DE DAÑO	No. DE VECES LA CORRIENTE NOMINAL	TIEMPO EN SEGUNDOS
TERMICO	2	2000
	3	300
	4	100
	5	50
	6	35
	7	25
	8	20
	9	15
	10	12.5
	15	5.8
MECANICO	20	3.3
	25	2.0
	30	1.5
	40	0.8
	50	0.5

### Distribución de corrientes en los devanados -- del transformador.

Dado el tipo de conexión y la falla involucrada, las corrientes se distribuyen de distinta forma en los arrollamientos del transformador. En un sistema delta-estrella con neutro aterrizado, en estudio, las fallas secundarias consideradas por su naturaleza y probabilidad de ocurrencia son: Trifásica, bifásica aislada y monofásica a tierra. La corriente en el lado primario del transformador depende de la relación de transformación del mismo y del tipo de falla secundaria, tal como se muestra en la figura 1.

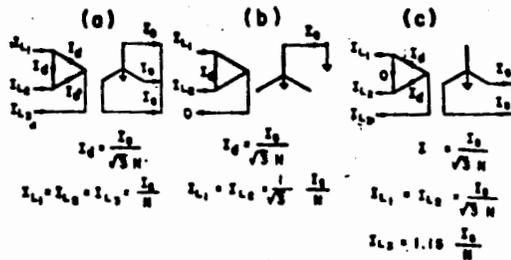


Figura 1.- Relación de las corrientes de línea en un transformador con conexión Delta-Estrella con neutro aterrizado. N, indica la relación de transformación. (a) falla trifásica, (b) falla monofásica a tierra, (c) falla bifásica aislada.

En una falla trifásica, las corrientes en las fases son iguales en magnitud y su desplazamiento es de 120° entre ellas, la relación de corrientes al lado primario es  $\frac{1}{N}$ . En la falla

monofásica a tierra, existe un desbalance de corrientes en los devanados y la relación que existe entre las corriente primaria y secundaria es  $\frac{1}{\sqrt{3}N}$ , o sea el 57.7% con res-

pecto a la falla trifásica. En la falla bifásica aislada, la relación existente es  $\frac{1.15}{N}$

esto es, un 15% mayor que la relación obtenida para la falla trifásica.

En términos de la protección contra sobrecorrientes referidos al primario. La Curva de daño, debe desplazarse hacia la izquierda al 58% y hacia la derecha un 15%, con respecto a la corriente de un eje coordenado corriente-tiempo para considerar las fallas monofásicas y bifásicas aislada respectivamente, véase la figura 2.

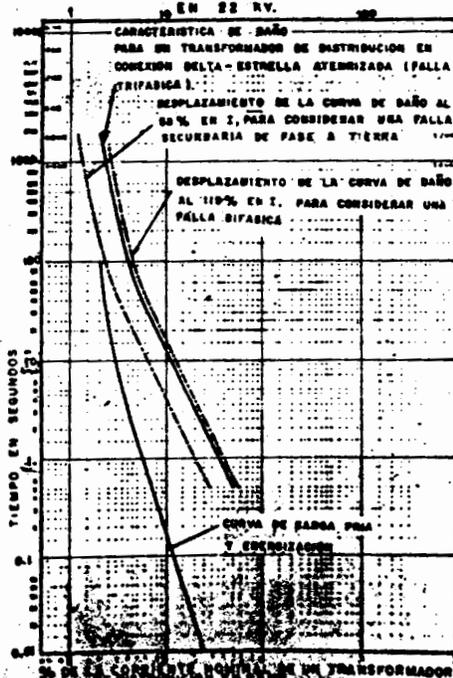


Figura 2.- Desplazamiento de la curva de daño al 58% y al 115% en I, para considerar una falla monofásica y bifásica aislada respectivamente, véase la figura 2.

## Corrientes Transitorias de energización - -

Estas corrientes tienen su origen cuando se energiza un transformador y cuando por alguna razón se abate momentáneamente la tensión en el lado de la fuente. Su magnitud y duración dependen de:

- El flujo residual en el núcleo del transformador.
- El punto sobre la onda de tensión cuando ocurre la energización.

La práctica comun empleada hasta hoy indica que las magnitudes de corriente que deben soportar los equipos de protección primaria, sin dañarse, son: 25 veces la corriente nominal primaria para 0.01 segundos y 12 veces para 0.1 segundos.

### 2.2 CARACTERISTICAS DE LA CARGA

El conocimiento aproximado de los perfiles de la carga conectada al transformador, así como los fenomenos de caracter transitorios originados por la misma, dan lugar a criterios necesarios para la aplicación de los equipos de protección primarios.

#### Corriente de carga fría. (cold load pick-up current)

Estas se originan debido a la energización súbita del transformador con cierto tipo de carga, el cual experimentó previamente una interrupción. Su magnitud y duración depende de cada sistema eléctrico en particular y de los tipos de carga conectada, no es posible definir los valores característicos de carga fría, sin embargo, los valores sugeridos son dadas por la experiencia y corresponden a:

- 6 veces la corriente nominal primaria para 1 Seg.
- 3 veces la corriente nominal primaria para 10 Seg.
- 2 veces la corriente nominal primaria para 100 Seg.

Se ha dado por llamar "corriente de carga caliente" (hot load pick-up current) al efecto combinado de la corriente de magnetización y la corriente de carga fría.

