

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
INTERRUPTORES DE POTENCIA EN LA  
SUBESTACIÓN BARBACOA I”**

**REALIZADO POR:**

Br. Wilmer D. Romero B.

C.I. 15678352

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA

BARCELONA, 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
INTERRUPTORES DE POTENCIA EN LA  
SUBESTACIÓN BARBACOA I”**

PASANTÍA DE GRADO APROBADA POR EL DEPARTAMENTO  
DE ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE

**JURADO CALIFICADOR**

Prof. Melquiades Bermúdez  
Asesor Académico

Prof. Luís Suárez  
Jurado

Prof. Santiago Escalante  
Jurado

BARCELONA, 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE  
INTERRUPTORES DE POTENCIA EN LA  
SUBESTACIÓN BARBACOA I”**

**ASESORES**

<b>ASESOR ACADÉMICO</b>	<b>ASESOR INDUSTRIAL</b>
PROF. MELQUIADES BERMÚDEZ	ING. ELBIS REQUENA

BARCELONA, 2009

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo con el artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado. “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso, porque es todo y por darme la vida, inteligencia, familia, fuerza y principios para cumplir con esta meta.

A mi madre, Inés María Bravo Rivero, lo más grande que me ha dado la vida.

A mi padre, Jesús Andrés Romero Bello, por darme su apoyo.

A todos mis amigos y compañeros de estudios, gracias por su apoyo y amistad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer:

A nuestro Dios Todopoderoso por haberme permitido la vida y las capacidades necesarias para obtener este sueño anhelado.

A mis padres, familiares y amigos, por motivarme diariamente a culminar mis estudios.

A mi Asesor Académico, Ing. Melquiades Bermúdez, por toda la orientación, amistad y ayuda que me prestó.

A la empresa CADAFE por brindarme la oportunidad de realizar mis pasantías en sus instalaciones.

A todo el personal de la Subestación Barbacoa I que colaboraron conmigo, en especial: Ing. Elbis Requena, Ing. Carlos Rausseo, T.S.U. Simón Luna y al Ing. Carlos Romero quienes estuvieron siempre a la orden.

A la licenciada Carmencita quien estuvo siempre pendiente de mí y desde un principio se puso a la orden.

A todos los que no recuerdo ahora, pero que de una manera u otra estuvieron pendientes de mí. A todos muchas gracias.

Wilmer Romero

## TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
TABLA DE CONTENIDO.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIV
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>16</b>
<b>ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>16</b>
1.1 DESCRIPCIÓN BREVE DE LA EMPRESA.....	16
<i>1.1.1 Reseña histórica de la compañía.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2 Características de la empresa.....</i>	<i>21</i>
<i>1.1.3 Relación con otras empresas.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.4 Producto y mercado de la empresa.....</i>	<i>23</i>
1.2 DESPACHO DE CARGA ORIENTAL.....	24
<i>1.2.1 Actividades del despacho.....</i>	<i>24</i>
<i>1.2.2 Responsabilidad primordial.....</i>	<i>25</i>
<i>1.2.3 Niveles de autoridad.....</i>	<i>26</i>
<i>1.2.4 Ubicación Geográfica del Despacho de Carga Oriental.....</i>	<i>26</i>
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	27
1.4 OBJETIVO PRINCIPAL.....	28
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>29</b>

<b>INTERRUPTORES DE POTENCIA.....</b>	<b>29</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	29
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS .....	30
2.2.1 Tensión Nominal .....	30
2.2.2 Tensión de Diseño.....	30
2.2.3. Potencia de Ruptura.....	30
2.2.4 Tensión de Recuperación.....	31
2.2.5 Reignición y Reencendido.....	31
2.2.6 Capacidad de Cierre.....	31
2.2.7 Ciclo de Trabajo .....	31
2.2.8 Clasificación según el Proceso de Extinción.....	33
2.3 DEFINICIONES ASOCIADAS A LOS INTERRUPTORES DE ALTA TENSIÓN.....	33
2.4 FENÓMENOS PRESENTES EN EL DISPARO Y CIERRE DE LOS INTERRUPTORES.	
.....	38
2.5 TIPOS DE INTERRUPTORES .....	41
2.5.1 Interruptores de Vacío .....	41
2.5.2 Interruptores en Baño de Aceite .....	50
2.5.3 Interruptores de Pequeño Volumen de Aceite.....	64
2.5.4 Interruptores de Aire Comprimido .....	75
2.5.5 Interruptores de Soplado Magnético .....	84
2.5.6 Interruptores en Hexafluoruro de Azufre (SF <sub>6</sub> ).....	91
2.6 TIPOS DE FALLAS EN INTERRUPTORES.....	115
2.7 PRUEBAS QUE SE REALIZAN A LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA .....	123
2.8 EL ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO.....	127
2.8.1 Introducción.....	127
2.8.2 Conceptos Básicos del Estudio de Cortocircuito.....	128
2.8.3 Fuentes de Cortocircuito .....	130
2.8.4 Corrientes de Cortocircuito Simétricas y Asimétricas. ....	131

2.8.5 <i>El Cálculo del Cortocircuito</i> .....	133
2.8.6 <i>Tipos de Fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia</i> .....	134
2.8.7 <i>La Teoría de las Componentes Simétricas</i> .....	136
2.8.8 <i>La Teoría de las Fallas Trifásica y Monofásica</i> .....	140
2.8.9 <i>El Detalle de los Cálculos de Cortocircuito</i> .....	145
2.8.10 <i>Aplicación del Cálculo de Cortocircuito</i> .....	147
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>150</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS INTERRUPTORES EXISTENTES EN LA SUBESTACIÓN BARBACOA I</b> .....	<b>150</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	150
3.2 INTERRUPTORES INSTALADOS EN LA S/E BARBACOA I.....	151
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL INTERRUPTOR FX-12 (230 kV).....	153
3.3.1 <i>Características Generales</i> .....	153
3.3.2 <i>Vista General del Interruptor FX-12</i> .....	157
3.4 CARACTERÍSTICAS DEL INTERRUPTOR S1-145 (115 Kv).....	158
3.4.1 <i>Características Generales</i> .....	158
3.4.2 <i>Vista General del Interruptor S1 -145</i> .....	160
3.5 CARACTERÍSTICAS DEL INTERRUPTOR 3AH3 (34,5 Kv).....	161
3.5.1 <i>Características Generales</i> .....	161
3.5.2 <i>Vista General del Interruptor 3AH3</i> .....	162
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>164</b>
<b>CALCULO DEL NIVEL DE CORTOCIRCUITO</b> .....	<b>164</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	164
4.2 NIVELES DE CORTOCIRCUITO EN LAS BARRAS .....	164
4.3 PROCEDIMIENTO USADO PARA EL CÁLCULO .....	165
4.3.1 <i>Impedancias Externas de Secuencia Positiva y Negativa</i> .....	165
4.3.2 <i>Impedancias Externas de Secuencia Cero</i> .....	166

4.3.3 Impedancia del Transformador .....	166
4.3.4 Cálculo de Corriente de Cortocircuito Trifásica en las Barras .....	168
4.3.5 Cálculo de Corriente de Cortocircuito Monofásica en las Barras.....	168
4.4 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN LAS BARRAS .....	170
4.5 CÁLCULO DE PORCENTAJES DE RESERVA.....	171
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>173</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>173</b>
CONCLUSIONES .....	173
RECOMENDACIONES.....	175
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>180</b>
<b>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:</b>	<b>202</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema interconectado Nacional (SIN).....	21
Figura 2: Ubicación Geográfica del Despacho de Carga oriental .....	27
Figura 3: Magnitudes y parámetros característicos del proceso de conexión desconexión de un interruptor trifásico de aire comprimido.....	32
Figura 4: Tubo de maniobra de vacío.....	42
Figura 5: Punto de cátodo simple (corriente de arco menor de 100 Amp).....	43
Figura 6: Punto de cátodo doble (corriente de arco mayor de 100 Amp). .....	44
Figura 7: Contactos “espiral pétalo”.....	46
Figura 8: Contacto de pétalo con ranuras al lado del cilindro .....	47
Figura 9: Contacto de pétalo con ranuras en la extremidad y base .....	47
Figura 10: Representación muy simplificada de un interruptor en baño de aceite.....	51
Figura 11: Semicorte de un interruptor automático en baño de aceite. ....	52
Figura 12: Cámara de explosión de un interruptor AEG en baño de aceite para grandes potencias de ruptura. ....	55
Figura 13: Dispositivo tubulador de control del arco de un interruptor en baño de aceite.....	57
Figura 14: Representación esquemática del proceso de ruptura en un interruptor en baño de aceite: .....	59
Figura 15: Proceso de la ruptura de un arco en baño de aceite .....	60
Figura 16: Representación esquemática de un interruptor en baño de aceite para accionamiento longitudinal .....	63
Figura 17: Representación esquemática de un interruptor en baño de aceite para accionamiento transversal. ....	63
Figura 18: Corte esquemático de la cámara de ruptura de un interruptor Siemens. De pequeño volumen de aceite: .....	66
Figura 19: Curva de variación de la longitud del arco, en función de la corriente de ruptura. De un interruptor de pequeño volumen de aceite. ....	70

Figura 20: Cámara de ruptura de Soplado Longitudinal .....	72
Figura 21: Cámara de ruptura de soplado transversal. ....	72
Figura 22: Cámara de ruptura de un interruptor CEM-GARDY, de pequeño volumen de aceite, de soplado mixto .....	73
Figura 23: Proceso de extinción de un arco eléctrico por medio de un chorro de aire comprimido.....	77
Figura 24Cámara de ruptura de soplado axial:.....	79
Figura 25: Cámara de ruptura perfeccionada de soplado axial: .....	80
Figura 26: Cámara de ruptura de soplado transversal: .....	81
Figura 27: Dispositivo de ruptura múltiple serie:.....	82
Figura 28: Dispositivo de ruptura múltiple paralelo.....	83
Figura 29: Dispositivo de ruptura múltiple paralelo con condensadores .....	84
Figura 30: Principio del soplado magnético.....	85
Figura 31: Cámara de soplado del interruptor de soplado neumático ACEC, tipo DE- ION:.....	88
Figura 32: Cámara de soplado del interruptor de soplado magnético Merlin Gerin. Tipo SOLENARC. ....	90
Figura 33: Configuración Química del SF6 .....	93
Figura 34: Comparación dieléctrica del SF6 con la del aire en igualdad de condiciones. ....	96
Figura 35: Interruptor .....	110
Figura 36: Medida de la resistencia de contactos de un interruptor. ....	125
Figura 37: Pruebas de uniformidad al cierre y apertura. ....	125
Figura 38: Contribución de las distancias componentes a la corriente de cortocircuito .....	131
Figura 39: Corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas.....	132
Figura 40: Forma de oscilograma para una corriente de cortocircuito simétrica. ....	132
Figura 41: Representación de los vectores de secuencia.....	136
Figura 42: Diagrama unifilar (de un sistema elemental). ....	138

Figura 43: Red de secuencia positiva .....	139
Figura 44: Red de secuencia negativa .....	140
Figura 45: Red de secuencia cero. ....	140
Figura 46: Los tres conductores de un sistema trifásico.....	141
Figura 47: Falla trifásica.....	142
Figura 48: Circuito para la falla trifásica.....	143
Figura 49: Falla monofásica (Línea a Tierra).....	144
Figura 50: Conexión de las redes de secuencia para la falla línea a tierra (monofásica).....	144
Figura 51: Partes del Interruptor FX-12. ....	157
Figura 52: Partes del Interruptor S1-145.....	160
Figura 53: Placa de características. ....	162
Figura 54: Interruptor de potencia al vacío 3AH3.....	163
Figura 55: Circuito equivalente de falla trifásica .....	168
Figura 56: Circuito de secuencia positiva.....	169
Figura 57: Circuito de secuencia negativa.....	169
Figura 58: Circuito de secuencia cero .....	169
Figura 59: Circuito de falla monofásica .....	170

## INTRODUCCIÓN

La subestación Barbacoa I de CADAFE, se encuentra ubicada en la carretera nacional de Barcelona, en el kilómetro 27, poblado campesino de Barbacoa II.

Estas instalaciones fueron fundadas en el transcurso del año 1.963, con una capacidad instalada para la época de 100 MVA y con un crecimiento interanual de 6%.

Actualmente, esta subestación tiene una capacidad instalada superior a los 700 MVA y cuenta con un total de 38 Interruptores de Potencia, los cuales en su mayoría su puesta en servicio es nueva.

Los interruptores son los enlaces activos en la operación de despeje de fallas, pero incluso aunque parezcan estar en buenas condiciones pueden aparecer serios problemas. A lo largo de una vida de servicio de 20 – 40 años, los interruptores deben estar preparados para operar sin ningún fallo en cualquier instante. Como normalmente los interruptores deben entrar en acción tras permanecer mecánicamente en reposo durante largos períodos, es mucho lo que se exige a su funcionamiento.

Por otra parte, un interruptor de alta tensión se diseña para interrumpir una intensidad de cortocircuito específica, y esto requiere un funcionamiento a una velocidad dada para crear una corriente de aire, aceite o gas de refrigeración adecuada, según el tipo. Esta corriente refrigera el arco eléctrico lo suficiente para interrumpir la intensidad en el siguiente paso por cero de la intensidad. Es importante interrumpir la intensidad de forma que el arco no vuelva a aparecer antes de que el contacto del interruptor haya entrado en la llamada zona de amortiguación.

El margen de aplicación de los interruptores de potencia es hoy día más amplio, debido fundamentalmente a los elevados niveles de tensión y por ende los valores de corriente de cortocircuito de los sistemas.

Esta subestación recibía hasta el año 1.998 las líneas de Santa Teresa (I y II) y Tigre (I y II), frente al incremento de la carga en la zona norte del Estado Anzoátegui, la capacidad instalada se aumentó, incorporándose dos nuevos tramos provenientes de la Subestación Barbacoa II con un nivel de tensión de 400/230 KV. Debido a que los interruptores se diseñaron para aquella época y se cambió la topología agregándose nuevos elementos (con la incorporación de Barbacoa II), como líneas y transformadores en 230/115 KV, trayendo esto como consecuencia un impacto sobre la red vieja, considerándose teóricamente que el nivel de cortocircuito aumentó.

Frente a esta situación, se plantea realizar un análisis de la corriente de cortocircuito actual y hacer una comparación con respecto a la corriente de cortocircuito de los interruptores, esto nos permitiría observar si se cumplen los criterios porcentuales que deben existir para el normal funcionamiento de los interruptores de potencia y determinar si están en capacidad, cuando ocurre una falla, de interrumpir la intensidad de corriente original, de forma segura para evitar serios daños a los equipos.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

### 1.1 Descripción breve de la empresa.

#### 1.1.1 Reseña histórica de la compañía

A finales del siglo XIX se inicia en Venezuela el suministro de energía eléctrica en las ciudades de Caracas y Maracaibo. En 1888 se crea la empresa Energía Eléctrica de Venezuela, C.A. (ENELVEN) y en 1895 La Electricidad De Caracas (EDC).

En el año 1946 la electrificación en el país se realizaba mediante plantas de generación agrupadas en pequeñas compañías oficiales y privadas dispersas en el territorio nacional. Estas plantas operaban de forma aislada y servían básicamente a los mercados con mayor densidad de población, quedando el resto del país desprovisto del suministro eléctrico.

Las plantas oficiales eran administradas por los consejos municipales y los gobiernos estatales y el servicio se prestaba de forma discontinua.

La situación existente y la necesidad de electrificación motivaron la creación de la Corporación Venezolana de Fomento (CVF), estando entre sus objetivos principales el estudio de la electrificación integral del país.

La Corporación Venezolana de Fomento fue la encargada de iniciar la ejecución del primer plan nacional de electrificación con la colaboración de técnicos especialistas venezolanos y extranjeros. Según la necesidad de las zonas se fue agrupando estratégicamente 15 compañías anónimas independientes entre si, lo cual

dio origen a la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) en el año 1958.

En 1963 se crea EDELCA, quien tiene la responsabilidad de desarrollar el potencial eléctrico del río Caroní. Este mismo año se iniciaron los estudios para unificar la frecuencia del país a 60 Hz con el objetivo de interconectar los sistemas eléctricos de las empresas CADAFE, EDELCA y EDC.

El 23 de agosto de 1968 se firmó un primer contrato de interconexión entre las tres empresas anteriormente mencionadas dando origen a OPSIS, como una organización para la coordinación de la operación y apoyo a la planificación de los sistemas eléctricos del país. Con la finalidad de hacer extensivos los beneficios de la interconexión nacional, el 1° de diciembre de 1988 se firmó un nuevo contrato de interconexión incorporando a la empresa ENELVEN y asignándole a OPSIS nuevas responsabilidades en la coordinación de la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Al comienzo de la década de los noventa se inició una reorganización, centralización y regionalización con la finalidad de adecuarse a las nuevas necesidades nacionales para lograr una mayor eficiencia operativa y la prestación de un servicio óptimo. De este proceso surgieron cuatro empresas regionales de distribución y comercialización:

**CADELA:** Compañía Anónima Electricidad de los Andes, cuya área de influencia comprende los estados Mérida, Trujillo y Barinas, con una superficie geográfica de 69.048 km<sup>2</sup>. Atiende una demanda máxima de 650,20 MVA representada por 520.084 suscriptores, a través de 56 subestaciones.

**ELECENRO:** Compañía Anónima Electricidad del Centro, responsable de distribuir y comercializar la energía de los estados Miranda, Aragua, Guárico, Apure y Amazonas, los cuales tienen una superficie conjunta de 336.545 km<sup>2</sup>. La empresa atiende a unos 530.545 suscriptores que representan una demanda máxima de 1195 MVA.

**ELEOCCIDENTE:** Compañía Anónima Electricidad de Occidente, esta empresa atiende a los estados Carabobo, Falcón, Portuguesa, Cojedes y parte de Lara (hoy en día transferida a ENELBAR) y de Yaracuy, cubre un área geográfica de 66.550 km<sup>2</sup> y suministra energía a unos 498.186 suscriptores que representan una demanda máxima de 1343 MVA.

**ELEORIENTE:** Compañía Anónima Electricidad de Oriente, cuya área de cobertura geográfica comprende los estados Anzoátegui, Sucre y Bolívar, con una superficie de 293.100 km<sup>2</sup>. Posee 543.147 suscriptores y atiende una demanda máxima de 1331 MVA.

Este proceso se derivó del decreto 1558 publicado en gaceta oficial N°36085, de fecha 13-11-96, mediante el cual la presidencia de la república ordenó al Fondo de Inversiones de Venezuela (FIV) y CADAPE, elaborar y ejecutar en el lapso de un año el plan de reestructuración y privatización de la empresa. A partir de esa fecha la junta directiva de CADAPE aprobó una estrategia con un nuevo modelo organizativo que le incorporó a las empresas filiales la generación térmica aislada y la transmisión regional o sub-transmisión en 115 kV.

Dentro de esa estrategia se enmarcó la privatización del sistema eléctrico de Nueva Esparta (SENECA), el 15 de septiembre de 1998 y se programó la venta del Sistema Eléctrico de Monagas-Delta Amacuro (SEMDA).

El Sistema Eléctrico de Monagas-Delta Amacuro (**SEMDA**), cubre el área geográfica de 69.100 km<sup>2</sup> en los estados Monagas y Delta Amacuro, cuenta con unos 92.620 suscriptores lo que representa una demanda máxima de 300,27 MVA.

El sistema Eléctrico Nacional lo conforman 18 empresas públicas y privadas. Las empresas públicas son EDELCA, ENELVEN, ENELCO, ENELBAR y CADAFE con cinco empresas filiales (Eleoriente, Elecentro, Eleoccidente, CADELA y SEMDA). Las empresas privadas son ELEBOL, CALIFA, ELEVAL, SENECA y EDC con sus empresas filiales CALEV, ELEGGUA y CALEY.

Las empresas CADAFE, EDELCA, EDC y ENELVEN, signatarias del contrato de interconexión suplen el 95,4% de la energía eléctrica que se consume en el país. El porcentaje restante proviene del sector autoabastecido (PDVSA, productores independientes e industrias con generación propia).

En el marco de la reorganización del sector eléctrico nacional, y con la finalidad de mejorar la calidad del servicio en todo el país, maximizar la eficiencia en el uso de las fuentes primarias de producción de energía, la operación del sistema y redistribuir las cargas y funciones de las actuales operadoras del sector, el Ejecutivo Nacional, a través del Decreto-Ley N° 5.330, de fecha 2 de mayo de 2007, publicada en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38.736 del 31 de julio de 2007, ordena la creación de la sociedad anónima Corporación Eléctrica Nacional S.A.

CORPOELEC es una empresa operadora estatal adscrita al Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo, encargada de la realización de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de potencia y energía eléctrica.

Se encuentra conformada por las siguientes empresas de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica:

- Electrificación del Caroní, C.A. (EDELCA)
- Energía Eléctrica de Venezuela, S.A. (ENELVEN)
- Empresa Nacional de Generación C.A: (ENAGER)
- Compañía de Administración y Fomento Eléctrico S.A. (CADAFE)
- Energía Eléctrica de la Costa Oriental del Lago C.A: (ENELCO)
- Energía Eléctrica de Barquisimeto S.A. (ENELBAR)
- Sistema Eléctrico del Estado Nueva Esparta (SENECA)
- La Electricidad de Caracas (La EDC)

La organización territorial de la actividad de distribución de potencia y energía eléctrica está definida por las siguientes regiones operativas:

- Región Noroeste: estados Zulia, Falcón, Lara y Yaracuy
- Región Norcentral: estados Carabobo, Aragua, Miranda, Vargas y Distrito Capital
- Región Oriental: estados Anzoátegui, Monagas, Sucre, Nueva Esparta y Delta Amacuro
- Región Central: estados Guárico, Cojedes, Portuguesa, Barinas y Apure
- Región Andina: estados Mérida, Trujillo y Táchira
- Región Sur: estados Bolívar y Amazonas

En la figura 1 se puede observar el Sistema Interconectado Nacional. La capacidad instalada del SIN, alcanza los 19.637 MW y está compuesta por un 63% de generación hidráulica (12.429 MW) y el 37% restante de origen térmico, 4551 MW en unidades a vapor y 2657 MW a gas.

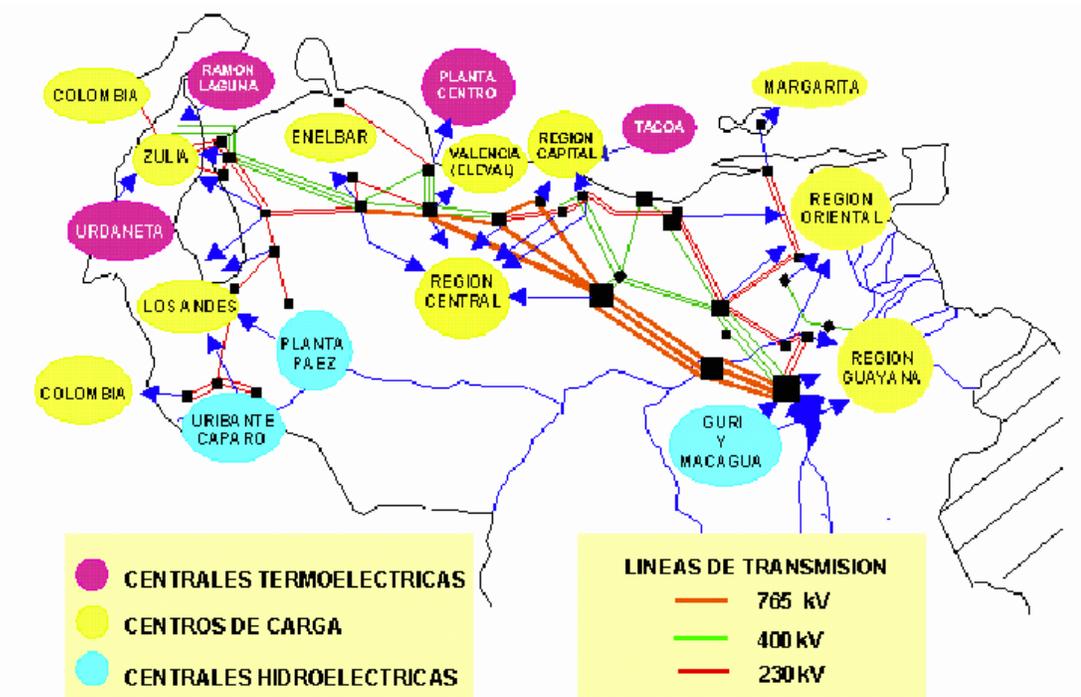


Figura 1: Sistema interconectado Nacional (SIN)

### 1.1.2 Características de la empresa

#### Naturaleza

A mediano plazo, CADAFE será una empresa nueva de carácter corporativo, no burocrática, organizada tanto funcionalmente como por proyectos y de fácil adaptación a los cambios, dirigida fundamentalmente a prestar un servicio eléctrico integral y eficiente, de calidad comparable a las mejores empresas del sector eléctrico, tanto nacional como internacional, con personal y tecnologías excelentes y financieramente sólida.

#### Objetivos

El objetivo de CADAFE es prestar un servicio eléctrico integral, de calidad, técnicamente confiable, a precio que permitan cubrir los costos operativos y efectuar las inversiones requeridas para el mantenimiento, mejoramiento y ampliación

rentable del sistema, estimulando el desarrollo del país y mejorando la calidad de vida de la población.

### **Misión**

Generar, Transmitir, Distribuir y vender energía eléctrica, en forma efectiva y rentable, para sustituir y promover el desarrollo económico del país y para mejorar el bienestar de la población asociada al uso del servicio eléctrico.

### **Valores**

Los valores de la empresa son: integridad, responsabilidad, el orgullo por la empresa, la honestidad, la mística, la lealtad y la experiencia. Estos valores están presentes en cada trabajador y con estos se crea un compromiso directo con la empresa, con el desarrollo, con la gente, hacer óptimo el trabajo y así hacer crecer a Venezuela.

### **1.1.3 Relación con otras empresas**

La Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico mantiene relaciones con diferentes empresas, entre las que destacan está **EDELCA**, que suministra gran parte de energía que se distribuye en el país.

**PETRÓLEOS DE VENEZUELA**, quien mantiene relaciones comerciales con CADAFE en el área de suministro de combustible gas-gasoil, para diferentes plantas de la empresa y a la vez CADAFE le suministra energía eléctrica para diferentes complejos petroleros.

**OTERCA MAQUINARIAS C.A**, ha mantenido estrechas relaciones comerciales con CADAFE desde su inicio y ha colaborado con el desarrollo de su personal técnico con cursos de capacitación en el área de filtración, además de

colaborar técnicamente en la solución de problemas y en la búsqueda de mejoras de los sistemas de filtración de aire.

**ALCAVEN** también representa importancia ya que suministra conductores para diferentes plantas y subestaciones que tiene la empresa a nivel nacional.

**CONFESIONES CURSIO**, es la empresa que suministra uniformes correspondientes al personal masculino de la empresa. Este corresponde: camisas, pantalones y calzados.

**INDUSTRIA FERROGAL DE VZLA**, es la encargada de suministrar los herrajes para cable de guarda nivel tensión 115-230 de 400 kv. Estos herrajes pueden ser grilletes, mordaza, conectores etc.

**C.A.N.T.V.**, es la empresa encargada de prestar servicios telefónicos a CADAFE.

#### **1.1.4 Producto y mercado de la empresa**

**CADAFE** es una empresa propiedad de la república que presta un servicio público estratégico en la mayor parte del territorio venezolano y para lo cual genera, transmite, distribuye y comercializa energía eléctrica en forma confiable con la participación de una significativa población directa de trabajadores, usuarios y proveedores.

Siendo CADAFE la mayor empresa prestadora de servicio eléctrico en Venezuela, en el año 1.984, acogió el reto de la búsqueda de la excelencia en su gestión global tomando en cuenta su misión y naturaleza y la experiencia desarrollada

por empresas corporativas de otros países los cuales habían basado su éxito en la consolidación y desarrollo hacia el mercado.

## **1.2 Despacho de carga oriental**

Es la unidad encargada de las operaciones de las instalaciones de transmisión y generación de CADAFE en la zona oriental, bajo los criterios de estabilidad, continuidad y economía.

En todo sistema conformado por varias subestaciones interconectadas, debe existir un organismo que se encargue de coordinar las actividades a realizar en cada una de esas subestaciones, con el fin de evitar operaciones no deseadas que pongan en peligro la estabilidad del sistema y la normalización del mismo cuando se presentan contingencias.

### **1.2.1 Actividades del despacho**

**Vigilar:** Cada uno de los equipos que conforman el Sistema Eléctrico posee rangos nominales de operación, criterios de operación y límites Operacionales. Hay que vigilar el comportamiento de dicho sistema constantemente, para así poder mantener los parámetros (carga, tensión y frecuencia) dentro de los rangos preestablecidos.

**Mantener:** Un Servicio Eléctrico que esté fuera de los rangos normales de operación representa un mal servicio, es por ello que se requiere realizar operaciones a lo largo y ancho del sistema para normalizar los rangos y así mantener la estabilidad y confiabilidad.

**Restablecer:** Ningún Sistema Eléctrico está exento de fallas y perturbaciones, lo cual trae como consecuencia la alteración de los parámetros normales y en mayoría de los casos, suspensión del servicio. El despacho está en el deber de realizar las operaciones necesarias para el restablecimiento del sistema eléctrico.

**Coordinar:** Todo sistema necesita mantenimiento para poder operar y ofrecer buenos resultados. En un sistema interconectado hay actividades que no pueden realizarse paralelamente, ya que afectaría el sistema general, por eso, los despachos de carga de cada zona se encargan de coordinar cada una de las actividades a realizarse.

**Informar:** El Sistema Eléctrico Oriental esta comprendido por varias unidades como la de generación, transmisión, y otras empresas a las cuales CADAFE vende energía. La información periódica entre todos los componentes que forma el sistema es vital para poder realizar operaciones con el previo conocimiento de los demás. El despacho de carga está en el deber de informar toda actividad realizada entre cada uno de los entes involucrados.

### 1.2.2 Responsabilidad primordial

Garantizar que la energía entregada reúna las siguientes características, para beneficio del consumidor y de la empresa:

- **Continuidad** del servicio las 24 horas del día.
- **Calidad de Servicio**, manteniendo los parámetros del sistema eléctrico de potencia dentro de las condiciones normales de operación.
- **Economía de Operación**, aplicando métodos y procedimientos de minimización de los costos de producción de energía.

### **1.2.3 Niveles de autoridad**

El despacho de carga, es la máxima autoridad de la empresa en todos los sistemas de generación y transmisión, en lo que se refiere a la operación de las Instalaciones.

Ante cualquier evento que ocurra en las instalaciones, el operador tiene la obligación de notificar al despachador de turno las características del mismo, quien a su vez es el encargado de dictar las operaciones para reestablecer el sistema eléctrico a su cargo, a las condiciones normales.

Los Despachos de Carga de CADAFE son los siguientes:

- Despacho de Carga Nacional.
- Centro de Control Central.
- Centro de Control Occidental.
- Centro de Control Oriental.

### **1.2.4 Ubicación Geográfica del Despacho de Carga Oriental**

Ubicado en el kilómetro 27 carretera vieja Barcelona – Tigre caserío Barbacoa Municipio Simón Bolívar Estado Anzoátegui.



**Figura 2: Ubicación Geográfica del Despacho de Carga oriental**

### 1.3 Justificación del proyecto

La empresa CADAFE ha venido presentando un aumento en los niveles de cortocircuito debido al aumento en la capacidad de las subestaciones para cubrir la creciente demanda exigida por la carga. Frente a esta situación se plantea realizar un análisis de la corriente de cortocircuito actual y hacer una comparación con respecto a la corriente de cortocircuito de los interruptores, esto nos permitiría observar si se cumplen los criterios porcentuales que deben existir para el normal funcionamiento de los interruptores de potencia y determinar si están en capacidad, cuando ocurre una falla, de interrumpir la intensidad de corriente original, de forma segura para evitar serios daños a los equipos.

Se requiere un estudio exhaustivo de los interruptores con el objeto de determinar si estos se encuentran en buenas condiciones para operar sin ningún fallo en cualquier instante y de no ser así analizar la posibilidad de sustituirlos por equipos de mayor capacidad y mejor condición operacional teniendo presente las características de los equipos a sustituir.

#### **1.4 Objetivo principal**

Estudiar el comportamiento de los interruptores de potencia que se encuentran en la subestación Barbacoa I (Zona I de transmisión de CADAFE).

#### **1.5 Objetivos específicos**

- Describir la conformación del sistema eléctrico de transmisión de la zona I de transmisión de CADAFE.
- Obtener los criterios sobre las condiciones de operación del sistema en condiciones normales y de falla.
- Recabar información acerca de interruptores de potencia y demás elementos presentes en la subestación Barbacoa I.
- Simular el funcionamiento del sistema eléctrico mediante el programa de análisis de sistemas de potencia ETAP Power Station versión 4.0.
- Realizar análisis de flujo de carga y cortocircuito del sistema eléctrico en estudio.

# CAPÍTULO II

## INTERRUPTORES DE POTENCIA

### 2.1 Introducción

Un interruptor de potencia es un dispositivo, cuya función consiste en interrumpir y restablecer la conducción de corriente de un circuito. Es decir, el interruptor abre o cierra galvánicamente al circuito en cuestión. Esta interrupción puede efectuarse bajo carga, para despejar por ejemplo una falla, o para desconectar o conectar a cualquier equipo eléctrico o línea de transmisión.

El margen de aplicación de los interruptores de potencia es hoy día más amplio, debido fundamentalmente a las elevadas tensiones de transmisión de energía en el ámbito comercial las cuales llegan a los 800 kV, mientras que a nivel experimental las tensiones respectivas sobrepasan los 1.000 kV. Las intensidades de cortocircuito de los sistemas densamente mallados han sobrepasado los 50.000 A, debido a las elevadas densidades de carga de las ciudades modernas y centros industriales de gran capacidad de producción.

Antes de describir a los diferentes tipos de interruptores, y considerando que estamos ante un dispositivo de maniobras relativamente complicado, es prudente definir aquellos conceptos básicos que nos facilitarán su entendimiento.

## **2.2 Conceptos Básicos**

### **2.2.1 Tensión Nominal**

Es aquella tensión, que el interruptor ve bajo condiciones normales de operación. En muchos casos esta tensión se encuentra ligeramente por debajo de la tensión de diseño.

### **2.2.2 Tensión de Diseño**

Es la tensión nominal máxima de operación, para la cual el suplidor garantiza su equipo en condiciones de régimen permanente. La IEC tiene establecidos estos valores en sus normas respectivas. A título de ejemplo, basta con mencionar, que 69 kV sería una tensión nominal de operación, mientras que la tensión de diseño, según la misma norma, es 72 kV.

### **2.2.3. Potencia de Ruptura**

Para definir este término haremos las siguientes aclaratorias: durante una falla tanto la intensidad de corriente como la tensión asume cuando menos dos valores diferentes. Así tenemos, por ejemplo, que la corriente de cortocircuito denota un valor inicial (valor instantáneo de la corriente de falla) y uno permanente (corriente de ruptura). La potencia de ruptura es entonces la intensidad de corriente de ruptura, que un interruptor puede despejar satisfactoriamente, a la tensión reinante en el sistema. Por lo general se establecen, según el caso, valores y condiciones específicas para la citada tensión.

#### **2.2.4 Tensión de Recuperación**

Al igual que la corriente, tenemos también aquí dos valores diferentes, a saber, tensión de recuperación transitoria bajo la cual debemos entender a la tensión que aparece en los contactos del interruptor en el primer intervalo de tiempo, es decir, cuando el proceso transitorio de la maniobra está en pleno apogeo. Esta se ve seguida en el tiempo, por la tensión de recuperación de régimen permanente, la cual se establece en los contactos del interruptor sólo a frecuencia nominal.

#### **2.2.5 Reignición y Reencendido**

La literatura anglosajona diferencia al reencendido del arco que tiene lugar entre los contactos del interruptor durante el primer cuarto de ciclo, denominándolo reignition, del reencendido que se puede presentar más tarde (después de  $\frac{1}{4}$  de ciclo), al cual llama restriking. Nos referimos a estos términos con las expresiones reignición y reencendido. La reignición por lo general no le da origen a sobretensiones peligrosas, mientras que el reencendido puede llevar a factores de sobretensión comprendidos en el orden de 3 a 4 valores p.u.

