



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**E. N. E. P. ARAGON**

100

**SELECCION DE APARTARRAYOS EN  
LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION**

Sist. 29247.

**T E S I S**  
QUE PRESENTA EL C.  
**JOAQUIN FELIPE PALMER ARIAS**  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICO**

México, D. F.

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
UNAM

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON  
DIRECCION

JOAQUIN FELIPE PALMER ARIAS  
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 7 de octubre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. PASCUAL RIVERA MUÑOZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado " SELECCION DE APARTARRAYOS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., octubre 24 de 1983.  
EL DIRECTOR

LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería (Mecánica)  
Unidad Académica.  
Departamento de Servicios Escolares.  
Director de Tesis.

A MIS PADRES,  
SOFIA Y JOAQUIN FELIPE.

Porque gracias a su apoyo y consejo,  
y la enorme fé que depositaron en mí,  
hicieron posible que llegara a una de las  
realizaciones más grandes de mi vida,  
lo cual constituye el patrimonio más valioso  
que pudieran darme.

Con admiración y respeto.

A MI ESPOSA,  
MARIA GUADALUPE.

Por la felicidad que me ha otorgado,  
y por el ánimo que me dió para la  
culminación de este trabajo.

Con todo mi amor.

A MI PEQUEÑO HIJO,  
JOAQUIN JONATHAN.

Porque hizo que se reafirmara en mí,  
el espíritu de lucha y el deseo de superarme  
en la vida.

Deseando que ésto le sirva algún día.

A MIS HERMANOS,  
ANTONIO, LAURA, GABRIEL Y CLAUDIA.

Por los días difíciles que pasamos,  
por lo poco o mucho que nos dieron  
nuestros padres, su sacrificio no fue  
en vano.

Deseando que aprovechen al máximo el  
esfuerzo de ellos y algún día logren  
todas sus metas, y cristalicen todos  
sus anhelos.

A MIS PROFESORES.

Porque dedicaron parte de sus vidas  
en mi formación académica,  
y me ayudaron a ser un hombre de bien.  
Con toda mi gratitud.

A MI ASESOR DE TESIS,  
ING. PASCUAL RIVERA MUÑOZ.

Por su enorme ayuda e interés mostrado,  
para la realización de este trabajo.  
Con todo mi agradecimiento.

A MIS COMPAÑEROS DE ESCUELA:

Por la valiosa cooperación que me  
dieron, y su desinteresada ayuda que  
me proporcionaron, para salvar los  
obstáculos presentados en mi carrera  
estudiantil.  
Con toda mi estimación.

## INDICE

	Pág.
INTRODUCCION.	
I. ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.	
1. Generalidades.	1
2. Sistema de distribución aéreo.	6
2.1. Sistema de distribución aéreo primario . .	7
2.1.1. Clasificación según su operación.	8
2.1.2. Materiales normalizados para la construcción de estos alimentado- res.	10
2.2. Sistema de distribución aéreo secundario.	12
2.2.1. Corriente trifásica de cuatro hi- los.	12
2.2.2. Voltajes.	14
2.2.3. Tipos de red.	15
2.2.4. Conductores.	17
3. Sistema de distribución subterráneo.	19
3.1. Sistema de distribución subterráneo pri- mario.	20
3.1.1. Tipos de estructura.	20
3.1.2. Descripción y funcionamiento del equipo.	24
3.2. Sistema de distribución subterráneo se- cundario.	28
3.2.1. Tipos de estructura.	31

3.2.2. Descripción y funcionamiento del equipo.	37
3.2.3. Operación de los cables de baja tensión en la red automática.	39
3.2.4. Determinación del porcentaje de carga según el número de alimentadores.	42
II. LAS SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.	47
1. Generalidades.	47
2. Origen de las sobretensiones.	48
2.1. Sobretensiones de origen externo o atmosféricas.	49
2.1.1. Teoría de Simpson.	49
2.1.2. Teoría de Elster y Geitel.	50
2.1.3. Teoría de C.T. Wilson.	51
2.1.4. Teoría de Findeisen y Wichmann.	52
2.1.5. Efectos de las descargas atmosféricas.	52
2.1.6. Tipos de sobretensiones de origen externo.	53
2.1.7. Nivel cerámico.	55
2.2. Sobretensiones de origen interno.	56
2.2.1. Clases de sobretensiones de origen interno.	56
2.2.2. Voltaje de reestablecimiento o de recuperación.	58

2.2.3. Sobretensiones por desconexión - de circuitos capacitivos.	59
2.2.4. Sobretensiones por desconexión - de circuitos inductivos.	65
III. EL APARTARRAYO.	67
1. Generalidades.	67
2. Definición del apartarrayos.	67
3. Principio básico de operación.	68
3.1. Ciclo de operación del apartarrayos ti- po valvular.	73
3.2. Ciclo de operación del apartarrayos ti- po expulsión.	75
4. Partes de que se compone un apartarrayos.	76
IV. CLASIFICACION Y PRUEBAS.	82
1. Generalidades.	82
2. Apartarrayos clase estación.	82
3. Apartarrayos clase línea.	83
4. Apartarrayos clase distribución.	83
5. Pruebas.	85
5.1. Pruebas de tensión de descarga a frecuen <u>cia</u> del sistema.	87
5.2. Prueba de descarga al impulso con ten- sión normalizada, equivalente a un rayo.	88
5.3. Prueba de descarga con frente de onda de tensión de impulso.	90
5.4. Prueba para determinar la curva de ten-	

sión de descarga al impulso por manio- bras de interruptores-tiempo.	91
5.5. Prueba de tensión residual.	95
5.6. Pruebas de corriente al impulso.	96
5.6.1. Prueba de alta corriente al im- pulso, corta duración.	98
5.6.2. Prueba de baja corriente al im- pulso, larga duración.	100
5.7. Prueba de operación.	104
5.8. Prueba de alivio de presión.	112
5.8.1. Pruebas de alivio de presión con alta corriente.	113
5.8.1.1. Pruebas de alta corrien <u>t</u> te a 77% de la tensión nominal.	114
5.8.1.2. Pruebas de alta corrien <u>t</u> te a menos del 77% de - la tensión nomiral.	115
5.8.2. Pruebas de alivio de presión con baja corriente.	117
5.9. Prueba del dispositivo de desconexión - del apartarrayos.	118
5.10. Prueba de tensión de ionización inter- na y tensión de radio-interferencia.	120
5.11. Pruebas en seco y en húmedo.	121

V.	SELECCION DE APARTARRAYOS.	125
	1. Generalidades.	125
	2. Voltaje de línea a tierra.	126
	3. Voltaje de operación.	129
	4. Coeficiente de aterrizamiento y de selección.	130
	5. Método de selección.	131

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA.

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

En los últimos años, el desarrollo de la industria eléctrica en México ha tenido un despegue aceptable, por lo que su importancia es vital para el desarrollo de nuestra nación.

La generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, son las tres partes primordiales que componen esta industria.

La distribución de la energía eléctrica es el último eslabón de este gran esquema que conforma la industria eléctrica, es el punto final de los sistemas eléctricos en toda su estructura y es sin duda, la parte culminante a todo un desarrollo anterior que finaliza en la labor de hacer llegar la energía eléctrica a los consumidores.

Dada pues, su importancia, de los sistemas de distribución de energía eléctrica, es conveniente y necesario, desde el punto de vista económico y social proporcionarles la protección necesaria de acuerdo al servicio que de estos sistemas se requieren; la efectividad que el ser humano siempre ha deseado en todo sistema de que se vale para producir es del 100%, es decir, se trata de que siempre los sistemas de cualquier índole -y más en los sistemas de potencia- trabajen al 100% de su capacidad, o sea, que no haya pérdidas, que su eficiencia sea neta, pero es inobjetable decir que siempre existirán las pérdidas, ya que no

existe, aún, sistema perfecto.

Existen dos clases de sobretensiones que ocasionan disturbios en los sistemas de distribución de energía eléctrica y que provocan diversas pérdidas en ellos, el saber cómo están constituidos -los sistemas de distribución-, los disturbios ocasionados por las sobretensiones internas y externas y cómo se pueden proteger de ellas por medio de los - - apartarrayos en base a la selección adecuada de los mismos, es el objetivo de este trabajo.

En el capítulo I, se enfocan los sistemas de distribución de energía eléctrica, su estructura, los diferentes - - arreglos de las redes, sus voltajes de operación, su clasificación y los elementos que los constituyen; el capítulo - II trata de la teoría de las sobretensiones que en ellos se presentan, su clasificación, su origen y los efectos que - - producen; el capítulo III determina la definición del apartarrayos en un amplio contexto, es decir, los tipos que - - existen, su mecanismo básico de operación y los elementos - qué lo constituyen; el capítulo IV incluye la clasificación que de los apartarrayos se hace y las diversas pruebas tanto de diseño como de prueba y rutina a los cuales se someten, estas pruebas son normalizadas y en nuestro país la mayoría de ellas se realizan en el extranjero y vienen certificadas; el capítulo V se refiere a la selección de los - - apartarrayos en base al método que se describe en ese capítulo y finalmente las conclusiones y recomendaciones que so

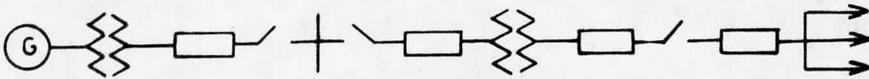
bre el particular se hacen.

## CAPITULO I

### ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

#### 1.- Generalidades.-

De una manera general, un sistema de energía eléctrica se compone de una gran variedad de cargas eléctricas, repartidas en un área determinada, una representación esquemática de un sistema de energía eléctrica, es como a continuación se muestra:



Como se sabe, en las plantas generadoras es donde se produce la energía eléctrica consumida por las cargas, por otra parte el esquema anterior nos muestra que dicho sistema se compone de una red de transmisión y distribución para transportar esa energía -proveniente de las plantas generadoras- a los puntos de consumo y con la ayuda de equipo adicional, se logra que el suministro de dicha energía, se realice con la calidad necesaria, para que se logre lo anterior, es necesario tener en cuenta los tres siguientes factores, que nos determinan si la calidad del servicio proporcionado por la compañía suministradora es el adecuado:

- Continuidad del servicio.

- Regulación del voltaje.
- Control de la frecuencia.

Del esquema anterior, se observa que las partes principales de que consta todo sistema de energía eléctrica son: generación, transmisión y distribución, a su vez, éste último esta integrado por: S.E. de distribución, redes primarias, transformadores de distribución, redes secundarias, acometidas y medición al servicio del cliente, cada uno de estos elementos esta íntimamente relacionado con los demás, de tal forma que la alteración de uno de ellos generalmente afecta a los demás.

Los sistemas de distribución, pueden adoptar diversas posiciones, ya sea que la distribución se haga con líneas aéreas o subterráneas y diferentes arreglos de la topología del sistema, como pueden ser: radial, anillo y red. Esto depende de la densidad de carga en una región dada y del tipo de la misma.

En un sistema radial, las cargas tienen una sola alimentación, de manera que una avería en la alimentación produce una interrupción del suministro como se muestra en la figura 1.

Con un sistema en anillo, se tiene una doble alimentación y puede interrumpirse una de ellas sin causar una interrupción del suministro, tal como se ve en la figura 2.

Con una red, se aumenta el número de interconexiones y consecuentemente la seguridad del servicio, como se aprecia

en la figura 3.

Por otra parte, la distribución de la energía eléctrica se inicia de manera paralela a las aplicaciones iniciales que se hacían con la electricidad, como el caso del teléfono, telégrafo y alumbrado público.

Los sistemas de distribución, se lograron por medio de corriente alterna tal como se conocen y aplican en la actualidad, transportando grandes cantidades de energía eléctrica en alta tensión a lugares lejanos y por medio de transformadores de distribución se reduce el voltaje a la tensión comercial que se utiliza.

La instalación de líneas aéreas, es importante para el desarrollo de estos sistemas, por lo que su empleo se generaliza dado su relativo bajo costo.

En la Ciudad de México, en los inicios de este siglo, se inicia la distribución de la energía eléctrica por medio de líneas aéreas, siendo los voltajes empleados en la distribución primaria de 3 000 Volts, luego se usaron 6 000 Volts y hoy en día por razones del alto incremento de la carga se esta usando a 23 000 Volts; aunque debe hacerse mención, que dado el gran índice de crecimiento de la ciudad, se ha hecho necesario hacer la repartición o distribución de la energía eléctrica por medio de cables subterráneos.

De esta manera, los sistemas de distribución tienen dos tipos de estructura:

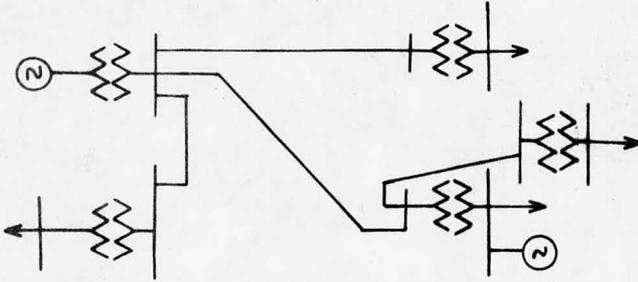


Figura 1-Sistema radial

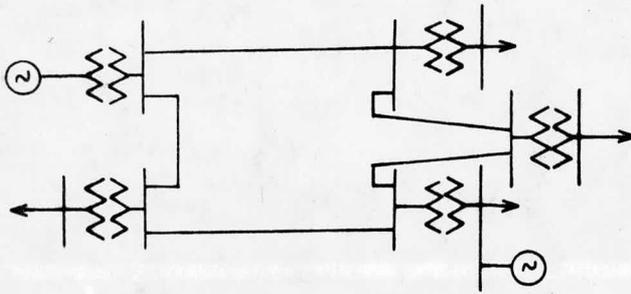


Figura 2-Sistema en anillo

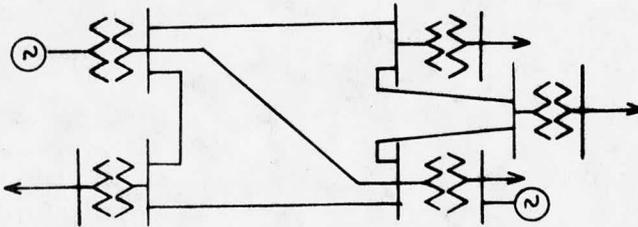


Figura 3-Red

- Aérea.
- Subterránea.

Además, éstas dos formas tienen una subdivisión que es la siguiente:

Sistemas de Distribución	1. Aéreo	a. Primario
		b. Secundario.
	2. Subterráneo	a. Primario
		b. Secundario.

Los elementos que se encargan, de distribuir la energía eléctrica en cualquiera de los dos tipos existentes - - aéreo y subterráneo- se denominan alimentadores.

Los factores que se citan a continuación, deben prevalecer y tenerse muy en cuenta para el diseño de un alimentador:

- Continuidad.
- Eficiencia.
- Regulación.
- Flexibilidad.
- Costo.

No podemos pasar por alto, que un sistema de distribución de energía eléctrica siempre nos representa un proceso dinámico, de ahí que los alimentadores adopten ciertas configuraciones, para que, en un momento dado, puedan absorber todos los incrementos de carga del sistema de una manera relativamente fácil, que nos aseguren el máximo de continuidad y operen de la manera más eficiente posible, estas ase-

veraciones han originado una serie de configuraciones o tipos de red que son las más aceptadas.

## 2. Sistema de distribución aéreo. -

Una de las principales características de la electricidad y que nunca debe pasar inadvertida, es su peligrosidad. En ciertas condiciones, el contacto accidental con una línea "desnuda" que contenga un determinado potencial, puede causar la muerte instantánea.

Por otra parte, pequeños bloques de potencia, no justifican gastar mucho en aislamientos de alta tensión, salvo que ello fuera indispensable. Por estas y otras razones, las líneas de las instalaciones interiores, al alcance de personas y animales siempre deben ser líneas de baja tensión.

Como toda conducción de energía eléctrica, por muy grueso que sea el calibre del conductor, siempre se efectúa a costa de una pérdida de voltaje, la distancia entre el lugar de consumo y el de generación, tendría que ser necesariamente muy pequeña si se pretendiese transmitir la energía al mismo voltaje de utilización. Esto obligaría a instalar plantas demasiado pequeñas y numerosas, dado lo exiguo de su radio de acción, tal situación es, obviamente, antieconómica.

La economía exige, además, que se trate de unidades de gran potencia, es por ésto que las plantas generadoras siempre suelen estar alejadas de los puntos de consumo, ello --

obliga a transmitir la energía en alto voltaje, un voltaje inadecuado para su utilización directa.

Las líneas de distribución son, precisamente, las encargadas de reducir paulatinamente este voltaje, hasta un valor apropiado para su empleo y de hacer llegar la energía hasta el sitio preciso de consumo.

Las redes de distribución exigen una inversión tan grande que no es exagerado decir que constituyen la parte más importante de las empresas suministradoras de energía eléctrica.

## 2.1 Sistema de distribución aéreo primario.-

La función de los alimentadores primarios, es la de repartir o distribuir la energía que emana de la subestación de potencia a la carga; éstos alimentan servicios de grandes fábricas o comercios, en donde el propio usuario se encarga de reducir el voltaje a valores no peligrosos. Este tipo de sistema alimenta, igualmente, los transformadores de distribución, a partir de los cuales surge el sistema de distribución secundario.

Las líneas de transmisión de alto voltaje (en nuestro país ya las hay de 400 kV) llegan a las subestaciones receptoras, éstas, suelen formar anillos para una mejor distribución de la carga. En ellas, el voltaje se baja, ya sea hasta el valor utilizado para las líneas primarias de distribución, o bien a un voltaje intermedio con objeto de alimentar otras subestaciones de menor potencia, o interconectar-

se con anillos de menor voltaje que existen por tratarse de instalaciones más antiguas.

Así, de esta manera, a partir de estas subestaciones receptoras, salen las líneas primarias de distribución.

Generalmente, se emplean tensiones de: 2 400, 3 000, 4 160, 4 300, 5 600, 7 200, 12 470, 13 200, 13 800, 22 900, 24 940 y 34 500 Volts. En nuestro país, las tensiones de operación de estos alimentadores primarios de distribución son de: 6 000, 13 800, 22 900 y 34 500 Volts.

En la actualidad, la República Mexicana tiene dos empresas suministradoras de la energía eléctrica y que son: Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación) y la Comisión Federal de Electricidad.

La primera, emplea para su distribución primaria dos tensiones: 6 y 23 kV., aunque la tensión de los 6 kV., tiende a desaparecer por razones que ya se citaron anteriormente, mientras que la segunda tiene los siguientes valores de tensión con los que opera: 13.8 y 34.5 kV.

#### 2.1.1.- Clasificación según su operación.

Las redes primarias de distribución, por su tipo de operación, se clasifican de la siguiente manera:

- Radial.
- Paralelo.

Por definición, en un sistema radial, el flujo de energía tiene una sola trayectoria: de la fuente a la carga,

mientras que en el paralelo, se tiene más de una trayectoria. Por otra parte, los dos tipos mencionados poseen una gran variedad y diversidad de modificaciones en su estructura.

En particular, los sistemas aéreos de distribución -- primario tienen la característica de ser sencillos y económicos, razón muy poderosa para que su uso este generalizado, ya que se adaptan principalmente a:

a) Zonas urbanas con:

- Carga residencial.
- Carga comercial.
- Carga industrial.

b) Zonas rurales con:

- Carga doméstica.
- Carga de pequeña industria (bombas, molinos, - - etc.).

Los elementos principales de este sistema como son -- los transformadores, cuchillas, seccionadores, restauradores e interruptores se instalan en postes de concreto, madera o acero.

La configuración más sencilla, empleada para los alimentadores primarios es del tipo arbolar, la cual consiste en conductores de grueso calibre en la troncal y de menor calibre en las derivaciones o ramales. Se estructuran de -- tal manera que el área por él abarcada, quede enmarcada por su troncal y dividida en tres cuadros o módulos por líneas

de igual calibre; se unen los lados opuestos de un módulo - por líneas llamadas de amarre, cuyos calibres son de 1/0 y sus ramales o derivaciones para alimentar a los transformadores son de calibre No. 2, tal como se aprecia en la figura 4.

2.1.2.- Materiales normalizados para la construcción de estos alimentadores.

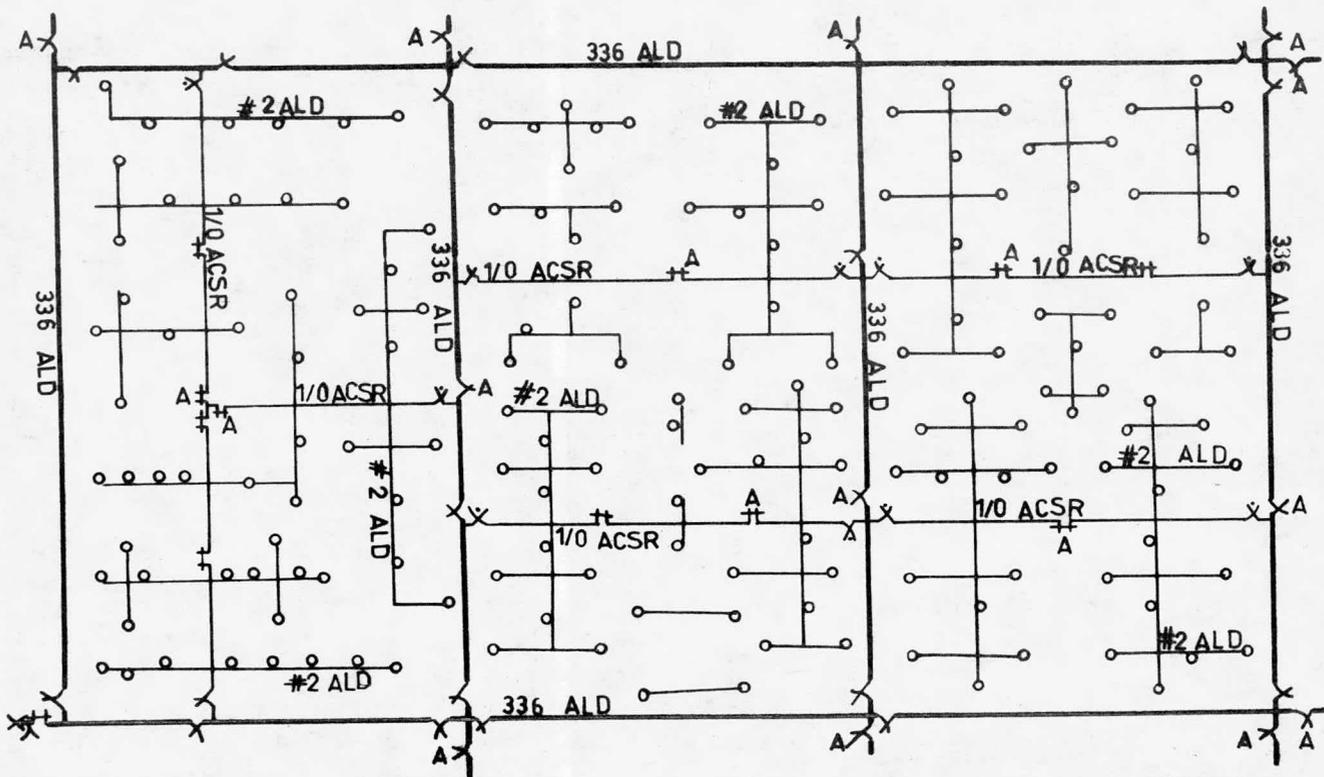
a) Conductores y sus características.- Se ha dado -- preferencia al uso de conductores de aluminio, por ser más económicos, ligeros y presentar menos el fenómeno de efecto corona que los conductores de cobre, los cuales se han - dejado para aplicaciones especiales, como son las zonas con taminadas con vapores que atacan el aluminio.

Se muestra a continuación una tabla para una mejor vi sualización de este punto.

DESIGNACION	H I L O S			EQUIVALENTE Cobre	SECC. CORRIENTE mm <sup>2</sup> Normal A.	U S O
	Al.	Acero				
ACSR 2	6	1	4	39.24	160	Ramales
ACSR 1/0	6	1	2	62.39	220/	Líneas - de Amarre
Ald 336	19	0	4/0	170.5	470	Troncales

b) Aisladores y crucetas. - Los aisladores son de porcelana y del tipo alfiler o suspensión y de tensión; las -- crucetas utilizadas son de fierro canal de 150 mm., de an--

Figura 4.-Estructura del sistema de distribución aéreo primario



- X Interruptor en aire, capacidad nominal 600 Amperes, 1 cámara de extinción (operación manual).
- X Interruptor en aire, capacidad nominal 400 Amperes, 1 cámara de extinción (operación manual).
- ⌚ Cuchillas de navaja para abrir sin carga.
- X Juego de terminales monofásicas.

- ∧ Juego de apartarrayos.
- o Transformador de distribución.
- A Interruptores y cuchillas, normalmente abiertas.

cho y de diferentes longitudes según la disposición de los conductores, como se observa en la figura 5.

La capacidad normal de los alimentadores de 23 kV., es de 9 ó 12 MVA, dependiendo de la capacidad de la subestación.

## 2.2. Sistema de distribución aéreo secundario.

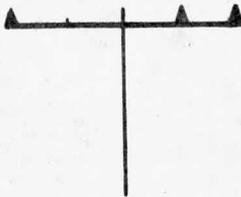
Este sistema de distribución opera al voltaje de utilización y, mediante acometidas y por medio de medidores, entrega la energía a los domicilios de los consumidores; -- siendo el voltaje secundario de 220 Volts entre fases y de 127 Volts entre fase y neutro, ya que se emplean líneas trifásicas de cuatro hilos.

### 2.2.1. Corriente trifásica de cuatro hilos.

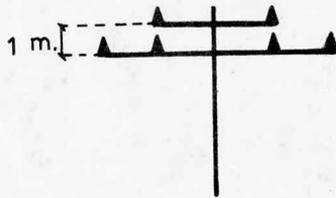
El método más empleado, para determinar cual es el sistema más eficiente para poder conducir la energía eléctrica, consiste en comparar los pesos de cobre requeridos para transmitir una misma carga a un voltaje determinado, a igualdad de pérdidas en la transmisión. Se toma como 100%, es decir, como base de referencia al sistema monofásico de dos hilos. En este cálculo, se considera que todas las corrientes tienen un factor de potencia igual a la unidad y -- que todas las líneas de varias fases trabajan equilibradas, para el neutro se considera un calibre igual a la mitad del empleado para las fases.

