

1

41126  
115



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGON**

**CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA  
UNA SUBESTACION EN ALIMENTACION RADIAL O  
DESCENTRALIZADA EN 23 KV DE LA LINEA 3 DEL STC.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICO**

**P R E S E N T A :**  
**JOEL TORRES AVILA**

**ASESOR: ING. ELEAZAR MARGARITO PINEDA DIAZ**

**MEXICO**

**TESIS CON  
FALLA DE GRIGEN**

**2003**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# Joel

## Gracias a :

o **DIOS,** POR DARMÉ LA OPORTUNIDAD DE EXISTIR, Y CONOCER LA VIDA.

o **MIS PADRES AMPARO JULIA Y JERONIMO,** A QUIENES NUNCA PAGARE CON NADA TODOS SUS SACRIFICIOS Y DESVELOS, QUE ME HAN LLEVADO A SER LA PERSONA QUE SOY, POR SER MIS GUIAS Y EJEMPLO A SEGUIR, Y PORQUE ME REGALARON LA HERRAMIENTA MAS IMPORTANTE PARA VIVIR, UNA CARRERA PROFESIONAL.

o **MI HERMANA LUZ MARIA,** POR EL APOYO Y COMPRENSION QUE ME HA BRINDADO SIENDO MI AMIGA.

o **MIS TIO (A)S : EUSTOLIA, ISABEL, JUANITA, MARIA, SILVIA, APOLONIO, ISRAEL, MIGUEL, SERGIO, MAXIMINO, VICTOR** POR IMPULSARME EN CADA MOMENTO A SEGUIR ADELANTE, POR SUS SABIOS CONSEJOS Y POR AYUDARME CUANDO MAS LO NECESITE.

o **MI NOVIA DIANA MIRIAM,** POR PERMITIRME MADURAR Y CRECER A SU LADO, Y POR SU APOYO INCONDICIONAL .

o **LA UNAM,** POR HABERME BRINDADO LA VALIOSA OPORTUNIDAD DE FORMAR PARTE DE SU COMUNIDAD UNIVERSITARIA, CONTRIBUYENDO A MI FORMACION COMO SER HUMANO Y PROFESIONISTA.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

- TODAS LAS PERSONAS QUE ME HAN ILUSTRADO DURANTE EL INICIO DE MI CARRERA PROFESIONAL, CON SU AMPLIA EXPERIENCIA Y DEDICACION, Y POR EL APOYO BRINDADO PARA LA REALIZACION DEL PRESENTE TRABAJO, **ARQ. JUAN MORALES CRUZ, ING. FERNANDO MALVAEZ MONTESANO, ING. RUBEN TELLEZ FLORES, ING. SALOMON OVIEDO MEDRANO, LIC. ALEJANDRO M. GOMEZ PACHECO.**

○ **PERSONAL TECNICO Y OPERATIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (STC),** QUE ME IMPULSO Y COORDINO, EN LA REALIZACION DEL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACION, **ING. AGUSTIN GALVAN MALDONADO, PERSONAL TECNICO Y OPERATIVO DEL DESPACHO DE CARGA.**

- **ING. MARGARITO E. PINEDA DIAZ,** POR SUS CONSEJOS, ORIENTACION Y RECOMENDACIONES EN EL DESARROLLO DEL PRESENTE TEMA DE TESIS.

- **LOS INGENIEROS ADRIAN PAREDES ROMERO, JESUS NUÑEZ VALADES, JOSE LUIS GARCIA ESPINOZA Y RAUL BARRON VERA,** POR HABER INVERTIDO SU VALIOSO TIEMPO Y CONOCIMIENTOS EN LA REVISION DEL PRESENTE TRABAJO .

**GRACIAS**

A MI FAMILIA, A MIS AMIGOS DE LA ENEP Y A MIS COMPAÑEROS DE SEDUVI.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

4



**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN – UNAM**

**JEFATURA DE CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**OFICIO: ENAR/JAME/0783/2003.**

**ASUNTO: Síndico**

**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS  
SECRETARIO ACADÉMICO  
P R E S E N T E**

\* Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: **JOEL TORRES ÁVILA**, con Número de Cuenta: 9319445-1, con el tema de tesis: **"CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UNA SUBESTACIÓN EN ALIMENTACIÓN RADIAL O DESCENTRALIZADA EN 23 KV DE LA LÍNEA 3 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (STC)"**.

* PRESIDENTE:	ING. JESÚS NÚÑEZ VALADÉZ	ABRIL	77
VOCAL:	ING. RAÚL BARRÓN VERA	OCTUBRE	78
SECRETARIO:	ING. ELEAZAR MARGARITO PINEDA DÍAZ	OCTUBRE	80
SUPLENTE:	ING. ADRIÁN PAREDES ROMERO	MAYO	90
SUPLENTE:	ING. JOSÉ LUIS GARCÍA ESPINOSA	AGOSTO	98

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el Ing. Eleazar Margarito Pineda Díaz, quien esta incluido basándose en lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

**Atentamente**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Bosques de Aragón, Estado de México, 5 de septiembre de 2003.

**EL JEFE DE CARRERA**

**ING. RAÚL SARRÓN VERA**

C.c.p. - Lic. Ma Teresa Luna Sánchez - Jefa del Depto. de Servicios Escolares.  
C.c.p. - Ing. Eleazar Margarito Pineda Díaz - Asesor de Tesis  
C.c.p. - Alumno  
RBVamce

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



5  
**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**  
**ARAGÓN**  
 DIRECCIÓN

ESCUELA NACIONAL  
 DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
 ARAGÓN  
 MÉXICO

**DUPLICADO**

**JOEL TORRES AVILA**  
**PRESENTE**



En contestación a su solicitud de fecha 5 de junio de 2002, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. MARGARITO E. PINEDA DÍAZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UNA SUBESTACIÓN EN ALIMENTACIÓN RADIAL O DESCENTRALIZADA EN 23 kv. DE LA LÍNEA 3 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (STC)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.



Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
 San Juan de Aragón, México 17 de septiembre de 2003  
**LA DIRECTORA**

*L. Turcott*  
 ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



Nota: La aceptación del tema de tesis y asesor de la misma fue registrada en la Secretaría Académica de esta Escuela con fecha 21 de junio de 2002.

- Cy*
- C) Secretaría Académica.
  - C) Jefatura de la Carrera Ingeniería Mecánica Eléctrica.
  - C) Asesor de Tesis.

LTG AIR

**TESIS CON**  
**SALA DE ORIGEN**

# INDICE

Introducción.....	1
<b>CAPITULO I. GENERALIDADES.</b>	
1.1 Parámetros.....	4
1.1.1 Resistencia Unitaria efectiva (R).....	4
1.1.2 Inductancia unitaria.....	5
1.1.3 Conductancia unitaria.....	5
1.1.4 Capacitancia unitaria.....	5
1.1.5 Parámetros eléctricos de cables de energía.....	6
1.1.5.1 Resistencia de corriente directa.....	6
1.1.5.2 Efecto del cableado.....	7
1.1.5.3 Efecto de la temperatura en la resistencia.....	9
1.1.5.4 Resistencia a la corriente alterna.....	10
1.1.5.5 Inductancia y Reactancia inductiva.....	11
1.2 Características de las Subestaciones.....	12
1.2.1 Elementos principales.....	13
1.2.2 Clasificación.....	13
1.2.3 Funciones de las subestaciones.....	14
1.2.4 Características.....	18
1.2.5 Ubicación.....	19
1.2.6 Edificio y accesorios complementarios.....	19
1.3 Protecciones.....	20
1.3.1 Criterios generales.....	21
1.3.2 Diseño preliminar.....	22
1.3.3 Diagramas unifilares.....	22
1.3.4 El servicio de la compañía suministradora.....	26
1.4 Valores por ciento y en por unidad.....	27
1.4.1 Definición.....	27
1.4.2 Ventajas.....	28
1.4.3 Relaciones generales.....	29
1.4.4 Cantidades base.....	31
1.4.5 Cambio de cantidades.....	32
1.4.6 Preparación de un sistema para su estudio.....	33
1.5 Estudio del cortocircuito.....	35
1.5.1 Conceptos básicos.....	35
1.5.2 Fuentes de cortocircuito.....	37
1.5.3 Reactancias de las maquinas rotatorias.....	40
1.5.4 Calculo.....	41
1.5.4.1 Teoría de las componentes simétricas.....	42

- 1.5.4.2 Los operadores de las componentes simétricas..... 44
- 1.5.4.3 Formación de redes de secuencia para los estudios de corto circuito..... 46
- 1.5.5 Cortocircuito en sistemas de c.a. .... 47
  - 1.5.5.1 Falla trifásica..... 47
  - 1.5.5.2 Falla monofásica..... 50
- 1.5.6 Cortocircuito en sistemas de corriente continua..... 52

**CAPITULO II. ALIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN 23 KVA Y 15 KVA EN LA LINEA 3 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO "METRO".**

- 2.1 Interconexión del sistema eléctrico nacional..... 55
- 2.2 Sistema centralizado de distribución eléctrica en el S.T.C. en 85 / 15 kV. en líneas 1, 2 y 3..... 55
  - 2.2.1 Sistema Centralizado de distribución en 85 kV..... 57
  - 2.2.2 Protecciones en el Sistema Centralizado de 85 kV..... 58
- 2.3 Alimentación a Subestaciones de Rectificación (SR's) en 15 kV. en Línea 3..... 59
  - 2.3.1 Subestaciones en 15 kV. en talleres y edificios de apoyo (SAF's)..... 60
    - 2.3.1.1 Generalidades de las SAF's..... 61
    - 2.3.1.2 Equipos alimentados por las SAF's..... 62
- 2.4 Sistema Descentralizado o radial en Línea 3..... 63
  - 2.4.1 Sistema de alimentación en 23 kV. .... 63
    - 2.4.1.1 Interruptores de 23 kV, distribuidores de Alumbrado y Fuerza..... 64
    - 2.4.1.2 Alimentación en 23 kV. a Subestaciones de Rectificación (SR's)..... 65
    - 2.4.1.3 Equipos utilizados en la distribución en 750 Vcc en Línea 3..... 68
    - 2.4.1.4 División eléctrica en Línea 3. .... 69
  - 2.4.2 Subestaciones de rectificación de 15 kV..... 71
    - 2.4.2.1 Tipos de alimentación de las Subestaciones de Rectificación..... 73
    - 2.4.2.2 Subestación ALSTHOM Tipo Normablock..... 73
      - 2.4.2.2.1 Constitución de las secciones de que disponen estas subestaciones..... 75
      - 2.4.2.2.2 Función que desempeñan las secciones que constituyen a las subestaciones tipo Normablock. .... 79
    - 2.4.2.3 Subestaciones de Alumbrado y Fuerza marca "Energomex"..... 80
      - 2.4.2.3.1 Desconectador marca "Energomex", tipo RAD y RAF6..... 82
      - 2.4.2.3.2 Descripción del funcionamiento de la extinción del arco..... 82
      - 2.4.2.3.3 Desconectador marca "Energomex" tipo "CS"..... 83
      - 2.4.2.3.4 Constitución de las secciones de que se componen este tipo de Subestaciones..... 84

CON  
 FALLA DE ORIGEN

**CAPITULO III. CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UNA SUBESTACION EN ALIMENTACION RADIAL O DESCENTRALIZADA EN 23 KV DE LA LINEA 3 DEL STC.**

3.1 Subestacion rectificadora radial o descentralizada alimentada en 23 kv de la Linea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO)..... 87

    3.1.1 Descripción de los elementos de una Subestación de rectificación alimentada en 23 kv. .... 88

3.2 División eléctrica de Línea 3. .... 88

    3.2.1 Diagrama. .... 90

3.3 Cálculo de la corriente nominal de una Subestación de Rectificación alimentada en 23 kv. .... 91

3.4 Procedimiento para el cálculo de la corriente de cortocircuito..... 91

    3.4.1 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en una Subestación de Rectificación radial o descentralizada alimentada en 23 kv. .... 92

    3.4.2 Trazo del diagrama de los limitadores de la corriente de cortocircuito..... 94

    3.4.3 Cálculo de valores de resistencia de los elementos de la SR..... 95

    3.4.4 Cálculo del valor de la resistencia equivalente total (REQUIVALENTE TOTAL). .... 99

    3.4.5 Cálculo de la corriente de cortocircuito para un punto de falla intermedio.... 103

    3.4.6 Cálculo de la corriente de cortocircuito total (Icc TOTAL)para un punto de falla intermedio. .... 103

3.5 Cálculo de la corriente de cortocircuito para un punto de falla en cables alimentadores. .... 104

    3.5.1 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en cables alimentadores de Vías de la Subestación de Rectificación VIVEROS. .... 105

        3.5.1.1 Trazo del diagrama para los limitadores de la corriente de cortocircuito. .... 105

        3.5.1.2 Cálculo del valor de la Resistencia equivalente total ( REQUIVALENTE TOTAL ) del circuito de limitadores..... 106

        3.5.1.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito de la Subestación de Rectificación VIVEROS para el calculo de una falla en cables alimentadores..... 107

    3.5.2 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en cables alimentadores de Vías de la Subestación de Rectificación MIGUEL ANGEL DE QUEVEDO (SRM.A.Q.). .... 108

        3.5.2.1 Trazo del diagrama para los limitadores de la corriente de cortocircuito.... 108

        3.5.2.2 Cálculo del valor de la Resistencia equivalente total ( REQUIVALENTE TOTAL ) del circuito de limitadores..... 109

        3.5.2.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito de la Subestación de Rectificación M.A.Q. para el calculo de una falla en cables alimentadores..... 111

    3.5.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito total (ICC TOTAL) ..... 111

CONCLUSIONES ..... 112

BIBLIOGRAFIA..... 115

**TEST CON FALLA DE ORIGEN**

## INTRODUCCIÓN.

Hoy en día todas las áreas de una empresa y sus respectivos departamentos dependen del óptimo funcionamiento del Sistema de suministro y distribución de la energía eléctrica.

El mal diseño de los Sistemas Eléctricos origina: paros de fabricación, pérdida de producción y rompe con cualquier esquema programado de trabajo, además de los potenciales daños humanos, a partir de esta inquietud surge la idea de desarrollar el presente trabajo, aplicando el Estudio de Cortocircuito a la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo "METRO" en la zona en que operan las denominadas Subestaciones Radiales o Descentralizadas. La dificultad que se llegó a presentar es la poca información que se tiene respecto a un Cortocircuito en Corriente Continua.

La confiabilidad, eficiencia, continuidad de operación y seguridad, son algunos aspectos críticos de los sistemas de distribución de energía eléctrica, que pueden ser mejorados a través de la correcta aplicación del correspondiente Estudio Eléctrico.

El estudio de los Sistemas Eléctricos de Distribución nos brindan una cantidad muy completa de información relacionada con las condiciones normales y anormales de la operación del sistema. Esta información permite mejorar la operación y funcionamiento de un Sistema Eléctrico considerablemente, gracias a las decisiones acertadas y documentadas al manejar sus sistemas de distribución.

Los sistemas de suministro de energía eléctrica constantemente sufren cambios; se ajustan con el tiempo a nuevos y más grandes consumidores de energía, dependiendo de la demanda y del crecimiento propio.

Los sistemas industriales y comerciales, frecuentemente sufren cambios muy similares con sus propias instalaciones. La mayoría de las veces, estos cambios tienen serios efectos en los equipos eléctricos. Con el incremento de capacidad aumenta el nivel de falla, excediendo en algunas ocasiones la capacidad de los equipos, exponiendo a éstos y al personal a un alto riesgo. Agregar equipo o modificar la configuración del sistema sin considerar sus efectos puede dejarlo fuera de operación por un tiempo innecesario y generar otros costos que afectan la rentabilidad de la empresa.



## Análisis de Corto Circuito

El Estudio de Corto Circuito es muy útil para que los propietarios y responsables de los Sistemas Eléctricos conozcan los niveles de falla que puede alcanzar sus Sistemas Eléctricos y equipos. Todo esto para especificar los dispositivos de protección, interruptores, fusibles, etc. y asegurarse de que sean capaces de responder en condiciones de falla y señalar los niveles de guante de los mismos equipos.

Los equipos mal dimensionados ó seleccionados generan costos que deben evitarse , y esto se logra con un requerimiento adecuado de equipo, materiales y mano de obra basado en estándares industriales, que van desde la selección de un transformador principal de distribución, relevadores, hasta cable, luminarias etc

Algunos beneficios que se tienen por los resultados del análisis son :

- Evitar fallas catastróficas debido a situaciones de corto circuito.
- Reducir los paros de producción de equipo.
- Minimizar la susceptibilidad de equipos mal dimensionados ó mal seleccionados.
- Reducir daños al personal y a los equipos.

Los Estudios de Corto Circuito se entregan en reportes con niveles de falla, datos de las impedancias, tablas comparativas de los valores de corto circuito contra la capacidad de los equipos, información técnica de los equipos y del sistema y algunos otros aspectos adicionales.

Y es a partir de un estudio de Cortocircuito que se inician los Estudios de Coordinación de Protecciones que representan la evaluación de los dispositivos de protección del sistema y equipos asociados.

El objetivo en todos los casos es mantener el suministro de energía en la carga, mientras la selectividad, sensibilidad y velocidad del dispositivo protección aseguren la mínima interrupción bajo condiciones de sobrecarga y corto circuito.

En el capítulo 1 Generalidades se presenta la base teórica del presente trabajo añadiendo información útil para desarrollar un Calculo de Cortocircuito en Corriente Alterna que es el mas común en un Sistema Eléctrico de Potencia., en el capítulo 2 Alimentación y distribución en 85 / 15 kV del Sistema de Transporte Colectivo " METRO " , donde se

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

describen los componentes de cada uno de los equipos que hacen posible la Distribución de energía eléctrica en el Sistema de Transporte Colectivo "METRO". Y en el Capítulo 3 Calculo de la corriente de cortocircuito para una Subestación Radial o Descentralizada en 23 kV de la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo "METRO". capitulo en el que se desarrolla el Calculo de Cortocircuito para Línea 3 en la zona en la que la alimentación con que operan los equipos es de 23 kV.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPITULO 1 . GENERALIDADES.

### 1.1 Parámetros.

Es preciso dar algunas definiciones referidas a los parámetros en las líneas monofásicas, entre los cuales existe la resistencia, inductancia, conductancia, etc.

#### 1.1.1 Resistencia Unitaria efectiva (R).

Considerando la figura 1 que representa una línea de longitud igual a la unidad, supuesta en cortocircuito perfecto haciéndose circular una corriente de valor eficaz  $I = 1$  A. La potencia disipada define la resistencia unitaria de la línea.

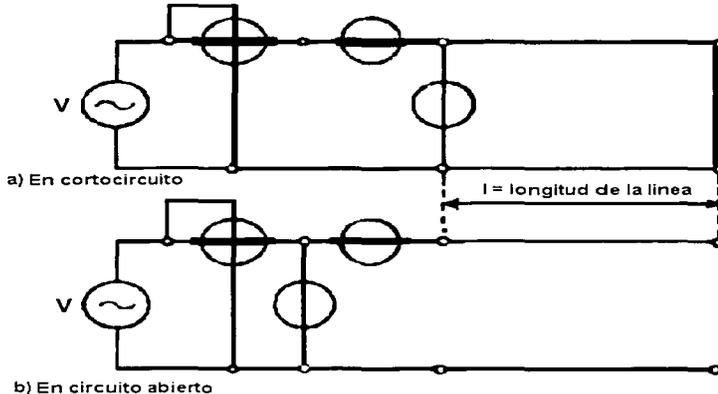


Figura 1. Línea monofásica.

Las pérdidas que se presentan son por histéresis incluso cuerpos alejados pueden estar sujetos a pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis (si son ferromagnéticos). Tales pérdidas se traducen en lo que concierne al circuito inductor, en incrementos de resistencia con relación a los valores medidos de corriente continua.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Hay que tener en cuenta que  $R$  depende de la frecuencia y de la temperatura, por consiguiente de la corriente ( $i$ ). Durante los fenómenos transitorios, la profundidad de penetración de la corriente es variable, lo que motiva una consiguiente variación en  $R$ .

### 1.1.2 Inductancia unitaria

Según la figura 1.1a se mide la impedancia de la línea en cortocircuito, pero en este caso a base de una longitud ( $l \ll \lambda$ ) suficiente. Tal impedancia es  $Z_t = R_l + j\omega L_l$ . El valor  $L = L_l / l$  constituye la inductancia unitaria de la línea.

Estando las líneas en cortocircuito las tensiones entre fases son débiles por lo que se pueden despreciar las corrientes de conductancia de aislamiento, así como las de desplazamiento si se trabaja con frecuencias bajas. Aun cuando se supone constante depende la frecuencia y también eventualmente del efecto corona, luego de la tensión.

De esta forma queda definida la impedancia unitaria longitudinal :

$$Z = R + j\omega L$$

### 1.1.3 Conductancia unitaria.

Al aplicarle la tensión eficaz  $U = 1$  V entre los conductores de la línea en vacío ( $l =$  longitud eficiente), representada en la figura 1.1 b. Si la potencia activa utilizada es  $P$ ,  $P / l$  es igual a la conductancia unitaria de aislamiento o de perditanancia, llamada también conductancia transversal o simplemente conductancia unitaria.

### 1.1.4 Capacitancia unitaria.

En la figura 1.1 b se representa la medición de la admitancia de la línea en vacío de longitud  $l$  ( $l \ll \lambda$ ) suficiente  $Y_t = P_t + j\omega C_t$ . El valor  $C = C_t / l$  constituye la capacidad unitaria de la línea.

La capacidad unitaria varía principalmente debido al efecto corona y de la tensión.

De esta forma queda definida la admitancia transversal unitaria :

$$Y = P + j\omega C$$

Parámetros unitarios y parámetros totalizados :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Longitudinales} \\ \left. \begin{array}{l} R \\ L \end{array} \right\} \end{array} \right\} R + j\omega L = \underline{Z}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_l = R_t = R_l \\ L_l = L_t = L_l \end{array} \right\} R_l + j\omega L_l = Z_t$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$\left. \begin{array}{l} \text{Transversales} \\ \left\{ \begin{array}{l} P \\ C \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad P + j\omega C = \underline{Y} \quad \left. \begin{array}{l} P_1 = P_1 = P_1 \\ C_1 = C_1 = C_1 \end{array} \right\} \quad P_1 + j\omega C_1 = \underline{Y}_1$$

Es usual asignar los valores definidos (unitarios o totales) a uno solo de los conductores de la línea monofásica, aunque en ocasiones es preferible asignarlos a cada uno de los conductores por separado, por ejemplo corresponderá  $R/2$  y  $L/2$  tratándose de una línea simétrica.

### 1.1.5 Parámetros eléctricos de cables de energía.

Los parámetros de operación de los cables aislados son de utilidad para el diseñador de sistemas eléctricos de distribución de energía eléctrica, ya que el conocimiento de dichos parámetros permite la correcta selección y elección del calibre del conductor a utilizar, esto con base a la caída de tensión, pérdidas de energía en el conductor, etc. También permite determinar el valor de la impedancia ( $Z$ ), que se utiliza en el cálculo de cortocircuito del sistema analizado.

#### 1.1.5.1 Resistencia de corriente directa.

La resistencia de corriente directa de un conductor eléctrico, formado por un alambre de cualquier material, esta expresada por la fórmula :

$$R_{cd} = \rho \left[ \frac{l}{\Lambda} \right] \quad \left[ \Omega \right]$$

en donde :

$l$  = longitud del conductor.

$\Lambda$  = área de la sección transversal del conductor.

$\rho$  = resistividad volumétrica del material conductor en unidades compatibles con  $l$  y  $\Lambda$ .

El valor de la unidad de resistividad por unidad de masa, para el cobre, que ha normalizado la IACS a  $20^\circ\text{C}$  y 100 % de conductividad es 0.15328 ohm-gramo/m<sup>2</sup>.

Para su aplicación práctica la resistividad se suele dar por volumen. Algunos valores, en diferentes unidades usadas son : 1.7241 microhm-cm , 0.67879 microhm-pulgada , 17.21 ohm-mm<sup>2</sup> km.,

Los valores para aluminio grado EC con 61 % de conductividad a  $20^\circ\text{C}$  , según IACS , son : 2.828 microhm-cm , 1.1128 microhm-pulgada , 28.28 ohm-mm<sup>2</sup>/km.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

De los valores anteriores, los que generalmente se manejan son aquellos que como se menciono anteriormente manejan unidades compatibles con  $L$  y  $A$ , como sería el  $\text{ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ .

### 1.1.5.2 Efecto del cableado.

Cuando se trata de conductores cableados, su resistencia es igual a la resistencia de cada uno de los alambres dividida entre el número de ellos ( $N$ ), para ello se utiliza la siguiente expresión :

$$R_{cd} = \frac{R'}{N} = \frac{\rho}{N} \times \frac{L}{A'}$$

Donde :

$R'$  y  $A'$  = son la resistencia y el área de la sección transversal de cada alambre, respectivamente.

Sin embargo esta fórmula sería válida si todos los alambres tuviesen la misma longitud, pero como este valor no es exactamente el mismo, ya que las longitudes de los alambres de las capas superiores tienen una mayor longitud, para conocer el incremento de la resistencia por efecto del cableado, para fines prácticos se utiliza la expresión :

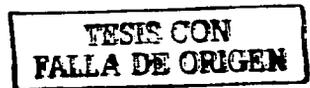
$$R_{cd} = \rho \left[ \frac{L}{A} \right] \left[ 1 + K_c \right] \quad [ \Omega ]$$

donde :

$K_c$  = es el factor de cableado, y los valores correspondientes para diversos tipos de cuerdas se presentan en la tabla 1, y en las tablas 2 y 3 se encuentran los valores de la resistencia a la corriente directa de los conductores usuales :

Tipo de Cableado	$K_c$
Redondo normal	0.020
Redondo compacto Sectorial	0.020
Sectorial	0.15
Segmental	0.020

Tabla 1. Incremento de la resistencia por efecto del cableado.



Mm <sup>2</sup>	AWG MCM	Area de la sección ( mm <sup>2</sup> )	Resistencia eléctrica nominal a la cd (20°C) (Cu suave) Ω/km
	8	8.37	2.100
	6	13.30	1.322
	5	16.77	1.050
	4	21.15	0.832
	3	26.70	0.660
	2	33.60	0.523
35		34.89	0.504
	1	42.41	0.415
50		48.30	0.364
	1/0	53.50	0.329
	2/0	67.43	0.261
70		69.00	0.255
	3/0	85.00	0.207
	4/4	107.21	0.164
	250	126.70	0.139
	300	152.01	0.116
	350	177.34	0.0992
	400	202.70	0.0867
240		242.50	0.0726
	500	253.40	0.0694
	600	304.02	0.0578
	700	354.70	0.0496
	750	380.02	0.0463
	800	405.36	0.0434
	1000	506.70	0.0347

Tabla 2. resistencia a la corriente directa a 20 °C en conductores de cobre con cableado concéntrico normal, comprimido y compacto.

Designación AWG , MCM	Area de la sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Resistencia eléctrica nominal a la cd a 20 °C ( Ω / km )
2	33.6	0.860
1/0	53.5	0.539
2/0	67.4	0.428
3/0	85.0	0.3391
4/0	107.2	0.269
250	126.7	0.228
350	177.3	0.163
500	253.4	0.114
600	304.7	0.0948
700	354.7	0.0813
1000	506.7	0.0569

Tabla 3. Resistencia a la corriente directa a 20 °C en conductores de aluminio con cableado normal, comprimido y compacto.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.1.5.3 Efecto de la temperatura en la resistencia.