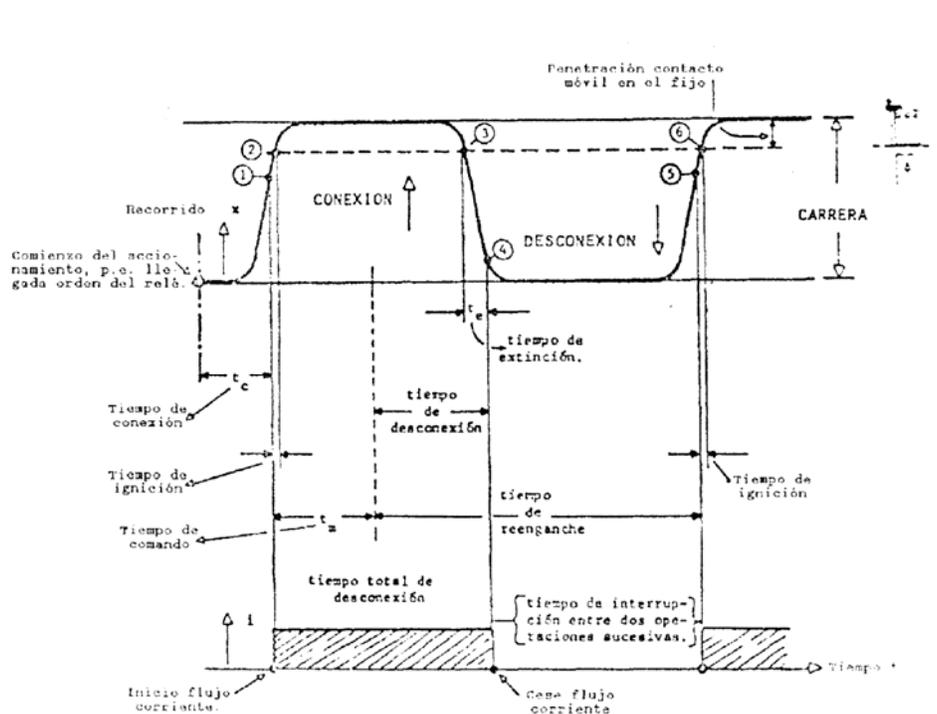
#### **2.2.6 Capacidad de Cierre**

La capacidad de cierre o conexión de un interruptor, al circular la intensidad de corriente de falla, indica el valor máximo de dicha corriente, el interruptor puede conectarse satisfactoriamente a una tensión dada. Esta podría ser la misma tensión nominal.

#### **2.2.7 Ciclo de Trabajo**

El ciclo de trabajo de un interruptor de potencia consiste en una serie de operaciones de apertura (desconexión) y cierre (conexión), o ambas a la vez, con el

objeto de revisar y analizar su funcionamiento y comportamiento ante diferentes situaciones, tanto dieléctricas como térmicas. En la Fig. 3 hemos expuesto la maniobra realizada por un interruptor de potencia en una de sus fases, al conectar y desconectar un circuito determinado. Los tiempos oscilados a las maniobras son de suma importancia, tanto desde el punto de la estabilidad del sistema, como el de la situación térmica. Mientras más tarde el interruptor en despejar la corriente de falla, mayor será el daño que la misma le causará al sistema afectado.



**Figura 3: Magnitudes y parámetros característicos del proceso de conexión desconexión de un interruptor trifásico de aire comprimido**

El esquema contempla sólo una de las fases, ya que las tres no se conectan o desconectan al mismo tiempo. Los instantes más relevantes del proceso de la maniobra son:

1 y 5 = salto de la chispa e inicio de la conducción plasmática conducción

2 y 6 = unión de los contactos e inicio de la conducción galvánica. | conducción

3 = separación de los contactos (fijo y móvil), | desconexión

4 = cese de la conducción plasmática. | desconexión

### 2.2.8 Clasificación según el Proceso de Extinción

Los interruptores se pueden clasificar en tres grandes categorías:

**Interruptores de soplado auxiliar:** Utilizan para la extinción del arco una fuente de energía exterior independiente (aire comprimido, inyección mecánica de aceite). Su poder de ruptura depende evidentemente del poder de la energía auxiliar.

**Interruptores a extinción natural del arco:** Son basados sobre el principio de soplado electromagnético.

**Interruptores de autosoplado:** Dentro de ellos, la energía desprendida a través del mismo arco acarrea su extinción.

### 2.3 Definiciones Asociadas a los Interruptores de Alta Tensión

**Contacto Fijo:** Corresponde a la parte activa del interruptor que se encuentra inmersa en la cámara de extinción, formando los elementos de conexión o desconexión eléctrica del circuito de potencia. Este contacto se encuentra en forma estacionaria dentro de la cámara.

**Contacto Móvil:** También forma parte de los elementos de conexión y desconexión, pero con la diferencia del anterior, de que es este contacto quien puede ser removido por medio del mecanismo de mando para realizar la operación.

**Cámara de Interrupción:** Es la parte primordial de cualquier interruptor eléctrico, en donde al abrir los contactos se transforma en calor la energía que circula por el circuito de que se trate. Deben estar disecadas para soportar los esfuerzos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuito, así como los esfuerzos dieléctricos que aparecen al producirse la desconexión de bancos de reactores, capacitores y transformadores.

Dada la complejidad del análisis de la interacción de los fenómenos que se presentan en la interrupción del arco eléctrico, el diseño de una cámara de interrupción está basado, en gran medida, en tablas y pruebas de laboratorio. En las cámaras de extinción se puede incrementar la resistencia del arco con base en los conceptos siguientes:

- a. *Alargamiento.* En este caso la resistencia es proporcional a la longitud del arco.
- b. *Enfriamiento.* Un enfriamiento del gas ionizado aumenta la resistencia del arco, debido a que la tensión requerida para mantener la ionización aumenta cuando la temperatura del plasma disminuye.
- c. *División.* La cámara de arqueo está formada por varias láminas paralelas aisladas entre sí; esto hace que el arco se divida en un gran número de pequeños arcos en serie; cada uno de los cuales se enfría por alargamiento mientras ascienden entre dos láminas contiguas.
- d. *Construcción.* A medida que a un gas ionizado se le va forzando a pasar por un ducto que se va estrechando, se requiere un incremento en a tensión para mantener el arco.

**Bobina de Cierre:** Es un elemento eléctrico encargado de accionar el mecanismo de operación para el cierre del interruptor, una vez que recibe una orden de cierre a través de una señal eléctrica (DC o AC).

**Bobina de Apertura:** Es un elemento eléctrico encargado de liberar el mecanismo de apertura de un interruptor, una vez que recibe una orden de disparo por actuación de cierta protección o una orden de apertura dada por un operador. Puede ser accionada también por una señal AC o DC.

**Relé Antibombeo:** Es un dispositivo encargado de evitar una serie de conexiones y desconexiones del interruptor, en caso de que subsista una orden de conexión en el mecanismo de cierre al mismo tiempo que una orden de desconexión en el mecanismo de apertura.

**Polo:** Constituye el elemento intermedio entre el mecanismo de mando y la cámara de extinción. Sirve de elemento de soporte a la cámara de interrupción y como elemento de aislamiento a tierra de las partes energizadas del interruptor. Contiene en su interior el medio aislante y el elemento de maniobra del contacto móvil.

**Discordancia de Polos:** Es la diferencia de acción, en tiempo, que existe entre los polos de un interruptor durante una maniobra de apertura o cierre.

**Celda:** Los distintos elementos que con carácter general constituyen las instalaciones de transformación y distribución son: las barras colectoras, sencillas o dobles, y en su caso la de transferencia, los seccionadores, los interruptores y los transformadores de medida (tensión e intensidad).

Estos elementos se montan comúnmente en celdas, y en cada una de ellas se agrupan los correspondientes a cada circuito, como son los de una entrada o salida de línea o los correspondientes a un transformador.

En sí, podemos definirla como una instalación de distribución de energía eléctrica, formada por un recinto dentro del cual se encuentran aparatos de alta tensión, equipos de protección e instrumentos indicadores.

Se encuentran divididas en cámaras o compartimientos, como son:

- Cámara destinada a albergar las barras.
- Cámara para los interruptores automáticos.
- Cámara para la conexión de los equipos de control y cables.

La idea de montar los aparatos en diversas celdas obedeció al criterio de que pudieran separarse las distintas partes de la instalación para el caso de tener que proceder a revisiones y trabajos, y también para que los arcos que pudieran formarse entre los elementos quedasen localizados a los del grupo en que aquello tuviera lugar. Asimismo, el fuego originado por inflamación del aceite no dañaría directamente a las partes de la instalación situadas fuera de la celda siniestrada.

En toda subestación encapsulada, se hace necesaria la utilización de diversos tipos de recipientes portadores de gas, que van a conformar el encapsulado de los diferentes componentes del mecanismo de control y además servirán, de acuerdo a su diseño, como partes de interconexión de los diferentes elementos constituyentes del mecanismo de control de la subestación encapsulada y de ella misma en su totalidad.

En principio existe un tipo de recipiente para cada tipo de aparato en particular y adyacente a él hay tubos para barras de transporte y conexiones direccionales,

interconectores de ramales, etc. Estos elementos proporcionan una gran flexibilidad y ayudan a cumplir las exigencias de los diferentes sistemas de una manera óptima.

El material constituyente de cada recipiente debe ofrecer seguridad e impermeabilidad al gas que ha de contener. En general se elaboran ciertos tipos de espaciadores; los cuales, junto con el gas conforman un aislamiento sólido entre el sistema energizado del centro y a cubierta aterrada exterior de cada recipiente, soportan mecánicamente al sistema conductor y dividen el mecanismo de control en diversas secciones de gas separadas entre sí. Asimismo los espaciadores deben soportar la magnitud de voltaje requerido en cada caso y formar una barrera segura al gas durante condiciones de servicio normal y en caso de anomalías del sistema. En cuanto a magnitud de corriente circulante, dichos espaciadores deben proveer cierta flexibilidad aunada a buenas características eléctricas.

El material escogido para la fabricación de los recipientes debe ser no magnético y de baja resistividad para evitar problemas de inducción y pérdidas por corriente Eddy; utilizándose por lo general aluminio y acero para su confección mediante el empleo de técnicas de soldadura y fundición. En la práctica, son más baratos los recipientes logrados en una pieza mediante fundición, por lo que ésta técnica es aprovechada tanto como sea posible.

De acuerdo a su configuración geométrica, los recintos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

- a. Rectos.
- b. En forma de T,
- c. Angulares.
- d. Cilíndricos.

**Resistencia de Contacto:** Cuando una cámara de arqueo se cierra, se produce un contacto metálico en un área muy pequeña formada por tres puntos, que es lo que en geometría define un plano. Este contacto formado por tres o más puntos es lo que fija el concepto de resistencia de contacto y que provoca el calentamiento del contacto, al pasar la corriente nominal a través de él. La resistencia de contacto varía de acuerdo con la fórmula:

$$\text{Ec. 2.1} \quad R = K * \zeta * \frac{D}{F}$$

en donde:

**R** = Resistencia de contacto en Ohms.

**K** = Constante dada por el fabricante del interruptor.

**$\zeta$**  = Resistividad del metal del contacto

**D** = Dureza del metal del contacto

**F** = Fuerza que mantiene cerrado el contacto

En la fórmula se observa que la resistencia de un contacto crece directamente proporcional, a la resistividad y a la dureza e inversamente proporcional con la presión del contacto.

#### **2.4 Fenómenos Presentes en el Disparo y Cierre de los Interruptores.**

**Condiciones de cortocircuito:** En un circuito bajo condiciones normales, la tensión aplicada produce una tensión limitada por las impedancias de los elementos que forman parte del mismo, como son generadores, líneas de transmisión, aparatos y cargas, produciéndose un factor de potencia que puede ser elevado.

Para el mismo circuito, pero bajo condiciones de cortocircuito en las terminales del generador, se inicia una sobrecorriente que sólo está limitada por la resistencia del

inducido del generador, sumada en cuadratura con la reactancia de dispersión del mismo, que es una impedancia muy pequeña. El flujo de dispersión resultante cierra su circuito a través del aire y como la resistencia del embobinado es pequeña en comparación con la reactancia, es la reactancia la única limitadora de la corriente.

De aquí se llama a esta corriente “Corriente inicial de cortocircuito” la cual tiene su magnitud disminuyendo gradualmente por la acción electromagnética de la misma que reduce el flujo y, por consiguiente la fuerza electromotriz, hasta alcanzar la corriente de cortocircuito un valor permanente que sólo estará limitado por la reactancia síncrona del generador, que se debe al campo giratorio síncrono de la reacción de inducido. A esta corriente se le denomina “Corriente permanente de cortocircuito” y tiene un factor de potencia del orden de 0,1.

La corriente de cortocircuito en un sistema puede ser de dos tipos:

- a. Simétrica.
- b. Asimétrica.

**Corriente Simétrica:** Es el valor eficaz de la componente de corriente alterna en el momento de separación de los contactos del interruptor. Esta se origina cuando al pasar la onda de tensión por su valor máximo se inicia el cortocircuito. Debido a que la onda de corriente, por ser un circuito eminentemente inductivo, se atrasa prácticamente  $90^\circ$ , parte de cero y no se produce ningún estado transitorio que desplazaría el eje de la onda de corriente.

**Corriente Asimétrica:** Es el valor total de la corriente de cortocircuito, que ocurre en el instante en que se separan los contactos del interruptor, y que comprende, en cada instante, la suma de dos términos: el de corriente directa, que decrece

exponencialmente y el de corriente alterna que se mantiene constante respecto al tiempo.

La corriente asimétrica se origina cuando al inicio del cortocircuito la onda de tensión pasa por el valor cero. En ese instante, por tratarse de un circuito inductivo, la onda de corriente aparece atrasada  $90^\circ$ , y la corriente al no poder alcanzar su valor máximo por la inercia que representa el circuito inductivo, presenta un desplazamiento del eje de las abscisas (X) en forma exponencial.

Apertura bajo condiciones de cortocircuito: Como se sabe, la apertura de un circuito siempre va acompañada de un arco, cuya extinción se produce al paso de la corriente por cero.

La magnitud de la corriente asimétrica total que debe abrir un interruptor, es la suma del valor eficaz de la componente alterna (ca) más la componente no oscilatoria (cd) en el instante en que abren los contactos del interruptor, como se muestra en la expresión:

$$I_{eT} = \sqrt{\left(\frac{I_{ac}}{2}\right)^2 + I_{cd}^2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

en donde:

$I_{eT}$  es el valor efectivo de la corriente total de apertura.

$I_{cd}$  e  $I_{ca}$  son los valores de la gráfica de la corriente asimétrica

**Tensión de restablecimiento después de la apertura:** En el momento del paso por cero de la corriente, o sea de la extinción del arco en los contactos, aparece entre ellos una tensión que es la suma de la onda fundamental de tensión sumada a la componente transitoria de tensión, suma que se llama tensión de restablecimiento.

La tensión de restablecimiento es el producto del promedio de los valores eficaces de las tensiones entre fases, tomadas durante el periodo que sigue a la extinción definitiva del arco, multiplicado por  $\sqrt{3}$ , o sea:

$$V_R = \frac{\frac{V_1}{2\sqrt{2}} + \frac{V_2}{2\sqrt{2}} + \frac{V_3}{2\sqrt{2}}}{3} * \sqrt{3} \quad \text{Ec.2.3}$$

en donde:

$V_R$  = Tensión de restablecimiento

$V_1, V_2, V_3$  = son las tensiones entre cada una de las tres fases.

**Potencia de cortocircuito trifásica de un interruptor:** Es el producto de la tensión de restablecimiento por la corriente, ya sea simétrica o asimétrica y por  $\sqrt{3}$ .

## 2.5 Tipos de Interruptores

### 2.5.1 Interruptores de Vacío

Los interruptores de vacío tienen numerosas propiedades haciéndolos radialmente diferentes de muchos descargadores a gas.

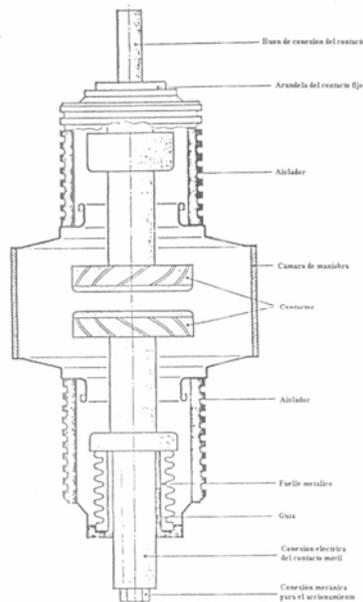
Son éstas las únicas características que hacen al interruptor de vacío un invento ideal por su alto poder en el circuito de interrupción.

Por definición, el arco de vacío no cuenta con la formación de moléculas de gas para crear o conducir cantidad significativa de corriente.

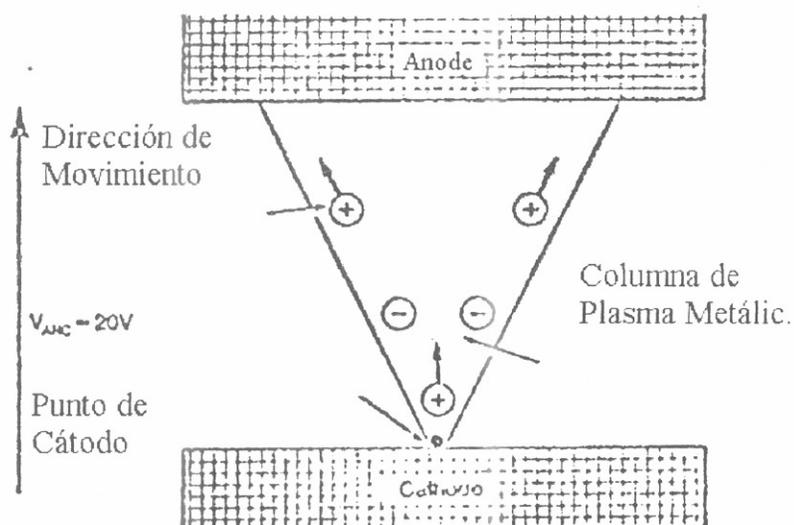
Al separarse los contactos, la intensidad de desconexión produce por efecto de la descarga del arco, un vapor metálico. A través de éste vapor-plasma fluye la corriente hasta su primer paso por cero. El arco se extingue en las inmediaciones de este paso por cero y el vapor-plasma se condensa de nuevo en pocos microsegundos sobre la superficie de los contactos. Sólo una décima parte se condensa en las paredes de la cámara preparada al efecto.

El tubo de maniobra de vacío: ahorra espacio, seguro en el servicio, de aplicación universal. Está constituido con una cámara central de maniobra y aisladores cerámicos dispuestos simétricamente. Fig. 4.

La estructura de un arco de vacío a baja corriente se muestra en la Fig. 5, la columna luminosa viene a ser en forma cónica, con sus ápices al punto de cátodo. El punto de cátodo supe electrones e íconos dispositivos para el plasma del arco y es libre para moverse en la superficie del cátodo.



**Figura 4: Tubo de maniobra de vacío.**



**Figura 5: Punto de cátodo simple (corriente de arco menor de 100 Amp).**

La profundidad de la trayectoria de erosión desde un punto de cátodo simple es muy superficial, del orden de unas cuantas decenas de micrones.

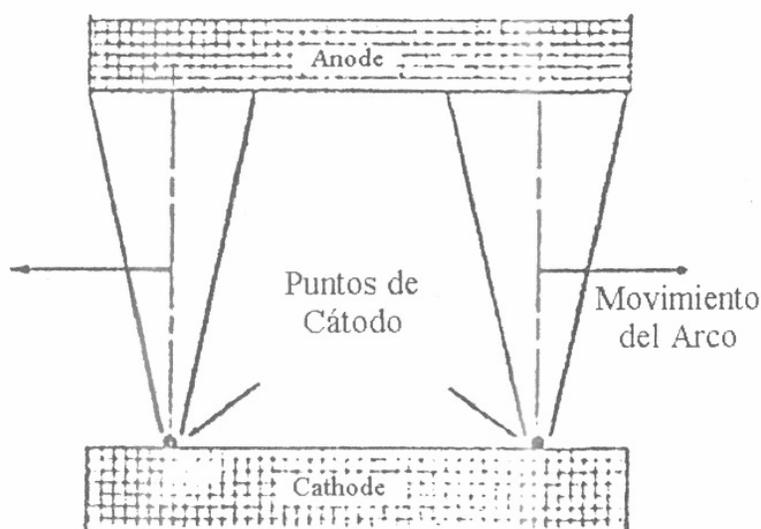
Lejos de la región del punto de cátodo en la columna de arco, electrones e iones viajan hacia el ánodo.

La baja relatividad en la densidad iónica y el movimiento directo del ión garantiza que el nivel de colisión sea bajo. En adición, el average de la energía del ión es extremadamente alto, más superior en realidad que el voltaje aparente de aceleración a través del arco.

Estas propiedades aseguran que una vez lejos de la región del cátodo, un ión característico viajará rápidamente y en línea recta hasta que se rompa el ánodo o protector.

La facilidad con la cual las partículas se mueven de un extremo a otro del arco asegura un bajo voltaje en él.

Así como la corriente del arco es aumentada, otras propiedades se hacen claras como se muestra en la Fig. 6. En el caso de los electrodos de cobre, si la corriente se aumenta por encima de 100 amperios el punto de cátodo simple estallará en dos para mantener la corriente. Un punto de cátodo simple puede cargar solamente una corriente limitada, dependiendo de algunos grados en el material del electrodo.



**Figura 6: Punto de cátodo doble (corriente de arco mayor de 100 Amp).**

El funcionamiento de las dos columnas de arco es también de interés: las columnas de arco (o puntos de cátodos) repelan una a otra. Así ellas representan elementos de corriente paralelas, llevando corriente en la misma dirección, normalmente aguardarían la atracción. De todos modos la explicación para esta “conducta retrograda” es una propiedad del arco extremadamente útil, suministrando un mecanismo muy efectivo para la máxima disipación de energía.

Un buen interruptor diseñado soportaría aproximadamente 40 kV/mm a través de una pequeña abertura de vacío. Esta acción obviamente representa excelentes propiedades dieléctricas.

### **Características de Diseño**

La difusión del arco de vacío parece apta para proveer un dispositivo de interrupción casi ideal y no obstante, solamente sobre los 15 últimos años es cuando los interruptores de vacío vienen a ser establecidos. Las razones de este retardo envuelve problemas mayores en las áreas vitales del diseño de contacto, material de contacto y tecnología de vacío.

La transición en forma de un arco de vacío a bajas corrientes (difundidas con puntos de cátodo individuales repelentes) ocurre cerca de una corriente de 10 kA y su efecto es cambiar el arco a una forma estrecha.

A medida que la corriente aumenta el modo del arco cambia drásticamente.

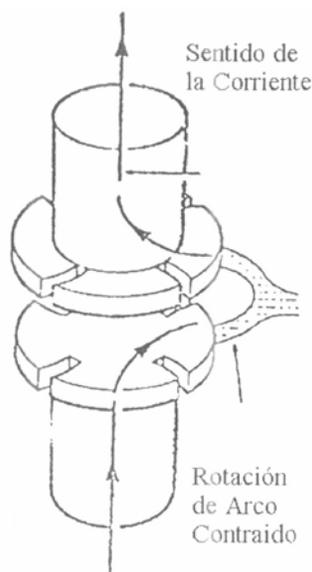
El resultado del arco de vacío estrecho es para promover contacto de calificación y fusión y así prevenir interrupciones en el mismo.

Los contactos tienen que ser diseñados en forma tal, como para proveer un campo magnético cualquiera, transverso o axial para el eje del arco.

En el caso de los contactos del campo axial, una rosca como parte de la estructura normalmente prevé el campo magnético. Su efecto es “atrapar” al arco entre las líneas de campo. Si el arco está inicialmente de modo difuso, la corriente es aumentada, el campo magnético axial lo evitará transfiriéndose al modo estrecho.

Los contactos del campo transverso generan un campo magnético que causa la rotación del arco alrededor de este contacto, Esta rotación permite que la energía del arco estrecho sea distribuida alrededor del contacto, de manera que la corriente caiga bajo 10 kA; el arco retorna a la forma difusa y la interrupción puede ocurrir. Naturalmente que a la velocidad a la cual el arco rota, influenciará la capacidad de interrupción.

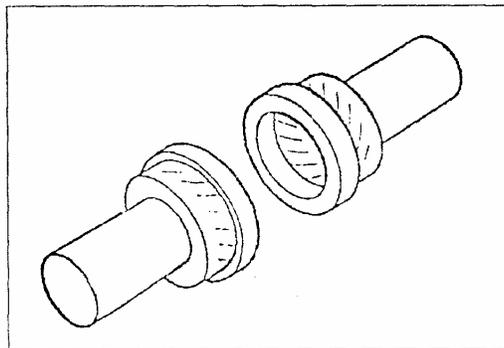
El primer tipo de contacto del campo transverso conocido como el “espiral pétalo”, es mostrado en la Fig. 7. En este diseño cada contacto consiste en un disco plano con ranuras curvas cortadas a través de la cara del disco. La corriente alcanza al arco fluyendo a lo largo de esos “pétalos” y por consiguiente, crea un campo magnético transverso. Esto causa la rotación del arco, la velocidad de éste depende del número de ranuras y sus ángulos, así como también es proporcional al cuadrado de la corriente. Obviamente el número de ranuras que puede ser provisto en este diseño es limitado por consideraciones geométricas y mecánicas fundamentales y por lo tanto, la velocidad rotacional (y la capacidad de interrupción) es limitada.



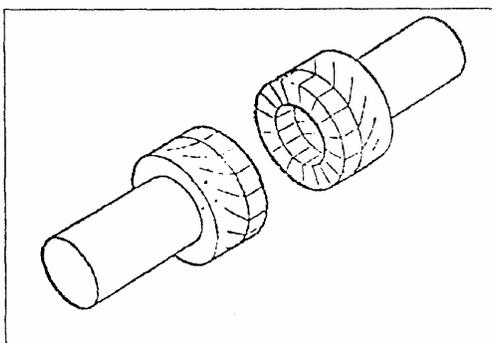
**Figura 7: Contactos “espiral pétalo”**

### Contacto ranurado

Un refinamiento del contacto de pétalo para extender el diseño se obtiene usando un contacto cilíndrico hueco con ranuras diagonales cortadas a través del lado del cilindro, dos versiones de este contacto contraído se muestran en las Figs. 8 y 9.



**Figura 8: Contacto de pétalo con ranuras al lado del cilindro**



**Figura 9: Contacto de pétalo con ranuras en la extremidad y base**

El primero tiene un tipo sólido de material de contacto y procede en una forma similar al diseño de pétalo. Sin embargo, tiene un número de ranuras anguladas (20 y 80 mm de contacto), para crear grandes velocidades de rotación del arco. Secundariamente es posible asegurar que el arco esté positivamente localizado en la dirección radial. Estas ventajas aseguran que este contacto sea capaz de interrumpir amplias corrientes con una alta vida eléctrica.

La segunda versión de este contacto tiene las correspondientes ranuras en su extremidad y en la base. El efecto de esto es doble, la transmisión de un arco estrecho es retardado debido al movimiento del arco sobre la extremidad de los contactos individuales y las propiedades mecánicas del contacto y por lo tanto, aligera los mecanismos de interrupción a ser usados.

El material de contacto determina un número de propiedades importantes del arco. Estas pueden resumirse de la siguiente manera:

- a. **Corriente de corte:** Este fenómeno ocurre con todas las formas de interrupción. Surge del factor de que una cantidad limitada de energía es requerida para mantener el arco.

Así como la corriente desciende hacia cero en una onda de 60 Hz, un punto se alcanza para el cual, la corriente no es suficientemente alta para proveer al arco sus iones y electrones necesarios. En este punto el arco se destruirá repentinamente y es conocido como un “corte” de corriente,

En un interruptor de vacío, el estimado de corriente dependerá firmemente de las propiedades físicas del material de contacto, tales como: punto de fusión, la función de trabajo y la conductividad térmica. En la práctica esto puede producir average variable de 0.5 Amperios mientras el tungsteno produce un “corte” de aproximadamente 55 Amperios.

- b. **Soldadura de contacto:** Cualquier metal limpio que esté en contacto físico en vacío se soldará hasta en ausencia de corriente. Así como materiales limpios son esenciales para un interruptor de vacío, esto parecerá un problema difícil, pero en la práctica, dependiendo de las

propiedades físicas del material de contacto, la fuerza de la soldadura será muy variable. Un material quebradizo dará una baja fuerza de soldadura comparado con un material flexible.

- c. **Conductividad térmica y eléctrica:** La conductividad del material de contacto afectará la generación y disipación del calor en el interruptor durante la operación a una corriente continua. La única pérdida del calor del recinto de vacío se debe a la radiación y a esas temperaturas ésta será mínima. Por lo tanto casi todo el calor generado debe ser disipado por las varas de contacto. Es de hacer notar que la operación continua a una alta temperatura, no dañará el funcionamiento del interruptor de vacío.
- d. **Rendimiento de voltaje:** Para obtener los beneficios de las propiedades inherentes de un alto aislamiento en la abertura de vacío, es importante que los electrodos no tengan una excesiva emisión de electrones, esto puede ocurrir de dos formas:
- Electrones liberados del volumen del material, debido a propiedades tales como baja función de trabajo.
  - Electrones liberados de la superficie por emisión de campo. Esto es particularmente notable en materiales dúctiles tales como el cobre.

Todos los requerimientos con un solo metal son difíciles de satisfacer. Por ejemplo, el cobre tiene una excelente conductividad, un rendimiento de voltaje normal pero tiene una fuerza de soldadura muy alta. Así, el tungsteno tiene un

excelente rendimiento de voltaje, una baja fuerza de soldadura, pero muy altos niveles de corte.

Usando aleaciones binarias o materiales compuestos, es posible obtener las propiedades deseadas de ambos metales para el mayor arreglo posible entre los diferentes requerimientos conflictivos: Dos materiales, bismuto de cobre (una verdadera aleación binaria) y cromo de cobre (un compuesto) son exitosos al usarse en interruptores de vacío. Donde el cromo de cobre es el mejor material particularmente con respecto al corte por corriente y resistencia del voltaje.

Un interruptor debe quedar a un grado de vacío aceptable a través de su vida de trabajo, normalmente 20 años. Un nivel de vacío “aceptable” puede ser definido en dos criterios: primeramente, la presión debe estar suficientemente baja para asegurar que el arco esté en la forma de un arco de vacío y seguidamente que las propiedades de aislamiento de la abertura no sean formalmente degradadas.

La presión en un recinto de vapor puede aparecer debido a una fuga real (ej. un agujero en el recinto), a la liberación de gas de los componentes internos, o a la liberación de gas de alta presión contaminante.

El conjunto de métodos modernos de limpieza pueden asegurar un mínimo de fugas, incluso las dimensiones definidas del average permisible.

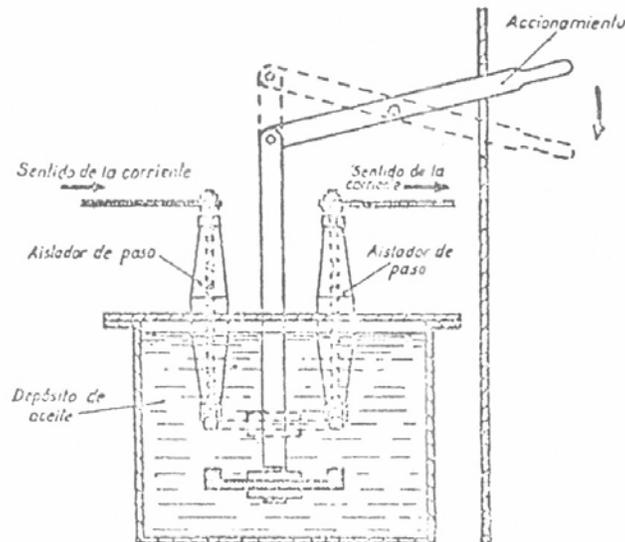
### **2.5.2 Interruptores en Baño de Aceite**

En estos interruptores, el corte de la corriente se realiza en el interior de unos depósitos cerrados y llenos de aceite aislante, semejante al empleado para los transformadores. Para conocer u principio de funcionamiento, se ha preparado la representación esquemática en la Fig. 10. El conjunto del interruptor se introduce en

una cuba o depósito de aceite aislante; en la posición de la figura, el interruptor está abierto y para cerrarlo basta maniobrar hacia abajo la palanca de accionamiento. Los conductores bajo tensión se introducen en la cuba por medio de aisladores de paso y también deben aislarse cuidadosamente todas las piezas que no sean exclusivamente de paso de a corriente, tales como elementos de accionamiento y paredes metálicas del depósito de aceite; el conjunto metálico del interruptor debe ponerse a tierra.

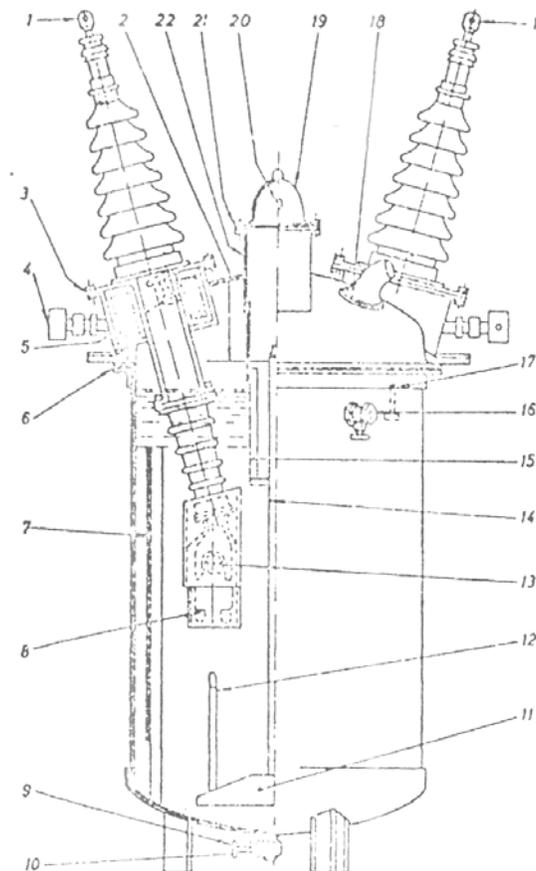
El interruptor representado en la Fig. 10 es unipolar, o sea que solamente corta la corriente en una fase; pero pueden disponerse tantos dispositivos de desconexión como sean necesarios, semejantes al de la figura, y accionados a un dispositivo común a todos ellos. En la práctica, estos interruptores tienen aspecto constructivo diferente y son de más compleja constitución.

La cuba de aceite es, por lo general, de plancha de acero que, al principio fue rectangular y posteriormente cilíndrica. La cuba no está enteramente llena de aceite, sino que, entre el nivel del aceite y la parte inferior de la tapa, se deja cierto volumen de aire que actúa de amortiguador.



**Figura 10: Representación muy simplificada de un interruptor en baño de aceite.**

Veamos a continuación (Fig. 11) el semicorte de un interruptor automático en baño de aceite para tensiones nominales hasta 800 A y capacidad de ruptura de 1500 MVA. En la figura se muestran los más importantes elementos constructivos de este interruptor



**Figura 11: Semicorte de un interruptor automático en baño de aceite.**

- |  |   |
|--|---|
| 1. Tomas de corriente.   | 13. Contacto fijo elástico  |
| 2. Cámara de expansión.  | 14. Varilla de accionamiento del contacto móvil, de madera tratado. |
| 3. Junta estanca.  | 15. Guía del vástago de contacto móvil.                             |
| 4. Caja de paso de las conexiones de los transformadores de los pasatapas. | 16. Grifo de llenado de aceite.                                     |
| 5. Transformador del pasatapas.  | 17. Indicador de nivel de aceite.                                   |
| 6. Yunta estanca.  | 18. Membrana de seguridad.  |
| 7. Pantalla aislante.  | 19. Tapa.   |
| 8. Cámara de extinción del arco.   | 20. Biela de accionamiento del mecanismo.                           |
| 9. Grifo de vaciado.   | 21. Junta estanca.  |
| 10. Grifo de bola para extracción del aceite                               | 22. Caja de accionamiento.  |
| 11. Traviesa móvil.  |   |
| 12. Contacto móvil   |   |

Los interruptores normales son de doble ruptura, a base de disponer un puente o traviesa móvil entre dos contactos fijos por fase. Los contactos fijos se unen a las varillas de conducción de la corriente que, como hemos dicho, pasan por el interior de aisladores pasatapas, sujetos a la tapa de la cuba.

Podemos clasificar los interruptores en baño de aceite, en dos grandes grupos:

- A. Interruptor de ruptura libre.
- B. Interruptores con cámara de explosión.

Los interruptores de ruptura libre solamente pueden utilizarse para interrumpir circuitos con potencias de ruptura hasta 400 MVA. En estos interruptores, el arco salta entre los contactos apagachispas sumergidos en aceite y la desionización del canal del arco se produce de forma aleatoria, relacionada solamente con la separación entre los contactos y la presión que sobre la bolsa de gases crea la masa de aceite y la propia sobrepresión de los gases formados en la ruptura.

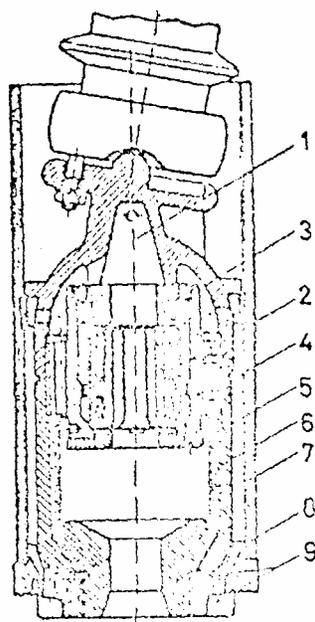
Según la sobrepresión de los gases producidos durante la ruptura se distinguen dos tipos de interruptores: los de baja presión con gran cámara de aire y los de alta presión con una cámara de aire relativamente pequeña.

Las pruebas de los cortocircuitos en los laboratorios han demostrado que los interruptores de baja presión tienen imprevisibles características de ruptura, como la duración del arco es en ellos mayor que en cualquier otro tipo de interruptor, muchas veces, la presión a que quedan sometidos es mayor de la prevista en el proyecto del interruptor.