De acuerdo a ésto, se ve que el sistema más eficiente, es decir, el que requiere menor peso de cobre, es la distri

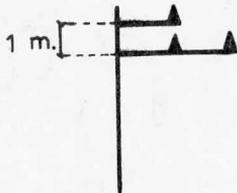
CIRCUITO SENCILLO NORMAL



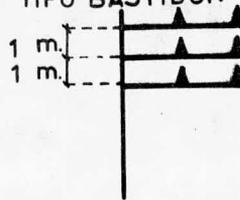
CIRCUITO DOBLE NORMAL



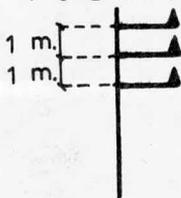
CIRCUITO SENCILLO VOLADO



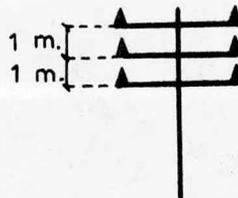
CIRCUITO DOBLE VOLADO  
TIPO BASTIDOR



CIRCUITO SENCILLO VOLADO  
TIPO BASTIDOR



VARIANTE CON 3 CRUCETAS 62



VARIANTE



VARIANTE

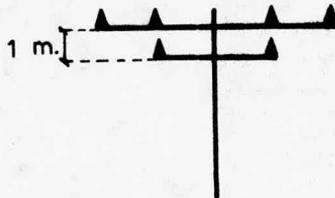


Figura 5-Diferentes tipos de construcción en el sistema de distribución aéreo primario

bución trifásica con neutro, ya que la cantidad de cobre es apenas del 29.2% de la requerida por el sistema patrón, es decir, por la distribución monofásica a dos hilos.

Es obvio, que este razonamiento no es válido cuando - las condiciones en que está basado no se dan en la reali- - dad, pero en zonas con una alta densidad de carga y cuando es necesario equilibrarlas, como acontece en las zonas urba- nas de nuestro país, dicho razonamiento se considera el ade- cuado; es por ello que se ha optado por las líneas trifási- cas de cuatro hilos para los sistemas de distribución aéreo secundario.

#### 2.2.2. Voltajes.

Los voltajes de los sistemas de distribución secunda- rio, se procura que no sean de peligro para la vida de los individuos, en caso de contacto accidental.

La Comisión Electrotécnica Internacional ha tratado - de poner un poco de orden en la gran diversidad de voltajes que se usan en el mundo, y ha agrupado las tensiones reco- mendadas en las siguientes series:

---

TIPO DE SERVICIO	SERIE I Volts	SERIE II Volts
Trifásico, 4 hilos	127/220	120/208
Trifásico, 3 hilos	220	240
Trifásico, 4 hilos	230/380	240/415
Trifásico, 3 hilos	380	480
Trifásico, 3 hilos	500	600
Monofásico, 2 hilos	127	120
Monofásico, 3 hilos	---	120/240

---

Se recomienda, además, que cada país utilice únicamen  
te los voltajes de una de las dos series.

### 2.2.3. Tipos de red.

Se procura que cada transformador de distribución, --  
alimente un sistema aéreo secundario aislado -eléctricamen-  
te- de los demás por tres razones:

a) Control de la carga del transformador.- Si las re  
des operaran en paralelo, la energía seguiría la ruta de me  
nor impedancia y no podría controlarse que el transformador  
tomase una carga adecuada a su capacidad.

b) Control de la carga en las líneas.- Por la misma  
razón anterior, la distribución de corrientes sería automá-  
tica y, por lo tanto, no podría evitarse que una corriente  
demasiado intensa pasara por un tramo de calibre insuficien-  
te.

c) Evitar la operación inversa de los transformadores.- Las áreas abastecidas por los transformadores continuos pertenecientes a distintas líneas primarias, pondrían en paralelo dichas líneas. Ello, además, haría que la corriente de falla subiese de valor con el peligro que esto acarrea.

Estando las redes aisladas unas de otras, se les puede dar las siguientes dos disposiciones:

- Anillo.

- Radial.

Para la disposición en anillo, existe un procedimiento muy ingenioso de cálculo, que establece que la corriente que circula en una dirección, a partir del transformador, es igual a la suma de todos los momentos de las corrientes de carga, por la impedancia del circuito hasta cada carga, medida en dirección opuesta, dividido entre la impedancia de todo el anillo. A partir de ese dato, y descontando la corriente que se queda en cada servicio, se van determinando las corrientes en cada tramo hasta el punto de menor voltaje, que es precisamente el que recibe corriente por ambos lados, por lo que esta disposición garantiza una mejor regulación.

Para la disposición de estas líneas en forma radial, el cálculo de la caída de voltaje no ofrece dificultad alguna, ya que para los cálculos, se consideran corrientes colineales y equilibradas, es decir, todas las cargas traba-

jan con un factor de potencia de 0.8.

#### 2.2.4. Conductores.

Con miras a la conductividad eléctrica, se suele escoger el cobre que tenga la máxima pureza, pues es el que tiene la mínima resistencia específica, en estas condiciones, la conductividad del cobre comercial es ligeramente inferior al de la plata y muy superior a la del aluminio, que es el que le sigue en conductividad.

Pero, debido a las siguientes razones, el aluminio esta desplazando al cobre:

- Menor peso a igualdad de resistencia eléctrica y longitud.
- Resistencia a la corrosión.
- Economía relativa dada la situación económica del país.
- Facilidad de fabricación.
- Amagnetismo.
- Resistencia a la tracción.

De todas ellas, la principal es, desde luego, la economía.

Con los precios normales del mercado, el conductor de aluminio con alma de acero, llamado ACSR, es más barato que el equivalente de cobre, además, a igualdad de conductibilidad, el ACSR es en un 50% más resistente y un 20% más ligero, con lo que puede trabajarse con flechas menores. En la

práctica, ésta ventaja se aprovecha para aumentar los claros interpostales, o sea, para disminuir el número de postes.

Por razones de almacenaje, se ha procurado limitar al máximo la diversidad de calibres empleados para las líneas de distribución secundaria al grado de que los calibres normalizados son solamente dos:

- a) 1/0 AWG - Para líneas reforzadas.
- b) 4 AWG - Para las líneas generales.

El hilo neutro es, en ambos casos, del No. 4 AWG.

Para el empleo de los conductores en el sistema aéreo de distribución secundario, se utilizan dos alternativas:

a) Línea abierta desnuda.- Esta soportada por bastidores que disponen verticalmente los conductores, quedando las tres fases arriba y el neutro en la parte inferior. Los conductores de las fases, se soportan en unos carretes de porcelana que les proporcionan el aislamiento requerido, mientras que el hilo neutro, se fija a unos rollos de zinc o de hierro fundido, que pone a tierra todo el herraje. Todo el conjunto, formado por los tres carretes y el rollo, esta atravesado por una varilla de acero.

Una modalidad de esta línea abierta, es que en lugar de emplear bastidor, se utiliza una cruceta y los conductores y el neutro se disponen en forma horizontal, esto es siempre y cuando se desee ganar altura.

b) Línea trenzada.- Posee los conductores aislados,

alrededor de un cable desnudo, también de cobre, que sirve de neutro, recibe el nombre de BMCU o "neutranel" y puede ser de dos calibres: 3 X 4 ó 3 X 1/0. Esta última disposición, tiene la ventaja de una mejor apariencia, pues la línea se pierde frente de las fachadas de las casas, y de su menor impedancia, pues la reactancia inductiva adquiere un valor mínimo; tiene sin embargo, el inconveniente de que hay que quitar el aislamiento para conectar cada acometida y, además, que en caso de una falla, se suele quemar por tramos enteros. Es ideal, sin embargo, en zonas arboladas y protege algo contra conexiones fraudulentas.

### 3. Sistema de distribución subterráneo.

Con el advenimiento de grandes densidades de carga, junto a las demandas gubernamentales y públicas por un servicio eléctrico más confiable y seguro, las empresas eléctricas se han obligado a ampliar sus sistemas por medio de cables subterráneos, con el objeto de reducir las interrupciones debidas a rayos, tormentas y choques de vehículos a los cuales están expuestas las redes aéreas, y que son prácticamente eliminadas con las redes subterráneas.

Esta reducción, en la exposición de las instalaciones o contingencias físicas que las afectan, aumenta generalmente su seguridad pero también reduce su accesibilidad, lo que ocasiona que en caso de falla pueda llegar a tener una larga interrupción.

### 3.1. Sistema de distribución subterráneo primario.

La finalidad del sistema primario, es transportar la energía eléctrica, del bus de la subestación principal o de repartición de carga, a los devanados primarios de los transformadores de las subestaciones de distribución por medio de los cables alimentadores troncales.

Existen también, arreglos en los que la red primaria tiene enlace con varias subestaciones de repartición, seccionando los cables alimentadores primarios en un punto conveniente, para que en caso de falla en alguno de éstos o para efectuar trabajos de mantenimiento se transfiera la alimentación.

#### 3.1.1. Tipos de estructura.

Los sistemas de distribución subterráneo primario tienen tres tipos de estructura, que son los más aceptados y empleados en nuestro país y que son los siguientes:

a) Radial con dispositivos seccionadores. - Un seccionador, es un dispositivo que sirve para abrir un circuito con carga, pero no bajo condiciones de falla, posee un mecanismo en el cual acumula una "memoria" del número de operaciones del aparato protector que lo respalda, lo que le permite abrir sus contactos después de 1, 2 o 3 operaciones, según el ajuste previo, por lo que el seccionador no interrumpe corrientes de falla. De esta manera, este sistema consiste en llevar un solo cable troncal hasta el área de carga, donde se derivan los ramales para cada centro de car

ga teniendo un dispositivo seccionador de operación manual en cada ramal. La protección de este sistema es el interruptor localizado en la subestación de distribución, lo que ocasiona que al ocurrir una falla sobre la troncal o en uno de los ramales se sufra una interrupción temporal mientras la falla es localizada. Una vez localizada esta falla se secciona y se reestablece el servicio en el resto del alimentador. Para una mejor visualización de este tipo de estructura se aprecia en la figura 6.

b) Anular.- Este sistema consiste, de un alimentador que parte de la subestación de distribución y llega a la zona por alimentar, donde es seccionado, partiendo cada ramal a un centro de carga, de éste para llegar a otro y así sucesivamente hasta alimentar todos los centros de carga, cerrándose el anillo en otro punto de seccionamiento donde el anillo es reforzado por otro alimentador. El anillo trabaja normalmente abierto en su punto central.

Por lo general, cada centro de carga está constituido por transformadores instalados en casetas construídas expreso o en gabinetes de tipo intemperie, donde se tienen dispositivos desconectores a cada lado del transformador; al principio de las troncales hay interruptores que protegen todo el alimentador, en la figura 7 se aprecia este sistema.

c) Derivación múltiple.- La explotación de este tipo de estructura, se hace en base a un esquema de alimentadores preferentes y emergentes con transferencias manuales o

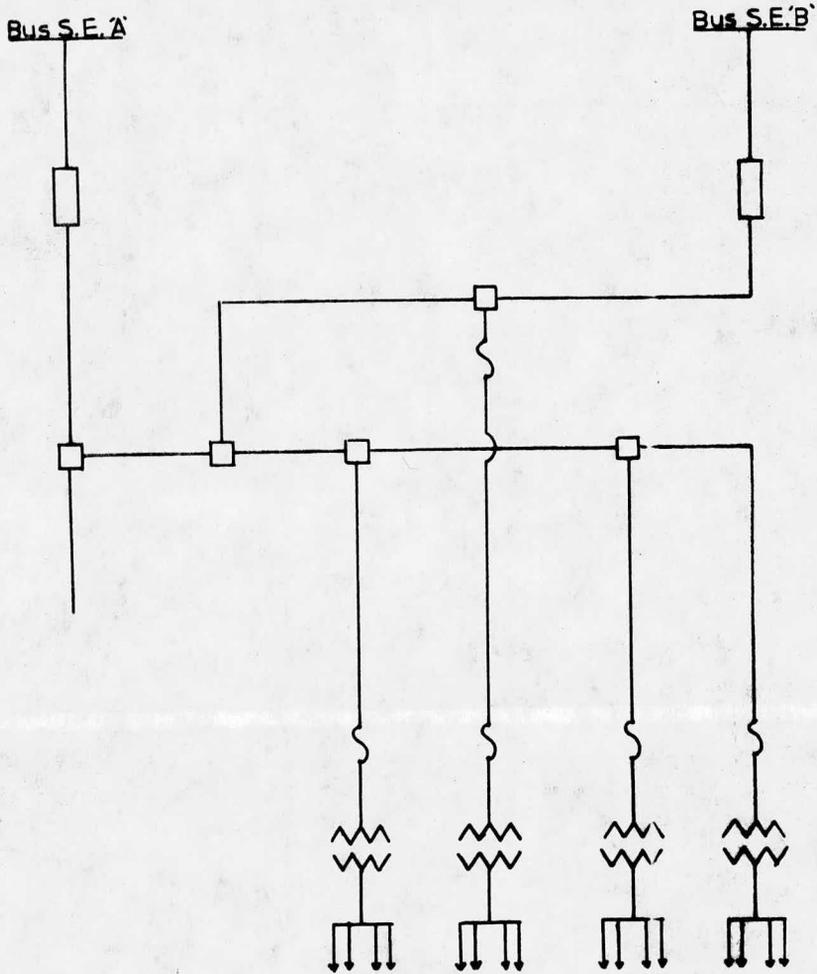


Figura 6.- Sistema de distribución subterráneo primario radial con dispositivos seccionadores

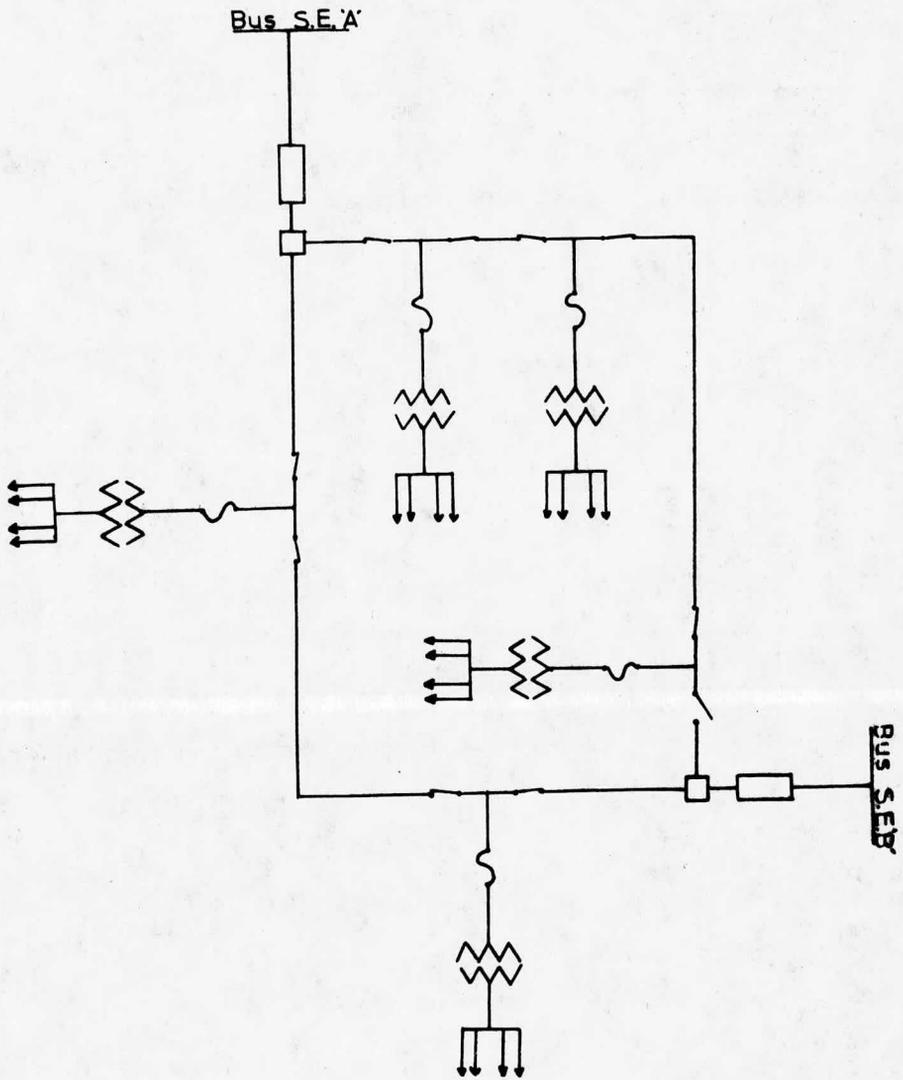


Figura 7-Sistema de distribución subterráneo primario  
anular

automáticas, siguiendo el principio de cambio de alimentación. De esta manera, éste sistema consiste en llevar varios cables troncales por toda el área que va a ser alimentada, de estos troncales, por medio de cajas de seccionamiento o interruptores, se derivarán los ramales que alimentarán el equipo que efectuará el cambio de alimentación en forma automática.

Estos equipos serán interruptores de transferencia y de ellos se deriva la acometida al servicio o a los transformadores de distribución. Este sistema, tiene la ventaja de poder proporcionar servicios en alta y baja tensión, lo cual le da flexibilidad. Al ocurrir un disturbio en una de las troncales, la carga de éste se reparte entre los alimentadores restantes en fracciones iguales, de acuerdo a la figura 8.

### 3.1.2. Descripción y funcionamiento del equipo.

Este punto abarca tres aspectos principales que son los siguientes:

1. Obra civil.- Se compone de los siguientes elementos:

a) Ductos.- Sirven para alojar los cables de alta tensión y en cruceros los cables de baja tensión. Los más utilizados son de: asbesto, concreto o cemento, sus características son:

- Pared interior suave, sin rugosidades que podrían dañar la cubierta del cable al instalarlo.

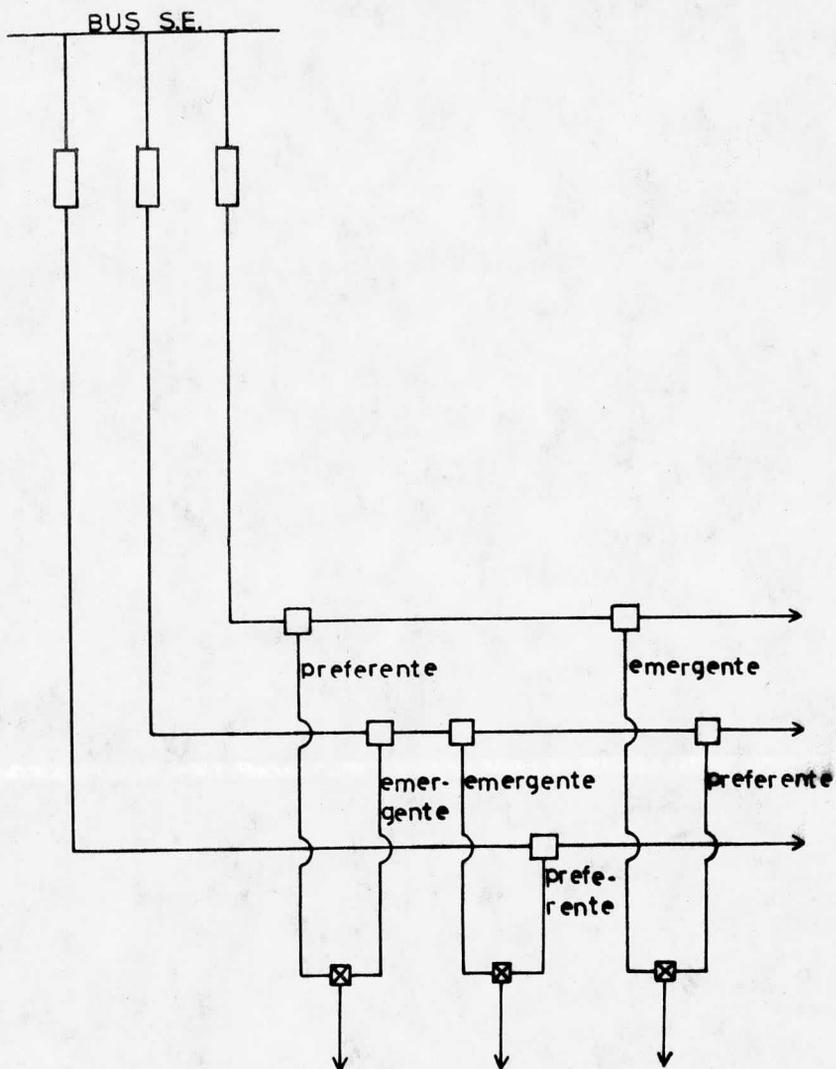


Figura 8-Sistema de distribución subterráneo primario  
en derivación múltiple

- Impermeable al agua.

- Inerte a la acción química y a la electrolisis.

b) Pozos de visita.- Son registros donde concurren las vías de ductos, alojan los conductores y permiten el acceso al personal que elabora las uniones o empalmes. Son de gran utilidad ya que permiten realizar cambios de dirección o libramientos de obstáculos tales como: tuberías de agua, redes telefónicas, etc., razón por la que se localizan de forma irregular; su construcción es de concreto ligero y malla soldada.

c) Subestaciones tipo bóveda.- Son construcciones subterráneas que sirven para alojar el equipo eléctrico de distribución tipo sumergible. Su forma es rectangular, su construcción es de concreto, cuenta con rejilla de ventilación y entrada, esta provista de reposadera.

d) Subestaciones tipo caseta.- Estas se utilizan en fraccionamientos y unidades habitacionales; es un cuarto de mampostería de acuerdo al anteproyecto de la empresa suministradora de energía eléctrica.

2. Instalación eléctrica.- Los cables de alta tensión que se emplean en las troncales, están constituidos por cables trifásicos de  $250 \text{ mm}^2$ , de sección, formados por tres conductores de cobre recocido, sección sectorial, aislamiento de papel arrollado en forma helicoidal, de conjunto impregnado por un compuesto de alta calidad dieléctrica, tiene una cubierta de plomo que le sirve como protección

contra golpes mecánicos para evitar la humedad y la posibilidad de fuga del compuesto dieléctrico, además, tiene un recubrimiento termoplástico de cloruro de polivinil para evitar la acción corrosiva.

Existen además, cables de 70 mm<sup>2</sup>., y 50 mm<sup>2</sup>., de sección según las necesidades del servicio, ya sea para ramales o derivaciones. Se instalan en ductos.

3. Accesorios y equipo. - Son dos los elementos primordiales de este sistema:

a) Transformadores. - Nos convierten la energía de un voltaje primario a un secundario. Son trifásicos los que más comúnmente se utilizan distinguiéndose los dos siguientes tipos:

- Para instalarse en bóveda al tipo sumergible, enfriado por aceite, es el que más se utiliza dado su relativo bajo costo, su principal inconveniente es que dicho elemento es inflamable. Estan dotados de tubos de enfriamiento en los costados del tanque.

- Para instalarse en subestación tipo interior o caseta, enfriado por askarel o inerteen. Los transformadores son de las mismas características, con la ventaja de que el medio aislante utilizado no es inflamable, el inconveniente que presenta es que su manejo es sumamente delicado, por lo que últimamente se esta eliminando.

La conexión es delta-estrella, con un defasamiento de 30° de la tensión secundaria respecto a la primaria. Las

capacidades más usuales son de: 200, 400, 500 y 750 KVA.

b) Interruptores de alta tensión.- Los más utilizados son de 2 y 3 vías, se emplean para abrir o cerrar los circuitos trifásicos y también como medio de seccionamiento. Se instalan en bóvedas o pozos, por condiciones de seguridad se operan sin potencial.

### 3.2. Sistema de distribución subterráneo secundario.

Los sistemas de este tipo, son el último eslabón de la cadena entre la estación de generación y los consumidores.

Al igual que los sistemas de distribución en alta tensión, también los sistemas de baja tensión tienen diferentes arreglos en sus conexiones y se siguen en general manteniendo los mismos principios de operación que en aquellos. Sin embargo, hay una importante diferencia entre los circuitos primarios y los secundarios, la cual afecta su operación, ésto es, que en los secundarios es posible trabajar con la línea "viva", teniendo las precauciones necesarias, por lo que este sistema se hace más flexible.

Este sistema -baja tensión- al igual que el sistema de distribución en alta tensión -o primario- consiste de alimentadores secundarios que tienen su origen en la baja tensión de los transformadores, en cajas de distribución o en los buses de las subestaciones secundarias y que llevan la energía hasta el lugar de consumo.

El arreglo que actualmente ofrece mayor ventaja en --

cuanto a funcionamiento y seguridad en su operación es la distribución secundaria por medio de buses cubiertos monofásicos. Dicho arreglo consta de lo siguiente:

De las salidas de la baja tensión en cada fase del transformador se conectan uno o más cables monofásicos según la carga de acuerdo a la disposición siguiente:

KVA	CABLES POR FASE
300	4 BTC 1 x 150 mm <sup>2</sup> . de sección
400	4 BTC 1 x 150 mm <sup>2</sup> . de sección
500	4 BTC 1 x 150 mm <sup>2</sup> . de sección
750	4 BTC 1 x 250 mm <sup>2</sup> . de sección

Posteriormente, el otro extremo del cable, se conecta ~~respectivamente~~ a cada uno de los buses monofásicos; de las salidas de los buses, se conectan los conductores monofásicos que están protegidos por fusibles, estos cables monofásicos se empalman con cables trifásicos en pozos de visita adyacentes a la bóveda y de ahí se distribuyen a los servicios por alimentar, este aspecto se observa en la figura 9.

Existen también arreglos de distribución secundaria o de baja tensión por medio de cajas de 6 vías, buses cubiertos, blindados, etc.