### 2.3 CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS DE PROTECCION ASOCIADOS AL TRANSFORMADOR.

Los fusibles proporcionan algunas ventajas de protección contra sobrecorrientes a transformadores, ya que estos equipos pueden tener las ventajas de capacidad interruptiva elevada y dimensiones reducidas, otra ventaja adicional es su precio económico.

Para la selección de los fusibles se requiere de una coordinación selectiva de los dispositivos de protección del lado de la fuente y del lado de la carga, debiéndose considerar otros puntos importantes tales como:

- Tensión nominal del sistema.
- Corriente de cortocircuito disponible
- Perfil de la carga asociada al transformador
- Corrientes de magnetización y de carga fría.
- Características corriente-tiempo de fusión e

interrupción total del fusible.

- Características de la tensión transitoria de restablecimiento del alimentador.
- Características de dañabilidad, del elemento sensible a la corriente, del fusible.

### 2.4 FILOSOFIA DE PROTECCION.

Los compromisos de protección que deben satisfacer los diversos equipos eléctricos destinados a este fin, son múltiples y de diferente tipo. En el caso particular de los fusibles, no se satisfacen todos los requisitos de protección mediante la selección de un fusible en particular por consiguiente, se han establecido criterios de aplicación con el objeto de proteger al transformador contra las fallas que se estiman más severas. Por tanto, es necesario evaluar el grado de protección al transformador y los riesgos a los que se sujetan estos, cuando se protegen con fusibles de diseño particular.

#### Relación de fusión (fusing ratio).

En general, esta relación se define como el cociente de la corriente nominal del fusible y la corriente a plena carga del transformador. Algunas relaciones muy usadas son de 1.5 y 2.0, pero para algunas aplicaciones específicas, se requieren relaciones de fusión tan bajas como 1.0 o tan altas como 6.0.

Proteger transformadores haciendo uso de relaciones de fusión bajas, implica una protección contra sobrecargas, y por tanto, el fusible seleccionado será tan pequeño en corriente nominal como sea posible. Los criterios de protección empleando relaciones de fusión bajas o altas, implica ventajas y desventajas relacionadas con:

- Continuidad del servicio.
- Costo de reposición de fusibles.
- Fallas en el transformador debidas a sobrecargas.
- Coordinación con otros equipos de protección

### 2.5 ESQUEMAS DE PROTECCION A TRANSFORMADORES.

Ante la complejidad de la protección a transformadores, se han desarrollado y puesto en operación, en otras partes del mundo, varios esquemas de protección, en los cuales se emplean cortacircuitos de distribución de eslabón universal, fusibles limitadores de corriente de respaldo y rango completo (back up, full range), cortacircuitos fusibles de potencia y de eslabón descubierto; todos éstos, en diferentes arreglos de protección primaria. Así mismo, se han desarrollado otros esquemas que incluyen la protección del lado de baja tensión del transformador, mediante interruptores termomagnéticos con o sin fusibles (doble elemento y limitadores de corriente).

El desarrollo de la tecnología del transformador completamente autoprotegido, ha sido el resultado del planteamiento de todas las alternativas de protección posibles, pues incluye la protección primaria y secundaria, la protección contra descargas atmosféricas y los sistemas de señalización de operación y falla. Las ventajas y desventajas técnicas y económicas de su uso no serán tratadas en este trabajo, sólo se mencionará como una alternativa de pro

acción digna de tomarse en cuenta.

Esquemas de Protección primaria con fusibles.

Las principales ventajas de estos esquemas son, la simplicidad de instalación, mantenimiento y su costo relativamente bajo, mismas que le han conferido gran aceptación.

- Protección única con fusibles de potencia Tipo expulsión.

En la actualidad, este esquema es empleado -- por C.L.F.C. para la protección de la gran mayoría de sus transformadores de distribución - tipo poste.

Consta únicamente de un fusible de potencia -- conectado en cada fase primaria del transformador. Los criterios de selección y coordinación de estos fusibles, indican que éstos no deben operar con las corrientes de magnetización y de carga fría del transformador. Las relaciones de fusión más usadas son de 1.0, 1.5 y -- 2.0. La coordinación ideal de sus características corriente-tiempo, implica que, la característica mínima de fusión del fusible, debe ubicarse a la derecha de las características que definen las corrientes de magnetización y de carga fría, y a su vez, a la izquierda de las características de daño del transformador, -- véase la figura 3.

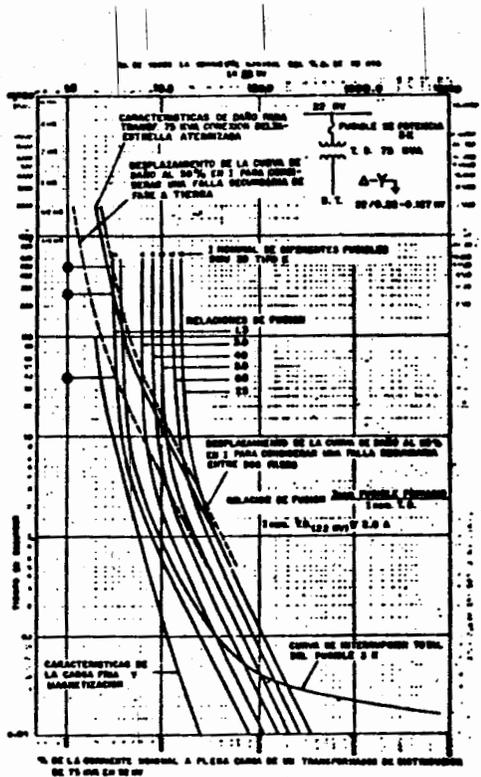


Figura 3.- Coordinación de un fusible de potencia primaria protegiendo a un transformador de 75 KVA.