Los interruptores de pequeñas cámaras de aire tienen la cuba y la tapa diseñadas para resistir las mayores presiones que en ellos se alcanzan estas elevadas presiones favorecen la rápida desionización del canal del arco, obteniéndose rupturas seguras. La gran simplicidad de construcción, la facilidad para la inspección y su casi nulo mantenimiento, junto con una gran seguridad de aislamiento y de funcionamiento, constituyen ventajas que aseguran, para mucho tiempo, la utilización de este tipo de interruptores de ruptura libre.

Los interruptores con cámara de explosión se utilizan para interrumpir circuitos con potencias de ruptura superiores a unos 400 MVA. La Fig. 12, es el corte longitudinal de la cámara de explosión de un interruptor AEG, con indicación de sus partes constituyentes más importantes.

En estas cámaras de explosión, el arco produce también una formación muy intensa de gas, pero el aceite no puede escapar debido a la pared de la cámara que rodea el punto de ruptura, por lo que se producen fuertes torbellinos que lanzan el aceite a presión sobre el arco, contribuyendo de esta forma al enfriamiento del mismo y a su rápida extinción.



**Figura 12: Cámara de explosión de un interruptor AEG en baño de aceite para grandes potencias de ruptura.**

1. Parte superior de la cámara de explosión.
2. Contacto de tulipa
3. Guía de contacto.
4. Cuerpo de la cámara de explosión.
5. Anillo de protección del contacto.
6. Cilindro aislante interior.
7. Cilindro aislante exterior.
8. Anillo soporte de aislamiento para revestimiento exterior.
9. Cierre de la cámara de explosión de material aislante.

Son muy numerosas las disposiciones constructivas que se han ideado para estas cámaras, y en todas ellas se pretende acelerar la desionización del arco a cada paso de la corriente por cero, utilizando mediante ingeniosos dispositivos, la propia

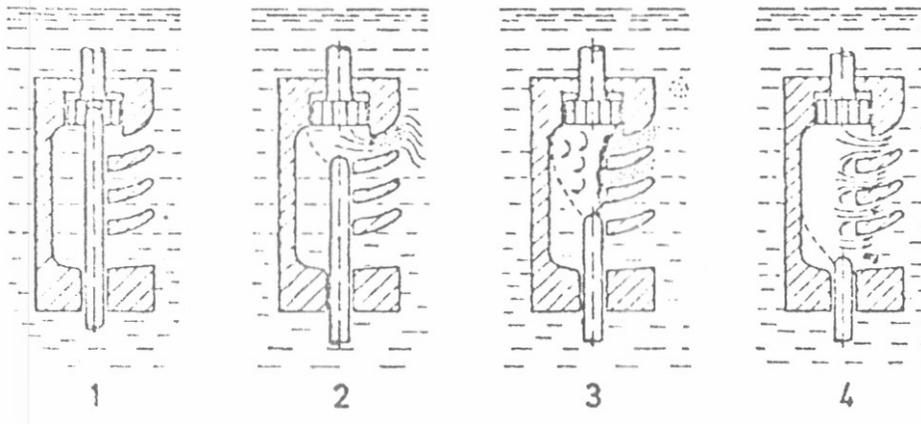
energía liberada por el arco, para obtener su rápida extinción. La reducción del tiempo de ruptura asegura un menor desgaste de los contactos y menor carbonización del aceite, permitiendo de esta manera un mayor número de cortes sin necesidad de renovar o regenerar el aceite ni revisar o reponer los contactos.

Los dispositivos de control del arco mediante cámaras de explosión (Fig. 13) han recibido comercialmente distintos nombres; mencionaremos el tubulador (conocido como el transversator) y que está constituido por placas de fibras mecanizadas y enlazadas, formando una pequeña cámara situada alrededor de los puntos de ruptura y en la que uno de sus lados, provisto de pequeños canales transversales, queda lo más próximo posible al recorrido del arco.

Al separarse los contactos, el arco es impulsado contra las ranuras, obteniéndolas por los propios gases a presión originados por la descomposición del aceite, cuando la corriente pasa por cero, los gases producidos son sopladados fuertemente a través de las ranuras, barriendo los gases ionizados y restableciendo inmediatamente la barrera aislante. Con todo esto se obtiene:

- a) Un arco muy corto.
- b) Una duración del arco del orden de un semiperíodo.

A pesar de la mejora que significa la cámara de explosión para muy altas tensiones y capacidades de ruptura, en el continente europeo existe actualmente la tendencia a sustituir el interruptor en baño de aceite por el interruptor de pequeño volumen de aceite o por el interruptor neumático, abandonándose los de baño de aceite para tensiones superiores a los 35 KV.



**Figura 13: Dispositivo tubulador de control del arco de un interruptor en baño de aceite.**

**Extinción del Arco de Corriente Alterna en el Seno del Aceite:** La inmersión de los contactos de ruptura de un interruptor en el aceite o en otro líquido no evita la formación del arco durante la separación de los contactos pero, en cambio se consigue que la energía absorbida para la vaporización y descomposición del aceite, queda utilizarse para enfriar enérgicamente la columna del arco y los propios contactos.

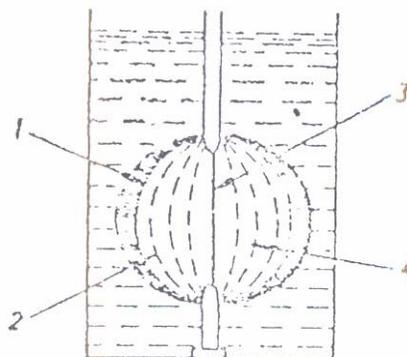
Para una misma separación entre los contactos la tensión necesaria para que se establezca el arco es mucho mayor en aceite que en el aire. Por lo tanto, la tensión de extinción y, sobre todo, la tensión de reencendido al formarse el arco en el seno del aceite son varias veces superiores a las tensiones correspondientes en al aire y como consecuencia, los interruptores en el baño de aceite resultan particularmente adecuados para la interrupción de circuitos de corrientes alterna de alta tensión

El mismo proceso de la ruptura en el aire, puede ser aplicado en la ruptura bajo aceite. Sin embargo, ahora aparecen fenómenos adicionales, característicos de los interruptores en el baño de aceite, que determinan su mayor eficacia La alta temperatura (6000 a 8000 °C) del arco producido al separarse los contactos provoca

en el aceite una disociación en hidrógeno (70%), metano (10%), etileno (20%), etc., y carbón libre. Estos gases están fuertemente ionizados, es decir de sus átomos se han arrancado electrones.

El campo eléctrico originado por la tensión de reestablecimiento, impulsa a los iones positivos hacia el contacto que actúa como cátodo, mientras que los electrones y los iones negativos, rechazados por el cátodo, se dirigen al ánodo. Los choques producidos por el movimiento de estas partículas producen nuevos iones, con lo que se aumenta la ionización de la columna que rodea el arco; a esta ionización contribuye también la emisión termoiónica de los contactos que frecuentemente, llegan a la temperatura de incandescencia por causa de la energía del arco en el momento de la ruptura. Esta masa de gases ionizados forma una bolsa en el seno del aceite, en cuyo interior se halla el arco, tal como se ha representado esquemáticamente en la Fig. 14. El núcleo del arco, cuya temperatura puede llegar a 8000 °C, queda rodeado de una zona de hidrógeno, con temperatura de 500 a 800 °C, alrededor de la cual se encuentra una capa de vapor recalentado y, sobre esta, una capa de vapor saturado, cuya periferia constituye la zona de vaporización.

El proceso de desionización del arco es debido, sobre todo, a la presencia del hidrógeno, cuya acción desionizante es unas 7,5 veces superior a la del aire. Este proceso depende también de la intensidad de la corriente que se ha de cortar.

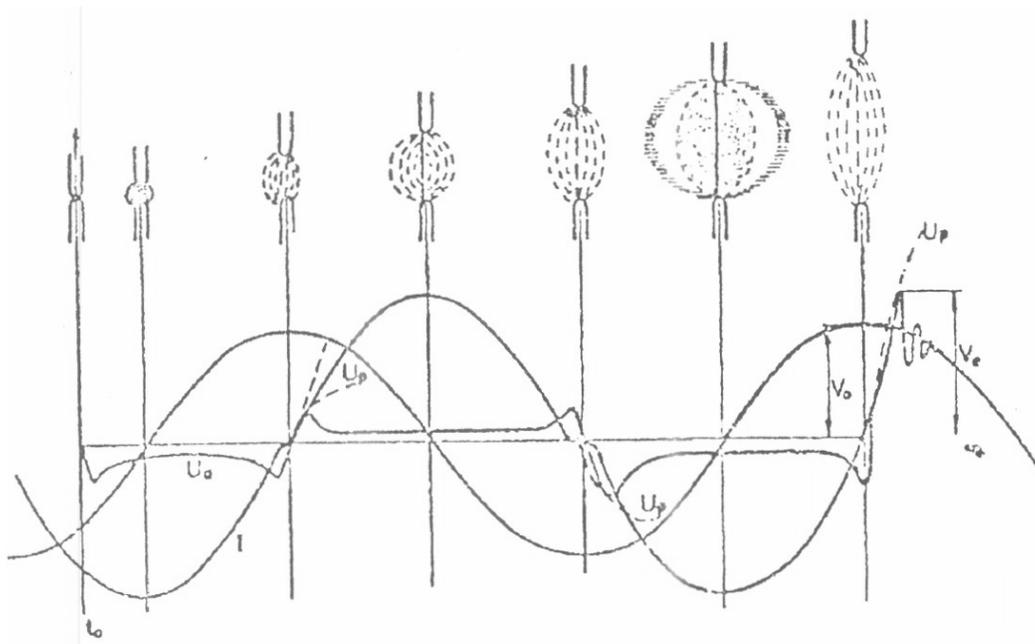


**Figura 14: Representación esquemática del proceso de ruptura en un interruptor en baño de aceite:**

1. Zona de vaporización
2. Vapor saturado
3. Hidrógeno
4. Vapores recalentados

La Fig. 15 muestra el proceso de la ruptura del arco en el seno del aceite, cuando la corriente retrasa con  $90^\circ$  respecto a la tensión, es decir, en las circunstancias más desfavorables, pues en el instante en que el arco se extingue por pasar la corriente por cero, la tensión que reaparece entre los contactos, tiene un valor máximo.

Sea  $I$  la curva característica de la corriente que atraviesa el interruptor y supongamos que la separación de los contactos se produce en el instante  $t_0$ ; entre estos contactos se cebará un arco y entre los bornes del interruptor, tendremos una tensión  $U_a$ , valor que se mantiene sensiblemente constante durante la alternancia de la corriente. Al final de la alternancia cuando la corriente se anula, la tensión del arco aumenta. Durante la alternancia, la introducción de la pequeña calda de tensión  $U_a$  en el arco, no aumenta sensiblemente que continuará siendo senoidal, si ya lo era anteriormente.



**Figura 15: Proceso de la ruptura de un arco en baño de aceite**

Cuando la corriente pasa por el valor cero, se extingue el arco, pero, subsiste entre los contactos de la columna de gases fuertemente ionizados. En este momento se produce una rápida desionización y enfriamiento del canal del arco, fenómenos motivados principalmente por dos causas, ya citadas:

- A. La descomposición de los vapores de aceite que penetran en el canal del arco, y la vaporización del aceite que rodea la bolsa de gases, cuyos valores de descomposición e interno de vaporización son sustraídos al canal del arco.
- B. El elevado valor de la conductividad térmica del hidrógeno.

En el momento en que la corriente se anula, la tensión entre los contactos del interruptor que es muy reducida (caída de tensión en el arco  $U_a$ ), debe pasar al vapor

de la tensión de la red, la cual alcanza su valor máximo. Si la velocidad de regeneración del dieléctrico  $U_p$  es mayor que la velocidad de aumento de la tensión de reestablecimiento  $V_e$  no se perforará la barrera aislante y el arco no volverá a cebarse. Pero si la tensión de reestablecimiento aumenta con mayor velocidad que la de rigidez dieléctrica del medio o lo que es lo mismo, que la tensión de reencendido, se cebará nuevamente un arco que saltará entre los contactos del interruptor hasta el nuevo paso de la corriente por el valor cero, repitiéndose el mismo fenómeno hasta que la separación entre contactos sea suficiente para que la tensión de reencendido permanezca superior a la tensión de reestablecimiento. Esta separación o longitud crítica de ruptura depende, en cada interruptor, de la tensión del circuito, de la intensidad de la corriente y, especialmente, de las velocidades de aumento de las tensiones de reestablecimiento y de reencendido.

Cuando se extingue definitivamente el arco, a causa de la capacidad  $C$  existente entre los bornes del interruptor la tensión en borne no toma inmediatamente el valor de la tensión existente en ese instante, sino que tiende progresivamente a este valor, hasta rebasarlo, pasa por un máximo y, después de unas cuantas oscilaciones amortiguadas, a la frecuencia propia de la red, alcanza definitivamente el valor correspondiente a la tensión de la red.

Durante todo el proceso de ruptura, ha ido aumentando la presión en el interior del recipiente cerrado que contiene el aceite. El incremento de la longitud del arco provoca un aumento de la energía desarrollada, la bolsa de gases aumenta de diámetro, y el aceite rechazado por esta bolsa puede, incluso, llegar a alcanzar la cubierta de la cuba, Como la cantidad de aceite que puede salir es insignificante, los gases desarrollados no disponen de mayor volumen que el volumen primitivo del aire situado sobre el aceite, siendo tanto mayor la presión desarrollada cuanto menor sea el volumen del colchón de aire y más pequeños los agujeros de la salida de los gases.

En resumen, podemos decir que la ruptura bajo aceite presenta las siguientes ventajas respecto a la ruptura al aire:

- Menor longitud del arco.
- Mejor aislamiento entre piezas en tensión y entre estas piezas y masa.

Sin embargo, los inconvenientes son numerosos e importantes:

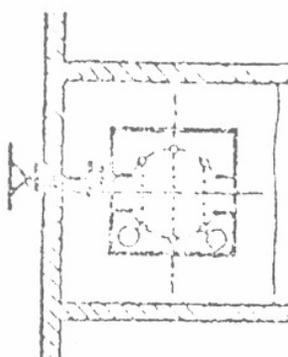
- A. Inflamabilidad del aceite. En el caso de un fallo de ruptura, el aceite puede inflamarse y provocar grandes incendios.
- B. La mezcla de gases y aire puede resultar explosiva y, en caso de inflamarse el aceite, provocar la explosión del interruptor.
- C. La polución del aceite por el carbón producido por el arco. Aunque no afecta sus cualidades desde el punto de vista de la extinción del arco, sí reduce su propiedad dieléctrica, ensucia los contactos y los diferentes elementos y aislantes sumergidos en el aceite y obliga, por lo tanto, a periódicas visitas de inspección y limpieza de los contactos.
- D. No son adecuados para la ruptura de corrientes continuas.

**Sistemas de Accionamiento de los Interruptores en Baño de Aceite:** Estos interruptores se construyen para accionamiento longitudinal (Fig. 16) y para accionamiento transversal (Fig. 17), En ambos casos se dejan libres ambos extremos del eje; uno de estos extremos lleva el volante u otro dispositivo de accionamiento, y

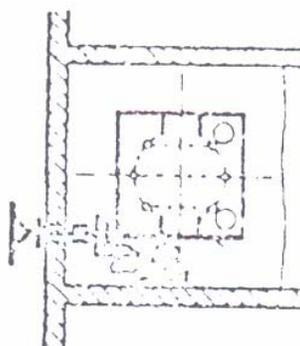
el otro extremo está destinado al montaje de los elementos de contacto para los dispositivos de señalización y corte de la corriente de mando del interruptor.

El mando de estos interruptores puede realizarse de tres formas:

- A. Conexión y desconexión manual, con trinquete de retención.
- B. Conexión manual y desconexión automática por medio de electroimán.
- C. Conexión y desconexión a distancia.



**Figura 16: Representación esquemática de un interruptor en baño de aceite para accionamiento longitudinal**



**Figura 17: Representación esquemática de un interruptor en baño de aceite para accionamiento transversal.**

### 2.5.3 Interruptores de Pequeño Volumen de Aceite

Si se prescinde del aceite como aislante, sustituyéndolo por un recipiente por fase de material aislante y se limita el volumen del aceite al justamente preciso para llenar la cámara de ruptura, más una reserva para ir renovando el que se consume, tendremos, en esencia, el dispositivo de corte presentado y desarrollado con el nombre de interruptor de pequeño volumen de aceite.

Sin embargo, el amplio desarrollo actual de este tipo de interruptor, procede de los perfeccionamientos en los dispositivos de control del arco utilizados en los interruptores en baño de aceite.

En un principio la técnica del interruptor de pequeño volumen de aceite se aplicó al corte de muy altas tensiones, para las cuales, los interruptores, entonces clásicos, en baño de aceite llegaban a tener dimensiones verdaderamente desorbitadas (por ejemplo, un interruptor para 220 KV contenía 50 toneladas de aceite, tensiones más bajas).

Esencialmente, el interruptor de pequeño volumen de aceite, por cada polo, de un vástago móvil de contacto que se introduce en el eje del contacto fijo ambos contactos están contenidos en una cámara de ruptura, de material aislante que, muchas veces está subdividida en varias cámaras.

El arco se desarrolla en los gases comprimidos que, posteriormente se refrigeran lo suficiente para desionizarlos e impedir de esta forma el reencendido del arco después del paso de la corriente por su valor nulo. Estos gases comprimidos están producidos por el mismo arco y no por un compresor exterior, como en el caso de los interruptores de aire comprimido; son, en nuestro caso, productos de

descomposición del aceite bajo el efecto del calor producido por la proximidad del arco.

Por lo tanto, resulta esencial que la presión sea elevada en la cámara para asegurar las cualidades dieléctricas del espacio de corte. Pero también es esencial que el arco no se mantenga en el mismo gas y que los gases producidos puedan ceder el sitio a otros nuevos; todo ello, deformando el arco, fraccionándolo, refrigerándolo y, finalmente, desionizándolo. Este efecto se obtiene disponiendo orificios de escape para los gases, orificios calibrados para que se produzca el soplado en cuestión, manteniendo la presión en la cámara a un valor conveniente y durante suficiente tiempo.

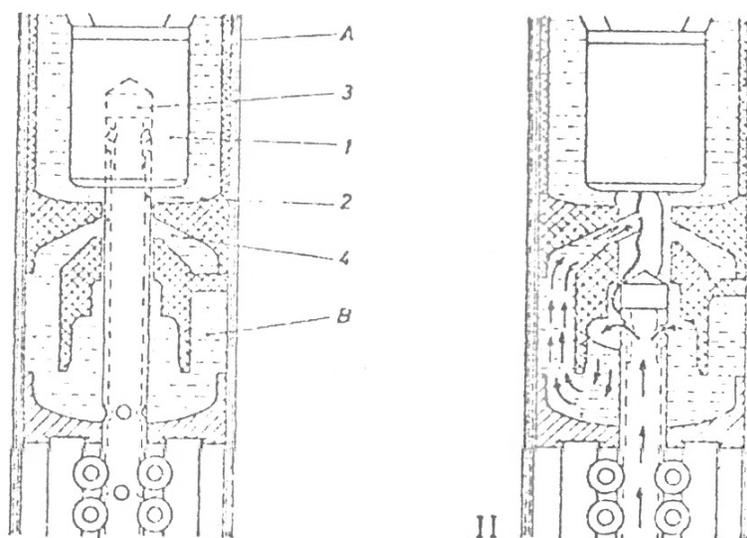
Para fijar mejor los conceptos vamos a descubrir dos procedimientos de apagado del arco. El primero ha sido desarrollado por AEG en sus interruptores de pequeño volumen de aceite para tensiones de servicio de  $W_a$  30KV. La desconexión se produce en el interior de una cámara aislante llena de aceite, el contacto superior es móvil y el inferior fijo.

Durante el proceso de desconexión, el contacto móvil se saca del contacto fijo y, como consecuencia, se forma un arco eléctrico que, al calentar el aceite circundante origina gases de aceite; estos gases ejercen la misma presión por ambas caras del pistón diferencial que, hasta ahora, está comprimido hacia abajo por la acción del muelle.

Como en la cámara inferior, el pistón tiene más superficie que en la superior, se ejercerá mayor esfuerzo sobre esta cara inferior y el pistón se pondrá en movimiento hacia arriba impulsando, a través de unas toberas, un potente chorro de aceite fresco que se proyecta en los puntos de indicación del arco produciendo un enérgico efecto de enfriamiento, con lo que el arco se apaga muy rápidamente.

Veamos el procedimiento de corte adoptado por Siemens (Fig. 18). La ruptura del arco se hace mediante la combinación de un efecto extintor independientes del valor de la corriente que se ha de cortar y otro efecto que depende de esta corriente.

El efecto extintor independiente de la corriente, se produce mediante el movimiento hacia abajo del contacto móvil durante la desconexión. El aceite que se encuentra en la parte inferior de la cámara de extinción es impulsado por el interior del contacto móvil hacia el arco y ataca directamente los puntos de origen del arco en el contacto, reforzando así el efecto de la corriente de aceite producida por el arco mismo. Con este proceso basta para interrumpir corrientes capacitivas sin que se produzcan reencendidos.



**Figura 18: Corte esquemático de la cámara de ruptura de un interruptor Siemens. de pequeño volumen de aceite:**

I.- Posición de interruptor conectado. II.- Posición de interruptor en curso de desconexión.

A. Cámara superior.

B. Cámara inferior.

1. Contacto fijo.

2. Contacto móvil.

3. Puma de material aislante.

4. Tobera del canal anular.

El efecto extintor de origen propio, es decir, dependiente de la intensidad de corriente, se consigue mediante un dispositivo de nueva creación sencillo y sin partes sometidas a movimientos. Mediante una tobera anular que consta de dos partes se subdivide la cámara en los espacios A y B. Entre ambas partes de la tobera se forma un canal anular que tiene algunos milímetros de altura en su punto más estrecho. Al desconectar se arrastran el contacto móvil y el arco desde el espacio A al espacio B.

Los gases que se desprenden en el recinto A, salen libremente hacia arriba, pasando por el contacto fijo. En el recinto B se forma una burbuja de gas a alta presión; como consecuencia de la diferencia de presiones existente entre los recintos A y B, fluye una mezcla de gas y aceite desde el recinto B, a través del canal anular hacia la abertura de salida, la cual deja libre el contacto móvil, que se mueve hacia abajo. La circulación cesa cuando se han equilibrado las presiones en ambos recintos. Debido a esta circulación del medio extintor, el arco se refrigera intensamente y se desioniza totalmente a distancia entre los contactos fijo y móvil, de forma que el arco se extingue la primera vez que la corriente pasa por su valor cero, después de entrar la punta de la varilla en el recinto B, evitándose de esta forma, con seguridad, los reencendidos.

Cualquiera que sea la disposición que se utilice para extinguir el arco, los interruptores de pequeño volumen de aceite tienen una cualidad fundamental: son autorreguladores, es decir, que cuanto mayor es la corriente que se ha de cortar mayor es la cantidad de gases producida y, por lo tanto, más enérgica es la acción extintora de estos gases.

Por lo tanto, desde el punto de vista de su capacidad de ruptura, se adopta por sí mismo al valor de la corriente que se ha de cortar, y esto hasta el valor máximo de

esta corriente. En lo que se refiere a dicho valor máximo, no está limitado más que por la aptitud de la envoltura para resistir la presión interna de los gases, y por la cantidad de aceite del que se dispone en la inmediata proximidad del arco (volumen de la cámara).

Esta observación nos conduce a uno de los progresos más importantes realizados en estos últimos años. Efectivamente, el empleo de resinas armadas con fibras o de tejidos de vidrio y, mejor todavía, de arrollamiento de filamentos de vidrio (es decir, arrollamiento dirigido de hilo de vidrio según la orientación deseada para resistir mejor las sobretensiones), ha permitido multiplicar por un factor de por lo menos 2, la presión máxima tolerable en las cámaras y, como consecuencia, la capacidad de ruptura.

Otras ventajas de los interruptores de pequeño volumen de aceite, son las siguientes:

- A. Desionización rápida del trayecto del arco (la duración de ruptura excede muy raramente de 0,002 segundos).
- B. Caída de tensión en el arco excepcionalmente baja, por lo que no hay que temer sobretensiones en el momento de la extinción.
- C. Mínima disipación de energía.
- D. Muy limitada carbonización del aceite.
- E. Reducido deterioro de los contactos como consecuencia de la pequeña disipación de energía.

**Dispositivos de Ruptura:** La carrera que debe tener el vástago móvil de contacto para asegurar la ruptura, evidentemente es función de la tensión en los bornes de la ruptura. No es completamente proporcional a esta tensión y se puede admitir que varía como  $\sqrt{U}$ .

Por otro lado, si queremos cortar el arco rápidamente, es necesario que esta carrera sea recorrida muy rápidamente, por ejemplo en 0.02 segundos.

Cuando la tensión crece, se llega muy rápidamente a precisar de vástagos de contactos de gran longitud, por lo tanto de masa elevada (para una sección dada, esta impuesta por la corriente nominal), y de una velocidad media muy grande. Esto resulta prácticamente irrealizable para una tensión elevada por cámara. 245 KV por ejemplo.

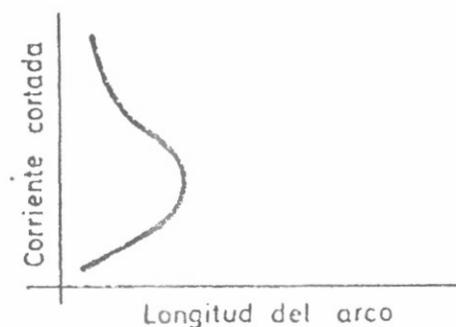
La solución está en disponer varias cámaras de ruptura en serie. Efectivamente, se puede demostrar que es necesaria una energía  $n^2$  veces más pequeñas para proporcionar a  $n$  vástagos idénticos de longitud  $L$ , una velocidad  $\frac{v}{n}$  que para proporcionar a un vástago de la misma sección y de longitud  $L$ , una velocidad  $v$ , suponiendo que la distancia total de ruptura es la misma en los dos casos y que está recorrida en el mismo tiempo. Por lo tanto, la ganancia de energía que aporta la ruptura múltiple es importante ya que, según hemos visto, esta energía varía como  $\frac{1}{n^2}$  a igualdad de las restantes condiciones.

Por esta razón, aunque en el pasado se construyeron interruptores de una sola cámara hasta 245 KV de tensión de servicio, actualmente, los constructores se inclinan por la ruptura múltiple para aún más bajas tensiones de servicio. Actualmente se adopta una tensión nominal para cámara comprendida entre 70 y 145 KV.

La cámara de ruptura múltiple exige un reparto correcto de la tensión entre los espacios de ruptura, lo que se consigue por medio de condensadores.

Por lo tanto, podemos decir que actualmente se utiliza casi exclusivamente la cámara de extinción por autosoplado que, para altas tensiones de servicio, es una cámara múltiple. Realmente, el término “soplado” está mal elegido, ya que se trata, en realidad, de una “expulsión” o “eyección” de los gases formados.

Las cámaras de extinción se denominan de autosoplado porque el propio arco eléctrico suministra la energía necesaria para su extinción. Esta energía crece con la corriente que se ha de interrumpir y su capacidad de ruptura límite está relacionada con su robustez mecánica y a los fenómenos exteriores que acompañan el corte. Para ciertas corrientes medias, la energía desarrollada es pequeña y es preciso, en estos casos, alargar el arco durante más tiempo para obtener su extinción. La curva de la Fig. 19 muestra la variación de la longitud del arco en función de la corriente cortada puede apreciarse que existe una zona crítica para la cual, la longitud de corte pasa por un máximo, que puede determinar la carrera de los contactos móviles.



**Figura 19: Curva de variación de la longitud del arco, en función de la corriente de ruptura, de un interruptor de pequeño volumen de aceite.**

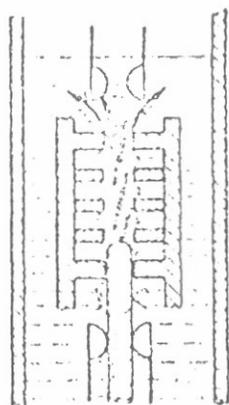
Se puede decir que en los interruptores por autosoplado, la duración del arco varía con el valor de la corriente cortada y que la construcción de estos aparatos es un compromiso entre la longitud del arco crítica y la capacidad de ruptura límite: cuando se reduce la primera, se reduce también la segunda y recíprocamente.

Como estos aparatos no precisan ninguna fuente de energía exterior, su órgano de mando no tiene más que suministrar la energía mecánica necesaria, para poner en movimiento los contactos móviles.

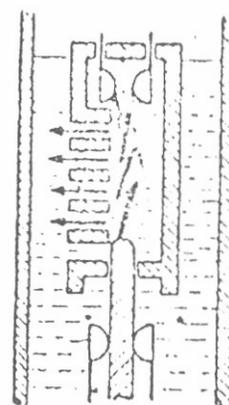
En las cámaras de ruptura, el soplado puede ser longitudinal y transversal.

En las cámaras con soplado longitudinal o axial (Fig. 20) los gases bajo presión aseguran un barrido longitudinal del arco; debido a la reducida sección de evacuación de gases, la presión en la cámara es generalmente elevada, incluso con pequeñas corrientes. Todas las reacciones son axiales lo cual, para los interruptores del tipo suspendido es una importante ventaja.

En las cámaras con soplado transversal (Fig. 21), los gases escapan por aberturas practicadas sobre una o varias generatrices de la envoltura. Debido a la mayor sección de los orificios, la presión es más débil que en el caso anterior, lo que permite el corte rápido de corrientes muy elevadas. Su aptitud para cortar las corrientes débiles es menor, lo que limita su empleo a las tensiones medias.

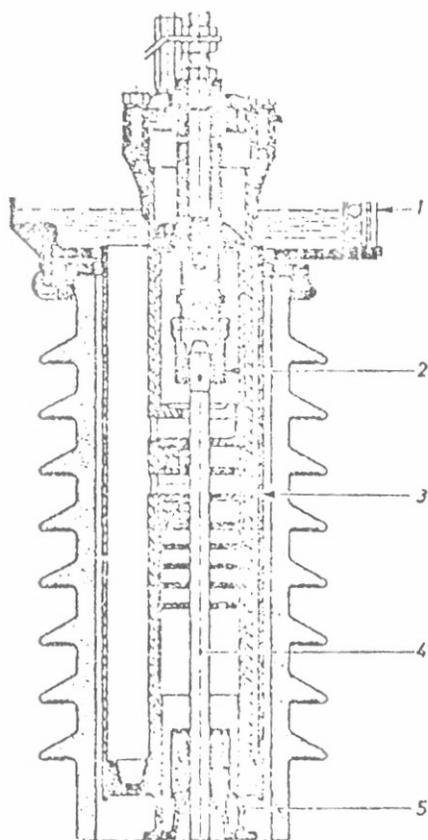


**Figura 20: Cámara de ruptura de Soplado Longitudinal**



**Figura 21: Cámara de ruptura de soplado transversal.**

Moderadamente, se han reunido las ventajas del soplado longitudinal (corte rápido de pequeñas corrientes) con las del soplado transversal (corte rápido de corrientes elevadas), realizando cámaras de soplado mixto. En los interruptores provistos de estas cámaras, y a partir del contacto fijo se sitúan primero las cámaras de soplado transversal, después las de soplado longitudinal. En la Fig. 22 se representa el conjunto de las cámaras de extinción de un interruptor CEM-GARDY con dispositivos de soplado mixto; en esta ejecución se han graduado los orificios de soplado lateral de manera que existen, en total, tres zonas de soplado: los interruptores de esta clase se denominan, en general, traductores.



**Figura 22: Cámara de ruptura de un interruptor CEM-GARDY, de pequeño volumen de aceite, de soplado mixto**

- 1) Nivel de aceite.
- 2) Contacto deslizante superior (Fijo).
- 3) Cubierta aislante.
- 4) Espiga de contacto móvil.
- 5) Contacto deslizante inferior (móvil).

Se han ideado también cámaras de ruptura más perfeccionadas en las que la duración del arco es muy breve, prácticamente independiente de la corriente cortada. En el dispositivo transas de la firma CEM-GARDY se combinan también las dos

formas de soplado, pero de manera completamente distinta: las cámaras son de dos formas distintas, que están distribuidas alternativamente, de manera que en un tipo de cámara, el soplado se realiza a través del orificio longitudinal por donde pasa el contacto móvil y. en el otro tipo de cámara el soplado es lateral aunque no exactamente transversal ya que está distribuido por toda la periferia y. por lo tanto, interesa solamente la circunferencia exterior del dispositivo de ruptura.

En las cámaras de soplado longitudinal se puede lograr una elevada presión de los gases de soplado, proporcionando al espacio de ruptura la rigidez dieléctrica deseada, en las cámaras de soplado periférico, el arco se diluye y aplasta y se lanza hacia el exterior, refrigerándolo.

A veces, y para obtener una duración mínima del arco, independientemente además del valor de la corriente cortada, se emplean cámaras de impulsión mecánica, como la que hemos representado en la Fig. 18 de un interruptor de AEG. En estas cámaras, el aceite se pone a presión por medio de un pistón sobre el cual actúa un órgano mecánico, y se proyecta de esta forma sobre el trayecto del arco. Los interruptores realizados según este principio, han dado excelentes resultados, pero la gran energía exterior que debe suministrarse para hacer frente a la contrapresión debida al arco, han limitado su construcción a tensiones de servicio medias y capacidades de ruptura no muy elevadas.

La combinación de una cámara de corte por autosoplado y de una cámara de corte auxiliar de impulsión mecánica permite obtener, de forma segura y económica, el corte regular de todas las corrientes en este caso, la energía exterior a desarrollar queda limitada al corte de las corrientes medias en la zona crítica.

**Sistemas de Accionamiento:** En los interruptores de pequeño volumen de aceite, los principales sistemas de accionamiento son los siguientes:

- a) **Por acumulación:** En este sistema se aplica sobre el mecanismo de cierre, una energía acumulada previamente, por ejemplo, la acción de un resorte que ha sido armado con anterioridad manualmente o por medio de un motor eléctrico.
  
- b) **Por aire comprimido,** en cuyo caso el mecanismo de accionamiento puede ser gobernado directamente a mano con ayuda de una válvula o, lo que es más frecuente, por medio de una electroválvulas
  
- c) **Por líquido a presión** que, lo mismo que en el caso anterior, puede gobernarse directamente a mano, o por medio de una electroválvula.

#### **2.5.4 Interruptores de Aire Comprimido**

Los interruptores neumáticos llamados también interruptores de aire comprimido, utilizan la propiedad que tiene el aire a presión de extinguir el arco, al expansionarse. El principio de corte por soplado de aire consiste en enviar una fuerte corriente de aire al centro del arco que, por esta causa, se desioniza, después del paso de la corriente por cero, por lo general, esta corriente de aire es provocada por la expansión de cierta cantidad de aire, que previamente se ha comprimido en un depósito independiente. Es decir, que en los interruptores neumáticos, el aire comprimido se emplea, no solamente para el mando de estos interruptores, sino también para el apagado directo del arco que se forma al abrirse los contactos del interruptor.

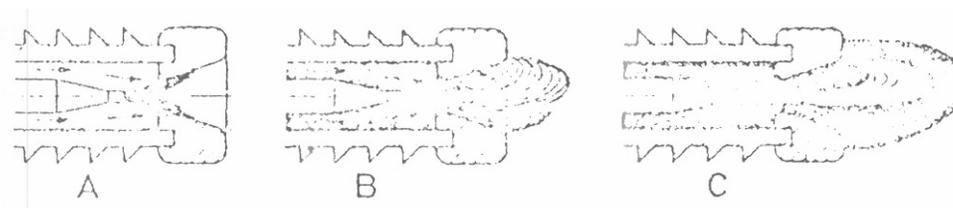
El corte del arco por aire comprimido puede utilizarse para todas las tensiones y para todas las potencias de ruptura, tanto para interruptores de montaje exterior como de montaje interior. Por otro lado: presenta menos probabilidades de peligro de

incendio que los interruptores que utilizan el aceite como medio de extinción del arco. Entre los inconvenientes de este tipo de interruptores, pueden enumerarse:

- a) La necesidad de una instalación de aire comprimido con los correspondientes compresores, depósitos y tuberías, lo cual en los caso de instalaciones con pequeñas potencias de ruptura, implican unos importantes gastos de costo inicial.
- b) Los inconvenientes inherentes al propio aire comprimido, es decir, el mantenimiento que llevan consigo los compresores, las canalizaciones y, especialmente las válvulas, así como la necesidad de disponer en cada momento, de aire suficiente seco y limpio.

Sin embargo, la facilidad de adaptación de estos interruptores a todos los problemas inherentes a la explotación de las redes a muy alta tensión y su seguridad de puesta a punto, los hacen preferible a los interruptores de pequeño volumen de aceite, cuando las tensiones son muy altas o muy elevadas las potencias de ruptura. En la Fig. 23, se muestra esquemáticamente el proceso de extinción de un arco eléctrico por medio de un chorro de aire comprimido: un cilindro aislante lleva una tobera metálica que constituye uno de los contactos del interruptor; el otro contacto está constituido por un perno o espiga que, al desconectar el interruptor, se retira.

El arco eléctrico formado en el momento de la separación de los contactos es soplado hacia fuera por la acción del aire comprimido, enérgicamente refrigerado y apagado después del primero o del segundo semiperíodo, cuando la corriente pasa por un valor nulo. La extinción del arco se obtiene gracias a la alta rigidez dieléctrica del aire comprimido suficientemente seco, y a la gran velocidad de circulación de este aire por toberas apropiadas, constituidas muchas veces por los propios contactos.