Dentro de los límites normales de operación de los conductores eléctricos, los únicos cambios apreciables en los materiales usados son los incrementos en la resistencia y la longitud que estos sufren, en virtud de cambios en su temperatura. El más importante (para cables aislados), es el cambio en el valor de la resistencia, ya que el incremento en la longitud sólo es importante en el caso de líneas aéreas con grandes tramos entre postes. En cables aislados sólo se requiere usar una técnica adecuada de instalación que permita absorber el cambio en las dimensiones del conductor.

Si se efectuaran mediciones de la resistencia en un conductor, a distintas temperaturas y se construyera una gráfica en base a los valores obtenidos, se tendría la figura 2 :

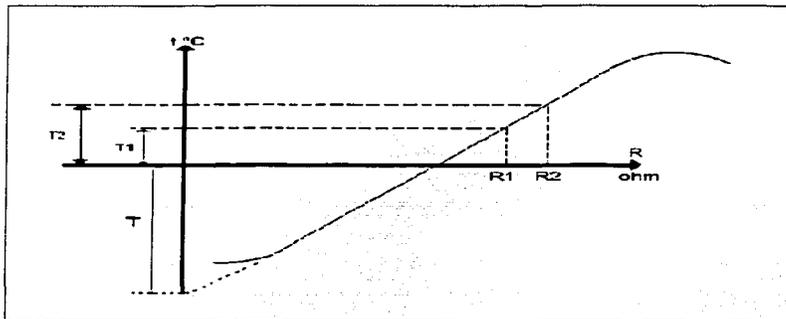


Figura 2. Variación de la temperatura de un conductor eléctrico metálico con la temperatura.

La resistencia ( $R_2$ ), a una temperatura cualquiera  $T_2$  en función de la resistencia ( $R_1$ ), a una temperatura  $T_1$  distinta de cero estaría dada por la expresión :

$$R_2 = R_1 [ 1 + \alpha (T_1 + T_2) ]$$

En donde :

$\alpha$  = se le denomina "coeficiente por corrección de temperatura" y sus dimensiones son el recíproco de grados centígrados. El valor de la temperatura se expresa generalmente a una temperatura estándar de 20 °C (68 °F).

TEST CON  
FALLA DE ORIGEN

De la figura , se obtiene la expresión :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T_2 - T}{T_1 - T}$$

El punto de intersección de la prolongación de la parte rectilínea de la curva de la figura con el eje t (temperaturas) es un valor constante para cada material: en esta temperatura el valor teórico de la resistencia del material es nula. A continuación se dan valores de T en °C para los materiales comúnmente usados en la fabricación de conductores eléctricos :

T = 234.5 °C para cobre recocido estirado en frío con 100 % de conductividad según IACS.

T = 241 °C para cobre semiduro estirado en frío con 97.3 % de conductividad según IACS.

T = 228 °C para aluminio estirado en frío con 61 % de conductividad, según IACS.

Calculando para cualquier valor el recíproco :

$$\alpha = 1 / 234.5 = 0.004264 \text{ a } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 1 / 241 = 0.004149 \text{ a } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 1 / 228 = 0.004385 \text{ a } 0^\circ\text{C}$$

Para realizar una tabla con valores de corrección para cobre al 100 % de conductividad IACS se utiliza la expresión :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + 20}{234.5 + T} = \frac{254.5}{234.5 + T}$$

Mientras que los valores de corrección para aluminio de 61 % de conductividad IACS se obtuvieron de la siguiente expresión :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{228 + 25}{228 + T} = \frac{253}{228 + T}$$

#### 1.1.5.4 Resistencia a la corriente alterna.

La resistencia de un conductor eléctrico por el que circula corriente alterna es mayor que la resistencia que presenta el mismo conductor a la corriente directa. Este incremento es ocasionado por dos efectos :

- 1) El efecto superficial o de la piel.
- 2) Efecto de proximidad.

Si se hace circular una corriente alterna por un conductor las pérdidas de energía por resistencia resultan algo mayores que la pérdida que se produce cuando circula una corriente directa de magnitud igual al valor eficaz de la corriente alterna.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.1.5.5 Inductancia y Reactancia inductiva.

Cuando en un conductor eléctrico circula una corriente de magnitud variable con el tiempo, se crea un flujo magnético variable, el cual se enlaza con los demás conductores del circuito (por los que también circulan corrientes de naturaleza análoga), a la razón de la variación del flujo magnético a la variación de la corriente en el tiempo, se le conoce como inductancia. Lo anterior se observa en la figura 3, donde la inductancia  $L$  se da en Henrys .

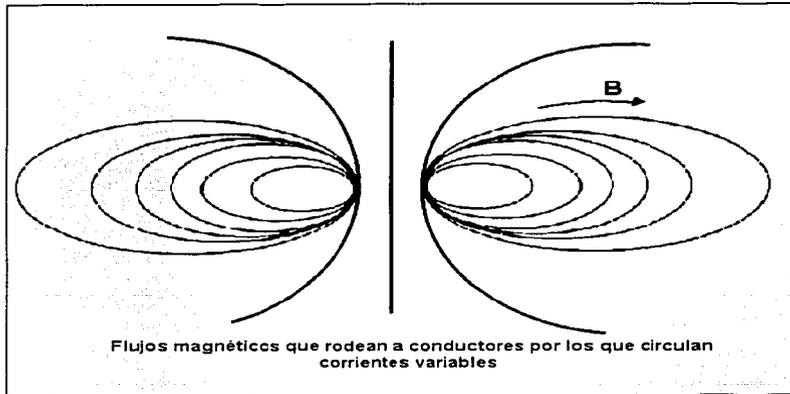


Figura 3. Flujos magnéticos.

La inductancia de un cable está dada por la suma de la inductancia propia o interna  $L_0$  (ya que parte del flujo generado corta al conductor mismo), más la externa o mutua  $L_m$ . Por lo tanto la inductancia total se obtiene con la expresión :

$$L = L_0 + L_m$$

La inductancia mutua depende de la separación y disposición de los cables, de la construcción del cable en cuanto al conductor y si está provisto o no de pantallas o cubiertas metálicas y conexión a tierra de las mismas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el caso de la inductancia total (incluidos los efectos de la inductancia mutua y propia), se pueden distinguir los siguientes casos :

- a) Cables sin pantalla o cubierta metálica, o bien, los cables que provistos de pantallas o cubiertas metálicas, las tienen conectadas a tierra de tal forma que no existen corrientes a través de las mismas.
- b) Cables con pantallas o cubiertas metálicas que se encuentren conectadas a tierra de tal forma que permiten corrientes a través de las mismas.

El valor depende de la frecuencia del sistema y del valor de la inductancia total del cable y se obtiene de la siguiente expresión :

$$X_L = 2 \pi f_L \quad \left( \Omega/\text{km} \right)$$

donde :

$f$  = frecuencia del sistema en Hz.

$X_L$  = reactancia inductiva en henry/km.

## 1.2 Características de las Subestaciones.

Una subestación es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un Sistema Eléctrico de Potencia; sus funciones principales son : transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.

También se puede definir como un conjunto de elementos y dispositivos que tiene como función modificar los parámetros de la potencia eléctrica (tensión y corriente), además de proporcionar los medios de interconexión entre las líneas de alimentación y de salida. En general dichos elementos y dispositivos se pueden clasificar como :

- a) Elementos de potencia. Transformadores, interruptores, cuchillas, reactores, capacitores, transformadores de medición.
- b) Elementos de protección. Relevadores, interruptores, apartarrayos, hilos de guarda, cuernos de arco y pararrayos.
- c) Elementos de medición . voltmetros, amperímetros, wattmetros, factorímetros, frecuencímetros, etc.
- d) Otros. Conductores, tableros, estructuras, redes de tierra, conectadores, alumbrados, etc.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.2.1 Elementos principales.

Los principales elementos que constituyen una subestación eléctrica son los que se describen a continuación :

- 1.- Transformador principal.
- 2.- Transformador de circuitos auxiliares.
- 3.- Interruptor.
- 4.- Restaurador.
- 5.- Cuchillas fusible.
- 6.- Cuchillas desconectoras manuales.
- 7.- Apartarrayos.
- 8.- Sistema de tierras.
- 9.- Estructura.
- 10.- Equipo de filtrado de aceite.
- 11.- Equipo de secado.
- 12.- Transformadores de instrumento.
- 13.- Condensadores.
- 14.- Alumbrado.
- 15.- Tableros de Alta y Baja tensión.
- 16.- Equipo de protección y seguridad industrial.
- 17.- Equipo de medición.
- 18.- Conductores eléctricos.
- 19.- Canalizaciones.
- 20.- Equipo de descarga a tierra.
- 21.- Banco de baterías.

Los elementos mencionados son los mínimos que una subestación eléctrica debe tener presente para poder operar correcta y seguramente.

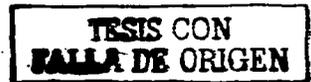
### 1.2.2 Clasificación.

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar de la siguiente manera :

1.- Por su operación en :

- De corriente alterna .
- De corriente directa .

2.- Por la función que desempeñan :



- Elevadoras.
- Reductororas.
- De enlace.
- De distribución.
- De rectificación.

3.- Por su construcción en :

- Intemperie.
- Interior.
- Blindado.

Las subestaciones eléctricas de corriente alterna, son aquellas que por sus características eléctricas únicamente operan con corriente alterna y pueden ser elevadoras, reductoras, de enlace, en cuanto al tipo de construcción pueden ser de tipo intemperie, de tipo interior o de tipo blindado.

Las de corriente directa, también por sus características eléctricas, únicamente trabajan con corriente directa y por lo regular operan a tensiones constantes y generalmente son de tipo interior.

### 1.2.3 Funciones de las subestaciones.

a) Subestaciones eléctricas elevadoras.

Las subestaciones eléctricas elevadoras, normalmente son instaladas adyacentes a las centrales eléctricas o plantas generadoras de energía eléctrica, para modificar los parámetros de la energía o potencia administrada por los generadores eléctricos, y así, permitir la transmisión en alta tensión a través de las líneas de transmisión aéreas o subterráneas según sea el caso. Por lo tanto se dice que una subestación elevadora nos sirve para incrementar la tensión de generación que proporcionan las centrales eléctricas a valores mucho más elevados.

Estas subestaciones ocupan un papel muy importante en el campo de la electricidad, ya que por medio de ellas se logra economizar en cuanto al costo de los aislamientos de los equipos y de los sistemas de enfriamiento de los mismos equipos.

A continuación se ilustra en la figura 4 indicando el punto donde se instala este tipo de subestaciones: es decir que se encuentra después de la central generadora.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

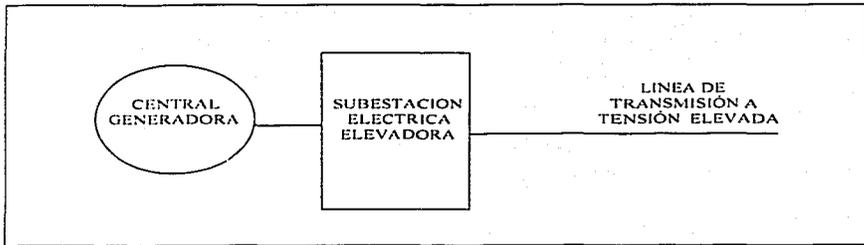


Figura 4. Subestaciones elevadoras

a) Subestaciones eléctricas de distribución.

Estas subestaciones normalmente son reductoras y son instaladas al final de las líneas de transmisión, a través de estas se alimentan diversos equipos de las instalaciones industriales y comerciales. Su capacidad depende de la carga que se desea alimentar.

Normalmente estas subestaciones se alimentan a través de dos alimentadores diferentes, para que en el caso de que uno falle, no se interrumpa el servicio o la producción según sea el caso. Su mantenimiento se hace por lo regular los fines de semana en el caso industrial y en el caso público, se conecta en servicio la subestación de enlace que debe estar disponible para que se tenga la continuidad en el servicio.

La figura 5 nos muestra su ubicación dentro del sistema eléctrico de potencia.

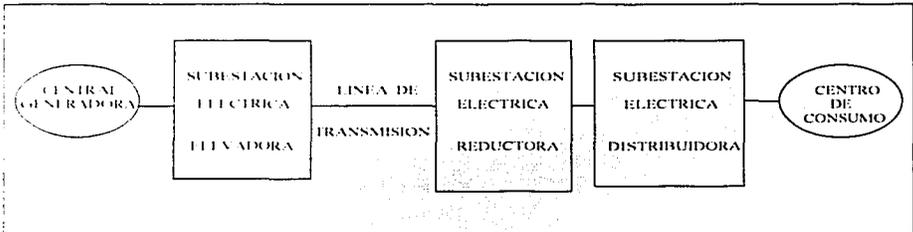


Figura 5. Ubicación de la subestación de distribución

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### c) Subestaciones eléctricas de enlace.

Este tipo de subestaciones son llamadas de enlace porque sirven para interconectar o enlazar dos líneas de transmisión o alimentadores para que en un momento dado alguno de ellos salga de servicio por falla en uno de sus equipos o por mantenimiento; normalmente operan al mismo potencial, esto es, que los circuitos que enlazan, operan al mismo potencial.

Estas subestaciones en realidad no son ni elevadoras ni reductoras y únicamente operan cuando uno de los alimentadores o centrales generadoras queda fuera de servicio.

Su aplicación y su uso es tan importante como las otras, ya que por medio de estas podemos evitar apagones y paros industriales que repercutan en el desarrollo del servicio que se este brindando. Siempre es recomendable tener una subestación de enlace para evitar trastornos y pérdidas económicas.

En la figura 6 se observa su disposición dentro del sistema eléctrico de potencia.

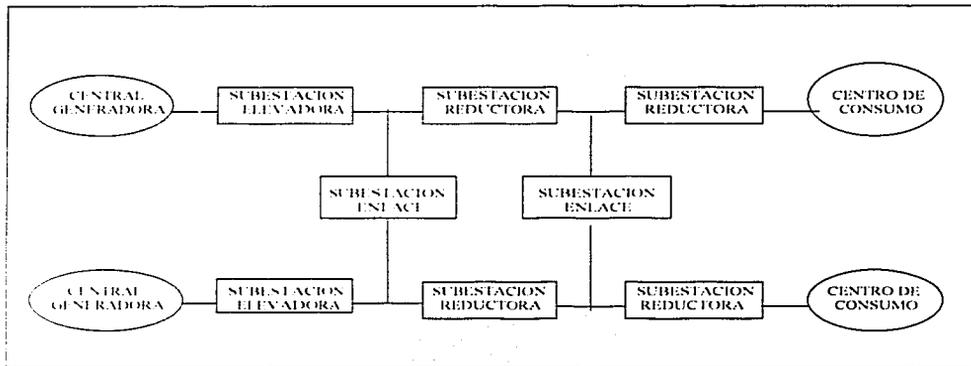


Figura 6. Ubicación de una subestación eléctrica de enlace.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

#### d) Subestaciones eléctricas reductoras.

Estas subestaciones son las que reciben la alta tensión que viene de las subestaciones elevadoras a través de las líneas de transmisión y su función principal es la de reducir la alta tensión a valores menores, factibles de ser distribuidos a los consumidores.

También suele llamárseles subestaciones receptoras reductoras primarias, por ser las que reciben y reducen la alta tensión en la primera etapa; el costo de este tipo de subestaciones es muy elevado y su mantenimiento debe ser muy riguroso y cuidadoso, ya que una posible falla en uno de sus equipos produce pérdidas económicas muy considerables, ya que por lo regular estas alimentan a las subestaciones de enlace o a las de distribución.

En la figura 7 se observa la ubicación de la subestación reductora.

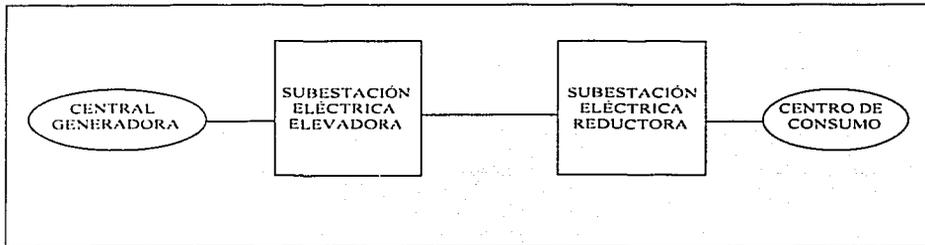


Figura 7. Ubicación de una subestación reductora.

#### e) Subestaciones eléctricas de rectificación.

Estas subestaciones nos sirven para rectificar la corriente alterna en directa. Su aplicación es para casos especiales y su costo es considerablemente alto porque sus elementos rectificadores son de materiales muy costosos. Ejemplos de este tipo de subestaciones las podemos encontrar alimentando las vías del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), ya que se encargan de proporcionar la tensión en corriente continua para la tracción de los trenes que circulan a lo largo de sus líneas.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.2.4 Características.

La necesidad de instalar subestaciones eléctricas para alimentar las redes de distribución, proviene del carácter peculiar de los sistemas de corriente utilizables en la electrificación de las vías férreas.

Las redes de tracción pueden ser de corriente alterna o de corriente continua. En uno u otro caso podrían instalarse centrales generadoras que efectuaran la alimentación directa a la red, sin embargo este método es inaceptable en casi todos los casos, debido al escaso rendimiento que da en la distribución y principalmente a la dificultad de mantener el voltaje constante en todos los puntos de la línea, aparte de los inconvenientes que aparecen tanto en la instalación como en la explotación, al tener que emplazar una central en un lugar determinado por condiciones ajenas a su propio funcionamiento.

Las grandes centrales generadoras suelen ser hidroeléctricas y se encuentran bastante alejadas de las zonas del aprovechamiento de la energía, imponiéndose la necesidad de transportarla. El transporte de la energía es mas económico cuanto mayor es el voltaje de transmisión, puesto que la sección de los conductores varía en razón inversa del cuadrado de la tensión. Esto obliga a instalar estaciones transformadoras en el principio y en el final de la línea que eleven y bajen la tensión a valores convenientes y prácticos según nuestras necesidades.

Para tener buen rendimiento en la distribución es necesario establecer numerosos puntos de alimentación de la red, lo cual se consigue instalando diferentes estaciones secundarias de transformación llamadas Subestaciones que se encargan de convertir la corriente recibida de las estaciones principales o de otras redes de utilización, para adaptarlas a los servicios según nuestras necesidades, en nuestro caso tracción, alumbrado, etc.

Las subestaciones son elementos esenciales de toda red de electrificación cuyo desarrollo es cada día mayor por permitir el empleo de la energía hidráulica y mayor aprovechamiento de la energía térmica.

Se pueden definir tres tipos de subestaciones eléctricas :

- 1) Subestaciones que transformen las corriente alterna en continua.
- 2) Subestaciones de transformación monofásica a polifásica.
- 3) Subestaciones transformadoras de la frecuencia.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.2.5 Ubicación.

El problema de la ubicación de una subestación es tan complejo que no puede darse una regla precisa que lo resuelva, solo determinadas consideraciones técnicas.

Si la subestación debe suministrar energía a una red urbana de distribución, el punto más adecuado para su emplazamiento es el centro de gravedad de la carga, la máxima distancia entre subestaciones esta limitada por el voltaje del sistema de distribución, debido a que la variación de voltaje debe estar dentro de un rango que se determine admisible para su operación.

Para el caso de las instalaciones del sistema de transporte colectivo existe un cierto interés de situar las subestaciones dentro de las instalaciones de determinadas estaciones de abordaje de pasajeros, dejando resuelto así el problema de la localización de dichas subestaciones, el calculo de distribución es entonces a base de dicha situación.

A una tensión continua de 600 volts, esta distancia no debe exceder de unos 20 kilómetros correspondiendo a cada subestación alimentar una extensión de 10 kilómetros en ambos sentidos (es decir Vía 1 y Vía 2); para una tensión de 1200 y 1500 volts en línea puede permitirse una distancia máxima de 50 a 60 km, las líneas del Metro cuentan con una relación de subestaciones por cada terminal.

Si se tratara de un sistema de corriente alterna las subestaciones podrían alejarse mas del centro de consumo, dados los voltajes elevados que se manejarían.

### 1.2.6 Edificio y accesorios complementarios.

Al proyectar una subestación conviene tener presente las consideraciones siguientes :

- 1) Ubicar los aparatos procurando economizar todo el espacio posible, pero sin obstaculizar posibles reparaciones en el equipo.
- 2) Todo material de construcción será incombustible y se protegerán contra fuego unas piezas de otras y el conjunto del exterior.  
Los transformadores e interruptores en aceite, si los hay se separaran de las maquinas y del cuadro de maniobra por un muro.
- 3) Debe preverse espacio suficiente para una futura ampliación de la subcentral. Esto se consigue con disposiciones simétricas de los aparatos y convenientes armaduras para la construcción del techo del edificio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

4) El aspecto exterior del edificio debe ser sencillo y expresivo, con ligeros adornos que destruyan la monotonía del muro plano. Si el edificio de la subestación forma parte de la estación puede desarrollarse algo más al gusto arquitectónico construyendo un local digno de la compañía.

5) El alumbrado. Debe procurarse construir el edificio adaptándolo a las necesidades exigidas por el equipo con que cuente la subestación. Todas las partes del local deben estar perfectamente alumbradas para facilitar los trabajos de reparación y maniobra o para toma de lecturas en los instrumentos de medición que se hagan durante el día o la noche según sea el caso, incluso los rincones y fosas ya que éstos deben estar perfectamente limpios. El local no debe contar con una superficie excesiva de ventanas.

6) Ventilación. La ventilación de una subestación es de suma importancia ya que una buena alimentación aumenta la capacidad y vida de los aparatos, eleva el rendimiento de las máquinas de transformación, mejora el factor de carga y estimula a los operarios. Las ventanas son el medio de ventilación más común sin embargo no pueden emplearse en ciertas localidades por el polvo que se deposita en la maquinaria, el ruido que transmiten y el frío en determinados periodos del año.

El mejor sistema consiste en hacer que el aire entre por debajo de las máquinas, transformadores o interruptores y salga por el techo, ya sea por circulación natural o aspirado por un ventilador.

7) Compresor. Las subestaciones deben estar provistas de un compresor de aire para limpiar las máquinas, aisladores de alta tensión, conexiones, etc. La presión conveniente oscila alrededor de 25 kgs. y la capacidad varía de 400 a 700 litros por minuto.

### 1.3 Protecciones.

Las instalaciones eléctricas son en ocasiones tan importantes como los sistemas eléctricos de potencia y el uso de las técnicas de análisis usadas en estos pueden aplicarse a las instalaciones eléctricas del tipo industrial. El análisis de los sistemas es un conjunto de técnicas que se basan en las leyes fundamentales de la electricidad aplicables a circuitos trifásicos de corriente alterna. Estas técnicas nos representan a la instalación o el sistema eléctrico de potencia bajo condiciones específicas de operación y nos proporcionan información para rediseñarlos, hacer los ajustes precisos o bien cuando se contemplan modificaciones dentro los mismos.

Un análisis completo de una instalación eléctrica industrial esta conformado por :



- Estudios y cálculos de corto circuito.
- Selección de dispositivos de protección.
- Coordinación de dispositivos de protección.
- Otros estudios como arranque de motores, caídas de voltaje, corrección de factor de potencia, etc.

Estos estudios nos proporcionarían como ya se comentó la información necesaria para que nuestras instalaciones eléctricas se caractericen por su :

- Confiabilidad en el servicio.
- Seguridad en su operación.
- Calidad en el suministro de energía.
- Diseño simple para la operación y mantenimiento.
- Posibilidad de ampliaciones futuras.
- Costos iniciales y de operación mínimos.

### 1.3.1 Criterios generales.

Las condiciones anormales de operación que no se pueden permitir en un sistema eléctrico son el cortocircuito y las sobrecargas.

El corto circuito puede tener su origen de distintas formas, por ejemplo fallas de aislamiento, fallas mecánicas en el equipo, fallas en el equipo por sobrecargas excesivas y repetitivas, etc.

Las sobrecargas se pueden presentar por causas muy simples, como pueden ser instalaciones inapropiadas, operación incorrecta del equipo por ejemplo arranques frecuentes de motores, ventilación deficiente, periodos largos de arranque de motores, etc.

En el diseño de sistemas eléctricos se han desarrollado varias técnicas para minimizar los efectos de las anomalías que ocurren en el mismo, de tal forma, que se diseñe el sistema para que sea capaz de :

- a) Aislar rápidamente la porción afectada del sistema, de forma que el efecto sea mínimo y se mantenga el servicio tan normal como sea posible.
- b) Reducir el valor de la corriente de cortocircuito al mínimo valor posible y así reducir los daños potenciales al equipo o a la misma instalación.
- c) Proveer al sistema siempre que sea posible de medios de recierre automático para minimizar la duración de fallas de tipo transitorio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Se puede decir que la función de la protección es la detección y el pronto aislamiento de la porción afectada del sistema, ya sea que ocurra como corto circuito u otra condición anormal que pueda producir daño a la parte afectada o a la carga que alimenta.

La coordinación es la selección, ajuste o ambas cosas de los dispositivos de protección para aislar la parte afectada del sistema cuando ocurre alguna anomalía, y se debe de tener en cuenta para cualquier diseño de un sistema eléctrico.

Para aislar un corto circuito o una sobrecarga, se requiere de una protección que nos sirva para los dos casos y nos desconecte la parte afectada, se debe contar con un elemento sensor y su respectivo dispositivo de interrupción, los cuales en ocasiones se encuentran separados e interconectados solo por los cables de control o se pueden en un mismo dispositivo como el fusible el cual cumple con ambas funciones, es un elemento sensor y de interrupción, se conecta en serie con el circuito y responde a los efectos térmicos producidos por la corriente a través del mismo. Mientras que los interruptores son solo dispositivos que se deben usar con elementos sensores (relevoadores).

### **1.3.2 Diseño preliminar.**

El diseñador de un Sistema Eléctrico de Potencia para instalaciones industriales, debe determinar el requerimiento de carga, incluyendo los tamaños y tipos de carga, así como cualquier requerimiento de tipo especial. Así mismo debe de contar con el valor del corto circuito en el punto de conexión y la red de suministro eléctrico. También se deben conocer las características de los dispositivos de protección de la compañía suministradora de la energía eléctrica.

El diseño debe comenzar con un diseño preliminar del sistema que cubra los fundamentos del corto circuito, de manera que permita el diseño preliminar y la selección correcta de los dispositivos de protección.

### **1.3.3 Diagramas unifilares.**

Para el estudio de sistemas eléctricos de potencia o para aplicaciones industriales, el uso de diagramas unifilares es de gran utilidad y representa un elemento básico para el diseño y los estudios de Sistemas Eléctricos.

El diagrama unifilar se define como "un diagrama que indica por medio de líneas sencillas y símbolos simplificados, la interconexión y partes componentes de un sistema eléctrico".

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En el caso particular de los sistemas eléctricos de potencia como se sabe las instalaciones son trifásicas, es decir que su representación se obtendría por medio de un diagrama trifilar. en la siguiente figura se muestran ambos diagramas, es decir uno trifilar y la correspondiente representación unifilar.