Este arreglo se dota de medios de seccionamiento y re alimentación como son: cajas de seccionamiento, juegos de -

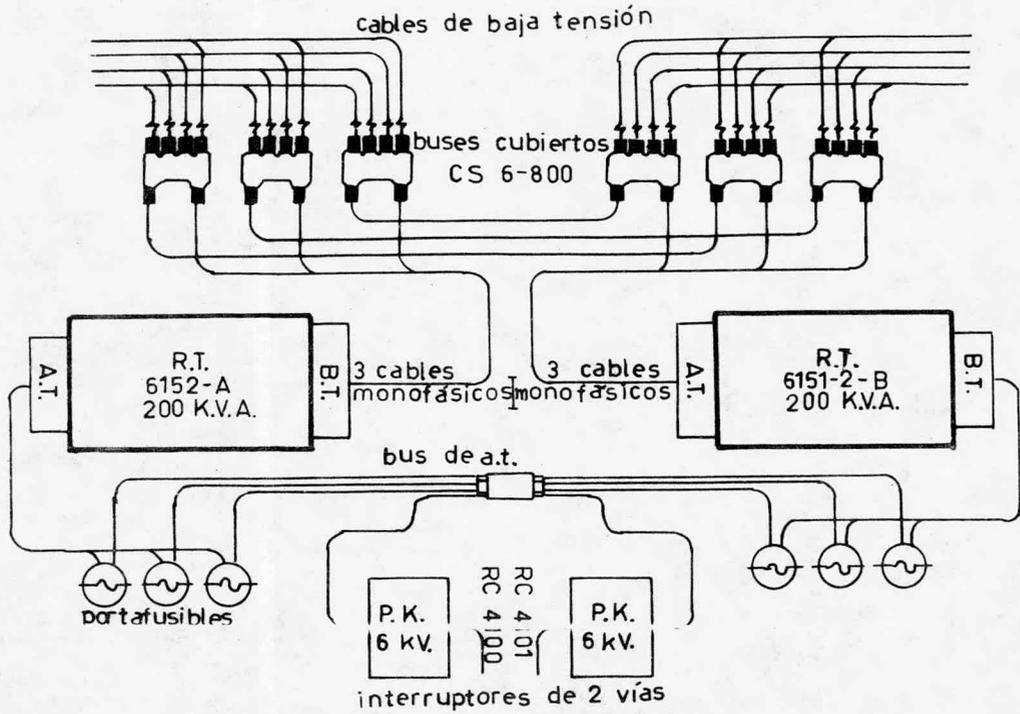


Figura 9- Sistema de distribución subterráneo secundario por medio de buses cubiertos monofásicos CS 6-800

barras, buses, etc., para que en caso de reparaciones prolongadas o para la ejecución de trabajos de mantenimiento, se proporcione el suministro regular de energía eléctrica a los usuarios.

### 3.2.1. Tipos de estructura.

Existen tres estructuras de redes secundarias en el sistema de distribución por medio de cables subterráneos:

a) Red radial sin amarres.- En este tipo de red, cables de sección apropiada, de acuerdo con la carga que alimentaran, parten en diferentes direcciones y a partir del lugar donde se encuentra instalado el transformador se forman los alimentadores secundarios. En esta red, una falla en el transformador o en alguno de los cables dejará sin servicio a todos los consumidores alimentados por esta instalación.

Aún por simple que es este tipo de red, es posible tener un grado de seccionalización, siempre y cuando el problema sea en los cables; una vez que la falla es localizada, el cable puede ser cortado, aislando el lado con falla y el lado en buen estado y si éste está conectado a la fuente puede ser normalizado y una parte de la carga volverá al servicio mientras se realiza la reparación, la figura 10 muestra este tipo de estructura.

b) Red radial con amarres.- En el sistema anterior, al ocurrir la falla en el alimentador primario o en el transformador resulta que la interrupción es en toda el

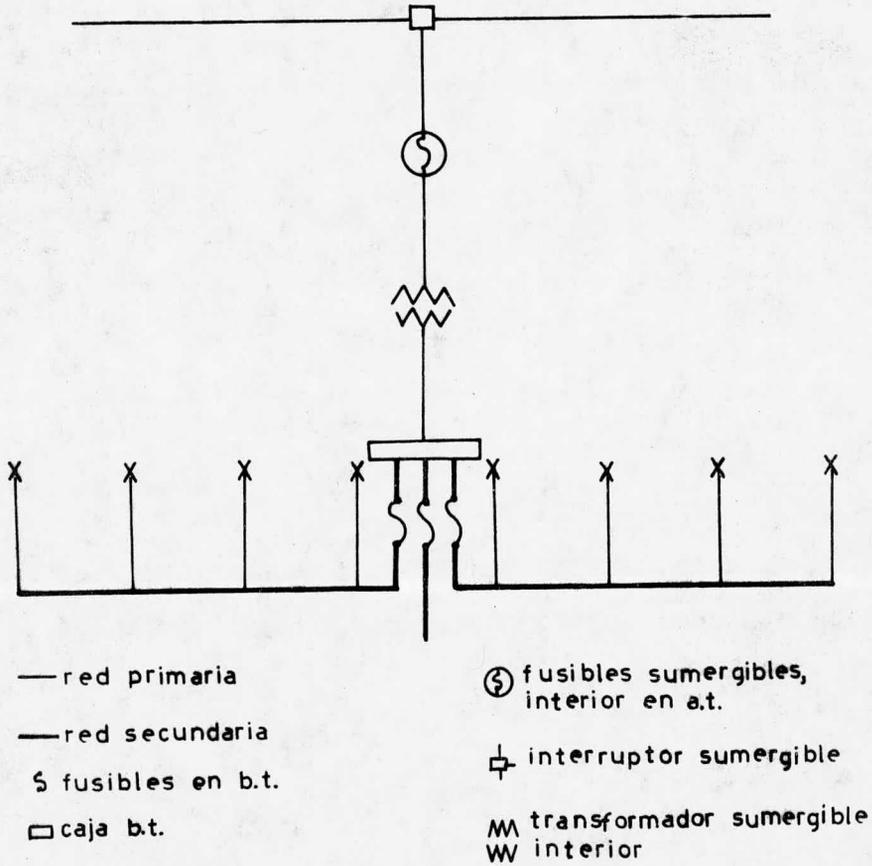


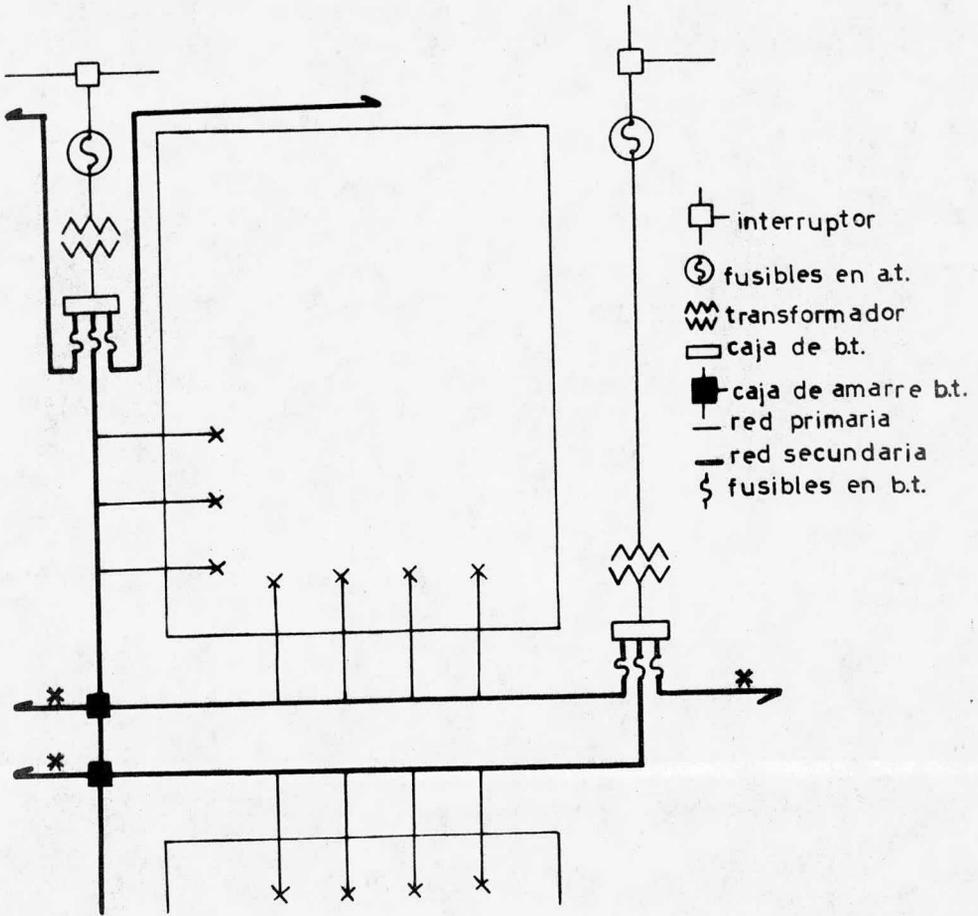
Figura 10.- Sistema de distribución subterráneo secundario  
en red radial sin amarres

área alimentada por éstos, hasta que la falla es reparada o se hace el reemplazo del transformador. Para cubrir esta situación así como para facilitar la restauración en el servicio cuando hay problemas en el sistema secundario, se provee a la red de baja tensión de medios de amarre que consisten en cajas de seccionamiento que van de un transformador y que se instalan, generalmente, en las esquinas con objeto de darles mayor flexibilidad en su conexión al poder recibir hasta cuatro cables.

Al efectuar la construcción de este sistema, debe tenerse cuidado de que la secuencia de fases en todos los transformadores sea la misma a fin de que al hacer la transferencia de carga de uno a otro, la secuencia no sea invertida. lo cual perjudicaría a los consumidores, de esta manera, se tiene la figura 11 para una mejor apreciación de esta estructura.

c) Red automática.- Este sistema de distribución en baja tensión, es la solución adoptada en muchas ciudades para solucionar el problema de un buen servicio y una buena regulación de voltaje en zonas importantes de ellas y, además, donde se tiene una gran concentración de cargas uniformemente repartidas a lo largo de las calles. Este sistema garantiza un servicio prácticamente continuo, ya que las fallas en alta tensión y en los secundarios, no afectan a los usuarios.

Los elementos primordiales que componen la red automá



\* a los servicios en b.t.

Figura 11-Sistema de distribución subterráneo secundario en red radial con amarres

tica se observan en la figura 12 y son los siguientes:

Una fuente de potencia, la cual es normalmente una -- subestación de distribución (S), esta es el punto de origen de dos o más alimentadores radiales sin enlace entre ellos; estos alimentadores van hasta los centros de carga en el -- área de la red, donde aquí son seccionados por medio de cajas de desconexión o interruptores para llevar los ramales que alimentarán directamente los transformadores de red (T).

Estos (T), están conectados al sistema primario, de -- tal forma que transformadores adyacentes queden alimentados por alimentadores diferentes.

Un dispositivo desconectador llamado protector (P) es instalado en el lado secundario de cada transformador, este dispositivo tiene como objetivo evitar un retorno o "regreso" de energía de la red secundaria a un punto de falla en el sistema primario, ya que cuando un alimentador primario falla, el protector desconecta inmediatamente el transformador de la red secundaria.

El lado carga del protector de red es conectado a la red secundaria (G). Las cargas (L y L') están conectadas a los cables secundarios que van por las calles directamente enterrados o bien, a las terminales del protector o a los buses de baja tensión instalados en las bóvedas o subestaciones de edificios.

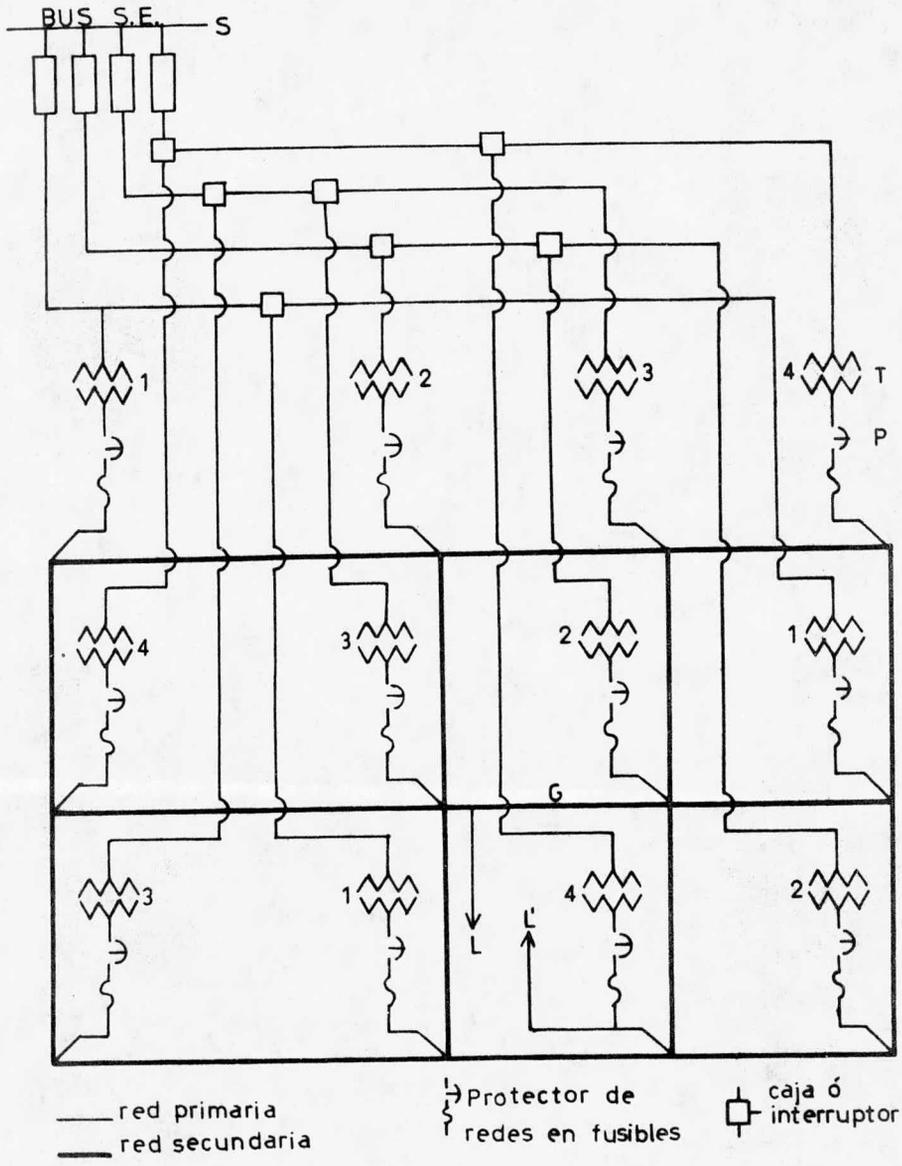


Figura 12-Sistema de distribución subterráneo secundario en red automática

### 3.2.2. Descripción y funcionamiento del equipo.

Son tres los elementos más comunes de este sistema y que son los siguientes:

a) Cajas de 6 vías.- Básicamente es un bus trifásico de cobre electrolítico, consta de una caja de fierro metalizado de zinc o cadmio, una placa aislante de fijación, separadores aislantes de eboni asbesto y como medio de conexión se emplean fusibles de lámina de cobre o placas. Su finalidad es repartir la carga por baja tensión del transformador a los cables troncales secundarios. Este equipo es tipo sumergible.

Ya que ofrecen una seguridad no muy buena en su operación, en la actualidad estas cajas de 6 vías se están reemplazando por buses cubiertos monofásicos CS-6-800.

b) Buses cubiertos monofásicos CS-6-800.- Como se dijo anteriormente, sustituyen a las cajas de distribución de 6 vías; permite interconectar cuatro circuitos de 3 cables BTC 1 x 150 mm.<sup>2</sup>, al transformador, se fijan al muro de la bóveda por medio de soportes, en las derivaciones se conectan por medio de zapatas los cables al bus por conducto de un fusible de cartucho, protegiéndose la parte viva con capuchones de neopreno.

La nomenclatura que corresponde a los buses cubiertos monofásicos CS-6-800 es la siguiente:

C = Cables.

S = Subterráneos.

6 = 6 vías.

800 = 800 Amperes por vía.

Y la de los cables BTC 1 x 150 mm<sup>2</sup> y BTC 1 x 400 mm<sup>2</sup>,  
es como sigue:

B = Baja tensión.

TC = Termofijo cadena cruzada, aislamiento de los  
cables.

1 = 1 conductor.

150,400 = Sección del conductor del cable en mm<sup>2</sup>.

c) Cajas de seccionamiento.- Las cajas de seccionamiento tienen dos tipos que son los siguientes:

- Tipo banqueta CS4-500.- Se coloca horizontalmente en registro precolado, bajo banqueta y quedando cerrada o accesible con marco y tapa de fierro colado. Permite interconectar hasta 4 cables BPA 3 x 300 mm<sup>2</sup> de sección o menores y efectuar varias combinaciones para cambiar la trayectoria del potencial en los cables de acuerdo a las necesidades que se presenten.

- Tipo pedestal CS4-400.- Es prácticamente un bus -- que permite interconectar hasta 4 cables BPA 3 x 150 mm<sup>2</sup> de sección o menores, posee una base de concreto sobre la cual se colocan los soportes y los herrajes del bus, tiene una cubierta metálica que protege el interior contra la lluvia, humedad, golpes mecánicos, etc.

La nomenclatura que corresponde a las cajas de seccionamiento CS-4-500 y CS4-400 es la siguiente:

CS = Cables subterráneos.  
4 = 4 vías.  
400, 500 = 400, 500 Amperes por vía.

Y la de los cables BPA 3 x 300 mm<sup>2</sup> y BPA 3 x 150 mm<sup>2</sup>  
es como sigue:

B = Baja tensión.  
PA = Plomo Armado.  
3 = 3 conductores.  
300, 150 = 300, 150 sección del conductor en mm<sup>2</sup>.

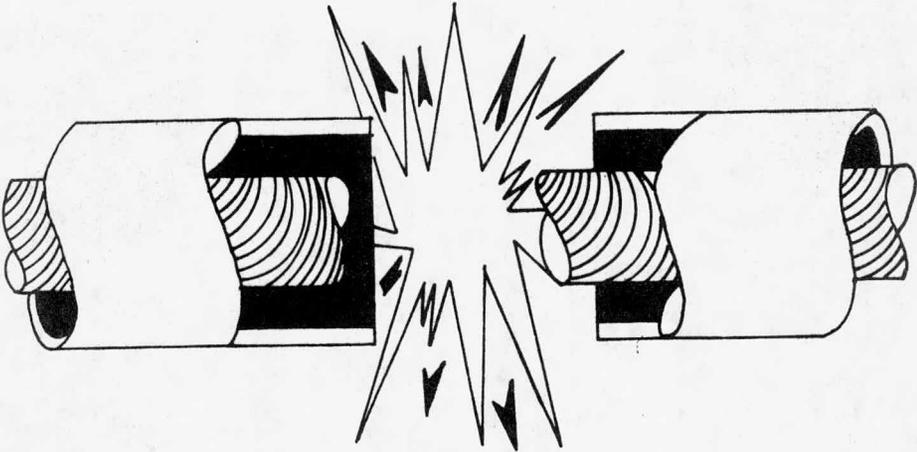
### 3.2.3. Operación de los cables de baja tensión en la red automática.

En condiciones de falla de un cable de baja tensión, la capacidad total de las subestaciones por medio de la sólida red interconectada que la forman, proporciona una corriente de falla con grandes dimensiones que hace que sea tan elevada, que quema y troza el cable en el lugar de la falla hasta aislarse, a este proceso se le llama eliminación de falla por auto-extinción, la figura 13 nos muestra este proceso.

Los dos casos que presenta este fenómeno son:

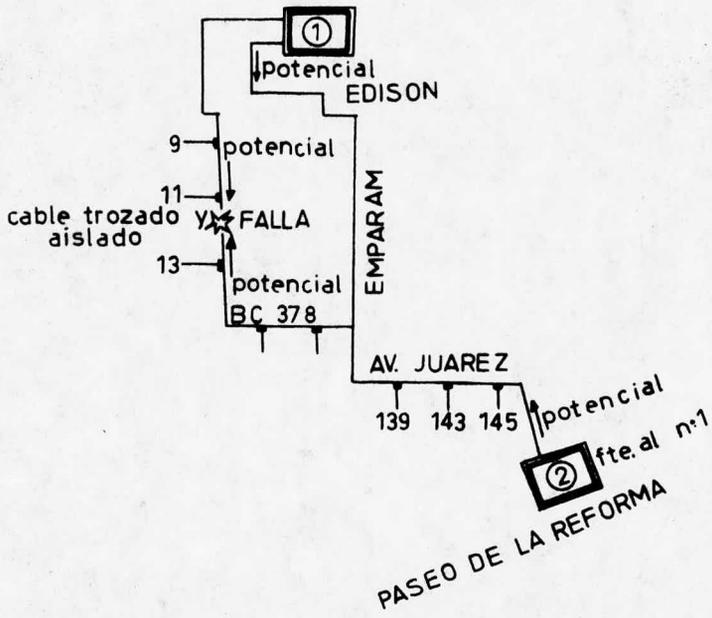
- Cuando la falla es entre dos servicios, el proporcionado al cliente, no se enterará, ya que el cable se alimenta por las demás subestaciones a las que está conectado, figura 14.

- Es el caso más crítico, en el cual la falla ocurre en la derivación del servicio, ya que se interrumpirá el su



-  Aislamiento de papel.
-  Conductor de cobre.
-  Cubierta de plomo.

Figura 13- Eliminación de falla por auto-extinción



▭ subestaciones tipo bóveda  
— acometida n.º

Figura 14- Condiciones de falla entre dos servicios

ministro de energía eléctrica al cliente, figura 15.

3.2.4. Determinación del porcentaje de carga según el número de alimentadores.

Cuando un alimentador queda fuera de servicio por falla o por libramiento, los otros alimentadores deben ser capaces de llevar toda la carga, lo que nos indica que entre mayor sea el número de alimentadores, éstos pueden trabajar con una carga más cercana a su plena capacidad.

Se puede deducir una fórmula para obtener el porcentaje de carga que deben llevar los alimentadores según el número de ellos que sirven a la malla de la red.

Considerando:

$n$  = número de alimentadores.

$Q_n$  = carga de cada alimentador.

$\frac{Q_n}{n-1}$  = el incremento de carga al salir alguno de los  $n-1$  alimentadores.

De donde:

$$Q_n + \frac{Q_n}{n-1} = 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Simplificando a:

$$Q_n + \frac{Q_n}{n-1} = \frac{(n-1)(Q_n) + (1)(Q_n)}{n-1} = \frac{nQ_n - Q_n + Q_n}{n-1}$$

$$Q_n + \frac{Q_n}{n-1} = \frac{nQ_n}{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

Sustituyendo (2) en (1):

$$\frac{nQ_n}{n-1} = 100\% ;$$

$$Q_n = \frac{100\% (n-1)}{n} \dots \dots \dots (A)$$

- Para n = 2:

$$Q_n = \frac{100\% (2-1)}{2} = 50\%$$

- Para n = 3:

$$Q_n = \frac{100\% (3-1)}{3} = 66.66\%$$

- Para n = 4:

$$Q_n = \frac{100\% (4-1)}{4} = 75\%$$

- Para n = 5:

$$Q_n = \frac{100\% (5-1)}{5} = 80\%$$

- Para n = 6:

$$Q_n = \frac{100\% (6-1)}{6} = 83.33\%$$

- Para n = 7:

$$Q_n = \frac{100\% (7-1)}{7} = 85.71\%$$

- Para n = 8:

$$Q_n = \frac{100\% (8-1)}{8} = 87.5\%$$

- Para n = 9:

$$Q_n = \frac{100\% (9-1)}{9} = 88.8\%$$

- Para n = 10:

$$Q_n = \frac{100\% (10-1)}{10} = 90\%$$

Como se puede apreciar en la gráfica I, al fallar un alimentador, el incremento de carga adicional se reduce rápidamente a partir de cinco alimentadores.

Ahora, suponiendo que los transformadores están uniformemente distribuidos y con una repartición equitativa de carga, al salir un alimentador, también salen los transformadores conectados a éste y considerando que los demás pueden llegar a una carga del 120% sin dañarse, podemos establecer lo siguiente:

Considerando:

n = número de alimentadores.

$q_n$  = carga de cada transformador.