**Figura 23: Proceso de extinción de un arco eléctrico por medio de un chorro de aire comprimido.**

- A. Arco eléctrico durante el valor máximo de la corriente.
- B. Arco eléctrico poco antes del paso de la corriente por cero.
- C. Arco eléctrico inmediatamente después de la desconexión.

El arco desarrollado entre los contactos calienta considerablemente el aire que se encuentra en la tobera, este aire se dilata y se forma una contrapresión que se opone al paso del aire de soplado.

La contrapresión formada es tanto menor cuanto mayor es la apertura de la tobera, y tanto mayor cuanto más elevada es la energía del arco. En el momento en que la corriente pasa por su valor máximo, la contrapresión, debida al calentamiento del aire de soplado, es también máxima y el caudal de aire de soplado es mínimo; el soplado puede llegar a anularse e, incluso, invertirse su sentido, si la contrapresión en la tobera se hace superior a la presión en el depósito de aire comprimido. Por el contrario, cuando la corriente pasa por cero, el caudal de aire soplado es máximo y máximo también, por lo tanto, el efecto extintor de la corriente de aire.

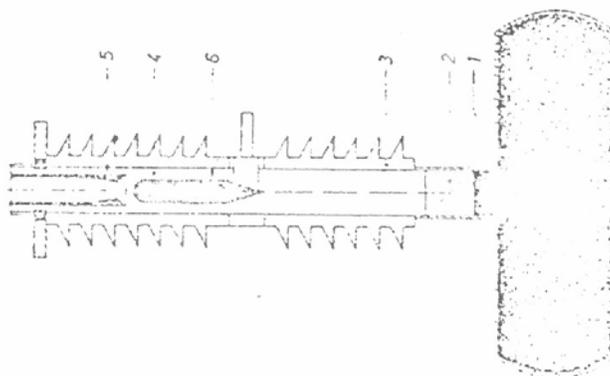
Por otra parte, incluso admitiendo que no haya retroceso del aire desde la tobera al depósito, el arco formado, por conductividad térmica y por radiación, ioniza parcialmente el aire de la tobera, no solamente en la parte donde se forma el arco, sino también en los alrededores.

A medida que la corriente se aproxima a cero, disminuye la energía del arco y aumenta el caudal de aire, de forma que disminuye la profundidad de aire necesaria en la tobera, por encima del arco, como consecuencia, el aire que rodea el arco se desioniza progresivamente

Si en las proximidades del paso de la corriente por su valor cero es tal que, durante el restablecimiento de la tensión, el aire de la tobera está suficientemente desionizado para que no pueda producirse el recebado del arco, este arco se extinguirá definitivamente. Por lo tanto, la capacidad de ruptura de un interruptor neumático es tanto mayor cuanto mayor es la presión de aire de soplado y cuanto mayor es la sección de la apertura de la tobera.

**Dispositivos de Ruptura:** El aire a presión que, como hemos visto, es el agente de extinción del arco, puede enviarse a éste por soplado axial o longitudinal y por soplado transversal.

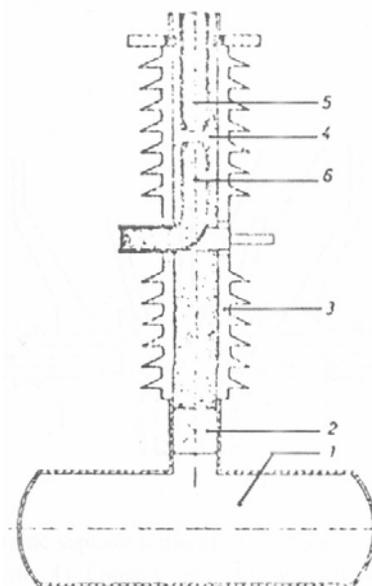
Veamos como está constituida una cámara de ruptura de soplado axial (Fig. 24). En caso de desconexión el aire almacenado en el depósito 1, es expansionado al aire libre por la apertura de una válvula 2, y conducido por un aislador hueco 3, hasta la cámara de ruptura 4, el contacto móvil 5, es hueco y tiene la forma de una tobera. El arco formado entre este contacto y el contacto fijo 6, está en gran parte situado en el cuello de la tobera y, de esta forma, se encuentra sometido a la acción de un chorro de aire que se desplaza a la velocidad del sonido y cuya presión es función directa de la presión en el depósito de almacenamiento del aire comprimido.



**Figura 24 Cámara de ruptura de soplado axial:**

- 1) Depósito de aire comprimido.
- 2) Válvula.
- 3) Aislador hueco
- 4) Cámara de ruptura.
- 5) Contacto móvil.
- 6) Contacto fijo

Esta disposición puede perfeccionarse, utilizando dos contactos huecos por ruptura, tal como se representa en la Fig. 25 de esta forma, se dispone de un mayor caudal de aire para la ruptura y de una buena simetría entre el contacto móvil y el contacto fijo, simetría que resulta muy favorable para la solución de los problemas dieléctricos que se presentan a causa de la tensión existente entre los contactos abiertos.



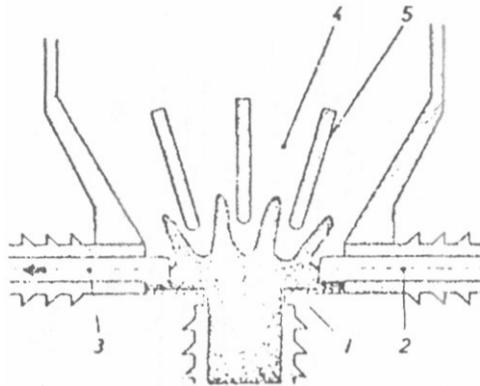
**Figura 25: Cámara de ruptura perfeccionada de soplado axial:**

- 1) Depósito de aire comprimido.
- 2) Válvula
- 3) Aislador hueco.
- 4) Cámara de ruptura.
- 5) Contacto móvil.
- 6) Contacto fijo.

La disposición de aire de la Fig. 24 se adapta generalmente para interruptores de características medias, mientras que las cámaras de ruptura de elevadas características están realizadas según el principio expresado en la Fig. 25.

En los interruptores de soplado axial, un estudio preciso de las condiciones de soplado demuestra que éste alcanza su máxima eficacia para una distancia bien determinada entre la tobera que constituye el contacto móvil y el vástago que forma el contacto fijo.

En la Fig. 26, se muestra muy esquemáticamente el principio del soplado transversal. En este caso, el arco es soplado en una gran longitud entre pantallas aislantes que lo subdividen en varios arcos parciales, ayudando de esta forma a su extinción.



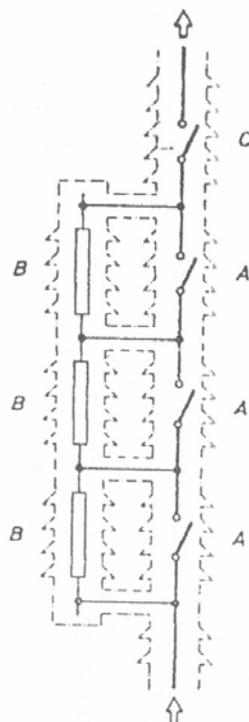
**Figura 26: Cámara de ruptura de soplado transversal:**

- 1) Cámara de ruptura.
- 2) Contacto fijo.
- 3) Contacto móvil.
- 4) Cámara de extinción del arco.
- 5) Pantallas aislantes apagachispas

Los dispositivos de rupturas estudiados hasta ahora son simples. para tensiones muy altas se utilizan generalmente dispositivos de ruptura múltiples mediante el reparto de la tensión que debe cortarse. Vamos a estudiar resumidamente los dispositivos de ruptura múltiples más utilizados en la práctica.

En el dispositivo de ruptura múltiple serie (Fig. 27) los dispositivos de corte a) están shuntados por las resistencias b) y se monta además un dispositivo de corte auxiliar c) que, a su vez, puede ser de ruptura simple o múltiple para simplificar la

explicación supondremos que es de ruptura simple. En la maniobra de desconexión del interruptor, abre primero A y después C; transcurriendo cierto intervalo de tiempo, se vuelve a cerrar A, permaneciendo abierto C. el dispositivo auxiliar C asegura el aislamiento en la posición D “interruptor abierto”, así como el cierre de este mismo interruptor. Los contactos de A y C deben preverse para soportar la corriente nominal, así como todas las sobrintensidades.

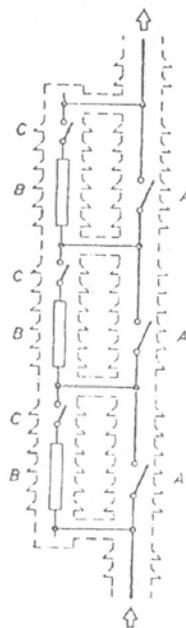


**Figura 27: Dispositivo de ruptura múltiple serie:**

- A) Dispositivos de corte principales.
- B) Resistencias amortiguadoras.
- C) Dispositivos de corte auxiliar.

El dispositivo de ruptura múltiple paralelo (Fig. 28) está constituido, como el anterior, por los dispositivos de corte principales A, resistencia de shuntado B y dispositivos de corte auxiliares C; pero en este caso, los dispositivos de corte

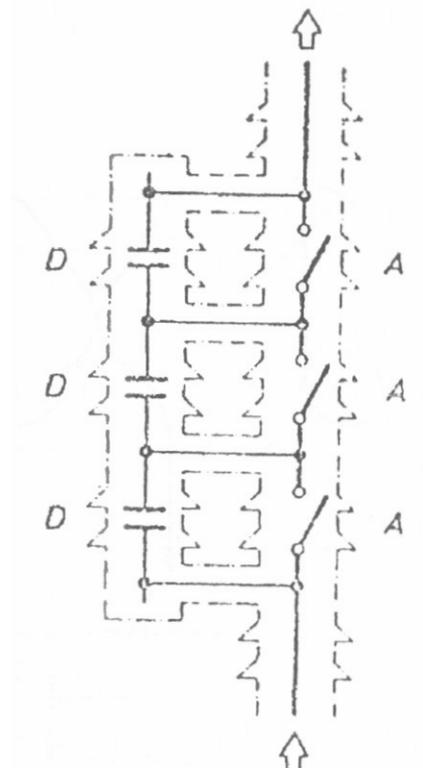
auxiliares están montados en serie con cada resistencia de shuntado y, por lo tanto, en paralelo con los contactos principales A. cuando el interruptor está abierto, los contactos A y C permanecen también abiertos, y la rigidez dieléctrica entre la entrada y la salida del interruptor, se obtiene manteniendo éste bajo presión. Cuando se cierra el interruptor, solamente se cierran los contactos A, permaneciendo abiertos los C. si se quiere desconectar el interruptor, los contactos auxiliares C se cierran, insertando las resistencias de shuntado B y después, se abren los contactos principales A, cuando se han abierto estos contactos, se abren también los contactos C. con esta disposición, únicamente los contactos principales A deben preverse para asegurar el paso de la corriente nominal y soportar las sobreintensidades.



**Figura 28: Dispositivo de ruptura múltiple paralelo**

- A) Dispositivos de corte principales.
- B) Resistencias amortiguadoras.
- C) Dispositivos de corte auxiliar

Cuando la limitación de sobreintensidades no exija el empleo de resistencia y para potencias de corte limitadas, el reparto de la tensión puede realizarse por medio de condensadores, tal como lo expresa en la Fig. 29, en este caso, no es necesario el empleo de dispositivos auxiliares de corte.



**Figura 29: Dispositivo de ruptura múltiple paralelo con condensadores**

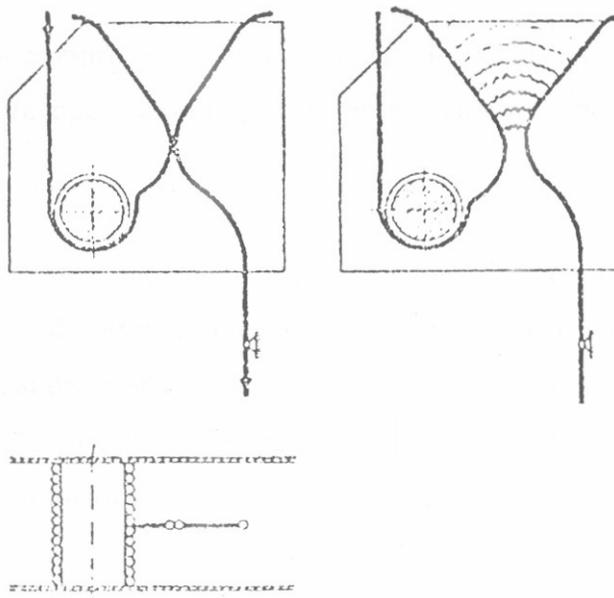
A) Dispositivos de corte.

D) Condensadores.

### 2.5.5 Interruptores de Soplado Magnético

En la Fig. 30 se muestra muy esquemáticamente la constitución de un aparato de corte de soplado magnético. Primeramente se conduce la corriente hasta una bobina de pocas espiras de núcleo de hierro y, posteriormente, al aparato de corte, que está situado en el campo magnético que engendra la corriente en el núcleo de hierro.

Si al abrir los contactos se produce un arco eléctrico. éste resulta estirado por la fuerza que sobre él ejerce el campo magnético, siempre que las líneas de fuerza estén convenientemente dirigidas. A causa de esta acción, el arco eléctrico se alarga hasta romperse y apagarse.



**Figura 30: Principio del soplado magnético**

Descubriremos dos tipos de interruptores de soplado magnético en este principio. Estos tipos son:

- Interruptor De-Ion de ACEC.
- Interruptor Solenarc de Merlin Gerin.

**Interruptor DE-ION de ACEC:** Se construyen para tensiones de servicio de 6 KV y 15 KV y para intensidades nominales de 1250 A y de 2000 A.

El dominio de aplicación de estos interruptores solamente está limitado por sus características de corte. De forma general, se puede decir que su utilización está indicada en las centrales eléctricas y en las estaciones transformadoras y de distribución. Una ventaja que se debe tener en cuenta es que se trata de aparatos completamente autónomos, ya que no necesitan ni de aceite ni de aire comprimido.

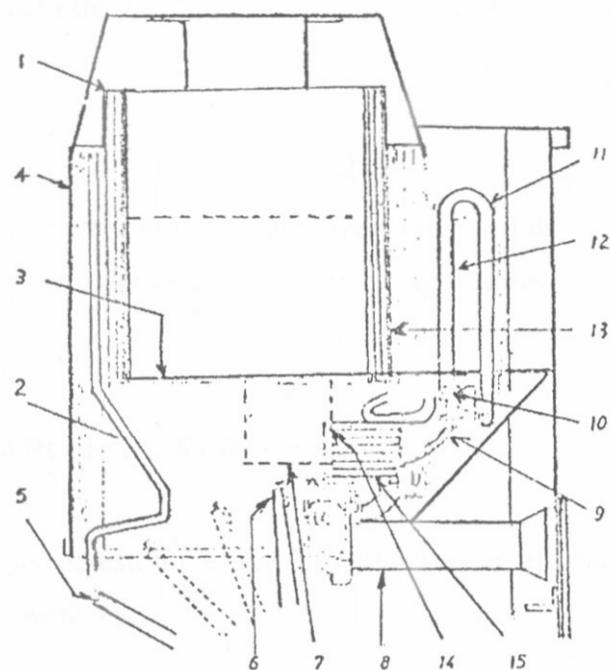
Este interruptor comprende un carro provisto de ruedas para su desplazamiento, que constituye la estructura que soporta las diferentes partes esenciales del interruptor, es decir:

- El mecanismo de conexión que puede equiparse con mando electromagnético, mando manual de reserva de energía o, en otros casos, con mando neumático. El mando manual de reserva de energía es de enganche libre, o sea independiente del operador, y permite la conexión a distancia y, eventualmente, una maniobra de reenganche automático.
- El mecanismo de desenganche libre que puede estar accionados por relés de baja tensión, de sobrecarga o de tensión mínima.
- Seis atravesadores, equipados con tulipas de conexión y que soportan los contactos fijos y móviles.
- Los móviles magnéticos que sirven también de soporte a las bobinas y a las cámaras de soplado.

- Las pantallas metálicas puestas a tierra que impiden el acceso a las piezas bajo tensión. Es de notar la pared metálica horizontal que separa netamente las partes de alta y de baja tensión del aparato.

Veamos ahora, con ayuda de la Fig. 31, cómo se realiza el proceso de ruptura. En el momento de separación de los contactos, el arco se estira horizontalmente entre el contacto apagachispas fijo y el contacto apagachispas móvil. Bajo la acción combinada de los efectos térmicos y electromagnéticos, el arco sube en la cámara de soplado y se engancha inmediatamente a la placa de guía de arco (15), al cuerno posterior de guía de arco (13) y, finalmente, al cuerno anterior del cuerno de arco (2). Este arco se subdivide en dos arcos en serie, de los que uno de ellos shunta la bobina de soplado (11) que, por lo tanto, es atravesada por una parte de la corriente que se ha de cortar. El flujo magnético que se produce, atraviesa el núcleo (12), las dos armaduras polares (3), se cierra en el aire a través de la cámara de soplado situada entre las dos armaduras polares (3), y actúa sobre el arco. Cuando la caída de tensión en el arco que shunta la bobina de soplado, es superior a la caída de tensión en esta última, se apaga este arco y la bobina de soplado se inserta en serie en el arco que subsiste.

A partir de este momento, como la bobina de soplado está recorrida por la corriente que se ha de cortar, el campo magnético y consiguientemente la intensidad de soplado, es proporcional a la corriente que se ha de cortar. El arco solicitado por este campo, sube por la cámara de soplado y los extremos del arco se desplazan rápidamente a lo largo de los cuernos de guía de arco. Gracias a los tabiques cerrados por las placas (1), de material refractario especial, el arco es fuertemente alargado, y refrigerado. De ello resulta un aumento importante de la tensión del arco y, por consiguiente, una mejora del factor de potencia del circuito, lo que facilita extraordinariamente la extinción del arco



**Figura 31: Cámara de soplado del interruptor de soplado neumático ACEC, tipo DE-ION:**

1) Placa aislante refractaria. 2) Cuerno anterior de guía de arco. 3) Armadura polar del circuito magnético. 4) Coraza de material aislante. 5) Conexión del cuerno anterior (unida a la parte fija del contacto móvil). 6) Contacto móvil apagachispas. 7) Contacto fijo apagachispas. 8) Pasatapas superior. 9) Conexión de unión de la bobina de soplado al contacto rijo. 10) Tulipa de conexión de la bobina de soplado al cuerno posterior de guía de arco. 11) Bobina de soplado. 12) Núcleo magnético. 13) Cuerno posterior de guía de arco. 14) Placas aislantes refractarias de transferencia. 15) Placa guía de arco.

Como la intensidad de soplado es proporcional a la corriente que se ha de cortar, la duración del corte de pequeñas intensidades sería mayor que la de las corrientes de cortocircuito, para evitarlo, se ha previsto un dispositivo especial de soplado para que los tiempos de rupturas siempre sean iguales, cuyo principio es el

mismo utilizado en los seccionadores de potencia: un cilindro de soplado y un pistón mecánicamente dependiente de los contactos móviles del interruptor.

Como la corriente se interrumpe siempre que pasa por cero, no existe peligro de sobretensiones, por lo que este interruptor resulta apropiado para la protección de motores y transformadores.

Además este interruptor es insensible a la frecuencia propia de la red, a causa de la gran tensión de arco (que mejora el factor de potencia en caso de ruptura) y de la ausencia de punto de extinción (conductividad residual bastante importante).

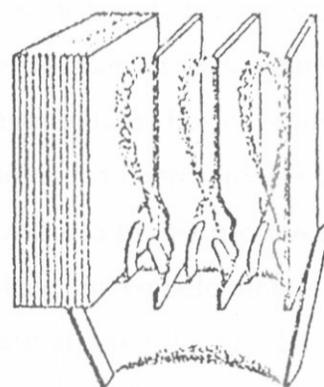
**Interruptor SOLENARC de MERLIN GERIN:** El aspecto exterior de este interruptor está basado en el principio de la ruptura seca, que vamos a estudiar brevemente.

Esencialmente, se trata de una desionización del arco por refrigeración al contacto de materiales refractarios, según un trayecto determinado en una cámara de ruptura adecuada; el medio dieléctrico entre contactos está constituido por aire a la presión atmosférica.

La cámara de soplado del interruptor SOLENARC tiene la forma, expresada esquemáticamente en la Fig. 32. La idea fundamental ha sido reducir, en lo posible, las dimensiones de la cámara, haciendo que el arco ocupe todo el volumen disponible. Para ello la cámara de ruptura está constituida por placas refractarias paralelas entre sí, cada placa lleva en su base una envoltura metálica que presenta, a cada lado de la placa, un cuerno metálico. Las raíces de cada arco elemental, comprendido entre los cuernos consecutivos, se desplazan sobre la envoltura metálica y obligan al arco a describir un bucle en la división de la cámara de ruptura. Desde este instante, el arco constituye, por sí mismo, una bobina de soplado, cuyas espiras se alargan muy

rápidamente bajo el efecto de los esfuerzos electrodinámicos. De esta forma, se obliga a los gases ionizados a penetrar en los intervalos laminares entre las placas refractarias, donde son enérgicamente refrigerados.

A causa de los esfuerzos electrodinámicos desarrollados en las espiras así constituidas, no es necesario prever un soplado importante. Incluso, según se ha demostrado recientemente, resulta posible suprimir totalmente los circuitos magnéticos y sus bobinas, de forma que sería más exacto hablar de interruptor de soplado electrodinámico.



**Figura 32: Cámara de soplado del interruptor de soplado magnético Merlin Gerin. tipo SOLENARC.**

Describiendo el principio de este interruptor y las características generales de la cámara de ruptura, hemos supuesto el arco establecido en esta cámara sobre los cuernos externos. Naturalmente, hay que asegurar la continuidad del circuito eléctrico durante el período de formación del arco, cuando los contactos se han separado, y unir los dos extremos de la cámara, en las entradas y salidas del aparato. Entre la parte posterior de la cámara y el contacto fijo, no hay ninguna dificultad, pues basta con realizar un contacto amovible, que permita la retirada eventual de la cámara.

### 2.5.6 Interruptores en Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>)

Son aparatos que se desarrollaron a finales de la década de los años 60 y cuyas cámaras de extinción operan dentro de un gas llamada hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) que tiene una capacidad dieléctrica superior a otros fluidos dieléctricos conocidos. Esto ha permitido hacer mas compactos y durables los interruptores desde el punto de vista de mantenimiento. En los primeros interruptores se usaron dos presiones, la menor de 3 bars, llenando los tanques y la mayor, de unos 18 bars, dentro de las cámaras de extinción. Esto se hizo con el fin de evitar que al abrir el interruptor en sus contactos, el soplo de gas produjera enfriamiento y éste pasara al estado líquido. Posteriormente se ha usado una sola presión, con lo cual se disminuye el tamaño de los interruptores en cerca de un 40%, y para evitar el uso de la segunda presión se aprovecha la propia presión del gas como un punto de partida y la cámara, al abrir los contactos, tiene un émbolo unido al contacto móvil que al operar comprime el gas y lo inyecta sobre el gas ionizado del arco, que es alargado, enfriado y apagado y pasar la corriente por cero.

Los interruptores pueden ser de polos separados, cada fase en su tanque, o trifásicos en que las tres fases utilizan una misma envolvente. Se fabrican para tensiones desde 115 hasta 800 KV y las capacidades de interrupción varían de acuerdo con el fabricante, llegando hasta magnitudes de 80 Ka, que es un caso muy especial.

Este tipo de aparato pueden librar fallas hasta en dos ciclos y para limitar las sobretensiones altas producidas por esta velocidad, los contactos vienen con resistencias limitadoras.

Las principales averías de este tipo de interruptores son las fugas de gas, que requieren aparatos especiales para detectar el punto de la fuga. En un aparato bien instalado, las pérdidas de gas deben ser inferiores al 2% anual del volumen total del gas encerrado dentro del aparato.

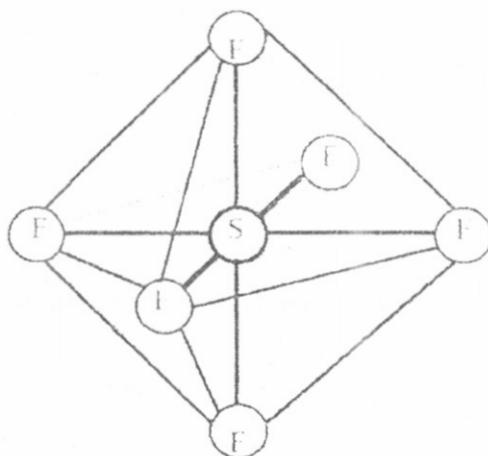
En caso de pérdida total de la presión del gas, o cuando ha bajado la presión del gas, no es conveniente operar un interruptor de SF<sub>6</sub> y debe ser bloqueado el circuito de control de apertura para evitar un accidente.

En los interruptores trifásicos, la apertura de los contactos es simultánea, aunque conviene que haya dispersión de un milisegundo entre los tres polos; se entiende por dispersión a la diferencia en tiempo que existe entre el instante de cierre del primero y el instante de cierre del último polo del interruptor. El uso de la dispersión es importante, pues sirve para reducir las sobretensiones debidas a impulsos por maniobra.

Si el interruptor es de operación monopolar, puede ser beneficioso usar recierre monopolar. Aquí la dispersión puede aumentar hasta 4 milisegundos, cuya magnitud empieza a producir efectos adversos en la magnitud de las sobretensiones por maniobra. El mecanismo de mando de estos interruptores es, generalmente, de aire comprimido.

**Estructura Molecular, Constitución y Propiedades del SF<sub>6</sub> :** El hexafluoruro de azufre es un gas inerte obtenido a través de la síntesis directa del flúor y del azufre fundido. El producto resultante es purificado por lavado, craqueo y secado, luego es licuificado por compresión a fin de eliminar los elementos no condensables tales como el oxígeno, el nitrógeno del aire y el tetrafluoruro de carbón, siendo almacenado finalmente en tanques de acero.

Este compuesto químico del género de los halógenos está constituido por dos elementos no metálicos, los cuales al unirse molecularmente dan origen a un haluro de gran singularidad, debido a su estructura de tipo simétrico, que le proporciona gran estabilidad. En la figura 33 se muestra esta configuración.

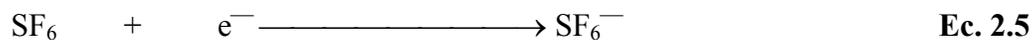


**Figura 33: Configuración Química del SF<sub>6</sub>**

La ecuación química que representa la formación de este compuesto es:



Desde el punto de vista de la distribución potencial interna y la absorción de energía, su disposición es tal, que permite a la molécula de gas capturar electrones libres, por lo que está llamado a ser electronegativo, como se puede ver en la siguiente ecuación:



Es de notar que el salto de la corriente es iniciado por los electrones libres, lo cual significa que las buenas propiedades de captura del gas dan una gran capacidad de aislamiento

El SF<sub>6</sub>, posee una rigidez dieléctrica muy elevada, como se menciono anteriormente, debido fundamentalmente a su propiedad de absorber electrones libres, los cuales transforman a la molécula neutral en un ión negativo. La velocidad de estos en el espacio interelectrónico es bastante lenta, tan lenta como a de los iones positivos, existiendo entonces la posibilidad de que ambos se recombinen para formar una molécula neutral.

Existen otros gases llamados electronegativos, entre los cuales resaltan F12, CO<sub>2</sub>, CCL<sub>2</sub>F<sub>2</sub> y el SF<sub>6</sub>, el cual es el más difundido y utilizado. Por esta razón analizaremos sus propiedades más resaltantes.

### **Propiedades del Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>)**

#### ***Propiedades Químicas.***

El SF<sub>6</sub> es un gas estable e inerte, no reacciona con el agua ni con el ácido clorhídrico, tampoco con el amoníaco. Normalmente no ataca a ningún material, excepto cuando se ve expuesto a descargas eléctricas, como las que pueden ocurrir en las subestaciones encapsuladas y particularmente en la cámara de interrupción que lo usan tanto como dieléctrico como medio de extinción.

Estos productos de descomposición sí atacan a algunos materiales no metálicos, como por ejemplo al vidrio de la capa superficial de la porcelana, esteatita, etc. y a algunos metales, como el cobre, estaño, hierro, tungsteno, etc. Esta acción corrosiva es favorecida tanto por las altas temperaturas como por la humedad, formándose, por

lo general ácidos fluorhídricos. Cuando el gas se enfría, no se combinan de nuevo estas componentes atómicas. Los productos que quedan entonces son comúnmente fluoruros de azufre cobre. Si bien este porcentaje de sustancias es mínimo, resulta necesario en la práctica filtrar al gas, para regenerarlo y llevarlo a -sus condiciones iniciales. Esto se logra por absorción, para lo cual se prestan tamices moleculares, hidróxido de aluminio ( $\text{AlOH}_2$ ), llamado también aluminio activado, hidróxido de potasio, etc.

En vista de que el  $\text{SF}_6$ , en las condiciones de descomposición citadas anteriormente, no ataca ni al aluminio, ni al acero, en particular al acero inoxidable, se ha difundido en la práctica el uso de los dos primeros como recipiente y albergue, tanto de las subestaciones encapsuladas, como de las cámaras de interrupción.

### ***Propiedades Físicas.***

El  $\text{SF}_6$  es unas cinco veces más pesado que el aire, bajo condiciones normales o estándar (760 Torr, 20 °C), 163 litros de este gas pesan 1 Kg. El  $\text{SF}_6$  es inodoro, incoloro e incombustible. El  $\text{SF}_6$  pasa directamente de la fase sólida a la gaseosa, y no existe en forma de líquido sino bajo presión. En las subestaciones encapsuladas y en los interruptores de potencia hay que dispensarle especial cuidado a la temperatura ambiente, pues estando sometido el gas a presión (hasta 18 bar) este puede licuar a partir de 10 °C.

Los valores límites que se han establecido en la práctica son los siguientes:

6,1 bar hasta 25 °C bajo cero.

11,2 bar hasta 5 °C bajo cero.

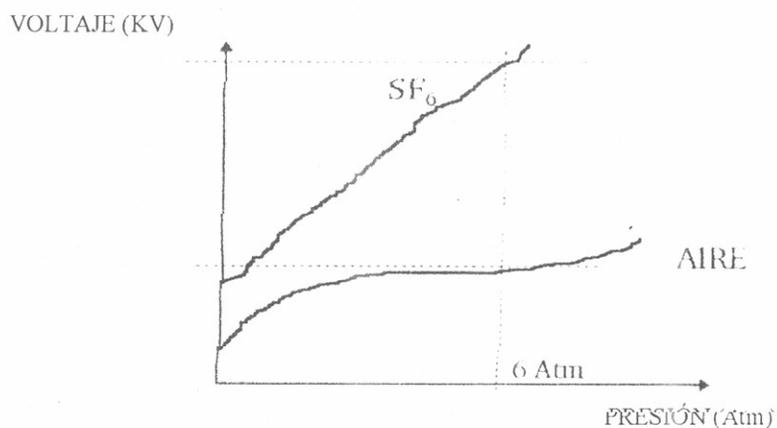
Si se desea, por razones dieléctricas, elevar la presión del  $\text{SF}_6$ , entonces es menester recurrir a la calefacción del recipiente.

Es importante hacer destacar, que el manejo del gas en recipientes o bombonas para su traslado, al igual que durante el llenado y vaciado de las subestaciones encapsuladas, tiene que obedecer al Diagrama de Mollier.

Algunas instalaciones comerciales disponen de una Unidad de Manejo del Gas, la cual permite compensar automáticamente cualquier pérdida de gas (fuga) y garantizar, simultáneamente, la presión deseada en la cámara de interrupción.

### ***Propiedades Dieléctricas.***

El SF<sub>6</sub> tiene una rigidez dieléctrica mayor que el aire, el nitrógeno y el bióxido de carbono, lo cual es atribuible a su carácter electronegativo. En la figura 34 se ilustra, en forma comparativa, al SF<sub>6</sub> y al aire, asumiendo la misma configuración eléctrica y la misma frecuencia de prueba. Puede apreciarse, que desde el punto de vista dieléctrico el SF<sub>6</sub> duplica el valor del aire, por ejemplo; para 6 atmósferas absolutas de presión.



**Figura 34: Comparación dieléctrica del SF<sub>6</sub> con la del aire en igualdad de condiciones.**

Al comparar las propiedades de SF<sub>6</sub> con las de otros dieléctricos se llega a las siguientes conclusiones:

- Los dieléctricos sólidos, bajo la acción de descargas eléctricas, pueden ser dañados tanto superficialmente como en su masa. El SF<sub>6</sub> no sufre alteraciones apreciables debido a su espontánea autogeneración.

- El SF<sub>6</sub> cumple satisfactoriamente la Ley de Paschen, denotando una variación bastante lineal al aumentar la presión del gas.

- La relación entre el valor máximo de la tensión de descarga a impulso y el de la tensión de descarga a frecuencia industrial del SF<sub>6</sub> es más baja que la de los aceites aislantes de uso general.

Finalmente es de resaltar, que el carácter electronegativo del SF<sub>6</sub> se mantiene aún a temperaturas muy elevadas (varios miles de °K), lo cual lo hace muy solicitado para combatir al arco eléctrico en interruptores de potencia.

### ***Propiedades Extintoras.***

El SF<sub>6</sub> es un gas electronegativo, de tal manera que el arco eléctrico en el interruptor se desioniza rápidamente. Debido a su pequeña constante de tiempo, como arco eléctrico, el SF<sub>6</sub> es diez veces superior al aire a la misma presión. Esto permite aumentar la potencia de ruptura en cada polo sin incrementar sustancialmente el número de cámaras en serie.

A temperaturas del arco de más de 5000 °K se descompone el átomo de SF<sub>6</sub>, teniendo además lugar una rápida recombinación de las cargas eléctricas que participan en el flujo de corriente. Ambos efectos actúan simultáneamente,

reduciendo la capacidad de transporte del espacio disruptivo y aumentando la velocidad de restablecimiento de la tensión, después del desgarre del arco. En SF<sub>6</sub> se pueden extinguir arcos 100 veces superiores a aquellos, que en igualdad de condiciones, se observan en el aire.

Uno de los factores principales en la extinción de arcos eléctricos, es la denominada constante térmica  $\theta$ , la cual para arcos cilíndricos es proporcional al cuadrado del radio ( $\theta \approx r^2$ ). En la práctica hay que tratar que el radio del arco sea lo más pequeño posible, de tal manera que éste denote el mayor contenido de calor. En el SF<sub>6</sub> se presenta esta condición para temperaturas comprendidas entre 3000 y 7000 °K. Este comportamiento térmico favorable obedece a la conductibilidad térmica del SF<sub>6</sub> en el rango en cuestión, el cual conlleva a la formación de arcos muy delgados y calientes, relativamente fáciles de extinguir.

Las propiedades del gas SF<sub>6</sub> con respecto al uso en subestaciones encapsuladas son:

- Excelente capacidad dieléctrica (tres veces mayor que la del aire a presión atmosférica e igual que para el aceite a 2 bar de presión).
- Notable capacidad de disipación del arco (más de 10 veces que el aire).
- Químicamente estable ya que el calor lo descompone en sus elementos básicos sólo a temperaturas superiores a los 500 °C.
- No tóxico. No inflamable.
- Es inodoro e incoloro.

- Posee una alta densidad (cerca de 6 veces la densidad del aire).
- Alta conductividad térmica, simplificando los problemas de elevación de temperatura a la corriente rateada.
- Puede alcanzar temperaturas de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sin licuificarse, si la densidad original corresponde a una presión absoluta de 4,5 bar a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Es un gas absolutamente inerte y químicamente no sujeto a envejecimiento (las sustancias de descomposición debidas al arco son muy inestables y se recombinan automáticamente muy pronto).
- Es un gas con muy baja conductividad sónica (la velocidad de propagación del sonido en el  $\text{SF}_6$  es de  $1/3$  con relación al aire).
- Precio razonable (cerca de  $6\text{\$/Kg}$ , lo cual significa que el costo del gas se ubica entre el 1% y 2% del costo total de la subestación).

En general, para efectos de aislamiento en aparatos de alta tensión, existen otros materiales con excelentes propiedades de aislamiento además del  $\text{SF}_6$ , tales como aire, freón, aceite, resma epoxy, etc. Sin embargo, el material en estudio, debe cumplir varios requisitos que no están directamente relacionados con sus propiedades de aislamiento.

### ***Proceso de Interrupción***

Los interruptores, en caso de apertura, deben asegurar el aislamiento eléctrico del circuito.

La energía que se desarrolla durante el proceso de interrupción puede definirse por la expresión:

$$P_r = \sum_0^{t_a} e * i * \Delta t \quad \text{Ec. 2.6}$$

en la que:

$t_a$  = tiempo de duración del arco en segundos,

$e$  = tensión del arco en voltios,

$i$  = corriente que circula por el interruptor, en amperios

Por otra parte, la duración del arco  $t_a$  depende del tiempo  $t$ , que comprende desde que se inicia la apertura de los contactos hasta el primer paso por cero de la corriente y, además, del número de los sucesivos reencebamientos que se producen a cada semiperiodo, por consiguiente, si  $t_0$  es la duración de éste y  $t_1$  el número de reencebamientos, se tendrá que:

$$t_a = t_0 + n * t_1 \quad \text{Ec.2.7}$$

Otra cuestión que se presenta en la interrupción de la corriente es la sobretensión originada por tal causa y que según la fórmula de Kennelly tiene por valor:

$$E = I \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

en la que:

$E$  = valor de la tensión máxima alcanzada en voltios;

$I$  = intensidad de la corriente que circula en el momento de la interrupción, en Amperios;

$L$  = coeficiente de autoinducción del circuito, en henrios;

$C$  = coeficiente de capacidad de dicho circuito en  $\mu\text{F}$  (microfaradios).