El propósito de un diagrama unifilar, es que el diseñador desarrolle a través de un medio simple sus ideas. Para la distribución de potencia a nivel industrial existen sistemas básicos que se han desarrollado a partir de los distintos posibles arreglos y que son los siguientes :

a) Sistema radial simple.

Es el más económico para la distribución directa de la potencia a los centros de carga, de donde la potencia se distribuye a su vez para su utilización.

En la figura 8 se muestra el esquema básico de este sistema que resulta adecuado para muchas aplicaciones, pero que desde luego no tiene su mejor característica en la confiabilidad, ya que si falla la alimentación, se pierde el suministro en el resto de la instalación.



Figura 8 . Sistema de distribución radial (simple).

**TESTS CON  
FALLA DE ORIGEN**

b) Sistema selectivo primario.

El sistema selectivo primario proporciona una alimentación alterna a cada centro de carga. En esto, dos líneas van hacia cada unidad o centro de carga. En caso de que se presente una falla en las líneas de alimentación, entonces solo algunos de los centros de carga pierden su potencia, y mediante switcheos rápidos se regresan a servicio, en tanto que el alimentador en falla se repara.

En la figura 9 se observa este sistema, que aunque es de un costo mayor al sistema radial simple debido a sus alimentadores adicionales y el equipo de switcheo, pero para algunos procesos o servicios donde es necesario un mayor grado de confiabilidad en el suministro eléctrico es la mejor opción.

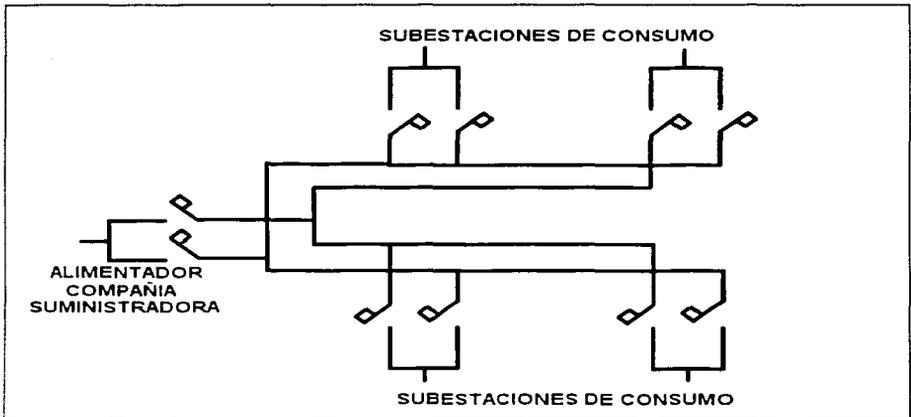


Figura 9. Sistema selectivo primario.

c) Sistema selectivo secundario.

Este sistema es básicamente un sistema radial primario con enlaces secundarios entre buses o barras. Este sistema como el radial simple, tiene la desventaja de tener una fuente de alimentación única. Desde luego es posible tener más de una fuente radial para mejorar la confiabilidad por medio del uso de bus secundarios de amarre que permite aislar

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

cualquier alimentador secundario y alimentar el bus secundario, cerrando los interruptores de amarre al bus.

En la figura 10 se muestra este sistema y se observa por ejemplo, que si por alguna razón el transformador No. 1 tiene que estar fuera de servicio, o bien si presenta una falla en el alimentador, los interruptores A y D podrían ser abiertos para aislar el circuito del alimentador al transformador. Los interruptores de amarre I y E podrían cerrarse y todas las cargas sobre el secundario del transformador No. 1 serían alimentadas temporalmente desde el transformador No. 2.

Este sistema requiere un análisis cuidadoso porque si las cargas sobre un bus, mas las cargas del segundo bus, son mayores que la capacidad de un transformador, se pueden producir posibles interrupciones de servicio.

Algunos sistemas con sistema secundario selectivo están diseñados de tal manera que cada transformador toma solo la mitad de la carga para poder tomar carga adicional cuando el cierre del bus amarre.

En el diagrama anterior si se produce el disparo de los interruptores A ó D ó ambos, se podría iniciar el cierre de los interruptores I y E para completar el cierre del secundario. Si el amarre del secundario bajo condiciones normales de operación, tiene un interruptor normalmente abierto podría cerrar.

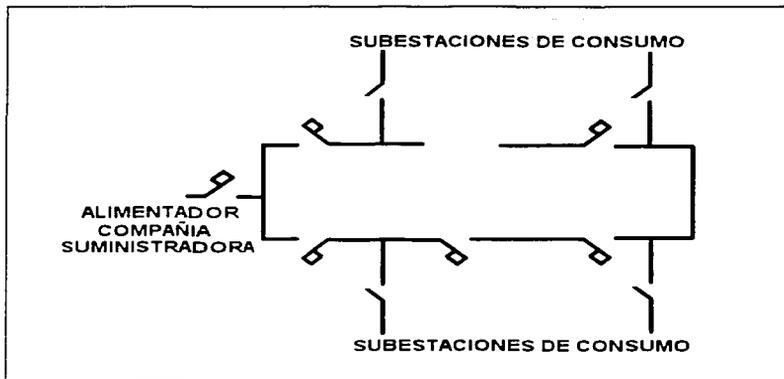


Figura 10 . Sistema con secundario selectivo.

### 1.3.4 El servicio de la compañía suministradora.

Es importante que a partir de las necesidades de servicio, o bien que las características de las cargas por alimentar se cuente con la siguiente información, que para iniciar es la siguiente :

1. El plano de la planta o industria, mostrando obras adyacentes.
2. El punto de entrega o suministro de energía eléctrica por la compañía suministradora.
3. Naturaleza de la carga conectada y voltajes de utilización.
4. Valor del corto circuito en el punto del suministro.
5. Forma de conexión a tierra de los neutros.
6. Circuitos de respaldo ( en caso necesario ).
7. Características de la generación propia.
8. Un diagrama unifilar que contenga :
  - a) Fuentes de alimentación, incluyendo el valor del corto circuito disponible.
  - b) Tamaño, tipo, ampacidad y número de todos los conductores.
  - c) Capacidad, voltaje, impedancia, conexión de devanados y conexión de tierra de los devanados.
  - d) Identificación y cantidad de los dispositivos de protección ( fusibles, relevadores, etc).
  - e) Transformadores de instrumento.

Otros requerimientos que es conveniente conocer son :

- a) Requerimientos de arranque para motores grandes.
- b) Operación de soldaduras eléctricas si las hay.
- c) Cargas que se deben conservar en operación bajo cualquier condición.
- d) Cargas muy sensibles (centros de computo, laboratorios, etc.).
- e) Equipos que producen alto nivel de ruido.

Toda esta información permite realizar los siguientes estudios :

- 1)Corto circuito. Calculo de la corriente y / o potencia del corto circuito en todas las barras del sistema.
- 2)Protección. Diseñar los sistemas de protección requeridos, que deben ser considerados como parte integral del diseño total del sistema.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

#### 1.4 Valores por ciento y en por unidad.

Los sistemas eléctricos de potencia y las instalaciones industriales operan en sistemas en donde la unidad de voltaje más común es el kilovolt (kV) y en donde se manejan valores de potencia, tales que el kilovolt-ampere (kVA) es una unidad común de los sistemas trifásicos.

Estas cantidades junto con la corriente y los valores de impedancias, se expresan en forma común en por unidad o en por ciento para simplificar notación y cálculos, en especial cuando en un mismo sistema eléctrico se manejan distintos niveles de voltaje y distintos valores de potencia en los equipos.

Estos conceptos son aplicables a sistemas eléctricos trifásicos balanceados o con un nivel de balanceo tolerable.

##### 1.4.1 Definición.

Una cantidad por ciento es 100 veces una cantidad en por unidad. Ambas son usadas a conveniencia o como selección de facilidad en su uso por cada persona, por lo que es conveniente tener el concepto de las dos formas de representar o de expresar cantidades.

Un valor en por unidad o cualquier cantidad expresada en por unidad, es la relación de esta cantidad entre un valor determinado como base. El resultado se expresa como una cantidad adimensional.

Los valores reales a actuales, tales como voltaje (V), corriente (I), potencia (P), potencia reactiva (Q), volt-ampere (VA), resistencia (R), reactancia (X) e impedancia (Z), se pueden expresar en por unidad o en por ciento de acuerdo a las siguientes relaciones :

$$\text{cantidad en por unidad} = \frac{\text{cantidad}}{\text{cantidad base en las mismas unidades}}$$

$$\text{cantidad en por ciento} = (\text{cantidad en por unidad}) \times 100$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Donde la cantidad es un valor escalar o complejo, expresado en sus propias unidades, tales como : volts, amperes , ohms, voltamperes o watts.

La llamada cantidad base a valor base, se refiere a un valor de referencia, seleccionado de forma arbitraria o a conveniencia, para la misma cantidad o las mismas unidades. Por lo tanto las cantidades en por unidad o en por ciento son cantidades adimensionales.

#### 1.4.2 Ventajas.

Algunas de las ventajas de usar cantidades en unidad o en por ciento son :

1. Su representación resulta ser una forma mas directa de comparar datos, ya que las magnitudes relativas se pueden comparar directamente.
2. El valor equivalente en por unidad, es el mismo para cualquier transformador, ya sea que se refiera al lado primario o al secundario.
3. La impedancia en por unidad (P.U.) de un transformador en un sistema trifásico, es la misma, en forma independiente del tipo de conexión que tenga (delta-estrella, delta-delta, etc.).
4. El método en por unidad es independiente de los cambios de voltaje y de defasamiento.
5. Los fabricantes de equipo eléctrico, por lo general especifican la impedancia de los mismos en por unidad o por ciento a la base de sus datos de placa (potencia en kVA, voltajes en kV), por lo que estos valores se pueden usar directamente en sus propias bases.
6. Los valores en por unidad de impedancia de los equipos caen dentro de un rango de valores limitado, mientras que los valores en ohms, lo hacen en un rango mas amplio. Por esta razón es mas común encontrar valores característicos de impedancias en los equipos en por unidad.
7. Hay menos posibilidad de confusión entre valores trifásicos o monofásicos o entre valores entre fases o de fase a neutro.
8. Los valores en por unidad, resultan ideales para los estudios de computadora digital.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

9. Para estudios de corto circuito, los voltajes de las fuentes se pueden tomar como 1.0 por unidad.
10. El producto de cantidades en por unidad, da una cantidad en por unidad.

### 1.4.3 Relaciones generales.

Es conveniente hacer una revisión de las cantidades que intervienen en los circuitos trifásicos, considerando los dos tipos de conexiones mas comunes, Delta o Estrella.

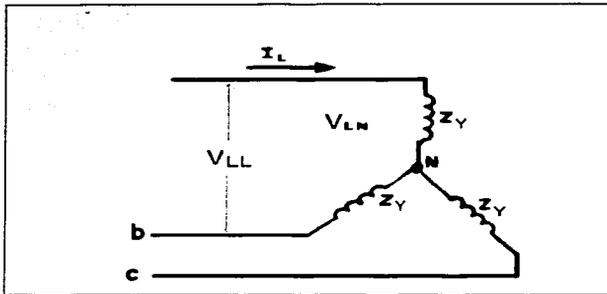


Figura 11. Impedancias conectadas en estrella.

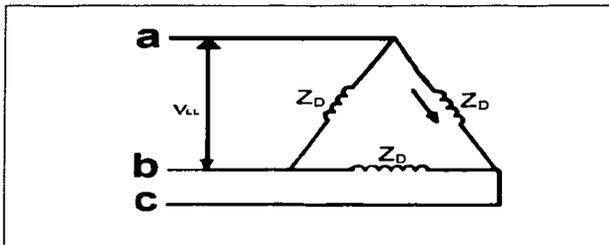


Figura 12. Impedancias conectadas en delta.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Para cada una de las conexiones anteriores se pueden aplicar las siguientes expresiones :

$$S = \sqrt{3} V_{LL} I_L$$

Donde : s = Potencia trifásica aparente.

$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN} \angle 30^\circ$$

$V_{LL}$  = Voltaje de línea a línea.

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_{LL}}$$

$V_{LN}$  = Voltaje de línea a neutro.

Para las conexiones estrella y delta, se pueden obtener los valores de impedancia y de corriente, mostradas a continuación.

### 1. Impedancias conectadas en Estrella .

$$Z_Y = \frac{V_{LN}}{I_L} = \frac{V_{LL} \angle -30^\circ}{\sqrt{3} I_L} \times \frac{\sqrt{3} V_{LL}}{s}$$

$$Z_Y = \frac{V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{s}$$

### 2. Para impedancias conectadas en Delta.

$$I_D = \frac{I_L \angle 30^\circ}{\sqrt{3}}$$

$$Z_D = \frac{V_{LL}}{I_D} = \frac{\sqrt{3} V_{LL} \angle -30^\circ}{\frac{I_L \angle 30^\circ}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3} V_{LL} \angle -30^\circ \times \sqrt{3} V_{LL}}{s}$$

$$Z_D = \frac{3 V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{s}$$

$$I_D = \frac{V_{LL}}{Z_D} = \frac{s \angle 30^\circ}{3 V_{LL}}$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

#### 1.4.4 Cantidades base.

Las cantidades tomadas como referencia y conocidas como Base, son cantidades escalares, por lo que no se requiere notación fasorial para su manejo, de manera que si se usa el subíndice (b) para expresar en la forma siguiente :

Para la potencia Base :

$$KVA_b = \sqrt{3} KV_b I_b$$

La corriente Base :

$$I_b = \frac{KVA_b}{\sqrt{3} KV_b}$$

La impedancia Base :

$$Z_b = \frac{KV_b \times 1000}{KVA_b}$$

Si se expresa la potencia en MVA, dado que se puede escribir  $KVA_b = 1000 \times MVA_b$ , la impedancia se puede expresar como :

$$Z_b = \frac{KV_b^2}{MVA_b}$$

En los sistemas eléctricos trifásicos, la práctica común es usar un voltaje nominal del sistema como voltaje base y un valor conveniente en KVA ó MVA como potencia base.

El voltaje usado como base es el de fase a fase. Los valores de impedancia expresados en por unidad, se refieren al valor base de la impedancia y entonces se tienen las siguientes expresiones :

$$Z_{p.u.} = \frac{Z(\Omega)}{Z_b(\Omega)} = \frac{Z(\Omega) MVA_b}{(KV_b)^2}$$

Al igual que :

$$Z_{p.u.} = \frac{Z(\Omega) KVA_b}{1000 (KV_b)^2}$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En notación por ciento recordando que :

$$Z \% = Z \text{ p.u.} \times 100$$

$$Z \% = \frac{1000 \text{ MVA}_b \times Z (\Omega)}{(KV_b)^2}$$

También :

$$Z \% = \frac{Z (\Omega) \text{ KVA}_b}{10 (KV_b)^2}$$

Cuando los valores en Ohms se desean obtener a partir de los valores en por unidad o en por ciento :

$$Z (\Omega) = \frac{KV_b^2}{\text{MVA}_b} Z \text{ p.u.}$$

$$Z (\Omega) = \frac{1000 (KV_b)^2}{\text{KVA}_b} Z \text{ p.u.}$$

$$Z (\Omega) = \frac{(KV_b)^2 (Z \%)}{100 \text{ MVA}_b}$$

$$Z (\Omega) = \frac{10 (KV_b)^2 (Z \%)}{\text{KVA}_b}$$

Estos valores son aplicables al calculo de resistencias o reactancias.

#### 1.4.5 Cambio de cantidades.

Generalmente las impedancias en por ciento o en por unidad del equipo, se especifican sobre la base del equipo las cuales son generalmente diferentes de la base del sistema de potencia. Debido a que todas las impedancias en un sistema se deben expresar sobre la misma base para los cálculos en por unidad o en por ciento es necesario convertir todos los valores a una base común seleccionada.

Esta conversión se puede derivar expresando la misma impedancia en Ohms en dos bases distintas un por unidad. Si se designa a una base como  $\text{KVA}_1$  y  $\text{KV}_1$  y la otra como  $\text{KVA}_2$  y  $\text{KV}_2$ . Los valores de la impedancia en por unidad referidos a cada base son :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$Z_1 \text{ p.u.} = \frac{Z (\Omega) \text{ KVA}_1}{1000 \text{ KV}_1^2}$$

$$Z_2 \text{ p.u.} = \frac{Z (\Omega) \text{ KVA}_2}{1000 \text{ KV}_2^2}$$

dado que la impedancia en Ohms tiene el mismo valor despejando de cada ecuación e igualando se tiene que :

$$Z_2 \text{ p.u.} = Z_1 \text{ p.u.} \frac{\text{KVA}_1}{\text{KVA}_2} \times \frac{\text{KV}_1^2}{\text{KV}_2^2}$$

La ecuación anterior representa la ecuación general para cambiar de una base a otra. Cuando las relaciones de transformación de los transformadores corresponden a los voltajes nominales, entonces la ecuación para el cambio de base se simplifica.

$$Z_2 \text{ p.u.} = Z_1 \text{ p.u.} \frac{\text{KVA}_1}{\text{KVA}_2}$$

#### 1.4.6 Preparación de un sistema para su estudio.

Normalmente las cantidades en por ciento o en por unidad se hace para la realización de estudios de corto circuito general, y en el caso particular de la selección y ajuste de protecciones, se requieren de casos de estudios adicionales, que justifican la representación de los sistemas en por unidad.

Este tipo de representación se hace en base a un procedimiento paso a paso que proporciona las bases para los estudios en la mayoría de los sistemas eléctricos industriales y comerciales, con tensiones primarias hasta de 115 kV y voltajes de distribución y / o utilización de 13.8 kV, 4.16 kV, 2.4 kV, 440 V/254 V, 220 V/ 127 V. Incluyendo aquellas industrias en que además de la alimentación de la compañía suministradora, tienen generación propia.

Para estudios de corto circuito, se debe seguir el siguiente procedimiento, basado en la combinación de un diagrama unifilar a partir del cual se obtendrá un diagrama de impedancias.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1.- Preparar el diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia que se este analizando, donde se incluyan todos sus elementos de interes para nuestro estudio así como sus datos como podrían ser : potencia, voltaje e impedancia. El diagrama puede ser simplificado en su mayor parte posible, pero sin excluir algún elemento importante para nuestro estudio :

2.- Preparar el diagrama de impedancias, el cual se obtiene del diagrama unifilar para el sistema reemplazando cada elemento por su impedancia conservando su interconexión, los valores de las impedancias de cada una de las componentes, pueden estar expresadas en terminos de cualquiera de las siguientes unidades :

- a) Ohms por fase.
- b) Por ciento, referidos a sus datos nominales de potencia y voltaje.
- c) Por unidad, referidas a una base común de KVA.

Para el diagrama unifilar mostrado en la figura anterior, el diagrama de impedancias correspondiente es el siguiente :

Donde se observa que en el diagrama de impedancias aparece una fuente equivalente para el sistema de alimentación de la compañía suministradora. Esta fuente equivalente es un equivalente de Thevenin que se representa como una fuente de voltaje en serie conectada con una impedancia.

La fuente de voltaje se toma con un valor de 1.0 p.u. y la impedancia en serie con esta fuente se obtiene a partir de la potencia o corriente de corto circuito del punto de alimentación, referida al valor de la potencia base o la corriente base según sea el caso.

Para los estudios de corto circuito, en la elaboración del diagrama de reactancias, es necesario representar los valores de las impedancias o reactancias de los elementos del sistema, los cuales se pueden obtener directamente de los datos de placa de cada componente o realizando algunos calculos como los siguientes :

a) Transformadores.

La reactancia o impedancia de los transformadores, se expresa en por ciento ( % Z ) referida a la potencia nominal del transformador en KVA. Este valor de impedancia se expresa a la capacidad del transformador (KVA) a la capacidad de autoenfriamiento.

Para obtener valores por unidad se usa la expresión :

$$Z \text{ p.u.} = \frac{\% Z T}{100} \left( \frac{KVA_b}{KVA \text{ Transf.}} \right)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

b) Bus, ducto, cables y conductores.

La resistencia y reactancia de los buses ducto, los cables y conductores, se obtienen frecuentemente de datos en tablas o es dato proporcionado por el fabricante, expresados generalmente en Ohms por fase, por unidad de longitud, para convertirlas a por ciento se utiliza la expresión :

$$Z \% = \frac{Z (\Omega) \text{ KVA}_{\Delta_b}}{10 (\text{KV}_b)^2}$$

donde :  $Z (\Omega)$  = impedancia total del conductor o bus ducto.

### 1.5 Estudio del cortocircuito.

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.

Para cualquier ajuste o selección de protecciones en una instalación eléctrica se requiere de un estudio de cortocircuito.

#### 1.5.1 Conceptos básicos.

Los sistemas eléctricos de potencia en plantas industriales, centros comerciales, sistemas de transporte y grandes edificios, se diseñan para alimentar los centros de carga de una forma segura, confiable y continua. Uno de los aspectos a los que se pone mayor atención en el diseño de los sistemas de potencia, es el control adecuado en caso de presentarse un cortocircuito en nuestro sistema eléctrico a fin de evitar interrupciones en el servicio o producción, con su consecuente pérdida de tiempo, riesgo de daño a personas equipo e instalaciones, por lo cual el calculo del cortocircuito es esencial para el correcto funcionamiento de cualquier empresa.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Los sistemas eléctricos de potencia se diseñan para estar el mayor tiempo libres de fallas, mediante uso de equipos especializados y diseños completos y cuidadosos, así como técnicas modernas de construcción y con el mantenimiento adecuado. Pero aun con todas las precauciones y medidas que se pudieran tomar, las fallas se presentan causadas por : sobretensiones de origen atmosférico, envejecimiento prematuro de los aislamientos, falsos contactos y / o conexiones, acumulación de polvo, presencia de elementos corrosivos, humedad, presencia de roedores, errores humanos y las llamadas causas desconocidas.

Cuando ocurre un cortocircuito, se presenta se pueden presentar las siguientes situaciones:

1. En el punto de falla se puede presentar un fenómeno de arco eléctrico o fusión de los metales mismos.
2. Las corrientes de cortocircuito, circulan de las fuentes (alimentación de la red y máquinas rotatorias) hacia el punto de falla.
3. Todas las componentes de la instalación, por donde circulan las corrientes de cortocircuito, se ven sujetas a esfuerzos térmicos y dinámicos, dichos esfuerzos varían con el cuadrado de la corriente ( $I^2$ ) y con la duración de la corriente (segundos).
4. 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 valor máximo de falla).

Por todos los disturbios que produce la ocurrencia de un cortocircuito, el lugar o zona donde se presenta la falla debe ser lo mas rápido que nuestro equipo nos lo permita aislado del resto de la instalación, y esto se consigue por medio los dispositivos de interrupción (interruptores, fusibles, etc). De hecho los dispositivos de protección deben de tener la capacidad suficiente para interrumpir la máxima corriente de cortocircuito que pueda circular durante la presencia de una falla en el punto mas próximo a esta.

El máximo valor de corriente de cortocircuito esta 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, esto se observa en la figura 1.3.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

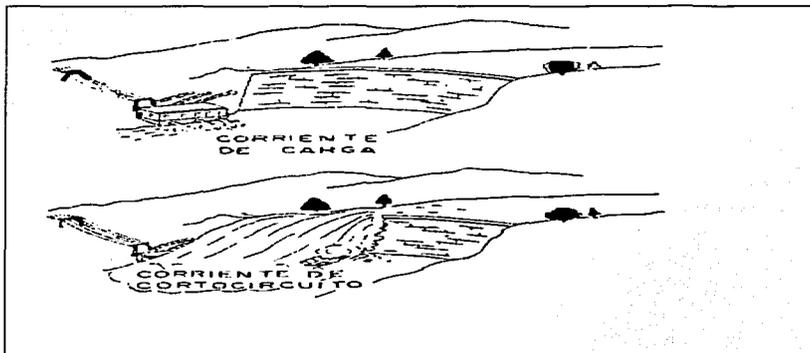


Figura 13. Representación de una corriente de cortocircuito.

### 1.5.2 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 principales fuentes de cortocircuito son las siguientes :

a) Generadores.

Los generadores eléctricos están accionados por turbinas o primo-motores, de modo que cuando ocurre un cortocircuito en el circuito alimentado por el generador, esto tiende a seguir produciendo voltaje debido a que la excitación del campo, se mantiene y el primo-motor continua accionando al generador a la velocidad normal.

El voltaje generado produce una corriente de cortocircuito de gran magnitud que circula del generador o generadores al punto de cortocircuito. El valor de esta corriente, se encuentra limitada solo por la impedancia del generador y la del cortocircuito entre el generador y el punto de falla. Si se trata de un cortocircuito en las terminales del generador, la corriente solo esta limitada por la propia impedancia de este.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### b) Motores síncronos.

Los motores síncronos, se construyen de forma similar a los generadores, ya que cuentan con un devanado de campo excitado por corriente directa y un devanado del estator por el cual circula la corriente alterna. El motor síncrono demanda corriente alterna del sistema y la transforma en energía mecánica.

Cuando se presenta el cortocircuito en el sistema, el voltaje en este se reduce a un valor muy bajo, en consecuencia el motor suspende la entrega de energía a la carga mecánica e inicia su frenado lentamente. Sin embargo la inercia de la carga y el rotor del motor accionan al motor síncrono. Entonces este se convierte en generador y entrega la corriente de cortocircuito por varios ciclos después de que el cortocircuito ha ocurrido. El valor de la corriente de cortocircuito producida por el motor depende de la impedancia del mismo y la del sistema al punto del cortocircuito.

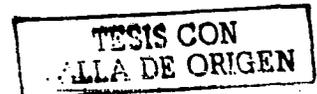
### c) Motores de inducción.

La inercia de la carga y el rotor de un motor de inducción, tiene el mismo efecto sobre un motor síncrono que sobre un motor de inducción, es decir acciona al sistema después de ocurrido un cortocircuito en el sistema. Sin embargo la diferencia entre estos radica en que el motor de inducción no cuenta con el devanado de excitación de corriente continua, pero existe flujo en el motor durante la operación normal. Este flujo actúa como el producido por el devanado de campo en corriente continua en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción es producido por la inducción del estator, en forma análoga que se proviene del devanado de corriente continua.

El flujo del rotor permanece normal en la medida en que se le aplica voltaje externamente. Sin embargo si la fuente externa de voltaje fuera removida como ocurre cuando se presenta un cortocircuito en el sistema, el flujo en el rotor no decae instantáneamente y debido a que las partes rotatorias accionan al motor de inducción, se genera un voltaje en el devanado del estator el cual produce que la corriente de cortocircuito circule hacia la falla hasta que el flujo del rotor decae y termina en cero. La corriente de cortocircuito desaparece en aproximadamente cuatro ciclos, debido a que no existe una corriente de campo sostenida en el rotor para proporcionar el flujo, como en el caso de la máquina síncrona.

El flujo no es suficiente para mantener la corriente de cortocircuito por mucho tiempo de modo que afecta solo momentáneamente el comportamiento del interruptor, ya que su capacidad de interrupción es generalmente en alrededor de dos ciclos, debido a esto el análisis de cortocircuito tomando en cuenta los motores de inducción se hace solo en algunos casos.



La magnitud de la corriente de cortocircuito producida por el motor de inducción, depende de la impedancia del propio motor y de la impedancia en el punto donde se presenta la falla. Debido a que el valor de la impedancia es similar a la impedancia a rotor bloqueado, el valor inicial de la corriente de cortocircuito, es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor.

d) Alimentación de la fuente de suministro de la red ( compañía suministradora ).