De manera análoga a la ecuación (A):

$$q_n = \frac{120\% (n-1)}{n} \dots \dots \dots (B)$$

- Para  $n = 2$ :

$$q_n = \frac{120\% (2-1)}{2} = 60\%$$

- Para  $n = 3$ :

$$q_n = \frac{120\% (3-1)}{3} = 80\%$$

- Para  $n = 4$ :

$$q_n = \frac{120\% (4-1)}{4} = 90\%$$

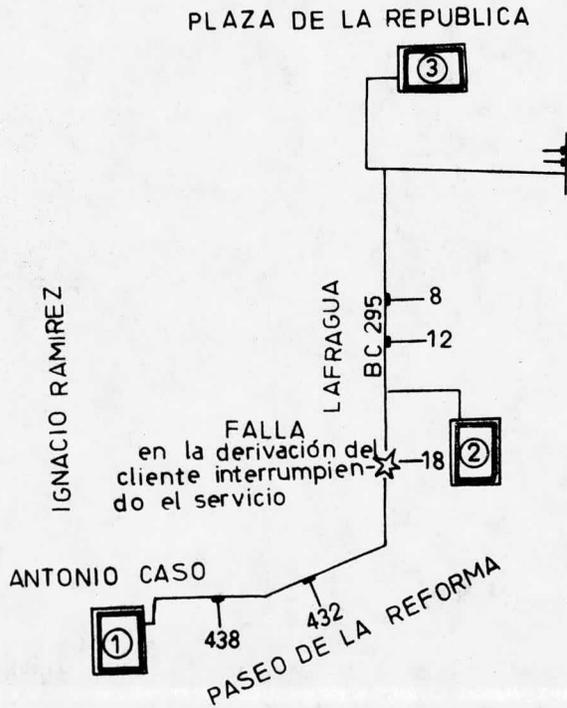
- Para  $n = 5$ :

$$q_n = \frac{120\% (5-1)}{5} = 96\%$$

- Para  $n = 6$ :

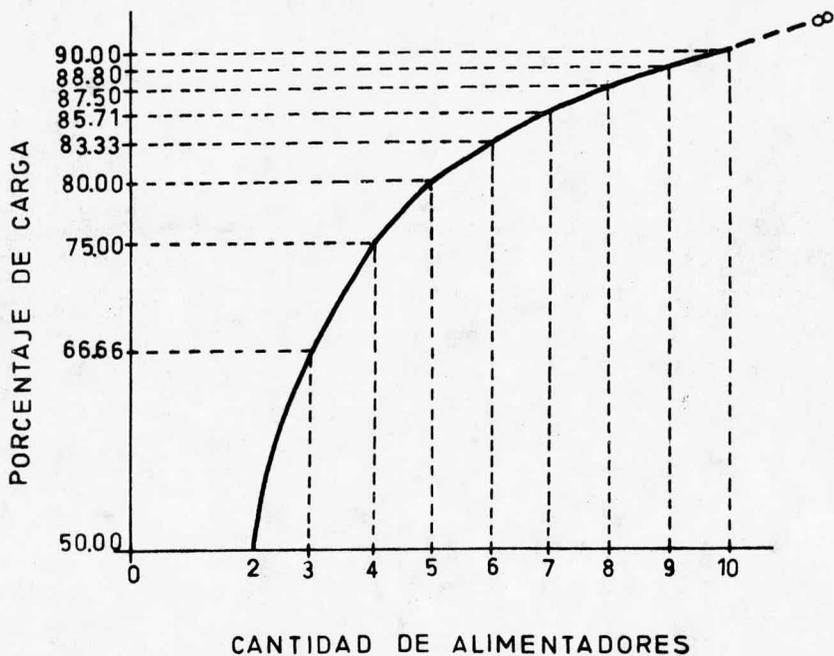
$$q_n = \frac{120\% (6-1)}{6} = 100\%$$

Por lo que, podemos concluir: una red de distribución automática por baja tensión, reúne las condiciones de trabajo satisfactoriamente con 6 alimentadores primarios, en los cuales al salir uno de ellos, sus transformadores aportarán el 120% de su capacidad sin dañarse y trabajando en condiciones normales al 100% de su capacidad.



□ en 1y2 subestaciones tipo bóveda  
□ en 3 subestación tipo interior  
← acometida n°

Figura 15- Condiciones de falla en la derivación del cliente



Gráfica I.-Determinación del porcentaje de carga según el número de alimentadores

## CAPITULO II

### LAS SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

#### 1. Generalidades.

En las instalaciones eléctricas, por causas unas veces intrínsecas y otras debidas a fenómenos externos, la diferencia de potencial entre conductores o entre éstos y tierra puede alcanzar, durante un tiempo normalmente pequeño, valores superiores a la diferencia de potencial más o menos constante que existe en los bornes de las máquinas generatrices y que corresponden a las condiciones del circuito. Dichas diferencias de potencial anormales, que se conocen con el nombre de sobretensiones, pueden manifestarse entre los conductores y la instalación a tierra de los circuitos, y por consiguiente entre la tierra y los arrollamientos de las máquinas o de los aparatos y también entre dos conductores de diferente fase, pudiendo asimismo elevarse anormalmente la diferencia de potencial entre dos puntos poco distantes de un mismo conductor.

Cuando en una parte de la instalación o de las máquinas el incremento de tensión es mayor a los valores para los cuales están dispuestos los aisladores de la línea, o los aislantes de los cables y de los arrollamientos, y además dura un tiempo apreciable y acompañada de suficiente intensidad de corriente, dan lugar a la producción de averías. Estas se manifiestan generalmente por el deterioro lento o rápido, o con perforación de los aislantes, que

en un tiempo más o menos corto puede poner fuera de servicio a los cables, máquinas o aparatos en los que haya ocurrido la sobretensión.

Se deduce que las sobretensiones son peligrosas para la integridad de las máquinas, aparatos y conductores, cuando alcanzan valores superiores a las tensiones de prueba. Así, pues, es necesario prevenirse empleando protecciones - que si no evitan la formación de sobretensiones, impidan al menos que al producirse sobrepasen los límites convenientes.

## 2. Origen de las sobretensiones.

Las sobretensiones puede ser de dos clases:

- a) Sobretensiones de origen atmosférico o externo.
- b) Sobretensiones de origen interno.

En tiempos pasados, la idea que prevalecía era que -- las sobretensiones más graves se presentaban por causas de origen externo, en la actualidad, en algunos sistemas esta condición se presenta, pero con el empleo de muy altas tensiones en los sistemas de transmisión, el uso de bancos de capacitores, la utilización de cables en redes subterráneas y aéreas y algunos otros factores propios del sistema, se - ha observado que las sobretensiones de origen interno, han llegado a ser en muchos casos, más graves que las de origen externo, por lo que la atención de éstas es importante para los sistemas de distribución.

## 2.1. Sobretensiones de origen externo o atmosféricas.

De una manera rudimentaria, el estudio de las descargas atmosféricas se inició en 1740 por Benjamín Franklin en base a las teorías que se tenían para la electricidad estática.

En la actualidad este fenómeno -y en particular en -- nuestro país- no ha sido estudiado lo suficiente para poder dar una explicación veráz de su origen, sin embargo, se dispone de algunas teorías y varios experimentos que tratan de explicar su nacimiento y efectos.

Experimentalmente se ha comprobado que la tierra representa un electrodo negativo y a una distancia de 100 a - 150 Km. sobre su superficie se encuentra una capa de aire - que representa el electrodo contrario, es decir, el positivo. Cuando las corrientes de aire entre la tierra y esta - capa producen una ionización de proporciones elevadas se establece una descarga de iones, que si su valor es alto puede degenerar en una descarga eléctrica.

### 2.1.1. Teoría de Simpson.

Simpson manifestó que la formación de cargas eléctricas en las nubes se debe a corrientes de aire que se encuentran en su interior con cierta actividad. Las corrientes - de aire ascendentes transportan vapor húmedo del mar o de - la superficie terrestre; este vapor al encontrarse a determinada altura, y bajo condiciones atmosféricas propicias, - se condensa transformándose en gotas de agua que al adqui--

rir una dimensión y peso considerable caen en forma de lluvia.

Cuando se inicia la lluvia, en su caída las gotas encuentran las corrientes de aire ascendentes que provocan -- rompimiento de las mismas, formándose gotas más pequeñas, - estas gotas -por un procedimiento parecido- vuelven a fraccionarse en tamaños menores, al ocurrir el rompimiento de - las gotas se desprenden iones negativos generando así cargas eléctricas que se dispersan en la atmósfera y al mismo tiempo son llevados por las corrientes de aire ascendentes a la parte inferior de la nube y en tanto, la parte superior de la nube se carga en forma inductiva.

#### 2.1.2. Teoría de Elster y Geitel.

Esta teoría se fundamenta en estudios realizados sobre una gota grande de lluvia a través del campo eléctrico de la misma, cuyo gradiente superficial es de 100 Volts por metro de altura, debido a la acción de este campo, la gota se polariza en la parte superior por una carga negativa y - en la parte inferior por una carga positiva.

La gota cargada eléctricamente en su caída se encuentra con corrientes de aire ascendentes que le producen una disminución de tamaño, y ya reducida la gota, continuando - su caída hacia la tierra se encuentra con gotas de mayor tamaño, desequilibrándose eléctricamente. El contacto de gotas de diferentes tamaños se repetirá frecuentemente originándose un intercambio de signo de carga en la gota hasta -

que este valor llegue a ser crítico produciéndose la descarga.

Este proceso descrito en 1885, permite explicar la -- carga positiva de la lluvia, pero no la formación de los -- campos eléctricos de las tormentas.

### 2.1.3. Teoría de C.T. Wilson.

Según C.T. Wilson, una gota polarizada capta durante su caída mas iones negativos que positivos cargándose, por esta razón en medida creciente con electricidad negativa.

En la atmósfera normalmente existen una gran cantidad de iones negativos y positivos que se mueven en diferentes direcciones con una velocidad promedio de 1 cm. por segundo, bajo la acción de un campo eléctrico de 1 Volt por cm., (experimento de Wilson). La existencia de iones en el aire los estima en el orden de 1 000 positivos y 800 negativos - por  $\text{cm}^3$ . En Pilar, cerca de Córdoba, Argentina, se registraron en término medio 2 272 iones por  $\text{cm}^3$ , de los cuales 1 147 fueron de carga positiva y 1 125 de carga negativa.

Wilson especifica también que para estudiar el origen de las descargas atmosféricas en las nubes, es necesario -- considerar el rompimiento de las gotas de una tormenta, y -- por consiguiente, una separación de su carga eléctrica respectiva. En el proceso de lluvia las gotas hacen contacto con iones eléctricos dando origen a que aumente la ionización de la atmósfera, facilitando la formación de trayectoria del canal del rayo para descargar hacia la tierra o ha-

cia la nube.

#### 2.1.4. Teoría de Findeisen y Wichmann.

El hielo en la nube tiene importancia en la acumulación de cargas eléctricas que producen el rayo. La teoría de Findeisen y Wichmann supone que de los cristales de hielo en caída se desprenden esquirlas cargadas de electricidad negativa. Estas esquirlas, debido a su reducido peso, quedarían flotando en el espacio, mientras que los "granos" de hielo, considerablemente más pesados y en continuo crecimiento, prosiguen su caída. De esta manera hay una separación de cargas en la nube, es decir, esta separación de cargas se debe a la fricción de las esquirlas y los "granos" de hielo.

De igual manera, Findeisen y Wichmann, relacionan el choque que tiene un graniza con otro permitiendo así que el aire adquiera una carga positiva y el hielo quede cargado negativamente.

#### 2.1.5. Efectos de las descargas atmosféricas.

Los efectos que presentan de una manera más frecuente las descargas atmosféricas en las instalaciones eléctricas, es la interrupción del servicio.

Basta con que se tengan nubes sobre la línea de distribución para que exista la posibilidad de que haya un sobrevoltaje. Las nubes en un medio seco y con viento a una velocidad aproximada de 40 Km/h originan las descargas at-

mosféricas, además de dejar fuera de servicio el suministro de energía eléctrica, presenta los tres efectos siguientes:

a) La corriente del rayo alcanza valores instantáneos lo suficientemente altos que someten a los elementos que -- componen la instalación a esfuerzos térmicos y dinámicos, -- se caracterizan porque son ondas unidireccionales de muy -- corta duración (con frecuencias del orden de 10 a 100 kilohertz), y para disminuir dichos esfuerzos se necesita de un diseño adecuado de la red de tierras.

b) Los esfuerzos dinámicos debidos a la intensidad de corriente del rayo someten a los conductores a fuerzas de -- repulsión y atracción que en un momento determinado pueden llegar a romper los aisladores de soporte.

c) La corriente del rayo trae consigo una enorme cantidad de energía calorífica llegando a valores de temperatura hasta de  $8\ 350^{\circ}\text{C}$  que pueden provocar la falla de aislamiento de los apartarrayos destruyéndose por explosión al -- no poder descargar esa cantidad de energía.

#### 2.1.6. Tipos de sobretensiones de origen externo.

En general, este tipo de sobretensiones se clasifican en tres tipos:

a) Por carga estática.- Son de menor peligro, se presentan en las líneas de transmisión ya que sobre éstas existen nubes y disminuyen considerablemente su efecto mediante el uso de hilos de guarda ya que representan un medio de -- descarga "natural"; sin embargo, en el caso de las líneas -

de distribución, por razones económicas no es generalizado el empleo de hilos de guarda.

b) Por descarga indirecta.- Son debidas a la presencia de rayos que caen en puntos cercanos a las instalaciones y que por los efectos de inducción electromagnética y electrostática introducen tensiones transitorias a las instalaciones. Es el más frecuente y dependiendo de la intensidad de descarga se pueden convertir en un serio peligro, ya que mediciones hechas en el terreno se sabe que estas sobre tensiones son del orden de 100 y hasta 200 kV. con corrientes de 25 a 75 kA. Este tipo de descargas son las que afectan a los sistemas de distribución primario y secundario.

c) Por descarga directa.- Son las menos frecuentes, pero pueden causar los daños más serios, debido a la gran cantidad de energía que traen consigo ya que pueden alcanzar valores de hasta 100 kA instantáneos.

Por lo general, en los conductores aéreos la descarga directa provoca una onda de sobrevoltaje inicial que se divide en dos ondas viajeras que van hacia la izquierda y hacia la derecha del punto en que se produce la descarga con una velocidad igual a la de la luz, ocasionando una sobretensión con una magnitud de acuerdo con la expresión matemática:

$$V = 1/2 Z_c I_{cr}$$

donde  $I_{cr}$  es el valor cresta de la corriente del rayo y  $Z_c$

es la impedancia característica de la línea.

Se deduce que estas sobretensiones -externas- son de origen atmosférico y comúnmente toman la forma de un impulso unidireccional, la amplitud máxima que se puede presentar no tiene ninguna relación con la tensión de operación del sistema.

Estas sobretensiones se deben a las siguientes posibles causas:

- Descargas directas del rayo.
- Tensiones inducidas causadas por una descarga a tierra en un lugar cercano a la línea.
- Tensiones inducidas debido a variaciones atmosféricas a lo largo de las líneas de transmisión.
- Sobretensiones electrostáticas inducidas causadas por nubes cargadas.
- Sobretensiones electrostáticas inducidas, causadas por el efecto de la fricción de pequeñas partículas, como el polvo existente en la atmósfera.

#### 2.1.7. Nivel cerámico.

Se le llama nivel cerámico al número de descargas -- que sucede en una área determinada, usualmente 1 Km<sup>2</sup> ligando puntos con igual número de descargas por año; se obtiene una línea sobre un mapa geográfico, con igual probabilidad posterior de descarga, logrando así una carta de nivel cerámico, es decir, con igual probabilidad de descarga por Km<sup>2</sup> de superficie.

Estudios realizados por la Marina Británica, sitúan a México específicamente al Estado de Chiapas, como el 3er. lugar mundial de nivel cerámico con una probabilidad diferente a la de los Estados Unidos de América.

Por otra parte, la Ciudad de México se divide en tres regiones de nivel cerámico, teniendo mayor probabilidad de descarga las regiones sur y suroeste; la parte del primer cuadro y norte de la ciudad, en 2do. lugar y la región este en 3er. lugar.

## 2.2. Sobretensiones de origen interno.

Estas sobretensiones se presentan en los sistemas de distribución debidas a operaciones, fallas u otros motivos propios del sistema y pueden ser de dos tipos:

a) Dinámicos.- Se les da este nombre cuando se presentan excesos de voltaje con respecto al voltaje nominal con que opera el sistema.

b) Transitorios.- Cuando existe una falla, conexión o desconexión de circuitos y en general una operación de maniobra (switcheo) reciben el nombre de sobretensiones transitorias.

### 2.2.1. Clases de sobretensiones de origen interno.

Se tienen dos clases de sobretensiones de origen interno, y que son las que más comúnmente se presentan en los sistemas de distribución.

a) Sobretensiones a la frecuencia del servicio.- Den

tro de esta clasificación se consideran las que se presentan a baja y alta frecuencia. Se originan al ocurrir una avería en la línea; se interrumpe el servicio, pero no llega a grandes proporciones ya que las generatrices mantienen casi de manera constante su velocidad con lo que se logra que el daño causado no pase a mayores.

Las sobretensiones que internamente se producen a baja frecuencia se presentan a la frecuencia nominal con que opera el sistema y se incluyen las tensiones en estado permanente que puedan originar este hecho.

Por otra parte, las sobretensiones internas de alta frecuencia se deben a los transitorios que ocurren al realizar maniobras de switcheo y la tensión resultante que se presenta toma la forma de una senoide amortiguada cuya frecuencia es de 20 kHz. y se ve afectada por las capacitancias e inductancias inherentes al circuito.

b) Sobretensiones por operaciones de maniobra.- Una operación de maniobra se debe a la apertura o cierre de interruptores en un sistema. Después de que se ha realizado el corte o interrupción del circuito, la tensión presenta una oscilación de mediana o alta frecuencia, sin embargo, esta oscilación no llega a alcanzar amplitudes demasiado elevadas después de que se ha interrumpido la falla.

El interruptor es el dispositivo que sirve para cerrar o abrir circuitos eléctricos, con o sin carga, o con corrientes de falla.

En la actualidad, el problema de estos dispositivos es el medio de desconexión, ya que utiliza contactos de separación en un medio de una determinada constante dieléctrica. Esta forma de desconexión puede provocar que el arco eléctrico -que se produce al momento de abrir un interruptor con carga- entre los contactos fijos y móviles que han quedado separados, se vuelva a reestablecer cuando por la magnitud de la falla la rigidez dieléctrica del medio de extinción baja debido a la ionización, dicho arco somete a los contactos del interruptor a un voltaje adicional que se conoce como: voltaje de reestablecimiento o de recuperación.

#### 2.2.2. Voltaje de reestablecimiento o de recuperación.

Este fenómeno se presenta cuando existe una falla y el interruptor opera aún cuando el disturbio no se ha liberado, es decir, la desconexión de circuitos da lugar a sobretensiones que se conocen como: voltajes de recuperación y llegan a alcanzar valores hasta de 2.5 veces la tensión nominal y someten a las instalaciones a esfuerzos dieléctricos graves.

Los interruptores están diseñados para interrumpir la corriente en el cero natural, de tal forma que cuando se tiene que interrumpir la corriente de falla que pasa por el cero natural, el interruptor se espera un determinado tiempo para que la corriente pase por el cero y se almacena una energía que da lugar a una corriente que se denomina post-arco.

El voltaje de recuperación posee dos componentes, una dinámica que se obtiene considerando una falla trifásica a tierra cuando los contactos del interruptor están cerrados y otra transitoria que depende de las características del circuito que se interrumpe (ya sea capacitivo o inductivo), y para cada caso se determina la expresión de estas sobretensiones empleando las transformadas de Laplace.

### 2.2.3. Sobretensiones por desconexión de circuitos capacitivos.

Para esta situación se presentan dos casos:

a) Desconexión por falla de un punto cercano a la fuente:- De acuerdo a la figura 16, tenemos que al abrir el interruptor (D) se presenta un voltaje con características capacitivas. Para la simulación de la apertura del interruptor se supone que en el lugar de este dispositivo se inyecta una corriente de igual magnitud pero de sentido opuesto a la corriente de falla y se supone, de igual manera, que dicha interrupción ocurre cuando la corriente pasa por su cero natural, de tal forma que el circuito equivalente queda como la figura 17.

Se considera una fuente de voltaje senoidal con:

$$V(t) = V \cos \omega t$$

$$I(t) = \frac{V}{\omega L} \sin \omega t$$

Aplicando Laplace:

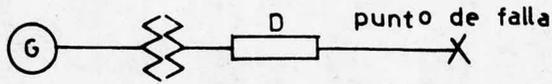


Figura 16.-Desconexión por falla en un cercano punto a la fuente

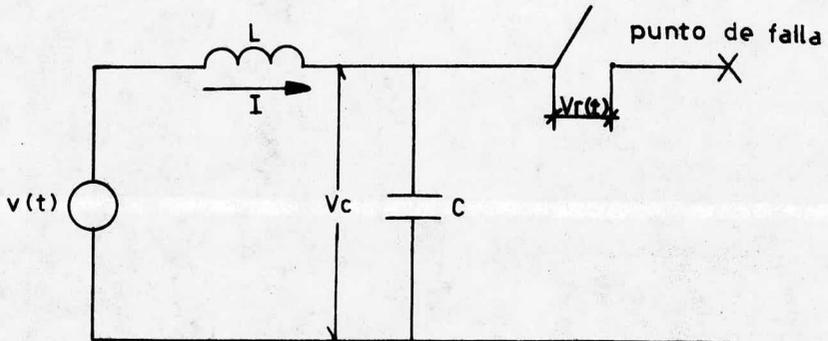


Figura 17.-Circuito representativo por desconexión de falla en un cercano punto a la fuente

$$I(s) = \frac{V}{\omega L} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{V}{L} \frac{1}{s^2 + \omega^2}$$

Luego entonces, el circuito equivalente como la figura 18 y la determinación del voltaje transitorio queda a partir de la función de impedancia del circuito y de la corriente de falla en el dominio de Laplace:

$$V(s) = Z(s) (-I(s))$$

llegando a:

$$V_r(t) = V_c \left[ \cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right]$$

Por lo tanto, el voltaje de recuperación tiene dos componentes:

Una que corresponde a la frecuencia de trabajo del sistema y que es  $\omega = 2\pi f$ , y otra de frecuencia natural  $\omega_n = 2\pi f_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ;  $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

b) Sobretensiones en circuitos capacitivos con inductancia al final.- Se supone que al interrumpir la corriente de falla se puede simular la inyección de una corriente opuesta a la de falla que de manera semejante al caso anterior dicha interrupción de la corriente se realiza en el momento en que ésta pasa por su cero natural, pues bien, en este caso la simulación que se hace de la corriente inyectada opuesta a la de falla puede no coincidir con el instante real de interrupción de la corriente y tiene un desfase como se ilustra en la figura 19.

La determinación del voltaje de recuperación, al igual que en el caso pasado, se hace partiendo de un desa-

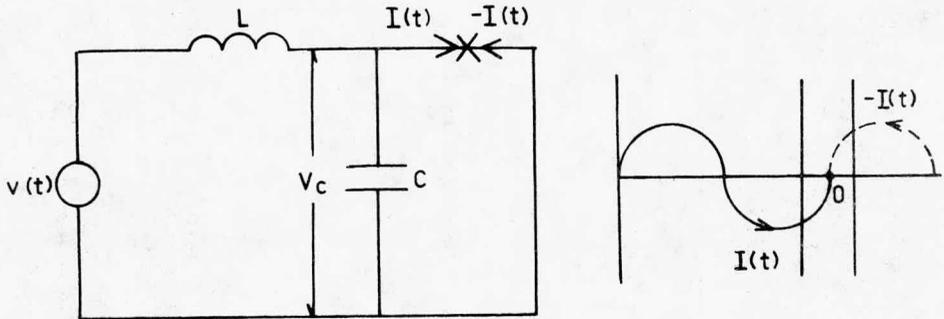


Figura 18.-Circuito equivalente de la desconexión por falla en un cercano punto a la fuente

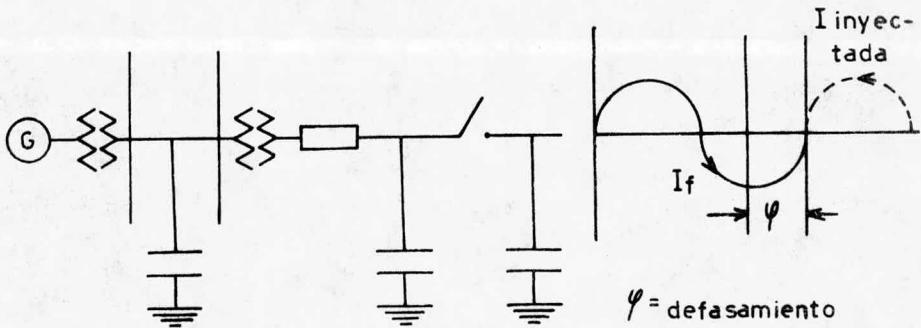


Figura 19.-Sobretensiones en circuitos capacitivos con inductancia al final

rollo de Laplace.

Partiendo de:

$$V(s) = Z(s) I(s)$$

se tiene que:

$$v(t) = V \left[ \left( \cos \varphi \left( \cos wt - \frac{L_1}{L} \cos w_1 t - \frac{L_2}{L} \cos w_2 t \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{Sen} \varphi \left( \operatorname{Sen} wt - \frac{L_1}{L} \frac{w_1}{w} \operatorname{Sen} w_1 t - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{L_2}{L} \frac{w_2}{w} \operatorname{Sen} w_2 t \right) \right]$$

donde:

$w$  = frecuencia industrial (60 Hz)

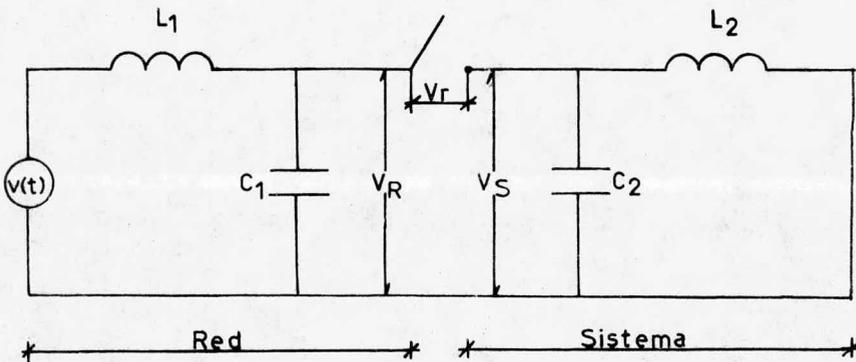
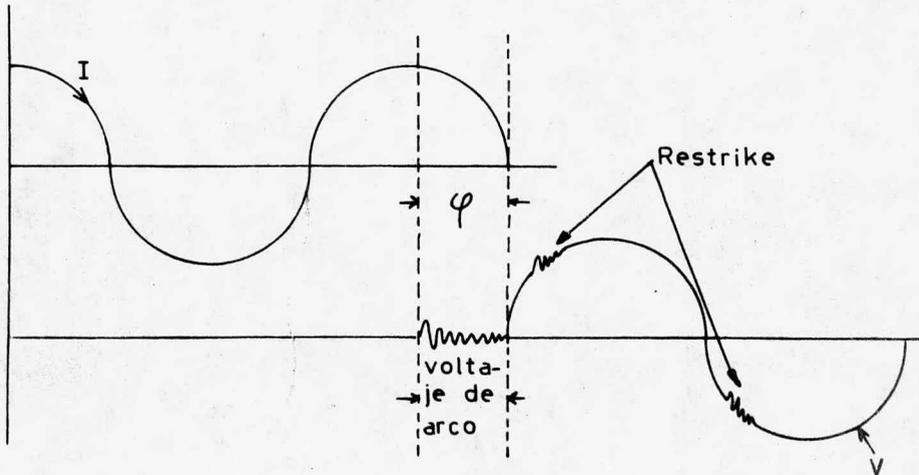
$w_1, w_2$  = frecuencias naturales del circuito.

En el caso de que la corriente se interrumpa en su cero natural, es decir  $\varphi = 0$ , se tiene lo siguiente:

$$v(t) = V \left[ \left( \cos wt \right) - \left( \frac{L_1}{L} \cos w_2 t \right) - \left( \frac{L_2}{L} \cos w_2 t \right) \right]$$

De esta manera, el circuito representativo de este caso es el referente a la figura 20.

Dependiendo de la capacitancia del sistema, se puede tener una "carga atrapada" lo que ocasiona sobretensiones bastante elevadas en los sistemas de distribución y da origen -esa "carga atrapada"- a los llamados "restrikes" y a la "reignición", esta última se forma al interrumpirse una corriente capacitiva que presenta sobretensiones inherentes al separarse los contactos del interruptor y si ocurren antes del primer cuarto de ciclo de la onda reciben dicho nombre; mientras que si ocurre después del primer cuarto de ciclo



$L_1, C_1$  = Inductancia y capacitancia del lado de la red

$L_2, C_2$  = Inductancia y capacitancia del lado del sistema

$V_R$  = Voltaje en la red

$V_S$  = Voltaje en el sistema

Figura 20-Circuito equivalente de las sobretensiones en circuitos capacitivos con inductancia al final

clo de la onda se les denomina "restrikes" y este último es más peligroso para los interruptores que el de "reignición".

Dependiendo de la "carga atrapada" que tenga el sistema varía la sobretensión que se presenta en la red, es por tal motivo que los interruptores deben de estar "libres de restrike".

#### 2.2.4. Sobretensiones por desconexión de circuitos inductivos.

En este tipo de desconexiones se presentan transitorios que dan lugar a sobretensiones en las instalaciones y llegan a extremos graves, si las corrientes que circulan -- por los circuitos inductivos es pequeña.

De ahí que en la práctica ese caso se presenta en la desconexión de transformadores en vacfo por el lado de alta tensión, es decir, que al interrumpir la corriente en los transformadores en vacío, dan origen a sobrevoltajes entre línea y tierra, que vienen acompañadas de ondas cuyo frente es rígido.

La corriente en vacío del transformador -que como se dijo anteriormente- es relativamente pequeña, puede ser interrumpida ya sea en el momento que tiene el valor de cresta o bien antes de su paso natural por cero.

La interrupción repentina de esta corriente provoca valores extremadamente altos en el voltaje de recuperación.

En el momento de realizar la desconexión, se da lugar a un circuito LC en el transformador, de tal forma que se -

cumple que la energía magnética de los devanados es igual a la energía eléctrica de la capacitancia.

## CAPITULO III

### EL APARTARRAYO.

#### 1. Generalidades.

Los sistemas de distribución, deben ser protegidos -- contra las sobretensiones que se presentan, ya sea por descargas atmosféricas, o bien, por operaciones de maniobra. De las dos, la protección contra las descargas atmosféricas es de mayor importancia, puesto que los niveles de aislamiento normalmente empleados en los sistemas de distribución secundarios, pueden soportar sobretensiones por operaciones de maniobra de varias veces el voltaje normal de operación.

Básicamente, entonces, una vez que se ha colocado el apartarrayos para la protección contra las descargas atmosféricas, el equipo y los circuitos que componen los sistemas de distribución, están también protegidos contra operaciones de maniobra con un margen bastante adecuado.

#### 2. Definición del apartarrayos.

Es un dispositivo, el cual se encuentra permanentemente conectado al sistema, usado en la coordinación de aislamiento de los sistemas para proteger las componentes de los mismos de altas tensiones transitorias debidas a descargas atmosféricas y operaciones de maniobra.

Se instala entre línea y tierra y también sirve para limitar la duración y amplitud de la corriente del rayo a -

tierra, es decir, que la función del apartarrayos no es eliminar las ondas de sobretensión presentadas durante las descargas atmosféricas, o bien, por las que se presentan por operaciones de maniobra, sino limitar su magnitud a valores que no sean perjudiciales para los elementos del sistema.

Luego entonces, las funciones específicas de los apartarrayos son:

a) Operar, descargando grandes corrientes provocadas por las sobretensiones, que pueden ser de muy alta magnitud, o de gran duración, sin sufrir ningún daño.

b) Reducir las sobretensiones peligrosas a valores -- que no dañen el aislamiento del equipo, presentando una baja impedancia para facilitar el paso de la corriente del rayo a tierra, para lo cual debe seleccionarse el rango de -- voltaje del apartarrayos.

c) Auto-operarse, es decir, restablecerse después de haber dejado pasar la sobretensión, impidiendo el flujo a tierra de corriente dinámica, lo que es, presentar una alta impedancia a la corriente nominal de 60 Hz.

### 3. Principio básico de operación.

Cuando se describe el ciclo de operación de un apartararrayos, se deben mencionar tres etapas: primero es el chispeo, después la descarga y, finalmente, la interrupción del flujo de energía.

a) Chispeo.- Este término se refiere al inicio del ciclo protectorio del apartarrayos, este fenómeno se presen-

ta cuando el voltaje de la onda alcanza el nivel en que se da lugar al arco en el entrehierro de los electrodos que completa el circuito de descarga a tierra. En términos de voltaje, éste es un punto muy indefinido dado que en el entrehierro, de tan solo una estructura, el chispeo es función tanto del frente de onda como del voltaje de la perturbación ocasionada por el rayo.

En condiciones ideales, el chispeo del entrehierro debe ocurrir durante cualquier sobretensión que represente peligro al sistema, pero debe, en cambio, ignorar las sobretensiones transitorias menores que no sean dañinas al sistema. Esto no implica que para este complicado "mecanismo de juicio", se requiera de un dispositivo protector relativamente sencillo y económico, es por eso que los factores que determinan que el diseño del entrehierro sea práctico se hayan obtenido mediante la experiencia de campo acumulada y la interrelación con las demás funciones del apartarrayos, por lo tanto no debe permitirse que el comportamiento del entrehierro quede fuera de sincronismo con la operación de un circuito protectorio debidamente coordinado.

Los dos requerimientos básicos para que se logre un chispeo adecuado son los siguientes:

- Una respuesta de alta velocidad para los frentes de ondas crecientes, tal como acontece en el caso de los rayos y.

- Una respuesta consistente en relación a las ondas -

con menor rapidez de incremento, que son típicas de muchas de las sobretensiones generadas en los sistemas.

Ambos requisitos deben de cubrirse a través de una calibración del sistema eléctrico mediante los entrehierros, esta calibración consiste en conectar una resistencia extremadamente alta en paralelo con cada uno de los entrehierros del apartarrayos, quedando de esta manera establecida y conservada una distribución uniforme del voltaje a través de todos los entrehierros de la estructura.

Se ha demostrado que el entrehierro múltiple, calibrado eléctricamente es el más indicado para la construcción de los apartarrayos, ya que tienen una mayor consistencia de respuesta, de esta forma, la banda de respuesta del chispeo queda sustancialmente reducida y es más predecible debido a la preionización de los entrehierros entre los electrodos.

La relación que existe entre el chispeo del apartarrayos y el voltaje de línea da una respuesta parcial fijando el voltaje mínimo de chispeo a 60 cps de los apartarrayos a 1.5 veces el voltaje nominal, sin embargo, el voltaje de chispeo del apartarrayos aumenta a medida que aumenta también la rapidez de crecimiento de la onda de voltaje de la perturbación provocada por el rayo. La relación entre el voltaje de chispeo al impulso y el voltaje de chispeo a 60 cps es, por lo tanto, una variable que depende del diseño del apartarrayos y la velocidad de crecimiento del voltaje de

impulso aplicado.

La única regla es que todos los chispeos deben asegurarse por debajo de la rigidez dieléctrica del equipo que se protege y, al mismo tiempo, no tan bajo que provoque operaciones innecesarias del apartarrayos. El nivel de aislamiento del equipo y la posible magnitud de los disturbios generados en el sistema constituyen la guía para establecer un determinado nivel de chispeo.

Calibrar los circuitos se vuelve más complicado en los apartarrayos de las clases de estación y de línea ya que la necesidad de controlar las características del chispeo es mayor en relación a los de clase distribución.

b) Voltaje IR de descarga.- El voltaje IR de descarga de un apartarrayos es el producto de la intensidad de descarga y la resistencia del camino de descarga del apartarrayos, ésta ocurre a través del camino de baja impedancia que establece el circuito en serie de los entrehierros y los bloques de carburo de silicio de la válvula. Casi toda la resistencia de dicho circuito está en los bloques de la válvula, dado que la resistencia del entrehierro ionizado es despreciable después del chispazo; la característica no lineal de la resistencia de los bloques de la válvula es un factor crítico para determinar la resistencia total del camino de descarga al impulso.

Así como esta resistencia puede ser muy baja, la intensidad de la descarga puede serlo muy alta, y el voltaje IR de descarga puede alcanzar niveles que iguallen o excedan

el voltaje de chispeo del apartarrayos. Una aproximación conservadora de la máxima intensidad de descarga, para una aplicación específica, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$I_a = \frac{Z C_o - C_a}{Z}$$

donde:

$I_a$  = Intensidad de descarga en kA.

$C_o$  = 1.2 x nivel de aislamiento de la línea (flameo crítico de onda 1.2 x 50  $\mu$ seg.)

$Z$  = Impedancia característica de la línea en ohms.

$C_a$  = Voltaje de descarga del apartarrayos en kV.

Debe hacerse notar que la inductancia de las guías de línea y de tierra del apartarrayos, deben ser adicionadas al calcular márgenes de protección. Por esta razón se procura que dichas guías sean lo más cortas posibles dado que su inductancia suele estimarse en 0.4 microhenries por pie, produciendo una caída de 1.6 kV. por pie con una corriente de un frente de onda de 4 000 Amperes por microsegundo. Esto da lugar a que uno de los objetivos principales de los fabricantes que diseñen los apartarrayos es mantener los voltajes IR de descarga lo más bajo posible, lo cual permite otras ventajas adicionales en el funcionamiento de los apartarrayos.

c) Interrupción.- El entrehierro tiene una segunda función que es vital para la operación del apartarrayos que es la interrupción del flujo de energía. Cuando el rayo o

alguna otra perturbación inicia el chispeo en el entrehierro del apartarrayos, no sólo el transitorio sino además -- una corriente de 60 cps fluye en la línea a través del apartarrayos hacia tierra. El impulso es momentáneo, pero el chispeo establece un camino conductor en los entrehierros a través de los bloques de la válvula por el cual circula la corriente de la línea. Este proceso se conoce como "flujo de corriente de energía" y debe extinguirse de inmediato si desea evitarse una interrupción en el sistema.

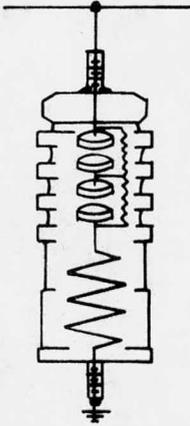
La interrupción del flujo de corriente, por medio exclusivamente de los entrehierros, depende de la habilidad de los bloques de carburo de silicio de la válvula del apartarrayos para reducir el flujo de corriente de fase a tierra, al voltaje normal al neutro, a un nivel tal que dichos entrehierros puedan extinguir la corriente de 60 cps a su siguiente paso por cero.

El entrehierro puede compararse a un interruptor de una velocidad excepcional que inicia a la vez que termina el ciclo protector del apartarrayos. Una acción que siente y descarga a tierra pulsaciones peligrosas de sobretensiones, limitando su voltaje a un nivel no dañino para el equipo.

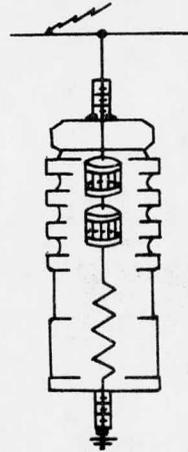
La figura 21 muestra el proceso de operación básico del apartarrayos.

### 3.1. Ciclo de operación del apartarrayos tipo valvular.

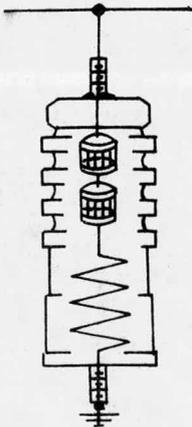
El apartarrayos tipo valvular flamea y drena la co -



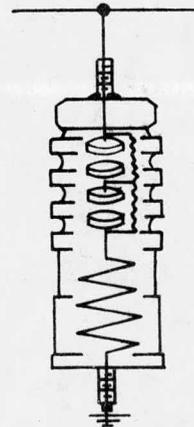
a) En condiciones normales, las funciones del apartarrayos como aislador con la serie interior de entrehierros soportando el voltaje de fase a tierra.



b) Un rayo provoca una perturbación instantánea que origina el chispeo en el múltiple conjunto de entrehierros y establece un camino de descarga a través de los bloques de la válvula hacia tierra.



c) Después de la descarga, el entrehierro continúa conduciendo la corriente pero los bloques de la válvula recuperan su elevada resistencia original que reduce drásticamente la corriente.



d) Reducida la corriente, los entrehierros interrumpen el camino de la descarga en el primer paso por cero de la corriente y el apartarrayos vuelve a su condición original.

Figura 21-Principio básico de operación del apartarrayos

corriente transitoria a tierra. El elemento característico de este tipo de apartarrayos ofrece baja resistencia al flujo de corriente transitoria, y por lo tanto, mantiene la tensión de descarga a través del apartarrayos en un mínimo.

El elemento, sin embargo, ofrece resistencia muy alta a la corriente remanente de 60 cps, que precede a la corriente transitoria, y como la magnitud de la corriente remanente es limitada, no puede sostenerse por sí misma a través de la estructura del flameo del apartarrayos. Después de la interrupción de la corriente remanente, el apartarrayos queda listo para repetir el ciclo de operación.

### 3.2. Ciclo de operación del apartarrayos tipo expulsión.

En el apartarrayos tipo expulsión, a diferencia del tipo valvular, la cámara de expulsión prácticamente no ofrece impedancia a las corrientes transitorias, y por lo tanto, la tensión de descarga es muy pequeña. De hecho, para la misma corriente transitoria la caída de tensión es despreciable comparada con la de un apartarrayos tipo valvular.

Siguiendo la misma trayectoria de la corriente transitoria, se establece una corriente remanente de 60 cps a través de la estructura de flameo y la cámara de expulsión. Como en el caso del tubo de expulsión de un fusible, el arco genera gases desionizantes de la fibra de la cámara, como los gases se producen rápidamente y aumentan la presión dentro de la cámara, el arco se alarga y se estrecha. Además, la alta presión y la naturaleza desionizante de los ga

ses aumenta la resistencia dieléctrica dentro de la cámara.

En el momento cero de la corriente de 60 cps, el arco se interrumpe momentáneamente y ya no se restablece por sí mismo; la alta presión de los gases expulsa las partículas del arco de la cámara, quedando listo el apartarrayos para repetir el mismo ciclo de operación.

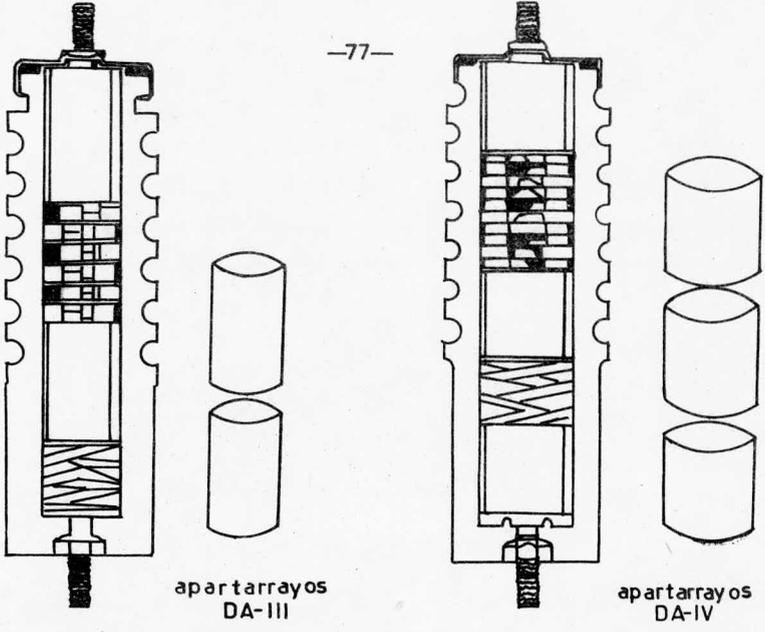
#### 4. Partes de que se compone un apartarrayos.

El circuito básico de un apartarrayos consiste en un elemento de entrehierros conectados en serie con una resistencia no lineal instalados entre la línea y tierra, este circuito básico se observa en la figura 22.

El elemento de entrehierros desempeña dos funciones:

- Completa el circuito a tierra durante la operación del apartarrayos y,
- Desconecta el circuito quedando restablecido un camino a tierra de muy alta resistencia una vez que el impulso ha sido drenado de la línea.

El diseño del elemento de entrehierros del apartarrayos tiene como principal objetivo la rapidez de la acción. Hasta que el entrehierro se inflama se va formando un voltaje creciente a causa del impulso del rayo; si tomamos en cuenta que el voltaje de un rayo puede crecer a razón de millones de voltios en millonésimas de segundo, no cuenta mucho que unos pocos cientos de miles de Volts alcancen a aparecer a través de las terminales del equipo que se protege. Para mejorar la eficiencia del entrehierro se emplean entre



DA-III trabajo normal

DA-IV trabajo pesado

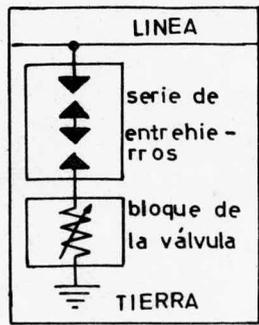


Figura 22-Circuito básico del apartarrayos clase distribución

hierros múltiples; una serie de entrehierros pequeños proporciona un encendido más consistente y en un tiempo mucho menor en comparación con uno más grande y, además, a un voltaje comparativamente más bajo. Los entrehierros múltiples, así mismo, interrumpen el flujo de corriente de energía con mayor confiabilidad, sin embargo, se tiene que tomar alguna providencia con los entrehierros múltiples a fin de evitar el reencendido en el instante siguiente a la interrupción, esto se logra dividiendo en forma equitativa el voltaje del sistema entre cada fracción del entrehierro.

La igualación del trabajo del entrehierro se obtiene mediante la calibración eléctrica. En su forma más sencilla, la calibración eléctrica significa añadir un circuito capacitivo o resistivo en paralelo con la estructura del entrehierro, los circuitos calibradores o de alta impedancia permiten únicamente una corriente infinitesimal, pero como la caída de voltaje graduadora a través de cada entrehierro es idéntica, puede establecerse un patrón de distribución de voltaje que supere efectivamente los perjuicios de la capacitancia parásita, la contaminación exterior o la cercanía de conductores cargados u objetos puestos a tierra. Los resistores calibrados pueden ser de carácter no lineal, consiguiéndose de esa manera ventajas adicionales en el control del voltaje de distribución, especialmente cuando el apartarrayos está próximo a efectuar el chispeo.

Un entrehierro de aire se rompe en el proceso del es-

tablecimiento del arco cuando el espacio de aire entre los electrodos ha sido previamente ionizado. La ionización del aire ocurre bajo un considerable esfuerzo eléctrico y toma un tiempo apreciable dentro de su brevedad, este requisito de tiempo puede acortarse dotando a la zona del entrehierro de una fuente irradiante que produzca partículas altamente ionizadas a voltajes inmediatamente abajo del chispeo. La ionización puede lograrse de diversas formas: en algunos -- apartarrayos depende de un punto metálico en la vecindad de una superficie energizada; en otros, de una superficie plateada próxima a los electrodos energizados sirve a este propósito.

La resistencia en serie de un apartarrayos tiene que ser no lineal para que el apartarrayos efectivamente funcione.

La resistencia no lineal puede describirse como una resistencia que varía inversamente al voltaje aplicado, bajo condiciones normales de voltaje la resistencia es alta, pero bajo voltajes desusadamente altos, la resistencia es baja; la sustancia no lineal es principalmente el carburo de silicio.

Este, se mezcla cuidadosamente con un aglutinante de cerámica, se comprime en bloques cilíndricos a alta presión y se cuece en hornos de atmósfera controlada a temperaturas superiores de 2 000°F, las paredes laterales se recubren -- con un compuesto aislante y los extremos se rocían con me--

tal para conseguir así buenas superficies de contacto. Esta parte del apartarrayos es conocida como el "bloque de la válvula".

Cada bloque de válvula de carburo de silicio se precondiciona y se clasifica eléctricamente antes de acoplarse en el interior del apartarrayos; como el elemento de una válvula contiene varios bloques, la selección adecuada de ellos clasificados logra las características óptimas de operación, la cantidad de bloques de válvula empleados en un apartarrayos queda determinada por la resistencia requerida para cada valor individual de kV nominales.

Cuando el impulso provocado por un rayo llega al entrehierro de aire, hace brincar el arco. El chispeo del entrehierro sujeta a los bloques de la válvula a un voltaje grandemente elevado y la resistencia de los mismos disminuye bruscamente a un valor muy bajo; la corriente transitoria instantánea, que puede ser de miles de Amperes, fluye a tierra a través de los bloques de la válvula. El voltaje que aparece entre las terminales del equipo protegido depende directamente del producto de la resistencia interna del apartarrayos y del tamaño de la corriente transitoria, mientras más bajo sea ese voltaje, conocido como el voltaje IR de descarga, menor será el daño en el aislamiento del equipo que se protege.

La resistencia no lineal del apartarrayos tiene una función igualmente importante en el ciclo de interrupción

del apartarrayos. El chispeo de los elementos del entrehierro causado por la descarga de un rayo ioniza la atmósfera en las cámaras del arco y comienza a circular una corriente del sistema de 60 cps que continúa fluyendo a través del -- apartarrayos, esta corriente se conoce como "flujo de corriente de energía", el alto voltaje del impulso del rayo -- estará ya disipado en ese momento, y el voltaje actual a -- través de los bloques de la válvula es aproximadamente el -- voltaje instantáneo entre fase y tierra del sistema. Bajo tales condiciones, los bloques de la válvula regresan inmediatamente a su alta resistencia original con el resultado de que el flujo de corriente de energía se reduce a un valor tal que el elemento de entrehierros en serie puede interrumpir al siguiente paso por cero de dicha corriente.

En resumen, la protección contra el impulso puede ser proporcionado a el equipo que se desea proteger -como puede ser el transformador- mediante un entrehierro de aire adecuado. Los apartarrayos corrigen las desventajas de los entrehierros de aire. Consisten en una combinación de entrehierros de aire y resistencias no lineales. El chispeo predecible y una interrupción predecible del flujo de corriente de energía del apartarrayos, pueden conseguirse por medio de un conjunto de entrehierros múltiples preionizados - que acorten la corriente de energía en una serie de arcos pequeños; el calibrado permite la distribución uniforme del voltaje en la serie de entrehierros y amplía el control sobre la operación del chispeo.

CAPITULO IV  
CLASIFICACION Y PRUEBAS.

1. Generalidades.

Los apartarrayos se dividen en tres clases: apartarrayos de estación, apartarrayos de línea y apartarrayos de distribución; su tensión está referida a la tensión máxima de fase a tierra que soportan. La clase adecuada del apartarrayos se selecciona basándose en las características de protección y en lo que a continuación se menciona:

- Tensiones nominales disponibles.

- Límites de corriente para la liberación de presión, que no deberá de exceder a la corriente de corto circuito del sistema, en el punto de localización del apartarrayos.

2. Apartarrayos clase estación.

Los apartarrayos clase estación se utilizan para la protección de grandes transformadores y subestaciones grandes al igual que en todo equipo arriba de 138 kV. que se quiera proteger y en combinación con capacitores para la protección de generadores y motores; se fabrican en tensiones desde 3 kV. Las corrientes de descarga que soportan son no menores de 100 000 Amperes con una onda de 5 x 10  $\mu$ seg. y 150 Amperes en 2 000  $\mu$ seg. La corriente de descarga con onda de 12 x 45  $\mu$ seg., es de 10 000 Amperes, valor de cresta.

Estos apartarrayos no se utilizan en sistemas de dis-

tribución.

### 3. Apartarrayos clase línea.

Esta clase de apartarrayos se emplean generalmente para la protección de transformadores y otros equipos y en ocasiones para pequeñas subestaciones, en líneas de sub-transmisión y en postes de transición; el valor máximo de clase intermedia es de 120 kV. Se fabrican desde 3 kV. Las corrientes de descarga que soportan no son menores de 65 000 Amperes con una onda de  $5 \times 10 \mu$  seg. y 75 Amperes en  $1\ 000 \mu$  seg. La corriente de descarga con onda de  $10 \times 20 \mu$  seg. es de 15 000 Amperes valor de cresta.

### 4. Apartarrayos clase distribución.

Los apartarrayos clase distribución se dividen en dos tipos: el valvular y el de expulsión. Aunque tienen las mismas funciones, básicamente sus características y su construcción son diferentes. Se utilizan generalmente para la protección de transformadores tipo poste, a la salida de subestaciones, seccionadores y otros aparatos pequeños de distribución.

Estos apartarrayos se fabrican en tensiones de 3 a 30 kV. la corriente de descarga que soportan no es menor de 65 000 Amperes con una onda de  $5 \times 10 \mu$  seg. La corriente de descarga de los apartarrayos tipo valvular con una onda de  $10 \times 20 \mu$  seg. es de 5 000 Amperes, valor de cresta; los apartarrayos tipo expulsión pueden manejar la corriente no-

minal de falla a 60 ciclos del propio apartarrayos.

Los apartarrayos de distribución tipo valvular tienen dos características: de flameo al impulso y de tensión de descarga. La gráfica IV.1 muestra las características de flameo para varias tensiones nominales, las curvas de flameo relativamente planas, indican que este tipo de apartarrayos tienen una respuesta rápida a las tensiones de las descargas atmosféricas aún en el caso de ondas con frente casi vertical. Estas curvas están referidas a ondas de prueba de  $1.5 \times 40 \mu\text{seg.}$

Un apartarrayos de 12 kV. por ejemplo, muestra una tensión crítica de flameo al impulso de 53 kV. cresta, definida como la tensión cresta de la onda que produce flameos en el 50% de los casos, cuando se aplica una onda estándar de 100 kV. por microsegundo por 12 kV. de tensión del apartarrayos, el mismo apartarrayos muestra una tensión de flameo de frente de onda de 60 kV. cresta.

Las curvas de descarga de la gráfica IV.2 indican las caídas por impedancia a través de apartarrayos de diferentes tensiones nominales, cuando se aplican ondas de prueba de  $10 \times 20$  con diferentes valores de cresta. A 3 000 Amperes, por ejemplo, se tiene una caída de 25 kV. en un apartarrayos de 6 kV.

Los apartarrayos tipo expulsión tienen características de flameo similares a los del tipo valvular, sin embargo, sus curvas características no son tan planas como se --

aprecia en la gráfica IV.3. Aún cuando los apartarrayos tipo expulsión no tienen tensiones de flameo tan bajas como las del tipo valvular, proporcionan una protección adecuada para transformadores.

No se muestran curvas de descarga para este tipo de apartarrayos debido a que las caídas por impedancia durante las descargas son despreciables. Por ejemplo, un apartarrayos de 9 kV. que descarga una onda de corriente de 65 000 - Amperes tiene una caída por impedancia de solo 7 kV. Esta caída comparada con un nivel básico de aislamiento (NBA) de 95 kV. de un transformador de 7 200 Volts protegido por un apartarrayos de 9 kV. es despreciable.

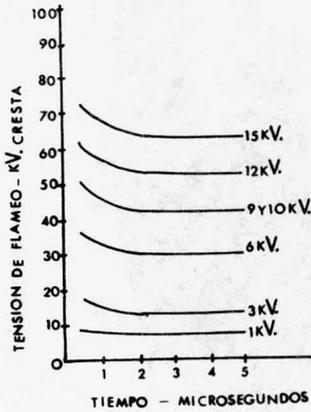
Por lo tanto, los apartarrayos se clasifican según -- sus corrientes nominales de descarga y deben cumplir con -- los requisitos de prueba como son las de aceptación, diseño y rutina.

##### 5. Pruebas.

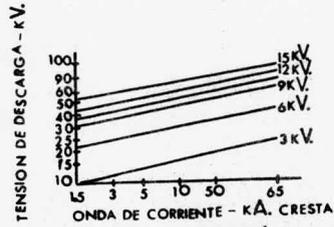
Todas las pruebas deben hacerse sobre los mismos apartarrayos, secciones proporcionales o unidades de los mismos.

Las pruebas de aceptación se realizan cuando así ha sido acordado entre fabricante y consumidor y se aplican a apartarrayos o a muestras representativas de un pedido, para demostrar que cumplen con las características requeridas.

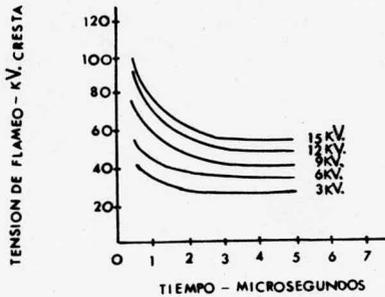
En cada diseño de apartarrayos se realizan pruebas para establecer representativos funcionamientos y demostrar su cumplimiento con las normas que los rigen, una vez he-



Gráfica IV.1- Características de flameo de apartarrayos de distribución tipo valvular



Gráfica IV.2- Características de tensión de descarga de apartarrayos de distribución tipo valvular



Gráfica IV.3- Características de flameo de apartarrayos de distribución tipo expulsión

chas estas pruebas no necesitan ser repetidas a menos que el diseño sea cambiado y modifique su funcionamiento.

Las pruebas de rutina son hechas a cada apartarrayos o a muestras representativas o a sus partes y materiales según sea requerido, para asegurar que el producto cumple con las especificaciones de diseño.

De acuerdo a la norma NOM-J-321 son diez pruebas de diseño las que se llevan a cabo para los apartarrayos, en cada una de ellas se especifica el número de especímenes.

#### 5.1. Pruebas de tensión de descarga a frecuencia del sistema.

Para esta prueba la tensión aplicada al apartarrayos debe ser de un valor suficientemente bajo para evitar la --descarga del apartarrayos -como resultado del transitorio -de conexión- y debe elevarse este valor rápida y uniformemente hasta que ocurra la descarga en las distancias de arqueo en serie. El tiempo durante el cual la tensión puede exceder a la tensión nominal del apartarrayos, debe oscilar entre 2 y 5 segundos cuando los apartarrayos bajo prueba emplean resistencias de control que pueden dañarse por sobrecalentamiento, si la tensión aplicada excede a la nominal -por un tiempo prolongado; después de que ha ocurrido la descarga debe desconectarse la tensión de prueba tan rápido como sea posible, generalmente esto se realiza por medio de -un dispositivo de disparo automático y en un tiempo no ma--yor de 0.5 segundos.

La carga que se utiliza para esta prueba por un apartarrayos con resistencias no lineales de alta conductividad, origina armónicas por lo que el circuito de prueba debe poseer una impedancia lo suficientemente baja para mantener la forma de la onda de la tensión, a través del espécimen, dentro de los límites especificados por la norma que los rige.

Para todos los apartarrayos, excepto los de 10 000 Amperes, de 60 kV. o de estación, y mayores, el valor mínimo de la tensión de descarga a frecuencia de línea para cada uno de los especímenes probados, no debe ser menor que 1.5 veces la tensión nominal del apartarrayos. Para los apartarrayos clase estación, el valor mínimo de la tensión de descarga a frecuencia del sistema, es de 1.35 veces la tensión nominal del apartarrayos.

5.2. Prueba de descarga al impulso con tensión normalizada, equivalente a un rayo.

Esta prueba consiste en lo siguiente:

Con el espécimen en el circuito se ajusta el generador de impulsos, para aplicar una tensión con una forma de onda de  $1.2 \times 50 \mu\text{seg.}$  y el valor de cresta previsto -que se define como el valor de cresta de un impulso de tensión de onda completa del cual se deriva el impulso de tensión de onda cortada- especificado en la tabla A, columnas 3 y 5. Realizado el ajuste, deben aplicarse al espécimen 5 impulsos positivos y 5 negativos y las distancias de arqueo en -

serie del apartarrayos deben descargar en cada impulso, si en una serie cualquiera de los 5 impulsos, las distancias de arqueado fallan una sola vez, deben aplicarse 10 impulsos adicionales de esa polaridad y las distancias de arqueado deben descargar en todos estos impulsos.

Para esta prueba no importa el intervalo de tiempo entre la iniciación de la onda y el instante de la descarga.

Las tolerancias en los ajustes del equipo de prueba deben ser tales que los valores medidos se encuentren dentro de los siguientes límites:

- Entre 97% y 100% para los valores de cresta especificados.
- Desde 0.85 segundos hasta 1.6 segundos para la duración virtual del frente de onda.
- Desde 40 segundos hasta 60 segundos para el tiempo a la mitad del valor de la cola de onda.

Las oscilaciones en la primera parte del frente de onda (abajo del 50%), no deben exceder del 10% del valor de cresta; se permiten pequeñas oscilaciones cerca de la cresta del impulso siempre y cuando su amplitud sea menor del 5% del valor de cresta, por lo que deben hacerse mediciones de la cresta de las oscilaciones.

Para determinar la curva de tensión de descarga al impulso equivalente a un rayo-tiempo, se logra obteniendo los datos al aplicar ondas de tensión de  $1.2 \times 50 \mu\text{seg.}$  de amplitudes sucesivas que se incrementan en pasos, principian-

do con una tensión inferior a la de la descarga del apartarrayos y aumentando la tensión de carga del generador (y -- con ésto la tensión de cresta prevista) hasta que la pendiente virtual del frente de onda del impulso iguale al especificado en la columna 2 de la tabla A. Alternativamente, para tiempos de descarga inferiores a 1.2  $\mu$ seg. los datos pueden obtenerse reduciendo el tiempo virtual frontal del impulso. Para tiempos de descarga inferiores a 1.2  $\mu$ seg. la prueba de impulso debe elevarse sustancialmente uniforme, hasta llegar a la descarga del apartarrayos. Para cada descarga la tensión más alta lograda antes de la descarga debe ser trazada contra el tiempo de descarga, medido desde el origen virtual.

### 5.3. Prueba de descarga con frente de onda de tensión de impulso.

Para esta prueba se utiliza una tensión de impulso -- con una pendiente virtual a la descrita en el inciso anterior, es decir, al especificado en la columna 2 de la tabla A, al apartarrayos se le aplican 5 impulsos positivos y 5 negativos, determinándose la tensión de descarga de los oscilogramas (de rayo catódico) tensión-tiempo, obtenidos durante cada prueba. En ninguno de los impulsos deben exceder la tensión de descarga cuyo valor se indica en la columna que corresponde (4, 6 ó 7) de la tabla A.

Para determinar la tensión máxima de descarga de frente de onda del apartarrayos bajo prueba, se puede emplear -

el punto de intersección de la curva cuya elaboración se describió en el párrafo anterior, es decir, con una línea representativa de la pendiente virtual del frente de onda que se especifica en la columna 2 de la tabla A, comparando con el valor máximo permisible en dicha table, siempre y cuando se obtengan como mínimo 5 valores de prueba de descarga positivos y 5 negativos, dentro de una zona de  $\pm 0.1 \mu\text{seg.}$  alrededor de la línea recta que representa la pendiente descrita. Esto se aprecia mejor en la gráfica IV.4.

#### 5.4. Prueba para determinar la curva de tensión de descarga al impulso por maniobras de interruptores-tiempo.

Esta prueba se le aplica a los apartarrayos clase estación y tiene por objeto demostrar las características de descarga al recibir impulsos por maniobra de interruptores, el procedimiento que a continuación se describe, proporciona un método uniforme que permite llevar a cabo esta prueba de manera que los datos suministrados por el fabricante se puedan llegar a comparar.

Las pruebas de descarga deben hacerse empleando diferentes ondas de tensión de impulso con tiempos virtuales de frente de onda, cuyo valor esta entre:

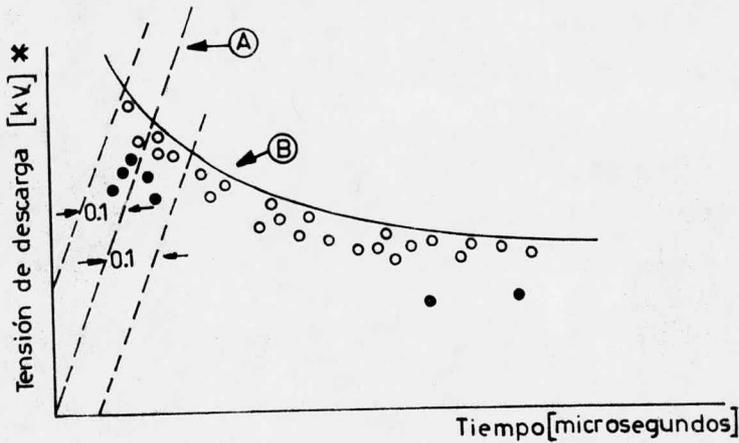
- a) 30  $\mu\text{seg.}$  y 60  $\mu\text{seg.}$
- b) 150  $\mu\text{seg.}$  y 300  $\mu\text{seg.}$
- c) 1 000  $\mu\text{seg.}$  y 2 000  $\mu\text{seg.}$

El tiempo del valor medio de la cola, deberá ser apreciablemente mayor que dos veces el tiempo para el frente de

TABLA A Tensiones máximas de descarga al impulso

Valor nominal del apart.	Pendiente del frente de onda	Apart. clase, estación y línea		Apartarrayos clase distribución		Apart. clase secundarios
kVrnc	FDO* kV	Normal ** kV, cresta	FDO* kV, cresta	Normal* kV, cresta	FDO* kV, cresta	FDO* kV, cresta
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7
0.175	10	-	-	-	-	3.5
0.280	10	-	-	-	-	3.0
0.500	10	-	-	-	-	4.5
0.660	10	-	-	-	-	6.0
3	25	13	15	21	26	
4.5	37	17.5	20	-	36	
6	50	22.6	26	40	44	
7.5	62	27	31	31	-	52
9	75	32.5	38	58	59	
10	87	38	44	-	-	
12	100	43	50	70	73	
15	125	54	62	80	83	
18	150	65	75	85	91	
21	175	76	88	"	106	
24	200	87	100	"	121	
27	225	97	112	"	133	
30	250	108	125	"	143	
33	275	119	137	"	"	
36	300	130	150	"	"	
39	325	141	162	"	"	
42	350	151	174			
48	400	173	199			
51	425	184	212			
54	450	195	224			
60	500	216	250			
72	600	259	298			
75	625	270	310			
84	700	302	347			
90	745	313	359			
96	790	324	371			
102	830	343	394			
108	870	363	418			
120	940	400	463			
126	980	420	485			
138	1030	460	530			
144	1055	480	554			
150	1080	500	577			
168	1147	558	646			
174	1160	570	660			
180	1170	590	681			
186	1180	610	702			
192	1200	649	746			
Hasta 225	1200	3.28 UR	3.78 UR			
Hasta 396	1200	3.26 UR	3.76 UR			
Más de 396	1200					

\*clase línea



- Ⓐ -Pendiente virtual del frente de onda, columna 2 de la tabla A
- Ⓑ - Curva de tensión de descarga al impulso equivalente a un rayo-tiempo; especificada en inciso 4.4.2
- -Pruebas con polaridad que dan la más alta tensión de descarga
- -Pruebas con polaridad opuesta
- \* -El valor no debe exceder lo especificado en las columnas 4,6 ó 7 de la tabla A

Gráfica IV.4.-Prueba de descarga con frente de onda de tensión de impulso

onda, pero el valor exacto no tiene importancia crítica.

Se determina primeramente la "tensión de descarga 50%" ( $U_{50\%}$ ), para cada forma de onda y para ambas polaridades, - se aplica un impulso con una tensión de cresta lo bastante inferior a la tensión prevista  $U_{50\%}$  del apartarrayos que se encuentra bajo prueba y elevando la tensión de carga del generador de impulso, en pasos aproximados de 5% hasta que la descarga ocurra. Esta, debe presentarse al aplicar el primero de 5 impulsos a los que se somete el apartarrayos y se anotan los valores de mayor tensión que se obtengan. Deben aplicarse el resto de las series de 5 impulsos disminuyendo la tensión de carga del generador (y en consecuencia la tensión de cresta prevista), alrededor de 5% cada vez que el apartarrayos descarga y aumentándola alrededor de 5% cada vez que el apartarrayos no descargue. Posteriormente deben aplicarse 10 impulsos más al espécimen, con incremento de tensión de carga del generador de impulsos, de tal forma -- que se obtenga una tensión de carga prevista de alrededor - de un 40% mayor que  $U_{50\%}$ .

$U_{50\%}$  se calcula como el promedio de los valores mayores de tensión registrados en cada una de las cinco pruebas a las que se somete el espécimen.

Los datos para todas las descargas que ocurren en las series de prueba para establecer  $U_{50\%}$ , así como durante las subsecuentes series a  $1.4 U_{50\%}$ , se emplean para trazar la curva de tensión de descarga al impulso por maniobra de in-

terruptores-tiempo. La mayor tensión alcanzada antes de la descarga, debe ser trazada en la curva a 90° del tiempo desde el cero real hasta la descarga, para cada prueba en la que la descarga ocurra. La curva tensión de descarga-tiempo, debe trazarse como una curva uniforme a través de los valores máximos de tensión registrados para ambas polaridades y continuando con la curva tensión de impulso de descarga equivalente a un rayo-tiempo, cuyo procedimiento está descrito en párrafos anteriores.

#### 5.5. Prueba de tensión residual.

Esta prueba se realiza siempre y cuando así se desee a los mismos especímenes que se utilizaron para las pruebas de tensión de descarga a frecuencia del sistema y de tensión de descarga al impulso. Se realiza o lleva a cabo esta prueba a tres especímenes de apartarrayos completos o a secciones proporcionales de los mismos. El valor nominal de tensión de los especímenes debe ser cuando menos de 3 kV., si la tensión nominal del apartarrayos no es menor que ese valor y no necesita exceder a 12 kV. La prueba debe realizarse en apartarrayos completos con tensiones nominales de 3 a 12 kV. y en secciones proporcionales para tensiones mayores.

Debe utilizarse una corriente de impulso de  $8 \times 20$   $\mu$ seg. dentro de los límites de ajuste del equipo, de tal forma que los valores medidos sean de 7 a 9  $\mu$ seg. para el tiempo en el frente de onda y para el tiempo en el valor me

dio de la cola de onda de 18 a 22  $\mu$ seg. Deben aplicarse tres impulsos de corriente a cada espécimen, con valores de cresta de aproximadamente 0.5, 1 y 2 veces la corriente de descarga nominal del apartarrayos. El tiempo entre las descargas debe ser lo suficiente que permita al espécimen regresar aproximadamente a la temperatura ambiente.

Cuando la prueba se realiza en una sección proporcional de un apartarrayos, la tensión residual del apartarrayos completo, se calcula como el producto del valor medido por la relación que hay entre la tensión nominal del apartarrayos completo y la tensión nominal de la sección; de esta manera, la lectura de la tensión residual en la curva de tensión residual-corriente de descarga -donde en esta curva la envolvente máxima de los puntos de prueba, se trazan en ella- no debe ser mayor que la tensión máxima residual del apartarrayos especificado en la tabla B.

#### 5.6. Pruebas de corriente al impulso.

Esta prueba, de corriente al impulso, se divide de la siguiente manera:

- a) Alta corriente al impulso, corta duración.
- b) Baja corriente al impulso, larga duración.

Cada una de estas pruebas debe de realizarse en tres muestras nuevas de apartarrayos completos, secciones proporcionales de los mismos, o cilindros valvulares, solamente - cuando no hayan sido previamente sujetos a cualquier prueba. La tensión nominal de las muestras de prueba debe ser

TABLA B Tensiones máximas residuales

Valor nominal del apartarrayos kV rmc	Apart. clase est. y línea kV, cresta	Apartarrayos clase distribución kV, cresta	Apartarrayos clase secundaria kV, cresta
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4
0.175	-	-	2.2
0.280	-	-	2.5
0.500	-	-	3.0
0.660	-	-	5.0
3	13	18	
4.5	17.5	24	
6	22.6	31	
7.5	27	39	
9	32.5	46	
10	38	-	
12	43	54	
15	54	64	
18	65	73	
21	76	83	
24	87	91	
27	97	99	
30	108	107	
33	119	***	
36	130	***	
39	141	***	
47	151		
48	173		
51	184		
54	195		
60	216		
72	259		
75	270		
84	302		
90	313		
96	324		
102	343		
108	363		
120	400		
126	420		
138	460		
144	480		
150	500		
168	552		
174	570		
180	590		
186	610		
192	649		
Hasta 225*	3.28 UR***		
Hasta 396*	3.26 UR***		
Más de 396	...		

\* Clase estación

cuando menos de 3 kV. y no necesita exceder de 9 kV. Si un desconectador de apartarrayos está construído dentro del di-  
seño del espécimen bajo prueba, estas pruebas deben ser he-  
chas con el desconectador en condiciones de operación, tal  
y como se hace mención en el inciso 5.9.

5.6.1. Prueba de alta corriente al impulso, corta duración.

Antes de las pruebas, el promedio de la tensión de --  
descarga en seco a frecuencia del sistema, debe ser determi-  
nado para cada muestra de prueba como se especifica en el -  
inciso 5.1., es decir, las pruebas a frecuencia del sistema  
deben hacerse a tensión alterna con una frecuencia entre 58  
y 62 Hz. y con una forma de onda senoidal aproximada.

La prueba de alta corriente al impulso, corta dura- -  
ción consiste en la aplicación a cada muestra de dos impul-  
sos de corriente con forma de onda de (4 a 8) x (10 a 20) -  
microsegundos y con valores de cresta como sigue:

Corriente nominal de descarga	Valor de cresta de alta
de apartarrayos	corriente al impulso
Amp.	kA
C.E. 10 000	100
C.D. 5 000	65

Se debe dar tiempo para que las muestras se enfríen -  
aproximadamente a la temperatura ambiente, entre cada impul-  
so, tanto la tensión como la corriente, deben ser medidas -  
obteniéndose los oscilogramas correspondientes en cada im-  
pulso y los registros de tensión en la misma muestra, no de

ben mostrar una diferencia significativa. Las tolerancias en el ajuste del equipo deben ser tales que los valores medidos de las corrientes al impulso estén dentro de los límites siguientes:

- a) De 90% a 110% del valor de cresta especificado.
- b) De 3.5  $\mu$ seg. a 4.5  $\mu$ seg. para el tiempo virtual de frente de onda.
- c) De 9  $\mu$ seg. a 11  $\mu$ seg. para el tiempo virtual a la mitad del valor sobre la cola.
- d) El valor de cresta de cualquier onda de corriente de polaridad opuesta, debe ser menor que el 20% del valor de cresta de la corriente.
- e) Se permiten pequeñas oscilaciones en el impulso, tomando en cuenta que su amplitud en la vecindad de la cresta del impulso, sea menor de 5% del valor de cresta. Bajo estas condiciones, para propósitos de medición, se acepta una curva media para la determinación del valor de cresta.

A continuación del segundo impulso de alta corriente y después que el apartarrayos bajo prueba se haya enfriado cerca de la temperatura ambiente, las pruebas de descarga a frecuencia de línea, las cuales fueron hechas antes de la prueba de alta corriente, deben repetirse y el promedio de la tensión de descarga a frecuencia de línea, no debe variar en más de 10%. El examen de las muestras bajo prueba debe revelar que no hay evidencia de perforación o flameo de los ciclindros autovalvulares o daño importante a las --

distancias de arqueo en serie o sus resistencias de distribución de tensión.

5.6.2. Prueba de baja corriente al impulso, larga duración.

Antes de realizar esta prueba, deben determinarse dos aspectos:

- La tensión residual a la corriente nominal de descarga de cada muestra como se indica en el inciso 5.5.

- El segundo aspecto es la determinación de la tensión media de descarga en seco a frecuencia del sistema de acuerdo al inciso 5.1., excepto donde la prueba se realice solamente sobre los cilindros valvulares, es decir, que para los apartarrayos clase distribución esta prueba, se realiza solamente sobre dichos cilindros valvulares, los cuales se conectan en paralelo o en serie-paralelo con otros cilindros y se sujetan al número especificado de operaciones de descarga del generador. El número y la resistencia de los cilindros valvulares y la tensión de carga, deben seleccionarse de tal forma que el impulso de corriente a través de la muestra bajo prueba, tenga la forma sustancialmente rectangular, con valores mínimos de:

Duración virtual de la cresta: 1 000  $\mu$ seg.

Valor de cresta de corriente: 75 Amperes.

Para que el impulso de corriente tenga la forma rectangular, debe de cumplir con los siguientes requisitos:

a) La duración virtual de la cresta debe estar entre 100% y 120% del valor especificado anteriormente.

b) La duración virtual total no debe exceder de 150% de la duración virtual de la cresta.

c) Las oscilaciones o el sobrepaso inicial no deben exceder del 10% del valor de cresta de la corriente. Si se presentan oscilaciones, debe trazarse una curva media para la determinación del valor de cresta.

d) Si el pulso de corriente es seguido por un pulso corto de polaridad opuesta, el valor de cresta de este último no debe exceder del 10% del valor de cresta del primero.

En estos apartarrayos -clase distribución- no se requiere demostración del ajuste del generador antes de la prueba de impulso de corriente larga duración.

Cumplidos los dos aspectos anteriores, se procede a efectuarse la prueba de corriente de larga duración la cual debe consistir -cada prueba- de 20 operaciones de descarga, divididas en 4 grupos de 5 operaciones. Los intervalos entre las operaciones deben ser de 25 a 30 minutos. Deben tomarse registros oscilográficos de la caída de tensión y la corriente en la muestra, en la primera y en la vigésima operación de cada secuencia de prueba.

Todas las pruebas deben realizarse con un generador de tipo constantes distribuidas. Los elementos del circuito del generador no necesitan tener valores idénticos en todas las secciones. Si se usa un generador auxiliar de impulso para iniciar la descarga del generador de constantes distribuidas, la energía almacenada del primero no debe - -

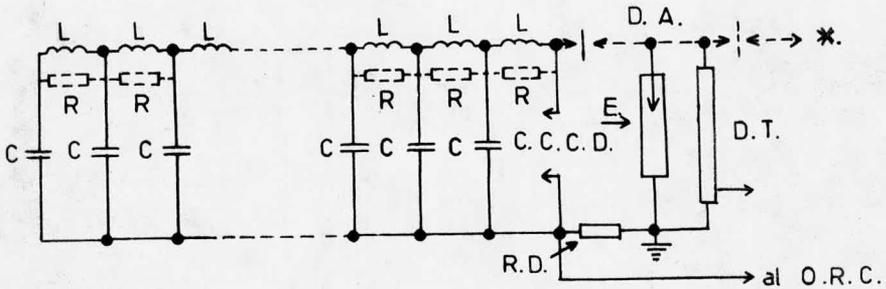
exceder de 0.5% la energía almacenada del segundo, el principio general del generador de tipo de constantes distribuidas se describe a continuación:

El método exacto por el cual se obtienen los requisitos de la forma de onda, duración, tensión de descarga, resistencia de carga, intervalos entre impulsos, etc., no está definido. Hay muchas variaciones posibles tanto en el circuito como en la selección de valores de los diversos componentes. La figura 23 muestra un diagrama simplificado de un generador de impulso con constantes distribuidas, donde la impedancia característica del generador esta determinada por:

$$Z = \sqrt{L/C} \text{ (cuando se desprecia la resistencia)}$$

Para producir una aceptable forma de onda, el número de secciones (LC) del generador es normalmente de 10 aproximadamente. Es necesario incrementar las inductancias en ambas terminales del generador con el objeto de limitar las oscilaciones al comienzo y al final de la cresta de la onda, así como también, introducir resistencias en paralelo (R) para compensar la reducción de cresta, originada por las inductancias incrementadas.