El caso de la protección con cortacircuitos fusibles del distribución de eslabón universal, es muy similar a la anterior. La única diferencia que presentan éstos con respecto a los fusibles de potencia, es que poseen una capacidad interruptiva menor.

Esquema serie de Cortacircuito de distribución y fusible limitador de corriente de respaldo (back up).

En este esquema, por naturaleza, se designa a los cortacircuitos fusibles como fusibles protectores, y sus eslabones fusibles se seleccionan con relaciones de fusión bajas, de tal manera que interrumpan la mayoría de corrientes, desde la mínima de fusión hasta antes de la correspondiente a su capacidad interruptiva -- nominal. Se dice que los fusibles limitadores son los fusibles protegidos, y su operación queda restringida únicamente con corrientes de falla severas.

La coordinación de las características de operación de estos fusibles, debe realizarse de tal manera que, la intersección de la curva de interrupción total del fusible de expulsión y la curva mínima de fusión del limitador de corriente tenga lugar en un valor de corriente igual o menor a la máxima capacidad interruptiva del fusible de expulsión, y a su vez dicho valor, sea igual o mayor a la corriente mínima de ruptura de fusible limitador de corriente. En la figura 4 se muestra tal intersección, marcada con la letra B.

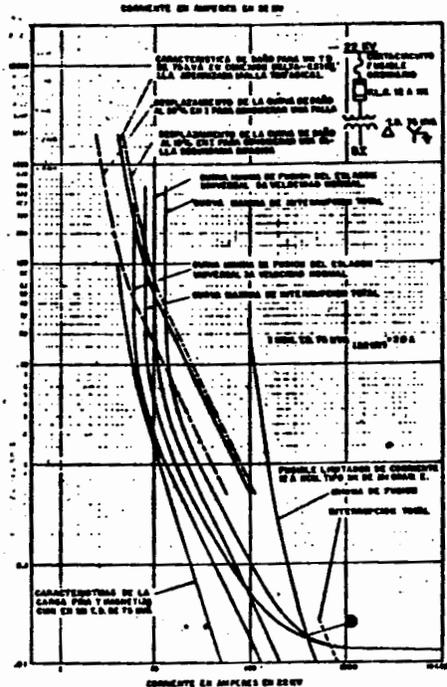


Figura 4.- Coordinación serie con fusible de expulsión y limitador de corriente protegiendo a un transformador de 75 KVA.

Las deficiencias de los esquemas antes mencionados, son: no se protegen en ningún caso contra sobrecargas permisibles ni cortos circuitos secundarios de fase a tierra. Es claro -- comprender esto, puesto que las características, tanto de daño del transformador como de operación del fusible, presentan pendientes -- muy diferentes y aún cuando se seleccione el fusible con relación de fusión más baja, el --

problema sigue latente, incrementándose el riesgo de operar por corrientes inrush y/o de carga fría.

Esquema de protección combinada, primaria y secundaria.

Con este tipo de esquema, se pretende proporcionar la protección adecuada con respecto a las fallas mas representativas ya mencionadas. Las alternativas de aplicación incluyen, interruptores termomagnéticos y fusibles de baja tensión clase K no renovables.

Los criterios de aplicación de cortocircuitos fusibles primarios, ya sea de potencia o de distribución (con eslabon universal), dependen del nivel de cortocircuito primario, de la coordinación deseada con los equipos de protección hacia el lado de la fuente. Los fusibles se seleccionan con relaciones de fusión 3.0 e inclusive 4.0, para los tipo K, rápidos; y con relaciones de fusión 5.0 y 6.0 para los tipo T, lentos. Su coordinación con los equipos de protección secundaria, deberá realizarse de tal forma que, al seleccionar el fusible primario con la relación de fusión más baja, coordine con las características del dispositivo de protección secundaria seleccionado con corriente nominal o calibración más grande.

Comparando las curvas características corriente-tiempo, mínimas de fusión del fusible primario, y la de interrupción total máxima del dispositivo de protección secundaria, se recomienda que entre estos dos exista un margen no menor del 15% en corriente, en los puntos más cercanos, para compensar las diferencias en por unidad de las corrientes de línea primarias y secundarias, correspondientes a la conexión delta-estrella con neutro aterrizado; en la figura 5 se ejemplifica dicha coordinación

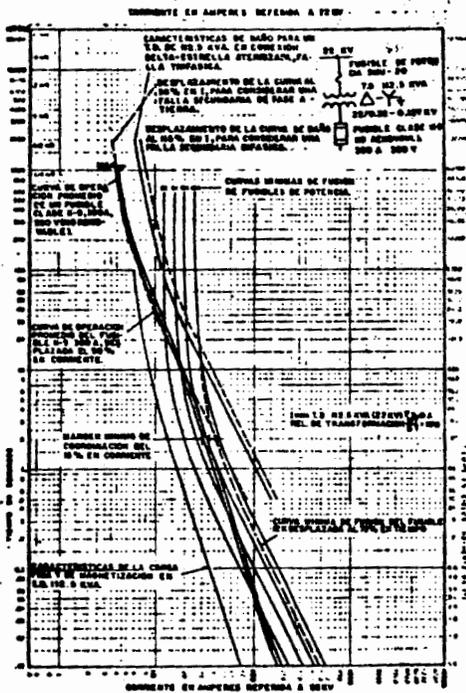


Figura 5.- Coordinación para un esquema de protección primario y secundario, de un transformador de

112.5 KVA, utilizando fusibles primarios de potencia tipo K y fusibles secundarios clase K-9 no renovables.

Las desventajas de este esquema de protección, radican principalmente, en la posibilidad de operar cargas trifásicas con una o dos fases, cuando por alguna falla, operan uno o dos fusibles de baja tensión.