La alimentación en el Sistema de Transporte Colectivo ( Metro ), se hace por medio de una fuente externa que proporciona la compañía suministradora ( Compañía de Luz y Fuerza del Centro ), esto se hace en alta tensión y pasa a través de los transformadores de la subestación de llegada dependiendo que unidad se encuentre funcionando.

Compañía de Luz y Fuerza en el punto de conexión a la alimentación del Sistema de Transporte Colectivo representa un equivalente de Thevenin de toda la red que se encuentra detrás, por lo que es en realidad una fuente importante de contribución de la corriente de cortocircuito. Es por esto que Luz y Fuerza del Centro debe proporcionar el valor de la potencia a la corriente de cortocircuito, como el valor equivalente de la red.

El valor total de la corriente de cortocircuito en un punto de la red, es la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos con la intensidad y duración de cada caso.

En la figura 14 se observa las diferentes contribuciones que se podrían presentar en la corriente de cortocircuito :

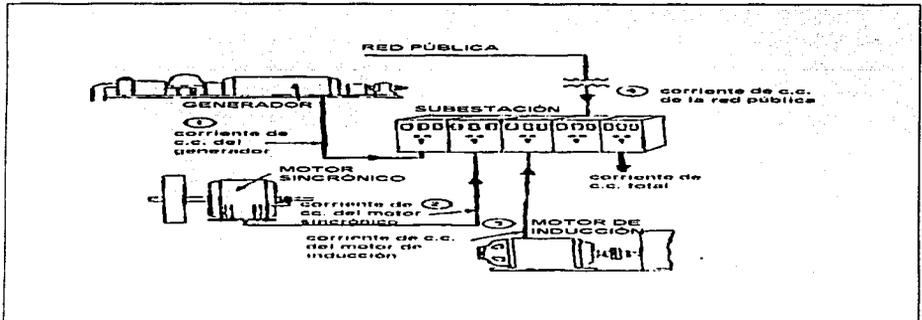


Figura 14 . Elementos que aportan corriente de cortocircuito.

TIENE CON  
FALLA DE ORIGEN

En la figura 15 se observa la forma de onda de las corrientes que aportan diferentes elementos que pueden llegar a conformar un sistema eléctrico de potencia :

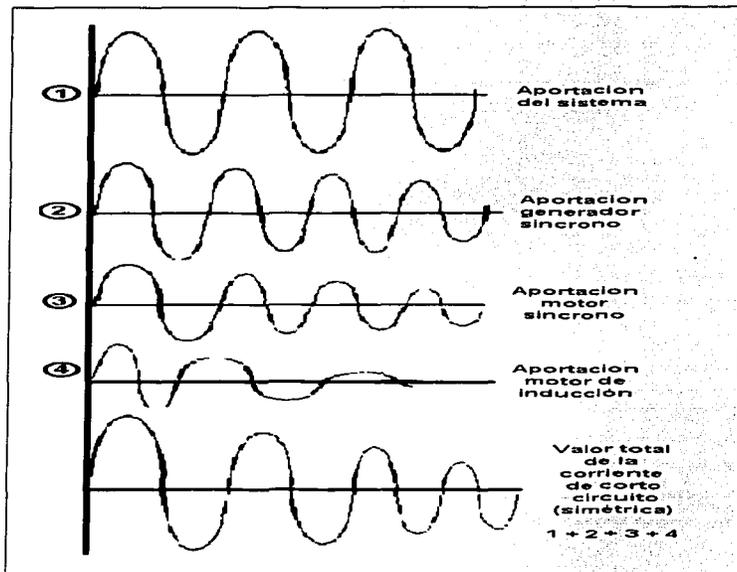


Figura 15 . Forma de onda de diferentes aportadores a la corriente de cortocircuito.

### 1.5.3 Reactancias de las maquinas rotatorias.

La impedancia de una maquina rotatoria, consiste en principio de una reactancia que no es un valor simple como en el caso de la impedancia de los transformadores o de los cables, ya que para las máquinas, es un valor completamente variable con el tiempo. Por ejemplo,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

si se aplica un cortocircuito trifásico a las terminales del generador, se observa cuando se toma un oscilograma, que se inicia con un valor alto y decae a un valor de estado estacionario, después de algún tiempo que se ha iniciado el cortocircuito. Dado el voltaje de excitación al devanado de campo, permanece un intervalo de tiempo relativamente muy corto.

Se puede usar la reactancia de las maquinas para explicar el comportamiento de la corriente de cortocircuito. Las expresiones para analizar la variación de las reactancias en cualquier instante, requieren de una formulación complicada que involucren al tiempo como una de las variables. Por ello se consideran tres valores de reactancias para generadores y motores en el calculo de cortocircuito.

a) Reactancia Subtransitoria ( $X''$ ).

Es la reactancia aparente del devanado del estator en el instante en que ocurre el cortocircuito y determina el valor de la corriente que circula durante los primeros pocos siglos después de que se presenta la falla.

b) Reactancia Transitoria ( $X'$ ).

Esta reactancia determina la corriente que sigue al periodo cuando la reactancia subtransitoria decae. La reactancia transitoria es efectiva después de uno y medio siglos, aunque esto varia con el diseño que presenta cada maquina.

c) Reactancia sincrona ( $X_s$ ).

Esta reactancia determina la corriente que circula cuando se llega a la condición de estado permanente. No es efectiva hasta después de varios segundos después de que ocurre el cortocircuito.

Cabe mencionar que los motores sincronos tienen las mismas reactancias pero con diferente valor.

#### 1.5.4 Calculo.

Cuando al observar la gráfica de una onda se nota que los picos de onda de la corriente son simétricas alrededor del eje cero se les denomina "envolventes de corriente simétrica". En cambio cuando las graficas que se observan no son simétricas alrededor del eje cero se les denomina "envolventes de corriente asimétrica". Para cualquier caso la envolvente es una línea que se traza uniendo los picos de las ondas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

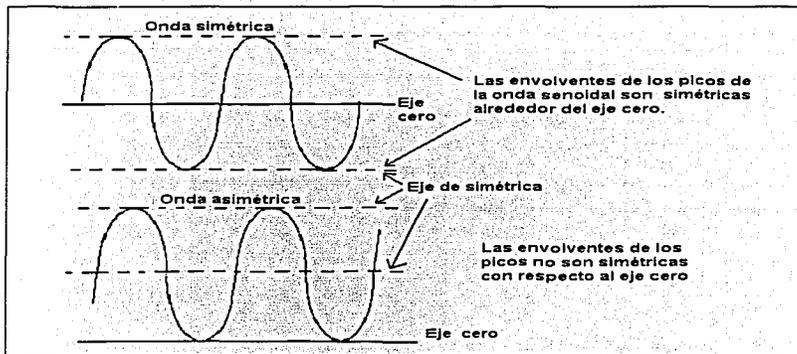


Figura 16 . Ondas simétrica y asimétrica.

La mayoría de las corrientes de corto circuito son casi siempre asimétricas durante los primeros ciclos después de la ocurrencia del corto circuito. la corriente asimétrica esta en su máximo durante el primer ciclo después que el cortocircuito ocurre y unos segundos después se vuelve simétrica.

El valor de una corriente de corto circuito se obtiene en su forma mas elemental de la ecuación básica para obtener el valor de una impedancia :

$$I = E / Z$$

Donde : E = Tensión en el sistema.

Z o X = Impedancia equivalente en el sistema que incluye a la red y las fuentes de corto circuito.

#### 1.5.4.1 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 desequilibrados de vectores, denominados de secuencia positiva, negativa y cero independientes, y se resuelve así cada una de estas redes como una red balanceada y después se regresa a la solución del problema original.

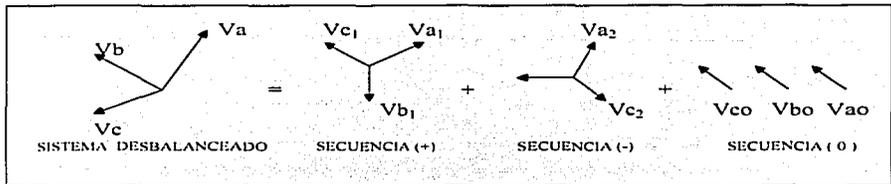


Figura 17. Representación de los vectores de secuencia.

De los vectores que aparecen en la figura 17. se observa que :

- 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 pero con diferencia de fase de  $120^\circ$  con la secuencia de fases opuesta al del 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 :

Para un sistema trifásico de voltajes se tiene :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} \end{aligned}$$

De la misma forma se obtiene un sistema trifásico para corrientes :

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{aligned}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.5.4.2 Los operadores de las componentes simétricas.

La letra **a** se utiliza generalmente para designar al operador que origina una rotación de  $120^\circ$  en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj. Este operador es un número complejo de módulo que se define como :

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j 0.866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j 0.866 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1 \\ a^4 &= 1 \angle 120^\circ = a \end{aligned}$$

Considerando el defasamiento que sufren los componentes de voltaje y de corriente de las ecuaciones obtenidas anteriormente con respecto a los componentes (+), (-) y (0) y aplicando el operador "a" en dichas ecuaciones se obtienen las relaciones siguientes:

Para voltajes :

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned}$$

Para corrientes :

$$\begin{aligned} I_{b1} &= a^2 I_{a1} & I_{c1} &= a^2 I_{a1} \\ I_{b2} &= a I_{a2} & I_{c2} &= a^2 I_{a2} \\ I_{b0} &= I_{a0} & I_{c0} &= I_{a0} \end{aligned}$$

De estos sistemas de ecuaciones se obtienen :

Para voltajes :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned}$$

Para corrientes :

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \\ I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \end{aligned}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para realizar las matrices de las ecuaciones anteriores :

Para voltajes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix}$$

Para corrientes :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix}$$

Se pueden representar los sistemas de ecuaciones anteriores en la siguiente expresión :

$$\begin{bmatrix} V_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix}$$

y realizando el despeje de  $V_{012}$ , se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ABC} \end{bmatrix}$$

Al realizar las operaciones indicadas se obtienen las siguientes matrices en las cuales se expresan los voltajes y corrientes de secuencia en función de las fases :

Voltajes :

$$\begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Para obtener las ecuaciones correspondientes se sigue el mismo procedimiento que para los voltajes y se obtiene que :

$$\begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

### 1.5.4.3 Formación de redes de secuencia para los estudios de corto circuito.

Los diagramas de secuencia son resultado de la transformación del diagrama unifilar en un diagrama llamado red de impedancias o reactivancias, según sea el caso. El diagrama de secuencia consiste en un circuito equivalente monofásico formada por las impedancias y fém's de los elementos de nuestro sistema y en los cuales existe una circulación de corriente de una secuencia en particular.

Para los estudios de corto circuito y en particular para fallas a tierra, se requiere que cada corriente de secuencia circule por una red de impedancias de la misma secuencia.

Al realizar el estudio de corto circuito se requiere de la formación de las redes :

- De secuencia positiva ( + ). Se obtiene reemplazando cada elemento del sistema por su impedancia y cada generador o motor por una fuente de voltaje en serie con su impedancia de secuencia positiva, dicha fuente de voltaje es únicamente de secuencia positiva porque estas maquinas están diseñadas para generar solamente tensiones equilibradas es decir de fase ABC, lo que quiere decir que está girando en sentido de las manecillas del reloj.
- De secuencia negativa ( - ). Se obtiene de manera similar al diagrama de secuencia positiva es decir reemplazando cada elemento por su impedancia de secuencia negativa, solo que en este caso no se representan las fuentes de voltaje, aunque el diagrama de secuencia positiva y negativa son idénticos.
- De secuencia cero ( 0 ). Para la formación de este diagrama es necesario tomar en consideración la forma en que se encuentran conectados los neutros de los elementos conectados a tierra como lo son generadores y transformadores, esto es debido a que para tener circulación de la corriente de secuencia cero debe existir un camino de retorno para completar el circuito.

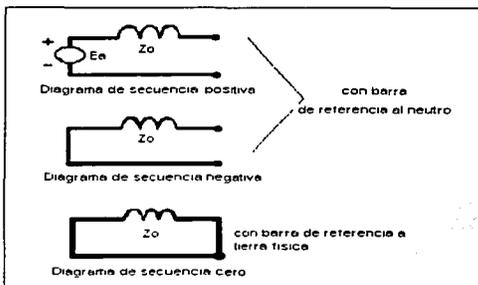


Figura 18. Barras de referencia para cada diagrama de secuencia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.5.5 Cortocircuito en sistemas de c.a.

Para el análisis de fallas en un sistema trifásico para la obtención de las componentes simétricas de corriente y de tensión entre los tres conductores del sistema se representan con las letras A, B y C, esto para cada fase; y se designa a las corrientes de un sistema equilibrado inicial como  $I_a$ ,  $I_b$  y  $I_c$ , mientras que para las tensiones de línea a tierra de la falla se designan por  $V_A$ ,  $V_B$  y  $V_C$ .

Al dibujar las redes de un sistema, cada red puede reemplazarse por su equivalente de Thevenin entre la barra considerada y el punto de falla.

#### 1.5.5.1 Falla trifásica.

En el análisis de fallas el primer paso a seguir es la obtención de las expresiones que permitan calcular las corrientes de corto circuito que se requieran en el punto de falla seleccionado.

El método de análisis general es el de componentes simétricas, un ejemplo de esto es a partir del sistema elemental que aparece en la figura 19.

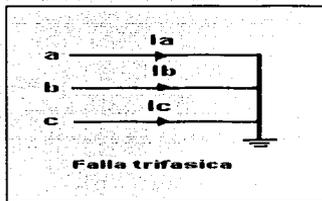


Figura 19. Falla trifásica.

La falla trifásica ya sea entre líneas o entre líneas y tierra es la falla que se presenta con menor frecuencia en sistemas eléctricos y cuando se llega a presentar es por descuidos del personal de operación. También se le conoce a la falla trifásica como falla simétrica debido a que no produce desequilibrio en el sistema, esto es que el sistema se mantiene balanceado y no se presentaron voltajes o corrientes de secuencia negativa y cero, por lo que solo se consideran las componentes de secuencia positiva (+), para un sistema

equilibrado como para una red de secuencia positiva (+) las corrientes están defasadas  $120^\circ$  en secuencia ABC. por lo que al aplicarle el operador "a" se tiene que :

$$i_b = (a^2)(i_a) \quad i_c = (a)(i_a)$$

Al sustituir estos valores en la matriz de componente de corrientes :

$$\begin{Bmatrix} i_{a0} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \end{Bmatrix} = 1/3 \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} i_a \\ a^2 * i_a \\ a^2 * i_a \end{Bmatrix}$$

Se obtiene :

$$Aa^0 = 0 \quad ia^1 = ia \quad ia^2 = 0$$

Por lo que se presentan las siguientes condiciones :

$$\begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ V_a = V_b = V_c &= 0 \end{aligned}$$

Donde se observa que :

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_f - (Z_1 - ia_1) \\ \text{pero como } V_{a1} &= V_a = 0 \end{aligned}$$

Se tiene la ecuación :

$$0 = V_f - (Z_1 - ia_1)$$

despejando se tienen :

$$130 = \frac{V_f}{Z_1}$$

La importancia de conocer la magnitud de este tipo de cortocircuito radica en que este tipo de cortocircuito nos proporciona la máxima corriente que puede producirse en el sistema en condiciones de falla, a la vez que proporciona la capacidad máxima de interrupción del interruptor, y estos valores son muy importantes para el diseño de protecciones de un sistema eléctrico de potencia.

Al determinarse el punto de falla en el sistema y habiéndose obtenido el diagrama de secuencia positiva correspondiente, se obtienen las corrientes de cortocircuito al reducir el diagrama hasta el circuito equivalente de Thevenin, el cual nos representa el circuito mostrado en la figura 20.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

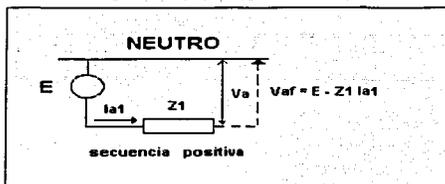


Figura 20 . Circuito representativo de la Falla Trifásica.

De aquí se obtiene la matriz  $Z_{BUS}$ , la cuál es una herramienta de solución de sistemas con falla, ya que nos facilita el manejo de sistemas en los cuales se consideran diferentes puntos de falla, o en sistemas que cuentan con un gran número de buses, además de ofrecernos rapidez en el calculo, no importando el numero de buses que se este manejando.

El circuito se analiza aplicando la Ley de nodos y se obtiene la matriz de admitancia ( $Y_{BUS}$ ), cuya matriz inversa resulta ser la matriz de impedancias ( $Z_{BUS}$ ), la principal característica de estas matrices es la de ser cuadradas, debido a que son del orden  $n \times n$ , el cual esta directamente relacionado con el número de buses o de barras del sistema que se este analizando. Debido a esto los elementos de la diagonal principal de las matrices  $Y_{BUS}$  y  $Z_{BUS}$ , son valores representativos de admitancias e impedancias respectivamente propias, mientras que los elementos fuera de esta diagonal son admitancias e impedancias mutuas.

$$\left[ Y_{BUS} \right] = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & - & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & - & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & - & Y_{3N} \\ - & - & - & - & - \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & - & Y_{NN} \end{pmatrix} \text{DIAGONAL PRINCIPAL.}$$

Y se obtiene

$$\left[ Z_{BUS} \right] = \left[ Y_{BUS} \right]^{-1}$$

Al obtener la matriz  $Z_{BUS}$  podemos conocer la corriente de cortocircuito en uno o varios de los buses o puntos de interés en el sistema analizado, usando la Ley de Ohm, y en base a la siguiente expresión :

$$I''_f = \frac{V_f}{Z_{KK}}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

donde :

$I_f$  = Representa a la corriente de falla en el punto "k" .

$V_f$  = Es el voltaje que existe antes de que se presente la falla y es de un valor de  $1.0 + j0$  p.u.

$Z_{KK}$  = Es el valor de la impedancia equivalente en el punto " f " de falla . los valores de  $Z_{KK}$  se obtienen de la diagonal principal de la matriz de impedancias (  $Z_{BUS}$  ). Los valores de  $Z_{KK}$  son el valor de la impedancia de Thevenin en el punto de falla.

### 1.5.5.2 Falla monofásica.

Este tipo de cortocircuito se produce cuando se presenta algun contacto accidental de una fase a tierra, como podría ser una falla de aislamiento en cables alimentadores, contacto accidental de una fase a tierra, etc. En la figura 21 se observa la representación de una falla monofásica.

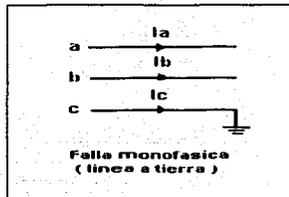


Figura 21 . Falla monofásica de línea a tierra.

Si se considera que la fase "a" se encuentra aterrizada, se tienen las siguientes condiciones de falla :

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ I_b &= I_c = 0 \end{aligned}$$

Las componentes simétricas de la corriente son :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} I_a + 0 + 0 \\ I_a + 0 + 0 \\ I_a + 0 + 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a/3 \\ I_a/3 \\ I_a/3 \end{bmatrix}$$

De las ecuaciones se observa que existen tres corrientes de secuencia positiva, negativa y cero son iguales entre si (  $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$  ). debido a esto se considera que

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$I_a = 3 I_{a0}$$

Lo que representa un sistema de tres redes conectadas en serie como se muestra en la figura 22.

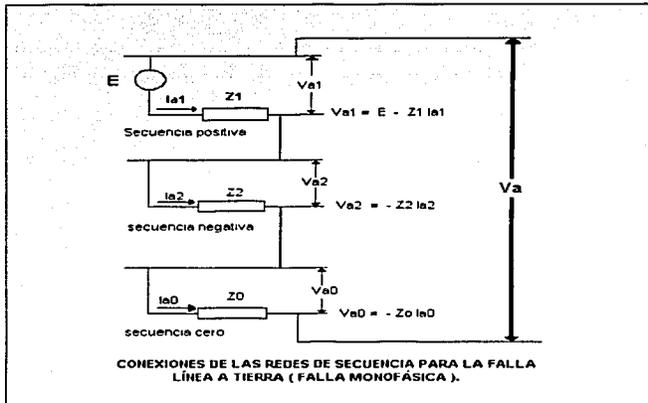


Figura 22. Circuito representativo de la Falla monofásica.

También se observa el valor del voltaje de falla :

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

Para obtener la corriente de falla se tiene que :

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

Por lo tanto :

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

Si la falla ocurre en un sistema con neutro conectado a tierra a través de la reactancia  $Z_N$ , se tendría la siguiente expresión :

$$I_f = \frac{3 V_f}{Z_1 + Z_2 + (Z_3 + 3 Z_N)}$$

**FALLA DE ORIGEN**

Los voltajes en el bus de falla son obtenidos por la expresión :

$$\boxed{[V_{F(k)}^{abc}] = [A] [V_{F(k)}^{abc}]}$$

Los voltajes de secuencia en el bus "n" debidos a una falla en el bus "k" son :

$$[V_n^{012}] = \begin{pmatrix} -Z^0_{nk} I^0_k \\ E_a - Z^1_{nk} I^1_k \\ -Z^2_{nk} I^2_k \end{pmatrix}$$

La cual también puede trabajarse como :

$$[V_n^{012}] = \frac{E_{a1}}{Z_{KK} + 2Z^1_{KK} + 3Z^0_{KK}} \begin{pmatrix} -Z^0_{nk} I^0_k \\ E_a - Z^1_{nk} I^1_k \\ -Z^2_{nk} I^2_k \end{pmatrix}$$

Mientras que para los voltajes de fase en el bus "n" y que son debidos a una falla en el bus "k" son :

$$[V_n]^{012} = V_n \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ 1 \end{pmatrix} - V_k \begin{pmatrix} Z^0_{nk} + 2Z^1_{nk} \\ Z^0_{KK} + 2Z^1_{KK} + 3Z^0_{KK} \\ Z^0_{nk} - Z^1_{nk} \\ Z^0_{KK} + 2Z^1_{KK} + 3Z^0_{KK} \\ Z^0_{nk} - Z^1_{nk} \\ Z^0_{KK} + 2Z^1_{KK} + 3Z^0_{KK} \end{pmatrix}$$

o en su forma general es :

$$[V_n^{abc}] = [A] [V_n^{012}]$$

### 1.5.6 Cortocircuito en sistemas de corriente continua.

El análisis de cortocircuito en sistemas de corriente continua es similar al realizado en sistemas de corriente alterna (c.a.). las fuentes de cortocircuito están dadas por rectificadores, baterías, celdas electrolíticas y convertidores síncronos, mientras que entre los limitadores de dicha frecuencia se encuentran las resistencias e inductancias de los elementos del sistema.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Uno de los métodos de análisis para este tipo de cortocircuito consiste en analizar por separado cada una de las fuentes suministradoras de la corriente de cortocircuito y construir su respectiva curva de corriente vs tiempo y finalmente realizar una curva con el concentrado de los valores obtenidos por separado para realizar una suma grafica, que nos proporcione el valor total de la corriente de cortocircuito del sistema analizado. Cabe mencionar que este tipo de análisis es muy utilizado cuando se consideran valores demasiado pequeños de resistencia e inductancia de los buses de un sistema eléctrico.

El comportamiento de un cortocircuito en sistemas de corriente continua y corriente alterna es similar. Cuando se presenta una falla, la aportación de cada fuente del sistema es la circulación de corriente hacia el punto donde se localiza la falla, por esto se hace necesario observar los efectos de las fuentes sobre la corriente de falla, esto se realiza con la ayuda de dos diagramas del sistema :

a) Diagrama de resistencia. Es utilizado para encontrar la corriente máxima de cortocircuito en cualquier punto del sistema. Este diagrama se realiza de forma similar a los diagramas de reactivancias, es decir las resistencias pueden ser combinadas en serie o en paralelo hasta obtener un sistema resistivo equivalente del sistema.

La expresión para calcular la máxima corriente de falla es :

$$I_T = \frac{E}{R_{cq}}$$

Donde :

E : Es el voltaje del sistema.

$R_{cq}$  : Es la resistencia equivalente del circuito.

$I_T$  : Es la corriente máxima total del circuito.

b) Diagrama de inductancias. Tiene como finalidad el obtener el incremento inicial de la corriente total de falla  $di_T/dt$  y que esta determinada por la expresión :

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{E}{L_{cq}} = \text{razón de incremento de la corriente}$$

Cuando podemos obtener tanto el diagrama de resistencias como el de inductancias se puede obtener una curva representativa que muestre el comportamiento de la corriente de falla como la que se muestra en la figura 23.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

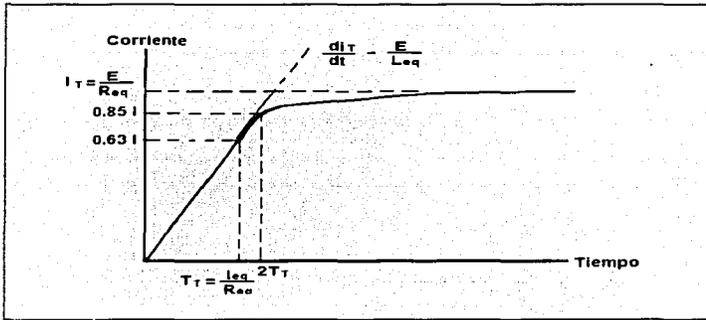


Figura 23 . Curva característica de cortocircuito en c.c.

Donde se observa que el valor de la Constante de Tiempo  $T_T$  inmediatamente después de la falla es igual al 63 % del valor de la máxima corriente de cortocircuito, mientras que cuando se tiene dos veces la constante de tiempo, se tiene un valor aproximado del 81 % del máximo valor de la corriente de cortocircuito.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **CAPITULO 2. ALIMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN 23 KVA Y 15 KVA EN LA LINEA 3 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO "METRO".**

### **2.1 Interconexión del sistema eléctrico nacional.**

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene dividida eléctricamente la Republica Mexicana en ocho zonas de operación, de las cuales, seis están interconectadas entre si para efectos de compensación por falta de suministro o capacidad de alguna de estas zonas y las dos restantes operan al margen de las primeras.

Éstas zonas se enlistan a continuación :

ZONA	UBICACIÓN DE SU CENTRO DE CONTROL
NOROESTE	HERMOSILLO, SON.
NORTE	GÓMEZ PALACIO, DGO.
NORESTE	MONTERREY, N.L.
OCCIDENTE	GUADALAJARA, JAL.
CENTRO	MÉXICO, D.F.
ORIENTE	PUEBLA, PUE.
PENINSULAR	MÉRIDA, YUC.
MEXICALI	MEXICALI, B.C.N. Y LA PAZ B.C.S.

La zona centro es la encargada de suministrar la energía eléctrica al Valle de México, esta zona está constituida por dos anillos que se denominan : Anillo exterior en 230 kV. y Anillo interior en 85 kV., es de este último donde se alimentan las subestaciones de Nonoalco y Jamaica, de las cuáles toma su alimentación la subestación 85 / 15 kV. de Buen Tono ubicada en el Edificio de P.C.C. I - (Puesto Central de Control) del Sistema de Transporte Colectivo "Metro".