El dispositivo de disparo puede ser un simple interruptor, sin embargo, si la tensión de carga del generador es insuficiente para descargar sobre el espécimen, puede usarse un pequeño generador auxiliar de impulso, es entonces que para este caso, tanto el generador de impulso de --



- C.C.C.D. = Circuito de Carga de Corriente Directa.
- O.R.C. = Osciloscopio de Rayos Catódicos.
- D.A. = Distancias de Arqueo.
- D.T. = Divisor de Tensión.
- R.D. = Resistencia en Derivación.
- E. = Espécimen.
- \*. = Al generador auxiliar de impulso si se requiere.

Figura 23.- Generador típico de impulso de constantes distribuidas para la prueba de baja corriente al impulso, larga duración.

constantes distribuidas como el generador auxiliar de impulso, deben estar separados del espécimen por varias distancias de arco. Deben registrarse con un osciloscopio de rayos catódicos (ORC), tanto la corriente que fluye por el espécimen como la tensión a través de él.

Es necesario, que también se verifique la forma de onda por un procedimiento de calibración usando un resistor de carga, cuyo valor debe ser muy cercano al valor de la impedancia característica del generador, ya que de otra forma, los requisitos con respecto a la forma de onda no se cumplen en su totalidad.

Más aún, un generador de tensión adecuado permite alteraciones del valor nominal de la muestra bajo prueba, como para ajustar la impedancia característica, sin embargo, debe notarse que el valor nominal de la muestra puede solamente ser alterado en pasos iguales a la menor tensión nominal de las secciones de apartarrayos usados en el diseño particular de los mismos.

#### 5.7. Prueba de operación.

Esta prueba debe realizarse a tres nuevas muestras de apartarrayos completos, o secciones proporcionales de los mismos, que no hayn sido sujetas anteriormente a ninguna prueba, excepto aquellas especificadas para propósitos de evaluación. La tensión nominal de las muestras en prueba debe ser por lo menos de 3 kV. si la tensión nominal del apartarrayos no es inferior a dicho valor, pero no necesita

ser mayor de 12 kV.

En apartarrayos con tensiones nominales mayores de -- 12 kV. es usualmente necesario efectuar esta prueba sobre -- una sección proporcional del apartarrayos, debido a las limitaciones de tener los medios necesarios para la prueba, -- es importante que la tensión a través de las distancias de arqueo de la muestra en prueba y la corriente remanente, a través de la muestra, representen lo más cercanamente posible, las condiciones en el apartarrayos completo.

Para apartarrayos con distribución de tensión uniforme, la tensión de prueba a frecuencia del sistema para ser aplicada a la sección proporcional del apartarrayos bajo -- prueba, debe ser la tensión nominal del apartarrayos completo, dividida por el número total "n" de secciones similares del apartarrayos. Se considera que el apartarrayos tiene -- una distribución de tensión uniforme, si "n" veces la descarga a frecuencia del sistema de la sección, no es mayor -- que 1.2 veces la descarga a frecuencia del sistema del apartarrayos completo. La experiencia ha demostrado que la distribución de tensión en el momento de la interrupción de la corriente remanente, generalmente es más uniforme que la -- distribución de tensión en el instante de la descarga.

Para apartarrayos con distribución de tensión no uniforme, la tensión de prueba a frecuencia del sistema debe -- corresponder a la de la sección que tenga el valor más alto de las secciones proporcionales del apartarrayos completo.

Para mantener el valor correcto de la corriente remanente, es necesario que la relación del valor de los cilindros valvulares de la sección proporcional bajo prueba, al valor de los cilindros correspondientes del apartarrayos completo -- sea la misma que la relación de las tensiones nominales. - Para poder satisfacer esta condición, puede ser necesario - seleccionar una combinación de distancias de arqueo y cilindros valvulares diferentes de la combinación normalmente empleada en el apartarrayos completo; si las distancias de arqueo no son todos de la misma construcción, puede ser necesario probar más de un arreglo, usando la tensión fraccional máxima para cada construcción.

El apartarrayos completo o la sección proporcional, - debe ser conectada a una fuente de alimentación que tenga - una frecuencia entre 58 y 62 Hz. La impedancia de la fuente de alimentación debe ser tal que durante el flujo de la corriente remanente, el valor de cresta de la tensión a frecuencia del sistema, medido en las terminales del apartarrayos, no debe caer a un valor inferior al de cresta de la -- tensión nominal del espécimen y después de la interrupción de la corriente remanente, el valor de cresta de tensión, - no debe exceder el valor de cresta de la tensión nominal en más de 10%. Este incremento se permite únicamente para facilitar el uso de equipo de prueba de razonable capacidad y no debe ser tomado como justificación para exceder la tensión nominal del apartarrayos en servicio.

Se debe conectar un generador de impulsos al apartarrayos a través de una distancia de arqueo y ajustarse a generar un impulso de corriente de  $8 \times 20 \mu$  seg. con un valor de cresta igual a la corriente de descarga nominal del apartarrayos; el primer impulso de prueba debe regularse en tiempo para que ocurra aproximadamente a  $60^\circ$  eléctricos antes de la cresta de la onda de tensión a frecuencia del sistema.

Si la corriente remanente queda establecida en forma consistente, la prueba debe realizarse bajo ese control de tiempo. Si la corriente remanente no queda establecida consistentemente con dicho control de tiempo, el momento de aplicación del impulso debe retrasarse en pasos de  $10^\circ$  eléctricos hacia el valor de cresta de tensión, hasta que la corriente remanente fluya consistentemente y bajo estas condiciones se efectúa la prueba. La polaridad de la corriente inicial debe ser la misma que la del medio ciclo de la tensión a frecuencia del sistema durante el cual ésta ocurre.

Se deben aplicar 20 impulsos en 4 grupos de 5 impulsos, el intervalo entre impulsos debe ser de 50 a 60 segundos y el intervalo entre grupos de 25 a 30 minutos; no se requiere que la pieza en prueba se mantenga energizada entre impulsos o entre grupos de impulsos.

En el caso de distancias de arqueo externas (limitadoras de corriente) para arcos de alta tensión, la regulación de tiempo descrita anteriormente no representa neces-

riamente la condición más desfavorable y se debe hacer una modificación apropiada de dicha regulación, para obtener el valor más alto de la corriente remanente.

Debe establecerse la corriente remanente para cada impulso de prueba y la muestra bajo prueba debe interrumpir la corriente remanente cada vez que ésta se establezca. No se deben aplicar más de 3 impulsos a la pieza de prueba durante la calibración.

Después de la prueba de servicio de operación y una vez que la muestra bajo prueba se enfría hasta cerca de la temperatura ambiente, se deben repetir las pruebas de descarga a frecuencia del sistema de tensión residual hechas antes de la prueba de operación y los valores medidos no deben cambiar más de 10%.

Por lo tanto, esta es una prueba en la cual las condiciones de servicio se simulan mediante la aplicación al apartarrayos de un número estipulado de impulsos especificados, mientras que está energizado por una fuente de alimentación de frecuencia, tensión e impedancia especificados.

A continuación, en la figura 24, se describe un circuito de prueba típico que puede ser empleado para la prueba de operación, donde más bien, se describe el funcionamiento de los diversos elementos que lo integran, que el especificar un circuito de prueba normalizado.

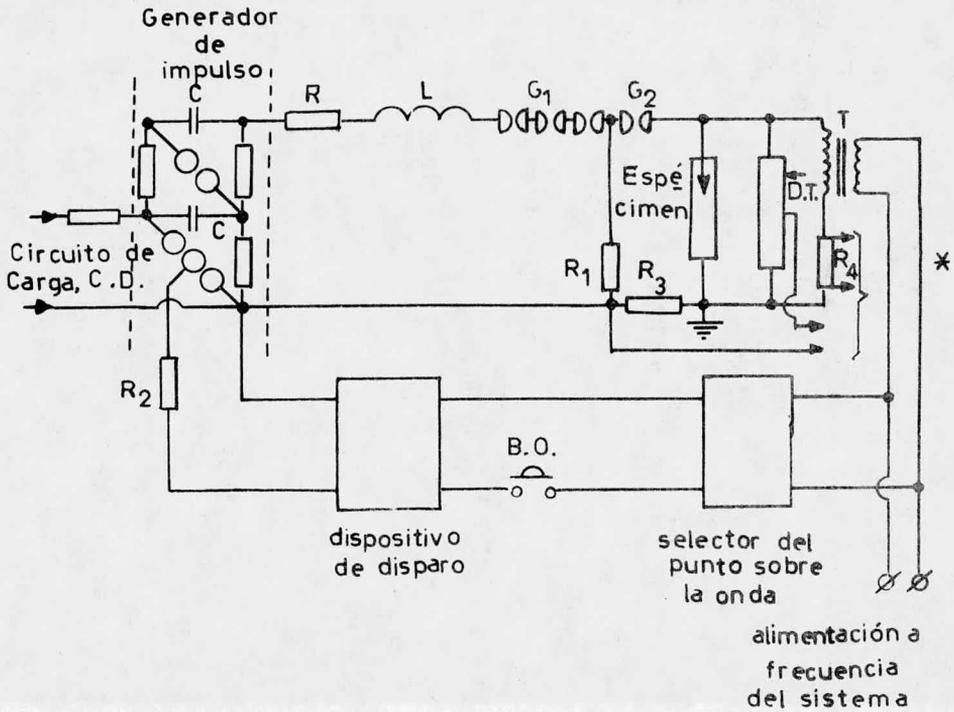
La muestra de prueba se conecta de una manera directa por medio de la alimentación a frecuencia del sistema, gene

ralmente un transformador, pero ésto no es esencial. Un --  
generador de impulso representado como un circuito de dos -  
etapas o bien un circuito de una etapa si es adecuado, se -  
conecta al apartarrayos a través de la resistencia (R), la  
inductancia (L) y las distancias de arqueo ( $G_1$  y  $G_2$ ), donde  
la forma de onda de la corriente de impulso se controla me-  
diante la selección adecuada de los valores para C, R y L.  
Un resistor ( $R_3$ ) de baja resistencia, no inductiva y un di-  
visor de tensión (DT), se emplean para las mediciones de co-  
rriente y tensión respectivamente. Un resistor ( $R_4$ ) se uti-  
liza en las terminales del transformador de potencia, para  
registrar la corriente remanente. Si se toman las precau-  
ciones adecuadas, la corriente remanente también puede re-  
gistrarse mediante un oscilógrafo magnético, o bien, con un  
osciloscopio de rayos catódicos, de igual manera, la ten- -  
sión a frecuencia del sistema puede registrarse mediante un  
oscilógrafo magnético o un osciloscopio de rayos catódicos,  
a través de un divisor de tensión o un transformador de po-  
tencial.

La distancia de arqueo que separa el generador de im-  
pulso del circuito de potencia, puede estar dispuesta en di-  
versas formas. En el tipo de distancia que se ilustra en -  
la figura 24, la resistencia ( $R_1$ ) si se usa, puede ser del  
orden de 1 megaohm y sirve para mantener un punto a un po-  
tencial de tierra en las distancias de arqueo múltiples, --  
cuando no pase ninguna corriente. La parte  $G_1$ , de la dis-

tancia de arqueo no tiene, por lo tanto, ninguna tensión -- senoidal a través de ella y puede ser descargada en cualquier punto del ciclo. La parte  $G_2$ , de la distancia de arqueo se hace tan pequeña, como sea consistente con su habilidad de poder soportar la tensión a frecuencia del sistema. La parte  $G_1$  esta diseñada para interrumpir cualquier corriente de frecuencia del sistema, que tratará de circular hacia el generador de impulso, después del final del impulso y es para asistir en ésto, que se muestra una construcción múltiple si la distancia de arqueo permanece conduciendo después del final del impulso, puede existir un intercambio de energía entre la capacitancia del generador de impulso y la fuente de poder, que va a perjudicar el procedimiento de prueba, ésto puede ocasionar que también el generador de impulso pueda también dañarse, debido a la circulación constante de corriente a frecuencia del sistema.

El generador de impulso debe dispararse en el momento correcto sobre la onda de tensión a frecuencia del sistema. Esto puede lograrse mediante una distancia de arqueo sincronizada o por un selector de punto sobre la onda, a través de un dispositivo de dispro, éste aplica un impulso de alta tensión al electrodo central de la distancia de arqueo de tres electrodos, en el generador de impulso. Una alta resistencia ( $R_2$ ), evita la circulación de una corriente de impulso apreciable en el circuito de disparo. El disparo del generador de impulso puede iniciarse por medio de un botón



O.R.C. = Osciloscopio de Rayos Catódicos.

D.T. = Divisor de Tensión.

O.M. = Oscilógrafo Magnético.

B.O. = Botón de Operación.

T = Transformador que alimenta la tensión de prueba senoidal.

\* = Medición O.R.C. u O.M.

Figura 24.-Circuito de prueba típico para la prueba de operación

de control o por cualquier otro medio, que ponga en operación el sistema de registro y dispare al generador de impulso al instante seleccionado, sobre la onda de tensión a frecuencia del sistema.

#### 5.8. Prueba de alivio de presión.

Cuando un apartarrayos está equipado con un dispositivo de alivio de presión se le debe realizar esta prueba, cuya finalidad es la de mostrar que en una falla del apartarrayos, el dispositivo de alivio opera correctamente dentro de los límites señalados en esta prueba.

Las pruebas deben realizarse a la tensión nominal más alta de una sola unidad completa de apartarrayos, de un tipo y diseño dado. Cada prueba debe efectuarse sobre una muestra alojada en una envolvente nueva, dicha muestra debe probarse a alta corriente y una muestra diferente a baja corriente, tal como se describe en los incisos siguientes.

A fin de iniciar el flujo de corriente dentro del apartarrayos bajo prueba, todas las distancias de arqueo en serie y los cilindros valvulares, deben ser puenteados mediante el empleo de un alambre fusible que funda dentro de los primeros 30° eléctricos, después de la iniciación de la corriente de prueba; el alambre fusible que puentea los cilindros valvulares, debe seguir el contorno próximo inmediato a las superficies de éstos.

La frecuencia de la alimentación para esta prueba no debe ser menor de 58 Hz. ni mayor de 62 Hz.

La muestra que se encuentra bajo prueba, debe montarse simulando las condiciones de instalación que estén de acuerdo con las recomendaciones que proporciona el fabricante. El extremo superior debe ser terminado con la configuración externa de otra unidad o por el casquete terminal, cualquiera que sea la condición más desfavorable para el alivio de presión, en caso de probarse una unidad como parte de un apartarrayos de mayor tensión. La base debe montarse sobre una superficie horizontal que esté al nivel de la parte superior de una barrera aproximadamente cilíndrica que sea por lo menos de 30 cm. de altura, concéntrica a la muestra y que la rodee completamente. El diámetro de la barrera debe ser igual al diámetro de la muestra, más dos veces la altura de la misma, con un diámetro mínimo de 1.8 m. Se considera que la muestra pasó la prueba si la envolvente del apartarrayos permanece intacta o si la fractura es tal que todas las partes expulsadas queden dentro de la barrera cilíndrica.

#### 5.8.1. Pruebas de alivio de presión con alta corriente.

Cuando el apartarrayos es puesto en corto circuito por medio de un conductor cuya impedancia sea despreciable, la capacidad de corto circuito de la fuente de alimentación debe ser lo suficientemente alta para que el valor rmc de la componente alterna de la corriente, no caiga abajo del 75% del valor correspondiente a 0.2 seg., el factor de potencia de corto circuito del circuito de prueba no debe ser

mayor que 0.1 ( $X/R = 10$  ó más).

Siempre y cuando sea posible, las pruebas deben efectuarse en un circuito monofásico y a una tensión de 77% - (-0, +30%) de la tensión nominal del apartarrayos, sin embargo, se tiene presente que las pruebas sobre apartarrayos de alta tensión pueden efectuarse en una estación de pruebas que no tenga la suficiente capacidad para realizarlas - en todos los apartarrayos al 77% de la tensión nominal. Durante las pruebas la corriente debe fluir por lo menos durante 0.2 seg., aunque pueden ser adecuados tiempos más cortos para las pruebas con el fin de medir la corriente prevista y ajustar el circuito.

Las pruebas deben efectuarse para demostrar el cumplimiento con una de las clases de alivio de presión dadas en la tabla C.

De tal manera, a continuación, se establecen dos procedimientos alternativos, para llevar a cabo la prueba de alivio de presión a alta corriente.

#### 5.8.1.1. Pruebas de alta corriente a 77% de la tensión nominal.

La corriente prevista debe medirse haciendo una prueba conectando en paralelo con el apartarrayos un conductor de impedancia despreciable. Los parámetros del circuito y la regulación de tiempo del interruptor de cierre, deben ser tales que el valor rmc de la componente alterna de la corriente sea igual o exceda el valor apropiado para la cla

se de alivio de presión dada en la tabla C y que el valor de cresta de la corriente en la primera onda principal, sea al menos 2.5 veces el valor rmc de la componente alterna de la corriente. El conductor debe entonces desconectarse y el apartarrayos en prueba debe probarse utilizando los mismos parámetros del circuito y la misma regulación de tiempo.

La resistencia del arco restringido en el interior -- del apartarrayos, reduce la componente alterna y el valor de cresta de la corriente. Esto no invalida la prueba, dado que ésta se realiza por lo menos a la tensión de servicio normal y el efecto de la corriente de prueba es el mismo que el que se experimenta durante una falla en servicio. Si la corriente de falla es el valor rmc de la componente alterna de la corriente prevista, medida durante la prueba con el apartarrayos puenteado con un conductor de impedancia despreciable, entonces se considera que el apartarrayos ha pasado la prueba.

#### 5.8.1.2. Pruebas de alta corriente a menos del 77% de la tensión nominal.

Cuando se realizan pruebas con una tensión de prueba apreciablemente menor que el 77% de la tensión nominal del espécimen, la comparación del arco interno es desproporcionalmente alta, con respecto a la impedancia del circuito de prueba, por lo que el valor de cresta de la corriente y la componente de corriente alterna pueden ser significativamente menor que si la prueba fuera hecha al 77% de la tensión

nominal; por lo tanto, puede ser incorrecto acreditarle al apartarrayos el valor de la corriente prevista. Por esta razón, cuando se hacen pruebas a menos del 77% de la tensión nominal del apartarrayos, el valor de cresta de la primera onda principal de corriente a través del apartarrayos, debe ser por lo menos 1.7 veces y además el valor rmc de la componente de corriente alterna debe ser por lo menos igual al valor rmc de la corriente prevista, seleccionada en la tabla C, entrando con la clase de alivio de presión.

No es esencial hacer una prueba preliminar con un conductor de impedancia despreciable que puentee el apartarrayos, pero debe tomarse en cuenta al seleccionar los parámetros del circuito de prueba para el efecto de la resistencia del arco interno, la que varía con la longitud y restricción del arco dentro del apartarrayos y esto puede requerir aumento de la corriente prevista, particularmente -- cuando la tensión del circuito de prueba es apreciablemente más baja que el 77% de la tensión nominal del apartarrayos. A continuación se presenta la tabla C para las pruebas de presión con alta corriente.

TABLA C

REQUISITOS PARA PRUEBAS DE ALIVIO DE PRESION CON ALTA  
CORRIENTE

---

Clases de Tensión nominal alivio de del apartarra- presión. yos, kV.	Corriente nominal de descarga del apartarrayos	Mínima corrien- te de falla si- métrica previs- ta, Amp. (rmc)
A            3 a 15	10 000 Amp. clase estación	65 000
B            20 a 192	10 000 Amp. clase estación	40 000
C            240 a 294	10 000 Amp. clase estación	25 000
D            ---	5 000 Amp. clase línea	16 000
E            ---	5 000 Amp. clase distribu- ción.	5 000

---

5.8.2. Pruebas de alivio de presión con baja corriente.

Esta prueba debe demostrar concordancia en todos los valores nominales dentro de un mismo diseño; el apartarra-  
yos bajo prueba puede ser de cualquier valor nominal del di-  
seño en consideración. Con una tensión de prueba igual a -  
77% ( -0, + 30%) del valor nominal del espécimen, los pará-

metros del circuito deben ser ajustados para que circule -- una corriente a través del espécimen de 600 Amp. rmc - - -- (  $\pm$  10%) medida aproximadamente a 1/10 de segundo después -- del inicio de la corriente, ésta debe fluir hasta que el -- alivio ocurra y el decremento de corriente ocurra durante -- la prueba no debe exceder 10% de la medida inicialmente.

En caso que un apartarrayos falle en el alivio de pre sión durante la prueba, deben tomarse precauciones al acercarse al apartarrayos para eliminar la presión interna, la cual puede ser muy alta incluso con el apartarrayos frío.

#### 5.9. Prueba del dispositivo de desconexión del apartarra-- yos.

Estas pruebas deben realizarse en apartarrayos que -- tengan desconectores o al ensamble del desconector en -- caso que su diseño sea tal que no se afecte por el calenta-- miento de las partes adyacentes del apartarrayos en su posi-- ción de instalación normal.

Cuando se trate de un desconector separado del apar-- tarrayos, el espécimen debe ser montado de acuerdo con las recomendaciones dadas por el fabricante, empleando para -- ello una terminal de conexión con el máximo tamaño y rigi-- dez así como una longitud más corta, de acuerdo a las reco-- mendaciones establecidas por el fabricante. En caso de no haber recomendaciones por el fabricante, el conductor debe ser de cobre duro y desnudo, aproximadamente de 5 mm. de -- diámetro (4 AWG) y 30 cm. de longitud, colocado en forma --

tal que permita libertad de movimiento al desconectador, -- cuando éste opere.

El desconectador debe soportar sin operar, cada una - de las 3 siguientes pruebas, repitiendo cada prueba 3 veces con un nuevo espécimen cada vez:

a) Prueba de alta corriente al impulso.

Esta prueba debe realizarse de acuerdo con 5.6 y --- 5.6.1, con la cresta de corriente correspondiendo a la clasificación más alta del apartarrayos, con el cual el desconectador es diseñado para usarse.

b) Prueba de baja corriente al impulso, larga dura- - ción.

Esta prueba debe ser hecha de acuerdo con 5.6 y - --- 5.6.2, con la cresta de corriente y la duración especificada en 5.6.

c) Prueba de operación.

Esta prueba debe ser hecha de acuerdo a 5.7, con el - desconectador en serie con el apartarrayos a una sección de prueba de diseño del apartarrayos, que tenga la más alta co rriente remanente de todos los apartarrayos, para los cua- - les es posible usar dicho desconectador.

Debe existir una clara evidencia de desconexión efec- tiva y permanente hecha por el desconectador. Si existiera cualquier duda al respecto, debe aplicarse una tensión a -- frecuencia de línea de 1.2 veces la tensión nominal del - - apartarrayos de mayor tensión, para el cual el desconecta--

dor es diseñado, esta debe aplicarse por un minuto sin que fluya una corriente que exceda a 1 mA. rmc.

#### 5.10 Prueba de tensión de ionización interna y tensión de radio-interferencia.

El espécimen que se utiliza en esta prueba, debe estar seco y aproximadamente a la temperatura ambiente. Cuando el apartarrayos consiste de una sola unidad, las pruebas deben hacerse sobre el apartarrayos completo en sus condiciones de operación, sin embargo, cuando el apartarrayos -- consiste de una serie de unidades que formen eléctricamente un apartarrayos completo. En efecto, las pruebas deben hacerse sobre solamente un número suficiente de capacidades, para establecer las tensiones de radio-interferencia o de ionización interna sobre la gama de capacidades nominales de apartarrayos.

Para pruebas de tensión de ionización interna, se permite un blindaje adicional de las partes externas, sin que el propio gradiente de tensión de ionización interna se -- afecte por el blindaje externo. Cuando no se usa tal blindaje, pueden combinarse las pruebas de tensión de radio-interferencia e ionización interna.

La tensión de radio-interferencia y la tensión de ionización interna, deben medirse a una frecuencia de 1 MHz. o tan cercana a esa frecuencia como sea posible.

Antes de llevar a cabo las pruebas, debe determinarse la tensión de ionización del ambiente en forma idéntica a -

la usada para la determinación de la tensión de ionización interna y de radio-interferencia, pero aplicando la tensión de prueba especificada a la frecuencia del sistema, sin el apartarrayos conectado.

En los casos donde se encuentra que la tensión de ionización interna o de radio-interferencia disminuye después de que se ha aplicado la tensión de prueba a frecuencia de línea por un mínimo de 10 segundos, el apartarrayos debe --preexcitarse por un período que no pase de 5 minutos.

Para determinar la tensión de radio-interferencia o ionización interna, se aplica a las terminales del apartarrayos una tensión de prueba igual a 1.05 veces la tensión máxima de operación de fase a tierra. Los valores de prueba se establecen en la tabla D.

#### 5.11. Pruebas en seco y en húmedo.

Las pruebas en seco y en húmedo, deben realizarse a tres especímenes completos de apartarrayos de cada tensión nominal por probar. Para las pruebas en seco, el objeto de prueba debe someterse antes de la prueba, al proceso de acondicionamiento al que se vea sujeto, tales como tratamiento en vacío, tratamiento térmico, etc., y debe ser probado a la temperatura prescrita; sino existe otra indicación, la temperatura debe ser la ambiente y el objeto debe estar limpio y seco.