3.- CARACTERISTICAS DE OPERACION Y PROTECCION DE LOS FUSIBLES PRIMARIOS.

En términos generales, se describen las pruebas de laboratorio y de campo efectuadas a fusibles de potencia de 3 amperes nominales tipo K. Los resultados de las mismas se tomaron como base para desarrollar el presente trabajo. Este tema se describe más ampliamente en el artículo titulado "CARACTERISTICAS DE OPERACION DE FUSIBLES DE DISTRIBUCION DE POTENCIA TIPO EXPULSION".

3.1. PRUEBAS DE LABORATORIO.

-Se realizaron pruebas de capacidad interruptiva de acuerdo a los requisitos dados por la norma IEC 282-2. De los resultados de estas pruebas se observó, que los fusibles presentan fuertes dispersiones en su operación con corrientes bajas (serie 5), esto es, con corrientes comprendidas entre la corriente mínima de fusión y 3 veces la corriente nominal del fusible.

-Se efectuaron pruebas en baja tensión para verificar la característica corriente-tiempo, y pruebas de calentamiento-enfriamiento para determinar la dañabilidad del elemento fusible.

Los resultados corroboraron los obtenidos en las pruebas de la serie 5 y además, se observó un cambio substancial en la microestructura del elemento.

-Con el objeto de cuantificar el grado de dañabilidad en los fusibles de 3A, se puso en práctica la prueba de aplicación de pulsos de energía, con valores de 65, 75 y 85% de la energía mínima de fusión; obteniéndose al final, incrementos en la resistencia ohmica de los fusibles del 9.59, 11.65 y 23.55% del valor inicial, respectivamente. Finalmente, se determinó en base a pruebas de fusión, el desplazamiento hacia la izquierda de las características corriente-tiempo del fusible, ocasionado por la electrodañabilidad. El desplazamiento más significativo fue de 18% en valores de tiempo, correspondiente a la aplicación de 6 pulsos con el 75% de la energía mínima de fusión.

-Se realizaron pruebas de energización a un transformador de 75 KVA, para determinar el grado de envejecimiento de los fusibles por efecto de las corrientes de magnetización (inrush). En estas pruebas se midieron corrientes de hasta 21 veces la corriente nominal del transformador. Al final de las pruebas se determinaron los incrementos de resistencia ohmica en los fusibles, los cuales fueron del 14% del valor original para los fusibles nuevos y del 31% para los fusibles retirados de la red.

-Se realizaron pruebas de cortocircuito secundario en un transformador de 75 KVA, simulando las condiciones reales de operación en la red. Se utilizó como protección primaria fusibles de 3A tipo K. El objetivo de estas pruebas fue el de verificar el grado de protección proporcionado por los fusibles ante este tipo de solicitación. De los resultados se observó que las corrientes mínimas, provocadas por fallas secundarias, capaces de iniciar la operación de los fusibles primarios son las mostradas en la tabla 2.

Tabla 2.- VALORES DE CORRIENTES DE FALLAS SECUNDARIAS Y DISTANCIAS APROXIMADAS QUE SE PROTEGEN CON UN FUSIBLE PRIMARIO 3K.

KVA T.D.	Tipo de falla	I mín. sec. Amperes	Distancia equivalente de la falla en metros
75	1Ø-T	660	110
	2Ø	660	hasta 450
	3Ø	600	hasta 450
112.5	1Ø-T	615	140
	2Ø	690	hasta 400
	3Ø	600	hasta 450

\* Considerando conductor trifásico Neutranel 1/0.

La última columna indica la máxima distancia a la que probablemente puede ser protegido el conductor neutranel. Para distancias mayores a las indicadas, el fusible nunca operará y consecuentemente el conductor se dañará. Cabe aclarar, que en realidad, después de los primeros 100 metros del circuito secundario se disminuye el calibre de los conductores, originando con esto la disminución substancial de la corriente de falla secundaria.

### 3.2 PRUEBAS Y RESULTADOS DE CAMPO.

-De los trabajos de campo realizados, el más importante fue el de determinar la demanda real al conjunto transformador-fusible, con objeto de calcular, estadísticamente, el perfil de carga de los transformadores de distribución.

Se monitorearon 91 transformadores, 65 de 75-KVA y 26 de 112.5 KVA. Se encontró que el perfil de carga representativo, es como se muestra en la figura 6.

Se determinó estadísticamente, que:

- La duración de las demandas pico en períodos de 24 Hs., van desde 1.4 hasta 4.0 Hrs., encontrándose que la moda corresponde a duraciones de 2.0 a 2.2 Hrs.
- Durante el período de demanda máxima (2 Hrs.) el 36.3% de transformadores instalados, presenta demandas mayores al 125% de su carga nominal.
- La raíz cuadrática media, del perfil de la carga, para el período de 24 Hs., indica que el 84.6% de los transformadores presentan una carga menor a la nominal.