El valor de  $E$  calculado en la fórmula anterior, supone que la interrupción es instantánea, lo cual no ocurre en la práctica. Además, en corriente alterna la intensidad es variable desde cero a su amplitud máxima, y si se interrumpe el circuito cuando la intensidad de la corriente pasa por un valor próximo a cero, ante el hecho de haber en aquél menor almacenamiento de energía magnética, la interrupción dará lugar a una sobretensión limitada. Intervienen también en la reducción de la sobretensión la resistencia del arco de apertura y la variable resistencia de los contactos, cuyo efecto se hace asimismo sentir en el cierre del circuito.

El arco que se forma entre los contactos daña a éstos, y origina la vaporización del aceite en los interruptores que lo contienen, pudiendo en algunos casos producirse una explosión. Se comprende, pues, la conveniencia de reducir la energía desarrollada en el proceso de interrupción y de que el arco tenga una duración lo más corta posible.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo fundamental a lograr en el funcionamiento efectivo de los interruptores modernos se refiere a dar al espacio que separa a los contactos, inmediatamente después de la apertura de los mismos, una rigidez dieléctrica suficiente para evitar el reencebamiento del arco.

La rapidez lograda en el funcionamiento de los interruptores modernos en relación a los que existían antes, tiene su base en la velocidad de respuesta del conjunto relé e interruptor; entre los cuales se han logrado reducir los ciclos de duración desde que el relé cierra sus contactos y se determina la intervención del interruptor, hasta el final de la interrupción; de 8 períodos o más a 2,5 o 4 períodos.

Sumado a esto en los interruptores modernos, el valor de la rigidez dieléctrica necesaria para una operación segura se obtiene por medio del uso del vapor de aceite (interruptores de aceite), por la acción de una violenta corriente de aire (interruptores neumáticos), y en su mejor forma con el empleo del Hexafloruro de Azufre ( $\text{SF}_6$ ) en los interruptores encapsulados en  $\text{SF}_6$ .

### **Tipos de Interruptores en $\text{SF}_6$**

Existen dos tipos principales de interruptores para los mecanismos de control aislados en gas  $\text{SF}_6$  estos son: el interruptor de doble presión y el interruptor soplador. Éste último ha seguido siendo perfeccionado a fin de incrementar su capacidad en la extinción de arcos. Existen muchas maneras de arreglo de las unidades de ruptura dentro del recinto de encapsulamiento y se realiza de tal forma que satisfaga el mayor número posible de problemas materiales. Así se tiene por ejemplo, la exigencia de un interruptor de soplado con un tiempo de apertura de 2 ciclos, lo cual ocasiona muchos problemas en el diseño de los mecanismos de operación. Diferentes tipos de mecanismos son examinados y comparados.

- El mecanismo de resorte operado por motor es demasiado pequeño para interruptores de alto voltaje con más de una unidad por fase.
- El mecanismo hidráulico es compacto y de un trabajo relativamente silencioso, pero su largo tiempo de apertura supera el tiempo de ruptura exigido de 2 ciclos.
- El mecanismo neumático tiene muchas posibilidades de ser diseñado rápido y fuerte, lo cual, se traduce en una gran capacidad de ruptura en intervalos de tiempo muy pequeños, pero esto no se puede hacer sin un sacrificio de la confiabilidad de operación del aparato.

Por esta razón, los interruptores no podrían ser especificados con una ejecución de la operación mayor de la absolutamente necesaria.

El interruptor de doble presión está caracterizado por su alta capacidad y corto tiempo de ruptura, sin embargo, su diseño es algo complicado y existe un alto riesgo a la condensación del gas SF<sub>6</sub> a alta presión, para bajas temperaturas del medio ambiente.

El interruptor del tipo soplado, también llamado de presión simple, tiene un diseño relativamente sencillo; el cual contempla esencialmente la extinción del arco en una forma rápida, segura y eficaz.

**Interruptores de dos presiones:** Estos interruptores consisten básicamente de un aislamiento a base de SF<sub>6</sub>, el cual garantiza el aislamiento contra tierra de las partes energizadas, con una presión comprendida entre 3 y máximo 6 bars, y de una presión superior (hasta 18 y 22 bars), la cual es utilizada en la cámara de extinción, para combatir el arco eléctrico.

Desde el punto de vista del funcionamiento, los interruptores a dos presiones pueden ser considerados como aparatos de tipo neumático, que trabajan en ciclo cerrado. En efecto, el gas a alta presión, que en cada operación se expande en el tanque de baja presión, se reutiliza enviándolo nuevamente al tanque de alta presión por medio de un compresor. Algunas modalidades constructivas tienen a los tres polos conectados al mismo tanque. Único compresor sirve para aspirar el gas desde los tanques de baja presión, comprimirlo, y llevarlo a los tres tanques de alta presión. Este ciclo se cumple, cada vez que el valor de la presión, en los tanques de elevada presión, ha descendido a un valor preestablecido. Adecuados circuitos de control y enclavamientos de seguridad impiden que las presiones, tanto en el tanque de baja

presión, como en el de alta presión, lleguen, a causa de funcionamientos anormales, a valores distintos de los nominales.

En este tipo de interruptor, el gas contenido en los aisladores pasantes está en comunicación directa con el tanque de baja presión.

Es de señalar, que este tipo de interruptor ha ido lentamente desapareciendo del mercado, debido a que la elevada presión de extinción, requerida en la cámara de interrupción, conduce fácilmente a la licuefacción del gas. En efecto, a temperaturas de +10 °C, las presiones usuales de extinción (18 a 22 bars) conducen a la citada licuefacción. En Venezuela es frecuente observar temperaturas de +10 °C en las zonas montañosas durante las primeras horas de la madrugada, motivo por el cual este tipo de interruptor no ha tenido ninguna acogida en nuestro medio.

### **Interruptores de una sola presión. (Monopresión, Autosoplantes)**

Como su nombre lo indica, estos interruptores utilizan una sola presión (por lo general de 3 a 6 bars). Algunas modalidades constructivas emplean con gran acierto al movimiento del contacto móvil, para crear una presión elevada y momentánea durante el proceso de la maniobra. El contacto móvil, en consecuencia, debe ser contemplado como un pistón, el cual trata de aumentar la presión en su desplazamiento dentro de la cámara de interrupción.

Cabe observar que tanto al conectar como al desconectar el circuito, el interruptor simultáneamente genera una mayor presión.

Estando el interruptor cerrado, por ejemplo, la presión es la misma, dentro y fuera del pistón (contacto móvil). Al separar los contactos, se forma un arco eléctrico. Si la intensidad de corriente no es muy alta, basta sólo el efecto desionizante del SF<sub>6</sub>

para lograr la desconexión, al primer paso natural por cero, de la corriente. Este comportamiento se manifiesta muy favorablemente en la desconexión de corrientes capacitivas e inductivas, como las que se observan en líneas marchando en vacío y en transformadores con muy poca carga.

Si por el contrario se trata de despejar un cortocircuito, el arco no logra extinguirse al primer paso natural por cero de la corriente. Esto permite a los contactos, seguir alejándose uno del otro, prolongando así el arco eléctrico en el espacio interelectródico. Al mismo tiempo la presión va aumentando hasta alcanzar valores considerables. Después del segundo paso natural por cero de la corriente, y dependiendo del valor momentáneo de la tensión de recuperación o restablecimiento ( $du/dt$ ), la presión autogenerada por el contacto móvil logra extinguir el arco. El término autosoplante se debe a la acción simultánea del contacto móvil, el cual, como se mencionó, comprime el gas al desplazarse durante la maniobra.

En su diseño y concepción básica, el interruptor de  $SF_6$  se ha inspirado mucho en los interruptores del pequeño volumen de aceite. De allí que los mecanismos de accionamiento, conexión en serie de varias cámaras, etc. denoten una gran cantidad de características en común.

Al igual que en otros interruptores de potencia, la repartición o distribución de la tensión en cada una de las cámaras, al tener varias conectadas en serie, se obliga con la ayuda de condensadores en paralelo, conectados exteriormente a los elementos modulares.

El mecanismo de operación de estos interruptores es muy importante. Así tenemos, por ejemplo, que para obtener a un comando de operación que desarrolle potencias proporcionales a los valores instantáneos de las fuerzas antagónicas, es preciso recurrir al accionamiento neutro. El movimiento de cierre o conexión se deja

supeditado a la acción de resortes antagónicos los cuales han sido cargados (con energía potencial) durante el proceso de apertura o desconexión.

La simultaneidad de apertura de los contactos de un mismo polo es regulable, de manera de poder quedar comprendida en un intervalo de 2 ms. La simultaneidad de movimiento de los tres polos es también regulable, de manera de quedar comprendida en un intervalo de tiempo inferior a 5 ms.

La construcción del conjunto, formado por contactos, pistón, cilindro móvil, etc. es tal, que en las operaciones de cierre, al parecer los prearcos de la conducción plasmática, no se crean fuerzas antagónicas. En efecto, la repulsión de los contactos móviles contrasta con la reacción del cilindro, también móvil, producida por el gas contenido en él, y que debería sufrir una compresión.

El interruptor de SF<sub>6</sub>, tipo monopresión, se emplea satisfactoriamente hasta tensiones de 525 KV. En las subestaciones encapsuladas se le usa en forma exclusiva. En Venezuela este interruptor se viene usando con mucho éxito desde comienzos del año 1970, cuando se le comenzó a instalar en el Sistema de 230 KV de la Electricidad de Caracas. Hoy en día este interruptor encuentra cada vez mayor aplicación, incluyendo al nivel de 800 KV. El nivel de cortocircuito en sistemas densamente mallados (con más de 50 KA) aún representa un desafío para este tipo de interruptor, el cual, lenta y sistemáticamente ha venido desplazando al de aire comprimido.

Estos interruptores, al igual que otros tipos tratados anteriormente (por ejemplo, mínimo contenido de aceite), pueden ser fabricados con tanque de SF<sub>6</sub> aterrado (dead tank), o sometido a potencial (live tank). Este último arroja ventajas operativas, al tener que manejar el gas para el llenado o vaciado del interruptor, debido a que se le suele fabricar hermético. Es posible entonces cambiar totalmente al polo en cuestión por uno de reserva. El tanque muerto exige un gran esmero y labor en sitio para la

misma operación de mantenimiento y demanda, con frecuencia, la instalación de una tienda o cubierta protectora, de manera que no entre humedad al interior del interruptor.

### **Diseño de las Unidades de Ruptura:**

Los interruptores de alto voltaje, necesitan un cierto número de unidades de ruptura conectadas en serie en cada polo. Existen diversas maneras de disponer dichas unidades en el interior del recinto:

- Un método, es disponerlas en una línea recta y operarias desde uno de los extremos terminales. La principal ventaja de este principio, es que logra un diseño compacto y hay un cierto grado de libertad en la escogencia del número de unidades.

- Otro método es colocar dos unidades una frente a la otra y operarias justo desde la mitad de la distancia existente entre ellas, con el dispositivo de operación colocado al lado del tanque. Las fuerzas operantes en este interruptor, se balancean mutuamente, de tal forma que el choque mecánico durante la operación es pequeño. Con este sistema sólo es posible utilizar un número par de unidades de interrupción.

- Una tercera forma de disponer las unidades es colocar dos unidades paralelas a las otras. Los contactos móviles se enlazan juntos y operan mediante una varilla común. La principal ventaja de este diseño es que no hay necesidad de contactos deslizantes para conectar la corriente desde los contactos móviles.

### **Contactos de Soporte:**

Los contactos en una unidad de ruptura pueden ser sostenidos de diferentes maneras. En un interruptor de potencia en SF<sub>6</sub> 245/300 KV, hay cierto número de

tubos de soporte paralelos a los contactos. Este diseño permite cambiar fácilmente los contactos para efectos de mantenimiento, sin que haya necesidad de desmontar todas las unidades. Esto también permite la disponibilidad de un mayor espacio para los condensadores y resistencias a colocar entre los tubos. Los contactos, igualmente pueden ser sostenidos mediante un largo tubo alrededor de ellos. Esto proporciona un diseño muy compacto; pero encerrar los contactos en un espacio tan estrecho como éste puede ser peligroso debido a que se pueden producir chispas justo después de la interrupción, cuando la onda transitoria de recuperación de voltaje incide en el entrehierro y el gas caliente no ha tenido tiempo de ser extinguido.

### **Varilla de Operación:**

Para una sola unidad de interrupción o cuando se colocan dos unidades frente a frente, no hay problemas de conexión de la varilla de operación para el movimiento de los contactos, ya que dicha varilla siempre se coloca en la línea central de las unidades.

Sin embargo, si existe un cierto número de unidades dispuestas a lo largo de una línea recta, las varillas de operación deberán ser colocadas al lado de los contactos. Existen entonces dos alternativas; una de ellas es colocar dos varillas diametralmente opuestas y conectadas a los lados de los contactos y la otra es colocar una sola varilla. El uso de las dos varillas proporciona un diseño mecánicamente balanceado pero puede ser muy dificultoso centrar individualmente los contactos en las diferentes unidades. Por otra parte el uso de una varilla simple en uno de los lados ocupa menos espacio, pero produce un momento flector en cada unidad de ruptura; lo cual, ocasiona que los tubos de soporte deban ser diseñados para soportar este momento.

### **Graduación de Condensadores y Resistencias:**

En un interruptor encapsulado, la capacitancia parásita entre los contactos y el recinto es mucho más alta que la capacitancia entre los contactos, en comparación con los interruptores de tipo convencional. Por ello, la graduación de los condensadores deberá ser mayor con el fin de lograr una apropiada distribución de voltaje.

Existen tres tipos de condensadores, tales como:

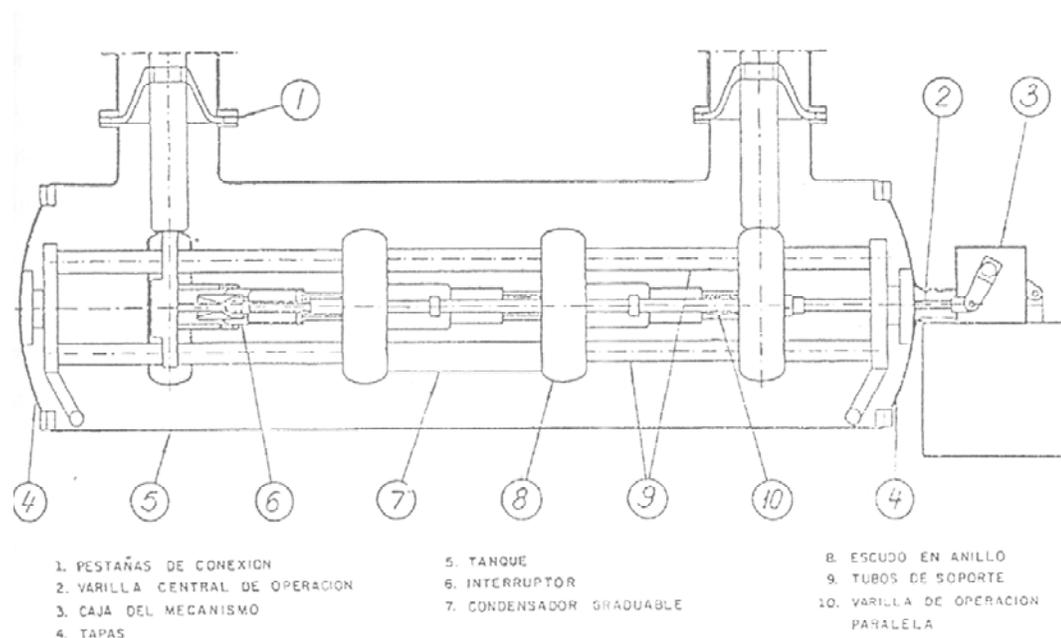
- El tipo lámina aislado en aceite.
- El de tipo cerámico.
- El tipo de láminas, fundidas en resma epoxy.

Este último puede ser utilizado como tubos de soporte, pero resulta muy costoso. Los capacitores son montados en el interior del tanque paralelos a los contactos.

Asimismo, para niveles de EHV (Extra High Voltage), los interruptores pueden ser equipados con resistencias de cierre. Estas son del tipo bloque en cerámica y están colocadas dentro del recinto del interruptor, paralelas a los contactos. Los contactos del resistor pueden ser operados fácilmente mediante un mecanismo especial conectado a cada contacto principal.

### **Descripción del Interruptor Trifásico en SF<sub>6</sub>:**

El diseño básico y los componentes principales de un interruptor de soplado, se muestran en la figura 35. Es de notar, que el interruptor trifásico completo consta de tres fases mecánicamente independientes y una cabina central de control incorporada a todo el equipo de operación común a las tres fases del interruptor.



**Figura 35: Interruptor**

El interruptor está encerrado en un tanque de aluminio (5), con cubiertas removibles (4) a cada extremo y pletinas de conexión (1) en clavijas perpendiculares al eje de las abscisas. Una unidad mecánica impermeable al gas (3) se coloca en una de las cubiertas y está conectada al tanque mediante un tubo central. El interruptor utiliza gas SF<sub>6</sub> a una presión de 0,5 Mpa, como medio de extinción. Cada interruptor de fase consta de tres unidades de ruptura (6). Los condensadores graduados (7) aseguran la distribución de voltaje a través de cada interruptor. Para niveles de “EHV” el interruptor puede ser equipado con resistencias de cierre.

Los interruptores son soportados mediante dos tubos de fibra epoxy reforzada (9) y corren entre las cubiertas extremas. Paralelas a los tubos de soporte, son conectadas dos varillas de operación a cada interruptor (10) y a uno de los extremos, mediante un enlazador a una varilla de operación central (2); la cual, está acoplada a una palanca en el eje operante de la unidad mecánica (3). Cuatro anillos de protección

(8) alrededor de los soportes fijos, previenen la concentración local del campo eléctrico alrededor de los bordes; además actúan como receptores del gas caliente utilizado en los interruptores evitando el soplado del gas en sitios donde la fuerza del campo eléctrico sea muy alta y donde este pudiera causar una ruptura.

Para propósitos de inspección y mantenimiento puede realizarse fácilmente todo el ensamblaje interno, puesto que los tubos de soporte descansan en ambos extremos sobre unas pequeñas correderas, mientras el resto del equipo permanece en su lugar.

El polo del interruptor puede ser instalado horizontal o verticalmente y puede soportar en términos mecánicos, otros aparatos tales como interruptores de desconexión, etc.

#### Mecanismos de Operación del Interruptor

Existen diferentes mecanismos de interrupción bajo los cuales operan los interruptores de alta tensión, entre los que tenemos:

**Hidráulico:** Este sistema emplea como fuente de energía para la realización de la maniobra el aceite hidráulico sometido a presión con auxilio de una motobomba y un recipiente con una presión inicial de nitrógeno. Su principio básico radica en la propiedad del pistón diferencial.

**Resorte:** En este sistema, se aplica sobre el mecanismo de cierre, una energía previamente acumulada, por la acción de un resorte que ha sido armado con anterioridad manualmente o por medio de un motor eléctrico.

Neumático: Aquí se emplea el aire comprimido como fuente de energía para la realización de la maniobra del interruptor. En algunos casos se emplea el mismo principio del pistón diferencial utilizado en el mando hidráulico, y en otros casos mediante una válvula de mando. En ambos casos se utiliza un juego de electroválvulas para las operaciones de cierre y apertura. Asimismo, la fuente de aire comprimido puede provenir de un compresor incorporado al mando del interruptor o de una fuente central de aire comprimido.

#### Requisitos de Despeje de un Interruptor en SF<sub>6</sub>:

Los interruptores de soplado, necesitan una gran fuerza de apertura con el fin de poder comprimir el gas SF<sub>6</sub> de los cilindros de soplado durante la etapa de extinción del arco. A medida que crece el valor de la corriente a interrumpir, mayor es la fuerza necesitada. Es de notar que para efectos de enganche, la fuerza requerida es comparativamente mucho menor.

Debido a las exigencias de un tiempo de ruptura muy pequeño (2 ciclos), aunado al peso de los contactos móviles del interruptor de soplado, se requerirá una alta fuerza de operación para acelerar dichos contactos. Para mantener la aceleración dentro de un rango de valores moderados, lo cual asegura que el interruptor tendrá una vida mecánica suficientemente larga; el llamado “tiempo de demora”, es decir, el tiempo transcurrido entre la aparición de la señal de disparo y la puesta en marcha de los contactos, debe ser reducido a un mínimo absoluto. Durante este tiempo la señal de disparo ha de ser amplificada a un nivel donde pueda liberar la energía de operación acumulada que da inicio al movimiento de los contactos.

Para totalizar los requisitos de despeje de un interruptor de soplado en 2 ciclos, el dispositivo de operación debe tener las siguientes propiedades:

- Un tiempo de demora mínimo con relación al inicio del movimiento de los contactos.

- Una alta fuerza de operación para acelerar los contactos a la velocidad requerida, antes de la separación del contacto y alcanzar el punto inicial de extinción del arco en el menor tiempo posible.

- Una alta fuerza de operación mantenida hasta el golpe final, cuando el arco produce una alta presión en los cilindros de soplado justo antes de la extinción.

- Debe adaptarse un dispositivo de amortiguación adecuado, para liberar la fuerza de operación en la condición de vacío.

- Con respecto a la fuerza y tiempo de cierre no se hace necesario tomar consideraciones extras.

Existen diferentes maneras de diseñar los sistemas operantes de puesta en libertad.

La señal de disparo, usualmente es una señal eléctrica DC, ha de ser amplificada hasta un nivel desde donde ésta pueda liberar la fuerza de operación; por ejemplo, soltar un resorte en espiral comprimido en un mecanismo hidráulico o abrir la válvula principal en un mecanismo hidráulico o neumático. Una vez que ha sido amplificada, la señal es transformada, usualmente, de energía eléctrica a energía mecánica hidráulica o neumática. Todas estas amplificaciones y transformaciones toman cierto tiempo por lo que se hace necesario optimizar cada paso de la cadena.

En general, la amplificación eléctrica es la más rápida seguida por la mecánica y la hidráulica en tanto que la amplificación neumática es la más lenta.

## **Ventajas y Desventajas de los Interruptores Tipo Hexafloruro:**

### **Ventajas:**

- Después de la apertura de los contactos, los gases ionizados no escapan al aire, por lo que la apertura del interruptor no produce casi ruido.
- Alta rigidez dieléctrica, del orden de tres veces la del aire.
- El SF<sub>6</sub> es estable. Expuesto al arco se disocia en SF<sub>4</sub>, SF<sub>2</sub> y en fluoruros metálicos, pero al enfriarse se recombinan de nuevo en SF<sub>6</sub>.
- La alta rigidez dieléctrica del SF<sub>6</sub> lo hace un medio ideal para enfriar el arco, aún a presiones bajas.
- La presión utilizada para la interrupción del arco es una fracción de la requerida en interruptores neumáticos.
- Buena conductividad térmica, es del orden de tres veces la del aire.

### **Desventajas:**

- A presiones superiores a 3,5 bars y temperaturas menores de -40 °C, el gas se licua. Por eso, en el caso de interruptores de dos presiones, es necesario calentar el gas de la cámara de extinción para mantener el equilibrio a temperaturas ambiente menores de 15 °C.

- El gas es inodoro, incoloro e insípido. En lugares cerrados hay que tener cuidado de que no existan escapes, ya que por tener mayor densidad que el aire, lo desplaza provocando asfixia en las personas por falta de oxígeno. En otros lugares es conveniente disponer de extractores que deben ponerse en funcionamiento antes de que se introduzca personal.
- Los productos del arco son tóxicos y combinados con la humedad producen ácido fluorhídrico, que ataca la porcelana y el cemento de sellado de las boquillas.

## **2.6 Tipos de Fallas en Interruptores.**

Mientras que las sobretensiones externas se limitan a la incidencia del rayo sobre la línea de transmisión o en la proximidad de ella, con una forma de onda bien definida (1,2/50 1seg), las denominadas sobretensiones internas pueden denotar diferentes tiempos de formación de cresta y de semiamplitud. El nombre de estas sobretensiones obedece al hecho de que su origen o causa se encuentra en el propio sistema de transmisión de energía. Así tenemos, por ejemplo, fallas a tierra (1,2/1200  $\mu$ seg), sobretensiones de maniobra (250/2500  $\mu$ seg), ferresonancia, etc.

En contraste con las sobretensiones externas o atmosféricas, las sobretensiones internas denotan en su forma y comportamiento cierta dependencia del tratamiento del neutro del sistema. Es decir, no se observa el mismo fenómeno en un sistema con el neutro rígidamente aterrado o con el neutro flotando o aterrado en forma inductiva.

La clasificación de estas sobretensiones es muy genérica, así tenemos, que algunos autores hablan de sobretensiones dinámicas, cuando la causa de las mismas es un cortocircuito, de sobretensiones de arco, cuando el neutro está flotando y tiene

lugar un reencendido por carga capacitiva, o cuando la carga que se desconecta es inductiva, etc. Las sobretensiones de resonancia se presentan, cuando la onda fundamental o sus respectivos armónicos, conllevan a un rápido incremento de la tensión. Tal es el caso al despejar cortocircuitos asimétricos con parámetros concentrados variables, siendo la ferresonancia uno de ellos. Este tema se presta para realizar un estudio muy profundo del comportamiento que asume un sistema determinado bajo una condición dada, por lo cual nos centraremos en las sobretensiones internas, entre las cuales aparecen:

### **Falla en las terminales:**

Dentro de esta categoría se considera a todas las fallas pegadas al interruptor. En este caso la oscilación de la tensión se amortigua por la resistencia propia del circuito de potencia y su frecuencia  $f_0$  depende de los valores de la inductancia y de la capacitancia del lado de la fuente, o sea:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} * \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. 2.9}$$

### **Falla kilométrica:**

Una falla puede tener lugar en cualquier parte de la línea o cable de transmisión. Si la incidencia de la misma se encuentra a menos de 5 Km del interruptor, se habla entonces de una falla kilométrica. El interruptor de potencia sometido a esta sollicitación ve entonces dos tensiones oscilatorias diferentes en sus contactos. Una de ellas correspondiente al extremo transmisor de la línea (lado de la fuente) y la otra al extremo receptor (lado de la carga). La tensión resultante deja de

denotar una forma de onda senoidal amortiguada para asumir un comportamiento de diente de sierra.

A continuación se diferencian cada una de las tensiones, considerando el lado o extremo de la línea que se ve afectado.

### **Tensión del Lado de la Línea:**

Una vez que la intensidad de corriente de cortocircuito ha sido despejada satisfactoriamente por el interruptor de potencia, se observa en el lado de la línea a una tensión oscilatoria  $U_e$ , a la cual la caracterizamos con el subíndice L. La pendiente de esta tensión viene dada por:

$$\left( \frac{dU_e}{dt} \right) = Z \frac{di_{CC}}{dt} = \sqrt{\frac{L}{C}} * \omega * \sqrt{2} * I_{CC} \quad \text{Ec. 2.10}$$

siempre y cuando asumamos a  $I_{CC} = i_{CC} * \sqrt{2} * \text{sen } \omega t$  y  $t = 0$ .

Multiplicando en Ec. 2.10. al numerador y denominador por L y considerando que la velocidad de propagación es  $v = 1/\sqrt{(L * C)}$ , obtenemos a la conocida relación:

$$\left[ \frac{dU_e}{dt} \right]_L = v * x * I_{CC} * \sqrt{2} = k * I_{CC} \quad \text{Ec. 2.11}$$

donde  $x = \omega * L$  (reactancia kilométrica) y K es una constante. La amplitud de la tensión oscilatoria en este lado del circuito, correspondiente al primer pico, es igual al doble de la caída de tensión en el circuito afectado por la corriente de falla, a saber:

$$U_{eL} = 2 * l * x * I_{CC} * \sqrt{2} \quad \text{Ec. 2.12}$$

donde  $l$  viene siendo la distancia de la falla al interruptor. La frecuencia oscilatoria en este mismo lado viene expresada por la conocida relación:

$$f_{eL} = \frac{v}{4 * l} = \frac{1}{4 * \sqrt{L_1 * C_1}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

En esta última expresión le hemos conferido a la inductancia del lado de la línea y a la capacitancia respectiva el subíndice 1. Esta frecuencia corresponde a la variación triangular de la tensión oscilatoria en el lado de la línea (1).

Es de resaltar, que en nuestro enfoque hemos despreciado a las capacitancias del lado del interruptor, de los transformadores de medición y eventuales condensadores de acoplamiento de la onda portadora. Su consideración conllevaría a una prolongación capacitiva de la sección de la línea.

### **Tensión del Lado de la Fuente:**

Por lo general salen varios alimentadores o líneas de las subestaciones de un sistema de energía, los cuales en caso de una falla kilométrica alimentan inevitablemente a la misma. Es de suponer, además, que mientras mayor sea la corriente de falla, mayor también será el número “ $n$ ” de los alimentadores. La capacitancia de éstos disminuye la pendiente de la tensión oscilatoria del lado de la fuente  $(dU_e/dt)_F$ . Sí asumimos que tenemos a “ $n$ ” alimentadores, obtenemos del lado de la fuente:

$$\left[ \frac{dU_e}{dt} \right]_F = \frac{1}{n-1} * Z * \omega * I_{CC} * \sqrt{2} = \frac{1}{n-1} * v * x * I_{CC} * \sqrt{2} \quad \text{Ec. 2.14}$$

asumiendo, sin embargo, que las líneas no afectadas por la falla (n-1) denotan la misma característica que la involucrada en el cortocircuito.

### **Tensión Resultante en el Interruptor:**

La tensión a la cual se ven sometidos los contactos del interruptor es entonces la superposición (suma) de las tensiones dadas por Ec. 2.11 y Ec. 2.14, a saber:

$$\left[ \frac{dU_e}{dt} \right]_F = \frac{1}{n-1} * Z * \omega * I_{CC} * \sqrt{2} = \frac{n}{n-1} * v * x * I_{CC} * \sqrt{2} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Aquí también es importante enfatizar, que en nuestras consideraciones anteriores hemos ignorado a una serie de factores, entre ellos a la resistencia del arco eléctrico de la falla, la impedancia de la línea para  $f_e$ , la resistencia de pre-inserción del interruptor, su capacitancia contra tierra, etc. Nuestro enfoque es válido, además para un circuito monofásico.

*La peligrosidad o gravedad* de la falla kilométrica lamentablemente no se puede indicar mediante una cifra, por ejemplo, de 1 a  $\infty$ . Es por ello que en la práctica se suele expresar la misma a través de un factor que contemple todos los parámetros y magnitudes involucradas. A este factor lo denominaremos Factor de Gravedad.

Las magnitudes que afectan a G son: la corriente de cortocircuito  $I_{CC}$ , la pendiente ( $dU_e/dt$ ) o frecuencia ( $f_e$ ) de la tensión oscilatoria y el valor máximo o amplitud del primer pico de la misma ( $U_e$ ).

**Apertura en Oposición de Fases:**

Se produce en el caso en que por una conexión de fase equivocada, al cerrar el interruptor, éste cierra contra un cortocircuito directo, lo que provoca una apertura violenta, llegando a producirse una sobretensión de hasta tres veces la tensión normal de fase a neutro, con una frecuencia de oscilación del doble de la fundamental.

**Apertura de Pequeñas Corrientes Inductivas:**

Es el caso típico de la apertura de un transformador excitado o de un banco de reactores. La apertura de estas corrientes puede provocar la llamada “Falla Evolutiva” que en un interruptor puede llegar a ser bastante fuerte.

**Falla Evolutiva:**

Esta se produce cuando al abrir un circuito inductivo aparece la sobretensión que puede provocar el arqueo de los aisladores exteriores, lo cual a su vez pone en cortocircuito la inductancia del transformador, liberándose una onda viajera entre el transformador y el interruptor que provoca el reencendido del interruptor, volviendo a reaparecer la corriente de cortocircuito. En el momento en que ocurre esto, los contactos del interruptor se encuentran en proceso de apertura y separados una cierta distancia. Al reiniciarse el arco, con la corriente de cortocircuito, se eleva la presión dentro del interruptor, pudiendo ésta llegar a un valor tan grande que produzca la explosión del mismo.

**Reenganche Rápido:**

Es de suma importancia reducir a un mínimo la duración de los cortocircuitos que se producen en las redes, a fin de limitar cuanto sea posible la magnitud de los daños que de aquellos resultan.

Por otra parte, cuanto más rápida sea la desconexión, menor será la influencia de la perturbación sobre toda la red, porque la aparición en ella de oscilaciones pendulares a causa de la pérdida del sincronismo, depende en gran parte de la duración de los cortocircuitos, y ésta a su vez depende del tiempo de funcionamiento de los relés y de la duración total de la ruptura por el interruptor.

Es pues, de gran interés, que el tiempo que pase, desde la iniciación del cortocircuito hasta la interrupción de la corriente, sea el menor posible.

### **Recierre Automático y Fallas en una Red:**

El recierre automático de los interruptores tiene como fin mejorar la continuidad de servicio de la instalación.

Las fallas en una red pueden ser de tres tipos:

1. Transitorias
2. Semipermanentes
3. Permanentes

En los dos primeros casos se puede restaurar el servicio una vez que ha cesado la falla. En el caso tres, sólo se puede restaurar el servicio una vez efectuada una reparación en la zona que presenta daños.

**Falla Transitoria:** En esta falla se considera que el tiempo desionización del trayecto de un arco eléctrico en el aire, varía desde unas centésimas de segundo, hasta unas dos décimas. Por lo tanto, cuando hay recierre se acostumbra permitir un espacio de 0,3 segundos entre el final de la última apertura y el principio del siguiente recierre, para evitar que el relevador de recierre lo vea como una continuación del cortocircuito.

Se estima que esta falla tiene una ocurrencia en líneas de muy alta tensión del 90 % y en las de tensión media de un 60 % del total de las fallas que afectan las líneas aéreas.

**Falla Semipermanente:** Esta falla es de mayor duración que la anterior, y sólo se elimina con un recierre automático lento de varios segundos o menos. Es como tal una falla rara en altas tensiones y más frecuente en tensiones medias. Generalmente se deben al contacto de una rama de árbol con un conductor de alta tensión.

La ocurrencia de esta falla en tensiones medias, demuestra que aproximadamente un 20 % de éstas se eliminan con el primer recierre lento y que en un segundo recierre, el promedio de fallas eliminadas es muy bajo, siendo para un tercer recierre el promedio prácticamente nulo.

**Falla Permanente:** Un ejemplo de este tipo de falla puede ser un cortocircuito en las bobinas de un transformador o dentro de un cable de potencia. En este caso, el cortocircuito una vez iniciado se establece en forma franca y sólo desaparece después de la apertura de interruptor correspondiente.

**Recierre Monofásico:** En alta tensión, estadísticamente, se ha detectado que el porcentaje de fallas que afectan una sola fase es del orden del 90 % y considerando, además, que la mayor parte de las fallas son de tipo transitorio o semipermanente, se

puede pensar en la utilización del recierre monofásico. Como el recierre es rápido, no existe el temor de que llegue a perder el sincronismo, ya que las otras dos fases siguen manteniendo una liga sincronizada y sólo en el caso en que después del primer recierre persista el cortocircuito, entonces se efectúa el disparo trifásico.

Cabe resaltar que el recierre automático exige condiciones de servicio más severas a los interruptores y sus mecanismos; lo que conlleva a realizar un diseño reforzado tanto en el aspecto mecánico como en el aspecto eléctrico, a fin de soportar en caso de una falla permanente la maniobra de cierre y apertura contra un segundo cortocircuito una fracción de segundo posterior al primer disparo.

## **2.7 Pruebas que se realizan a los Interruptores de Potencia**

Las pruebas a las que se deben someter los interruptores son de dos clases: pruebas de tipo y pruebas de verificación. Cada una comprende:

**Pruebas de tipo:** a) de prestación b) de sobrecarga; c) de temperatura d) de aislamiento, e) de resistencia mecánica f) de presión.

**Pruebas de verificación:** g) de funcionamiento h) de control del tipo.

a) *Prueba de prestación:* La prueba de prestación es esencialmente de tipo y sirve para determinar la corriente de ruptura nominal y la corriente de cierre nominal. Para las mediciones debe emplearse el oscilógrafo catódico para poder registrar: la corriente de fase, la tensión de fase y la tensión de arco. El ciclo de trabajo correspondiente deberá repetirse un número suficiente de veces hasta tanto se pueda asegurar que se han verificado las más duras condiciones de funcionamiento.

b) *Prueba de sobrecarga*: Es también prueba de tipo y sirve para comprobar que el interruptor está dispuesto para soportar la corriente de sobrecarga fijada.

c) *Prueba de temperatura*: Esta prueba tiene por objeto comprobar el comportamiento del interruptor a los efectos del calentamiento con la corriente nominal. A los efectos de la prueba, la sobreelevación de temperatura de régimen admitida en el interruptor a emplear, no debe superar los valores que son indicados por el fabricante.