Para la prueba en húmedo, el procedimiento es más elaborado y por lo tanto, más complicado que el anterior, ya -

T A B L A D

Tensión nominal kV	Tensión de prueba kV	Tensión máxima de radio-interferencia microvolts	Tensión máxima de ionización interna microvolts
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4
0.175	0.16	250	50
0.650	0.39	250	50
3	2.89	250	50
5	5.77	250	50
9	8.32	250	50
10	8.32	250	50
12	8.79	250	50
15	9.41	250	50
18	15.7	650*	50
21	15.7	650*	50
24	18.8	650	50
27	23.0	250*	50
30	23.0	650*	50
36	29.3	1250	150
39	29.3	1250	150
51	29.3	1250	150
50	44.0	1250	150
72	44.0	1250	150
90	83.0	2500	250
96	73.4	2500	250
108	88.0	2500	250
120	88.0	2500	250
144	102.2	2500	250
168	102.5	2500	300
180	147.0	2500	300
192	147.0	2500	300
240	183.0	2500	300
258	220.0	2500	300
276	220.0	2500	300
294	220.0	2500	300

apartarrayos clase distribución para tensiones nominales de 18,21, 27 y 30kV, la tensión máxima de radio-interferencia debe ser de 250 microvolts

que en éste, se obtienen resultados reproducibles en diferentes laboratorios, por lo que, generalmente, con estas pruebas no se pretende reproducir las condiciones reales de operación, sino exponer un criterio basado sobre la experiencia acumulada en estos menesteres, lo que permite inferir una operación satisfactoria durante el servicio.

El procedimiento de prueba que se sigue en húmedo es el siguiente: la muestra debe someterse a un riego de agua con la resistividad especificada, empleando una o varias boquillas. El riego consiste de pequeñas gotas debe caer sobre la muestra con un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  con la vertical, determinado por observación visual o bien mediante mediciones de las componentes horizontal y vertical de la precipitación.

La componente vertical del riego debe ser medida con una vasija colectora que tenga una abertura horizontal de 100 a  $750 \text{ cm}^2$  de área; cuando se requieran las dos componentes, la horizontal debe medirse con una vasija colectora que tenga una abertura vertical de área igual a la anterior y que esté dirigida hacia las boquillas.

Para muestras de altura mayor a 50 cm. se deben hacer medidas de precipitación cercana a los extremos y en medio, los valores obtenidos para cualquier posición no deben inferir en más de 25% del promedio de las tres posiciones y éste no variar en  $\pm 10\%$  del régimen indicado, para muestras de 50 cm. de altura o menores, las mediciones se deben ha--

cer solamente cercanas a la mitad.

La muestra debe ser rociada cuando menos durante un minuto antes de la aplicación de la tensión. Si la muestra es rociada con agua de la resistividad y temperatura prescrita antes de la aplicación de la tensión, se pueden obtener resultados más consistentes. Las características del riego están especificadas a continuación:

CARACTERISTICAS	PRACTICA	
	EUROPA	E.U.A.
Régimen de precipitación mm/min.	3 ± 10%	5 ± 10%
Componente vertical.		
Resistividad del agua ohm-cm.	10 000 ± 10%	17 800 ± 10%
Temperatura del agua	Temperatura ambiente ± 15°C	Temperatura ambiente ± 15°C
Duración de la prueba de tensión aguantable en húmedo.	1 minuto	10 segundos

A continuación se presentan las condiciones atmosféricas normalizadas:

Temperatura ambiente (to)	---	25°C
Presión atmosférica (bo)	---	760 mm. de Hg.
Húmedad (ho)	---	15 g/m <sup>3</sup> (esto es -- equivalente a una -- presión parcial de 15.4 mm de Hg. a 25°C)

CAPITULO V  
SELECCION DE APARTARRAYOS

1. Generalidades.

La selección de un apartarrayos para la protección -- contra sobretensiones de origen atmosférico y por maniobra de interruptores, debe estar de acuerdo con el criterio de protección establecido para un sistema en función del criterio de coordinación de aislamiento adoptado, por lo que se debe verificar que un determinado tipo de apartarrayos cumpla con los requerimientos de la línea, transformador, aisladores, etc., en los sistemas de distribución.

La gran mayoría de los apartarrayos que se utilizan - en México, no se fabrican aquí, razón por la cual especificaciones, instructivos, manuales de operación, pruebas, etc. vengan en un idioma diferente al español y algunas de ellas se certifiquen ante algún notario.

Las características importantes para la selección de un apartarrayos son las siguientes:

- Determinar la máxima magnitud del voltaje de línea a tierra al que va estar sujeto el apartarrayos.
- Conocer el voltaje de operación del apartarrayos.
- Considerar el coeficiente de aterrizamiento del sistema.
- Determinar el coeficiente de selección del apartarrayos.

## 2. Voltaje de línea a tierra.

Como los apartarrayos se instalan de línea a tierra, se requiere conocer la máxima magnitud del voltaje de línea a tierra al que será sometido, para saber el voltaje nominal adecuado del apartarrayos y evitar que falle o no proteja al equipo.

Los apartarrayos están diseñados para soportar sobretensiones y descargar corrientes de miles de Amperes sin sufrir daño durante tiempos muy cortos. Por esta razón la potencia que puede disipar un apartarrayos es limitada. Por otra parte, si se somete al apartarrayos a una sobretensión de menor magnitud, pero a la frecuencia nominal del sistema, es decir, a 60 Hz. se puede decir que de una manera fácil, se puede sobrepasar su capacidad térmica y el apartarrayos puede fallar. Por tal motivo, en la selección de apartarrayos, se considere más importante, el valor máximo de la tensión de línea a tierra a la frecuencia nominal del sistema que la magnitud del voltaje de un rayo que puede ocasionar las sobretensiones.

La magnitud del voltaje de línea a tierra en fases no falladas o sanas, depende del tipo de sistema en cuanto al voltaje nominal, el coeficiente de aterrizamiento y además es función de las impedancias características del sistema de éste y de otros factores.

Para determinar la magnitud de este voltaje, pueden emplearse tres métodos:

- a) El cálculo directo.
- b) El cálculo a través de una computadora.
- c) Multiplicando el valor de la tensión entre fases - por el coeficiente de aterrizamiento.

Los dos primeros deben utilizarse cuando se tenga duda sobre el coeficiente de aterrizamiento del sistema y puede calcularse con la constante del sistema, el tipo de falla y la resistencia de la falla.

La magnitud del voltaje en las fases no falladas o sa nas del sistema depende de cómo está la conexión del mismo en cuanto al aterrizamiento del neutro se refiere. Según el grado de conexión a tierra, los sistemas se clasifican en la siguiente forma:

a) Sistema con neutros múltiples.- Es el sistema de distribución con estrella a tierra en el cual el neutro, es ta sólidamente a tierra en cada transformador de distribución. Se le conoce también como: multi-aterrizado.

b) Sistema con neutro sólidamente a tierra.- Este -- sistema difiere del anterior en que el neutro está conectado sólidamente a tierra únicamente en las subestaciones. Se le conoce también con el nombre de: sólidamente aterrizado.

c) Sistema con neutro a través de una impedancia.- En este sistema el neutro en las subestaciones está conectado a tierra a través de una resistencia o una reactancia para limitar las corrientes de falla de fase a neutro. Los sistemas que llevan neutralizadores de falla se incluyen en es

ta categoría. Se les designa, también, como: aterrizado -- con reactores.

d) Sistema con neutro aislado.- Este sistema no está conectado a tierra, o lo que es lo mismo, sistema no aterrizado.

Por medio de componentes simétricos, se han determinado las tensiones máximas de fase a fase que ocasionan una sobretensión de fase a tierra dentro de las capacidades de tensión de los apartarrayos.

La tensión nominal del apartarrayos se obtiene como:

$$V_n = K_e V_{\max}.$$

Donde:

$V_{\max}$  = Tensión máxima del sistema entre fases (referente al equipo).

$K_e$  = Factor de conexión a tierra.

$V_n$  = Tensión nominal del apartarrayos.

El factor  $K_e$  se refiere a la forma en cuanto está conectado el sistema a tierra, considerando la falla de línea a tierra como la que produce la sobretensión en las fases no falladas. De acuerdo con esto la relación de reactancias de secuencia cero a secuencia positiva ( $X_0/X_1$ ) y la relación  $R_0/X_1$ .

El máximo sobrevoltaje por condiciones de fallas se obtiene para la falla de línea a tierra considerando el efecto del aterrizamiento. De acuerdo con las normas ASA las relaciones de  $X_0/X_1$  y  $R_0/X_1$  dan una clasificación de --

los sistemas de acuerdo a la forma en que se encuentren aterrizados sus neutros para la determinación de sus sobretensiones.

A continuación se presenta la siguiente tabla que incluye los datos necesarios para la adecuada selección de apartarrayos:

TIPO DE SISTEMA	$X_0/X_1$	$R_0/X_1$	COEFICIENTE DE ATERRIZAMIENTO.	COEFICIENTE DE SELECCIÓN DE APARTARRAYOS.
Multi-aterrizado	0 a 1	0 a 0.5	0.75	72%
Sólidamente aterrizado	0 a 3	0 a 1	0.80	81%
Aterrizado con reactores	3 a $\infty$	1 a $\infty$	1.00	100%
No aterrizado	-40 a $-\infty$	--	1.10	110%
No aterrizado	0 a -40	--	--	--

### 3. Voltaje de operación.

En los sistemas de distribución, los voltajes normales de operación no exceden de un 10 a un 15%, sin embargo, durante una falla, los voltajes de línea a tierra pueden alcanzar el valor de voltaje de línea a línea o a veces mayores. Si durante una falla a tierra el apartarrayos de una fase no fallada o sana, alcanzará el valor de su tensión de operación dentro de su rango de frecuencia tendrá que inte-

rrumpir una corriente, ésto originaría, un alto voltaje normal. Aunado a la falla a tierra, prevalece otra condición que hace que aumente el voltaje de línea a tierra, es el -- cambio de derivación en los transformadores debido a que en los sistemas de distribución surge el problema de una mala regulación y con ésto se logra contrarrestar, a la vez que se aumenta el voltaje entre fases para compensar la caída - de voltaje en el circuito.

Por estas razones, el voltaje de operación del apartarrayos debe ser seleccionado de tal manera que la magnitud de la sobretensión producida por la falla, sea igual o menor a la tensión de operación del apartarrayos.

#### 4. Coeficientes de aterrizamiento y de selección.

El coeficiente de aterrizamiento es el cociente de la magnitud del voltaje de línea a tierra durante una falla de línea a tierra entre el voltaje entre fases sin falla.

El coeficiente de selección de apartarrayos es el cociente del voltaje nominal del apartarrayos entre el voltaje entre fases del sistema y se expresa como porcentaje.

La condición que prevalece y que hace que se tenga -- una mayor estabilidad del neutro durante las fallas, es donde existen un mayor número de bajas resistencias en el neutro y ésto acontece en los sistemas urbanos de distribución. Por el contrario, en los sistemas rurales, donde existen un menor número de cargas resistivas, hay mayor desplazamiento del neutro durante las fallas y sus factores de selección -

de apartarrayos son mayores.

#### 5. Método de selección.

A continuación se indican los cinco pasos que se siguen para la selección de los apartarrayos:

a) Determinar el valor de la tensión máxima que existe entre la línea y tierra durante una falla monofásica, -- por medio de lo expuesto en 2.

b) Determinado el valor al que se hace mención en el inciso anterior, se calcula el 105% de dicho valor. Este porcentaje fue determinado de una manera empírica y el objetivo de ésto, es darle a la selección del voltaje un factor de seguridad que lo haga confiable.

c) Tener en cuenta el tipo de operación y características del apartarrayos, tales como la tensión máxima de línea a tierra, que se considera como el voltaje de chispeo y así mismo, la corriente de descarga máxima que circulará -- por el apartarrayos. En los sistemas de distribución, el apartarrayos maneja aproximadamente una corriente de 20 000 Amperes.

d) Considerar la coordinación de aislamiento, es decir, coordinar las características del equipo o sistema al cual se va a proteger de acuerdo a las características de resistencia al impulso.

Ya que la función del apartarrayos es la de proteger el equipo contra las sobretensiones que suceden en los sistemas de distribución de energía eléctrica, los apartarra--

yos deben poseer un voltaje de descarga menor que el voltaje crítico del aislamiento.

El grado de seguridad con que el equipo es protegido por los dispositivos de protección, se conoce con el nombre de margen de protección y se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$MP = \frac{BIL - Vd}{BIL} \times 100$$

Donde:

MP = Margen de protección.

BIL = Nivel básico de aislamiento.

Vd = Voltaje de descarga.

En la gráfica V, se aprecian los márgenes de protección recomendados contra las descargas atmosféricas y operación de interruptores (switches), es decir, contra las sobretensiones de origen externo e interno respectivamente, - los cuales son el 20% contra sobretensiones de origen externo y del 15% contra sobretensiones de origen interno. Este margen de protección tiene tres objetivos a seguir que son los siguientes:

- Protege de errores en la estimación de la máxima corriente de descarga.

- Protege de la separación de los apartarrayos del equipo por proteger.

- Protege la reducción del nivel básico de aislamiento (BIL) por envejecimiento del equipo.

Durante la descarga atmosférica, las terminales del equipo representan una alta impedancia al paso de la corriente de descarga. Esto ocasiona una caída de tensión del orden de varios kV. en el equipo lo que ofrece un esfuerzo adicional por parte del apartarrayos lo que ocasiona que fallen.

De la misma manera, al ir envejeciendo el equipo, se reduce la resistencia al impulso, provocando que el equipo se haga menos resistente a las sobretensiones de cualquier tipo, por lo cual estos puntos son protegidos con un margen del 20%.

e) Realizar una supervisión de que el equipo ha quedado correctamente protegido, para lo cual deben hacerse las comparaciones siguientes:

- La tensión máxima de chispeo del apartarrayos más el 20% del margen de protección, debe ser igual o menor que la resistencia a la tensión de onda cortada del equipo. Es decir:

$$1.2 T_{ch} \leq 1.15 BIL$$

Donde:

$T_{ch}$  = Tensión de chispeo.

BIL = Nivel básico de aislamiento.

- La tensión máxima de descarga del apartarrayos más el 20% del margen de protección, deberá ser menor o igual al nivel básico de aislamiento.

$$1.2 V_d \leq BIL$$

- En caso de que no se satisfagan los incisos anteriores, es decir, que no cumplan con lo requerido, es necesario realizar una nueva evaluación, ya que no se logró una buena coordinación de aislamiento.

A continuación se presentan dos tablas que pueden ayudar a seleccionar los apartarrayos:

VOLTAJES NOMINALES DE APARTARRAYOS PARA CIRCUITOS DE DISTRIBUCION DE 3 HILOS.

Voltaje Nominal Sistema	Voltaje Máximo	Factor Selección Apartarrayos	Voltaje Teórico Apartarrayos	Voltaje Recomendado.	No Aterrizado.
6.9	7.26	80%	5.8	6	9
13.8	14.5	80%	11.6	12	15
23.0	24.3	80%	19.5	21	27
34.5	36.5	80%	29.2	30	37

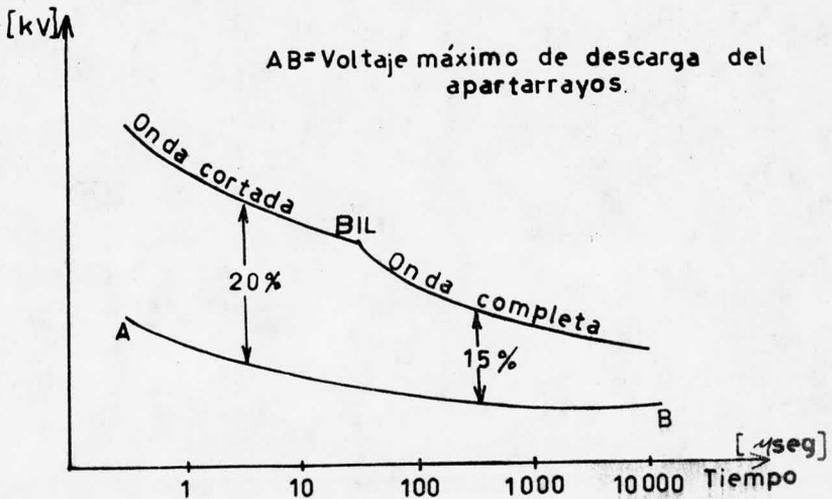
Los valores de los voltajes a que se hace mención en esta tabla esta referido a kV.

VOLTAJES NOMINALES DE APARTARRAYOS MULTI-ATERRIZADOS  
DE 4 HILOS

Voltaje Nominal Sistema	Voltaje Máximo	Factor Seleccion - Apartarrayos	Voltaje Teorico Apartarrayos	Voltaje Recomendado Apartarrayos
13.2/ 7.62	14 / 8.1	70%	9.8	10
13.8/ 7.97	14.5/ 8.4	70%	10.1	10
20.8/12	22 /12.7	72%	15.9	18
22.9/13.2	24.2/14	72%	17.4	18
24.9/14.4	25 /14.5	72%	18.0	18
24.9/14.4	26.4/15.2	72%	19.0	21
34.5/19.9	36.5/21.1	72%	26.3	27

Los valores de los voltajes a que se hace mención en esta tabla esta referido a kV.

Voltaje



Gráfica V-Tiempo - Márgenes de protección recomendados contra las sobretensiones externas e internas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La estructura de los sistemas de distribución de energía eléctrica se basa en dos modalidades: la aérea y subterránea.

En estos sistemas tienen una destacada importancia el diseño, la planeación, construcción y operación, por lo que se requiere tener un alto grado de confiabilidad, continuidad, calidad y eficiencia en la producción, transportación y distribución de la energía eléctrica que demandan los usuarios, bajo estos criterios se establecen los esquemas de protección y el costo que de los mismos se hace.

En la elección de la protección que debe llevar un sistema eléctrico de potencia existen diversos factores que intervienen para que en un momento dado se fije el criterio a seguir y que en particular para los sistemas de distribución de energía eléctrica, se mencionan los siguientes:

- Tensiones de operación de los sistemas aéreos y subterráneos en sus redes primarias y secundarias.
- Magnitud, grado de importancia y características de la carga.
- Tipos de fallas a las cuales están expuestos estos sistemas.
- Dispositivos de protección empleados.
- Selección de las alternativas en función de la confiabilidad deseada.

Dependiendo de la naturaleza de las sobretensiones, -

éstas se clasifican en: externas e internas.

Es importante la consideración de las descargas atmosféricas tanto en el diseño como en la protección de los sistemas de distribución, ya que la República Mexicana posee niveles cerámicos altos en la mayor parte de su territorio.

Para los sistemas de distribución, las sobretensiones más severas son las que originan las descargas atmosféricas, aunque las sobretensiones de origen interno en ocasiones son más graves.

Una conclusión importante sobre el comportamiento de las ondas viajeras, es que cuando ocurre una descarga directa en un conductor aéreo se generan ondas en el conductor a cada lado del punto de incidencia del rayo, estas ondas poseen dos componentes: voltaje y corriente y la magnitud del voltaje de las ondas viajeras es igual a la corriente multiplicada por la impedancia característica de la línea.

Estos transitorios viajan a lo largo de la línea aérea a una velocidad alrededor de 1 000 pies por microsegundo, es decir, a la velocidad de la luz.

Por otra parte, cuando el circuito termina en una impedancia muy grande, como la de un transformador, las ondas de voltaje se doblan en el punto de cambio de impedancia, después de que la onda viajó hasta el extremo del circuito y regresó. Esta condición es la que provoca que la protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución

subterráneo sea más crítica, pues se debe evitar que el doble del voltaje incidente dañe el aislamiento del equipo.

Luego entonces, las características distintivas del impacto de un rayo es una onda de voltaje extremadamente es carpado -lo cual significa que su voltaje crece a la velocidad de millones de Volts por microsegundo- y su corta duración, pero en general es la intensidad de corriente el componente del rayo que determina su fuerza destructiva.

A causa de la naturaleza no pronosticable del fenómeno de las descargas atmosféricas, los análisis de Ingeniería se basan en datos estadísticos, y es posible asegurar una razonable continuidad del servicio correlacionando cuidadosamente las investigaciones científicas, los registros que se consigan sobre el estado del tiempo y el equipo protector más adecuado contra los impulsos de los rayos.

Existen diversas alternativas para solucionar el problema de las sobretensiones que se presentan en los sistemas de distribución.

Haciendo mención de las sobretensiones de origen externo e interno existen elementos que permiten disminuir los efectos destructivos de las sobretensiones. Esta solución es la protección por medio de apartarrayos e hilos de guarda.

El apartarrayos, es un dispositivo diseñado para proteger equipo eléctrico contra sobretensiones transitorias elevadas y limitar la duración y frecuentemente la amplitud

de la corriente remanente.

Sus características principales son:

- Es autoextinguible, con capacidad inherente para interromper la trayectoria de la descarga.
- Opera el tiempo suficiente y con un voltaje bastante bajo para evitar los perjuicios que la sobreten-sión transitoria ocasionaría en el aislamiento del equipo eléctrico.
- Ofrece márgenes protectivos predecibles para las -- formas comunes de las ondas de voltaje que suelen -- llegar.

Las principales características protectivas de los -- apartarrayos, son su tensión de chispeo (Tch) y su voltaje de descarga (Vd).

La tensión de chispeo es una característica que depende de la razón de incremento del voltaje de la descarga.

El voltaje de descarga, en cambio, depende de la magnitud y forma de onda de la corriente. Es por eso que el - voltaje de descarga se le designa IR representando la caída de voltaje a través de su elemento valvular dependiendo de la magnitud de la corriente de descarga.

El voltaje de descarga aumenta cuando la onda de co-- rriente tiene un frente de onda reducido, es decir, cuando la onda de corriente presenta una alta razón de incremento.

Las fallas de los apartarrayos en los sistemas de distribución se deben primordialmente a la inclusión de la hu-

medad a través de los sellos defectuosos debido a los daños causados durante la instalación, sobretensiones sostenidas y una deficiente coordinación con los fusibles.

Debido a que los apartarrayos están diseñados para manejar altas corrientes en tiempos muy cortos, al soportar una corriente de falla a 60 Hz. su capacidad térmica es sobrepasada y el apartarrayos es dañado o incluso destruido.

El desarrollo, prueba y correlación del aislamiento de los dispositivos protectivos contra los rayos, se han visto facilitados con la adopción de una onda normalizada de voltaje de  $1.2 \times 50$  microsegundos, tomada como representativa de los impulsos transitorios. En la onda de  $1.2 \times 50$  microsegundos, la cresta se alcanza en 1.2 microsegundos y decae a la mitad de dicho valor en 50 microsegundos.

Los apartarrayos de la clase de distribución soportan dos clases de descarga muy diferentes entre sí.

La descarga de alta corriente al impulso, corta duración es la más parecida al esfuerzo que exigen las descargas atmosféricas en las ocasiones en que éstas son de corrientes extremadamente intensas. Las pruebas de diseño se realizan a 65 000 Amperes, empleando una onda de  $(4 \text{ a } 8) \times (10 \text{ a } 20)$  microsegundos, lo cual significa que el valor de cresta de la intensidad se alcanza en 4 - 8 microsegundos y la mitad de su valor en 10 - 20 microsegundos.

La segunda clase de descarga que soportan los apartarrayos es la de baja corriente, larga duración y ésta va --

asociada a transitorios generados dentro del propio sistema y, para este caso, las normas de diseño especifican que las pruebas se realicen con ondas rectangulares de una intensidad mínima de 75 Amperes x 1 000 microsegundos.

La coordinación de aislamiento es la comparación que se hace entre las propiedades autoprotectivas (BIL) del equipo, es decir, resistencia al impulso a diferentes tipos de onda, ya sea completa, cortada o un frente de onda con las características de protección propias de los apartarrayos, conservando siempre un margen de separación entre ellas a esto se le conoce como margen de protección (MP).

La magnitud de voltaje que se alcanza de fase a neutro en las fases no falladas durante una falla monofásica a tierra es importante, ya que este valor es el que nos define el voltaje nominal del apartarrayos que debemos elegir para la protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución.

Se recomienda tener presentes los siguientes conceptos para la selección adecuada de los apartarrayos en los sistemas de distribución de energía eléctrica:

- Tensiones a frecuencia nominal que se aplican a través de las terminales durante la operación.
- Sobretensiones debidas a rayos u operaciones de maniobra que aparecen en los apartarrayos.
- Especificaciones del apartarrayos.
- Clase de apartarrayos.

- Tensiones de chispeo y descarga (características de protección).
- Localización de los apartarrayos con respecto al aislamiento del sistema a proteger.
- Características disruptivas del aislamiento del equipo a proteger.
- Cociente de la rigidez dieléctrica entre los niveles de protección del apartarrayos (coordinación de aislamiento).

También es conveniente que el fabricante proporcione certificados de prueba que garanticen los valores de las características eléctricas de los apartarrayos, por ejemplo, para la especificación 1.0043 de la Compañía de Luz se tiene:

- Tensión de chispeo interna con frente de onda.
- Tensión de chispeo interna con onda completa de 1.2 x 50 microsegundos.
- Tensión de chispeo a frecuencia normal 36 kV.
- Prueba de descarga de corriente corta duración.
- Prueba de descarga de corriente larga duración.
- Prueba de ciclo de trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- Sistemas de distribución de energía eléctrica. Cfa., de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación). Depto. de Relaciones Industriales. 1973.
- Castillo Alcalá, Jorge. Mantenimiento preventivo a las redes de distribución subterránea en el sistema central de la Cd. de México. Cfa. de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación). Depto. de Cables Subterráneos. 1980.
- Zoppetti Júdez, Gaudencio. Estaciones transformadoras y de distribución. Ediciones G. Gili, S.A. 1981.
- Enriquez Harper, Gilberto. Fundamentos de protección de sistemas eléctricos por relevadores. Editorial Limusa. 1981.
- Enriquez Harper, Gilberto. Técnica de las altas tensiones. Estudio de sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos y coordinación de aislamiento. Editorial Limusa. Volúmen II. 1978.
- Tensiones de sistemas de distribución, subtransmisión y transmisión. Comisión Federal de Electricidad. Especificación L0000-02.
- Pararrayos D 23. Cfa. de Luz y Fuerza del Centro, S.A. (en liquidación). Depto. de Normas. Especificación -- 1.0043.
- How does a distribution class surge arrester work? Ohio Brass, Hi-Tension News. 1981.

- Apartarrayos valvulares para sistemas de corriente alterna. Norma DGN (NOM) J-321-1978.
- Técnicas de prueba en alta tensión. Norma DGN (NOM) - - J-271-1980.
- Selección de apartarrayos. Instituto de Investigaciones Eléctricas. D-101.