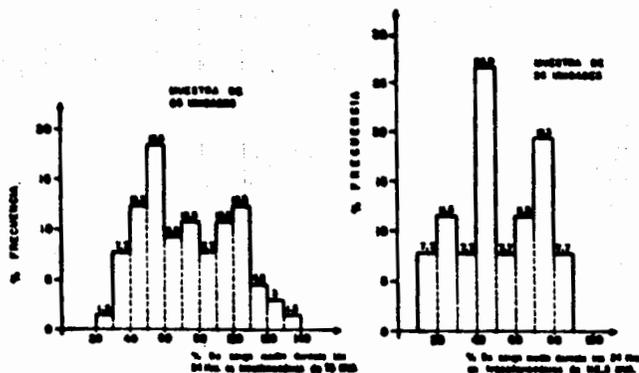


Figura 6.- Perfil de carga en transformadores de distribución tipo poste de 75 y 112.5 KVA.

-Se verificó, que hay ciertas condiciones externas a las redes de distribución, tales como las sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas, las cuales, dependiendo de su forma de onda y duración, pueden producir corrientes transitorias que poseen energía  $I^2t$  menores o iguales a las energías  $I^2t$  mínima de fusión de los fusibles de protección dañándolos paulatinamente o bien operándolos. Por otra parte, en los alimentadores donde no hay apartarros instalados, o se tienen valores elevados de resistencias de tierra, los transformadores están expuestos a la acción de estas sobretensiones originando daños en el mismo, tal como se verificó en un estudio realizado en 75 transformadores fallados, 47 de 75 KVA y 28 de 112.5 KVA, en la que se encontró que el 48% de éstos mostraban fallas de aislamiento. Los resultados de este estudio, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.- RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INSPECCION DE TRANSFORMADORES FALLADOS.

No. de unidades	Causa de falla	%
28	Arqueo en boquillas	37.33
24	Sobrecalentamiento	32.0
22	Sobretensión	29.33
17	Humedad	22.66
7	Sobrecarga	9.33
7	Cortocircuito secundario	9.33
6	Envejecimiento normal	8.0
2	Falla catastrófica	2.66
2	Vandalismo	2.66

Nota: Las sumas en la primera y tercera columna, sobrepasan al número total de transformadores y el 100% respectivamente, debido a que algunos transformadores presentaban varias causas de falla.

### 3.3 DEFICIENCIAS DEL ESQUEMA ACTUAL.

Tomando como antecedente los resultados de laboratorio y campo, se ponen de manifiesto las deficiencias que presenta el esquema actual -- con las observaciones finales siguientes:

- Los resultados del monitoreo de transformadores, indicaron que las sobrecargas en estos transformadores, existe, pero su magnitud no es suficiente para operar a los fusibles primarios, y el único efecto que producen es el de envejecerlos paulatinamente en un periodo de tiempo muy largo.
- Los principales responsables de la operación prematura de los fusibles primarios son las fallas de cortocircuitos secundarios, con valores de corriente referidos al lado primario iguales o mayores a 9A, porque con valores menores, los fusibles operan con muy alta dispersión en sus tiempos de fusión<sup>7</sup>.
- Como consecuencia, se recomienda, intalar en el secundario del transformador una protección primaria, así como la reducción de la longitud del circuito secundario.
- Las unidades fusibles estudiadas, sufren severos efectos de envejecimiento cuando son expuestos a la acción combinada de las corrientes transitorias de magnetización de transformadores y por el esfuerzo mecánico producido por el resorte de compresión en el elemento fusible.

### 4.- APLICACION DE INTERRUPTORES TERMOMAGNETICOS.

Actualmente en varios países, se han hecho estudios tendientes a optimar el uso de interruptores termomagnéticos para la protección, en baja tensión, de los transformadores de distribución tipo poste. Algunas de las fuertes limitaciones a que se enfrentan dichos estudios son, que los interruptores termomagnéticos y los transformadores poseen características térmicas y por lo tanto constantes de tiempo diferentes, por otra parte, el interruptor no posee ventajas de recierre automático.

El esquema de protección que se sugiere, está destinado para la protección de los devanados secundarios de los transformadores y de los conductores de distribución en baja tensión. Consiste de un interruptor termomagnético de caja moldeada accionado por un sistema automático de recierre, y como respaldo de protección al transformador contra fallas catastróficas, se tienen cortocircuitos de distribución de eslabón fusible universal, conectado en cada una de las fases primarias de éste.

#### 4.1 CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS Y DE MONTAJE DEL EQUIPO PROTECTOR.

El interruptor termomagnético que se propone es similar a los termomagnéticos convencionales, y por tanto, las pruebas de prototipo deberán ajustarse a los requerimientos normalizados por las normas nacionales vigentes, además de las internacionales (UL e IEC). Las diferencias que tienen estos interruptores -- con respecto a los convencionales, son:

- Las características de operación corriente-

tiempo se ajustarán a valores bien definidos, ya que se propone que este tipo de interruptor sea para usarse exclusivamente en la protección de secundarios de transformadores de distribución tipo poste, y consecuentemente sus características de operación térmicas, se ajustarán a las características de daño, en las diversas condiciones de fallas secundarias (IF-T, 2F, y 3F), de estos transformadores.