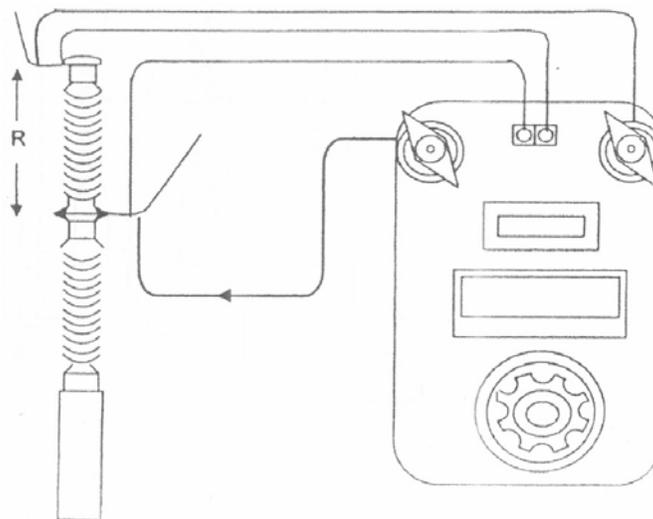
d) *Prueba de aislamiento*: Esta prueba es tanto para el tipo como para la verificación. Su objeto es comprobar la aptitud del interruptor para funcionar a la tensión nominal y verificar la bondad de todo el material aislante. La tensión para la prueba de aislamiento que se aplicará tanto a los de interior como a los de exterior, deberá ser igual, en valor eficaz, a dos veces la tensión nominal más 10000 voltios.

e) *Prueba de resistencia mecánica*: Es una prueba tipo y tiene por objeto controlar que toda la parte mecánica del interruptor, comprendido el mando, es suficientemente robusta y apta para el cometido que debe desempeñar. Para la prueba de resistencia mecánica es preciso someter al interruptor completamente montado a una sucesiva serie de aperturas y cierres cuyo número no sea inferior a 500. Después de esta prueba no precisará el interruptor ninguna reparación ni ajuste. (Fig. 36).

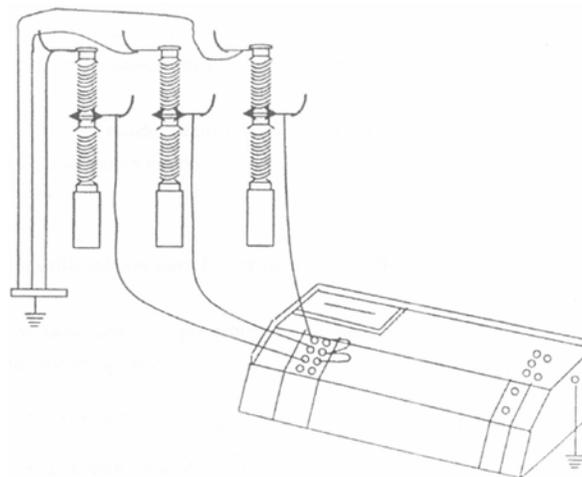
f) *Prueba de presión*: Es la prueba de resistencia de la caja a la presión interna, y debe convenirse en su caso entre el fabricante y el comprador.

g) *Prueba de funcionamiento*: Debe hacerse con el interruptor instalado y su objeto es comprobar la regularidad de montaje, especialmente en lo relativo al funcionamiento del mando y la simultaneidad de la maniobra de los tres polos. (Fig. 37).

h) *Control de tipo*: El control de tipo se verifica para comprobar, en el suministro de varios interruptores, que todos responden al interruptor tipo en el cual se han efectuado las pruebas tipo.



**Figura 36: Medida de la resistencia de contactos de un interruptor.**



**Figura 37: Pruebas de uniformidad al cierre y apertura.**

**Placa de Características:**

Los interruptores deben ir provistos por el fabricante de una placa en la que se consigne: el nombre del constructor, el tipo de aparato, el número de fabricación y los siguientes datos:

- 1) Tensión nominal.
- 2) Corriente nominal.
- 3) Corriente de ruptura nominal en amperios (eficaz).
- 4) Corriente de cierre nominal en amperios (máxima).

La caja del mando eléctrico llevará una placa característica indicando los datos esenciales para el uso del mando.

**Especificaciones para Interruptores de Potencia:**

Los datos esenciales que deben tenerse presente, en las ofertas y demandas de un interruptor, son los siguientes:

- Tensión nominal o de ejercicio (eficaz).
- Corriente nominal (máxima intensidad de la corriente de fase, expresada en valor eficaz que puede soportar en servicio continuo cada polo del interruptor).
- Frecuencia nominal.

- Corriente de sobrecarga (el más alto valor eficaz de la corriente de ruptura, compatible con una determinada prestación del interruptor).
- Corriente de cierre nominal (el valor instantáneo máximo de la primera semionda de la corriente, comprendida la componente unidireccional que se encuentra en un circuito en el acto de su cierre).

## **2.8 El Estudio de Cortocircuito**

### **2.8.1 Introducción**

El cálculo de las corrientes de cortocircuito, es esencial para la selección de la capacidad adecuada del equipo de protección y los dispositivos de interrupción. En los estudios de protección, es básico también, para la coordinación de protecciones. Los procedimientos de cálculo de cortocircuito son generales, ya que por un lado el fenómeno es el mismo, y por el otro, la metodología no difiere en forma importante entre un sistema eléctrico de potencia clásico y un sistema de potencia de tipo industrial.

Para la persona que diseña o hace cálculos para ajustes de protecciones en las instalaciones eléctricas, o bien selecciona o verifica las características del equipo de interrupción, tiene la necesidad de hacer cálculos de cortocircuito. Estos, dependiendo del tamaño y complejidad de la instalación, se pueden hacer por métodos manuales simplificados, con la simple ayuda de calculadoras de bolsillo para las operaciones, o bien como ocurre en la actualidad en muchos casos, con la ayuda de programas digitales, especialmente para computadoras personales (PC).

El tema sobre el estudio del cortocircuito, ha sido suficientemente estudiado en distintos libros de texto y publicaciones, aún cuando en ocasiones se le da distintos enfoques, en especial, a los métodos para programas digitales, en el fondo, es el mismo. En este capítulo se tratará el tema en forma conceptual, principalmente va que con frecuencia hay personas que se dedican al estudio de las protecciones, que han tenido poco contacto con este tema, del que se requiere claridad para su estudio y aplicaciones.

### **2.8.2 Conceptos Básicos del Estudio de Cortocircuito**

Los sistemas eléctricos de potencia en plantas industriales, centros comerciales y grandes edificios, se diseñan para alimentar las cargas en una forma segura y confiable, uno de los aspectos a los que se les pone mayor atención en el diseño de los sistemas de potencia, es el control adecuado de los cortocircuitos, o bien de las fallas como se les conoce comúnmente, ya que éstas pueden producir interrupciones de servicio con la consecuente pérdida de tiempo, la interrupción de facilidades importantes o servicios vitales, en ocasiones, y desde luego, con el riesgo de daño a personas, equipos e instalaciones.

Los sistemas eléctricos de potencia, se diseñan para estar tan libres de fallas, como sea posible, mediante el uso de equipos especializados y diseños completos y cuidadosos, así como técnicas modernas de construcción y con el mantenimiento apropiado.

Aún con todas las precauciones y medidas mencionadas antes, las fallas ocurren, algunas de las causas principales son las siguientes: sobretensiones de origen atmosférico, envejecimiento prematuro de los aislamientos, falsos contactos y conexiones, acumulación de polvo, presencia de elementos corrosivos, humedad,

presencia de roedores, errores humanos y aún las llamadas causas desconocidas. Cuando ocurre un cortocircuito, se presentan situaciones inconvenientes que se manifiestan con distintos fenómenos como son:

- a. En el punto de la falla se puede presentar un fenómeno de arco eléctrico o fusión de los metales mismos.
- b. Las corrientes de cortocircuito, circulan de las fuentes (alimentación de la red y máquinas rotatorias) hacia el punto de la falla.
- c. Todas las componentes de la instalación, por donde circulan las corrientes de cortocircuito, se ven sujetas a esfuerzos térmicos y dinámicos, estos esfuerzos varían como el cuadrado de la corriente ( $I^2$ ) y de la duración de la corriente (seg.).
- d. Las caídas de voltaje en el sistema, están en proporción a la magnitud de las corrientes de cortocircuito, la caída de voltaje máxima se presenta en el punto de ocurrencia de la falla. (Es prácticamente cero para el valor máximo de falla).

Por todos los disturbios que produce la ocurrencia de un cortocircuito, las fallas se deben remover tan rápido como sea posible, y esta es justamente la función de los dispositivos de protección (interruptores, fusibles, etc). De hecho, para cumplir con esta función, los dispositivos de protección, deben tener la capacidad de interrumpir la máxima corriente de cortocircuito que pueda circular para una falla en el punto de localización del dispositivo de interrupción.

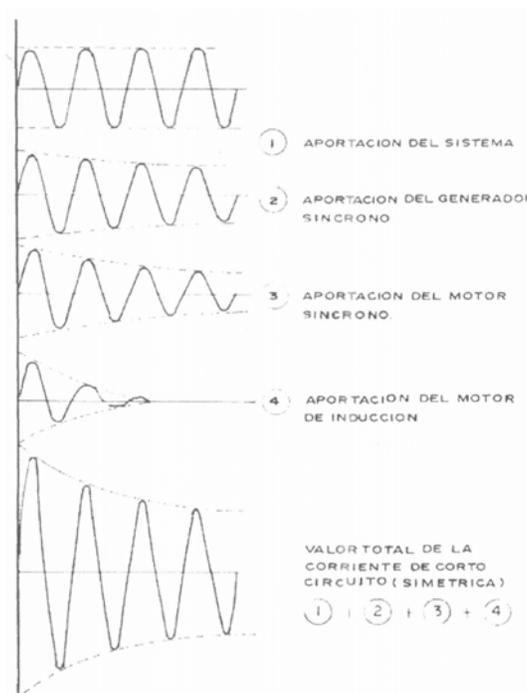
El máximo valor de la corriente de cortocircuito, está directamente relacionado al tamaño y capacidad de la fuente de potencia y es independiente de la corriente de carga del ‘Circuito protegido por el dispositivo de protección.

Entre mayor es la capacidad de cortocircuito de la fuente de potencia, mayor es la corriente de cortocircuito.

### **2.8.3 Fuentes de Cortocircuito**

Cuando se hace un estudio para determinar la magnitud de las corrientes de cortocircuito, es muy importante que se consideren todas las fuentes de cortocircuito y que las características de las impedancias de estas fuentes sean conocidas. Las fuentes de cortocircuito son principal mente las siguientes:

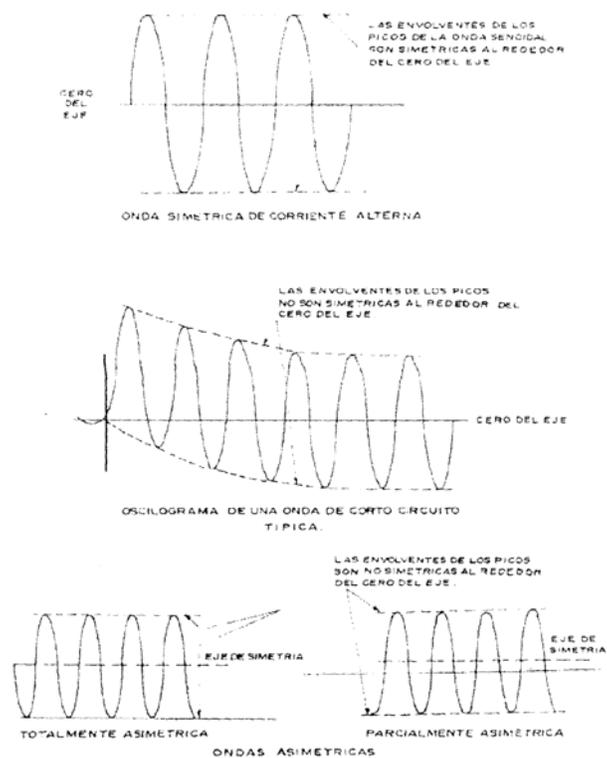
- Los generadores.
- Los motores síncronos.
- Los motores de inducción.
- La compañía suministradora de energía eléctrica.



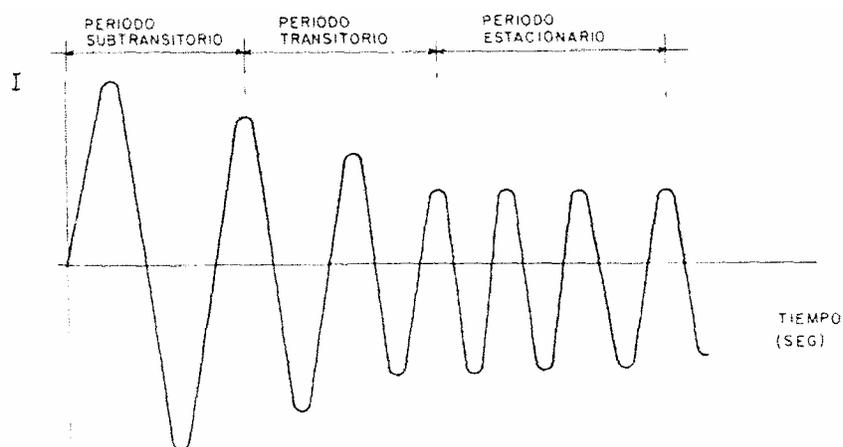
**Figura 38: Contribución de las distancias componentes a la corriente de cortocircuito**

#### 2.8.4 Corrientes de Cortocircuito Simétricas y Asimétricas.

Las palabras “simétrica” y “asimétrica” describen la forma de las ondas de corriente alterna, alrededor de su eje cero. Si las envolventes de los picos de las ondas de corriente son simétricas alrededor del eje cero, se les denomina “envolventes de corriente simétrica”, si las envolventes no son simétricas alrededor del cero de los ejes, se les denomina entonces “envolventes de corriente asimétrica”. En cualquier caso, la envolvente es una línea que se traza uniendo los picos de las ondas.



**Figura 39: Corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas**



**Figura 40: Forma de oscilograma para una corriente de cortocircuito simétrica.**

La mayoría de las corrientes de cortocircuito son casi siempre asimétricas, durante los primeros ciclos después de la ocurrencia del cortocircuito. La corriente

asimétrica está en su máximo durante el primer ciclo después que el cortocircuito ocurre y en unos pocos ciclos después se transforma en simétrica.

### **2.8.5 El Cálculo del Cortocircuito.**

El cálculo del valor preciso de una corriente asimétrica en un tiempo dado después del origen de una falla, es un cálculo que puede resultar complejo, en consecuencia, se pueden desarrollar métodos simplificados que conduzcan a la obtención de las corrientes requeridas para el equipo y los dispositivos de protección.

En el sentido más elemental, el valor de la corriente de cortocircuito simétrica, se obtiene por el uso apropiado de la impedancia en la ecuación básica;

$$I = E / Z$$

Donde:

E = Tensión en el sistema.

Z o X = Impedancia equivalente del sistema que incluye a la red y las fuentes de cortocircuito.

Para el equipo, se establece que un dispositivo de protección debe tener la capacidad de interrumpir la máxima corriente de cortocircuito que circula a la falla a través del dispositivo de protección en el punto de su localización, este mismo concepto se aplica a la determinación de la capacidad de corriente de cortocircuito de barras, buses, aislador y tableros.

### **2.8.6 Tipos de Fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia**

Las fallas o cortocircuitos, pueden ocurrir en un sistema eléctrico de potencia trifásica en distintas formas. El dispositivo de protección o equipo, debe tener la capacidad de interrumpir o de soportar cualquier tipo de falla que se pueda presentar o las fallas que se pueden presentar son las que se indican a continuación, pero para la determinación de las características del equipo de interrupción.

Se considera la falla trifásica, aún cuando la probabilidad de ocurrencia de ésta sea baja y casi siempre sea causada por motivos accidentales.

**Falla trifásica sólida.**

Una falla trifásica sólida describe la condición en que los tres conductores, es decir, las tres fases, se unen físicamente con un valor de cero impedancia entre ellas, como si se soldaran o atornillaran físicamente.

Aún cuando este tipo de condiciones de falla no es el más frecuente en ocurrencia, resulta, por lo general, el de mayor valor, y por esta razón resulta el cálculo básico para las instalaciones industriales y comerciales.

**Falla de fase a fase sólida.**

En la mayoría de los sistemas trifásicos, los niveles de falla sólida de fase a fase son de aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica sólida, debido a esto, el cálculo de esta falla, no siempre se requiere, ya que no representa el máximo valor.

### **Falla de línea (fase) a tierra sólida.**

En sistemas con el neutro, sólidamente conectado a tierra, la falla sólida de fase a tierra es por lo general, igual o ligeramente menor que la falla sólida trifásica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia en el que el valor de corriente es significativamente menor.

El cálculo de la falla de línea a tierra, es necesario en las instalaciones comerciales e industriales que tienen el neutro sólidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje. Para el cálculo de la falla de línea a tierra, se requiere del uso de técnicas por componentes simétricas, ya que la corriente de falla a tierra se puede calcular como:

$$I_F = \frac{3V}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N}$$

Donde:

V = Voltaje de línea a neutro.

$Z_1$  = Impedancia de secuencia positiva.

$Z_2$  = Impedancia de secuencia negativa.

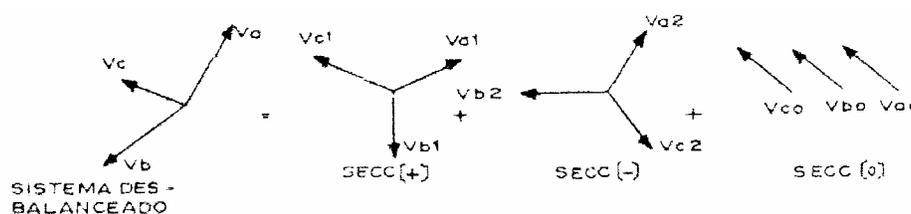
$Z_0$  = Impedancia de secuencia cero.

$Z_N$  = Impedancia de conexión a tierra del neutro.

Este valor de  $Z_N$  en las instalaciones industriales, puede ser una resistencia ( $R_N$ ) cuyo valor se selecciona de manera que limite la corriente de falla a tierra, a un valor entre 400 y 2000 amperes.

### 2.8.7 La Teoría de las Componentes Simétricas.

La teoría de las componentes simétricas, establece que tres vectores desequilibrados de un sistema trifásico, se pueden descomponer en tres sistemas equilibrados de vectores, denominados de secuencia positiva, negativa y cero independientes, así, se resuelve cada una de estas redes como una red balanceada y después se regresa a la solución del problema original. Respaldando esta teoría, es general para circuitos eléctricos trifásicos desbalanceados, y ofrece ventajas para las condiciones transitorias como es el cortocircuito en los sistemas eléctricos de potencia



**Figura 41: Representación de los vectores de secuencia.**

- Los componentes de secuencia positiva, son de igual magnitud con diferencia de fase de  $120^\circ$  y con la misma secuencia de fase que el sistema original.
- Los componentes de secuencia negativa, son de igual magnitud y con diferencia de fase de  $120^\circ$  con la secuencia de fases opuestas al sistema original.
- Los componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual magnitud y con una diferencia de cero grados.

Como cada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes, los vectores expresados en función de sus componentes, se expresa como:

$$\begin{aligned}v_a &= v_a^1 + v_a^2 + v_{ao} \\v_b &= v_b^1 + v_b^2 + v_{bo} \\v_c &= v_c^1 + v_c^2 + v_{co}\end{aligned}$$

### Los Operadores de las Componentes Simétricas.

La letra  $a$  se utiliza normalmente para designar al operador que origina una rotación de  $120^\circ$  en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj. Tal operador es un número complejo de módulo, la unidad y argumento de  $120^\circ$  y que se define como:

$$\begin{aligned}a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \\a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \\a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 360^\circ = 1 \\a^4 &= 1 \angle 120^\circ = a\end{aligned}$$

Con la cual se tiene las relaciones siguientes:

$$\begin{aligned}v_b^1 &= a^2 v_a^1 & v_c^1 &= a v_a^1 \\v_b^2 &= a v_a^2 & v_c^2 &= a^2 v_a^2 \\v_{bo} &= v_{ao} & v_{co} &= v_{ao}\end{aligned}$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores y realizando las operaciones matriciales necesarias, se pueden expresar los voltajes de secuencia en función de los de fase como:

$$\begin{bmatrix} va^0 \\ va^1 \\ va^2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma similar para las corrientes:

$$\begin{bmatrix} Ia^0 \\ Ia^1 \\ Ia^2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix}$$

### Formación de Redes de Secuencia para los Estudios de Corto-Circuito

Para los estudios de cortocircuito, y en particular, para las fallas a tierra, se requiere que cada corriente de secuencia, circule por una red de impedancias de la misma secuencia, es decir, que un estudio de cortocircuito por cualquier método que se aplique, requiere de la formación de las redes.

- De secuencia positiva.
- De secuencia negativa.
- De secuencia cero.

Para un sistema elemental como el que se tiene en la Fig. 42.

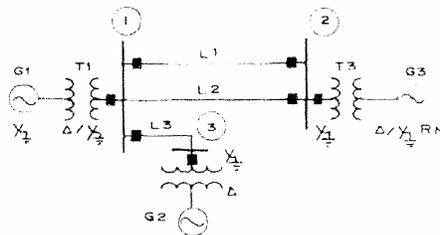


Figura 42: Diagrama unifilar (de un sistema elemental).

### La red de secuencia positiva.

En la figura 43 se ilustra la red de secuencia positiva, se obtiene reemplazando cada elemento del sistema por su impedancia y cada generador por una fuente de voltaje en serie con su impedancia de secuencia positiva, tratándose de instalaciones industriales, los motores síncronos o de inducción, son también fuentes de voltaje y tienen la misma representación.

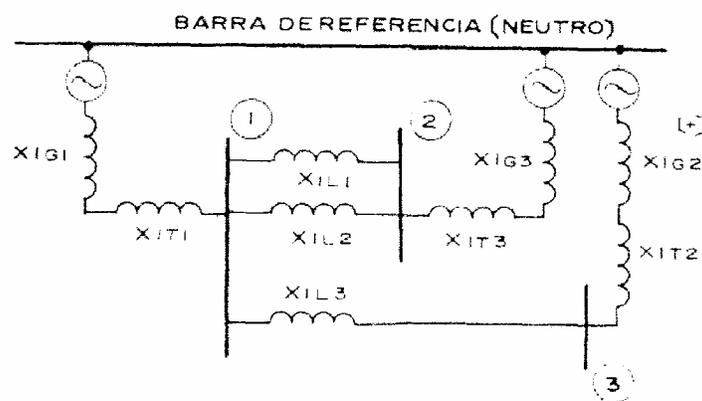


Figura 43: Red de secuencia positiva

### La red de secuencia negativa.

La red de secuencia negativa, se muestra en la Fig. 44, y se obtiene igual que la red de secuencia positiva, es decir, reemplazando cada elemento por su impedancia, de la misma secuencia. En este caso, no se tienen fuentes de voltaje, la razón es que los sistemas están diseñados en la práctica para generar sólo en la secuencia positiva, o sea, secuencia de fases ABC, para un observador que ve fases girando en sentido contrario de las manecillas del reloj.

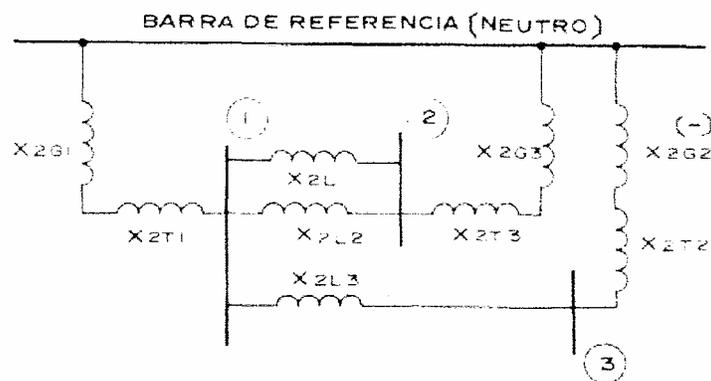


Figura 44: Red de secuencia negativa

### La red de secuencia cero.

En la red de secuencia cero, circulan sólo corrientes de secuencia cero, que aparecen durante la falla a tierra, es decir, que en la formación de esta red, se deben tomar en consideración, la forma en cómo se encuentran los neutros de los elementos conectados a tierra. La red de secuencia cero que se observa en la Fig. 45.

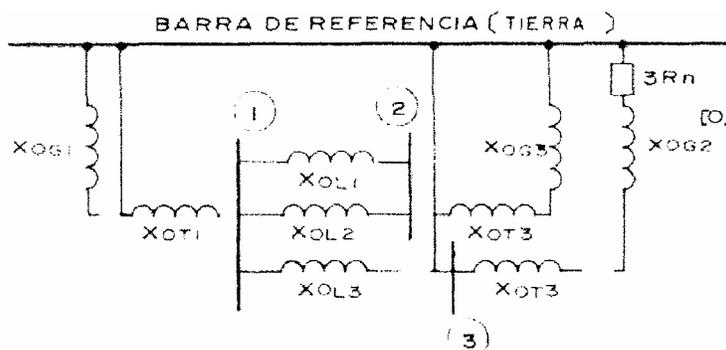
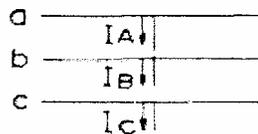


Figura 45: Red de secuencia cero.

### 2.8.8 La Teoría de las Fallas Trifásica y Monofásica.

Para la obtención de las ecuaciones para las componentes simétricas de corriente y tensiones en una red en general, durante una falla, se designan  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ; a

las corrientes que salen del sistema equilibrado inicial, en la falla de las fase A, B, y C. Refiriéndose a la Fig. 46, ésta muestra las tres líneas de un sistema trifásico en la parte de la red en que se presenta la falla. Por conexiones adecuadas de las varillas, pueden presentarse los diversos tipos de fallas.



**Figura 46: Los tres conductores de un sistema trifásico.**

Las tensiones de línea a tierra en la falla, se designan por  $V_a$ ,  $V_b$ , y  $V_c$ , antes de ocurrir la falla.

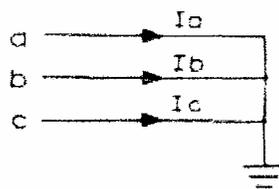
Dado que dibujar las redes de un circuito cualquiera, se supone que cada una de las redes puede reemplazarse por su equivalente de Thévenin entre las dos, la de la barra considerada y el punto de falla.

### **Falla Trifásica.**

En el análisis de fallas, lo que se pretende en primera instancia, es obtener las expresiones que permitan calcular las corrientes de cortocircuito que se requiera en el punto de falla seleccionado.

En la falla trifásica, las varillas hipotéticas están conectadas en la forma representada en la Fig. 47, que corresponde a la falla trifásica sólida.

El método de análisis general, es el de componentes simétricas. A partir de un sistema elemental como el mostrado a continuación:



**Figura 47: Falla trifásica.**

En la falla trifásica, el sistema se mantiene balanceado por lo que sólo se considera las componentes de sec(+), un sistema equilibrado como una red de sec(+). Las corrientes están desfasadas  $120^\circ$  en secuencia ABC aplicando el operador, por lo que:

$$i_b = a^2 * I_a \quad i_c = a * I_a$$

Sustituyendo estos valores en la matriz de componentes de corrientes.

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_a^2 * I_a \\ a * I_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} I_a + a^2 * I_a + a * I_a \\ I_a + a^3 * I_a + a^3 * I_a \\ I_a + a^4 * I_a + a^2 * I_a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_a^2 * I_a \\ a * I_a \end{bmatrix} = I_a/3 \begin{bmatrix} 1 + a^2 + a \\ 1 + a^3 + a^3 \\ 1 + a^2 + a^4 \end{bmatrix}$$

De aquí se obtiene que:

$$I_a^0 = 0$$

$$I_a^1 = I_a$$

$$I_a^2 = 0$$

En la Fig. 48 se muestra el equivalente de Thévenin de la red de sec(+), que se obtiene en forma simplificada.

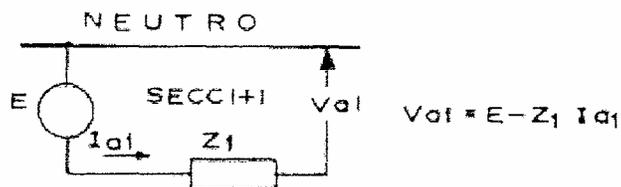


Figura 48: Circuito para la falla trifásica.

La ecuación de voltaje para esta red es:

$$V_{a1} = V_f - Z_1 * I_{a1} \quad \text{como} \quad V_{a1} = V_a = 0$$

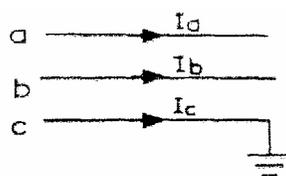
$$0 = V_f - Z_1 * I_{a1}$$

Por lo que:

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1} \quad \text{que es la conocida} \quad I_{3\phi} = \frac{V_f}{Z_1}$$

### Falla Monofásica (Línea a Tierra).

Supóngase que se presenta una falla de este tipo en una fase de un sistema trifásico, y en este momento las otras dos fases están en vacío, de acuerdo al diagrama elemental siguiente:



**Figura 49: Falla monofásica (Línea a Tierra).**

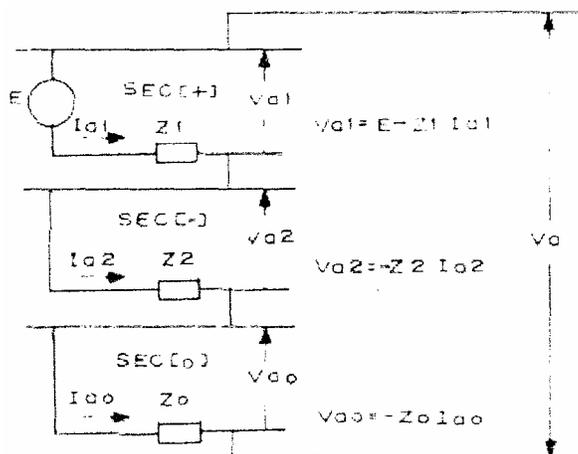
Condiciones de falla son:

$$V_a = 0$$

$$I_b = I_c = 0$$

Las componentes simétricas de la corriente son:

Como se observa, existen tres corrientes de secuencias, además  $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$  significa que las tres redes están conectadas en serie como se muestra en la Fig. 50.



**Figura 50: Conexión de las redes de secuencia para la falla línea a tierra (monofásica).**

Por lo tanto;

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_a = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$$

Como  $V_a = 0$        $0 = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$

$$V_f = Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a2} + Z_0 I_{a0}$$

$$V_f = I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

$$I_{a1} = V_f / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

La corriente de falla total sería;

$$I_a = I_f = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = I_f = I_{a1} + I_{a1} + I_{a1} = 3 * I_{a1}$$

$$I_f = 3V_f / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

Si la falla ocurre en un sistema con neutro conectado a tierra a través de reactancia  $Z_N$ .

$$I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + (Z_0 + 3Z_N)}$$

### 2.8.9 El Detalle de los Cálculos de Cortocircuito.

En esta parte, se presentan algunos de los detalles de los cálculos de cortocircuito que incluyen desde la representación del propio sistema, ya sea en forma general o como una impedancia equivalente del punto de falla hacia la fuente, iniciando por la obtención de los valores equivalentes de las impedancias de los elementos del sistema. Después de esta representación, el cálculo de los valores de cortocircuito, resulta relativamente simple con un procedimiento de paso a paso.

Este procedimiento de paso a paso, debe proporcionar las bases para la realización de los cálculos de cortocircuito para la mayoría de los tipos de instalaciones industriales y comerciales, para sistemas cuya tensión de alimentación

sea de 115 KV con voltajes de distribución o utilización de 3.8 KV, 4.16 KV, 2.4 KV, 440 V ó 220 V. En el caso de las instalaciones industriales se requiere de una representación extensiva, aún cuando un cálculo de cortocircuito se requiera sólo para una parte del sistema, por ejemplo, cuando se instala un nuevo equipo y sólo se requiere conocer el valor de la corriente de cortocircuito en el alimentador del equipo.

Los siguientes pasos identifican las consideraciones básicas para la realización de cálculos de cortocircuito. Desde luego que con la práctica algunos de estos pasos se pueden combinar o simplificar, por ejemplo, el uso de un diagrama unifilar o de impedancias, los pasos básicos son los siguientes:

a) Preparar un diagrama unifilar del sistema, incluyendo todas las componentes significativas del sistema.

b) Determinar los puntos de falla y el tipo de corriente de cortocircuito a determinar, basado en el objeto del mismo, como por ejemplo, el tipo de equipo a especificar.

c) Preparar el diagrama de impedancias correspondiente reemplazando cada elemento por su impedancia y cada fuente de cortocircuito (generador, motor, grupo de motores, red de alimentación) por una fuente de voltaje en serie con una reactancia e impedancia.

d) Para el punto de falla designado y las condiciones de falla, reducir la red, de manera que se obtenga una impedancia equivalente entre el punto de falla y la fuente. Cuando el calculo se hace por medio de la computadora digital, por lo general, se usan m todos matriciales para la formación de la red, en este caso, los equivalentes para todos los nodos, se obtienen en forma automática por medio de los elementos de la diagonal principal de la matriz de red.

### 2.8.10 Aplicación del Cálculo de Cortocircuito

Los métodos de cálculo de cortocircuito, se puede decir que son generales y aplicables a cualquier sistema eléctrico, sin embargo, en el caso de las instalaciones comerciales e industriales, se deben hacer algunas consideraciones particulares, debido a que se tienen cargas en mediana y baja tensión, y por ejemplo, la resistencia que es despreciable en los sistemas eléctricos de potencia en alta tensión, en estos sistemas no lo son.

Para algunos cálculos, se puede hacer uso de métodos simplificados para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, los conceptos de estos métodos se pueden hacer extensivos a los programas digitales.

Estos métodos simplificados se basan en el cálculo de la corriente de cortocircuito simétrica, modelando cada generador como una fuente de voltaje detrás de la reactancia apropiada (por lo general, la subtransitoria), cuando se usa la reactancia subtransitoria, se obtiene el valor inicial de la corriente de cortocircuito, y cuando se usa la transitoria, da el valor de esta corriente unos ciclos después. La llamada componente de corriente directa se ignora.

A este método también se le conoce como  $E/X$ , debido a que se desprecia el valor de la resistencia, especialmente en las componentes de alta tensión (líneas de transmisión, transformadores, cables de potencia) en donde el valor de la reactancia predomina sobre el de la resistencia. En las instalaciones en baja tensión, esta consideración no siempre es válida y entonces la reactancia se reemplaza por la impedancia, el efecto de no incorporar el valor de  $R$  en el cálculo de la corriente de cortocircuito mediante un cociente  $E/X$ , se puede dar a partir de factores cuyos

valores dependen de la relación X/R del sistema y de la velocidad de operación del interruptor.

Este método simplificado se puede usar siempre para dimensionar interruptores y puede resultar un tanto conservador en su cálculo, ya que los factores de corrección ajustan los decrementos de las componentes de corriente alterna y de corriente continua de la corriente de cortocircuito.

Para calcular el valor de la relación X/R para una falla en un punto determinado, existen dos métodos distintos (pero equivalentes).

- A. El primer método involucra la reducción de la red para encontrar el equivalente de Thevenin para reactancias y para resistencias. El procedimiento apropiado consiste en construir el diagrama de reactancias de la red (despreciando las resistencias que se supone tienen valores muy bajos en comparación con la reactancias) entonces se reduce la red hasta encontrar una reactancia equivalente de Thevenin que se conecta entre la fuente y el punto de la falla.

En seguida se construye la red en forma similar al caso anterior, pero ahora sólo con resistencias (despreciando todas las reactancias) entonces se reduce esta red hasta encontrar el equivalente de Thevenin para resistencias, de la fuente al punto de falla.

La relación X/R para una falla en un punto dado, es la relación entre los equivalentes de Thevenin para las redes de reactancia y de resistencia.

- B. El segundo método se basa en la formación de la llamada matriz Z bus, en este caso se orienta la solución hacia el uso de programas digitales, se

puede correr el programa dos veces, una vez para la reactancia, formando X bus y atraparé la red de resistencia, obteniendo Z bus, de modo, que como la diagonal principal de las matrices representa cada nodo o bus del sistema, para cualquier nodo K la relación (X/R) es:

$$(X/R) = X_{busK} / R_{busK}$$

## **CAPÍTULO III**

### **CARACTERÍSTICAS DE LOS INTERRUPTORES EXISTENTES EN LA SUBESTACIÓN BARBACOA I**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo mencionaremos los interruptores de potencia presentes en cada uno de los patios de la Subestación Barbacoa I. Es de hacer notar que en estas instalaciones existe un total de 38 interruptores, de los cuales el 65% poseen cámara de extinción de SF6.

Así mismo pudimos percatarnos que en su mayoría su puesta en servicio, es considerablemente nueva, producto de las diversas ampliaciones que se le han realizado a esta subestación, como también la constante desincorporación de interruptores que venían operando desde la fundación de esta planta y que debido a las constantes pruebas de mantenimiento realizadas a estos equipos, arrojaron como resultado su inminente salida por la obsolencia de los mismos.