### **2.2 Sistema centralizado de distribución eléctrica en el S.T.C. en 85 / 15 kV. en líneas 1, 2 y 3.**

La energía eléctrica utilizada por la red del STC para las Líneas 1, 2 y 3 es suministrada en forma de corriente trifásica en 85 kV. a 60 ciclos / segundo, por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro a la estación de alta tensión de Buen Tono (P.C.C. I).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La energía eléctrica se recibe de las Compañía de Luz y fuerza del Centro, a partir de las subestaciones Nonoalco y Jamaica, las cuales se encuentran diametralmente opuestas y forman parte del anillo de 85 kV, que rodea al Distrito Federal. Se utilizan 2 cables subterráneos armados cada uno dentro de un tubo de acero con aceite a presión y aislamiento de papel impregnado, con calibre de 800 MCM y capacidad de 100 MVA. El aceite a presión sobre el cable y dentro del tubo esta controlado por dos estaciones de bombeo de aceite en las cabeceras del cable, una en P.C.C. 1 independiente para cada cable, así como una en la S.E. Nonoalco y otra en la S.E. Jamaica. Dicho aceite se utiliza en los cables además de sus propiedades aislantes, como refrigerante del cable al hacerse circular de una estación de bombeo a otra. Estos cables cuentan también con una protección catódica la cual evita la corrosión y el deterioro del tubo de acero así como un hilo piloto que corre de extremo a extremo del tubo y sirve para detectar cualquier falla en el cable o deterioro del mismo, esto se muestra en la figura 24.

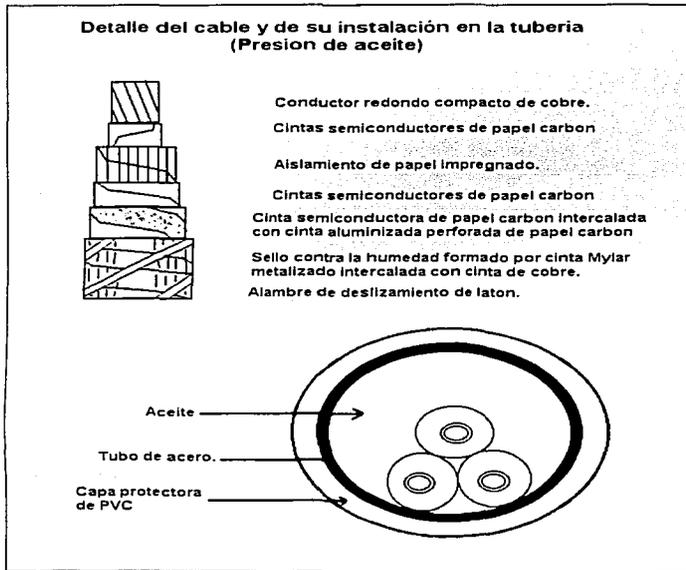


Figura 24 . Características del cable de 85 kV

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Las subestaciones lado "A" y lado "B" cuentan con un interruptor alimentador denominado "A85" y "B85" respectivamente para cada una de ellas, los cuales tienen la capacidad de aislar la llegada de alimentación de 230 kV.

### 2.2.1 Sistema Centralizado de distribución en 85 kV.

La subestación de transformación Buen Tono instalada dentro del edificio P.C.C. I, consta de dos subestaciones reductoras idénticas las cuales están instaladas en forma simétrica y diametralmente opuestas dentro del Edificio del P.C.C. I y son denominadas "A" y "B" respectivamente. Aquí se reduce la tensión de 85 kV a 15 kV. El equipo de 85 kV, de que esta integrada cada una de ellas se encuentra instalado en cinco cámaras de seguridad con protección contra incendio diametralmente opuestas unas contra otras.

Se le denomina subestación del lado "A" a la que es alimentada por la Subestación Jamaica y subestación lado "B" a la que es alimentada por la Subestación Nonoalco.

Su forma de ubicación tiene como finalidad el disminuir la posibilidad de que, por algún incidente, el S.T.C. quede sin alimentación eléctrica

Los Transformadores de la S.E. Buen Tono alimentan a 6 buses, de los cuales 4 son de tracción y 2 son de alumbrado. De los buses de tracción se alimentan las Subestaciones de Rectificación (SR), que finalmente proporcionaran energía a los trenes, mientras que de los buses de alumbrado y fuerza (Subestaciones de Alumbrado y Fuerza, SAF's), se energizaran las estaciones talleres y edificios. Cada uno de estos cables esta protegido por un interruptor automático denominado DHT.

El diagrama unifilar del sistema Centralizado de Distribución se muestra en la siguiente figura 25 donde se observa el sistema centralizado de alimentación a subestaciones de Rectificación del S.T.C. METRO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DIAGRAMA NO. 1 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL STC-M

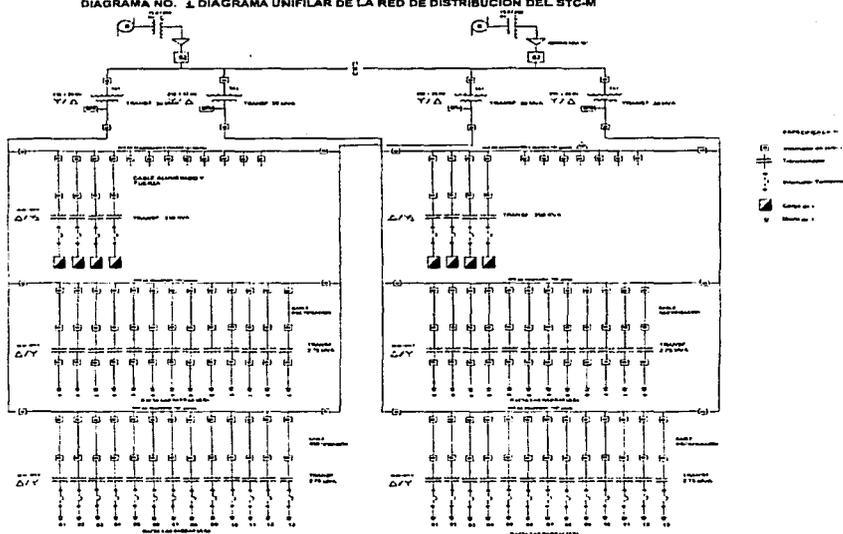


Figura 25 . Sistema centralizado de distribución de 85 / 15 kV en el S.T.C.

### 2.2.2 Protecciones en el Sistema Centralizado de 85 kV.

a) Disyuntor de Alta Tensión (DHT).

Tiene como finalidad proteger las subestaciones A y B de un posible cortocircuito presentado en las Subestaciones de Rectificación (SR's) o en las Subestaciones de Alumbrado y Fuerza (SAF's) . Existe un DHT para cada cable de alimentación a una SR y para cable de alimentación a las SAF (4 por línea).

b) Enlace entre subestaciones A y B.

Cuando por algún incidente uno de los cables de 85 kV.. se quedara sin alimentación. las subestaciones A y B podrían ser alimentadas por un solo cable mediante el cierre del

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Seccionador Rotativo Medio (SRM). En este caso la capacidad de corriente en las líneas disminuye, por lo que se toman medidas para reducir el consumo de corriente, hasta que se normalice el cable averiado o se haya resuelto la falla que se hubiera presentado.

### 2.3 Alimentación a Subestaciones de Rectificación (SR's) en 15 kV. en Línea 3.

La alimentación a las Subestaciones de Alumbrado y Fuerza (SAF's) en las línea 3, se lleva a cabo mediante 4 cables de 15 kV. que salen del P.C.C. 1 y van hacia cada uno de los extremos alimentando a las subestaciones, uno por Vía 1 y el otra por Vía 2, como se muestra en la figura 26

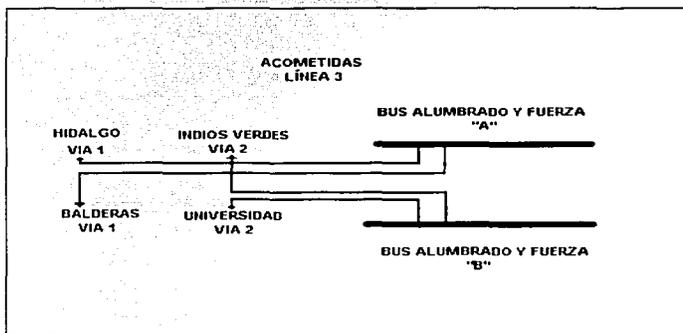


Figura 26 . Alimentación a subestaciones de rectificación en Línea 3.

En algunos circuitos alimentados a esta tensión, se cuenta con enlaces en las extremos de la línea, cerrando el anillo, utilizando las secciones 2 de las subestaciones de los extremos por ejemplo : Talleres Taxqueña, Taller de Mantenimiento Mayor Ticomán, etc.

En cada estación de pasajeros se tienen 2 Subestaciones para el Alumbrado y Fuerza, cuya finalidad es transformar los 15 o 23 KV, según sea el caso, en 220 y 127 V.C.A., que alimentan a los diferentes circuitos eléctricos para los servicios preferenciales y auxiliares de las estaciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.3.1 Subestaciones en 15 kV. en talleres y edificios de apoyo (SAF's).

La alimentación a los talleres y edificios de apoyo se efectúa de la siguiente manera : Alimentación en 15 kV. desde la Subestación Buen Tono del P.C.C. I .

- Edificio PCC-I.
- Edificio PCC-II.
- Edificio Administrativo.
- Edificio de INCADE.
- Talleres Zaragoza.
- Taller de Mantenimiento menor Ticomán.
- Talleres Taxqueña.

NOTA : Para la alimentación del Garage localizado en la Estación Terminal Universidad se tiene una acometida trifásica en 220 VCA, 4 hilos, directamente de la red de distribución de LFC.

En cada una de las estaciones del STC se tienen dos subestaciones, una por Vía, cada una de ellas comprende a los siguientes componentes :

a) Seccionador de llegada (gabinete 320); el cual permite aislar o alimentar a la subestación correspondiente.

b) Un interruptor paso de anillo (gabinete 321); que tiene como finalidad permitir el aislamiento o la alimentación de las SAF's de las estaciones siguientes por la misma Vía.

c) Un interruptor de protección al transformador (gabinete 322); así como su protección contra sobrecorriente por medio de 3 fusibles.

d) Un transformador con una relación de transformación de 15 o 23 kV a 220-127 V (gabinete 154); con la finalidad de alimentar al interruptor de baja tensión.

e) Un Interruptor de baja tensión (gabinete 607), el cual permite aislar o alimentar los tableros de distribución A o B según sea el caso, así como la de proteger al transformador de la subestación de sobrecarga o cortocircuitos.

f) Cabinas o tablero de distribución N11-N2 o A-B. Tienen como finalidad el permitir el aislamiento o la alimentación, así como proteger de sobrecorriente a los diversos equipos que alimenta.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de una Subestación Tipo de Alumbrado y Fuerza del STC, en la figura 27, se observan los elementos que la componen.

**TRECE CON  
FALLA DE ORIGEN**

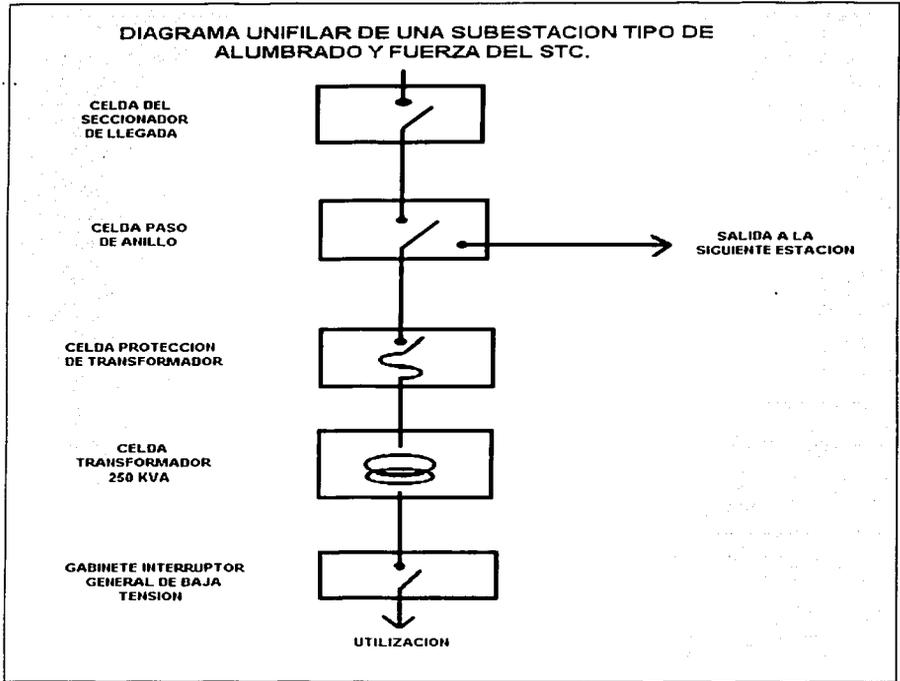


Figura 27 . Diagrama unifilar tipo de una SAF.

### 2.3.1.1 Generalidades de las SAF's.

Las subestaciones para Alumbrado y Fuerza en el STC, han sido diseñadas y construidas para operar bajo las siguientes condiciones de servicio :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

• Temperatura ambiente máxima	40 °C
• Temperatura ambiente mínima	- 4 °C
• Temperatura ambiente promedio	18 °C
• Presión barométrica	285 mm de Hg.
• Humedad relativa	30 %
• Precipitación pluvial promedio anual	1500 mm.
• Altitud	2240 M.S.N.M.
• Sismo (aceleración)	0.15 g.

### 2.3.1.2 Equipos alimentados por las SAF's.

Siendo las Subestaciones de origen Frances las primeras que fueron instaladas en el STC, en aquel tiempo se decidió llamar a los Tableros de Distribución como Cabinas. Actualmente dado que las nuevas subestaciones son de fabricación nacional, se les conoce como Tableros de Distribución.

#### a) Tablero de Distribución o Cabina N o A/B.

Existe una por cada subestación en todas las estaciones excepto en un tramo de la Línea 2, donde se tienen solo por Vía 1. Para el caso de las ampliaciones, las cabinas N se denominan tableros A y B, para Vía 1 y 2 respectivamente.

Una cabina N, que contiene interruptores termomagnéticos de 4 polos y 2 distintas capacidades, 250 y 125 amperes. De la cabina N se alimenta por cada Vía :

- La cabina P.
- Escaleras mecánicas.
- Centro de Control de Motores para Bombeo (CCM).
- Ventilación y extracción de aire.
- Instalaciones importantes de propaganda.
- Contactos monofásicos y trifásicos.
- Alimentación de alumbrado del tunel.
- Tableros "W".
- Alumbrado normal en la Estación.

#### b) Tablero de distribución P.

Se encuentra instalado en cada una de las Estaciones y Talleres del STC, tomando su alimentación de los Tableros de Distribución "A" y "B", a través de interruptores

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

termomagnéticos y cuentan con un equipo de transferencia automática, que permite bascular de una alimentación a otra cuando la alimentación preferente no esta presente.

Su finalidad es la de alimentar los circuitos prioritarios de la estación o área cercana de la misma, como :

- Equipos de instalación.
- Equipos de telemando.
- Equipos de torniquetes.
- Alumbrado de la SR mas cercana.
- Sonorización.
- Alumbrado preferencial de la Estación.
- Alumbrado de emergencia (baterías).
- Equipos de tracción mas cercanos.
- Motores de aparatos de Vías.

#### **2.4 Sistema Descentralizado o radial en Línea 3.**

Cuando en lugar de partir de una subestación, se tienen acometidas de Compañía de Luz y Fuerza (LFC), distribuidas a lo largo de la línea del S.T.C. en 23 kV., se llega a lo que se denomina un sistema descentralizado. Esto se observa en la siguiente figura :

El suministro se hace por medio de dos alimentadores o cables que provienen de dos subestaciones de LFC, las cuales se encuentran cercanas a las subestaciones del STC.

##### **2.4.1 Sistema de alimentación en 23 kV,**

La alimentación eléctrica de 23 kV para el STC se utiliza en cada una de las SR's ubicadas de la Estación del Metro Zapata hasta la terminal Universidad en la Línea 3, esto debido a la ampliación de esta Línea del STC.

A la estructura de suministro se le conoce como primario selectivo y consiste en una doble alimentación para asegurar la continuidad de alimentación eléctrica.

Esta operación es a base de derivación de circuitos independientes entre si, el primero es conocido como alimentador Preferente (P) y el segundo como alimentador Emergente (E), y así asegurar el suministro de energía en caso de falla en algunos de los dos circuitos alimentadores.



Esto debido a que si por alguna razón quedara fuera de servicio alguna alimentación, este sistema cuenta con un interruptor de transferencia automática, que se encarga de efectuar el cambio de alimentación de Preferente (P) a Emergente (E) y viceversa. Cabe mencionar que este equipo de transferencia cuenta con un mecanismo que le impide la operación en paralelo de los dos alimentadores.

A partir de este tipo de alimentación se energizaran los circuitos de :

- Alumbrado y Fuerza.
- Tracción.

Esto será a través de un interruptor de mediana tensión, conocido como DMT, que es de 23 kV, en pequeño volumen de aceite y con capacidad de 400 amperes.

#### **2.4.1.1 Interruptores de 23 kV, distribuidores de Alumbrado y Fuerza.**

Estos interruptores cuentan con protecciones para :

- Cortocircuito.
- Cable a tierra.

Su alimentación es de una línea con dos cabeceras y cada una alimenta una vía. Pero cada cabecera cuenta con dos interruptores, uno se utiliza en servicio normal y el otro opera sólo en casos de emergencia. Donde únicamente será posible conectar los dos interruptores cuando :

a) Falta alimentación de 23 kV, en una cabecera.

b) Por falta en uno de los cables distribuidores de las subestaciones de alumbrado y fuerza, una vez que está ha sido aislada en su tramo dañado.

Estas maniobras sólo pueden ejecutarse condicionadas a mecanismos de bloqueo que impiden la conexión en paralelo de las alimentaciones.

En la figura 28 se observa este tipo de alimentación y distribución de cabeceras de alumbrado y fuerza de 23 kV.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 2.4.1.2 Alimentación en 23 kV. a Subestaciones de Rectificación (SR's).

Esta alimentación es igual a las de Alumbrado y Fuerza de 23 kV, siendo su operación a base de dos alimentaciones, una emergente y otra preferente con interruptor de transferencia automática. Estos circuitos alimentadores son provenientes de las subestaciones de Compañía de Luz y Fuerza del Centro, que pueden ser de diferentes subestaciones o de una sola, pero de bancos de transformación diferente. Por lo que el interruptor de transferencia, se caracteriza por tener un mecanismo que impide la operación en paralelo de los dos alimentadores, esto se observa en la figura 28

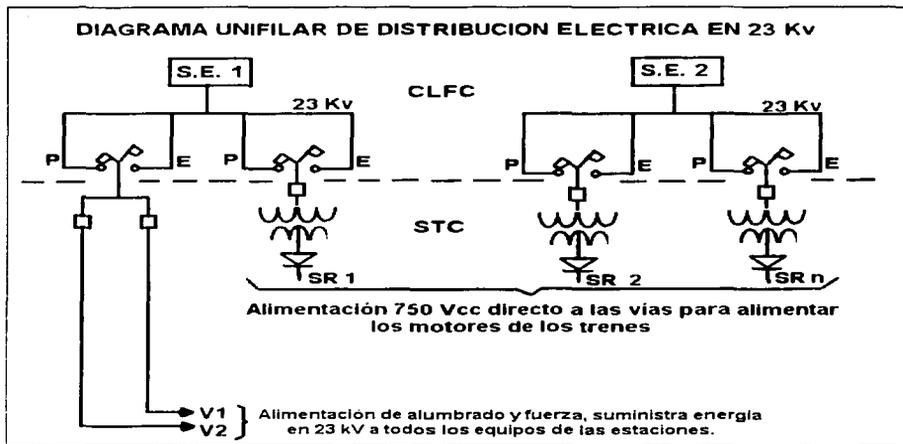


Figura 28. Alimentación eléctrica en 23 kV.

Las Subestaciones están compuestas de los siguientes equipos :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

a) Transformador de auxiliares. Es el encargado de alimentar los circuitos de control y protección, así como todos aquellos elementos que requieran una tensión de 220 volts de corriente alterna o menor.

b) Interruptor de potencia (DMT). Estos existen en aceite, aire o gas, y es el encargado de darle continuidad a la alimentación, así como protección a corrientes de cortocircuito.

c) Transformador principal. Es el que opera en 23 kV., es de tres devanados, uno en el primario conectado en delta y dos en el secundario, que es delta - estrella de 23 kV. / 570 Volts, y sirve para alimentar al grupo rectificador.

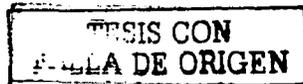
d) Block rectificador. Esta compuesto por dos puentes trifásicos de diodos de silicio y conectados en paralelo, unidos del lado positivo por una bobina de equilibrio.

e) Bobina de equilibrio. Esta conectada a la salida positiva del grupo rectificador, tiene la función de eliminar el rizo de la componente de corriente alterna.

f) Interruptor ultrarrápido (DUR). Esta ubicado a la salida de la bobina de equilibrio e interrumpe o restablece la continuidad de corriente continua, y protege en caso de existir un cortocircuito a nivel de vías.

g) Seccionadores. Estos positivos o negativos, conectan o aíslan la subestación de la carga.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de alimentación a subestaciones de 23 kV.



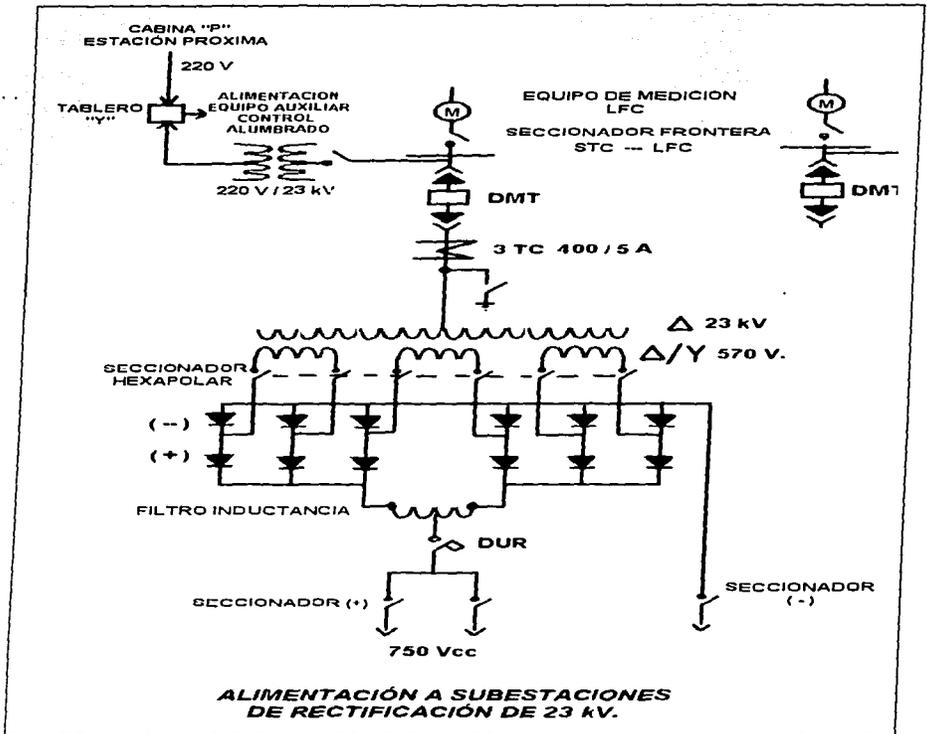


Figura 29. Diagrama unifilar de una SR de 23 kV.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.4.1.3 Equipos utilizados en la distribución en 750 Vcc en Línea 3.

a) Contactor de seccionamiento (CS). Este contactor tiene como función la de aislar o lograr la continuidad eléctrica entre dos zonas, esta integrado a las subestaciones rectificadoras (SR'S) que se encuentran ubicadas en las fronteras de las zonas.

Sus características son las siguientes :

Tensión nominal : 1000 volts corriente continua.

Capacidad nominal : 4000 Amperes.

Mando normal y forzado desde el Tablero de control optico (TCO) del Puesto Central de Control (PCC).

Cuenta con dos relevadores de presencia de tensión que envían la señal de las zonas energizadas al PCC.

Este contactor abre automáticamente por las siguientes causas :

- Ausencia de tensión, en cualquiera de las zonas adyacentes de 750 Vcc.
- Incidente en línea.
- Señal de mando centralizado (MC)
- Accionamiento de ruptor.

En el TCO se tiene un conmutador que señala la posición de este equipo es de la siguiente forma :

Lámpara encendida : CS abierto.

Lámpara apagada : CS cerrado.

b) Seccionador de aislamiento de telemando (SIT o SAT). Este seccionador se utiliza para aislar o dar continuidad eléctrica entre dos secciones adyacentes, se encuentra instalado en nichos dentro del tunel.

Sus características son las siguientes :

Corriente nominal : 4000 en SR's de 15 kV y 6000 amperes en ampliaciones de Línea 3.

Tensión nominal : 1000 volts

Mando local eléctrico.

Mando local manual.

Tensión de operación de su circuito de control 220 VCA.

Tensión de los relevadores de telemando 120 VCC.

Condiciones de operación del SIT :

Cierre. Puede efectuarse por mando a distancia y mando local eléctrico con presencia de tensión pero sin carga y puede cerrar por mando local manual siempre y cuando no haya tensión en 750

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

VCC en las vías. Un circuito de seguridad bloquea el acceso al gabinete donde se encuentra la manivela de mando local manual, cuando hay tensión en vías.

Apertura. Puede lograrse por mando local a distancia, local eléctrico y local manual; esto debe realizarse siempre y cuando no exista tensión en vías. Un circuito de seguridad impide que esta maniobra se lleve a cabo cuando existe tensión en las vías.

En el tablero del TCO correspondiente existe un conmutador con una lámpara integrada que indica la posición de este equipo : encendida (en apertura) y apagada (al cierre).

c) Contactor tramo de protección (CTP). Este equipo es utilizado para alimentar en 750 VCC o aislar al tramo de protección en las fronteras de dos zonas adyacentes.

Sus características son las siguientes :

Corriente nominal : 800 amperes.

Tensión nominal : 1000 VCC.

Tensión de su circuito de control : 127 VCA en SR's de 15 KV y 220 VCA en ampliaciones de Línea.

Existe un CTP por cada vía donde existe un tramo de protección y en el TCO hay instaladas lámparas que indican :

Lámpara encendida : CTP abierto.

Lámpara apagada : CTP cerrado.

Su funcionamiento depende directamente del funcionamiento del CS correspondiente.

e) Seccionadores sencillos.

Corriente nominal : 4000 amperes.

Tensión nominal : 1000 VCC . operación manual sin carga.

f) Seccionadores dobles.

Corriente nominal : 1500 amperes.

Tensión nominal : 1000 VCC . operación manual sin carga

#### 2.1.4.4 División eléctrica en Línea 3.

Esta zona se divide eléctricamente en 8 zonas y 14 secciones, las cuales se describen a continuación :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Zona A. Esta zona comprende del CS Basílica a la Estación terminal Indios Verdes, esta zona a la vez constituye la sección 1 y normalmente es alimentada por la SR Indios Verdes y la SR Basílica, cuyo CS sirve de límite con la zona B.