- Deberán tener internamente un dispositivo eléctrico que le permita abrir mecánicamente sus contactos (Shunt trip), alambreado hasta la parte exterior.
- La capacidad interruptiva necesaria para este equipo, no es tan severa, ya que las capacidades interruptivas de los termomagnéticos comerciales para capacidades de conducción -- hasta de 225 y 400 A nominales son de 25 y 35 KA simétricos en 240V. respectivamente y nunca se corre el riesgo de quedar abajo -- de la capacidad de cortocircuito instalada, -- aun hasta en el punto más cercano de una subestación de distribución.

Para que este equipo tenga las ventajas de protección necesaria para un transformador de distribución, es necesario que el interruptor termomagnético se habilite con un sistema o mecanismo de recierre, además de un sistema electrónico de conteo de eventos cierre-apertura, con un sistema de bloqueo para un límite dado de eventos y además que su operación sea manual y automática y que cuente con un sistema de señalización.

Todo el equipo protector, deberá estar integrado en un gabinete metálico para intemperie, ya que se montará al poste en la parte inferior al transformador. Es necesario que este equipo integrado, sea lo más compacto posible, además de que su sistema de ventilación sea lo más eficiente para evitar sobreelevaciones de temperatura y consecuentemente operaciones innecesarias del interruptor provocadas por exposiciones prolongadas a los rayos solares.

#### 4.2 CARACTERISTICAS DE COORDINACION.

Para estudiar y caracterizar el equipo de protección propuesto, se analizan las características nominales de operación del mismo y las condiciones de falla de los transformadores de distribución, de los fusibles de protección -- primarios y de los conductores de distribución en baja tensión: En las figuras 7 y 8, se muestran las características corriente-tiempo de este estudio de coordinación, representativo para transformadores de distribución más comunes 75 y 112.5 KVA., tomándose de éstas, las características de operación requeridas para los interruptores termomagnéticos.

En estos esquemas, se han seleccionado fusibles primarios tipo K de eslabón universal con corrientes nominales de 8 y 10 Amperes, para transformadores de 75 y 112.5 KVA respectivamente, las relaciones de fusión correspondientes son de 4 y 3.3 y con energías mínimas de fusión de 1,100 y 1,800 A<sup>2</sup> Seg.

Con el empleo del esquema de protección propuesto, se restringe las posibles operaciones de sobrecarga permitidas al transformador, mayores al 100%, obviamente, esto no es una limitación definitiva, ya que se encontró durante un estudio realizado, que únicamente el 3.3% de transformadores de un total de 91, operan arriba del 120% de su valor nominal, demostrándose con esto, que el índice de sobrecargas en transformadores es muy bajo.

Tabla 4.- CARACTERISTICAS CORRIENTE-TIEMPO MAXIMO DE OPERACION, REQUERIDAS PARA EL INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO.

I.T.M. 75 KVA		I.T.M. 112.5 KVA	
I sim. Amp.	T máx. op. Seg.	I sim. Amp.	T máx. op. Seg.
250	1,000	400	700
400	140	500	250
600	40	600	100
800	20	800	40
1,000	11	1,000	25
1,500	menor a 5	2,000	menor a 4
más de 2,000	0.016	más de 3,000	0.016

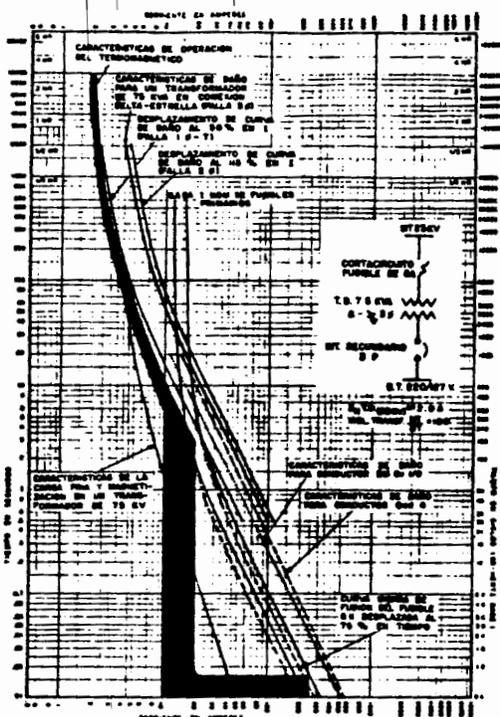


Figura 7.- Características de la coordinación de protecciones para un transformador de 75 KVA, utilizando interruptor termomagnético.

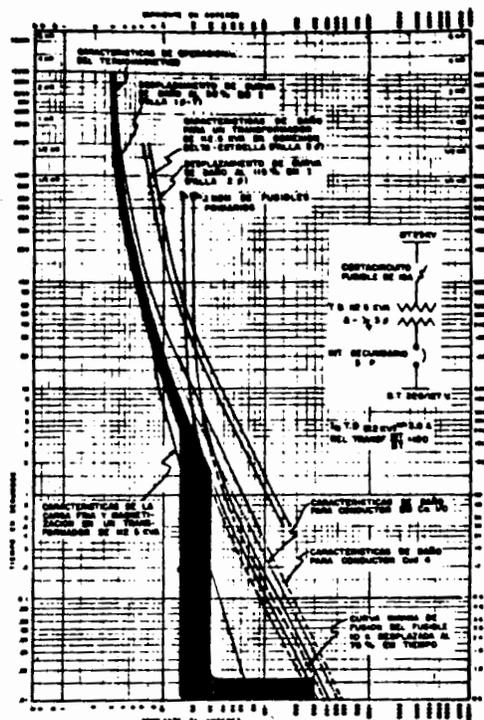


Figura 8.- Características de la coordinación de protecciones para un transformador de 112,5 KVA, utilizando interruptor termomagnético.

#### 4.3 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACION DEL ESQUEMA PROPUESTO.

Son varios los puntos que se deberán de estudiar y establecer un lineamiento de utilización para este esquema de protección en particular, como son:

- Realización de un programa para el cambio y adaptación al esquema propuesto.
- Determinación de las áreas para la aplicación del esquema, en función a las características de la carga eléctrica.
- Establecer un control de la cantidad de carga manejada por cada transformador.
- Realización de un programa de mantenimiento para los equipos.
- Establecer un sistema computarizado para conocer el comportamiento de cada uno de los equipos, el número de operaciones, las fallas reportadas, fechas de mantenimiento y reparación de partes, etc.
- Realizar un programa para la adquisición de refacciones, equipos de prueba y capacitación técnica.

Las ventajas que trae consigo la aplicación del esquema propuesto son:

- La protección integral del transformador.
- Reducción del número de fusibles primarios -- operados por envejecimiento.
- Protección contra sobrecorrientes de los conductores de distribución en baja tensión.

- Los trabajos de operación y mantenimiento -- son más confiables y seguros para los trabajadores.
- Los equipos integrantes de este esquema serían, completamente, de fabricación nacional.

Las Desventajas más importantes son:

- Los costos de los equipos son más caras.
- Se requiere implementar un programa de mantenimiento muy completo y consecuentemente más caro.
- El programa de cambio al esquema propuesto, contempla la sustitución de los Cortacircuitos fusibles de potencia por cortacircuitos fusibles de distribución de eslabón universal, o en su defecto, cambiar únicamente la corriente nominal del fusible de potencia.

5.- CONCLUSIONES.

- Se ha demostrado, que el esquema actual de protección primario contra sobrecorriente, - constituido únicamente por fusibles de potencia tipo expulsión de 3A tipo K, que se utiliza en la protección de transformadores de distribución tipo poste de 75 y 112.5 KVA, - presenta grandes deficiencias debidas a las limitaciones características de este tipo de fusible, tales como, las grandes dispersiones de operación con corrientes menores a 3 veces su corriente nominal y la susceptibilidad a ser dañados paulatina y acumulativamente en su vida útil de servicio.
- Para poder corroborar las ventajas técnicas que trae consigo la utilización del esquema de protección propuesto, es indispensable la puesta en operación de un estudio piloto para la utilización de los mismos, en puntos seleccionados en relación a: densidad y tipo de carga conectada, condiciones ambientales diversas y características geográficas diferentes, realizándose a la par, el monitoreo de la operación del esquema de protección para poder realizar una estadística comparativa.
- Con el desarrollo de este equipo de protección en baja tensión, se dará impulso a los fabricantes nacionales de interruptores termomagnéticos, para realizar proyectos de fabricación y consecuentemente desarrollar una tecnología apropiada a las necesidades nacionales.
- Se recomienda realizar un estudio teórico-experimental detallado de las características de daño de los transformadores de distribución tipo poste de fabricación nacional, ya que conociendo las características de daño reales, será posible desarrollar un estudio de coordinación de protecciones más óptimo.

REFERENCIAS

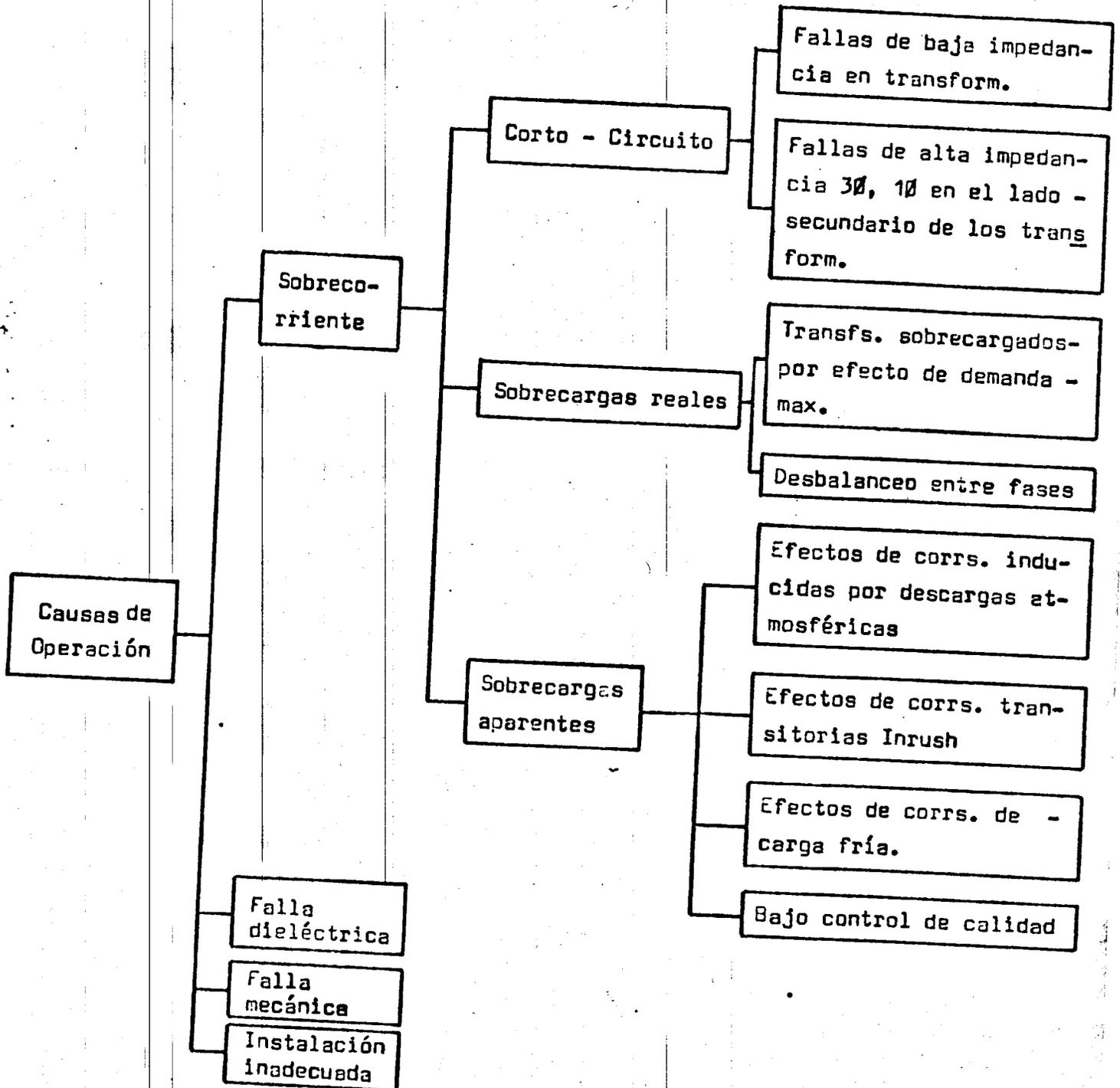
1. IEEE Tutorial Course, "Application and Coordination of Reclosers, Sectionalizers, and Fuses". 80 EHO157-8-PWR, Capítulos: 1, 2, 3, y 6.
2. Glenn, D.J. "Protection of Transformers and Other Equipment Using Distribution Cutouts and Power Fuses". 1981 International Conference on Distribution Fusing, IREO-LAB.

Varenes, Quebec, Canada. Nov. 2, 3, 4, 1981.

3. Huber, W.J. "Transformer Inrush Considerations for Current-Limiting Fuses", 1974, -- IEEE PES Summer Meeting and Energy Resources Conf.
4. Arndt, R.H.; Koch, R.E.; Schultz, N.R. "Concept Alternatives and Application Considerations in the Use of Current Limiting Fuses for Transformer Protection". 1974 Underground Transmission and Distribution Conference.
5. Takach, D.S. "Distribution Transformer Primary Fuse Coordination" 1982 IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7, July 1982. pp 2278-2285.
6. Avila R., A.; Aranda M., A. "Estudio de evaluación de esquemas de protección" 1985 Instituto de Investigaciones Eléctricas Reporte Parcial No. 4 para Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. Febrero, 1985.
7. Avila R., A; Domínguez B., A; García R., A.; Aranda M., A. "Estudio de las características de Operación de Fusibles de Distribución de Potencia tipo Expulsión". 1985 Mexico, Guadalajara Jal., México, Octubre, 1985.
8. Cress, S.L. "Electro-Thermal Damageability of Fusible Elements. International Conference on Fusing IREQ-LAB. Varenes, Quebec, - Can. Nov. 2, 3, 4, 1981.
9. Fortin, Marcel "Characteristics of High-Voltage Current-Limiting Fuses for Distribution Systems". 1982 IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7 July 1982.
10. Bennett, R.E.; Leach, J.G. "Fuse Selection Criteria for Distribution Transformer Overcurrent Protection".
11. Martin, Vance B. Complete Protection for Overhead Transformers.
12. Freund, Arthur "Overcurrent Protection Selection and Application". Electrical Construction and Maintenance, July 1980 pp 53-58
13. ANSI/IEEE C57.12.00-1980 "Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers."
14. IEC RECOMMENDATION 282-2, 1970. "High Voltage Fuses".
15. IPCEA, PUBLICATION P-32-382 "Short Circuit Characteristics of Insulated Cable", 1973
16. ANSI C37.48-1974 "Guide For Application, Operation and Maintenance of Distribution Cutouts and Fuse Links, Secondary Fuses, District Enclosed Single-Pole Air Switches, Power Fuses, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories".
17. S&C Electric Co., Descriptive Bulletin 351-30 "S&C Open Cutouts Type XS Outdoor Distribution"
18. S&C Electric Co., TCC Number 165-1; 165-1-4 "SMU FUSE UNIT S&C "K" SPEED".

4. CAUSAS DE OPERACION DE LOS FUSIBLES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

Las principales causas de operación de los fusibles en los sistemas de -- distribución son las siguientes:



I N D I C E

G-601093

- 1.- El fusible como dispositivo de protección en sistemas de distribución.
- 2.- Estudios de las características de operación de fusibles de distribución de potencia tipo expulsión.
- 3.- Protección contra sobrecorrientes.
- 4.- Protección contra sobrecorrientes por medio de fusibles en sistemas de distribución.
- 5.- Experiencias sobre protección secundaria en transformadores de distribución tipo poste de 23 kV.
- 6.- Estudio de fallas de fusibles limitadores en sistemas de distribución subterráneas en 23 kV.
- 7.- Coordinación de protección contra sobrecorrientes en transformadores de distribución aérea.
- 8.- Aplicación de interruptores termomagnéticos en la protección del lado de baja tensión de transformadores de distribución tipo poste.