### 3.2 Interruptores Instalados en la S/E Barbacoa I

EN EL PATIO DE: 230 KV							
EQUIPO	UBICACIÓN	MARCA	TIPO	AÑO	PUESTA EN SERVICIO	MANDO	CAMARA
M130	ACOPLE DE BARRAS	ALTHOM	S1-245-F3	1999	08/11/2001	MOTOR – RESORTE	SF6
M110	A/T AUTO N° 1	GECALSTHOM	FX-12	1990	24/09/1997	OLEONEUMATICO	SF6
M210	A/T AUTO N° 2	B.B.C.	ELF-245pat	1982		NEUMATICO	SF6
M310	A/T AUTO N° 3	ALSTOM	S1-245-F3	1999	02/04/2003	OLEONEUMATICO	SF6
M410	A/T AUTO N° 4	GECALSTHOM	FX-12	1990	16/09/2001	OLEONEUMATICO	SF6
M105	LÍNEA STA. TERESA I	MAGRINI GALILEO	245 MHMe-1P	1993	02/04/1997	NEUMATICO	SF6
M205	LÍNEA STA. TERESA II	MAGRINI GALILEO	245 MHMe-1P	1993	17/03/1995	NEUMATICO	SF6
M305	LÍNEA TIGRE 1	A.E.G.	S1-245-F3	1996	04/02/1998	MOTOR – RESORTE	SF6
M405	LÍNEA TIGRE 2	A.E.G.	S1-245-F3	1996	03/03/1998	MOTOR – RESORTE	SF6
M505	LÍNEA BBCOA. II N° II	GECALSTHOM	FX-12	1990	12/05/2003	OLEONEUMATICO	SF6
M605	LÍNEA BBCOA. II N° I	GECALSTHOM	FX-12	1990	17/10/1999	OLEONEUMATICO	SF6
N° INTERRUPTORES: 11							
EN EL PATIO DE: 115 KV							
EQUIPO	UBICACIÓN	MARCA	TIPO	AÑO	PUESTA EN SERVICIO	MANDO	CAMARA
H130	ACOPLE DE BARRAS	DELLE	HPG 11/15 S	1966		OLEONEUMATICO	ACEITE
H180	B/T AUTO N° 1	A.E.G.	S1-145	1991	15/05/1994	NEUMATICO	SF6
H280	B/T AUTO N° 2	DELLE ALSTHOM	HPG 11/15 S	1966		OLEONEUMATICO	ACEITE
H380	B/T AUTO N° 3	A.E.G.	S1-145	1991	15/08/1994	NEUMATICO	SF6
H480	B/T AUTO N° 4	A.E.G.	S1-145	1991		NEUMATICO	SF6
H105	CHUPARIN	DELLE	HPG 11/15 S	1966		OLEONEUMATICO	ACEITE
H205	GUARAGUAO	DELLE	HPG 11/15 S	1966		OLEONEUMATICO	ACEITE
H305	BARCELONA N° 1	A.E.G.	S1-145	1991	18/11/1993	NEUMATICO	SF6
H405	BARCELONA N° 2	DELLE ALSTHOM	FL-170	1980		OLEONEUMATICO	SF6
H505	RESERVA	A.E.G.	S1-145	1991	13/12/1998	OLEONEUMATICO	SF6
H605	LA ISLETA	A.E.G.	S1-145	1991	23/01/1999	NEUMATICO	SF6
H705	RESERVA	DELLE ALSTHOM	FL-170	1980		OLEONEUMATICO	SF6
H510	A/T TRAF0 N° 5	ASEA	HLP-145/250 1			MOTOR-RESORTE	SF6

H610	A/T TRAF0 N° 6	ALSTHOM ATLANTIQUE	FX-145-11	1982		OLEONEUMATICO	SF6
H710	A/T TRAF0 N° 7	OERLIKON	OP6	1965		OLEONEUMATICO	ACEITE
H810	RESERVA	OERLIKON	OP6	1965		OLEONEUMATICO	ACEITE
N° INTERRUPTORES: 16							

EN EL PATIO DE: 34,5 KV							
EQUIPO	UBICACIÓN	MARCA	TIPO	AÑO	PUESTA EN SERVICIO	MANDO	CAMARA
B130	ACOPLE DE BARRAS	SIEMENS	8HH-INTEMPERIE	2001	05/02/2004	MOTOR – RESORTE	SF6
B580	B/T TRAFONº 5	ALSTHOM ATLANTIQUE	HPGE 7/9 E	1982		MOTOR – RESORTE	ACEITE
B680	B/T TRAFONº 6	ALSTHOM ATLANTIQUE	HPGE 7/9 E	1982		MOTOR – RESORTE	ACEITE
B780	B/T TRAFONº 7	DELLE	HPGE 7/9	1966		MOTOR – RESORTE	ACEITE
B105	CLARINES	SIEMENS	8HH-INTEMPERIE	2001	09/01/2005	MOTOR – RESORTE	SF6
B205	HELVEVA	ALSTHOM ATLANTIQUE	HPGE 7/9 E		19/10/2005	MOTOR – RESORTE	SF6
B305	BARCELONA Nº 2	ALSTHOM ATLANTIQUE	HPGE 7/9 E	1982		MOTOR – RESORTE	ACEITE
B405	BARCELONA Nº 1	SIEMENS	8HH-INTEMPERIE	1982	04/06/2006	MOTOR – RESORTE	ACEITE
B505	POLAR	ALSTHOM ATLANTIQUE	HPGE 7/9 E	1982	17/01/1999	MOTOR – RESORTE	ACEITE
B605	BOCA DE TIGRE	SIEMENS	8HH-INTEMPERIE	2001	09/09/2001	MOTOR – RESORTE	SF6
B705	PRAXAIR	TABLECEL	OX36	1976		MOTOR – RESORTE	VACIO-SF6
B805	NARICUAL	SIEMENS	8HH-INTEMPERIE	2001		MOTOR – RESORTE	SF6
Nº INTERRUPTORES: 11							

### 3.3 Características del Interruptor FX-12 (230 kV).

#### 3.3.1 Características Generales

El interruptor del tipo FX es un equipo con una o varias cámaras de corte, con polos separados, para uso exterior.

El gas SF6 se utiliza como fluido dieléctrico y como agente extintor del arco. La técnica de corte es la del soplado autoneumático, denominado de simple presión:

el arco se apaga por medio de un chorro de gas, comprimido durante la maniobra de apertura.

Este interruptor está:

**Bien adaptado a las exigencias de las redes de alta tensión:**

La baja constante de tiempo térmico (facultad de llevar rápidamente a cero la conductibilidad del arco, incluso con muy pequeños valores de corriente) y la gran capacidad de absorción de los electrones libres (debido a su carácter electronegativo) confieren al SF<sub>6</sub> un elevado poder extintor del arco.

El rápido restablecimiento de la rigidez entre los contactos permite al interruptor realizar:

- el corte con elevadas velocidades de restablecimiento de tensión elevadas: simple solución al problema de fallo kilométrico.

- el corte de las corrientes capacitivas sin recibidos.

- el rápido reenganche: puesto que el medio gaseoso en el momento del segundo corte es prácticamente idéntico al que era antes del primero.

**Autónomo:**

Funciona con una simple presión y en volumen cerrado, no requiere ningún dispositivo de alimentación ni de rellenado en presión.

**Seguro:**

Dispone de un mecanismo sencillo, sólido y que no se desajusta, que funciona sin precauciones particulares.

**Sin peligro ni nocividad:**

El SF6 no se inflama y no es tóxico. El funcionamiento es prácticamente silencioso puesto que el gas se utiliza en un depósito cerrado, sin escape a la atmósfera.

Además, el SF6 es un buen amortiguador del ruido, pues su conductibilidad sónica es muy pequeña.

**De fácil control y poco mantenimiento.**

El control de la presión interna y un eventual complemento de llenado se pueden efectuar sin interrumpir el servicio.

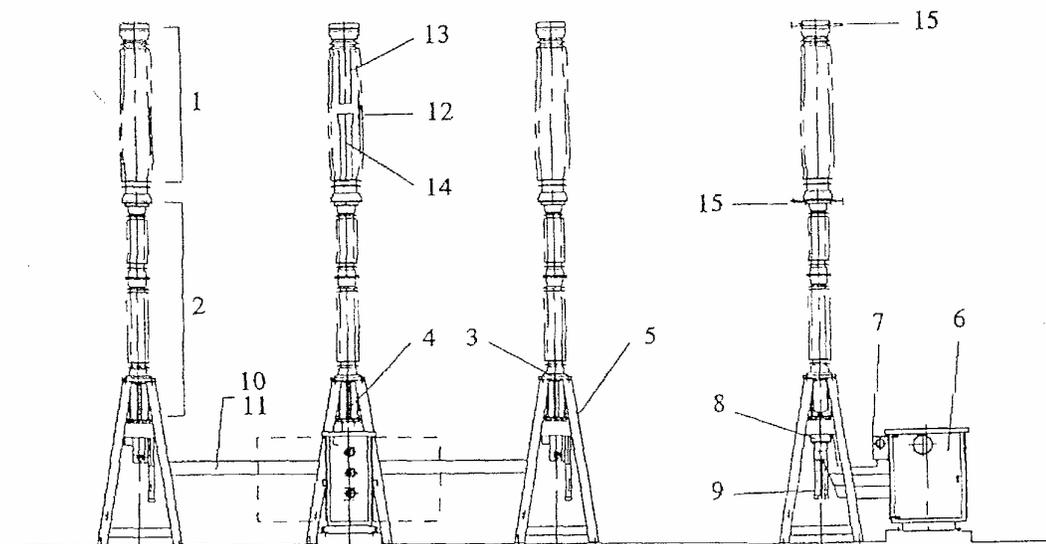
Las características físicas, químicas y eléctricas del SF6 hacen de él un excelente aislante. Los productos de descomposición gaseosos se eliminan con un agente absorbente.

Las piezas de contacto garantizan el paso de corriente permanente las cuales se desgastan muy poco, pues no están sometidas al arco. Las piezas de corte están protegidas contra los efectos del arco por un material refractario.

El mecanismo interno no requiere ningún tipo de mantenimiento periódico.

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	
Tensión:	245 kV
Tensión a los impulsos tipo rayo:	1050 kV
Frecuencia:	60 Hz
Corriente de corta duración admisible	40 kA
Tiempo de cortocircuito	3 s
Corriente en servicio continuo:	2000 A
Poder de corle en cortocircuito simétrica:	40 kA
Poder de cierre en cortocircuito:	100 kV
Resistencia de contacto (por cámara de corte, contacto nuevo):	36 $\mu\Omega$
Secuencia de maniobras:	O - 0,3 s - CO - 3 min CO
Presión al gas SF6 20 °C, 1013 hPa:	7.65 bar
Presión del gas SF6 segundo límite, 20 °C, 1013 hPa:	7,10 bar
Masa del gas SF6:	20,6 kg

### 3.3.2 Vista General del Interruptor FX-12



**Figura 51: Partes del Interruptor FX-12.**

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. Cámara de corte.                                  | 8. Gato.                |
| 2. Columna soporte.                                  | 9. Acumulador.          |
| 3. Bloque de estanquidad y de<br>raccordamiento SF6. | 10. Tubería hidráulica. |
| 4. Carter inferior.                                  | 11. Tubería de gas SF6. |
| 5. Chasis.   | 12. Aislador.           |
| 6 Armario de los auxiliares.                         | 13. Contacto superior.  |
| 7. Cofre SF6.  | 14. Contacto móvil.     |
|  | 15. Toma de corriente.  |

### **3.4 Características del Interruptor S1-145 (115 Kv).**

#### **3.4.1 Características Generales**

El interruptor S1-145 fabricado por AEG Venezolana SA. es del tipo puffer, con medio de extinción en SF6 y con mando Neumático. El accionamiento de estos equipos está diseñado para actuar en forma monopolar, sin embargo el mando eléctrico ó el gabinete de control en general se fabrica para operación tripolar. Contiene dos (2) bobinas de disparo y una (1) de cierre por cada polo y en particular la serie S1-145 es para operación a tensiones de servicio igual ó inferior a 145 KV.

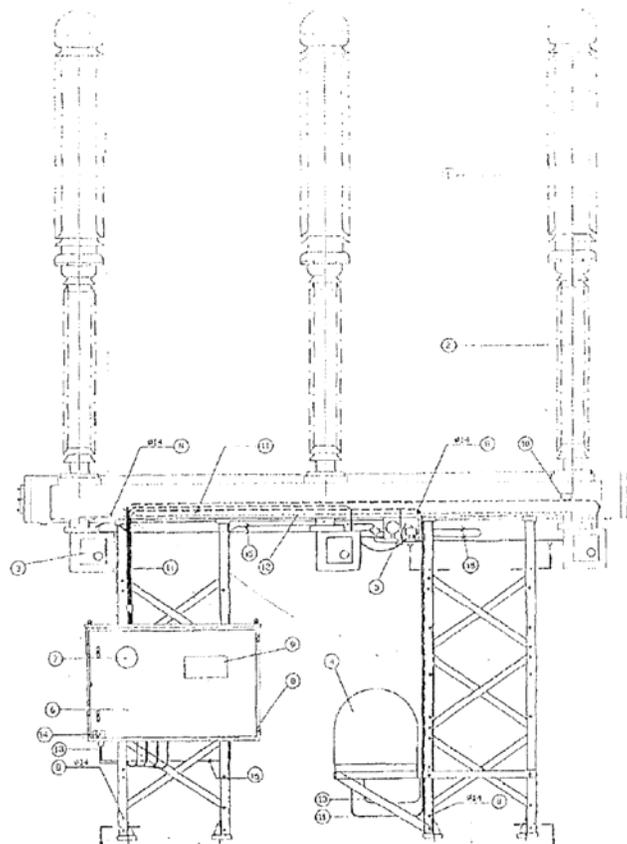
Es de mucha importancia que las recomendaciones dictadas, sean consideradas por los usuarios a fin de obtener un buen funcionamiento del equipo y lo más importante, que se encuentre disponible cuando se requiera de su servicio.

Básicamente el interruptor ensamblado por AEG Venezolana, S.A. está constituido por las siguientes partes:

- a) Columnas Polar.
- b) Tanque para aire con vigas “U”.
- c) Estructura soporte.
- d) Contactos auxiliares.
- e) Tubería de aire y SF6.
- f) Unidad de aire comprimido (ICU).
- g) Gabinete.
- h) Precableado.
- i) Unidad densímetro-manómetro.

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>			
Tipo	Si - 145	Ciclo de Operación	0-0,3 s- C0-3 mm-CO
Serial N°	310 556	Volumen total de SF6	321 l
E-N°	1289	Peso total de SF6	17kg
Año de fabricación	1991	Presión SF5 a 20 °C máx./min.	7/6 bar
Tensión Nominal	115 kV	Pureza en peso del SF6 25 °C	53g/l
Tensión Máxima de Utilización	145 kV	Presión de Aire máx./min.	6/10 bar
Tensión Onda de Choque	650 kV	Tensión bobina disparo	DC 77-121 V
Tensión Frecuencia Industrial	275 kV	Tensión bobina cierre	DC 77-121 V
Frecuencia Nominal	60 Hz	Tensión circuito auxiliar	DC 110 V
Corriente Nominal	3150 A	Tensión del motor (AC) 60HZ	120V
Factor del Primer Polo	15	Peso total por polo	500 kg
Capac. Interrupción en cortocircuito	31,5 kA	Peso total del interruptor	2357 kg
Capac. Interrupción en discord. de fases	7,9 kA	Temperatura	-25 / +40 °C

### 3.4.2 Vista General del Interruptor S1-145



**Figura 52: Partes del Interruptor S1-145.**

- |   |  |
|---|--|
| 1. Cámara de Extinción.                             | 8. Punto de Tierra Conector 2/0 AWG.       |
| 2. Columna Soporte.                                 | 9. Placa de Características.               |
| 3. Contactos auxiliares con indicación de posición. | 10. Placa de Identificación.               |
| 4. Unidades de aire (ICU).                          | 11. Precableado del Interruptor.           |
| 5. Unidad densímetro-manómetro SF6.                 | 12. Tubería SF5.                           |
| 6. Armario de mando.                                | 13. Tubería de Aire.                       |
| 7. Ventana para Inspección presión de aire          | 14. Disparo Manual (interior de gabinete). |
|   | 15. Tubería del Disparo Manual.            |

### **3.5 Características del Interruptor 3AH3 (34,5 Kv).**

#### **3.5.1 Características Generales**

Los interruptores de potencia al vacío 3AH3 de Siemens son tripolares, están diseñados para ser empleados en interiores y resultan adecuados para tensiones nominales comprendidas entre 7,2 kV y 36 kV.

El interruptor al vacío consta de la caja del accionamiento que incluye el acumulador de energía por resorte y los elementos de mando, de los tres polos equipados con tubos de maniobra al vacío, de los aisladores de apoyo de resma colada y de las barras de maniobra.

La posición de montaje del interruptor al vacío, referida a los tubos de maniobra al vacío, es la vertical. El interruptor al vacío se puede utilizar prácticamente en todos los tipos de instalaciones.

Bajo condiciones normales de servicio, el interruptor al vacío no requiere mantenimiento.

#### **Placa de Características**

La placa de características puede leerse estando el interruptor en la posición de servicio y contiene los siguientes datos:

Type 3AH3117-7		Design code 2Y	
Nr. S 32444557		Year of manuf. 1998	
13	$U_n$ 12 kV, 50/60 Hz	$I_r$ 3150 A	6
12	$I_{sc}$ 50 kA	$t_k$ 3s	7
11	$U_p$ 75 kV	$m$ 180 kg	8
Rated operating sequence: O- -CO-3min-CO			
MADE IN GERMANY			

**Figura 53: Placa de características.**

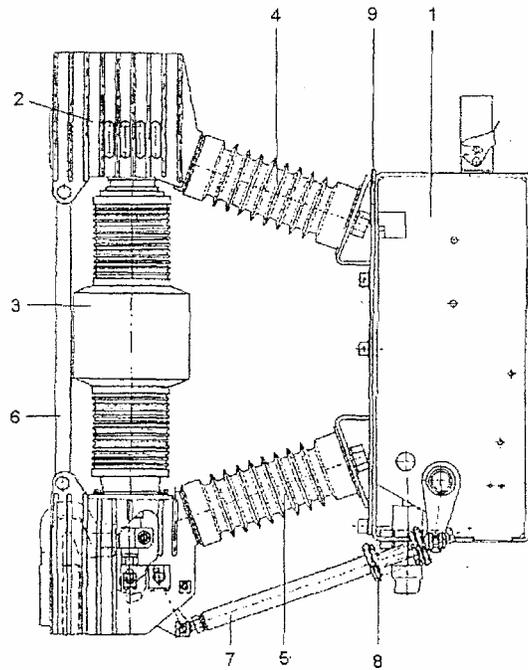
- |   |   |
|---|---|
| 1. Fabricante.                          | 9. Secuencia nominal de maniobra.                   |
| 2. Designación de tipo.                 | 10. Frecuencia nominal.                             |
| 3. Número de serie.                     | 11. Tensión nominal de choque soportable por rayos. |
| 4. Indicativo de la forma constructiva. | 12. Intensidad nominal de corte en cortocircuito.   |
| 5. Año de fabricación.                  | 13. Tensión nominal.                                |
| 6. Intensidad nominal de servicio.      |   |
| 7. Duración nominal de cortocircuito.   |   |
| 8. Peso.                                |   |

### 3.5.2 Vista General del Interruptor 3AH3

El interruptor al vacío está compuesto por la caja del accionamiento (1), los 3 polos (2), con los tubos de maniobra al vacío (3); los aisladores de resma colada (4 y 5), los largueros de refuerzo (6) y las barras de maniobra (7) con resortes de contacto (8), necesarias para accionar los contactos.

Cada uno de los tres polos (2) está sujeto por los aisladores de resma colada (4 y 5) que están atornillados a la placa portapolos (9).

La caja del accionamiento (1) aloja todos los elementos eléctricos y mecánicos necesarios para conectar y desconectar el interruptor al vacío.



**Figura 54: Interruptor de potencia al vacío 3AH3.**

## **CAPÍTULO IV**

### **CALCULO DEL NIVEL DE CORTOCIRCUITO**

#### **4.1 Introducción**

La condición normal de un sistema de potencia es cuando tiene un régimen de funcionamiento trifásico balanceado, sin embargo en ocasiones ese régimen es afectado por incidentes indeseados como lo son las fallas por cortocircuito en los diferentes puntos de una instalación, esta situación es la que permitirá la selección del interruptor y de la protección, logrando de esta forma una disminución de los daños y cortes de energía que pudieran ser ocasionados por la falla.

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar el procedimiento de cálculo de cortocircuito en las barras de 230 kV, 115 kV y 34,5 kV en la Subestación Barbacoa 1 y presentar la tabla de resultados.

#### **4.2 Niveles de Cortocircuito en las Barras**

Los niveles de cortocircuito en una instalación eléctrica deben comenzar a partir de un nivel de tensión definido para obtener la corriente y potencia de cortocircuito en diferentes puntos de una red de distribución, no se requiere hacer el estudio refiriéndolo al sistema de transmisión, únicamente se necesitaría los valores de falla en un punto de conexión de la red al sistema, y construir de allí un circuito equivalente externo. Es de hacer notar que para efectos del cálculo, el análisis se hará en la barra, ya que representaría el caso más extremo a la hora de presentarse una falla.

Posteriormente, se mostrarán las tablas de los niveles de cortocircuito monofásico y trifásico en cada una de las barras de la Subestación Barbacoa 1.

### 4.3 Procedimiento Usado para el Cálculo

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo, basado en la teoría del capítulo 2 y usado para la determinación de las corrientes de cortocircuito.

#### 4.3.1 Impedancias Externas de Secuencia Positiva y Negativa

Para calcular la impedancia de secuencia positiva y negativa se utilizará la siguiente ecuación;

$$I_{th} = \frac{V_{th}}{Z_{th}};$$

$I_{th} = I_{CC3f}$  en valores por unidad.

$V_{th}$  = Voltaje en valor por unidad (1 p.u.)

$Z_{th} = Z_1$  = Impedancia de secuencia positiva.

$$I_{CC3f} = \frac{1}{Z_1}$$

Despejando  $Z_1$

$$Z_1 = \frac{1}{I_{CC3f}}$$

Por lo general, se toma el valor de la impedancia de secuencia negativa igual al de secuencia positiva.

$$Z_2 = Z_1 = \frac{1}{I_{cc} 3f}$$

#### 4.3.2 Impedancias Externas de Secuencia Cero

Para calcular la impedancia externa de secuencia cero se utilizará la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{3.E}{2.Z_1 + Z_0}$$

$I_a = I_{1f}$  en valores por unidad.

$E$  = Voltaje en valor por unidad (1 p.u)

$Z_1$  = Impedancia de secuencia positiva

$Z_0$  = Impedancia de secuencia cero.

$$I_{cc} 1f = \frac{3.1}{2.Z_1 + Z_0}$$

Despejando  $Z_0$

$$Z_0 = \frac{3.1}{I_{cc} 1f} - (2.Z_1)$$

#### 4.3.3 Impedancia del Transformador

Para obtener la impedancia equivalente del transformador es necesario los siguientes datos:

- Impedancia en porcentaje del transformador.
- Potencia en MVA del transformador.
- Relación X/R del transformador. Esta se obtiene directamente de la gráfica de la IEEE Std 141-1993, interceptando con la potencia en MVA del transformador la curva.

La impedancia porcentual se transforma a valores por unidad utilizando la siguiente fórmula:

$$Z_{\text{tpu}} = \frac{(Z_t \% / 100) \cdot \text{MVA}_{\text{base}}}{\text{MVA}_{\text{transf}}}$$

$Z_{\text{tpu}}$  = Impedancia del transformador expresada en valores por unidad.

$Z_t \%$  = Impedancia del transformador expresada en porcentaje.

$\text{MVA}_{\text{base}}$  = Potencia base seleccionada.

$\text{MVA}_{\text{transf}}$  = Potencia del transformador.

Obtenida se calcula  $X_{\text{pu}}$  y  $R_{\text{pu}}$

$$R_{\text{pu}} = \frac{Z_{\text{pu}}}{\sqrt{(X/R)^2 + 1}}$$

$$X_{\text{pu}} = (X/R) \cdot R_{\text{pu}}$$

La impedancia interna equivalente del transformador será:

$$Z_{\text{equ}} = R_{\text{pu}} + j X_{\text{pu}}$$

#### 4.3.4 Cálculo de Corriente de Cortocircuito Trifásica en las Barras

Con la impedancia de secuencia positiva y la impedancia del transformador se construye el circuito equivalente para una falla trifásica.

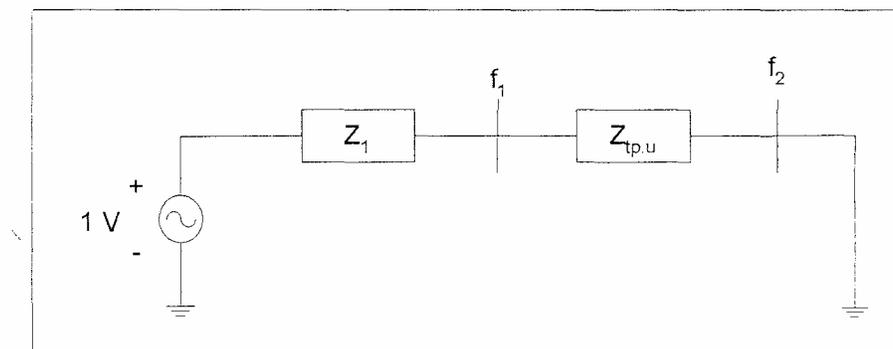


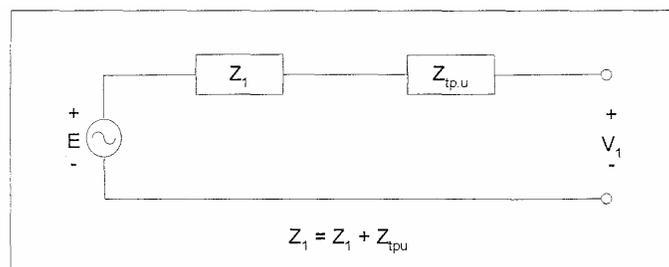
Figura 55: Circuito equivalente de falla trifásica

Por lo tanto:

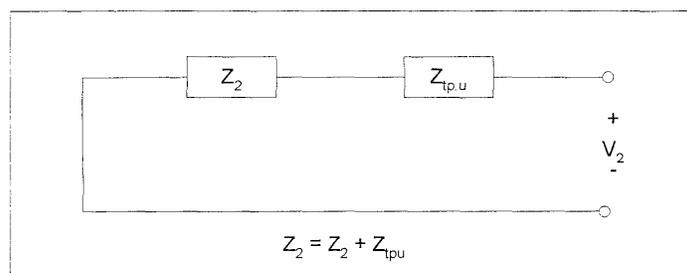
$$I_{cc1f} = \frac{1}{Z_1 + Z_{tpu}}$$

#### 4.3.5 Cálculo de Corriente de Cortocircuito Monofásica en las Barras

Se construyen los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero.

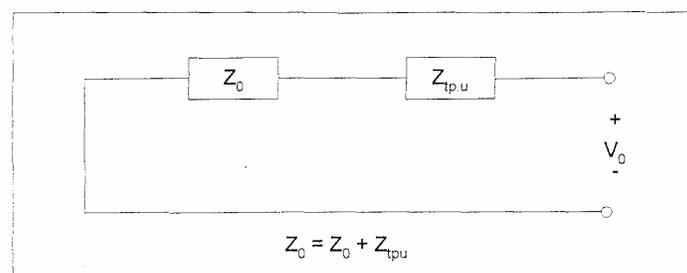


**Figura 56: Circuito de secuencia positiva**



**Figura 57: Circuito de secuencia negativa**

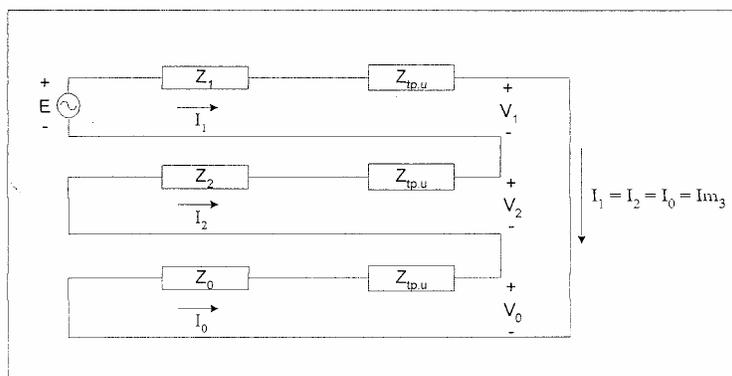
Para construir el circuito de secuencia cero se necesita saber el tipo de conexión a tierra a cada uno de los elementos que componen el sistema.



**Figura 58: Circuito de secuencia cero**

Como ya se mencionó en el capítulo 3, las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$ , en una falla monofásica son iguales, los circuitos equivalentes de cada secuencia estarán

conectados en serie con la impedancia interna equivalente del transformador multiplicada por tres.



**Figura 59: Circuito de falla monofásica**

Por lo tanto:

$$I_{cc1f} = \frac{3.1}{2.Z_1 + Z_0}$$

#### 4.4 Corrientes de Cortocircuito en las Barras

Una vez realizados los cálculos correspondientes se obtuvieron los resultados indicados en las siguientes tablas.

Nivel de tensión (KV)	Líneas	Nivel de C.C., Valores de Placa de los Interruptores (KA)	Nivel de C.C. del Sistema Actual (KA)	Diferencia de la ICC del Sistema (KA)
230	Santa Teresa I	40	11,5	28,5
	Santa Teresa II	40	11,5	28,5
	Tigre I	40	11,5	28,5
	Tigre II	40	11,5	28,5
	Barbacoa II #1	40	11,5	28,5
	Barbacoa II #2	40	11,5	28,5

$$I_{p230KV} = 11,5 \text{ KA}$$

Nivel de tensión (KV)	Líneas	Nivel de C.C., Valores de Placa de los Interruptores (KA)	Nivel de C.C. del Sistema Actual (KA)	Diferencia de la ICC del Sistema (KA)
115	Barcelona	31,5	14,6	16,9
	Parchita	40	14,6	25,4
	Chuparín	47	14,6	32,4
	Guaraguao	47	14,6	32,4
	Isleta	31,5	14,6	16,9

$$I_{p115KV} = 14,6 \text{ KA}$$

A efectos de realizar los cálculos de forma más rápida y precisa se hizo uso del programa de cálculo ETAP Power Station Versión 4.0. Asimismo, se hizo necesario el uso de este programa por la complejidad de la red, ya que se necesita considerar el Sistema de Red Eléctrica Nacional para crear un equivalente externo del sistema.

#### 4.5 Cálculo de Porcentajes de Reserva

Para realizar el cálculo del porcentaje de reserva que va a tener cada uno de los interruptores de potencia, se procedió de la siguiente manera:

$$\%Reserva = \frac{I_{CCN} - I_{CCcalc}}{I_{CCN}} * 100\%$$

Donde:

$I_{CCN}$  = Corriente de Cortocircuito Nominal.

$I_{CCcalc}$  = Corriente de Cortocircuito Calculada.

**En la barra de 230 kV, se obtuvo lo siguiente:**

$$\%Reserva = \frac{40 - 11,5}{40} * 100\% = 71,25\%$$

Perteneciente a los tramos del Barbacoa II, Tigre y Santa Teresa.

**En la Barra de 115 kV, se obtuvo lo siguiente:**

$$\%Reserva \text{ (mayor)} = \frac{47 - 14,6}{47} * 100\% = 68,94\%$$

Perteneciente a los tramos de Chuparín y Guaraguao.

$$\%Reserva \text{ (menor)} = \frac{31,5 - 14,6}{31,5} * 100\% = 53.65\%$$

Perteneciente a los tramos de Barcelona y Las Isletas.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

De acuerdo a las investigaciones y análisis que sustentan el siguiente trabajo se puede concluir lo siguiente:

Los sistemas de potencia interconectados son ventajosos tanto para la generación, transmisión sub-transmisión y distribución de energía eléctrica, puesto que se optimizan los costos de producción de la misma, se disminuye la capacidad de reserva y aumenta la confiabilidad del sistema, pero a su vez se obtiene un aumento en los valores de corrientes de cortocircuito, lo que obliga al uso de Disyuntores con mayor capacidad de interrupción y la posibilidad de que una perturbación inicial pueda conducir a la caída de una gran parte del sistema.

Asimismo, podemos concluir que un cortocircuito es toda conexión accidentalada o intencional que puede aparecer en un circuito cuando se interpone entre dos o más puntos, que se hallan bajo tensiones eléctricas diferentes, una resistencia de valor relativamente bajo o nulo.

Las causas de los cortocircuitos son múltiples y en la mayoría de los casos, según la experiencia obtenida en la Subestación Barbacoa I, se deben a la ruptura o contaminación de la cadena de aisladores, rotura de conductores, balanceo de conductores, incendio debajo de las líneas con cuerpos extraños, envejecimiento del aislamiento, falsas maniobras, sobre tensiones de maniobra, sobre tensiones atmosféricas, etc.

Por otro lado es de hacer notar, lo sucedido en la subestación Barbacoa I:

La corriente de cortocircuito resultante producto del estudio, en el nivel de tensión de 115 Kv, va a ser superior o mayor a la que se pueda producir en el nivel de tensión de 230 Kv, debido a que en el primero, el sistema tiene más elementos presentes, incluyendo los existentes en 230 Kv.

Para efecto del cálculo, se obvió la corriente de cortocircuito que se puede presentar en el nivel de tensión de 34.5 Kv, debido a que actúa como limitante la alta impedancia de los transformadores en 115/34,5 KV, trayendo esto como consecuencia una disminución en la corriente de cortocircuito que se pueda producir.

Las corrientes de cortocircuito, son normalmente altas, con la excepción de sistemas puestos a tierra a través, de impedancias elevadas o aislados de tierra. La magnitud de la corriente de cortocircuito depende esencialmente de la configuración del sistema, del número de generadores conectados en el momento de la falla y del tipo de falla. Se puede decir que las corrientes en un punto de falla pueden estar entre 10 y 20 veces la corriente nominal del sistema en ese punto.

Del análisis, se puede concluir que los interruptores de potencia tanto en 230 KV como en 115 KV, tienen suficiente capacidad de reserva para interrumpir la corriente de cortocircuito calculada.

Las salidas hacia Barcelona y Las Isletas se encuentran trabajando a un 46% de su capacidad total, sin embargo todavía se encuentran muy por debajo de su capacidad de interrupción de cortocircuito, por lo cual no se hace urgente ni necesario sus reemplazos.

## Recomendaciones

- Del análisis, se puede concluir que los interruptores de potencia tanto en 230 KV como en 115 KV, tienen suficiente capacidad de reserva para interrumpir la corriente de cortocircuito calculada.
- Conocer el valor de intensidad máxima de cortocircuito en un sistema de potencia permite, entre otras cosas:
  - Determinar correctamente los equipos de protección a instalar en el sistema y coordinar su funcionamiento.
  - Determinar las capacidades de interrupción de los disyuntores.
  - Determinar los esfuerzos térmicos y dinámicos que deben soportar cada uno de los componentes instalados en el sistema.
  - Permite diseñar convenientemente las puestas a tierra de las subestaciones y equipos asociados.
- La falla que generalmente es más severa es la falla trifásica y es la que determina el dimensionamiento de los interruptores de potencia, sin embargo existen casos en los que la falla monofásica es más severa, como es el caso de que en sistemas sólidamente puestos a tierras ocurre una falla en los terminales de un generador o en el lado en Y de un transformador en  $Y\Delta$ .
- No se debe olvidar que los interruptores de potencia poseen una vida útil alrededor de 20 a 40 años, pero incluso aunque parezcan estar en buenas

condiciones pueden aparecer serios problemas a la hora de requerirse que un equipo de interrupción despeje un fallo.

- Un aspecto que se debe tener en cuenta son las condiciones ambientales a las cuales están expuestos los interruptores, las condiciones de salinidad del aire, la humedad, la contaminación del aire, el polvo, etc., son condiciones que limitan el buen funcionamiento y la vida útil de los equipos eléctricos, provocándole desgaste y envejecimiento.
- Debido a todos estos factores antes mencionados es necesario realizar programas de mantenimiento exhaustivos a los equipos de interrupción para que de esta manera obtengamos de ellos un funcionamiento óptimo a la hora de requerir el despeje de una falla.

## BIBLIOGRAFIA

Acosta M., **“Sistemas Trifásicos Avanzados”**, Editorial Vadell Hermanos, Valencia (1989).

CADAFE, **“Diseño Normalizado de Subestaciones”**, Caracas (1980).

CADAFE, **“Mantenimiento de Líneas y Subestaciones de CADAFE”**, (1996).

**“Element-Properties”**, disponible en:

<http://www.etap.com/training/tutorials/pdfs/Element-Properties.pdf>

Fink Donald, **“Manual de Ingeniería Eléctrica”**, Editorial McGraw-Hill, México (1992).

G. Harpe, **“Líneas de Transmisión y Redes de Distribución de Potencia Eléctrica”**, Mc Graw-Hill Interamericana, S.A., México (1980).

Gracey G. C., **“Transmission Lines”**, Butler and Tanner, Londres (1963).

Gross, C. **“Análisis de sistemas de potencia”**. Primera edición. INTERAMERICANA. México (1982).