Zona B. Esta zona se divide en dos secciones que son la 2 y 3, división que se logra por el SIT Potrero. La sección 2 carece de SR alimentadora, la sección 3 normalmente se alimenta por la SR Potrero y la SR La Raza. Esta zona esta limitada por el CS Basílica y el CS La Raza.

Zona C. Esta zona se divide en dos secciones, que son la 4 y 5, divididas estas por el SIT Hidalgo. La sección 4 es alimentada normalmente por la SR Tlatelolco y la SR Guerrero y la sección 5 que normalmente se alimenta por la SR Hidalgo. Esta zona esta limitada por el CS La Raza y el CS Juárez.

Zona D. Esta zona esta dividida en tres secciones que son las secciones 6, 7 y 8, divididas estas por el SIT Niños Heroes y el SIT Hospital General respectivamente. La sección 6 es alimentada normalmente por las SR Juárez y Niños Heroes, la sección 7 se alimenta por la SR Hospital General y la sección 8 carece de SR alimentadora, esta zona es limitada por el CS Juárez y por el CS Centro Medico.

Zona E. Esta zona a la vez es la sección 9 y en el situación normal se alimenta por las SR's Centro Medico y Etiopia, esta limitada por el CS Centro Medico y el CS División del Norte.

Zona F. Esta zona se divide en dos secciones que son la 10 y 11, divididas por el SIT Zapata. La sección 10 se alimenta de forma normal por las SR's División del Norte y Zapata, y la sección 11 por la SR Coyoacán. Se limita esta zona por los CS División del Norte y Coyoacán.

Zona G. Esta zona se divide en dos secciones que son la 12 y 13, divididas por el SIT Coyoacán. La sección 12 no tiene SR alimentadora y la sección 13 se alimenta por las SR's Viveros y Miguel Ángel de Quevedo. Los CS que limitan esta zona son Coyoacán y Miguel Ángel de Quevedo.

Zona H. Esta zona comprende el CS Miguel Ángel de Quevedo a la Terminal Universidad, a la vez constituye la sección 14 y se alimenta en forma normal por las SR's Copileo y Universidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.4.2 Subestaciones de rectificación de 15 kV.

Las subestaciones de rectificación son las encargadas de transformar la corriente alterna de 15 kV. a corriente continua en 750 volts., que es la tensión con que se alimentan las barras guías, de donde toman la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento los motores de los trenes.

Estas subestaciones se alimentan de los cuatro buses de tracción de la subestación Buen Tono por medio de interruptores de 15 kV (DHT), a través de cables trifásicos armados de 15 kV., este cable cuenta con un hilopiloto que asegura la señalización y el telemando de la S.R. desde el Tablero de Distribución del Puesto de Despacho de Carga (PDC). desde son controladas y operadas a distancia.

Los grupos que componen una Subestación de rectificación son :

a) Gabinete Seccionador o interseccionador.

En este compartimiento se encuentra instalada una mufa terminal del cable alimentador de 15 kV., un seccionador tripolar cuya función es la de aislar la Subestación de Rectificación con respecto al cable alimentador.

Dentro de este módulo se encuentra instalado el transformador de servicios auxiliares cuya relación de transformación es 15 kV/220 VCA. este transformador suministra la energía eléctrica a todos los circuitos auxiliares de la propia subestación.

Estas subestaciones son de capacidad de 4000 kW con transformador de 30 kVA.

b) Grupo Transformador Principal.

En este modulo se encuentra instalado el transformador principal cuya función es de reducir el voltaje de 15 kV a 571 VCA.

Las características de un transformador de una SR de 4000 kW. son :

- Capacidad nominal : 4515 KVA.
- Conexión : Delta – Delta – Estrella.
- Relación de transformación : 15 kV / 571 VCA.
- Enfriamiento : Aire natural.
- Aislamiento : Tipo seco.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Estos transformadores cuentan con un seccionador hexapolar cuya función es la de conectar la tensión de salida del secundario del transformador con el block rectificador.

#### c) Grupo Rectificador.

Este grupo es el que se encarga de rectificar la tensión de salida del secundario del transformador principal en corriente continua de 750 volts, la cuál es suministrada a las barras guías.

Esta constituido por :

- Un rectificador dodecafásico de 36 diodos de silicio montados en dos puentes conectados en paralelo.
- Una bobina de equilibrio. Esta bobina cuenta con aislamiento tipo seco clase B y enfriamiento natural, se encuentra conectada a la salida del rectificador dodecafásico y tiene como finalidad corregir el rizo que se obtiene de la corriente rectificada, haciendo más lineal su señal de salida.
- Disyuntor Ultra Rapido (DUR). Este interruptor protege al grupo rectificador de las sobrecargas o cortocircuitos que se producen en la línea y permite la alimentación desde el grupo rectificador a las barras guías a través del seccionador de 5000 amperes. La capacidad de este interruptor es de 5000 amp., y una tensión máxima de 1800 volts y cuenta con dispositivos que ligan entre si todas las subestaciones rectificadores de una determinada zona, con el fin de que en el momento en que uno de ellos opera en su apertura debido a un cortocircuito o una sobrecorriente en línea, se efectúa esta misma operación en todos los demás DUR's de las subestaciones de rectificación de dicha zona. El DUR abre por : apertura del DHT correspondiente, sobrecarga o incidente en línea. El cierre se efectúa cuando el DHT correspondiente se cierra, este DUR tiene un rango de calibración de 0-15 K.A.
- Cuchillas seccionadoras de 5000 amperes. Estos seccionadores tienen como finalidad principal la de aislar la SR con respecto a las barras guías (+) y los rieles (-).

#### d) Gabinete de Control.

Este gabinete contiene todos los relevadores auxiliares y de protección del block rectificador y sus auxiliares, un amperímetro de escala de 0 - 12 KA, y un voltmetro cuya escala es de 0 - 1000 volts.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### c) Grupo ventilador.

La función del ventilador es la de proporcionar el flujo de aire a través de una cámara para enfriar al transformador principal y al block rectificador a fin de mantenerlos a una temperatura adecuada, para esto cuenta con dos velocidades de rotación las cuáles su funcionamiento depende de la temperatura a que se encuentre el block rectificador o la corriente que circula por el transformador principal. Este grupo tiene una capacidad de enfriamiento de  $11 \text{ m}^3/\text{segundo}$ .

#### 2.4.2.1 Tipos de alimentación de las Subestaciones de Rectificación.

Existen dos tipos de alimentación por medio de subestaciones de rectificación, las cuales son los siguientes :

a) Subestación de alimentación con "T". Son aquellas que alimentan en forma directa a través de los seccionadores de 5000 amperes a las barras guías y los riles negativos. En la figura se muestra el diagrama de este tipo de subestación.

b) Subestación de alimentación con "CS". Son aquellas que se encuentran ubicadas en las fronteras de zonas adyacentes y cuentan con un contactor de seccionamiento (CS), cuya función es la de establecer la continuidad eléctrica entre las dos zonas.

#### 2.4.2.2 Subestación ALSTHOM Tipo Normablock.

Elementos principales :

Las subestaciones francesas tipo Normablock, se encuentran divididas en secciones con acceso por medio de bloqueos y de maniobras, que evitan que personal ajeno a ellas las manipulen y puedan recibir un choque eléctrico de las partes portadoras de la energía.

Las secciones en las que se encuentran divididas estas subestaciones son :

1. Sección 1 "Llegada seccionador" (gabinete 320).
2. Sección 2 "salida interruptor" (gabinete 321).
3. Sección 3 "Protección de Transformador" (gabinete 322).
4. Sección 4 "Transformador" (gabinete 154).
5. Sección 5. "Interruptor general de Baja Tensión" (gabinete 607).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En la figura 30 se muestra el diagrama unifilar de una subestación ALSTHOM tipo Normablock de alumbrado y fuerza.

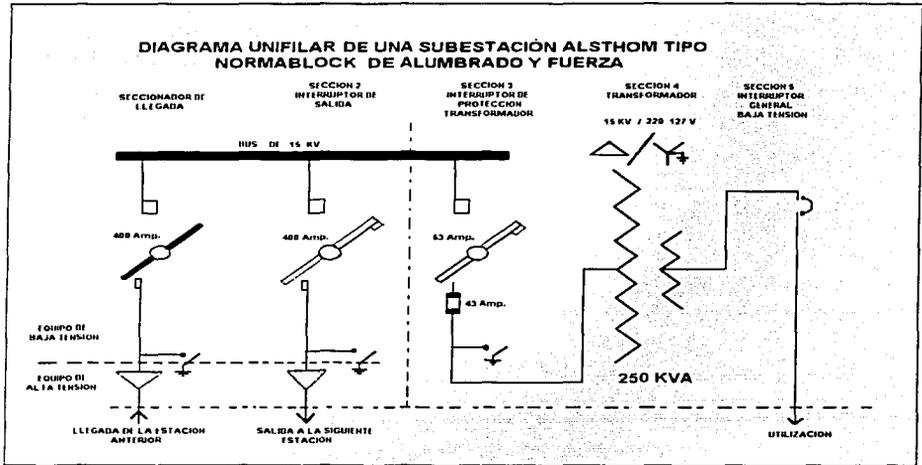


Figura 30 . Diagrama unifilar de una subestación Alsthom .

Dichas subestaciones son de tipo blindado, de acuerdo a su construcción, así como receptoras y reductoras en cuanto a su servicio. Estas subestaciones de 250 KVA se encuentran localizadas en cada estación de la Línea 3 de la Estación Hospital General hasta la Estación Tlatelolco.

A continuación se muestra en la figura 31 una vista de los gabinetes que alojan a este tipo de subestación:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

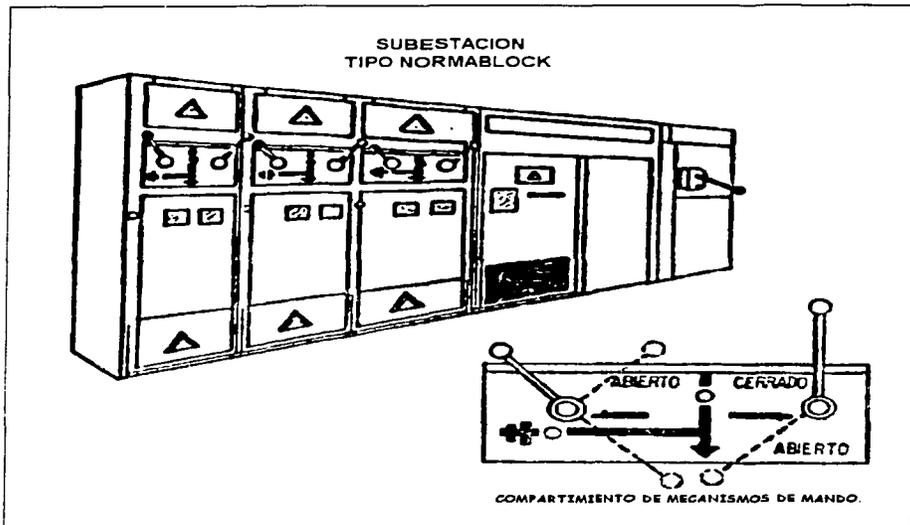


Figura 31 . Vista frontal de gabinete de subestación de rectificación Alsthom.

#### 2.4.2.2.1 Constitución de las secciones de que disponen estas subestaciones.

a) Sección 1 " Seccionador de llegada".

El gabinete que contiene al seccionador de llegada se encuentra dividido en tres partes :

- Parte inferior. Donde se encuentra el extremo del cable alimentador de la subestación.
- Parte media. Donde se localiza la mufa trifásica de llegada, el seccionador de descarga de tierra, el seccionador trifásico de operación sin carga, el cual es accionado desde el exterior por medio de un mecanismo de acoplamiento y cuya tensión y corriente nominal son 23 kV, y 400 amperes, así como un sistema de bloqueo mecánico de seguridad.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- Parte superior. Donde se localiza el bus 15 kV. Como se indica en la figura :

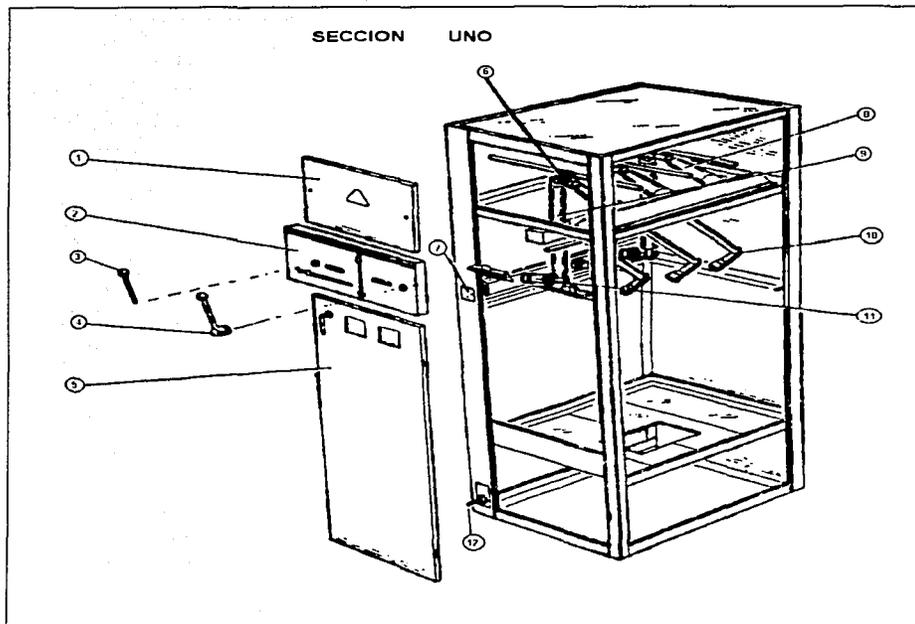


Figura 32 . Sección de Llegada.

b) Sección 2 "Interruptor de salida".

El gabinete que contiene ese interruptor de salida, se encuentra dividido en tres partes, ver figura :

- Parte inferior. Donde se encuentra el extremo del cable alimentador de salida.
- Parte media. Donde se localiza una mufa trifásica, el seccionador de descarga a tierra, el interruptor trifásico de operación con carga, el cual es operado

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

simultáneamente por un mecanismo de acoplamiento y cuya tensión y corriente nominal es de 23 kV. y 400 amperes, así como un sistema de bloqueos mecánicos de seguridad.

- Parte superior. Donde se encuentran los buses de 15kV, como se observa en la figura 33.

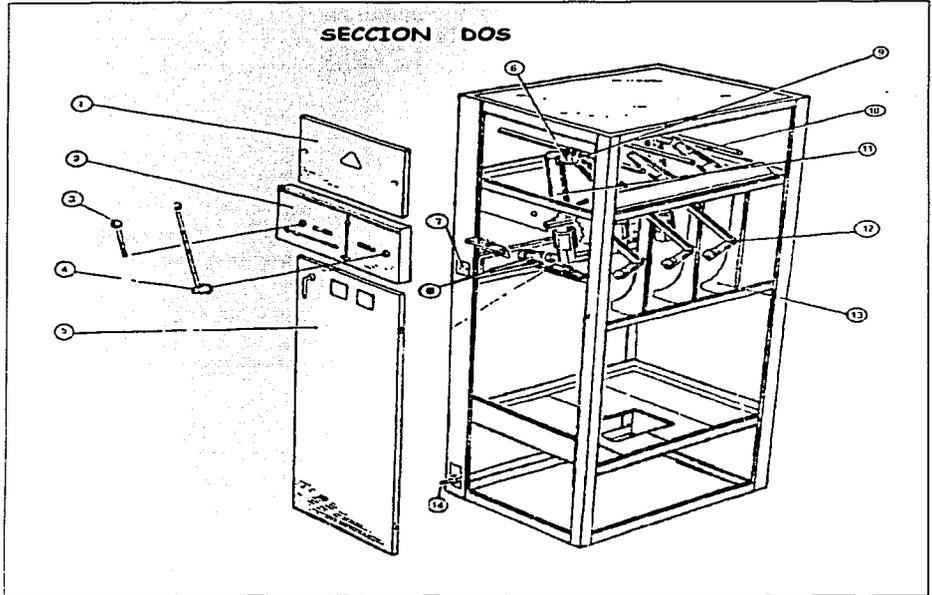


Figura 33. Sección del Interruptor de salida.

c) Sección 3 "Protección del Transformador".

El gabinete que aloja a esta protección al igual que en las secciones 1 y 2. se divide en 3 partes :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- Parte inferior. En esta sección no se emplea.
- Parte media. Se localiza un micro-interruptor normalmente abierto, tres fusibles de 43 amperes, un seccionador de descarga a tierra, el interruptor trifásico de operación con carga el cual es operado simultáneamente por un mecanismo de acoplamiento y cuya tensión y corriente nominal son de 23 kV y 63 amperes, el mecanismo de accionamiento del micro-interruptor y un sistema de bloqueos de seguridad.
- Parte superior. Aloja los buses de 15 kV, como aparece en la figura 34.

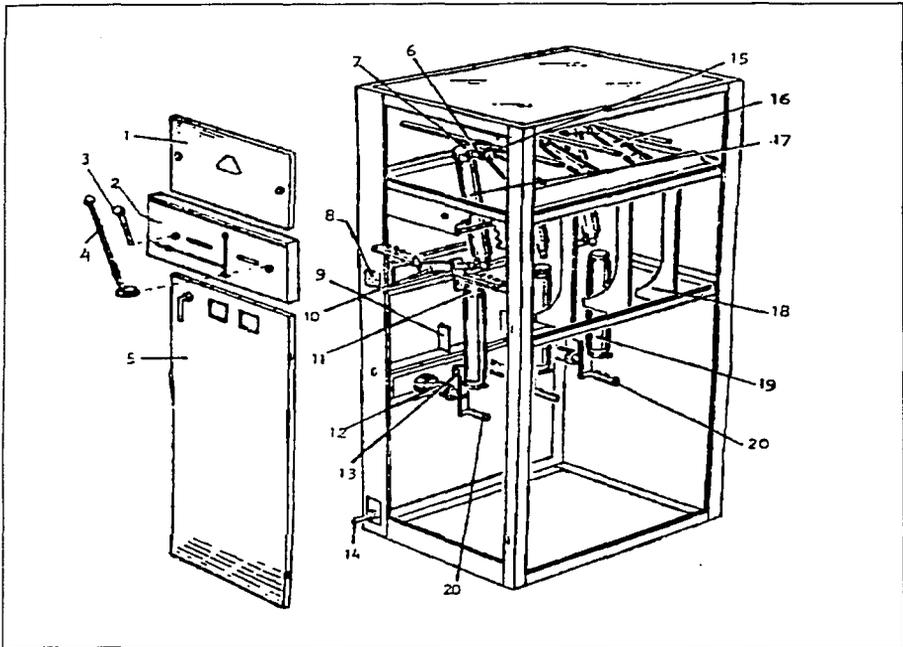


Figura 34 . Sección Protección del Transformador.

TECIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### d) Sección 4 "Transformador".

La sección 4 en todos los casos es destinada a alojar el transformador de la subestación de que se trate; normalmente cuenta con 2 puertas con la chapa en la parte delantera del gabinete, y la parte baja es desmontable para que se permitan las maniobras con el transformador cuyas características principales son :

Conexión        delta / estrella aterrizada.  
 Relación de transformación : 15 kV / 220-127 VCA.  
 Capacidad :     250 . 500 o 630 KVA.  
 Frecuencia :     50 / 60 hz.  
 Dieléctrico :     Piraleno.  
 Cambiador de Taps manual en el primario : 5 posiciones y variación de +/- 2.5 %.

#### e) Sección 5 "Interruptor de baja tensión".

El interruptor que aloja a este interruptor se encuentra dividido en tres partes :

- Parte inferior. Aquí se alojan las barras de salida del interruptor de baja tensión (una por fase y una del neutro), así como los cables que se conectan a ellos y una tablilla de conexiones que se utiliza para los circuitos de control del interruptor.
- Parte superior. Se tiene instalado el interruptor de baja tensión. El interruptor puede ser de tipo "DVRT" o "DVT", cuyas características se mencionan a continuación.

#### 2.4.2.2.2 Función que desempeñan las secciones que constituyen a las subestaciones tipo Normablock.

a) Sección 1 "Seccionador de llegada". Permite el aislamiento de alimentación de la subestación a la que pertenecen.

b) Sección 2 "interruptor de salida". En las subestaciones de 250 kVA. instaladas en las estaciones del STC. este interruptor alimenta a la subestación de la estación siguiente.

c) Sección 3 "Protección de Transformador" . La finalidad de esta sección es la de permitir el aislamiento o alimentación del transformador que se encuentra en la sección 4 de la subestación. Además de impedir que exista a la salida del mismo una o dos fases, así

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

ESTA TESIS NO SALE  
 DE LA BIBLIOTECA

como la de protegerlo contra sobrecargas por medio de los fusibles de 43 amperes de que dispone.

d) Sección 4 "Transformador". La función que desempeña es de transformar la tensión de 15 KVA . en 220 – 127 VCA, por medio de una transformación de tipo distribución.

e) Sección 5 "Interruptor de baja tensión". La finalidad de este gabinete es la de aislar o alimentar los circuitos del que se derivan, así como de proteger al transformador contra cortocircuitos, sobrecargas y de fase a neutro que existe a la llegada del interruptor de baja tensión.

#### 2.4.2.3 Subestaciones de Alumbrado y Fuerza marca "Energomex".

Las subestaciones compactas tipo "Energomex" son equipos para operación de alta tensión en 34.5 kV y usadas en alimentaciones de 15 y 23 kV.

Estas subestaciones cumplen con el requisito de seguridad en su funcionamiento y manejo, estos presentan en su totalidad perimetral (frente, partes laterales, posterior y superior), una ausencia de riesgos por contactos involuntarios con las partes vivas portadoras de energía de alta tensión para el personal que las opera.

Estan constituidas por gabinetes o secciones prefabricadas de fácil acoplamiento atornillable, que presenta por este hecho una flexibilidad para futuras ampliaciones. Una subestación Energomex típica esta constituida de las siguientes partes :

a) Subestación en 15 kV.

- Sección 1 "Llegada seccionador".
- Sección 2 "Llegada o salida de interruptor".
- Sección 3 "Protección transformador".
- Sección 4 " Transformador".
- Sección 5 "Interruptor de baja tensión".

**TEGIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

b) Subestación en 23 kV.

- Sección 1 "Llegada o salida, seccionador o interruptor".
- Sección 2 "Llegada o salida de interruptor".
- Sección 3 "Protección transformador".
- Sección 4 " Transformador ".
- Sección 5 "Interruptor de baja tensión".

En las figuras 35 y 36 se muestra la vista de frente, vista interior y diagrama unifilar de la Subestación tipo Energomex.

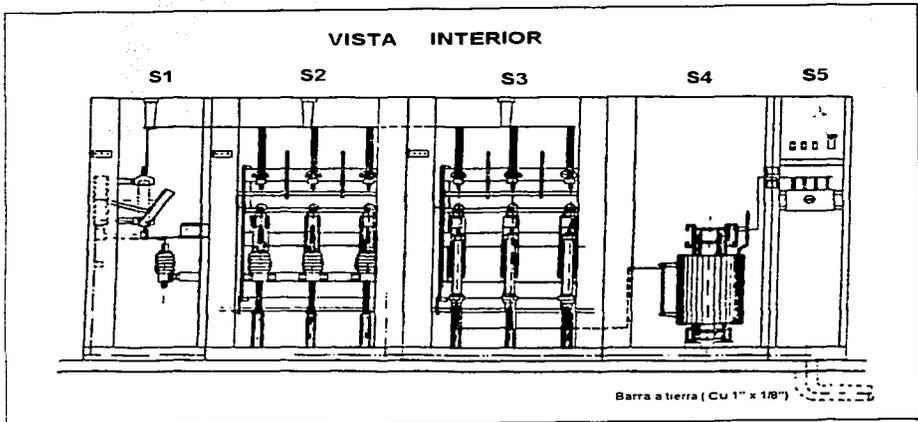


Figura 35 . Vista interior de Subestación tipo Energomex.

**CON  
FABRICA DE ORIGEN**

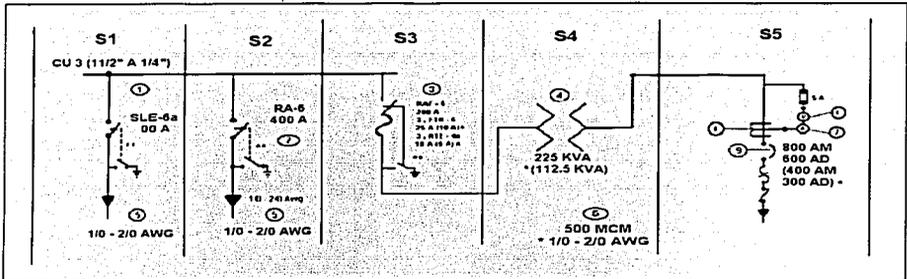


Figura 36 . Diagrama unifilar de una subestación tipo Energomex.

Este tipo de subestaciones se encuentran localizadas en ampliaciones en Línea 3, incluyendo subestaciones de Ventilación Mayor por ambas vías. Tipo RAD y RAF6.

#### 2.4.2.3.1 Desconectador marca "Energomex", tipo RAD y RAF6.

Estos desconectadores son de operación en grupo con carga tripolar, y servicio interior, para la sección 3 se le ha agregado un porta-fusible, un relevalor de sobrecarga y un dispositivo de disparo automático.

Su tensión nominal es de 23 kV , y puede operar a 15 kV o a 23 kV con corriente nominal de 400 amperes.

#### 2.4.2.3.2 Descripción del funcionamiento de la extinción del arco.

El mecanismo de extinción del arco, se lleva a acabo mediante un flujo de aire a presión, dirigido sobre el parachispas superior, al momento de la apertura del desconectador. Se obtiene el aire a presión debido al movimiento del tubo de contacto sobre el embolo fijo, el tubo baja y el aire contenido en él, debido a la rapidez de la apertura del aparato, se impulsa a chorro directamente sobre el arco.

A continuación se muestra en la figura 37 un diagrama con la vista interior de los desconectadores marca Energomex Tipo "RAD" y "RAF".

TESIS CON  
PLA DE ORIGEN

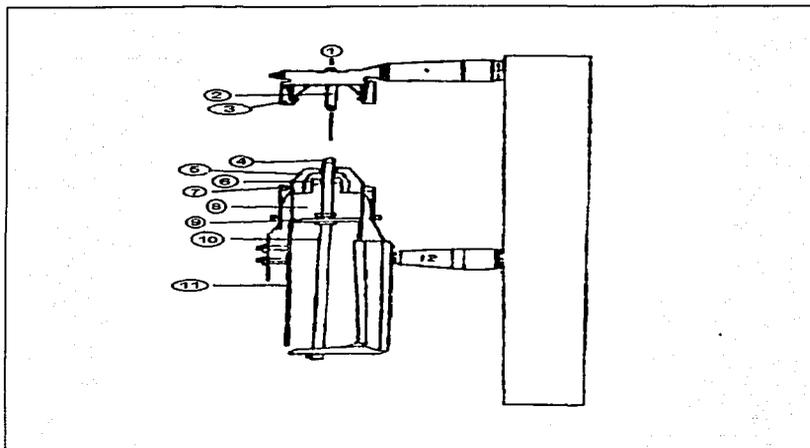


Figura 37 . Desconectador Energomex tipo RAD y RAF.

#### 2.4.2.3.3 Desconectador marca "Energomex" tipo "CS".

Estos desconectadores son de operación de carga tripolar, servicio interior y para la sección 3 se le ha agregado un portafusible, un relevador de sobrecarga y un dispositivo de disparo automático.

Su tensión nominal es de 23 kV y pueden operar en 15 kV o 23 kV con corriente nominal de 400 amperes.

Este tipo de subestaciones se encuentran localizadas en las Subestaciones de Ventilación Mayor de la Línea 3 en su parte Sur. Son desconectadores de operación manual con carga marca Energomex, y están contenidos en las secciones 1, 2 y 3 de estas subestaciones. Estos desconectadores son para operación en alta tensión en 34.5 kV, alimentados a una tensión de 23 kV, son operados por medio de un accionamiento externo, tanto para la apertura y cierre del desconectador, como para el cierre y apertura de su cuchilla de tierra.

### 2.4.2.3.4 Constitución de las secciones de que se componen este tipo de Subestaciones.

a) Secciones 1 y 2. Estos gabinetes alojan un desconectador (para cada uno) de operación con carga, marca Energomex tipo "RAD-6", de 34.5 kV de tensión nominal, 15 kV de tensión de operación, para una corriente nominal de 400 amperes, de igual funcionamiento al descrito en la sección 2 de las subestaciones alimentadas en 15 kV, este desconectador por igual tiene un seccionador de puesta a tierra con un juego de bloques, por medio de chapas e indicadores de tensión.

b) Sección 3. Esta sección aloja un desconectador trifásico en aire de operación con carga de iguales características que el de las secciones 1 y 2 antes mencionadas, solo que contiene un relevador de corriente y fusibles para usarse como protección del transformador.

c) Sección 4. Esta sección contiene en su interior un transformador de distribución, al cual se le deben efectuar los siguientes trabajos de mantenimiento.

- Limpieza exterior e interior del gabinete.
- Limpieza y desengrase con shampoo industrial de toda la superficie del transformador (excepto en transformadores de tipo seco).
- Verificación del apriete de conexiones a las boquillas de alta y baja tensión.
- Verificación de fugas de material dieléctrico en las boquillas radiadoras y superficie del transformador.
- Verificación del nivel de aceite y reponer si es necesario.
- Verificación del estado que guarda la arena "sílica-gel" (si es de color morado se deberá analizar la causa de humedad).
- Comprobar el estado que guarda el termómetro, así como la lectura que indica.
- Efectuar pruebas de aislamiento de alta contra baja tensión, alta mas baja contra tierra, y alta y baja contra tierra.
- Verificar el sistema de tierras.
- Checar y reportar si hay señales de calentamiento en conductores y conexiones.
- Al ponerlo en servicio, observar y reportar si existen ruidos magnéticos, liberaciones o condiciones especiales de alguna causa.

d) Sección 5. Este gabinete aloja en su interior un interruptor general de baja tensión, al cual se le debe dar la siguiente revisión y mantenimiento.

- Tocar con la palma de la mano la puerta, costados del gabinete y superficies de frente muerto sobre el interruptor. Cualquier calentamiento que la palma de la mano no pueda resistir durante 3 minutos indica un problema.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- Desconectar la energía del tablero, verificando las líneas de alimentación con un voltmetro para cerciorarse positivamente de que el equipo esta totalmente desenergizado.
- Buscar cualquier indicio de humedad o goteo al interior del tablero. Las condensaciones en las tuberías o goteo de fuentes externas es una causa muy común de fallas en los tableros.
- Sellar cualquier tubería donde exista escurrimiento de condensación y suminístrese una vía para drenarla.
- Sellar cualquier herididura o abertura que haya permitido la entrada de humedad a los gabinetes. Elimínese la fuente que produzca cualquier goteo en los goteos. Así como cualquier otra fuente de humedad.
- Reemplazar o secar cuidadosamente y limpié cualquier material aislante que se haya humedecido o que muestre una acumulación del material depositado proveniente de humedecimientos anteriores.
- Si existe acumulación apreciable de polvo y mugre, limpiar el tablero usando brocha de pelo, una aspiradora, o bien usando trapo limpio de pelusa. Evite soplar sobre los interruptores u otros equipos, no se usen sopladores o aire comprimido.
- Inspeccionar cuidadosamente todas las conexiones eléctricas visibles y terminales en las barras colectoras y sistemas de alumbrado.
- Apreta tornillos, tuercas, etc., si existen indicios de sobrecalentamiento, provocado por conexiones flojas.
- Si las conexiones o terminales se encuentran muy decoloradas o corroídas, picadas o muestran evidencia de haber estado sometidas a altas temperaturas, deberán desarmarse las partes sometiéndolas a un proceso de limpieza o reemplazarlas.  
Tener cuidado de no remover el recubrimiento electroлитico de las partes de aluminio en conexiones o terminales. Las partes de aluminio deben reemplazarse.
- Examinar los portafusibles cuidadosamente. Si existen indicios de sobrecalentamiento o falta de apriete, revisar la presión de los resortes, apriete de las mordazas, etc., reemplazar los portafusibles si la presión de sus resortes se compara desfavorablemente con la de otros idénticos, existentes en el tablero.
- Buscar cualquier rastro de deterioro en el material aislante, así como fusión de los compuestos selladores, reemplazar tales partes aislantes y ensamblajes en los que se encuentre fundido el sellador.
- Es necesario asegurarse de que las causas de sobrecalentamiento han sido corregidas.
- Verificar todos los mecanismos de operación exterior de los interruptores. Asegurándose que cada mecanismo operado cierra y abre positiva y completamente los contactos.
- Verifique la operación de todos los componentes mecánicos.
- Verifique todos los dispositivos para localizar partes faltantes o rotas, tensión apropiada de los resortes, libertad en movimiento, oxidación o corrosión, mugre y desgaste excesivo.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- Verifique los mecanismos de todos los entrelaces mecánicos y eléctricos, así como los medios provistos para bloquear con candado.
- Limpiar las salpicaduras provocadas por arcos, aceite o depósitos de hollín, reemplazando las partes si una cantidad apreciable de material se ha quemado, enmohecido o perforado.
- Reemplazar las partes aislantes y supresoras de arco rotas o perforadas.
- Limpiar y pulir los contactos de cobre fácilmente accesibles, navajas y mordazas, cuando los resultados de la inspección indiquen la necesidad de hacerlo. Evitando remover metal de las superficies de contacto de plata. Limpiar los contactos deslizantes moviendo rebabas proyectantes o material que haya sido movido por efecto de arcos y el cual interfiera con la libertad de movimiento.
- Limpiar las superficies de contacto para eliminar óxidos negros. Usando lija fina de óxido de aluminio y removiendo la menor cantidad de material posible. Es necesario cuidar que el tablero quede limpio completamente de partículas de metal o de abrasivo.
- Reemplazar las navajas o quijadas cuando por estar quemadas parcialmente, hayan cambiado de forma apreciablemente, o que exista interferencia con los bordes achaflanados, etc., para permitir el movimiento libre.
- En donde los contactos muestren sobrecalentamiento, comparar la presión de los resortes y rigidez de las partes con otras de idénticas que evidentemente estén en buenas condiciones. Reemplazar los resortes, mordazas navajas o contactos si estos se han recocido o dañado en alguna otra forma por el calor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO 3

### CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UNA SUBESTACION EN ALIMENTACION RADIAL O DESCENTRALIZADA EN 23 KV DE LA LINEA 3 DEL STC.

#### 3.1 Subestación rectificadora radial o descentralizada alimentada en 23 kV de la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO).

En la figura 38 se muestra el diagrama unifilar de una Subestación de Rectificación alimentada en 23 kV de la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO).

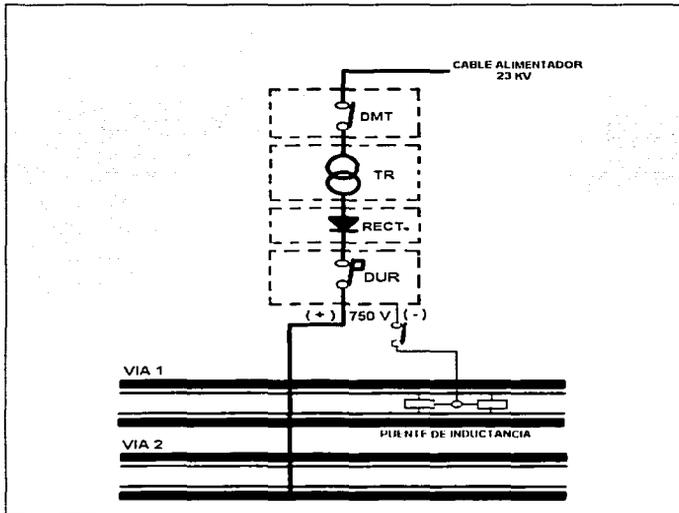


Figura 38. Subestación de Rectificación alimentada en 23 kV correspondiente a Línea 3..

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 3.11 Descripción de los elementos de una Subestación de rectificación alimentada en 23 kV.

Como se menciona en el punto 2.4.1.2 Alimentación en 23 kV a Subestaciones de Rectificación (SR's), la función de cada componente es :

- a) Interruptor de potencia o seccionador de 23 kV (DMT). Encargado de darle continuidad a la alimentación, y proteger al sistema de cortocircuitos provocados por parte del equipo de Compañía de Luz y Fuerza del Centro (Cía. de Luz).
- b) Transformador principal (TR). Opera en 23 kV., con una relación de transformación de 23kV / 0.570 kV, encargado de alimentar el Bloque rectificador.
- c) Bloque rectificador (RECTIFICADOR). Esta compuesto por dos puentes trifásicos de diodos de silicio, conectados en paralelo. Encargado como su nombre lo indica de rectificar la tensión de corriente alterna que recibe del transformador principal.
- d) Disyuntor ultra rápido (DUR). Interrumpe o restablece la continuidad de corriente continua, y protege en caso de existir un cortocircuito en vías.
- e) Puente de inductancias. Circuito utilizado para señalización.

### 3.2 División eléctrica de Línea 3.

La alimentación eléctrica en 23 kV en la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO) esta diseñada de tal manera que se obtenga una distribución uniforme de la carga a lo largo de las Líneas del Sistema de Transporte Colectivo (METRO), las Subestaciones de Rectificación están instaladas de tal manera que nos proporcionan una mayor flexibilidad de operación.

Es por esto que la Línea 3 en su alimentación en 23 kV., se compone eléctricamente de 3 zonas ( F, G y H ), las cuales se observan en la figura 39.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# 23 kV

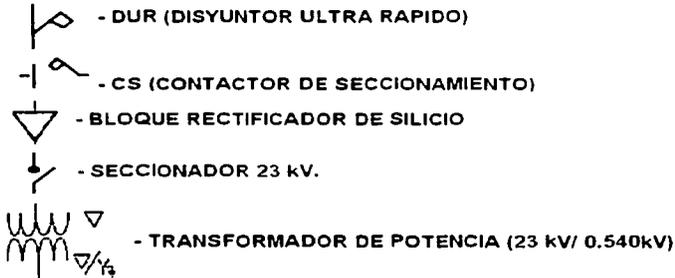
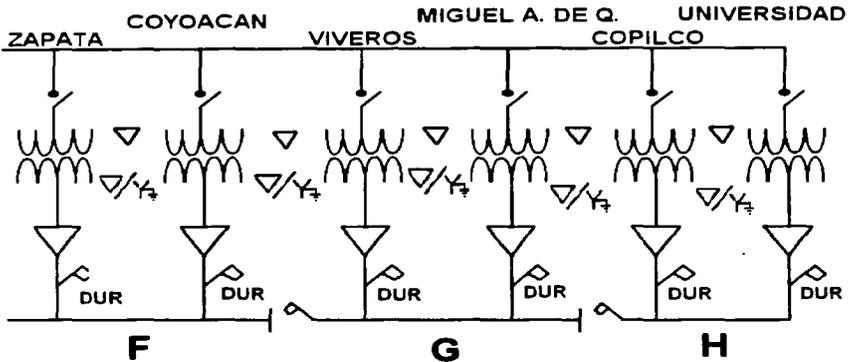


Figura 39. Subestaciones de Rectificación alimentadas en 23 kV en la Línea 3.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La división por zonas es con la finalidad de que en caso de presentarse una falla o algún problema en un punto de cualquiera de la Línea, se afecte el servicio en el menor número posible de estaciones y permitir proporcionando servicios provisionales en los tramos o zonas donde sí se puede mantener la energía eléctrica, dejando aislado el tramo donde se tengan problemas, es decir que cuando se presenta una falla en determinada zona, los Contactores de Seccionamiento (CS) al abrir aislarán la zona afectada.

### 3.2.1 Diagrama.

Como se observa en la figura 39, el diagrama correspondiente a la alimentación en 23 kV correspondiente a la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO), donde se puede observar que Subestaciones de Rectificación se encuentran conectadas en paralelo, ya que los voltajes en cada una de las ramas son idénticos.

De la figura 39 el Contactor de seccionamiento es un dispositivo que se encarga de aislar lo más rápido posible la zona donde se presenta una falla, para de esta forma evitar afectar otras zonas de la Línea de que se trate, en este caso Línea 3.

Las letras F, G y H corresponden a las zonas alimentadas en 23 kV., de la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo (METRO).

Como se sabe todos los circuitos eléctricos contienen secciones conectadas en serie, paralelo o ambas. Las leyes fundamentales que rigen el comportamiento de estas secciones proporcionan las herramientas básicas para el análisis de cualquier circuito, incluso los más complejos.

La conexión en paralelo de las fuentes de tensión requiere que todas las fuentes tengan voltajes idénticos, cuando se conectan en paralelo las fuentes de voltaje, se deben unir todas las terminales positivas al igual que las terminales negativas, tal como se tiene la disposición eléctrica de Línea 3 con sus Subestaciones rectificadoras conectadas en paralelo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3 Cálculo de la corriente nominal de una Subestación de Rectificación alimentada en 23 kV.

Utilizando la expresión para el cálculo de la corriente nominal ( $I_{NOM}$ ), en base a la capacidad de operación (KVA) nominal de la Subestación de Rectificación :

$$I_{NOM} = \frac{(KVA) \times (1000)}{E \times 1.732 \times f.p.} = \frac{4515 \times 1000}{570 \times 1.732 \times 0.9985}$$

$$I_{NOM} = 4580.22 \text{ Amperes}$$

donde :

- Kw = Capacidad de operación nominal de la Subestación de Rectificación.
- E = Tensión en el secundario del Transformador.
- 1.732 = Por ser un sistema de alimentación trifásico.
- f.p. = Factor de potencia.
- 1000 = Multiplicador utilizado de formula.

Cabe mencionar que se utiliza un valor de factor de potencia real tomado en las Subestaciones de Rectificación siendo de 0.9985 (aproximadamente 1) , debido a que se maneja corriente continua.

Por lo que el valor de corriente nominal en una Subestación de Rectificación es 4580.22 Amperes.

### 3.4 Procedimiento para el cálculo de la corriente de cortocircuito.

Para realizar nuestro cálculo de la corriente de cortocircuito se siguen los siguientes pasos que se mencionan a continuación :

- 1.- Preparación de los elementos para el cálculo.
- 2.- Trazar el diagrama de limitadores del sistema en estudio.
- 3.- Obtener los valores de resistencia por unidad de longitud de los elementos involucrados en el circuito.
- 4.- Obtener el valor de la **REQUIVALENTE TOTAL**.
- 5.- Por medio de la **Ley de Ohm**, utilizando la **Tensión de operación** y la **REQUIVALENTE TOTAL** obtenemos el valor de la corriente de cortocircuito para un punto de falla intermedio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 3.4.1 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en una Subestación de Rectificación radial o descentralizada alimentada en 23 kV.

Para circuitos que operan por medio de corriente continua como el sistema de alimentación radial o descentralizada que maneja el Sistema de Transporte Colectivo (METRO), la resistencia es la única oposición a la corriente, por lo tanto el máximo valor de corriente que se puede presentar es la de cortocircuito y se puede calcular el valor utilizando la Ley de Ohm ( $I = V / R$ ), manejando valores de tensión y resistencia de los elementos que conforman el sistema eléctrico de la subestación rectificadora objeto del presente estudio.

El análisis de cortocircuito se hará para una de las zonas mostradas en la figura 39, en lo que se refiere al equipo del STC, en este caso la zona G, esto se observa en la figura 40.

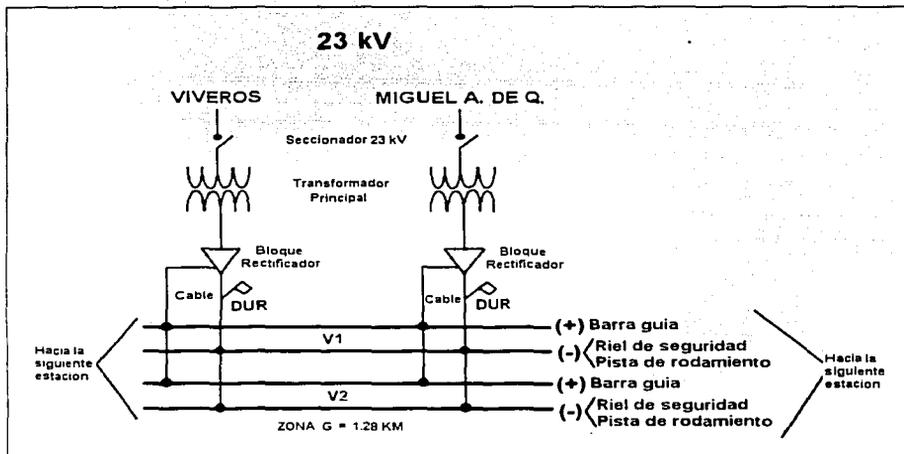


Figura 40. Zona G utilizada para el cálculo de falla.

Como se sabe la magnitud de potencia alimentada a la carga determina la cantidad de corriente de cortocircuito que se puede presentar, como nuestro análisis es solamente para el equipo manejado por el Sistema de Transporte Colectivo por lo cual consideramos que nuestra fuente de alimentación de tensión es a partir del Transformador principal de la Subestación de rectificación que se este analizando, por lo cual el análisis de cortocircuito objeto del presente estudio es en base de los elementos mostrados en la figura 41.

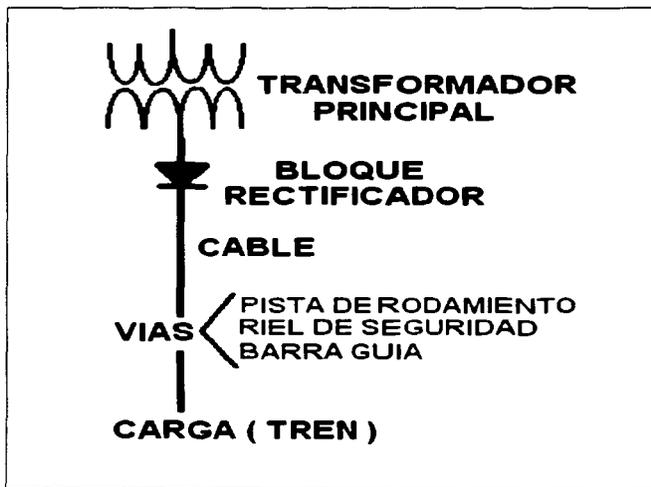


Figura 41. Elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito.

Para realizar dicho análisis nos basaremos en el procedimiento que se presentó en el punto 1.5.6 de Cortocircuito en sistemas de corriente continua.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 3.4.2 Trazo del diagrama de los limitadores de la corriente de cortocircuito.

Para iniciar nuestro análisis conviene representar una Subestación de Rectificación (SR) por su correspondiente diagrama de limitadores para la corriente de cortocircuito, donde se pueden observar las resistencias de los diferentes elementos del sistema. Esto se observa en la figura 42.

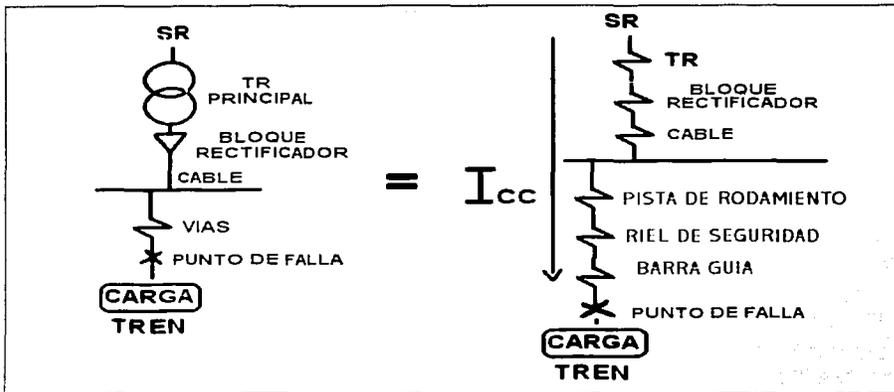


Figura 42. Principales limitadores de corriente de la corriente de cortocircuito.

Como se observa en la figura 42, la corriente de cortocircuito en una Subestación de Rectificación se puede calcular por medio de la expresión:

$$I_{cc} = \frac{\text{TENSION DE OPERACIÓN}}{R_{TR \text{ PRINCIPAL}} + R_{\text{BLOQUE RECT.}} + R_{\text{CABLE}} + R_{\text{VIAS}}}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los limitadores de la corriente de cortocircuito en corriente continua son en nuestro caso de estudio : el transformador, el bloque rectificador, cables, pista de rodamiento, riel de rodamiento, barra guía y la carga (tren); por lo que debemos considerar para el calculo de la corriente de cortocircuito los valores de resistencia de cada uno de estos elementos.

Aunque para nuestro análisis el valor de la resistencia de la carga (tren) no afecta el valor de la corriente de cortocircuito, debido a que ante la presencia del tren la corriente de cortocircuito circula a través del punto que presenta menor oposición o resistencia a su paso, es decir que no circula a través del tren, aun cuando la resistencia que presente este no sea considerable, por lo tanto, no se involucra este valor en nuestro calculo de la corriente de cortocircuito.

### 3.4.3 Calculo de valores de resistencia de los elementos de la SR.

1.- El primer elemento a calcular es el valor resistivo que proporciona el Transformador principal ( $R_{TR}$ ), en base a datos principales de placa del mismo como son :

$$\begin{aligned} \text{KVA base} &= 4515 \text{ KVA BASE} \\ \text{KVbase} &= 23 \text{ KV BASE} \\ Z \% &= 14 \% Z \end{aligned}$$

a) Calculando el valor de  $Z_{base}$  mediante la expresión :

$$Z_b = \frac{(\text{KVb})^2}{\text{KVA}} = \frac{(23 \text{ KV})^2}{4515 \text{ KVA}} = 11.7165 \Omega$$

b) De la siguiente expresión ( por ciento de la impedancia) se despeja a la variable  $Z$  ( $\Omega$ ) que representa el valor de la impedancia en Ohms en el Transformador principal.

$$Z \% = \frac{Z (\Omega) \times 100}{Z_b}$$

Tenemos que :



$$Z (\Omega) = \frac{Z \% \times Z \text{ base}}{100}$$

sustituyendo valores tenemos :

$$Z (\Omega) = \frac{(0.14 \times 11,7165)}{100} = 0.0164031 \Omega$$

El valor de la impedancia en ohms es 0.0164031 correspondiente al Transformador Principal (TR).

2.- El segundo elemento a calcular es la resistencia equivalente correspondiente al bloque rectificador ( $R_{\text{BLOQUE RECTIFICADOR}}$ ), utilizando sus características eléctricas de la Tabla 4.

CAPACIDAD	4000 W.
CORRIENTE	5000 A
TENSION AUXILIAR	220 / 127 V
FRECUENCIA	50 / 60 Hz
TENSION DE ENTRADA	542 V
TENSION DE SALIDA	751 V

Tabla 4. Características eléctricas del bloque rectificador.

La resistencia del bloque rectificador ( $R_{\text{BLOQUE RECTIFICADOR}}$ ) se obtiene por medio de la Ley de Ohm y a través de la expresión para el cálculo de la potencia  $P = VI$ , es decir :

$$R_{\text{BLOQUE RECTIFICADOR}} = \frac{P}{I^2} \quad (\Omega)$$

Sustituyendo los valores mostrados en la Tabla 4, se tiene :

$$R_{\text{BLOQUE RECTIFICADOR}} = \frac{4000 \text{ kW}}{(5000 \text{ A})^2} = 0.16 \Omega$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.- El siguiente elemento a calcular es la resistencia del cable ( $R_{\text{CABLE}}$ ), que alimenta a las Vías, su valor se obtiene de la expresión:

$$R_{\text{CABLE}} = \rho \left[ \frac{L}{A} \right] \quad (\Omega)$$

Se obtiene que el valor de la resistividad volumétrica ( $\rho$ ) del conductor es  $1.7241 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$ , de valores que manejen unidades compatibles con las unidades a utilizar en nuestro cálculo.

El valor de el área de la sección transversal del conductor ( $A$ ) es  $253.4 \text{ mm}^2$  para un conductor de 500 AWG que es el tipo de cable utilizado para alimentar las Vías en el Sistema de Transporte Colectivo (METRO).

Mientras que el valor de la longitud del conductor ( $L$ ) será el valor obtenido al presentarse la falla en la zona de estudio del presente trabajo, el cual se indico en el subtema 3.4.1 que sería de 55 metros.

Sustituyendo valores

$$R_{\text{CABLE}} = \left[ \frac{17.241 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}}{253.4 \text{ mm}^2} \right] \times L = \left( 0.068038 \Omega / \text{km} \right) \times N$$

$$R_{\text{CABLE}} = (0.068038 \Omega / \text{Km}) (0.055 \text{ Km}) = 0.00374209 \Omega = 3.74209 \text{ m}\Omega$$

Para poder determinar el valor de resistencia total del cable ( $R_{\text{CABLE}}$ ), tenemos que cada Subestación de Rectificación tiene la misma distancia en cuanto a su arreglo de 12 cables que alimentan las vías, y tienen una longitud de 55 metros.

Por lo tanto para obtener la resistencia total del arreglo se considera el valor considerado de un cable =  $3.74209 \text{ m}\Omega$ , y con este valor podemos obtener el valor total para el arreglo de 12 cables conectados en paralelo, con los que cuenta el sistema de alimentación a Vías por parte de una Subestación de Rectificación :

$$R_{12 \text{ CABLES}} = \left( \frac{R_{\text{UN CABLE}}}{N} \right) = \left( \frac{0.00374209}{12} \right) = 0.0003118408 \Omega = 0.3118408 \text{ m}\Omega$$

TESIS CON  
ALLA DE ORIGEN

Por lo que el valor de la  $R_{12 \text{ CABLES}}$  es  $0.3118408 \text{ m}\Omega$

4.- Siguiendo la figura 42 del diagrama de limitadores para una Subestación de Rectificación, el siguiente valor a calcular es la resistencia de los elementos en Vías para lo cual se tiene un conjunto de elementos como son pistas de rodamiento, riel de seguridad y barra guía, como se muestra en la figura 43.

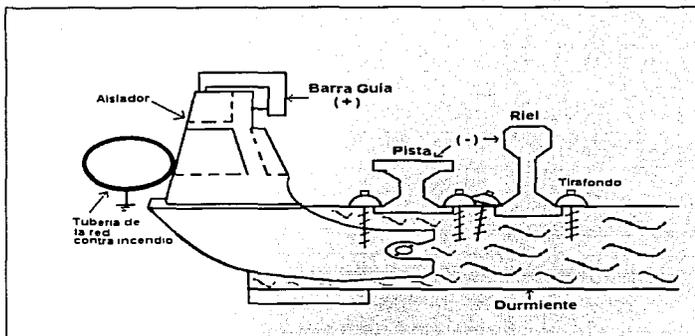


Figura 43. Corte de Vía.

Los valores de resistencia de la barra guía ( $R_{\text{BARRA GUA}}$ ), pista de rodamiento ( $R_{\text{PISTA DE RODAMIENTO}}$ ) y riel de seguridad ( $R_{\text{RIEL DE SEGURIDAD}}$ ), fueron valores proporcionados por el Departamento del Puesto de Despacho de Carga (PDC) del Sistema de Transporte Colectivo (STC), el cual se encuentra a cargo del Ing. Agustín Galván jefe del PDC, dichos valores fueron obtenidos en pruebas resistivas aplicadas a los elementos mencionados, y estos son:

$$R_{\text{RIEL DE SEGURIDAD}} = R_{\text{PISTA DE RODAMIENTO}} = 0.04 \Omega / \text{Km}$$

$$R_{\text{BARRA GUA}} = 1.22 \Omega / \text{Km}$$

TIENE CON  
VALIA DE ORIGEN

De la figura 43 se observa que la pista de rodamiento y el riel de seguridad se encuentran en paralelo, por lo que sus respectivos valores resistivos se pueden sumar :

Para calcular el valor de la suma de resistencias  $R_{\text{RIEL DE SEGURIDAD}} \parallel R_{\text{PISTA DE RODAMIENTO}}$  que cuentan con el mismo valor tenemos :

$$R_{\text{RIEL DE SEGURIDAD}} \parallel R_{\text{PISTA DE RODAMIENTO}} = \frac{(0.04 \times 0.04)}{0.04 + 0.04} = 0.02 \Omega / \text{km}$$

por lo tanto, tenemos que la resistencia del riel de seguridad y la resistencia de la pista de rodamiento es de :

$$R_{\text{RIEL - PISTA}} = 0.02 \Omega / \text{km}$$

Y cuando se presenta la falla tenemos a su vez que la resistencia de la barra guía ( $R_{\text{BARRA GUA}}$ ) esta en paralelo con la resistencia equivalente del riel de seguridad y la pista de rodamiento ( $R_{\text{RIEL - PISTA}}$ ), por lo tanto calculamos el valor de la resistencia equivalente de Vías ( $R_{\text{RIEL - PISTA - BARRA GUA}}$ ) con la misma ecuación para el cálculo de resistencias en paralelo :

$$R_{\text{RIEL - PISTA - BARRA GUA}} = \frac{(0.02 \times 1.22)}{0.02 + 1.22} = 0.0196774 \Omega / \text{km}$$

### 3.4.4 Cálculo del valor de la resistencia equivalente total (REQUIVALENTE TOTAL).

Este valor se multiplica por su respectivo valor en unidad de longitud, proporcionado por el punto donde se presente la falla.

Así tenemos los valores resistivos de todos los elementos limitadores de la corriente de cortocircuito del tramo o zona donde se presenta la falla. Para obtener el valor de la corriente de cortocircuito debemos obtener primero la resistencia equivalente total del circuito limitador, mediante la expresión :



### REQUIVALENTE TOTAL =

$$R_{TR} + R_{BLOQUE\ RECTIFICADOR} + R_{CABLE\ ALIMENTADOR} + R_{PISTA-RIEL-BARRA\ GUIA.}$$

Una vez calculados los valores de resistencia de los elementos limitadores de la corriente de cortocircuito, el siguiente paso es conocer el punto donde se presenta la falla, en nuestro análisis como tenemos un sistema monofásico, la falla que se puede presentar es la de línea a tierra o de cable a tierra, por lo cual debemos de tener en cuenta las distancias que existen entre cada Subestación de Rectificación (SR), para así poder brindar un valor de cortocircuito mayor o menor dependiendo la distancia que exista entre cada una de ellas, con esto podemos brindar valores de la corriente de cortocircuito que aporta cada Subestación de Rectificación y de esta manera conocer los valores para realizar un diseño y cálculo de protecciones adecuado.

Tomando como referencia la zona "G" de la Línea 3 del STC (METRO), que tiene una longitud a partir del Tramo Kilométrico (TK) = 17 + 510 correspondiente a la Subestación de Rectificación Viveros hasta el TK = 18 + 790 que corresponde a la Subestación de Rectificación Miguel Ángel de Quevedo, lo que nos proporciona una longitud de zona de 1280 metros o 1.28 Km, esto se observa en la figura 44.

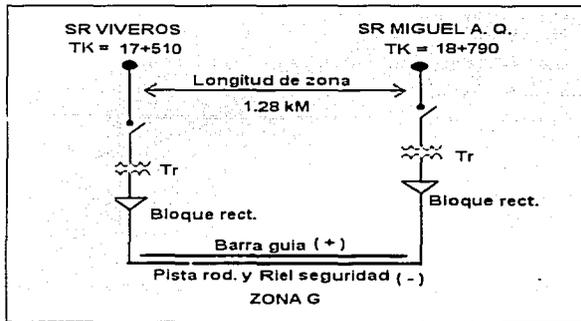


Figura 44. Punto de falla en la Zona "G".

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Considerando que se presenta la falla en la zona "G" a 0.640 Km de las Subestaciones de Rectificación Viveros y Miguel Ángel de Quevedo, es decir a la mitad del tramo de cada una de estas Subestaciones, esto se observa en la figura 45.

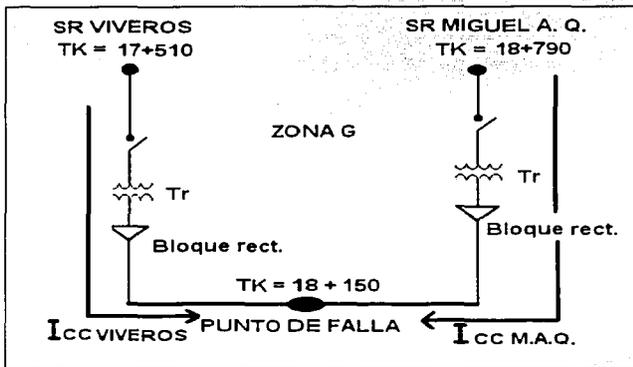


Figura 45. Punto de falla 1 para cálculo de la corriente de cortocircuito.

De la figura anterior podemos observar que la corriente de cortocircuito será :

$$\text{ICC TOTAL} = \text{ICC VIVEROS} + \text{ICC MIGUEL ANGEL DE QUEVEDO}$$

Siguiendo el procedimiento mencionado en el punto 3.4 Procedimiento para el cálculo de la corriente de cortocircuito :

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1.- Teniendo el diagrama de los elementos limitadores de la corriente de cortocircuito (figura 45).

2.- Una vez obtenidos los valores de resistencia de los elementos involucrados en el diagrama de limitadores de la corriente de cortocircuito.

$$R_{TR} = 0.0164031 \Omega$$

$$R_{BLOQUE RECTIFICADOR} = 0.16 \Omega$$

Quedando por calcular los valores de resistencia del cable ( $R_{CABLE ALIMENTADOR}$ ) y de los elementos limitadores de Vías ( $R_{PISTA-RIEL-BARRA GUIA}$ ), al multiplicar el valor obtenido por la unidad de longitud ( $L$ ), en este caso el punto de falla.

$$R_{CABLE ALIMENTADOR} = 0.3118408 \text{ m } \Omega$$

$$R_{PISTA-RIEL-BARRA GUIA} \times L = ( 0.0196774 \Omega / \text{km} ) \times 0.640 \text{ km} \\ = 0.012593536 \Omega$$

Y así tenemos los valores para encontrar el valor de la resistencia equivalente total ( $R_{EQUIVALENTE TOTAL}$ ) del circuito de limitadores de la corriente de cortocircuito.

Sustituyendo valores :

$$R_{EQUIVALENTE TOTAL} =$$

$$R_{TR} - R_{BLOQUE RECTIFICADOR} + R_{CABLE ALIMENTADOR} + R_{PISTA-RIEL-BARRA GUIA}$$

$$R_{EQUIVALENTE TOTAL} = 0.0164031 \Omega + 0.16 \Omega + 0.3118408 \text{ m } \Omega + 0.012593536 \Omega \\ = 0.189308 \Omega$$

$$R_{EQUIVALENTE TOTAL} = 0.189308 \Omega$$



### 3.4.5 Cálculo de la corriente de cortocircuito para un punto de falla intermedio.

Por lo tanto teniendo el valor de la **REQUIVALENTE TOTAL** y teniendo un valor de tensión de 751 volts que es la tensión de salida de las Subestaciones de Rectificación para alimentar Vías, aplicando la Ley de Ohm, obtenemos el valor de corriente de cortocircuito en un punto de falla que se presenta en el sistema eléctrico alimentado por una Subestación de Rectificación :

$$I_{cc} \text{ VIVEROS} = \frac{751 \text{ volts}}{0.189308 \Omega} = 3967.0801 \text{ Amperes}$$

### 3.4.6 Cálculo de la corriente de cortocircuito total (**I<sub>CC</sub> TOTAL**) para un punto de falla intermedio.

Y como tenemos 2 fuentes aportadoras de corriente, situadas a la misma distancia del lugar donde se presenta el punto de falla, generan el mismo valor de corriente de cortocircuito por lo tanto la corriente de cortocircuito total será:

$$I_{cc} \text{ TOTAL} = I_{cc} \text{ VIVEROS} + I_{cc} \text{ M.A.Q.}$$

$$I_{cc} \text{ TOTAL} = 3697.08.01 \text{ A} + 3697.0801 \text{ A} = 7394.1602 \text{ Amperes}$$

El cual es el valor total de la corriente de cortocircuito para una falla intermedia en la Zona G.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5 Cálculo de la corriente de cortocircuito para un punto de falla en cables alimentadores.

Si consideramos un segundo caso de tipo de falla, y consideramos una falla a la salida de la Subestación de Rectificación Viveros (SR VIVEROS), tenemos un valor máximo de la corriente de cortocircuito para la SR VIVEROS y un valor mínimo para la Subestación de Rectificación Miguel Angel de Quevedo (SR M.A.Q.). Esto se muestra en la figura 46.

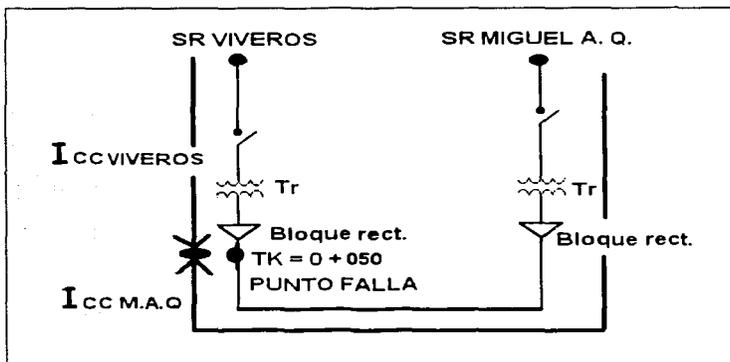


Figura 46. Punto de falla en los cables alimentadores de Vías.

A partir del proceso indicado en el subtema anterior, se realiza el cálculo de los valores de los elementos limitadores correspondientes a cada Subestación de Rectificación, y con ellos se puede conocer el valor de la corriente de cortocircuito para este segundo punto de falla.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5.1 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en cables alimentadores de Vías de la Subestación de Rectificación VIVEROS.

Subestación de Rectificación Viveros (SR VIVEROS) .

En la figura 47 tenemos el diagrama de la sección correspondiente a la SR VIVEROS, en cuanto a los elementos que forman parte del circuito de limitadores.

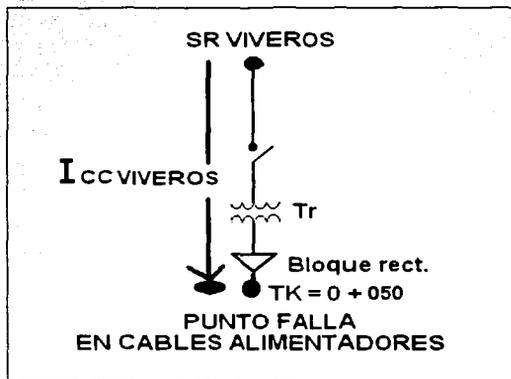


Figura 47. Diagrama de elementos limitadores en la SR VIVEROS.

#### 3.5.1.1 Trazo del diagrama para los limitadores de la corriente de cortocircuito.

De la figura 47 se observa que el punto de falla se presenta a 50 metros en el cable alimentador de Vías, y a continuación se muestra el diagrama de limitadores de la corriente de cortocircuito en dicha Subestación de Rectificación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

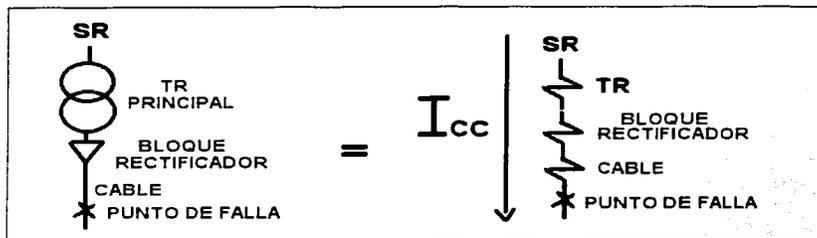


Figura 48. Diagrama de limitadores para un punto de falla en cables alimentadores de Vías.

De la figura 48 se observa que la expresión para calcular la corriente de cortocircuito correspondiente es :

$$I_{CC} = \frac{\text{TENSION DE OPERACIÓN}}{R_{TR \text{ PRINCIPAL}} + R_{BLOQUE \text{ RECT.}} + R_{CABLE}}$$

### 3.5.1.2 Cálculo del valor de la Resistencia equivalente total ( **REQUIVALENTE TOTAL** ) del circuito de limitadores.

Siguiendo el procedimiento mostrado en el punto anterior, una vez obtenido el diagrama de los elementos limitadores de la corriente de cortocircuito, el siguiente paso es calcular el valor de la Resistencia equivalente total ( **REQUIVALENTE TOTAL** ) en base a los elementos siguientes :

$$\text{REQUIVALENTE TOTAL} = R_{TR} + R_{BLOQUE \text{ RECTIFICADOR}} + R_{CABLE \text{ ALIMENTADOR}}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Conociendo los valores de :

$$R_{TR} = 0.0164031 \Omega$$

$$R_{BLOQUE RECTIFICADOR} = 0.16 \Omega$$

Valores que fueron calculados en el Subtema 3.4.3.

El valor resistivo a recalcular es el del cable alimentador. por lo que :

$$R_{CABLE ALIMENTADOR} = (0.068038 \Omega / Km) (0.05 Km) = 0.0034019 \Omega$$

Calculando la Resistencia equivalente total :

$$\begin{aligned} R_{EQUIVALENTE TOTAL} &= R_{TR} + R_{BLOQUE RECTIFICADOR} + R_{CABLE ALIMENTADOR} \\ &= 0.0164031\Omega + 0.16 \Omega + 0.0034019 \Omega \\ &= 0.179805 \Omega \end{aligned}$$

$$R_{EQUIVALENTE TOTAL} = 0.179805 \Omega$$

### 3.5.1.3 Calculo de la corriente de cortocircuito de la Subestación de Rectificación VIVEROS para el calculo de una falla en cables alimentadores.

Calculando el valor de la corriente de cortocircuito. una vez obtenido el valor de la Resistencia equivalente total ( $R_{EQUIVALENTE TOTAL}$ ), mediante la Ley de Ohm :

$$I_{CC VIVEROS} = \frac{751 \text{ VOLTS}}{0.179805 \Omega} = 4176.7470 \text{ Amperes}$$

TEMA CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5.2 Preparación de los elementos para el cálculo de la corriente de cortocircuito en cables alimentadores de Vías de la Subestación de Rectificación MIGUEL ANGEL DE QUEVEDO (SR M.A.Q.).

En la figura 49 se observa el diagrama de limitadores para la SR M.A.Q.

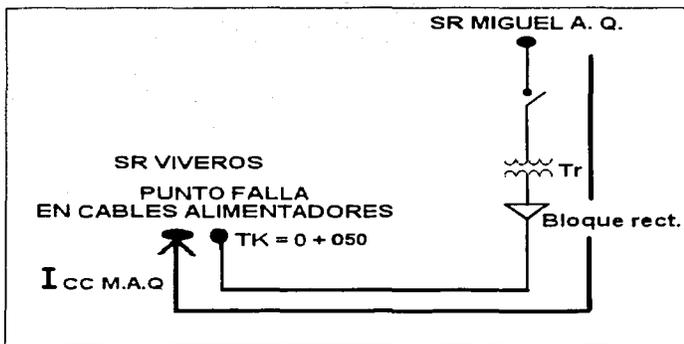


Figura 49. Diagrama del punto de falla correspondiente a la SR M.A.Q.

#### 3.5.2.1 Trazo del diagrama para los limitadores de la corriente de cortocircuito.

Se obtiene el diagrama de los elementos limitadores de la corriente de cortocircuito a partir de la figura 49, el cual se muestra en la figura 50.

**TESTS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ALTA DE OI**

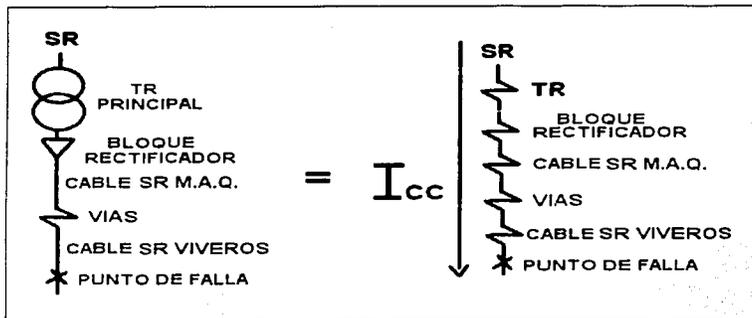


Figura 50 Diagrama de limitadores correspondiente a la SR M.A.Q.

De la figura 50 se observa que la expresión para calcular la corriente de cortocircuito correspondiente es :

$$I_{cc} = \frac{\text{TENSION DE OPERACIÓN}}{R_{TR \text{ PRINCIPAL}} + R_{BLOQUE \text{ RECT}} + R_{CABLE \text{ M.A.Q.}} + R_{VIAS} + R_{CABLE \text{ VIVEROS}}$$

### 3.5.2.2 Cálculo del valor de la Resistencia equivalente total ( REQUIVALENTE TOTAL ) del circuito de limitadores.

El siguiente paso es calcular el valor de la Resistencia equivalente total ( REQUIVALENTE TOTAL ) en base a los elementos siguientes :

$$\text{REQUIVALENTE TOTAL} = R_{CABLE \text{ ALIMENTADOR VIVEROS}} + R_{TR} + R_{BLOQUE \text{ RECTIFICADOR}} + R_{CABLE \text{ ALIMENTADOR M.A.Q.}} + R_{PISTA\text{-}RIEL\text{-}BARRA \text{ GUIA}}$$

TEJES CON  
LLA DE ORIGEN

Los valores conocidos son :

$$\mathbf{RTR = 0.0164031 \Omega}$$

$$\mathbf{RBLOQUE RECTIFICADOR = 0.16 \Omega}$$

Mientras que los valores por calcular son :

$$\mathbf{RCABLE ALIMENTADOR VIVEROS = ( 0.068038 \Omega / Km ) ( 0.005 Km ) = 0.00034019 \Omega}$$

$$\mathbf{RCABLE ALIMENTADOR M.A.Q. = ( 0.068038 \Omega / Km ) ( 0.055 Km )}$$

$$\mathbf{= 0.00374209 \Omega}$$

La resistencia de los elementos en Vías :

$$\mathbf{RPISTA-RIEL-BARRA GUIA = ( 0.0196774 \Omega/Km \times 1.28 Km ) = 0.0251870 \Omega}$$

Y calculando el valor de la **REQUIVALENTE TOTAL** en base a los elementos anteriores, sustituyendo valores en la expresión :

$$\mathbf{REQUIVALENTE TOTAL =}$$

$$\mathbf{RCABLE ALIMENTADOR VIVEROS + RTR + RBLOQUE RECTIFICADOR +}$$

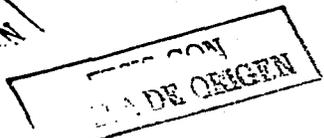
$$\mathbf{RCABLE ALIMENTADOR M.A.Q. + RPISTA-RIEL-BARRA GUIA}$$

$$\mathbf{REQUIVALENTE TOTAL =}$$

$$\mathbf{= 0.00034019 \Omega + 0.0164031 + 0.16 + 0.00374209 \Omega + 0.0251870 \Omega}$$

$$\mathbf{= 0.06167238 \Omega}$$

$$\mathbf{REQUIVALENTE TOTAL = 0.24147738 \Omega}$$



### 3.5.2.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito de la Subestación de Rectificación M.A.Q. para el cálculo de una falla en cables alimentadores.

Calculando el valor de la corriente de cortocircuito, una vez obtenido el valor de la Resistencia equivalente total (**REQUIVALENTE TOTAL**), mediante la Ley de Ohm :

$$\mathbf{I_{CC \ M.A.Q.} = \frac{751 \ \text{VOLTS}}{0.24147738 \ \Omega} = 3110.022 \ \text{Amperes}}$$

### 3.5.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito total (**I<sub>CC TOTAL</sub>**) :

$$\mathbf{I_{CC \ TOTAL} = I_{CC \ VIVEROS} + I_{CC \ M.A.Q.}}$$

$$\mathbf{I_{CC \ TOTAL} = 4176.7470 \ \text{A} + 3110.022\text{A} = 7286.769 \ \text{Amperes}}$$

El cual representa el valor de la corriente de cortocircuito para una falla en cables alimentadores.



## CONCLUSIONES

Se obtuvieron los valores máximos y mínimos de la Corriente de cortocircuito para cada Subestación, según el tramo o zona donde se presentara este, comprendiendo un valor máximo cuando se presenta el cortocircuito (disturbio) en una zona mas cercana de la Subestación de rectificación, mientras que cuando mas alejado se encuentre este de la Subestación de Rectificación se tendra un valor minimo de la corriente de cortocircuito.

Cabe mencionar que cuando en determinada zona no existe circulación de trenes, existe una corriente con valor de 0 Amperes, debido a que el circuito se encuentra abierto, y cuando se presenta una demanda máxima de corriente es cuando en la zona en cuestión existe un numero inusual de trenes.

Es importante mencionar que cuando se presenta un disturbio (falla monofásica) con su respectiva corriente de cortocircuito, y es de gran magnitud, se dañan los elementos que conforman la red de distribución eléctrica que forman las Subestaciones de Rectificación (SR) como son : en primer lugar los diodos , transformadores, cables, cargas, por lo cual es importante proteger estos elementos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La protección selectiva de los sistemas eléctricos de potencia se inicia con el cálculo de la corriente de cortocircuito como la realizada en el presente trabajo. El objeto de un estudio de cortocircuito como se menciona es para posteriormente desarrollar una selección adecuada de los dispositivos protectores a utilizar como lo son los disyuntores y/o fusibles, esto dependiendo del diseño.

Se deja abierto el presente trabajo para desarrollar un Estudio de Selección de Interruptores que puede ser tomado para posteriores trabajos de investigación

A continuación se presentan las tablas que contienen los datos obtenidos en los casos en que se realizó el estudio de cortocircuito.



Calculo de cortocircuito para la zona alimentada en 23 kV del Sisiema de Transporte Colectivo "METRO"

	S. R. VIVEROS				S. R. MIGUEL ANGEL DE QUEVEDO				RTOTAL (Ohms)	VTENSION EN VIAS (Volts)	I CORTO CIRCUITO (Amperes)
	RTR (Ohms)	RRELO RECT (Ohms)	RCABLE ALIMENTADOR (Ohms)	RRIEL PISTA BARRA GUIA (Ohms)	RTR (Ohms)	RRELO RECT (Ohms)	RCABLE ALIMENTADOR (Ohms)	RRIEL PISTA BARRA GUIA (Ohms)			
CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UN PUNTO DE FALLA INTERMEDIO	0.0164031	0.16	0.3119408	0.012593536	0.016403	0.16	0.3119408	0.012593536	RVVEROS = 0.189308 RMAQ = 0.189308	751	7394.1602
CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO PARA UN PUNTO DE FALLA EN CABLES ALIMENTADORES	0.0164031	0.16	0.0034019	---	0.016403	0.16	0.00374209	0.025187	RVVEROS = 0.179805 RMAQ = 0.24147738	751	7286.769

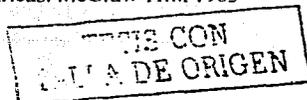
114

TRABAJOS CON  
DE ORIGEN

## BIBLIOGRAFIA

### Libros:

1. Coiné Electrical School. "Manual Coiné de Equipo Eléctrico y Electrónico".
2. Sierra madrigal Víctor (1985). "Manual técnico de cables de energía", México. Mc Graw-Hill.
3. Sistema de Transporte Colectivo (1991). "Distribución de la energía eléctrica". México : Instituto de Capacitación y Desarrollo.
4. Sistema de transporte Colectivo. "Control y distribución de la Energía eléctrica".. México Instituto de Capacitación y Desarrollo.
5. Sistema de Transporte Colectivo . "Subestaciones eléctricas en el STC". México : Instituto de Capacitación y Desarrollo.
6. Enriquez Harper, Gilberto (1996), "Elementos de diseño de instalaciones industriales". LIMUSA.
7. Fink D.G./ H.W. Beaty "Standard Handbook for Electrical Engineers" 14th.Ed . McGrawHill.
8. "Estaciones transformadoras y de distribución. Estudio , regulación y ensayo". Ediciones Gili (1982).
9. Irwin Lazar . "Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales".. Noriega Edit. México.
10. Enriquez Harper, Gilberto. "El ABC de las instalaciones eléctricas industriales" . Limusa-Noriega editores.
11. Pansini, Anthony J.. "Electrical Transformers and Power Equipment Third Edition".
12. Wheterill. "Transformadores, reguladores y reactancias".
13. Pitta, Albert F., Instalaciones eléctricas. Edit. Dossat.
14. Ramírez Vázquez, José. Instalaciones eléctricas. Barcelona: Ceac, 1980-9999
15. Foley, Joseph H. Fundamentos de instalaciones eléctricas. McGraw-Hill. 1983



16. Richter, Herbert P. Manual practico de instalaciones eléctricas.  
Edit Continental.

Catálogos :

- \* 0Conductores eléctricos. México. Grupo Condumex.

Normas :

1. IEEE-ANSI STD 141 (1986). "IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants. RED BOOK".
2. IEE STD 242 (1986). "IEEE BUFF BOOK . Protection and coordination of industrial and comercial power systems".
3. IEEE-Std C2.1997 NESC (National Electric Safety Code) (Seguridad en Lineas y Subestaciones).
4. RED BOOK. Std 141-1993 "Recommend Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants"

RECIBO CON  
FALLA DE ORIGEN