Harper E., **“Protección de Instalaciones Eléctricas Industriales y Comerciales”**, Editorial Limusa, México (1995).

IEEE Std 141, **“Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”**, (1993).

IEEE Std 399, “**Recommended Practice for Industrial and Comercial Power System Analysis**”, (1993).

“**Interruptores**”, disponible en:

<http://zeus.dci.ubiobio.cl/~eleduc/index.html>

“**Load-Flow-Analysis**”, disponible en:

<http://www.etap.com/training/tutorials/pdfs/Load-Flow-Analysis.pdf>

Marina, E. “**Manual de Power Factory**”. Nivel I. Unidad de Despacho de carga Central. C.A.D.A.F.E. Enero 2001. Última revisión: noviembre de 2004.

Manual del Usuario del Programa **DIgSILENT**, versión **10.3**. Gomaringen, August (1996).

Martín J., “**Diseño de Subestaciones Eléctricas**”, Editorial McGraw-Hill, México (1992).

Nasar S., “**Sistemas Eléctricos de Potencia**”, Editorial McGraw-Hill, México (1991).

Oliveros Alfredo, “**Estudio y Comportamiento de la Extinción del Arco Eléctrico en Interruptores de Potencia**”, Tesis UDO (1986).

OPERATION TECHNOLOGY INC. Documento de Adobbe Acrobat “**Manual ETAP Power Station 5.0.0**”. 2006.

PDVSA, “**Manual de Ingeniería de Diseño Eléctrico**”, Tomo 1 y 11, (1993).

Santaella, L.; Guevara, O.; Bermúdez, M.; Herrera, P.; Levy C. **“Manual del operador de las subestaciones de transmisión de CADAFE”**. 1987.

**“Short-Circuit-Analysis”**, disponible en:

<http://www.etap.com/training/tutorials/pdfs/Short-Circuit-Analysis.pdf>

Stevenson W., **“Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia”**, Editorial Mc GrawHill, México (1998).

Toledano J. y J. Sanz, **“Instalaciones Eléctricas de Enlace y Centros de Transformación”**, Editorial Paraninfo, Madrid (1998).

Wiley John, **“Circuitos Eléctricos”**, Editorial Continental, México (1966).

## **ANEXOS**

MANUAL DE INICIO

ETAP POWER STATION

Versión 5.0.0

Operation Technology, Inc., 2006

Todos los derechos reservados: Operation Technology, Inc. (800) 477-ETAP [477-3827] / (888) OTI-ETAP [684-3827] / (949) 462-0100 / Fax: (949) 462-0200 / E-Mail: sales@etap.com / www.etap.com

Versión en español – Traducido por Transail Technical Translations - www.transail.cl

### **INTRODUCCIÓN**

ETAP PowerStation es un programa de 32 bits, desarrollado para los sistemas operativos Microsoft® Windows® 2000 y XP. Este demo es totalmente interactivo y le permite hacer cambios al diagrama unilineal, correr estudios del sistema y revisar gráficamente los resultados del estudio - de la misma forma como lo hace el programa comercial. El demo le da la oportunidad de explorar las variadas características y capacidades de ETAP incluyendo análisis de Flujo de Carga, Cortocircuito y Sistemas de Conducción Subterráneos. Otros módulos de análisis, como Aceleración de Motores (Motor Acceleration), Armónicas (Harmonics), Estabilidad Transitoria (Transient Stability), Coordinación de Protecciones (Device Coordination), Flujo Óptimo de Potencia (Optimal Power Flow), Estudios de Confiabilidad (Reliability Assessment), Flujo de Carga DC (DC Load Flow), Cortocircuito DC (DC Short-Circuit), Dimensionamiento y Descarga de Baterías (Battery Sizing and Discharge), Sistemas de Mallas de Puesta a Tierra (Ground Grid

Systems), Dimensionamiento de Transformadores (Transformer MVA Sizing), Optimización de Taps en Transformadores (Transformer Tap Optimization), Estimación de Parámetros (Parameter Estimation) y Sistemas de Tracción de Cables (Cable Pulling Systems), pueden ser activados a su solicitud.

### Descripción Del Producto

ETAP es un programa de análisis de sistemas eléctricos de potencia totalmente gráfico que corre en los sistemas operativos Microsoft® Windows® 2000, XP y 2003. Además de los módulos de simulación estándar para análisis off-line, ETAP puede utilizar datos de operación en tiempo real on-line para monitoreo avanzado, simulación en tiempo real, optimización y desprendimiento inteligente de carga en tiempo real. Sin embargo, en el demo de ETAP 5.0 sólo se incluyen los módulos de simulación off-line.

ETAP le permite trabajar directamente con diagramas unilineales, sistemas de canalización subterráneos de cables, sistema tridimensional de cables, coordinación tiempo-corriente de protecciones y gráficos de selectividad, esquemas de sistemas de información geográficos (GIS), así como sistemas de mallas de puesta a tierra tridimensionales. El programa ha sido diseñado de acuerdo a tres conceptos clave:

#### Operación en Realidad Virtual

La operación del programa se asemeja a la operación de un sistema eléctrico real tanto como es posible. Por ejemplo, cuando Ud. abre o cierra un interruptor de circuito, pone un elemento fuera de servicio o cambia el estado de operación de motores, los elementos y subsistemas desenergizados son indicados en el diagrama unilineal en gris. ETAP incorpora nuevos conceptos para determinar la coordinación de dispositivos de protección directamente desde el diagrama unilineal.

### Integración Total de Datos

ETAP combina los atributos eléctricos, lógicos, mecánicos y físicos de los elementos del sistema en la misma base de datos. Por ejemplo, un cable no sólo contiene datos representando sus propiedades eléctricas y dimensiones físicas, sino también información indicando las canalizaciones a través de las cuales está tendida. Así, los datos para un cable individual pueden ser usados para análisis de flujo de carga o cortocircuito (los cuales requieren parámetros eléctricos y conexiones) como para cálculos de disminución de la capacidad de transporte (ampacity derating), los cuales requieren datos de tendido físico. Esta integración de los datos otorga consistencia a través del sistema y elimina múltiples entradas de datos para el mismo elemento.

### Simplicidad en la Entrada de Datos

ETAP mantiene un track de los datos detallados para cada aparato eléctrico. Los editores de datos pueden acelerar el proceso de entrada requiriendo el mínimo de datos para un estudio en particular. Para lograr esto, hemos estructurado los editores de propiedades en la forma más lógica de ingresar datos para diferentes tipos de análisis o diseño.

El diagrama unilineal de ETAP permite una cantidad de características para ayudarle a construir redes de diversa complejidad. Por ejemplo, cada elemento puede tener individualmente variadas orientaciones, tamaños y símbolos (IEC o ANSI). El diagrama unilineal también le permite añadir múltiples dispositivos de protección en una rama entre un equipo y una barra.

ETAP proporciona una variedad de opciones para presentar o ver su sistema eléctrico. Estas vistas son llamadas presentaciones. La ubicación, tamaño, orientación y símbolo de cada elemento puede ser diferente en cada presentación. Adicionalmente, los dispositivos de protección y relés pueden ser desplegados

(visibles) u ocultos (invisibles) para alguna presentación en particular. Por ejemplo, una presentación puede ser una vista de relés donde todos los dispositivos de protección son desplegados. Otra presentación puede mostrar un diagrama unilineal con algunos interruptores de circuito expuestos y el resto oculto (un layout más adecuado para resultados de flujo de carga).

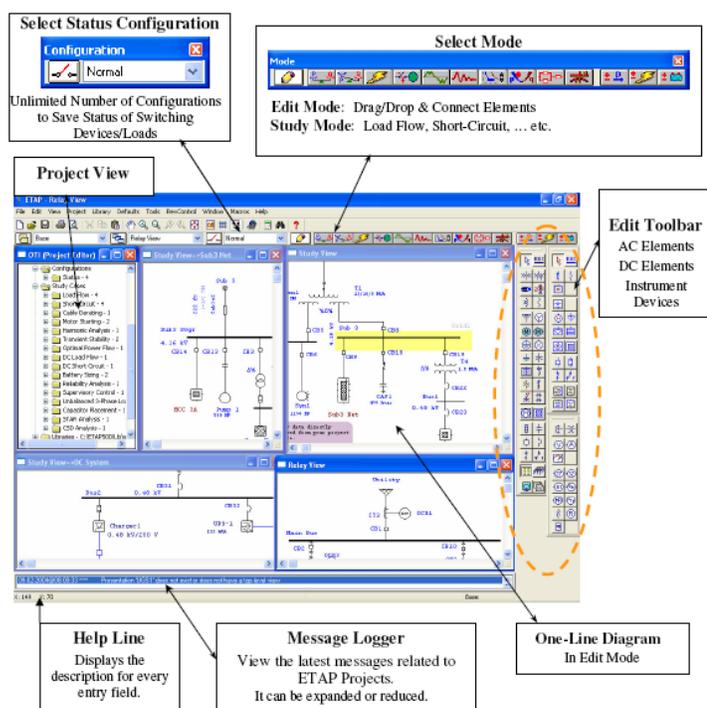
Entre las características más poderosas de ETAP están las redes compuestas y los elementos de motores. Los elementos compuestos permiten anidar gráficamente elementos de una red dentro de sí misma, con una profundidad arbitraria. Por ejemplo, una red compuesta puede contener otras redes compuestas, dando la capacidad de construir redes eléctricas complejas manteniendo aún un diagrama limpio y ordenado, desplegando lo que Ud. desea enfatizar, pero manteniendo el siguiente nivel de detalle del sistema al alcance de un clic.

### Mapas De Interfaz

Los siguientes mapas son proporcionados para describir la estructura general y la interfaz de usuario de ETAP.

### Modo de Edición

Aquí usted puede gráficamente agregar, borrar, mover o conectar elementos; acercar o alejar “zoom in” o “zoom out”; desplegar cuadrícula “grid on” o “grid off”; cambiar el tamaño, orientación, símbolo o visibilidad de elementos; editar propiedades; setear estado de operación y más.



## Barra de Menú

Esta barra contiene una amplia lista de opciones de menú. Cada opción activa una lista desplegable de comandos como operaciones de Archivo, Impresión, Conversiones de Base de Datos, Intercambio de Datos, objetos OLE, Estándares de Proyectos, Configuraciones de Proyectos, Opciones de Proyectos, Bibliotecas, Elementos por Defecto, Fuentes de Anotación, Datos Base y de Revisión, y más.

File Edit View Project Library Defaults Tools RevControl Window Macros Help

## Project Toolbar

Contiene botones que proporcionan acceso directo a muchas de las funciones que se utilizan comúnmente. Estas funciones son: Create Projects, Open Projects,

Save Projects, Print, Print Preview, Cut, Copy, Paste, Pan, Zoom, Text Box, Grid Display, Continuity Check, Hyperlink, Power Calculator, Find y Help.



## Project View

Project View es una representación jerárquica y gráfica que incluye Presentations, Configurations, Study Cases, Libraries y Components asociados con su proyecto. Aquí usted puede crear y manipular las posteriores presentaciones, configuraciones y casos de estudios:

Presentaciones en Diagrama Unilineal

Sistemas de Canalización Subterráneos de Cables U/G

Sistemas de Malla de Puesta a Tierra

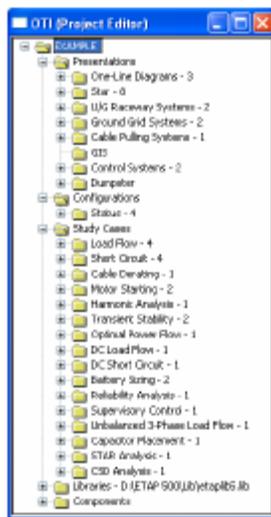
Sistemas de Tracción de Cables

Dumpster

Configuraciones de Estado

Casos de Estudio

Además, usted puede tener acceso total a todas las bibliotecas y elementos de su proyecto.



### Edit Toolbar

Este comando está activo cuando usted está en modo Edit. Puede hacer click o doble click para seleccionar, arrastrar y soltar elementos AC, DC y de instrumentos los diagramas unilineales. Además, puede desarrollar las siguientes funciones:

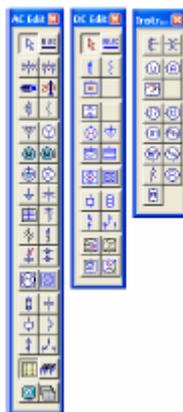
Ver e imprimir informes de salida personalizados (Text & Crystal Reports)

Opciones para ver los cambios

Acceso a Schedule Report Manager

Agregar nuevos Sistemas de Malla de Puesta a Tierra

Agregar redes compuestas y motores compuestos



## Modos de Estudio

ETAP proporciona los siguientes modos de estudio directamente desde el diagrama unilineal:

Análisis de Flujo de Carga

Análisis de Flujo de Carga No Balanceado

Análisis de Cortocircuito IEC

Análisis de Aceleración de Motores

Análisis de Armónicas

Análisis de Estabilidad Transitoria

Star - Coordinación de Dispositivos de Protección

Análisis de Flujo Óptimo de Potencia (OPF)

Análisis de Confiabilidad

Ubicación Óptima del Capacitor

Análisis de Flujo de Carga DC

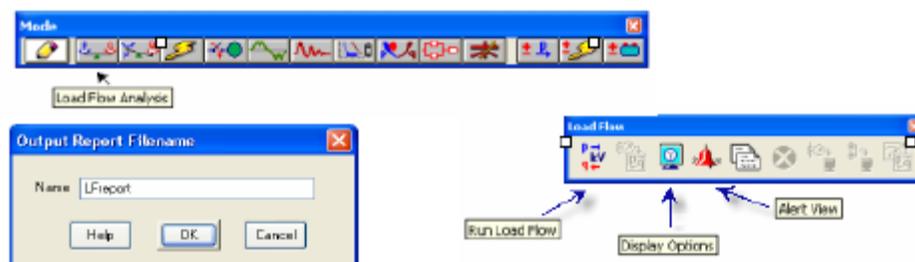
Análisis de Cortocircuito DC

Cálculos de Dimensionamiento y Descarga de Baterías

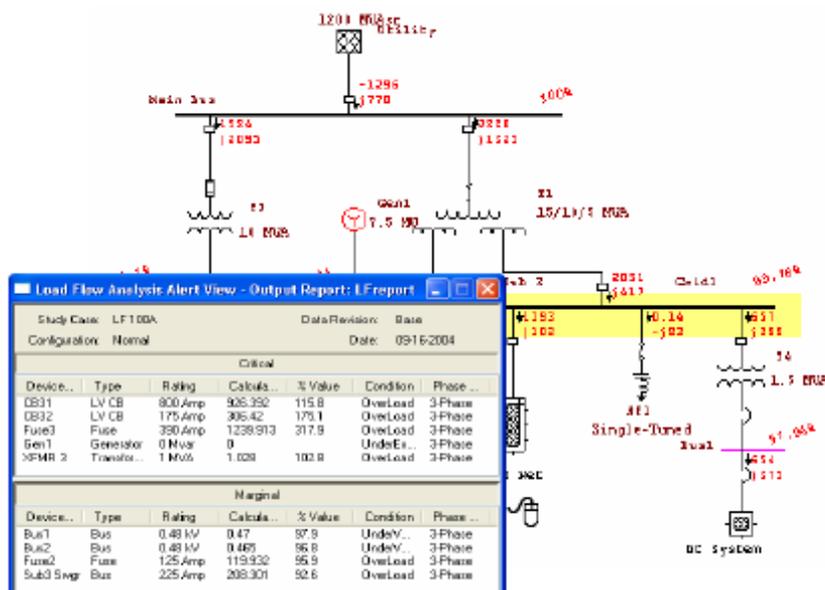
Sistemas de Canalización Subterránea de Cables



Haga click en el botón Load Flow Analysis en la barra de herramientas Mode para cambiar al modo Load Flow Analysis. Ahora, usted puede correr un estudio haciendo click en el botón Run Load Flow en la barra de herramientas Load Flow. Si selecciona Prompt, se le solicitará ingresar un nombre para su informe de salida. Posteriormente, aprenderá a personalizar su estudio cambiando opciones en el editor Load Flow Study Case.

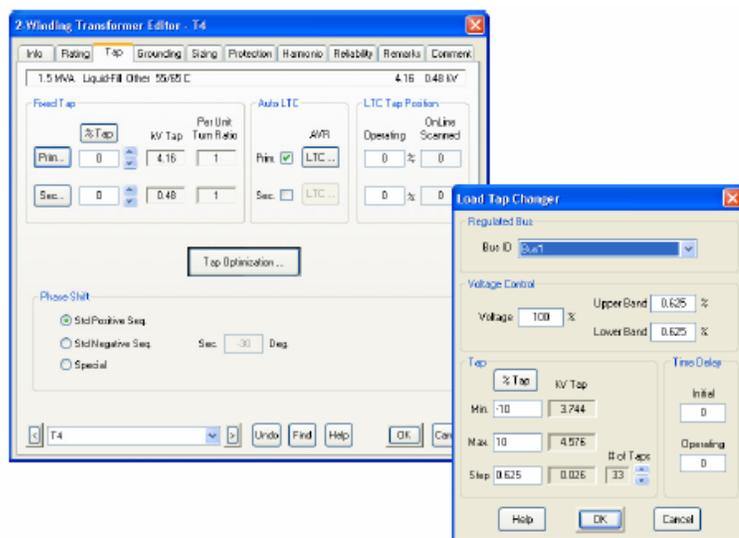


Los resultados del estudio se pueden ver en el OLD. La información que aparece en el OLD se puede cambiar en Display Options. Para obtener aún más detalles, se pueden revisar los informes de salida.



Para revisar cualquier problema de sobrecarga, tan sólo haga click en el botón Alert View en la barra de herramientas Load Flow. Con ello se abrirá una ventana que contiene una lista de los equipos subdimensionados. Observe que el botón Alert View está desactivado en el Demo 5.0 de ETAP.

Note que la tensión de operación de la barra Bus1 es de un 97,94%. Esto hace que aparezca la señal en la ventana Alert View de que la barra está ligeramente baja en tensión. Se puede cambiar el criterio de alerta de una condición en el editor Load Flow Study Case, lo cual se discutirá en la siguiente lección. Ahora, utilizaremos la característica de regulación de tensión de barra del Transformer Editor para cambiar nuestros resultados de Load Flow.

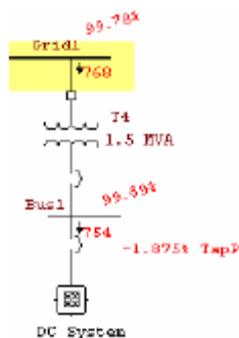


ETAP permite aplicar configuraciones Auto LTC para regular barras que se conectan directa o indirectamente a un transformador. Por ejemplo, podemos utilizar el transformador T4 para regular la barra Bus1 a un 100% del voltaje nominal. Abra el Editor de T4 haciendo doble click en su gráfico. En la pestaña Tap, active la casilla Auto LTC en la ventana principal.

Abra la ventana de configuraciones LTC haciendo click en la casilla LTC y cambie el Regulated Bus ID a Bus1. Haga click en OK tanto en la ventana LTC como en la de Transformer Editor.

Ahora usted puede volver a correr un estudio Load Flow, prestando atención al voltaje de funcionamiento de la barra Bus1. Para hacerlo, haga click en el botón Run Load Flow que está en la barra de herramientas Load Flow.

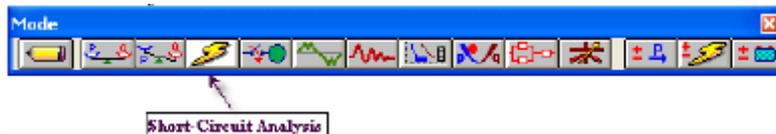
Note que el voltaje de funcionamiento de la barra Bus1 ahora está a un paso de tap del 100% deseado del valor de regulación. Este es sólo un ejemplo de las muchas características del módulo Load Flow de ETAP.



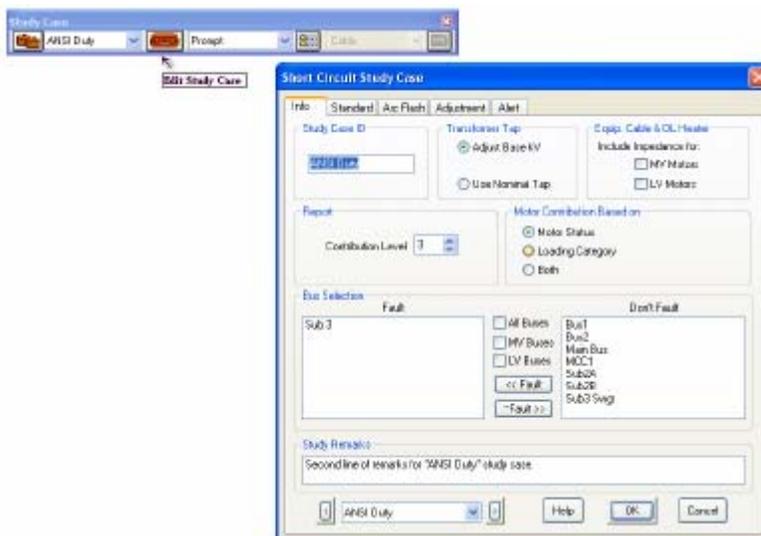
## Análisis De Cortocircuito

El propósito de este tutorial es introducir el módulo Short-Circuit Analysis de ETAP y proporcionar instrucciones sobre cómo correr cálculos de cortocircuito ANSI e IEC. Además, aparece un breve repaso a los editores de estudio de caso y a la función Alert View.

En la barra de herramientas Mode, seleccione el modo de cortocircuito haciendo click en el botón Short-Circuit Analysis.



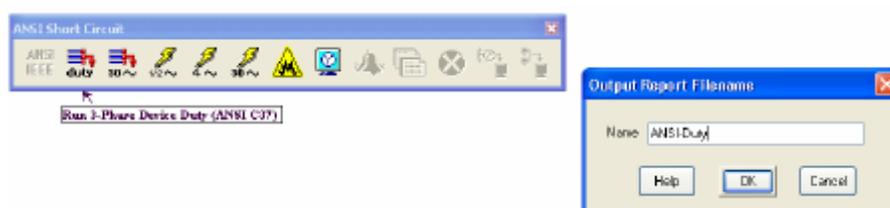
En la barra de herramientas Study Case, haga click en el botón Edit Study Case. Esto abrirá el editor Short Circuit Study Case, permitiéndole cambiar los criterios y opciones de cálculo. De la página Info, seleccione una barra o varias barras que estén defectuosas. Haga click en todas las barras, excepto Sub 3 y seleccione ~Fault>> para colocarlas en la categoría Don't Fault. Sub 3 ahora debería aparecer sólo en la categoría Fault. Haga click en OK cuando termine.



Esta tarea también se puede realizar gráficamente haciendo click derecho en una barra y seleccionando Fault o Don't Fault.

Nota: La barra defectuosa, Sub 3, aparecerá de color rojo oscuro en el OLD, indicando que está defectuosa.

Ahora usted puede correr un estudio (duty) de cortocircuito haciendo click en el botón Run 3- Phase Device Duty. Puesto que en la barra de herramientas Study Case está seleccionado Prompt, se le solicitará que ingrese un nombre para su informe de salida.

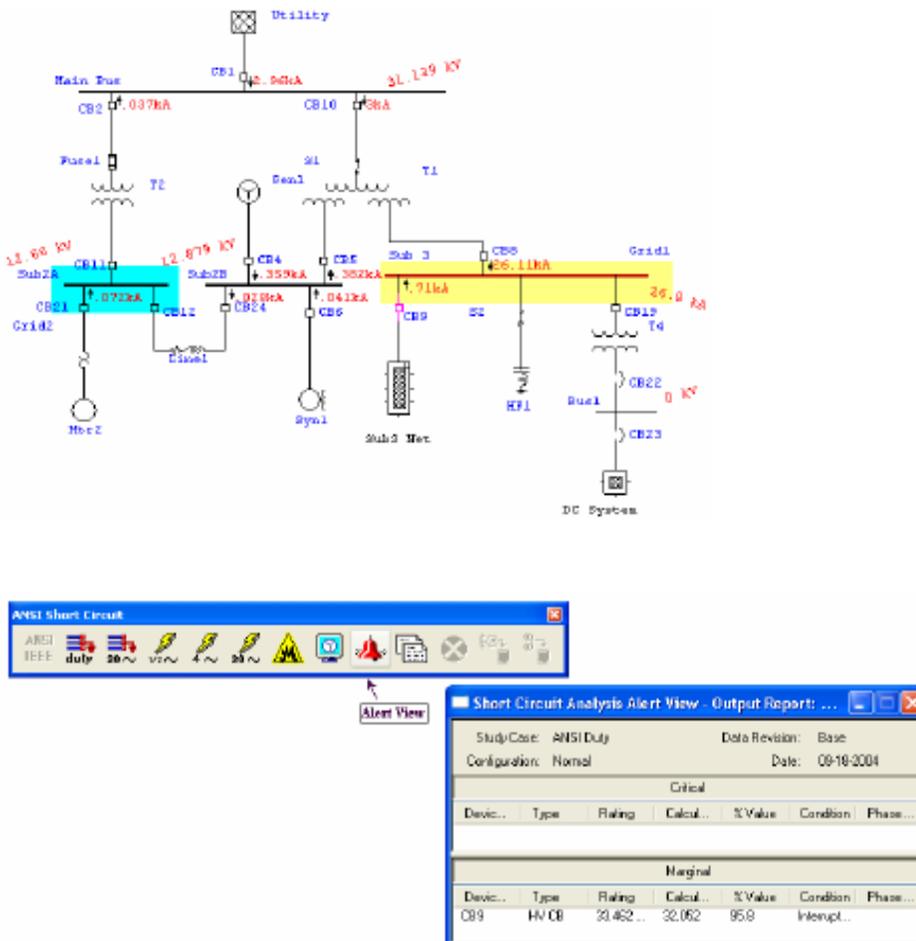


Existen otros cuatro tipos de estudios además del 3-Phase ANSI que se pueden llevar a cabo bajo la configuración estándar ANSI. Además, se puede realizar otros tres estudios según el conjunto de estándares IEC. Los métodos ANSI están predeterminados para estudios de cortocircuito, pero se pueden cambiar en la página Standards del editor Short Circuit Study Case.



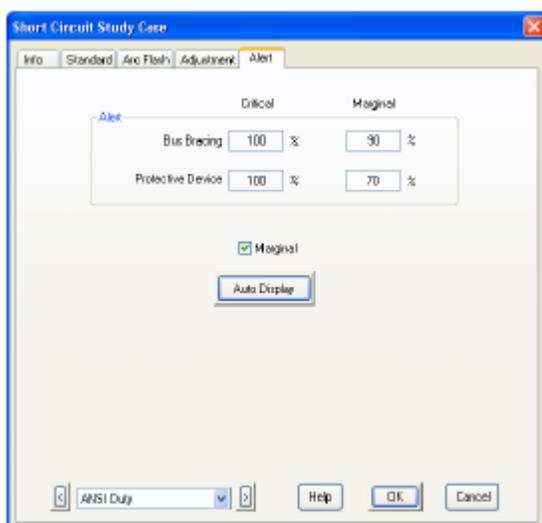
El OLV mostrará los resultados del cálculo de Device Duty Short Circuit. Se pueden modificar los resultados en el OLD al cambiar las configuraciones de cortocircuito en Display Options.

Observe que los interruptores CB9 y CB18 ahora están color magenta. Esta indicación significa que se han excedido las capacidades del dispositivo de alguna manera. Si la ventana Alert View aún no ha aparecido, haga click en el botón Alert View en la barra de herramientas ANSI Short Circuit Toolbar para ver los dispositivos señalizados (observe que la función de alerta está desactivada en el Demo). Note que la posición predeterminada para la barra de herramientas Short Circuit está en dirección vertical al extremo derecho de la ventana ETAP.

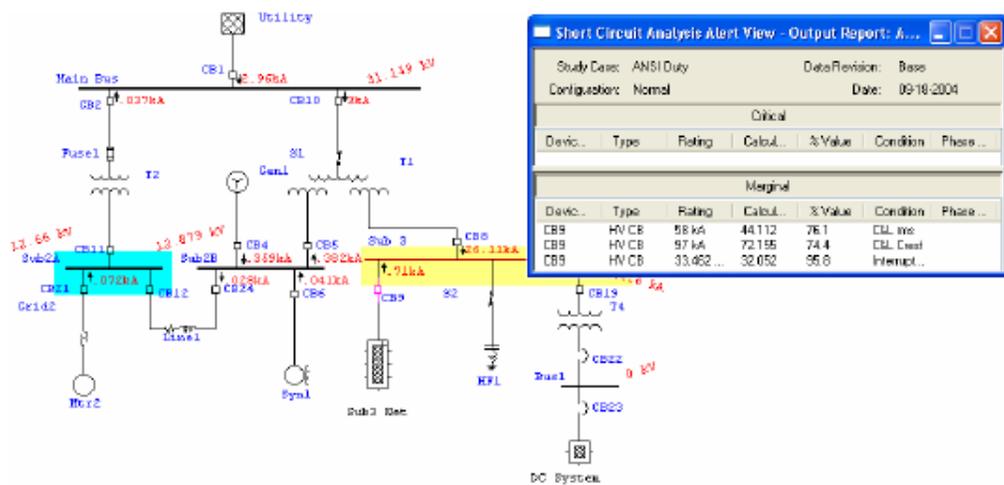


Todos los dispositivos que han sido señalados aparecerán en esta ventana.

Para ver o modificar las configuraciones de alarma, abra el editor Short Circuit Study Case en la página Alert. Active la casilla Marginal y cambie el límite a 70%. Asimismo, active la casilla Auto Display y luego haga click en OK. Cuando se ha activado la casilla Marginal, todos los dispositivos que han excedido este límite, pero que permanecen bajo un 100% aparecerán en Alert View en la categoría marginal. Los dispositivos que han excedido el 100% siempre serán señalados y aparecerán en la categoría Critical de Alert View.

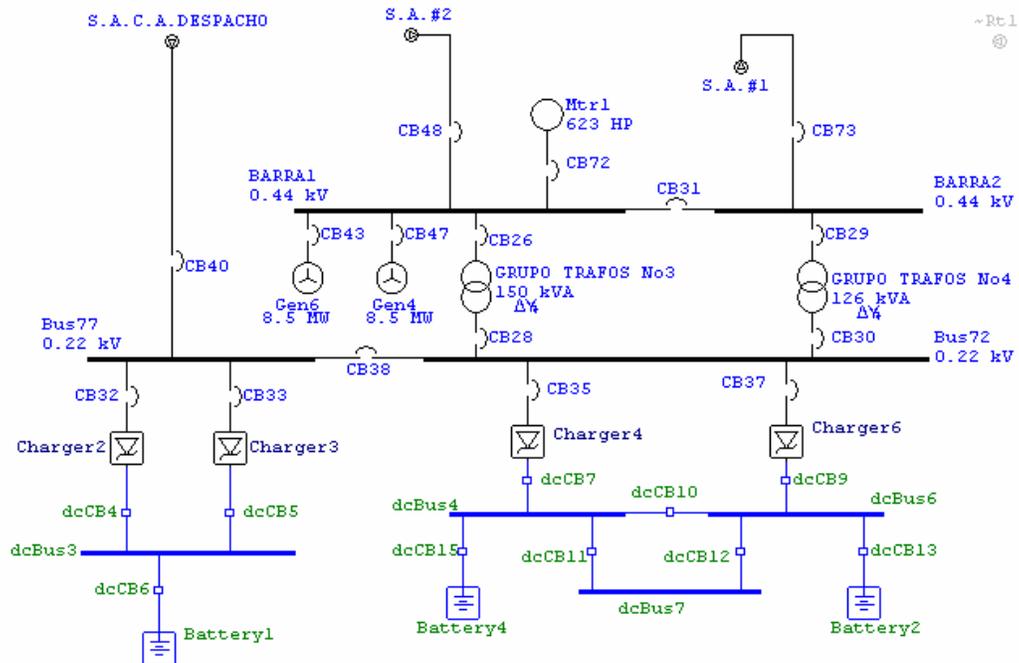


Ahora vuelva a correr el mismo estudio de cortocircuito siguiendo el procedimiento utilizado anteriormente. Observe que cuando se haya completado el cálculo, se abrirá automáticamente la ventana Alert View, según el cambio realizado a la página Alert en el editor Short Circuit Study. Note que aparecen otros dispositivos de protección en Marginal Alert View y aparecerán en color magenta en el OLD. Observe que los resultados de cortocircuito no cambian.





## SERVICIOS AUXILIARES DE CORRIENTE ALTERNA (S.A.C.A.)



### IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DEL PATIO:

La identificación de los equipos del patio estará formada por tres (3) números, precedente de una letra.

La letra será utilizada para clasificar los equipos de acuerdo a su nivel de tensión.

Para inspecciones visuales también se tendrá un color característico de los componentes de cada nivel de tensión.

Letra Z	=	800 KV	[naranja]
Letra X	=	400 KV	[verde tierno]
Letra M	=	230 KV	[rojo]
Letra H	=	115 KV	[azul]
Letra J	=	69 KV	[naranja*]
Letra B	=	34,5KV	[amarillo ]
Letra D	=	13,8KV	[marrón]
Servicios auxiliares alterna			[gris]
Servicios auxiliares continua			[blanco]

**\* Este nivel tiende a desaparecer**

## NUMERACIÓN DE LOS EQUIPOS DEL PATIO

El primer número será utilizado para denominar la secuencia del equipo = 1,2,3,4, etc.

El segundo número será utilizado para denominar la clase del equipo:

0 = LINEA DE TRANSMISION.

1 = LADO DE ALTA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

2 = JUEGO DE BARRA.

3 = ACOPLADO DE BARRAS.

4 = COMPENSADORES, ESTATICOS SERIE, CAPACITORES  
REACTORES.

5 = COMPENSADORES ESTATICOS PARALELOS, CAPACITORES  
REACTORES.

6 = SECCION DE JUEGO DE BARRAS DE RESERVA, DE  
TRANSFERENCIA.

7 = EQUIPO DE RECTIFICACION.

8 = LADO DE BAJA DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

9 = GENERADORES.

El tercer numero para denominar la función del equipo:

0 = DISYUNTOR DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y BARRA.

1 = SECCIONADOR DE PUESTA A TIERRA.

2 = SECCIONADOR DE BY-PASS.

3 = SECCIONADOR DE LINEA.

4 = SECCIONADOR DE BARRA PRINCIPAL (I).

5 = DISYUNTOR DE LINEA DE TRANSMISION.

6 = SECCIONADOR DE BARRA II, DE RESERVA DE TRANSFERENCIA.

7 = SECCIONADOR DE DISYUNTOR Y LADO DE JUEGO DE BARRA.

8 = SECCIONADOR DE BARRA PRINCIPAL (II).

9 = SECCIONADOR UNION JUEGO DE BARRAS REACTOR.

Ejemplos:

M = 230 KV.

M = 230 KV  
1 = Línea 1  
M105 0 = Línea de transmisión  
5 = Disyuntor de Línea.

M105 = Disyuntor de la línea I de transmisión de 230 KV

M180 = Disyuntor del lado de baja del transformador I de 230 KV

E305 = Disyuntor de la Línea III de transmisión de 115 KV

H103 = Seccionador de línea de la línea I de 115 KV

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

TÍTULO	Estudio del comportamiento de interruptores de potencia en la subestación Barbacoa I
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Romero B., Wilmer D.	CVLAC: 15.678.352 E MAIL: <a href="mailto:wilromerob@hotmail.com">wilromerob@hotmail.com</a>
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Interruptor de potencia
Subestación Barbacoa
Hexafluoruro de azufre
Soplado magnético
Flujo de carga
Cortocircuito
Simulación ETAP Power Station

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Electrica

RESUMEN (ABSTRACT):

Un interruptor de potencia es un dispositivo cuya función consiste en  
 interrumpir y restablecer la conducción de corriente de un circuito. Se requiere  
 un estudio exhaustivo de estos para determinar si encuentran en buenas  
 condiciones para operar sin ningún fallo en cualquier instante.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Bermúdez, Melquiades	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	3.486.726			
	E_MAIL	<a href="mailto:mbermudez@anz.udo.edu.ve">mbermudez@anz.udo.edu.ve</a>			
	E_MAIL				
Requena, Elbis C.	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	5.488.393			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Escalante, Santiago	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	3.198.012			
	E_MAIL	<a href="mailto:sescalante@anz.udo.edu.ve">sescalante@anz.udo.edu.ve</a>			
	E_MAIL				
Suárez, Luis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	11.144.624			
	E_MAIL	<a href="mailto:lsuarez@anz.udo.edu.ve">lsuarez@anz.udo.edu.ve</a>			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009 AÑO	12 MES	02 DÍA
-------------	-----------	-----------

LENGUAJE. SPA

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Estudio del comportamiento de	microsoftword
Interruptores.doc	

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O  
P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

Dpto. Despacho de Carga Oriental

ESPACIAL: **Dpto. Despacho de Carga Oriental CADAFE**

TEMPORAL: **Doce (12) meses**

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Ingeniero electricista**

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Pregrado**

ÁREA DE ESTUDIO:

**Departamento de Electricidad**

INSTITUCIÓN:

**Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

DERECHOS

De acuerdo con el artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado. “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

Romero B., Wilmer D.

AUTOR

AUTOR

AUTOR

Bermúdez, Melquiades

TUTOR

Escalante, Santiago

JURADO

Suárez, Luis

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS