



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Ingeniería Eléctrica

**“ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA, CORTO CIRCUITO Y  
COORDINACIÓN DE PROTECCIONES, PARA SISTEMA  
ELÉCTRICO MINERO CONECTADO EN 138 KV, QUE ENERGIZA A  
MOTORES EN 4160 V DE 900 HP, Y 480 V DE 75 HP.”**

# **T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTAN

**C. CHIMAL JAIMES CESAR GIOVANNI**

**C. RODEA AGUILAR MIGUEL**

ASESORES

**Ing. Evaristo Velázquez Càzares**

**Ing. Isabel Albarrán Rosas**

**MÉXICO D.F. 25 de Marzo de 2014**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"**

**REPORTE TÉCNICO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN  
DEBERA (N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA  
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
CESAR GIOVANNI CHIMAL JAIMES  
MIGUEL RODEA AGUILAR

**"ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA, CORTO CIRCUITO Y COORDINACIÓN DE  
PROTECCIONES, PARA SISTEMA ELÉCTRICO MINERO CONECTADO EN 138kV, QUE  
ENERGIZA A MOTORES EN 4160V DE 900 HP Y 480V DE 75HP"**

REALIZAR UNA COORDINACION DE PROTECCIONES A TRAVÉS DE UNA RED ELÉCTRICA  
DE UNA MINERA QUE SUMINISTRA ENERGÍA A MOTORES DE 75HP EN 480V Y 900HP EN  
4160V, SIMULADO A TRAVÉS DE SOFTWARE SKM POWER TOOLS.

- INTRODUCCIÓN A LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO MINERO.
- ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA O FLUJOS POTENCIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO.
- ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.
- SIMULACIÓN CON RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE CON EL PROGRAMA SKM POWER TOOLS.
- ESTUDIO ECONÓMICO DE PROYECTO.
- CONCLUSIONES.

**MEXICO D.F., A 28 DE FEBRERO DEL 2014**

**ASESOR**

  
ING. EVARISTO VELÁZQUEZ CAZARES

  
M. EN C. ISABEL ALBARRAN CARMONA

  
ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTIZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO  
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

## *Agradecimientos*

MIGUEL RODEA AGUILAR

A mis padres

Les estoy profundamente agradecido por estar siempre conmigo apoyándome en cada uno de los obstáculos en la que nos vimos envueltos y que fuimos superando como la gran familia que somos, cada uno de ustedes no se esperanzó en algún tipo de milagro divino, ni se doblegaron ante nada, sino que se actuaron de la mejor forma posible para salir siempre adelante y motivándonos en que podemos estar siempre mejor, ensañando a mis hermanos y a mí, lo mejor que tienen de ustedes como padres, pareja y humanos.

A mis hermanos

Por todas esas aventuras y momentos de la infancia en los que todos jugamos en la sala, recuerdos que jamás olvidare, por dejarme observar sus vidas y ver como mis padres sirvieron de ejemplo para ustedes.

Al ingeniero Rubén Navarro Bustos

La persona que por circunstancias de la vida me fue influenciando aun antes de conocerlo, enfocándose a ser un profesional exitoso y teniendo siempre fe en mí, tratando de sacar al ingeniero electricista interno, una persona a la cual quiero demasiado y considero un gran amigo y abuelo del alma mater. Nunca realizo un proyecto sin antes preguntarme ¿Que diría el ingeniero Navarro sobre esto?

Al ingeniero Evaristo Velázquez Cazares

Por su apoyo y paciencia en la realización de este trabajo, por ser un gran amigo el cual nos aportó su conocimiento sobre la ingeniería eléctrica.

A IHESA

Por ser la primera empresa que me abrió las puertas al ámbito profesional, a todos mis compañeros que a lo largo de las experiencias se volvieron mis profesores de campo y excelentes amigos, personas a las que nunca olvido y siempre están presentes en cada proyecto que he realizado.

A Chimal Jaimes Cesar Giovanni

Un amigo que me invito a participar en la elaboración de esta tesis y que hemos compartido las dificultades de este trabajo que nos acompañara a lo largo de nuestras vidas.

Cesar Giovanni Chimal Jaimes

A mis Padres y Hermanos

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A Angie Paola Bermúdez Amorocho

Por todo el apoyo que me ha dado, que ha estado conmigo en situaciones difíciles, que todos los logros, son también son tuyos, Por la bondad y sacrificio inspiraste a dar lo mejor de mi. Y puedo decir que esta tesis lleva mucho de ti, Gracias por estar a mi lado.

A Marcela Bermúdez y Emily Valeria

Por ser las personas que siempre han estado conmigo y me han apoyado cada momento de mi vida, a pesar de las circunstancias nunca han dejado de apoyarme, e incondicionalmente han estado conmigo y es un logro que me gusta compartir con ustedes.

Al Ing. Evaristo Velázquez Cazares

Le Agradezco por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo, por los consejos, el apoyo y el ánimo que me brindó, por su paciencia ante mi inconsistencia y sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y mas que nada por su Gran Amistad.

A Miguel Rodea

A mi compañero que acepto apoyarme a realizar este trabajo, que sabe lo duro que ha sido la elaboración de esta tesis, por el tiempo que ha prestado para seguir apoyándome a lo largo de este trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y Profesores

Por permitirme pertenecer a tan distinguida institución y a mis maestros que en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que pone la vida, a todos y cada uno de ellos les dedico cada una de estas paginas de mi tesis.

## Índice de Contenidos

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| Introducción.....                  | 1        |
| Objetivo.....                      | 1        |
| <i>Objetivos. Específicos.....</i> | <i>1</i> |
| Justificación.....                 | 2        |
| Planteamiento del Problema.....    | 2        |

## Capítulo 1 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA O FLUJOS DE POTENCIA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO. 4

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Introducción a los flujos de carga.....                          | 4  |
| 1.2 Planteamiento del Problema Básico.....                           | 4  |
| 1.3 Modelado de representación del SEP .....                         | 6  |
| 1.3.1 Tipos de Barras.....                                           | 6  |
| 1.3.2 Representación de los elementos del SEP.....                   | 6  |
| 1.4 Planteamiento del problema para un SEP de “n” barras .....       | 7  |
| 1.4.1 Ecuaciones de Barra .....                                      | 7  |
| 1.4.2 Ecuaciones de flujo de potencia.....                           | 7  |
| 1.4.3 Potencia perdida en la transmisión.....                        | 8  |
| 1.4.4 Calculo de las tensiones de barra.....                         | 8  |
| 1.5 Técnicas de solución para el problema de flujos de potencia..... | 9  |
| 1.5.1 Método de Gauss .....                                          | 9  |
| 1.5.2 Método de Gauss-Seidel.....                                    | 11 |
| 1.5.3 Método de Newton Raphson.....                                  | 15 |
| 1.5.4 Método de Newton-Raphson desacoplado (MNRD).....               | 22 |
| 1.5.5 Método de Newton-Raphson desacoplado rápido (MNRDR).....       | 23 |

## Capítulo 2 ESTUDIO DE CIRCUITO CORTO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO..... 27

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introducción al estudio de corto circuito.....       | 27 |
| 2.2 La naturaleza de la corriente de circuito cortó..... | 27 |
| 2.3 Efectos de la corriente de circuito cortó.....       | 27 |
| 2.4 Fuentes de corriente de corto circuito.....          | 29 |
| 2.4.1 Generadores.....                                   | 30 |
| 2.4.2 Motores síncronos.....                             | 30 |
| 2.4.3 Motores de inducción.....                          | 30 |
| 2.5 Sistema de la compañía suministradora.....           | 31 |
| 2.6 Tipos de Fallas.....                                 | 31 |
| 2.7 Corto circuito en general.....                       | 32 |
| 2.7.1 Método de las componentes simétricas.....          | 32 |

## Capítulo 3 Simulaciones Con Relevadores de Sobrecorriente con el Programa SKM Power Tools43

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Relevadores Direccionales de Sobrecorriente ..... | 43 |
| 3.2 Construcción .....                                | 43 |
| 3.3 Principio de Operación .....                      | 44 |
| 3.4 Conexiones del Relevador .....                    | 44 |
| 3.4.1 30 ° conexión (0° AMT).....                     | 45 |
| 3.4.2 60 ° Conexión (0 ° AMT) .....                   | 45 |
| 3.4.3 90 ° de conexión (30 ° AMT) .....               | 47 |
| 3.4.4 90 ° de conexión (45 ° AMT).....                | 47 |
| 3.5 Relés direccionales de falla a tierra.....        | 48 |
| 3.6 Coordinación de las unidades instantáneas.....    | 54 |

|                                                        |                                                                                                             |           |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7                                                    | Ajuste del tiempo de las unidades de sobrecorriente direccional .....                                       | 58        |
| 3.7.1                                                  | <i>Ajuste de pick-up</i> .....                                                                              | 58        |
| 3.7.2                                                  | <i>Ajustes Tiempo</i> .....                                                                                 | 59        |
| 3.7.3                                                  | <i>Ajuste de Tiempo por el método directo</i> .....                                                         | 59        |
| 3.8                                                    | Resultados del programa SKM PTW Power Tools para sistema de 138kV que suministra energía a dos motores..... | 65        |
| <b>Capítulo 4 Estudio Económico del Proyecto .....</b> |                                                                                                             | <b>76</b> |
| 4.1                                                    | Introducción .....                                                                                          | 76        |
| 4.2                                                    | Análisis Económico del Proyecto.....                                                                        | 76        |
| <b>Capítulo 5 Conclusiones .....</b>                   |                                                                                                             | <b>77</b> |
| 5.1                                                    | Conclusiones .....                                                                                          | 77        |
| 5.2                                                    | Aportaciones .....                                                                                          | 78        |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Sistema elemental de dos barras para plantear el problema básico.....                                   | 5  |
| Figura 1.2 Circuito equivalente por fase del sistema de la Figura 1.1.....                                         | 5  |
| Figura 1.3 Circuito equivalente $\pi$ de una línea para el calculo de flujos de potencia .....                     | 7  |
| Figura 1.4 Modelación circuital en sistema por unidad de un transformador con cambio de TAP.....                   | 7  |
| Figura 1.5 Representación de una Barra p en un SEP .....                                                           | 7  |
| Figura 1.6 Sistema de tres barras para explicar el método de Gauss – Seidel $Y_B$ .....                            | 13 |
| Figura 1.7 Diagrama de flujo del algoritmo de Newton-Raphson.....                                                  | 21 |
| Figura 2.1 Relación entre fuente suministradora de energía y la conexión de falla.....                             | 28 |
| Figura 2.2 Sistema de potencia para ejemplo de componentes simetricas .....                                        | 33 |
| Figura 2.3 Red de secuencia positiva .....                                                                         | 34 |
| Figura 2.4 Red de secuencia negativa .....                                                                         | 34 |
| Figura 2.5 Red de secuencia cero .....                                                                             | 35 |
| Figura 2.6 Impedancia de secuencia positiva de thevenin .....                                                      | 35 |
| Figura 2.7 Impedancia de secuencia negativa de thevenin .....                                                      | 36 |
| Figura 2.8 Impedancia de secuencia cero de thevenin.....                                                           | 36 |
| Figura 2.9 Red de secuencia positiva cortocircuitadas .....                                                        | 37 |
| Figura 2.10 Redes de secuencia positiva, negativa y cero conectadas en serie a las terminales de falla.....        | 38 |
| Figura 2.11 Redes de secuencia positiva y negativa conectadas en paralelo en las terminales de falla.....          | 39 |
| Figura 2.12 Redes de secuencia positiva, negativa y cero conectadas en paralelo con tensión en la falla.....       | 41 |
| Figura 3.1 Aplicación derelés de sobrecorrientedireccionales: (a) sistema de anillo; (b) sistema multifuente ..... | 43 |
| Figura 3.2 Obtención de ladirecciónde los flujo de potencia: (a) por supervisión; (b) porcontrol .....             | 44 |
| Figura 3.3 Diagrama Vectorial para 30 ° conexión (0° AMT) .....                                                    | 45 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.4 Diagrama Vectorial para 60 ° conexión (0° AMT) .....                                                                                                                                               | 46 |
| Figura 3.5 Diagrama Vectorial para 90 ° conexión (30° AMT).....                                                                                                                                               | 46 |
| Figura 3.6 Diagrama Vectorial para 90 ° conexión (45° AMT).....                                                                                                                                               | 47 |
| Figura 3.7 Diagrama unifilardelsistemapara el ejemplo3.1 .....                                                                                                                                                | 48 |
| Figura 3.8 Redes de secuencia para el Ejemplo 3.1 .....                                                                                                                                                       | 49 |
| Figura 3.9 Circuito equivalente para la Figura 3.8.....                                                                                                                                                       | 50 |
| Figura 3.10 Análisis de funcionamiento del relé para la fase A.....                                                                                                                                           | 53 |
| Figura 3.11 Análisis de funcionamiento del relé para la fase B.....                                                                                                                                           | 53 |
| Figura 3.12 Diagrama unifilar de un sistema de anillo con una apertura en el Ejemplo 4.2 .....                                                                                                                | 54 |
| Figura 3.13 Circuito Equivalente para una falla en J (ejemplo 4.2).....                                                                                                                                       | 56 |
| Figura 3.14 Circuito Equivalente para una Falla en K (ejemplo 4.2) .....                                                                                                                                      | 56 |
| Figura 3.15 Circuito Equivalente para una falla en L (ejemplo 4.2) .....                                                                                                                                      | 58 |
| Figura 3.16 Sistema deanillopara ilustrarel procedimientode ajuste del relédireccional desobrecorriente .....                                                                                                 | 61 |
| Figura 3.17 Corriente de cortocircuito para fallas en automático "(a) falla asociada con R <sub>21</sub> con anillo cerrado,. (b) fallo asociado con R <sub>II</sub> con el anillo abierto en R <sub>21</sub> | 63 |
| Figura 3.18 Diagrama unifilar de la red eléctrica, mostrando los valores de corrientes de falla.....                                                                                                          | 65 |
| Figura 3.19 Diagrama unifilar de la red eléctrica, mostrando los valores de caída de tensión.....                                                                                                             | 67 |
| Figura 3.20 Diagrama unifilar completo para alimentación de los motores, estudio de corto circuito.....                                                                                                       | 69 |
| Figura 3.21 ramal B conexiones de motor de 900HP en 4160V.....                                                                                                                                                | 70 |
| Figura 3.22 Ramal B, curvas de operación de los equipos eléctricos.....                                                                                                                                       | 71 |
| Figura 3.23 ramal A conexiones de motor de 75 HP en 480 V.....                                                                                                                                                | 72 |
| Figura 3.24 Ramal A, curvas de operación de los equipos eléctricos.....                                                                                                                                       | 73 |
| Figura 3.25 Acometida principal 138000 V.....                                                                                                                                                                 | 74 |
| Figura 3.26 Coordinación de los equipos de la acometida principal en 138,000 V. ....                                                                                                                          | 75 |



### *Índice de Tablas*

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 Resumen de los procedimientos para los ajustes de tiempo para el sistema de anillo de la Figura 3.16..... | 64 |
| Tabla 3.2 Tabla de corrientes de falla.....                                                                         | 66 |
| Tabla 3.3 Tabla de caídas de tensión.....                                                                           | 68 |
| Tabla 3.4 Tabla de capacidades conductivas y corriente nominal de los circuitos ramales .....                       | 68 |
| Tabla 3.5 Tabla de transformadores, se muestra las corrientes de operación.....                                     | 68 |
| Tabla 4.1 Equipos.....                                                                                              | 76 |
| Tabla 4.2 Ingeniería del Proyecto.....                                                                              | 76 |
| Tabla 4.3 Construcción, Instalación y Mano de obra .....                                                            | 76 |
| Tabla 5.1 Ajuste de relevadores .....                                                                               | 77 |



## Introducción

La coordinación de protecciones representa no solo seguridad operacional, sino también económica. Un buen sistema de protecciones ayuda a justificar, a largo plazo, la inversión que realizan las empresas al adquirir equipos tales como transformadores de potencia o distribución, generadores, líneas de transmisión y más equipos instalados.

El estudio de coordinación requiere de varios análisis previos para que así se garantice una adecuada calibración y ajuste de los dispositivos de protección dentro del sistema, siendo el análisis de flujo de carga y el estudio de corto circuito los más necesarios. El primero permite establecer las condiciones actuales de los elementos del sistema eléctrico en cuestión, mientras que el análisis de corto circuito determina la magnitud de los esfuerzos eléctricos a los cuales podrían ser sometidos los equipos del sistema, en caso de producirse una falla en el sistema.

Es por eso que este estudio de coordinación de protecciones para una minera describe y analiza dichos estudios con el fin de establecer los criterios bajo los cuales se propondrá una coordinación de equipos de protección.

## Objetivo

Realizar una coordinación de protecciones a través del análisis de una red eléctrica para la industria minera que suministrara energía a motores de 75 HP en 480 V y 900 HP en 4160 V, simulándolo a través de software SKM power tools.

## Objetivos. Específicos.

- Mostrar los métodos para la solución de los estudios de flujos de carga o potencia
- Mostrar los métodos de solución para el estudio de corto circuito.
- Realizar simulación en software de sistemas eléctricos SKM Power Tool.
- Mostrar los resultados del software.
- Dar los ajustes de las protecciones con base a los resultados.



## Justificación

Se requiere hacer la coordinación de protecciones para este tipo de red eléctrica minera, donde una falla en la instalación eléctrica que no se aíse en tiempo adecuado, genera inseguridad al usuario y al sistema, las probables contingencias de una mala coordinación de protecciones y selección de equipos son: muerte al personal, cortes de servicio y daños a otras estructuras de la industria.

Este tipo de estudios se realizara para poder determinar los equipos y actualizar las condiciones de la instalación.

El Estudio de Coordinación de Protecciones tiene un impacto directo sobre la seguridad eléctrica y el servicio. En caso de presentarse una falla por sobrecorrientes, la protección deberá operar inmediatamente antes de que los equipos se dañen y se provoque (un incendio). El dispositivo que protege al circuito deberá aislar la falla sin que las otras protecciones tengan que operar.

De acuerdo a la Ley sobre Instalaciones, Suministro y Uso de la Energía Eléctrica (NOM-001-SEDE-2012) en el art. 240-12. Coordinación de los sistemas eléctricos. Cuando se requiera una interrupción ordenada para minimizar el riesgo o riesgos para las personas y para el equipo, se permite un sistema de coordinación basado en las dos condiciones siguientes:

- 1) Protección coordinada contra cortocircuitos.
- 2) Indicación de sobrecarga mediante sistemas o dispositivos de supervisión.

La coordinación se define como la localización adecuada de una condición de falla para limitar las interrupciones de suministro a los equipos afectados, realizada mediante dispositivos selectivos de protección contra fallas, “deben coordinarse de tal manera que permita a los dispositivos de protección del circuito, eliminar una falla sin que ocurran daños que se extiendan a los componentes eléctricos del mismo”.

## Planteamiento del Problema

Una red de energía eléctrica requiere diversos equipos que estén interconectados para poder suministrar electricidad a las cargas, todos estos elementos necesitan un dimensionamiento adecuado para poder soportar distintos esfuerzos eléctricos, térmicos y mecánicos.

Para poder especificar algunos equipos eléctricos lo primero que se necesita son los parámetros en los cuales va operar de forma nominal y los parámetros de falla. Los valores de falla se obtienen realizando los estudios de flujos de carga y corto circuito.



En la actualidad los cálculos se realizan en software de ingeniería debido a que son herramientas que reducen el tiempo de trabajo y facilitan el análisis de sistemas eléctricos, uno de estos programas se llama SKM Power-Tools. En nuestra tesis empleamos el SKM Power-Tools para apoyarnos en los cálculos y tener un análisis más profundo en nuestra red eléctrica.

Lo que se plantea en este documento es una simulación de una red eléctrica de distribución de 138000V principal y que integrara con dos transformadores que reducirán la tensión, para alimentar a motores de capacidades de 75HP en 480 V y 900HP en 4160 V, se tendrá que proporcionar el dimensionamiento de los elementos eléctricos así como los ajustes correspondientes a las protecciones para la adecuada operación del sistema.

Al dar un ajuste de protección se tomarán diferentes puntos de fallas y distintos tipos de fallas para asegurar una precisión en el valor. Con esto, proporcionamos seguridad y confiabilidad a la instalación.

Esto dará una propuesta de actualización de equipos en la red eléctrica y mostrara los ajustes necesarios para la adecuada operación de las protecciones.

El sistema se compone por el transformador principal de la industria con capacidad de 30 MVA conectado a la red de la compañía suministradora, reduciendo la tensión de 138,000 a 13,800 V, de ahí se derivan hacia las cargas, donde solo tomaremos dos ramales que alimentaran a la parte de fuerza de los motores. El ramal A se compone de protección principal y un transformador de 1000 kVA y reducirá la tensión de 13,800 V a 480 V, y el ramal B con su protección principal y reducirá la tensión de 13,800 V a 4160 V.



## Capítulo 1 ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA O FLUJOS DE POTENCIA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.

### 1.1 Introducción a los flujos de carga.

El cálculo y análisis del flujo de potencias en la red de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) es uno de los aspectos más importantes de su comportamiento en régimen permanente. Consiste en determinar los flujos de potencia activa y reactiva en cada línea del sistema y las tensiones en cada una de las barras, para ciertas condiciones preestablecidas de operación.

Hasta el año 1950, el Cálculo del Flujo de Potencias (CFP) se realizaba utilizando principalmente los Analizadores de Redes de Corriente Alterna y en algunos casos, los Analizadores de Redes de Corriente Continua que corresponden a una simulación a escala del Sistema Real. En la actualidad, el Cálculo de Flujos de Potencia se realiza fundamentalmente, utilizando computadoras por las grandes ventajas que éstos presentan respecto a los analizadores de redes.

El análisis del flujo de potencias permite:

1. Determinar las Caídas de tensión de cada uno de los elementos del sistema eléctrico.
2. Programar las ampliaciones necesarias del SEP y determinar su mejor modo de operación, teniendo en cuenta posibles nuevos consumos, nuevas líneas o nuevas centrales generadoras.
3. Estudiar los efectos sobre la distribución de potencias, cuando se producen pérdidas temporales de generación o circuitos de transmisión.
4. Ayudar a determinar los programas de despacho de carga para obtener un funcionamiento óptimo.

### 1.2 Planteamiento del Problema Básico

Considérese el SEP elemental de dos barras de la Figura 1.1 y su circuito equivalente por fase que se muestra en la Figura 1.2. La línea  $L_{12}$  se ha representado por su circuito  $\pi$  nominal y donde:

$\dot{S}_1$  y  $\dot{S}_2$ : Potencias complejas netas de las barra 1 y 2 respectivamente, representadas como fuentes de potencia activa y reactiva, que corresponden a la **Potencia Generada menos la Potencia Consumida**.

$\dot{S}_{12}$  y  $\dot{S}_{21}$ : Flujos de potencia compleja que van desde la barra 1 a la barra 2 y viceversa.

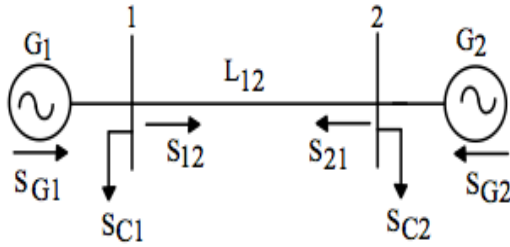


Figura 1.1 Sistema elemental de dos barras para plantear el problema básico

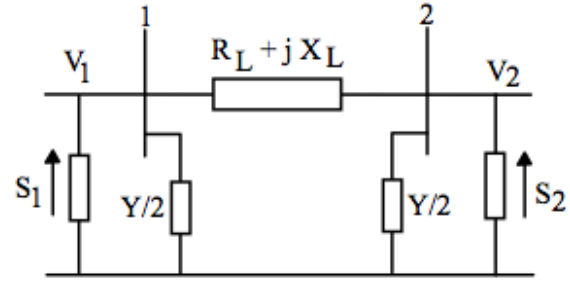


Figura 1.2 Circuito equivalente por fase del sistema de la Figura 1.1

En la Figura 1.1, las potencias completas netas de las barras 1 y 2 son:

$$\begin{aligned}\dot{S}_1 &= \dot{S}_{G1} - \dot{S}_{C1} = (P_{G1} - P_{C1}) + j(Q_{G1} - Q_{C1}) = P_1 + jQ_1 \\ \dot{S}_2 &= \dot{S}_{G2} - \dot{S}_{C2} = (P_{G2} - P_{C2}) + j(Q_{G2} - Q_{C2}) = P_2 + jQ_2\end{aligned}\quad (1.1)$$

En el circuito de la Figura 1.2 se puede escribir:

$$\begin{aligned}\frac{S_1^*}{V_1^*} &= \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} = \dot{V}_1 \frac{Y}{2} + \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{R_L + jX_L} \\ \frac{S_2^*}{V_2^*} &= \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = \dot{V}_2 \frac{Y}{2} + \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{R_L + jX_L}\end{aligned}\quad (1.2)$$

Estas ecuaciones, que relacionan las tensiones con las potencias activas y reactivas, presentan las siguientes características.

1. Son algebraicas y no lineales.
2. La frecuencia no aparece en forma explícita porque se supone como una constante.
3. El sistema de cuatro ecuaciones, tiene 12 variables en total:  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ,  $Q_{G1}$ ,  $Q_{G2}$ ,  $P_{C1}$ ,  $P_{C2}$ ,  $Q_{C1}$ ,  $Q_{C2}$ ,  $V_1$ ,  $\theta_1$ ,  $V_2$ ,  $\theta_2$ , por lo que no es posible obtener una solución para ninguna de ellas a menos que se reduzca el número de incógnitas, fijando de antemano algunas variables.

En relación a esto último, una forma posible de resolver el problema es la siguiente:

1. A partir de los datos del consumo suponer conocidas e independientes del voltaje, las potencias de las cargas  $P_{Ci}$ ,  $Q_{Ci}$ , donde  $i = 1, 2$ .
2. Fijar a prioridad dos variables de generación  $P_{G2}$  y  $Q_{G2}$  por ejemplo. No se pueden fijar las cuatro variables de generación debido a que las pérdidas en el sistema no son conocidas inicialmente.
3. Fijar el módulo y ángulo de la tensión en barra 1; es decir; suponer conocidos



$V_1, \theta_1$ . En particular, puede tomarse esta tensión como referencia, o sea,  $\theta_1=0$

En estas condiciones, el sistema de 4 ecuaciones (1.2) queda con sólo 4 variables:  $P_{G1}, Q_{G1}, V_2, \theta_2$ .

### 1.3 Modelado de representación del SEP

Teniendo presente el análisis del problema básico y con el objeto de establecer un procedimiento general para el CFP, es necesario considerar lo siguiente:

#### 1.3.1 Tipos de Barras

Asociados a cada barra  $p$  de un SEP existen cuatro variables,  $P_p; Q_p; V_p; \theta_p$ . Según las variables conocidas y desconocidas, las barras se clasifican en los siguientes grupos:

1. **Barras de carga (Barras P-Q):**  $P_p$  y  $Q_p$  están especificadas;  $V_p$  y  $\theta_p$  son las incógnitas.
2. **Barras de tensión controlada (Barra P-V):**  $P_p$  y  $V_p$  están especificadas;  $Q_p$  y  $\theta_p$  son las incógnitas. Este tipo de barras debe existir alguna fuente controlable de potencia reactiva.
3. **Barra flotante (Barra V):**  $V_p$  y  $\theta_p$  están especificados;  $P_p$  y  $Q_p$  constituyen las incógnitas. En esta barra debe existir por lo menos un generador. La necesidad de definir esta barra nace del hecho que no es posible especificarla, la potencia total que es necesario generar en el sistema debido a que inicialmente no se conocen las pérdidas en el mismo. La barra flotante debe suministrar la diferencia entre la potencia compleja inyectada al sistema en el resto de las barras y la carga total más las pérdidas. Esta barra se conoce también con otros nombres tales como: de referencia, oscilante, de relajación (slack).

#### 1.3.2 Representación de los elementos del SEP

1. **Líneas:** se representan usualmente por su circuito  $\pi$  nominal. Para una línea conectada entre las barras  $p$  y  $q$  de un SEP, el circuito equivalente corresponde al mostrado en la Figura 1.3. En algunos casos, basta representar la línea por su impedancia serie.
2. **Transformadores:** Cuando funcionan en su razón nominal, se representan por su impedancia de cortocircuito. Cuando operan con cambio de TAP y razón no nominal, se pueden representar por su circuito equivalente  $\pi$  que se muestra en la Figura 1.4, cuyos parámetros se indican en la ecuación

$$A = \frac{Y}{\alpha} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \right) \quad B = \frac{Y}{\alpha\beta} \quad C = \frac{Y}{\beta} \left( \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (1.3).$$

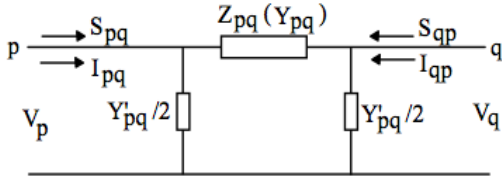


Figura 1.3 Circuito equivalente  $\pi$  de una línea para el cálculo de flujos de potencia

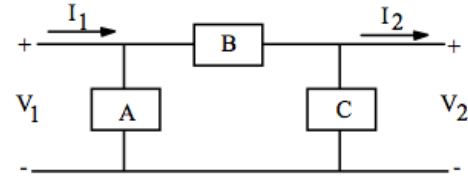


Figura 1.4 Modelación circuital en sistema por unidad de un transformador con cambio de TAP

$$A = \frac{Y}{\alpha} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \right) \quad B = \frac{Y}{\alpha\beta} \quad C = \frac{Y}{\beta} \left( \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (1.3)$$

con  $\alpha = 1 + t_1$  y  $\beta = 1 + t_2$ ; y donde  $t_1$  y  $t_2$ , representan el cambio de TAP, en el lado respectivo.

3. **Generadores:** Se consideran normalmente como fuentes de potencia activa y reactiva.

#### 1.4 Planteamiento del problema para un SEP de “n” barras

##### 1.4.1 Ecuaciones de Barra

Considérese una barra p cualquiera de un sistema tal como se muestra en la Figura 1.5. La potencia neta,  $\dot{S}_p$  y la corriente inyectada en la barra p,  $\dot{I}_p$  están relacionadas por las siguientes ecuaciones, que constituyen las ecuaciones de barra.

$$\begin{aligned} \dot{S}_p &= V_p I_p^* = P_p + jQ_p \\ \dot{I}_p &= \frac{S_p^*}{V_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \end{aligned} \quad (1.4)$$

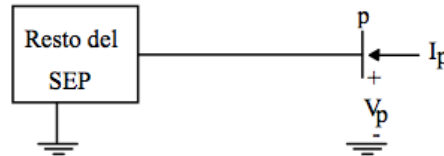


Figura 1.5 Representación de una Barra p en un SEP

##### 1.4.2 Ecuaciones de flujo de potencia

A partir de la Figura 1.3 se puede escribir:

$$\dot{I}_{pq} = (\dot{V}_p - \dot{V}_q) \dot{Y}_{pq} + \dot{V}_p (\dot{Y}_{pq}/2) \quad (1.5)$$

La potencia compleja que influye desde la barra p a la q esta dada por:

$$\dot{S}_{pq} = \dot{V}_p \dot{I}_{pq} = [\dot{Y}_{pq}^* + (\dot{Y}_{pq}/2)^*] \dot{V}_p^2 - \dot{V}_p \dot{V}_q^* \dot{Y}_{pq}^* \quad (1.6)$$

Análogamente, la potencia compleja que fluye desde la barra q a la barra p estará dada por:





$$\dot{S}_{qp} = \dot{V}_q \dot{I}_{qp} = [Y_{qp}^* + (Y'_{qp}/2)^*] V_q^2 - \dot{V}_p V_q^* Y_{pq}^* \quad (1.7)$$

Las expresiones (1.6) y (1.7) corresponden a las ecuaciones de flujo de potencia a través de la línea.

Es conveniente indicar que  $\dot{Y}_{pq} = \dot{Y}_{qp}$  y  $(\dot{Y}'_{pq}/2) = (\dot{Y}'_{qp}/2)$ . Además,  $\dot{Y}_{pq}$  es el inverso de la impedancia entre las barras p y q, el que no debe confundirse con el valor correspondiente en la matriz  $Y_B$ , de la ecuación (3.10).

#### 1.4.3 Potencia perdida en la transmisión

Después con los sentidos adoptados para  $\dot{S}_{pq}$  y  $\dot{S}_{qp}$ , la potencia compleja perdida en la línea será:

$$\dot{S}_{Lpq} = \dot{S}_{pq} + \dot{S}_{qp} \quad (1.8)$$

#### 1.4.4 Calculo de las tensiones de barra

Las ecuaciones (1.6) y (1.7) indican claramente que para resolver el problema del flujo de potencia se requiere determinar previamente las tensiones en todas las barras que correspondan. Empleando el método nodal para resolución de circuitos. En forma matricial, para la red de un SEP de “n” barras se puede escribir:

$$[I_B] = [Y_B][V_B] \quad (1.9)$$

donde  $[I_B]$  es el vector d corrientes inyectadas a las barras;  $[Y_B]$  es la matriz admitancia de barras y  $[V_B]$  es el vector tensiones de barra, definidos como:

$$[I_B] = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_p \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} [V_B] = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_p \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} [Y_B] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dots & \dot{Y}_{1p} & \dots & \dot{Y}_{1n} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dots & \dot{Y}_{2p} & \dots & \dot{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dot{Y}_{p1} & \dot{Y}_{p2} & \dots & \dot{Y}_{pp} & \dots & \dot{Y}_{pn} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \dot{Y}_{n2} & \dots & \dot{Y}_{np} & \dots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Teniendo presente que según (1.4), las corrientes inyectadas en las barras dependen de las potencias complejas netas respectivas y considerando (1.9) y (1.10), se puede escribir:



$$\begin{aligned}
\frac{S_1^*}{V_1^*} &= \dot{Y}_{11}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{V}_2 + \cdots + \dot{Y}_{1p}\dot{V}_p + \cdots + \dot{Y}_{1n}\dot{V}_n \\
\frac{S_2^*}{V_2^*} &= \dot{Y}_{21}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{V}_2 + \cdots + \dot{Y}_{2p}\dot{V}_p + \cdots + \dot{Y}_{2n}\dot{V}_n \\
&\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
\frac{S_p^*}{V_p^*} &= \dot{Y}_{p1}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{p2}\dot{V}_2 + \cdots + \dot{Y}_{pp}\dot{V}_p + \cdots + \dot{Y}_{pn}\dot{V}_n \\
&\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
\frac{S_n^*}{V_n^*} &= \dot{Y}_{n1}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{n2}\dot{V}_2 + \cdots + \dot{Y}_{np}\dot{V}_p + \cdots + \dot{Y}_{nn}\dot{V}_n
\end{aligned}
\tag{1.11}$$

Este sistema de ecuaciones es similar al obtenido en el problema elemental de 2 barras; es decir; las ecuaciones son algebraicas y no lineales, por lo tanto es necesario resolverlo mediante técnicas de aproximaciones sucesivas.

### 1.5 Técnicas de solución para el problema de flujos de potencia

Existen actualmente diversos métodos para resolver el problema de cálculo del flujo de potencias, los que reciben nombres según sea el procedimiento que se aplique para calcular las tensiones. Entre ellos podemos mencionar el de Gauss, el de Gauss-Seidel, los de Newton-Raphson (Completo, Desacoplado, Desacoplado rápido), etc.

Se estudiará a continuación, cada uno de ellos, considerando en primer lugar el procedimiento general y luego las aplicaciones al cálculo de flujo de potencias

#### 1.5.1 Método de Gauss

Se emplea para resolver un problema lineal o no lineal. Por simplicidad se considerará un sistema lineal de ecuaciones, como el indicado en (1.12), para fundamentarlo. Sin embargo, su aplicación a un sistema no lineal resulta inmediata.

$$\begin{aligned}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= y_1 \\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= y_2 \\
a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= y_3
\end{aligned}
\tag{1.12}$$

Despejando  $x_1$  de la primera ecuación,  $x_2$  de la segunda y  $x_3$  de la tercera se obtiene:

$$\begin{aligned}
x_1 &= (y_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3)/a_{11} \\
x_2 &= (y_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3)/a_{22} \\
x_3 &= (y_3 - a_{31}x_1 - a_{32}x_2)/a_{33}
\end{aligned}
\tag{1.13}$$

Sean  $x_1^0, x_2^0, x_3^0$  valores iniciales estimados anteriores de la solución del sistema (1.12), entonces, reemplazando estos valores en (1.13) se tiene:



$$\begin{aligned}x_1^1 &= (y_1 - a_{12}x_2^0 - a_{13}x_3^0)/a_{11} \\x_2^1 &= (y_2 - a_{21}x_1^0 - a_{23}x_3^0)/a_{22} \\x_3^1 &= (y_3 - a_{31}x_1^0 - a_{32}x_2^0)/a_{33}\end{aligned}\tag{1.14}$$

El procedimiento continua hasta que se satisface algún “criterio de convergencia” tal como, por ejemplo, el indicado en (1.15), donde  $\varepsilon$  es una cantidad de valor pequeño y positivo. A cada etapa del proceso se le denomina “iteración”.

$$||x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}|| \leq \varepsilon \quad \text{con } i = 1, 2, 3\tag{1.15}$$

Aplicando el método a un sistema de  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas; para la incógnita  $x_i$ , después de  $k$  iteraciones, y con  $i = 1, 2, \dots, n$ ; se puede escribir:

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left[ y_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_{ij} x_j^k \right]\tag{1.16}$$

Los inconvenientes de este procedimiento son el gran número de pasos que se requiere para llegar al resultado y la ocurrencia relativamente alta de situaciones en que no hay convergencia, por lo que no se utiliza para resolver el problema de cálculo de los voltajes de la ecuación (1.11). Sin embargo, constituye la base para la formulación del Método de Gauss-Seidel, lo que justifica su análisis. Al aplicar la ecuación (1.16) al problema de cálculo de los voltajes en las barras del sistema de ecuaciones (1.11) se obtiene:

$$\dot{V}_p^{k+1} = \frac{1}{\dot{Y}_{pp}} \left[ \frac{P_p - jQ_p}{(V_p^k)^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q^k \right]\tag{1.17}$$

Donde:  $p = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $q = 1, 2, 3, \dots, n$  y  $p \neq q$  (barra slack).

La ecuación (1.17) se conoce como método de Gauss  $Y_B$ , porque usa el Método de Gauss y se trabaja con la matriz admitancia de barras del sistema eléctrico. La expresión es válida sólo para las barras de carga. En el caso en que el SEP contenga barras de tensión controlada, la ecuación (1.17) debe ser modificada, pues en este tipo de barras no se conoce el valor de la potencia reactiva  $Q_p$ . Por lo dicho en el párrafo anterior, las modificaciones requeridas se estudiarán al considerar el Método de Gauss-Seidel  $Y_B$ .



### 1.5.2 Método de Gauss-Seidel

**a. Caso general:** Corresponde a una modificación del método de Gauss tendiente a acelerar la convergencia del proceso iterativo. En el método de Gauss se calculan todos los valores de las incógnitas correspondientes a una iteración y luego se emplean para determinar los nuevos valores de las incógnitas en la iteración siguiente. En el método de Gauss-Seidel en cambio, los valores calculados en una iteración determinada, se utilizan inmediatamente para calcular los valores de las incógnitas que restan por calcular en la misma iteración.

De este modo, si el proceso de cálculo se encuentra en la iteración  $(k + 1)$  y ya se han determinado  $x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_{i-1}^{k+1}$  entonces, los valores que se utilizan para calcular  $x_i^{k+1}$  serán  $x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_{i-1}^{k+1}, x_{i+1}^k, x_{i+2}^k, \dots, x_n^k$

Por tanto, la fórmula iterativa del Método de Gauss-Seidel aplicada a un sistema de  $n$  ecuaciones de la forma dada por (1.12) es:

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left[ y_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_j^k \right] \quad (1.18)$$

**b. Aplicación del método de Gauss-Seidel al cálculo flujos de potencia:** El cálculo de las tensiones de barras aplicando el procedimiento explicado anteriormente es distinto según sean los tipos de barras existentes en el SEP. Por ello se considerarán en primer lugar los sistemas con barras de carga y flotante solamente, por ser el caso más simple. A continuación se analizará la situación de las barras de tensión controlada.

**b1. Sistemas con barras de carga y flotante solamente:** Aplicando la ecuación (1.18) al sistema (1.11) se tiene:

$$\dot{V}_p^{k+1} = \frac{1}{\dot{Y}_{pp}} \left[ \frac{P_p - jQ_p}{(V_p^k)^*} - \sum_{q=1}^{p-1} \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q^k \right] \quad (1.19)$$

Donde:  $p = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $q = 1, 2, 3, \dots, n$  y  $p \neq s$  (barra slack).

La secuencia de solución según este método es como sigue:

1. Se suponen valores iniciales de tensión para todas las barras a excepción de la flotante, cuya tensión está especificada, o sea es dato del problema, al igual que



$P_p$  y  $Q_p$  en todas las barras de carga y los términos de la matriz admitancia de barras  $[Y_B]$ .

- Se aplica la fórmula iterativa (1.19) hasta que se cumpla algún criterio de convergencia, por ejemplo:

$$\begin{aligned} |V_p^{k+1} - V_p^k| &\leq \varepsilon_1 \text{ especificada} & \text{con } p = 1, 2, 3, \dots, n & \text{ y } p \neq s \text{ (barra slack)} \\ |\theta_p^{k+1} - \theta_p^k| &\leq \varepsilon_2 \text{ especificada} & \text{con } p = 1, 2, 3, \dots, n & \text{ y } p \neq s \text{ (barra slack)} \end{aligned} \quad (1.20)$$

- Determinadas las tensiones  $\dot{V}_p$ , se calculan los flujos de potencia  $\dot{S}_{pq}$  y  $\dot{S}_{qp}$  aplicando (1.6) y (1.7).
- Conocidos los valores de  $\dot{S}_{pq}$  y  $\dot{S}_{qp}$  se determinan las pérdidas en el sistema, empleando (1.8).

## b2. Sistemas con barras de carga, tensión controlada y flotante:

Normalmente un SEP incluye además de las barras de carga y flotante, barras de tensión controlada (BTC) que tienen por objeto permitir regular la tensión en uno o varios puntos del sistema. En las barras de tensión controlada debe existir una fuente regulable de potencia reactiva para poder cumplir su cometido.

Debido a que en este tipo de barra sólo se conocen el módulo de la tensión y la potencia activa, es necesario calcular previamente la potencia reactiva, antes de emplear la ecuación (1.19) para determinar el voltaje complejo en ella.

A partir de la ecuación para la barra  $p$  de la expresión (1.11), se puede escribir:

$$S_p^* = P_p - jQ_p = V_p^* (\dot{Y}_{p1}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{p2}\dot{V}_2 + \dots + \dot{Y}_{pp}\dot{V}_p + \dots + \dot{Y}_{pn}\dot{V}_n) = V_p^* \sum_{q=1}^n \dot{Y}_{pq}\dot{V}_q \quad (1.21)$$

es decir:

$$Q_p = \text{Im}g \left\{ V_p^* \sum_{q=1}^n \dot{Y}_{pq}\dot{V}_q \right\} \quad (1.22)$$

Cuando se emplea la ecuación (1.19) en una BTC, el valor de  $Q_p$ , que debe utilizarse corresponde al indicado por (1.22), el que se debe actualizar en cada iteración. Al determinar el voltaje, debe tenerse en cuenta que su módulo en esta barra está especificado y por lo tanto sólo puede cambiar su ángulo.

**Límites de Potencia reactiva en una Barra de tensión Controlada:** En el



cálculo del flujo de potencias en un SEP con Barras de tensión controlada es necesario tomar en cuenta los límites de potencia reactiva de las fuentes de potencia.

Sea  $p$  una BTC, entonces el valor de  $Q_p$  se puede escribir como:

$$Q_p = Q_{Gp} - Q_{cp} \quad (1.23)$$

Además:

$(Q_{Gp})_{max}$ : Valor máximo de generación de potencia reactiva de la fuente.

$(Q_{Gp})_{min}$ : Valor mínimo de generación de potencia reactiva de la fuente.

$Q_{cp}$ : Potencia reactiva de la carga en la barra

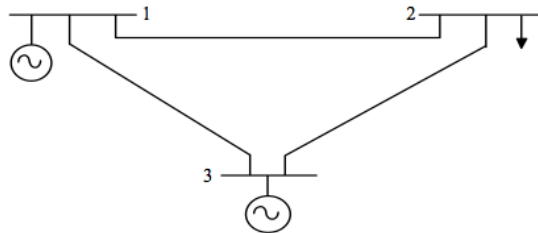
Los límites de potencia reactiva para la barra  $p$  serán:

$$(Q_p)_{min} \leq Q_p \leq (Q_p)_{max} \quad (1.24)$$

$$\text{donde: } (Q_p)_{min} = (Q_{Gp})_{min} - Q_{cp} \text{ y } (Q_p)_{max} = (Q_{Gp})_{max} - Q_{cp}$$

Si el valor de la potencia reactiva calculado según (1.22) en una iteración cualquiera  $k$ ,  $Q_p^k$ , excede el límite máximo o mínimo prefijado, significa que es imposible obtener una solución con la tensión especificada en esta barra y en consecuencia, ella debe ser considerada como una barra de carga en esa iteración, en la cual la potencia reactiva es igual al límite superior e inferior según corresponda. En las iteraciones siguientes, el método intentará mantener el voltaje especificado originalmente en esa barra, siempre que no se violen los límites de  $Q_p$ . Esto es posible, porque pueden ocurrir cambios en otros puntos del sistema, que lo permitan.

Para explicar mejor el procedimiento, considere el sistema de 3 barras de la Figura 1.6.



**Figura 1.6 Sistema de tres barras para explicar el método de Gauss – Seidel  $Y_B$**

Sean:

Barra 1: Flotante

Barra 2: de carga



Barra 3: de tensión controlada

La secuencia del calculo aplicado del método de Gauss – Seidel Y<sub>B</sub>es:

1. Especificar los datos necesarios:  $V_1, \theta_1, P_2, Q_2, P_3, V_3$  y los parámetros para determinar la matriz  $Y_B$ .
2. Suponer los valores iniciales:  $V_2^0, \theta_2^0, \theta_3^0$ . Normalmente se usa 1,0 (pu) para los módulos de voltaje y  $0^\circ$  para los ángulos;  $V_3$  está especificado.
3. Calcular la tensión en la barra 2.

$$\dot{V}_2^1 = \frac{1}{\dot{Y}_{22}} \left[ \frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^0)^*} - \dot{Y}_{21}\dot{V}_1 - \dot{Y}_{23}\dot{V}_3^0 \right] \quad (1.25)$$

4. Calcular la potencia reactiva en la barra 3

$$Q_3^0 = -Im \{ (\dot{V}_3^0)^* (\dot{Y}_{31}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{V}_2^1 + \dot{Y}_{33}\dot{V}_3^0) \} \quad (1.26)$$

5. Verificar si  $Q_3^0$  está dentro de los límites establecidos.
6. Si  $Q_3^0$  está dentro de los límites, determinar la tensión en la barra 3 según (1.27), mantener el valor especificado para  $V_3$  y cambiar el ángulo inicial por el determinado con (1.27).

$$\dot{V}_3^1 = \frac{1}{\dot{Y}_{33}} \left[ \frac{P_3 - jQ_3^0}{(\dot{V}_3^0)^*} - \dot{Y}_{31}\dot{V}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{V}_2^1 \right] \quad (1.27)$$

7. Si  $Q_3^0$  no está dentro de los límites, reemplazar  $Q_3^0$  en (1.27) por el valor del límite excedido, tomando el valor de  $\dot{V}_3^1$  calculado en (1.27) completo (módulo y ángulo).
8. Verificar que se cumpla el criterio de convergencia tal como se indica en ecuación (1.20), por ejemplo, en todas las barras. Si se cumple, el proceso de cálculo de las tensiones finaliza y se determinan los flujos de potencia y las pérdidas en las líneas según ecuaciones (1.6) y (1.7) y (1.8).
9. Si el criterio de convergencia no se cumple, volver al punto 3 y repetir el proceso.

**Factores de Aceleración:** La experiencia con el método de Gauss-Seidel Y<sub>B</sub> para el cálculo de flujos de potencia ha mostrado que se puede reducir considerablemente el número de iteraciones requeridas si la corrección en el voltaje de cada barra se multiplica por alguna constante que la incremente, para que el voltaje sea más cercano al valor al que se está aproximando. El



multiplicador que realiza esto, se denomina **factor de aceleración**. La diferencia entre el valor de voltaje de la barra p calculado en la iteración actual  $\dot{V}_p^{k+1}$  y el mejor que se obtuvo en la iteración anterior  $(\dot{V}_p^k)_{ac}$  se multiplica por un  $\alpha$  apropiado para obtener una mejor corrección que se agrega a este último. Es decir:

$$(\dot{V}_p^{k+1})_{ac} = (\dot{V}_p^k)_{ac} + \alpha [\dot{V}_p^{k+1} - (\dot{V}_p^k)_{ac}] \quad (1.28)$$

La elección del valor de  $\alpha$  depende del sistema en estudio. Hay valores óptimos de los factores de aceleración para cualquier sistema. Una mala selección de ellos puede dar como resultado una convergencia menos rápida o hacerla imposible. Normalmente, en los estudios de flujos de potencia,  $\alpha$  varía entre 1,3 y 1,8. Generalmente, un factor de aceleración de 1,6 para las componentes real e imaginaria es una buena selección. Sin embargo, es posible que el factor de aceleración utilizado para la componente real pueda diferir del usado para la componente imaginaria.

### 1.5.3 Método de Newton Raphson

- a) **Formulación general:** Este método es mas sofisticado que los anteriores y exige un mayor volumen de cálculos, pero asegura convergencia en un mayor número de veces y además en forma más rápida. El problema matemático a resolver consiste en n relaciones no lineales del tipo  $f(x_i) = 0$ . Es decir, se trata de un sistema de n ecuaciones de la forma:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (1.29)$$

Si se supone una estimación inicial del vector solución:

$$[x^0] = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0] \quad (1.30)$$

Al que le falta un residuo  $[\Delta x^0] = [\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0]$ , para llegar a la solución correcta; esto es, tener  $f(x_1^0 + \Delta x_1^0) = 0$  aunque  $f(x_1^0) \neq 0$ , se tiene:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \\ &\vdots \\ f_3(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \end{aligned} \quad (1.31)$$

Desarrollando cada ecuación en serie de Taylor en torno a los valores  $x_i^0$  se tiene:





$$\begin{aligned}
f_1(x_1^0 + \Delta x_1^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= f_1(x_1^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 + \dots + \Delta x_n^0 \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 + \phi_1 \\
&\vdots \\
f_n(x_1^0 + \Delta x_1^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= f_n(x_1^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 + \dots + \Delta x_n^0 \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 + \phi_n
\end{aligned} \tag{1.32}$$

donde:

$\phi$ : es el residuo en la serie de Taylor, que contiene los términos de orden superior

$\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0$ : representa las correspondientes derivadas parciales, evaluadas en  $x_i^0$

Como los  $\Delta x_i^0$  son pequeños, se pueden despreciar los términos de orden superior y se obtiene:

$$\begin{aligned}
f_1(x_1^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 + \dots + \Delta x_n^0 \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 &= 0 \\
&\vdots \\
f_n(x_1^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 + \dots + \Delta x_n^0 \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 &= 0
\end{aligned} \tag{1.33}$$

con  $i, j = 1, 2, \dots, n$

Matricialmente se puede escribir:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_i^0) \\ \vdots \\ f_n(x_i^0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.34}$$

Es decir:

$$[f(x^0)] + [J^0][\Delta x^0] = [0] \tag{1.35}$$

donde cada vector y matriz esta definido según las ecuaciones (1.34) y (1.35), o sea:

$$\begin{aligned}
[f(x^0)] &= \begin{bmatrix} f_1(x_i^0) \\ \vdots \\ f_n(x_i^0) \end{bmatrix} && \text{Vector función evaluada en } x_i^0 \\
[J^0] &= \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 \end{bmatrix} && \text{Matriz Jacobiana evaluada en } x_i^0 \\
[\Delta x^0] &= \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} && \text{Vector residuo evaluado en } x_i^0
\end{aligned}$$



A partir de (1.35), el vector residuo evaluado en  $x_i^0$ ;  $[\Delta x^0]$  se puede escribir

$$[\Delta x^0] = -[J^0]^{-1}[f(x^0)] \quad (1.36)$$

En general entonces, el residuo en una interacción  $k$  es:

$$[\Delta x^k] = -[J^k]^{-1}[f(x^k)] \quad (1.37)$$

Suponiendo que se conoce  $[x^k]$  (vector de valores aproximados de la variable), entonces puede obtenerse una aproximación mejor  $[x^{k+1}]$  de la forma:

$$[x^{k+1}] = [x^k] + [\Delta x^k] = [x^k] - [J^k]^{-1} + [f(x^k)] \quad (1.38)$$

Como se ha despreciado los términos de orden superior,  $[x^{k+1}]$  no será la solución correcta y debe repetir el proceso en forma iterativa, hasta que satisfaga algún criterio de convergencia, tal como:

$$\|x^{(k+1)} - x^k\| \leq \varepsilon \quad (1.39)$$

b) **Aplicación al cálculo de flujos de potencia:** En el caso de un Sistema de Potencia, los  $x_i$  corresponden a las tensiones de las barras (módulo y ángulo), de manera que la ecuación (1.37) se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = -[J^k]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

en que:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P^{calc} \\ Q^{esp} - Q^{calc} \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

Donde  $P^{esp}$  y  $Q^{esp}$  son los valores de  $P$  y  $Q$  especificados o programados y  $P^{calc}$  y  $Q^{calc}$  son los respectivos valores que se van calculando en cada iteración. Para mayor comodidad, a los valores calculados, se les eliminará el superíndice calc, es decir, se designarán simplemente como  $P$  y  $Q$ .

Según (1.21), los valores de  $P$  y  $Q$  en la barra  $o$  se pueden obtener a partir de:

$$\dot{S}_p = P_p + jQ_p = \dot{V}_p \sum_{q=1}^n Y_{pq}^* V_q^* \quad (1.42)$$

Expresando los voltajes de barras en forma polar y las admitancias de línea en forma rectangular se tiene que:



$$\dot{V}_p = V_p \angle \theta_p; \quad \dot{V}_q = V_q \angle \theta_q \quad y \quad \dot{Y}_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} \quad (1.43)$$

Remplazando (1.34) en (1.42), con  $\theta_{pq} = \theta_p - \theta_q$  se obtiene:

$$\dot{S}_p = P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q (G_{pq} + jB_{pq})(\cos \theta_{pq} + j\sin \theta_{pq}) \quad (1.44)$$

de (1.34) se obtiene finalmente:

$$\begin{aligned} P_p &= \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \\ Q_p &= \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \end{aligned} \quad (1.45)$$

A partir de (1.41) y (1.45),  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  para la barra p se pueden determinar como:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= P_p^{esp} - \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \\ \Delta Q_p &= Q_p^{esp} - \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \end{aligned} \quad (1.46)$$

Por lo tanto se puede resumir como:

1. Para las Barras PQ y PV

$$\Delta P_p = P_p^{esp} - \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \quad (1.47)$$

2. Para las barras PQ

$$\Delta Q_p = Q_p^{esp} - \sum_q^n V_p V_q (G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq}) \quad (1.48)$$



3. Para la barra slack no se requiere ecuaciones.

En las ecuaciones anteriores, las magnitudes de las tensiones en las barras PV y slack al igual que el ángulo en la barra slack no son variables, sino que se mantienen en sus valores especificados. Por lo tanto, el sistema formulado incluye dos ecuaciones para cada barra PQ y una para cada barra PV. Las variables del problema son  $V$  y  $\theta$  para cada barra PQ y  $\theta$  para cada barra PV.

Por razones prácticas se da a la barra slack el número  $n$  y se colocan los primeros números a las barras PQ. Luego si se tiene  $m$  barras PQ, se tendrá  $(n-m-1)$  barras con control de voltaje (barras PV).

La ecuación (1.40) queda entonces:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -[J^k]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

Con  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  calculados según (1.46). Luego, los valores actualizados para  $\theta$  y  $V$  son:

$$\begin{bmatrix} \theta^{k+1} \\ V^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^k \\ V^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Despejando  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  de (1.49), considerando (1.34) y arreglando adecuadamente, para hacer mas fácil el manejo de las ecuaciones, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & V \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

Si se tiene  $n$  nodos,  $m$  de carga, 1 libre y  $n-m-1$  de voltaje controlado las dimensiones de las submatrices que forman el Jacobiano son:

$$\begin{aligned} [H] \text{ es de } (n-1) \times (n-1) & \quad [N] \text{ es de } (n-1) \times m \\ [M] \text{ es de } m \times (n-1) & \quad [L] \text{ es de } m \times m \end{aligned}$$

Según lo anterior, la matriz Jacobiana completa es cuadrada y de dimensión,  $[(n-1) + m] \times [(n-1) + m]$ .

A partir de (1.51), se obtiene que:

$$\begin{aligned} H_{pq} &= \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_q} & N_{pq} &= V_q \frac{\partial \Delta P_p}{\partial V_q} \\ M_{pq} &= \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_q} & L_{pq} &= V_q \frac{\partial \Delta Q_p}{\partial V_q} \end{aligned} \quad (1.52)$$

Considerando (1.46), se puede determinar todos los elementos de la matriz Jacobiana como sigue:



1. Para  $p \neq q$

$$\begin{aligned}H_{pq} &= -V_p(G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq})V_q \\N_{pq} &= -V_p(G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq})V_q \\N_{pq} &= V_p(G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq})V_q \\L_{pq} &= -V_p(G_{pq} \sin \theta_{pq} - B_{pq} \cos \theta_{pq})V_q\end{aligned}\tag{1.53}$$

Se puede apreciar, que la forma de la ecuación (1.51):

$$\begin{aligned}H_{pq} &= L_{pq} \\N_{pq} &= -M_{pq}\end{aligned}\tag{1.54}$$

2. para  $p = q$

$$\begin{aligned}H_{pp} &= B_{pp}V_p^2 + Q_p \\N_{pp} &= -G_{pp}V_p^2 - P_p \\M_{pp} &= G_{pp}V_p^2 - P_p \\L_{pp} &= B_{pp}V_p^2 - Q_p\end{aligned}\tag{1.55}$$

Las expresiones (1.54) y (1.55) muestran lo importante que fue el haber planteado la matriz Jacobiana tal como se hizo en (1.51). Utilizando este tipo de coordenadas, el valor de Q en las barras PV puede ser calculado luego que el proceso haya convergido.

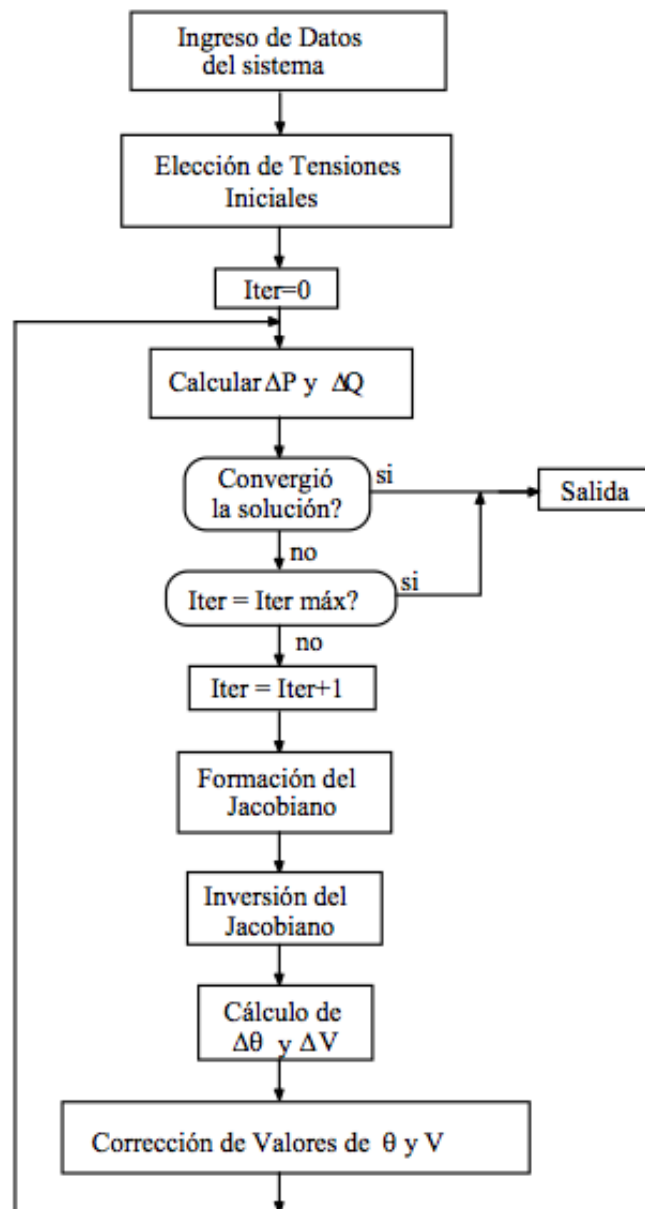


Figura 1.7 Diagrama de flujo del algoritmo de Newton-Raphson



En estricto rigor, la matriz Jacobiana se calcula e invierte en cada iteración. Sin embargo, en la práctica se recalcula usualmente sólo un determinado número de veces en un rango de iteraciones, con el fin de aumentar la velocidad al proceso iterativo.

#### 1.5.4 Método de Newton-Raphson desacoplado (MNRD)

Cuando se resuelven problemas que involucren un número considerable de barras, este método representa una alternativa para mejorar la eficiencia computacional y reducir los requerimientos de memoria. Se hace uso de una versión aproximada del método de Newton-Raphson completo visto en 1.5.3., basada en las siguientes consideraciones:

1. Un cambio en el ángulo del voltaje  $\theta$  en una barra afectada principalmente al flujo de potencia activa  $P$  en las líneas y débilmente a la potencia reactiva  $Q$ , lo que significa que:  $\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} \gg \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta}$ .
2. Un cambio en el modulo de voltaje  $V$  en una barra afecta principalmente al flujo de potencia reactiva  $Q$  en las líneas y débilmente a la potencia activa  $P$ . Por lo tanto  $\frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \gg \frac{\partial \Delta P}{\partial V}$ .

De acuerdo con esto, en la ecuación (1.51)  $N$  y  $M$  se pueden despreciar frente a  $L$  y  $H$  respectivamente y se puede escribir:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & V \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

o bien:

$$[\Delta P] = [H][\Delta \theta] \quad (1.57)$$

$$[\Delta Q] = [L][\Delta V/V] \quad (1.58)$$

Estas ecuaciones están desacopladas, en el sentido que las correcciones de los ángulos de los voltajes se calculan usando sólo los cambios en la potencia activa mientras que las correcciones en la magnitud de los voltajes se determinan sólo con los cambios en la potencia reactiva. Sin embargo, las matrices  $[H]$  y  $[L]$  son interdependientes, porque los elementos de  $[H]$  dependen de las magnitudes de los voltajes que se están resolviendo en la ecuación (1.58), mientras que los elementos de  $[L]$  dependen de los ángulos de la ecuación (1.57). El procedimiento natural es ir resolviendo alternadamente los dos sistemas de ecuaciones usando en uno, las soluciones más recientes del otro. Esta aproximación significa aumentar el número de iteraciones, lo que en la práctica queda compensado por el menor tiempo en cada iteración, debido a la disminución del tiempo ocupado en la inversión de las matrices  $[H]$  y  $[L]$  de menor dimensión que la del Jacobiano completo.



### 1.5.5 Método de Newton-Raphson desacoplado rápido (MNRDR)

El método de Newton Raphson desacoplado, requiere la inversión de dos matrices en cada iteración. Para evitar estos cálculos, se introducen más simplificaciones que se justifican por las características que presentan los flujos de potencia en las líneas y los voltajes en las barras de un sistemas de transmisión bien diseñado y operando apropiadamente. Estas características son:

1. Las diferencias angulares  $\theta_{pq} = \theta_p - \theta_q$  entre los voltajes de dos barras típicas son, por lo general, tan pequeños que:

$$\cos \theta_{pq} = \cos(\theta_p - \theta_q) = 1 \quad y \quad \sin \theta_{pq} = \sin(\theta_p - \theta_q) \approx 0 \quad (1.59)$$

2. Las susceptancias  $B_{pq}$  de las líneas son mucho mas grandes que las conductancias  $G_{pq}$ , por lo que:

$$G_{pq} \sin(\theta_p - \theta_q) \ll B_{pq} \cos(\theta_p - \theta_q) \quad (1.60)$$

La potencia reactiva  $Q_p$  que se inyecta a cualquier barra  $p$  del sistema durante su operación normal es mucho menor que la potencia reactiva que fluiría si todas las líneas de la barra estuvieran en cortocircuito con la referencia. Esto es:

$$Q_p \ll B_{pp} V_p^2 \quad (1.61)$$

con estas aproximaciones, y usado (1.45) se tiene:

$$P_p = V_p \sum_{q=1}^n (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) V_q \quad (1.62)$$

Es decir

$$P_p = G_{pp} V_p^2 + V_p \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) V_q \quad (1.63)$$

$$Q_p = -V_p \sum_{q=1}^n B_{pq} V_q = -B_{pp} V_p^2 - V_p \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq} V_q \quad (1.64)$$

A partir de (1.63) y (1.64) y considerando (1.46), los elementos  $[H]$  y  $[L]$  se obtienen como sigue:





$$H_{pq} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_p} = B_{pq} V_p V_q L_{pq} = V_q \frac{\partial \Delta Q_p}{\partial V_p} = B_{pq} V_p V_q \quad (1.65)$$

$$H_{pp} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_p} = B_{pq} V_p^2 - V_p \sum_{q=1}^n B_{pq} V_q = B_{pp} V_p^2 + Q_p \quad (1.66)$$

$$H_{pp} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_p} = B_{pq} V_p^2 - V_p \sum_{q=1}^n B_{pq} V_q = B_{pp} V_p^2 + Q_p \quad (1.67)$$

según (1.61), las ecuaciones (1.66) y (1.67) quedan

$$H_{pp} = L_{pp} = B_{pp} V_p^2 \quad (1.68)$$

Considerando (1.57) y (1.58), para el nodo p se puede escribir:

$$\Delta P_p = -H_{pp} \Delta \theta_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n H_{pq} \Delta \theta_q \quad (1.69)$$

$$\Delta Q_p = -L_{pp} \frac{\Delta V_p}{V_p} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n L_{pq} \frac{\Delta V_q}{V_q} \quad (1.70)$$

Introduciendo (1.65) y (1.68) en (1.69) y (1.70) se obtiene:

$$\Delta P_p = -V_p \left( B_{pp} V_p \Delta \theta_p + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq} V_q \Delta \theta_q \right) \quad (1.71)$$

$$\Delta Q_p = -V_p \left( B_{pp} V_p \frac{\Delta V_p}{V_p} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq} V_q \frac{\Delta V_q}{V_q} \right) \quad (1.72)$$



Dividiendo ambas ecuaciones por  $V_p$  y simplificando los voltajes de la ecuación (1.72), las ecuaciones anteriores quedan:

$$\frac{\Delta P_p}{V_p} = -B_{pp}V_p\Delta\theta_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq}V_q\Delta\theta_q \quad (1.73)$$

$$\frac{\Delta Q_p}{V_p} = -B_{pp}V_p\Delta V_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq}V_q\Delta V_q \quad (1.74)$$

Se ha reducido la no linealidad de las ecuaciones, lo que debería permitir mejorar el comportamiento del proceso iterativo. Si se fija arbitrariamente los valores de  $V_p$  y  $V_q$  del segundo miembro de la ecuación (1.73) en 1,0 (pu), los coeficientes de ambas ecuaciones quedan iguales, es decir:

$$\frac{\Delta P_p}{V_p} = -B_{pp}\Delta\theta_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq}\Delta\theta_q \quad (1.75)$$

$$\frac{\Delta Q_p}{V_p} = -B_{pp}\Delta V_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n B_{pq}\Delta V_q \quad (1.76)$$

Matricialmente se tiene:

$$\left[\frac{\Delta P}{V}\right] = [B'][\Delta\theta] \quad (1.77)$$

$$\left[\frac{\Delta Q}{V}\right] = [B''][\Delta V] \quad (1.78)$$

donde  $B'$  es el negativo de la parte imaginaria de la matriz  $Y_B$ , sin la fila y columna correspondiente a la barra slack y  $B''$  es el negativo de la parte imaginaria de la matriz  $Y_B$  sin las filas y columnas correspondientes a las barras slack y PV



Una estrategia típica de solución es la siguiente:

1. Calcular los errores iniciales  $\Delta P/V$
2. Resolver la ecuación (1.77) para determinar  $\Delta \theta$
3. Actualizar los ángulos  $\theta$  y usarlos para calcular los errores  $\Delta Q/V$
4. Resolver (1.78) para calcular  $\Delta V$
5. Actualizar las magnitudes del voltaje  $V$  y usarlas para calcular los nuevos errores  $\Delta P/V$
6. Volver al punto 2. y repetir el proceso hasta que todos los errores estén dentro de la tolerancias especificadas.



## **Capítulo 2 ESTUDIO DE CIRCUITO CORTÓ DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.**

### **2.1 Introducción al estudio de corto circuito.**

El estudio de corto circuito se realiza para analizar las fallas de nuestro sistema eléctrico, la cual nos ayuda a saber las corrientes de falla, con esto se determina una adecuada selección de equipo eléctrico y protecciones y el sistema de tierras.

### **2.2 La naturaleza de la corriente de circuito cortó.**

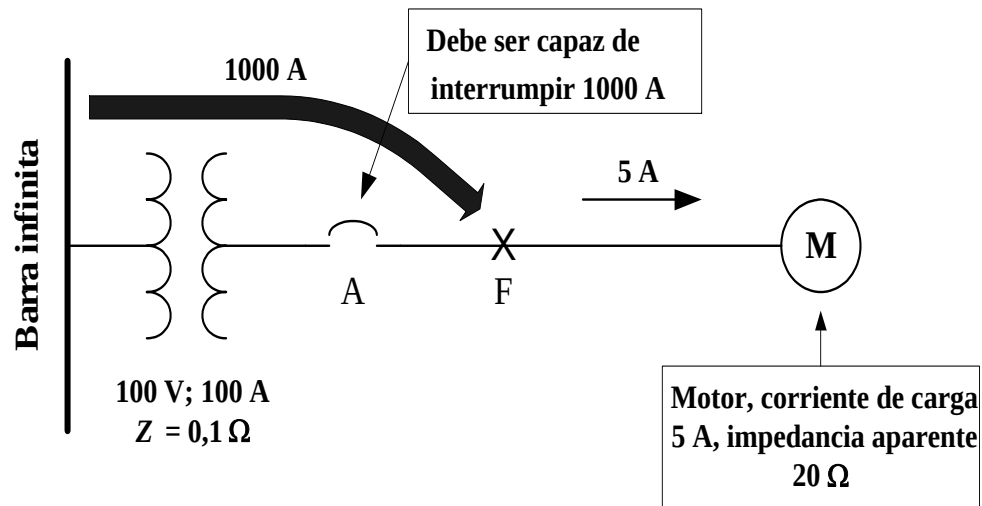
¿Qué es la corriente de corto circuito? Surge cuando hay una conexión de entre fases o de fase a tierra por la pérdida de aislamiento o por accidente. La tensión aplicada a la impedancia que haya entre el suministro y la conexión causara una corriente (ley de ohm), esta corriente será de corto circuito. La magnitud de la corriente de corto circuito dependerá de la magnitud de la impedancia que quede, siendo la corriente por lo regular, varias veces más grande que la nominal.

### **2.3 Efectos de la corriente de circuito cortó.**

Uno de los efectos más severos del C.C. (Corto circuito) es el efecto joule ya que es el generador de calor, por lo que al momento de la falla, todo el sistema debe ser capaz de soportar la energía disipada en forma de calor, generada por la corriente de cortocircuito.

El conocimiento de la corriente máxima de corto circuito que podrá suministrar la fuente de energía, es indispensable para dimensionar los equipos de protección y conductores, estos deben cumplir la función de aislar la falla sin sufrir daños o causar más daño al sistema, en el caso de los conductores deben ser capaces de soportar la corriente de corto circuito sin quemarse o salir disparados agravando la falla. Figura 2.1 muestra la relación que existe entre la corriente de corto circuito y la fuente suministradora de energía.

$$\text{Corriente de corto circuito} = V/Z_T = 100/0,1 = 1000 \text{ A}$$



$$\text{Corriente de corto circuito} = V/Z_T = 100/0,01 = 10\,000 \text{ A}$$

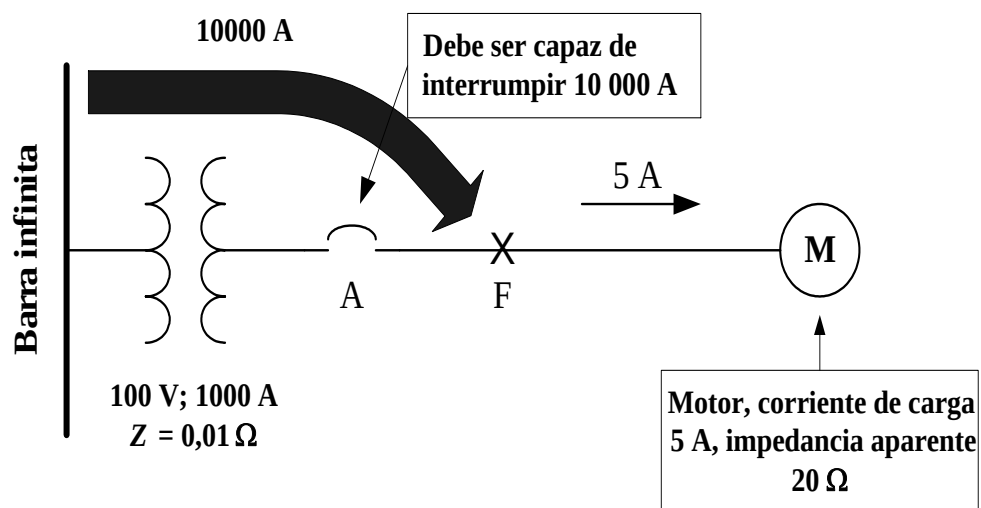


Figura 2.1 Relación entre fuente suministradora de energía y la conexión de falla.



Tomando como ejemplo un caso simple: un motor trifásico de 10 CF de 440 V toma alrededor de 13 A a plena carga y tomará solamente esa cantidad ya sea alimentado por una fuente de 25 kVA o de un banco de transformadores de 2 500 kVA. Así, si solamente se considera la corriente de carga cuando se selecciona el interruptor correspondiente a esa rama, se debe especificar un interruptor de potencia de 15 o 20 A. Sin embargo, el tamaño del sistema de potencia atrás del circuito tiene una fuerza real sobre la cantidad de corriente de C.C que puede fluir como el resultado de un C.C sobre el lado de carga del interruptor. De aquí que, se puede requerir un interruptor diferente para manejar la corriente de C.C que suministra el banco de 2 500 kVA que para la fuente de 25 kVA.

Un ejemplo matemático simple se muestra en la figura 2.1. Los números se han elegido por su facilidad de cálculo más bien que para la representación de las condiciones reales del sistema.

La impedancia que limita el flujo de corriente a la carga, consiste principalmente de los  $20 \Omega$  de impedancia aparente del motor. Si ocurre un C.C. en el punto F, la única impedancia que limita el flujo de la corriente de C.C es la impedancia del transformador ( $0,1 \Omega$  comparados con los  $20 \Omega$  del motor); por consiguiente, la corriente de C.C. es de 1 000 A, o sea 200 veces más grande que la corriente de la carga. A menos que el interruptor de potencia A pueda abrir 1 000 A, la corriente de corto circuito deberá continuar fluyendo, haciendo un daño mayor.

Supóngase que la planta crece y requiere un transformador más grande, uno de 1000 A nominales, que sustituye a la unidad de 100 A. Un corto circuito en F, (parte inferior de la figura 2.1) ahora será limitado por solamente  $0,01 \Omega$ , la impedancia del transformador más grande. Aunque la corriente de carga permanece en 5 A, la corriente de corto circuito será ahora de 10 000 A, y el interruptor de potencia en A debe ser capaz de abrir tal cantidad. Consecuentemente es necesario considerar el tamaño del sistema de alimentación de la planta así como la corriente de carga, para asegurar que el interruptor de potencia o fusibles seleccionados tengan una capacidad de interrupción para poder manejar el flujo de corriente de corto circuito.

## 2.4 Fuentes de corriente de corto circuito.

Son todas aquellas que proporcionan energía a la falla a través de corriente eléctrica, es importante conocer bien cuanto pueden aportar estas fuentes de corto circuito, para calcular la potencia total de la falla.

Las fuentes de potencia de corto circuito son:



### 2.4.1 Generadores

Los generadores son movidos por turbinas, motores diesel, u otro tipo de primomotores. Cuando ocurre un C.C. en el circuito al cual está conectado el generador, éste continúa generando tensión debido a que la excitación del campo se mantiene y el primomotor sigue moviéndolo a velocidad normal. La tensión generada produce una corriente de C.C. de gran magnitud, la cual fluye del generador (o generadores) al punto de falla.

Este flujo de corriente se limita únicamente por la impedancia del generador y el punto a donde ocurre la falla. Si el C.C. ocurre en las terminales del generador, la corriente queda limitada solamente por la impedancia de la máquina.

### 2.4.2 Motores síncronos.

Los motores síncronos están contruidos substancialmente igual que los generadores; tienen un campo excitado por corriente directa y un devanado en el estator por el cual fluye la corriente alterna. Normalmente el motor toma la potencia de la línea y convierte la energía eléctrica en energía mecánica. No obstante, el diseño de un motor síncrono es tan semejante al de un generador de energía eléctrica, que puede producirla justo como un generador, moviendo el motor síncrono como un primomotor.

Durante el corto circuito en el sistema el motor síncrono actúa como un generador y entrega corriente de C.C. , en lugar de tomar corriente de carga de él como se muestra en la figura 2.3. Tan pronto como el C.C se establece, la tensión en el sistema se reduce a un valor mucho más bajo. Consecuentemente el motor deja de entregar energía a la carga mecánica y empieza a detenerse. Sin embargo, la inercia de la carga y el motor impiden al motor que se detenga; en otras palabras, la energía rotatoria de la carga y el rotor mueven al motor síncrono como un primomotor mueve a un generador.

### 2.4.3 Motores de inducción.

La inercia de la carga y el rotor de un motor de inducción tienen exactamente el mismo efecto sobre el motor de inducción como el motor síncrono; siguen moviendo al motor después de que ocurre un C.C. en el sistema. Sólo existe una diferencia. El motor de inducción no tiene un campo excitado por corriente directa, pero existe un flujo en el motor durante la operación normal. Este flujo actúa en forma similar al flujo producido por el campo de corriente directa en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción se produce por la inducción desde el estator en lugar del devanado de corriente directa. El flujo del motor permanece normal mientras se aplica tensión al estator desde una fuente externa (el sistema eléctrico), sin embargo,



si la fuente externa de tensión se elimina súbitamente, esto es, cuando ocurre el corto circuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede cambiar instantáneamente.

Debido a que el flujo del rotor puede decaer instantáneamente y la inercia sigue moviendo al motor, se genera una tensión en el devanado del estator cuando una corriente de corto circuito que fluye hasta el punto de falla hasta que el flujo del rotor decae a cero.

## 2.5 Sistema de la compañía suministradora.

Los sistema eléctricos modernos de las compañías suministradoras, representan una red compleja y grande de plantas generadoras interconectadas.

En un sistema típico, los generadores no se ven afectados por las corrientes altas de corto circuito que se producen en una planta industrial, únicamente aparece en ellos un incremento en su corriente de carga que tiende a permanecer constante.

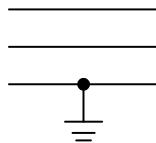
Las líneas de transmisión y distribución, así como los transformadores, introducen impedancias entre las plantas generadoras y los consumidores industriales; de no ser así, las compañías suministradoras serían una fuente infinita de corriente de falla.

La representación de la compañía suministradora para el estudio del corto circuito, será una impedancia equivalente referida al punto de conexión (punto de acometida).

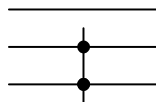
## 2.6 Tipos de Fallas.

En un sistema eléctrico trifásico pueden ocurrir las fallas siguientes:

a). Falla de una fase a tierra, llamada también falla monofásica.

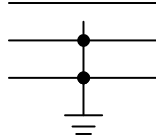


b). Falla entre dos fases, llamada también falla bifásica.

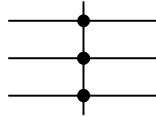


c). Falla de dos fases a tierra, llamada también falla bifásica a tierra.





d). Falla entre fases, llamada también falla trifásica.



Para los tipos de fallas indicados se pueden considerar dos casos:

- Falla sólida o franca.
- Falla a través de una impedancia.

Este último caso se presenta, por ejemplo, cuando la falla se establece a través de un arco eléctrico.

Un corto circuito en un sistema trifásico simétrico produce una falla trifásica balanceada. Las fallas de una fase a tierra, entre dos fases y de dos fases a tierra producen fallas desequilibradas.

## 2.7 Corto circuito en general.

### 2.7.1 Método de las componentes simétricas.

Con el objeto de ilustrar el método de componentes simétricas para la solución del C.C, utilizaremos un sistema de potencia, cuyo diagrama unifilar se muestra en la figura 2.2, donde se indican las reactancias de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero, los neutros del generador y transformadores están sólidamente conectados a tierra; el neutro del motor está conectado a tierra a través de una reactancia  $X_N = 0,05$  por unidad en base a los datos de placa del motor.

El generador está operando con sus MVA nominales, con un factor de potencia 0,95 atrasado y con una tensión 5 % arriba de su valor nominal.

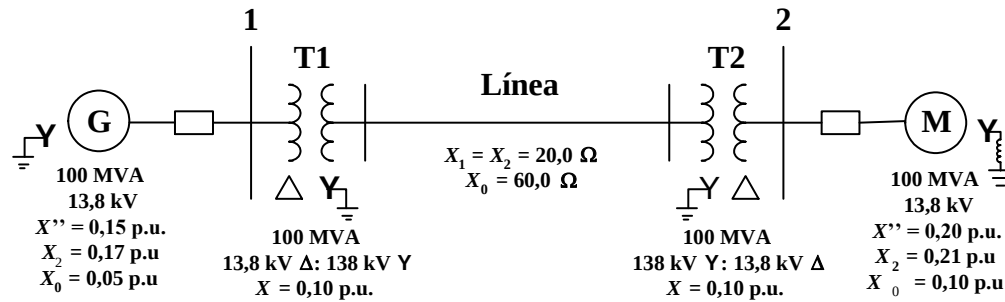


Figura 2.2 Sistema de potencia para ejemplo de componentes simétricas

a). Dibuje las redes de secuencia positiva, negativa y cero en valores por unidad tomando como bases 13,8 kV y 100 MVA, que son los datos del generador.

b). Reduzca las redes de secuencia a su equivalente de Thévenin, vistas desde las barras colectoras 2. La tensión de prefalla es  $\vec{V}_F = 1,05 \text{ p.u.}$  La corriente de la carga en prefalla y el defasamiento de los transformadores no se tomarán en cuenta.

c). Calcule las corrientes subtransitorias en las barras colectoras 2, para los tipos de falla siguientes:

- c1). Falla franca trifásica.
- c2). Falla franca de la fase A a tierra.
- c3). Falla franca entre las fases B y C.
- c4). Falla franca entre las fases B y C y tierra.

SOLUCIÓN.

a). La impedancia base de la línea de transmisión a su tensión es,

$$Z_{B,\text{línea}} = \frac{(\text{kV}_{B,\text{línea}})^2}{\text{MVA}_B} = \frac{138^2}{100} = 190,4 \Omega$$

La reactancia por unidad de la línea para las secuencias positiva y negativa es,

$$X_{B,\text{línea}, \text{p.u.}} = \frac{X_{\text{línea}, \Omega}}{Z_{B,\text{línea}}} = \frac{20,0}{190,4} = 0,1050 \text{ p.u.}$$

La reactancia por unidad de la línea para la secuencia cero es,



$$X_{B,\text{línea, p.u.}} = \frac{X_{\text{línea},\Omega}}{X_{B,\text{línea}}} = \frac{60,0}{190,4} = 0,315 \text{ p.u.}$$

La reactancia por unidad de la línea para las secuencias positiva y negativa es,

$$X_{B,\text{línea, p.u.}} = \frac{X_{\text{línea},\Omega}}{X_{B,\text{línea}}} = \frac{20,0}{190,4} = 0,1050 \text{ p.u.}$$

Las redes de secuencia, con las reactancias por unidad se muestran en las figuras 2.3, 2.4 y 2.5.

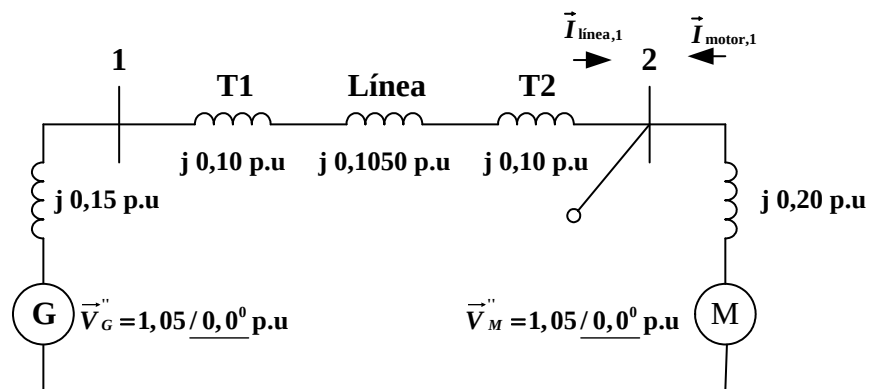


Figura 2.3 Red de secuencia positiva

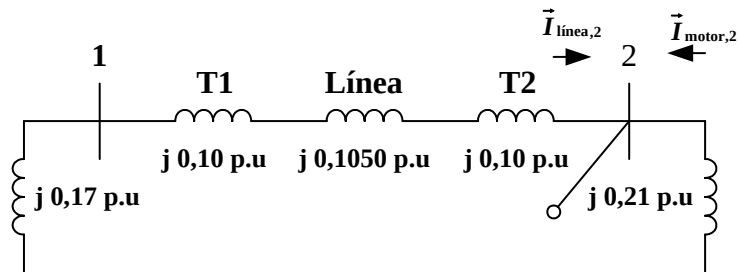


Figura 2.4 Red de secuencia negativa

En la figura 2.5, puesto que el motor está a tierra a través de una reactancia  $X_N$ , se incluye una reactancia igual a  $3 X_N$  en la rama del motor.

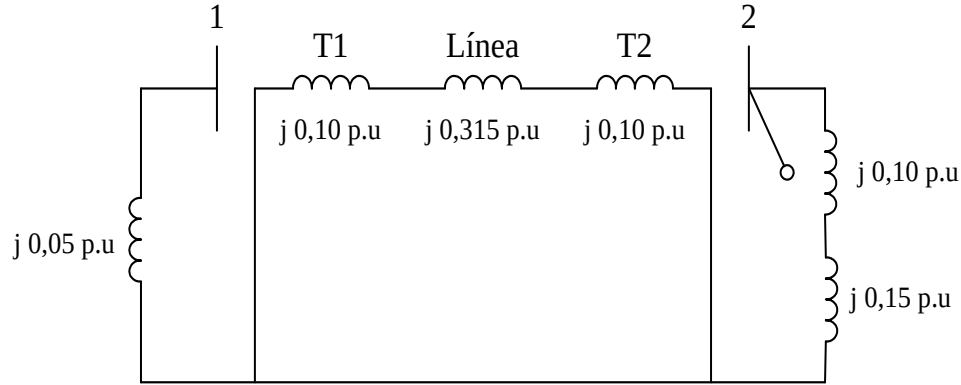


Figura 2.5 Red de secuencia cero

b). De la Figura 2.3, la impedancia de secuencia positiva de Thévenin, vista desde las barras colectoras 2, es igual al paralelo de las impedancias a ambos extremos de las barras colectoras 2, esto es,

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{Th,1} = \frac{(j0,15 + j0,10 + j0,1050 + j0,10)(j0,20)}{(j0,15 + j0,10 + j0,1050 + j0,10) + (j0,20)} = \frac{j^2 0,0910}{j0,655} = j0,1389 \text{ p.u.}$$

La figura 2.6 muestra la impedancia de secuencia positiva de Thévenin en las barras colectoras 2, con la fuente de Thévenin, la cual es la tensión de prefalla

$$\vec{V}_F = 1,05 \angle 0,0^\circ \text{ p.u.}$$

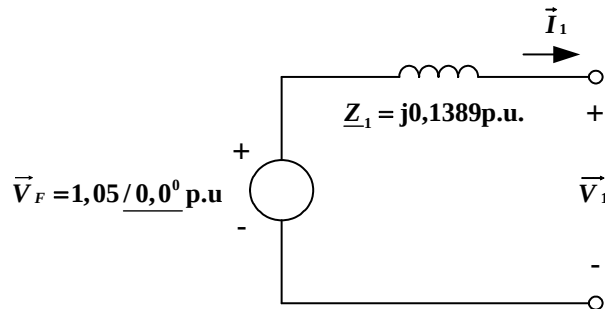


Figura 2.6 Impedancia de secuencia positiva de thevenin

Similarmente la impedancia de secuencia negativa de Thévenin es,

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{Th,2} = \frac{(j0,17 + j0,10 + j0,1050 + j0,10)(j0,21)}{(j0,17 + j0,10 + j0,1050 + j0,10) + (j0,21)} = \frac{j^2 0,0998}{j0,685} = j0,1456 \text{ p.u.}$$



La figura 2.7 muestra la impedancia de secuencia negativa de Thévenin.

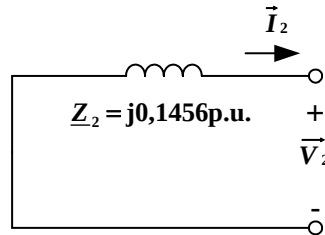


Figura 2.7 Impedancia de secuencia negativa de thevenin

La red de secuencia cero, observando la Figura 2.5, la impedancia de Thévenin a las barras colectoras 2 consiste solamente de,

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{\text{Th},0} = j0,10 + j0,15 = j0,250 \text{ p.u.}$$

debido a la conexión delta del transformador 2, ya que la red de secuencia cero vista desde la izquierda de las barras 2 está abierta.

En la Figura2.8 se muestra la impedancia de secuencia cero de Thévenin.

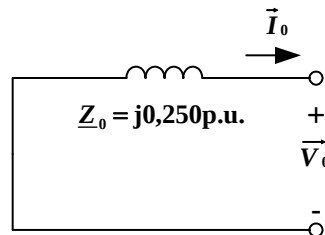


Figura 2.8 Impedancia de secuencia cero de thevenin

c). Cálculo de las corrientes de falla subtransitorias en las barras colectoras 2.

c1). Falla franca trifásica.

Falla entre las fases A, B y C y tierra, en las barras colectoras 2.

Recordando que para fallas trifásicas, las corrientes están balanceadas y solamente tienen componentes de secuencia positiva, entonces únicamente trabajaremos con la red de secuencia positiva.

Las terminales de la red de secuencia positiva de la Figura2.6 quedan cortocircuitadas como se muestra en la Figura2.9.

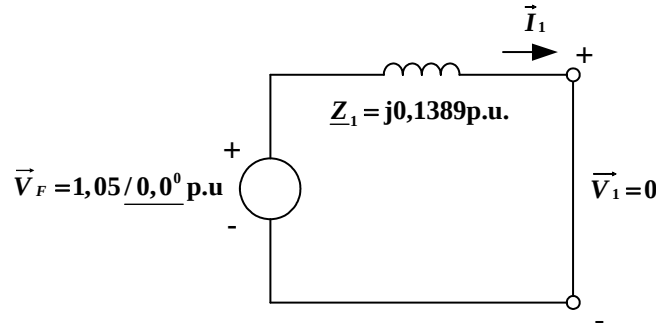


Figura 2.9 Red de secuencia positiva cortocircuitadas

De donde la corriente de secuencia positiva subtransitoria en por unidad es,

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_F}{\underline{Z}_1} = \frac{1,05 \angle 0,0^\circ}{j0,1389} = 7,56 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.}$$

Por supuesto que las corrientes subtransitorias de secuencias negativa y cero son iguales a cero.

Por consiguiente las corrientes de falla subtransitoria son,

$$\vec{I}_A'' = 7,56 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.} ; \vec{I}_B'' = 7,56 \angle -210,0^\circ \text{ p.u.} ; \vec{I}_C'' = 7,56 \angle -330,0^\circ \text{ p.u.}$$

La corriente base en las barras colectoras 2 es,

$$I_{B,barra2} = \frac{\text{MVA}}{\sqrt{3} \text{ kV}_{L2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 13,8} = 4,18 \text{ kA}$$

Las corrientes de falla subtransitoria en amperes son,

$$\vec{I}_A'' = I_{B,barra2} \times \vec{I}_{A,p.u.} = 4,18 \times 7,56 \angle -90,0^\circ = 31,6 \angle -90,0^\circ \text{ kA}$$

$$\vec{I}_B'' = 31,6 \angle -210,0^\circ \text{ kA} ; \vec{I}_C'' = 31,6 \angle -330,0^\circ \text{ kA}$$

c2). Falla franca de fase a tierra.

Falla de la línea A a tierra, en las barras colectoras 2.



Las redes de secuencia positiva, negativa y cero de la Figura 2.6 se conectan en serie a las terminales de la falla, como se muestra en la Figura 2.10.

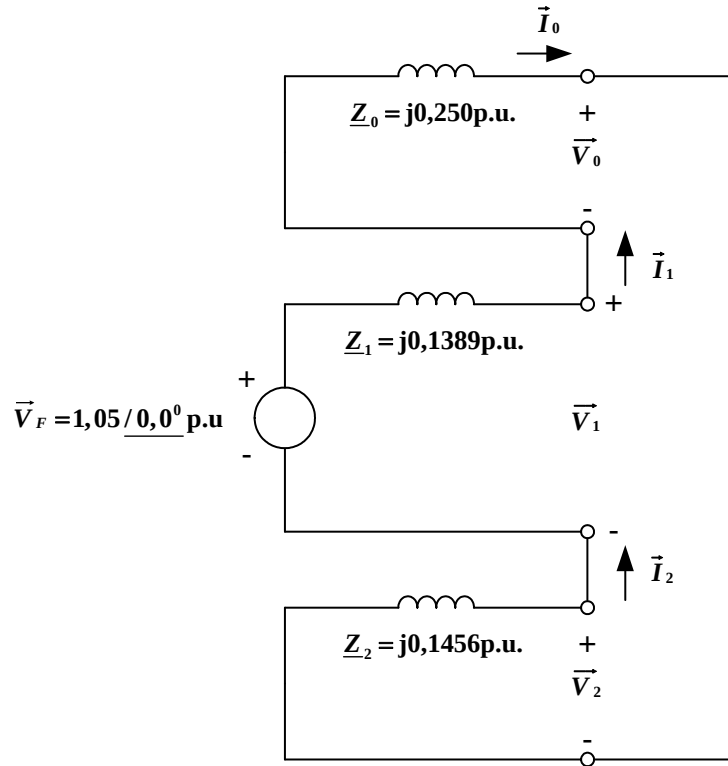


Figura 2.10 Redes de secuencia positiva, negativa y cero conectadas en serie a las terminales de falla

Puesto que el corto circuito es franco,  $Z_F = 0$ . De donde las corrientes de las secuencias son,

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}_0 = \frac{\vec{V}_F}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} = \frac{1,05 \angle 0,0}{j(0,1389 + 0,1456 + 0,250)} = 1,965 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.}$$

La corriente de falla subtransitoria es

$$\vec{I}_A'' = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = 3\vec{I}_1 = 3 \times 1,965 \angle -90,0 = 5,89 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.}$$

La corriente base en las barras 2 es,

$$I_{B, \text{barra2}} = \frac{\text{MVA}}{\sqrt{3} \text{ kV}_{L2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 13,8} = 4,18 \text{ kA}$$



Por consiguiente, la corriente de falla subtransitoria en las barras 2 es,

$$\vec{I}_A'' = \vec{I}_{B, barras2} \times \vec{I}_{A, p.u} = 4,18 \times 5,89 \angle -90,0 = 24,6 \angle -90,0^0 \text{ kA}$$

Las componentes de secuencia de la tensión en la falla son,

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \\ \underline{Z}_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1,05 \angle 0,0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0,1389 \angle 90,0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1456 \angle 90,0 \\ 0,250 \angle 90,0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,965 \angle -90,0 \\ 1,965 \angle -90,0 \\ 1,965 \angle -90,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,777 \angle 0,0 \\ 0,286 \angle 180,0 \\ 0,491 \angle 180,0 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

De donde las tensiones de fase de línea a tierra en las barras colectoras 2 en el punto de falla son,

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{AT} \\ \vec{V}_{BT} \\ \vec{V}_{CT} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0,777 \angle 0,0 \\ 0,286 \angle 180,0 \\ 0,491 \angle 180,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,179 \angle -128,7 \\ 1,179 \angle 128,7 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Tomando como tensión base a 110 kV, tenemos que las tensiones en volt son,

$$\vec{V}_{AT} = 0 ; \vec{V}_{BT} = 110 \times 1,179 \angle -128,7 = 129,7 \angle -128,7^0 \text{ kV} ; \vec{V}_{CT} = 129,7 \angle 128,7^0 \text{ kV}$$

c3). Falla franca entre dos fases.

Falla franca entre la línea B y la línea C en las barras colectoras 2.

Las redes de secuencia positiva y negativa de las figuras números 2.6 y 2.7 se conectan en paralelo en las terminales de falla, como se muestra en la Figura 2.11.

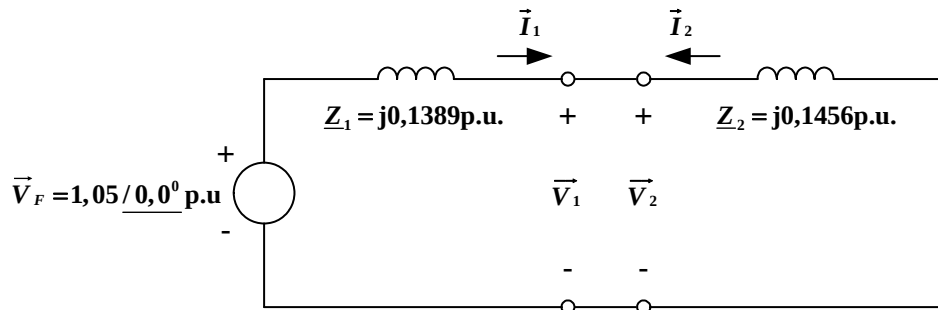


Figura 2.11 Redes de secuencia positiva y negativa conectadas en paralelo en las terminales de falla





Con  $\underline{Z}_F = 0$ , las corrientes de secuencia de la falla son,

$$\vec{I}_1 = -\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_F}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{1,05 \angle 0,0}{0,1389 \angle 90,0 + 0,1456 \angle 90,0} = 3,69 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_0 = 0$$

La corriente subtransitoria de falla en la fase B es,

$$\vec{I}_B'' = \mathbf{a}^2 \vec{I}_1 + \mathbf{a} \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a}) \vec{I}_1$$

$$= \sqrt{3} \angle -90,0^\circ \times 3,69 \angle -90,0^\circ = 6,39 \angle 180,0^\circ \text{ p.u.}$$

Usando la corriente base de 4,18 kA tenemos,

$$\vec{I}_B'' = I_{B, \text{barras2}} \times \vec{I}_{B, \text{p.u.}} = 4,18 \times 6,39 \angle 180,0^\circ = 26,7 \angle 180,0^\circ \text{ kA}$$

Además,

$$\vec{I}_A'' = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = 0$$

$$\vec{I}_C'' = \mathbf{a} \vec{I}_1 + \mathbf{a}^2 \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = (\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \vec{I}_1 = -\vec{I}_B$$

$$\vec{I}_A'' = 0 \quad ; \quad \vec{I}_C'' = 26,7 \angle 0,0^\circ \text{ kA}$$

c4). Falla franca entre dos fases y tierra.

Falla franca entre la línea B y la línea C y tierra en las barras colectoras 2.

Las redes de secuencia positiva, negativa y cero de las figuras 2.6, 2.7 y 2.8, están conectadas en paralelo con la tensión de la falla, como se muestra en la Figura 2.12.

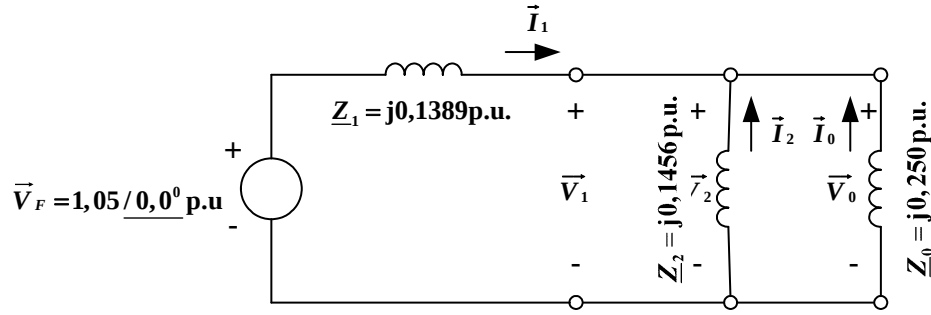


Figura 2.12 Redes de secuencia positiva, negativa y cero conectadas en paralelo con tensión en la falla

Con  $\underline{Z}_F = 0$ , las corrientes de secuencia de la falla son,

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_F}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_0}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}} = \frac{1,05 \angle 0,0}{0,1389 \angle 90,0 + \frac{0,1456 \angle 90,0 \times 0,250 \angle 90,0}{0,1456 \angle 90,0 + 0,250 \angle 90,0}} = 4,55 \angle -90,0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_2 = -\vec{I}_1 \left( \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right) = -4,55 \angle -90,0^\circ \times \left( \frac{0,250 \angle 90,0}{0,1456 \angle 90,0 + 0,250 \angle 90,0} \right) = 2,88 \angle 90,0^\circ \text{ p.u.}$$

$$\vec{I}_0 = -\vec{I}_1 \left( \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right) = -4,55 \angle -90,0^\circ \times \left( \frac{0,1456 \angle 90,0}{0,1456 \angle 90,0 + 0,250 \angle 90,0} \right) = 1,675 \angle 90,0^\circ \text{ p.u.}$$

Transformando al dominio de fase, las corrientes subtransitorias de fase son,

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_A'' \\ \vec{I}_B'' \\ \vec{I}_C'' \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \vec{I}_1'' \\ \vec{I}_2'' \\ \vec{I}_0'' \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 4,55 \angle -90,0 \\ 2,88 \angle 90,0 \\ 1,675 \angle 90,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6,91 \angle 158,7 \\ 6,91 \angle 21,3 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Usando la corriente base de 4,18 kA tenemos,

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_A'' \\ \vec{I}_B'' \\ \vec{I}_C'' \end{bmatrix} = 4,18 \begin{bmatrix} 0 \\ 6,91 \angle 158,7 \\ 6,91 \angle 21,3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 28,9 \angle 158,7 \\ 28,9 \angle 21,3 \end{bmatrix} \text{ kA}$$



De donde,

$$\vec{I}_A'' = 0 \quad ; \quad \vec{I}_B'' = 28,9 \angle 158,7^\circ \text{ kA} \quad ; \quad \vec{I}_C'' = 28,9 \angle 21,3^\circ \text{ kA}$$

La corriente de falla a tierra es,

$$\begin{aligned} \vec{I}_N &= 3 \vec{I}_0 = 3 \times 1,675 \angle 90,0^\circ = 5,02 \angle 90,0^\circ \text{ p.u.} \\ &= 4,18 \times 5,02 \angle 90,0^\circ = 21,0 \angle 90,0^\circ \text{ kA} \end{aligned}$$

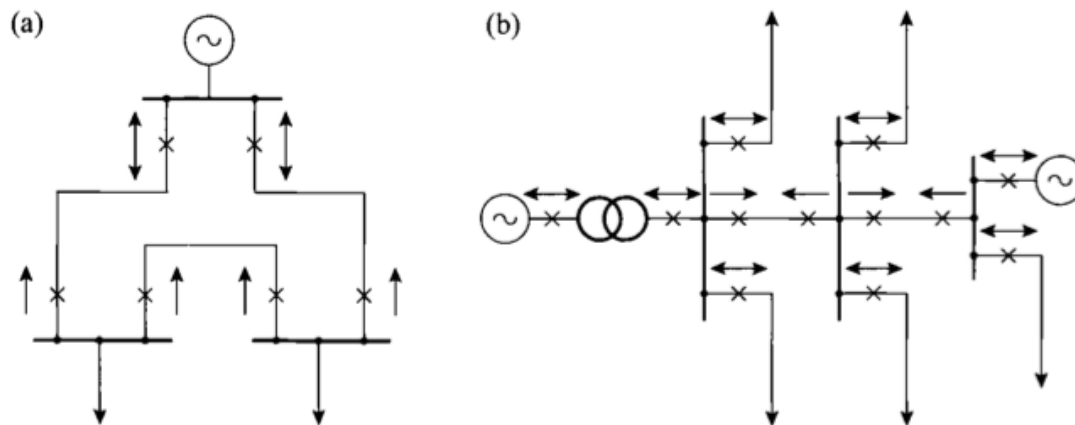
## Capítulo 3 Simulaciones Con Relevadores de Sobrecorriente con el Programa SKM Power Tools

### 3.1 Relevadores Direccionales de Sobrecorriente

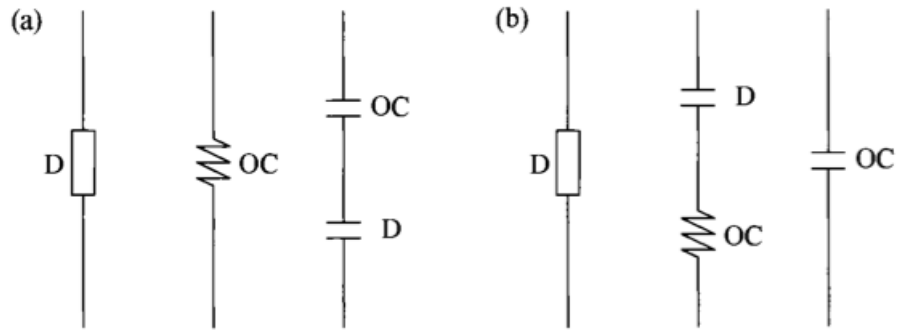
La protección de sobrecorriente direccional se utiliza cuando es necesario proteger el sistema contra corrientes de falla que pudiera circular en ambas direcciones a través de un elemento del sistema, y cuando la protección de sobrecorriente bidireccional podría producir la desconexión innecesaria de circuitos. Esto puede ocurrir en sistemas de anillo o de tipo malla y en sistemas con un número de puntos de profundización. El uso de relés de sobrecorriente direccionales en las dos situaciones se muestra en la Figura 3.1.

### 3.2 Construcción

Los relés de sobrecorriente direccionales se construyen utilizando una unidad de sobrecorriente normal más una unidad que puede determinar la dirección del flujo de potencia en el elemento de sistema de distribución asociada. Además de la corriente del relé esta segunda unidad por lo general requiere una señal de referencia para medir el ángulo de la falla y por lo tanto determinar el relé debe operar o no. En general, la referencia o señal de polarización es una tensión, pero esto también puede ser una entrada de corriente.



**Figura 3.1** Aplicación de relés de sobrecorriente direccionales: (a) sistema de anillo; (b) sistema multifuente



**Figura 3.2** Obtención de la dirección del flujo de potencia: (a) por supervisión; (b) por control

Básicamente, existen dos métodos para obtener la dirección del flujo de potencia - supervisión y control; ambos casos se muestran en la Figura 3.2 donde D indica la unidad direccional y OC la unidad de sobrecorriente. Es mejor utilizar el sistema de control para determinar la dirección del flujo de potencia, ya que la unidad de sobrecorriente sólo operando cuando el flujo es en la dirección correcta. Con el método de control, la unidad de sobrecorriente puede recoger de la dirección del flujo de alimentación incorrecta. Además, cuando un interruptor se abre en un sistema anillo los flujos actuales cambiarán y esto podría dar lugar a la posibilidad consiguiente de la pérdida de la coordinación.

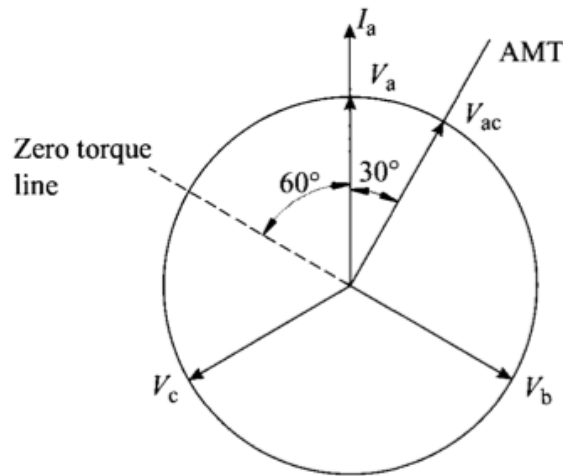
### 3.3 Principio de Operación

El par de operación puede ser definido por  $T = K\Phi_1\Phi_2\sin\theta$  donde  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  son los valores de polarización,  $\Phi_1$  es proporcional a la corriente y  $\Phi_2$  es proporcional a la tensión, con  $\theta$  el ángulo entre  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$ . El par es positivo si  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  y negativo si  $180^\circ < \theta < 360^\circ$ . Cabe señalar que  $\theta$  está en fase I, pero con retraso con respecto a la tensión ya que  $V = -(d\Phi)/dt$ .

Si  $I$  y  $V$  están en fase, entonces los flujos están fuera de fase en  $90^\circ$ . Por lo tanto, el ángulo de par máximo se produce cuando la corriente y la tensión del relé están en fase. Esto se puede conseguir muy simplemente mediante el uso de la corriente y la tensión de la misma fase. Sin embargo, esto no es práctico ya que, por un fallo en una de las fases, la tensión de fase podría colapsar. Por lo tanto, en la práctica es común el uso de la corriente en una fase diferente.

### 3.4 Conexiones del Relevador

La conexión de un relé direccional se define sobre la base de los grados por el cual una corriente de factor de potencia unitario conduce la tensión de polarización. El ángulo de torsión máxima, AMT, es el ángulo para el que este desplazamiento produzca el par máximo y por lo tanto siempre esté alineado con la tensión de polarización.



**Figura 3.3 Diagrama Vectorial para 30 ° conexión (0° AMT)**

### 3.4.1 30 ° conexión (0° AMT)

La Alimentación de los réles

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A: I_a, & \Phi_B: I_b, & \Phi_C: I_c \\ V_{ac} & V_{ba} & V_{cb} \end{array}$$

Par máximo: cuando la corriente de fase se retrasa a la tensión entre fase y neutro por 30°.

Ángulo de operación: el ángulo de la corriente se adelanta por 60° o se retrasa por 120°.

Uso: este tipo de conexión siempre se debe utilizar en los alimentadores, siempre que no tenga tres elementos, es decir, una por fase, ya que dos elementos de fase y un elemento de tierra puede dar lugar a mal funcionamiento (véase la Figura 3.3). La disposición de unidades de tres fases no debe ser utilizado en circuitos de transformadores donde algunas fallas pueden resultar en un flujo de corriente inversa en una o más fases que conducen a relé a un mal funcionamiento.

### 3.4.2 60 ° Conexión (0 ° AMT)

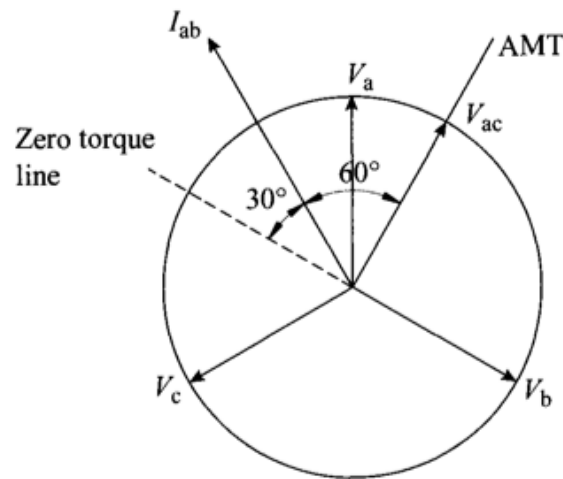
La alimentación de los relés:

$$\begin{array}{ccc} \Phi_A: I_{ab}, & \Phi_B: I_{bc}, & \Phi_C: I_{cb} \\ V_{ac} & V_{ba} & V_{cb} \end{array}$$

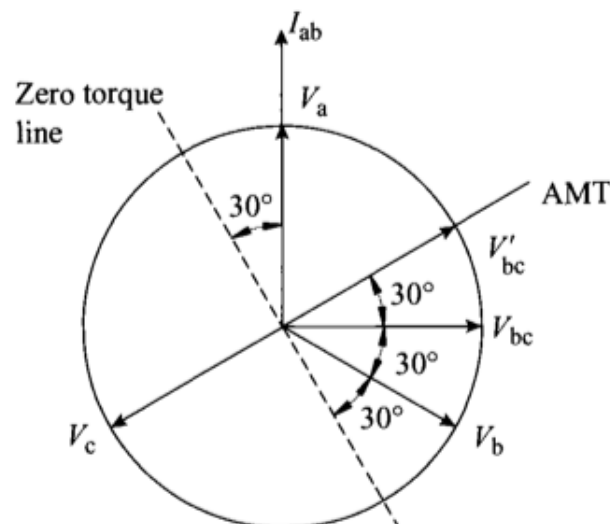
Par máximo: cuando la corriente se atrasa a la tensión entre fase y neutro en 60°.  $I_{ab}$  se retrasa con respecto a  $V_{ac}$  por 60°.  $I_a$  se retrasa con respecto a  $V_a$  por 60° con un factor de potencia unitario.

Ángulo de operación: la corriente  $I_{ab}$  de  $30^\circ$  se adelanta o se retrasa por  $150^\circ$ , o  $I_a$  se adelanta en  $30^\circ$  o se atrasa en  $150^\circ$  con respecto al factor de potencia unitario.

Uso: se recomienda que los relés con esta conexión se utilizan únicamente en los alimentadores (véase la Figura 3.4). Sin embargo, tienen la desventaja de que los CT tienen que ser conectados en Delta. Por esta razón, y debido a que no ofrecen ventajas en comparación con el caso anterior, se utilizan poco.



**Figura 3.4 Diagrama Vectorial para  $60^\circ$  conexión ( $0^\circ$  AMT)**



**Figura 3.5 Diagrama Vectorial para  $90^\circ$  conexión ( $30^\circ$  AMT)**

### 3.4.3 90 ° de conexión (30 ° AMT)

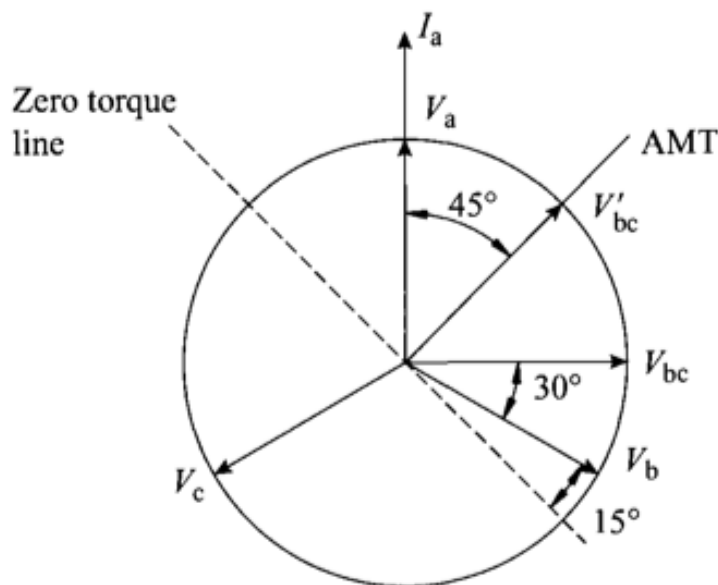
La alimentación de los relés:

$$\begin{array}{lll} \Phi_A: I_a, & \Phi_B: I_b, & \Phi_C: I_c \\ V_{bc} + 30^\circ & V_{ca} + 30^\circ & V_{ab} + 30^\circ \end{array}$$

Par máximo: cuando la corriente atrasa a la tensión entre fase y neutro en 60°.

Ángulo de operación: ángulos de corriente se adelanta en 30 ° o se atrasa en 150°.

Uso: en alimentadores, donde la fuente de los componentes de secuencia cero está detrás del punto de conexión del relé (véase la Figura 3.5).



**Figura 3.6**Diagrama Vectorial para 90 ° conexión (45° AMT)

### 3.4.4 90 ° de conexión (45 ° AMT)

La alimentación de los relés:

$$\begin{array}{lll} \Phi_A: I_a, & \Phi_B: I_b, & \Phi_C: I_c \\ V_{bc} + 45^\circ & V_{ca} + 45^\circ & V_{ab} + 45^\circ \end{array}$$

Par máximo: cuando la corriente se atrasa a la tensión entre fase y neutro en 45 °.

Ángulo de operación: el ángulo de la corriente se adelanta en 45 ° o se retrasa en 135 °.



Uso: este dispositivo se recomienda para la protección de transformadores o alimentadores que tienen una fuente de componentes de secuencia cero en la parte frontal del relé (véase la Figura 3.6). Esta conexión es esencial en el caso de los transformadores en paralelo, o alimentadores de transformadores, especialmente para garantizar el correcto funcionamiento de los relés para fallas más allá de Yd transformadores. Esta configuración se debe utilizar siempre cuando relés direccionales monofásicos se aplican a los circuitos que pueden tener una distribución de corriente 2-1-1.

### 3.5 Relés direccionales de falla a tierra

Direccionales de los relés de falla a tierra se construyen sobre la base de que la tensión residual es igual a tres veces la caída de tensión de secuencia cero en la impedancia de la fuente, y desplazada con respecto a la corriente residual para la característica de ángulo de la impedancia de la fuente. Cuando un conjunto de VTs adecuados no están disponibles para la obtención de la tensión de polarización, la corriente de polarización se emplea el uso de la corriente de un transformador local conectada a tierra. Esto se basa en el principio de que la corriente de neutro siempre fluye hacia el sistema de la tierra mientras que, dependiendo de la falla, la corriente residual puede fluir en cualquier dirección. Cabe destacar, sin embargo, que la posibilidad de que el fallo de un relé de protección direccional tensión de polarización es mínima y por lo tanto se recomienda que este dispositivo se debe utilizar siempre que sea posible.

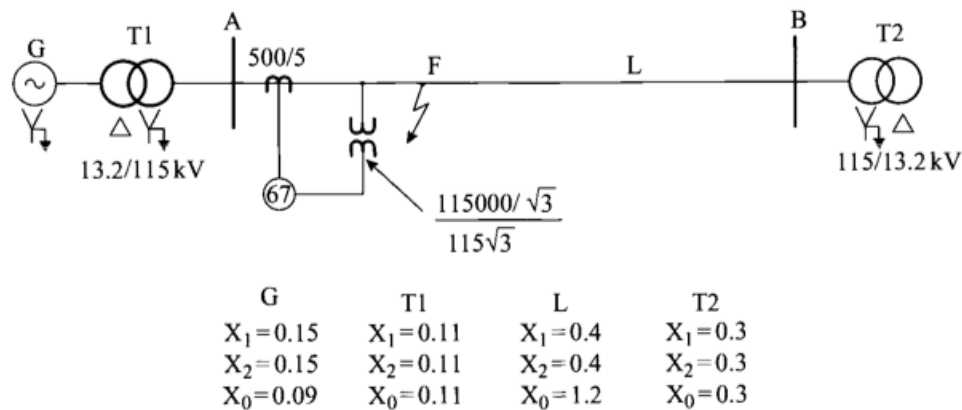


Figura 3.7 Diagrama unifilar del sistema para el ejemplo 3.1

### Ejemplo 3.1

Una falla a tierra en las fases B y C se representa por la flecha en el punto F en el sistema de potencia en la Figura 3.7. Determinar las señales de tensión y corriente (en amperes y volts) que intervienen en cada uno de los relés direccionales que tienen una conexión de  $30^\circ$  y se alimentan, como se indica a continuación:

$$\Phi_A: I_A, \quad \Phi_B: I_B, \quad \Phi_C: I_C$$



$$V_{AC}$$

$$V_{BA}$$

$$V_{CB}$$

Además, indican que los relés funcionan sobre la ocurrencia de la falla. En la solución, se ignoran las corrientes de carga y se asumirá una tensión de pre-falla igual a 1 p.u. Las bases en la ubicación del generador son 13,2 kV y 100 MVA.

Nótese: Aunque el sistema es radial, la instalación de un relé de sobrecorriente direccional se justifica por el supuesto crecimiento de este circuito será parte de un anillo en un sistema futuro.

solución

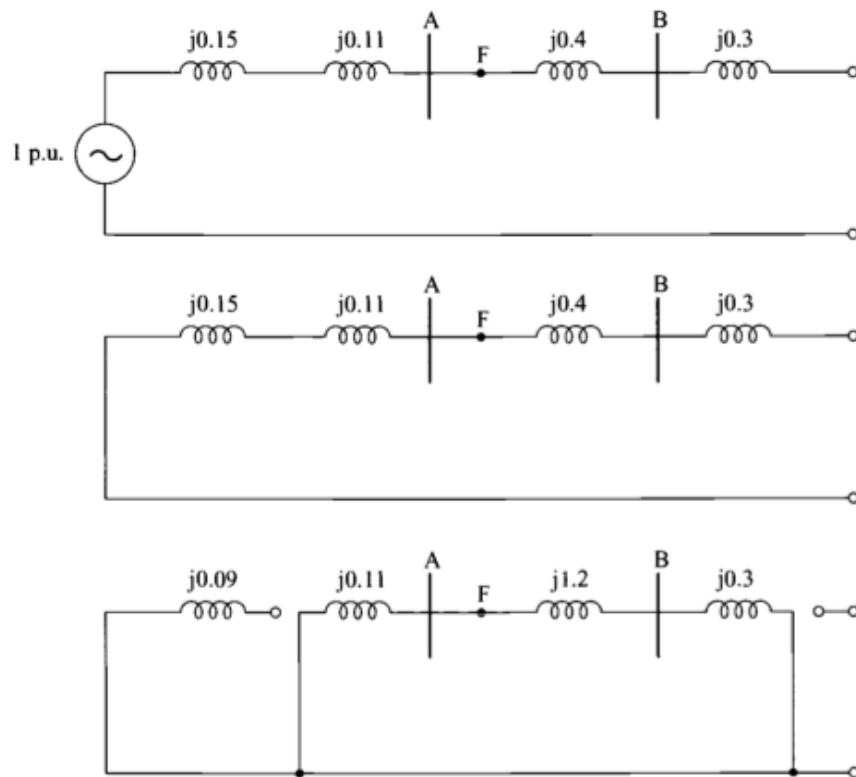
Las condiciones para una falla bifásica de fase a tierra, B-C-N, son

$$I_A = 0, \quad V_B = 0, \quad V_C = 0$$

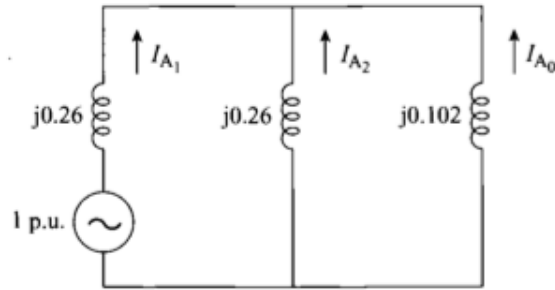
Las tres redes de secuencia se muestran en la Figura 3.8. El circuito equivalente se obtiene mediante la conexión de las tres redes de secuencia en paralelo como se muestra en la Figura 3.9.

De la Figura 3.8

$$Z_0 = 0.11 \parallel 1.5 \Rightarrow Z_0 = 0.102$$



**Figura 3.8** Redes de secuencia para el Ejemplo 3.1



**Figura 3.9** Circuito equivalente para la Figura 3.8

de manera que las tres corrientes de secuencia en la red son:

$$I_{A1} = \frac{1}{(j0.26 + \frac{j0.26 \times j0.102}{j0.362})} = -j3.0 \text{ p.u.}$$

$$I_{A2} = -(-j3.0) \frac{j0.102}{(j0.26 + j0.102)} = j0.845$$

$$I_{A0} = -(-j3.0) \frac{j0.26}{(j0.26 + j0.102)} = j2.155$$

En el punto de la falla:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = -j3.0 + j0.845 + j2.155$$

$\Rightarrow I_A = 0$  como era de esperar por una falta B-C-N

$$\begin{aligned} I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0} = 1 \angle 240^\circ (-j3.0) + 1 \angle 120^\circ (j0.845) + j2.155 \\ &= -3.33 + j3.2315 = 4.64 \angle 135.86^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0} = 1 \angle 120^\circ (-j3.0) + 1 \angle 240^\circ (j0.845) + j2.155 \\ &= 3.33 + j3.2315 = 4.64 \angle 44.14^\circ \end{aligned}$$

En el punto de falla en la red (no en el relé):

$$V_{A1} = V_{A2} = V_{A0} = -I_{A2}(j0.26) = 0.220$$

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} = 3V_{A1} = 3 \times 0.22 = 0.66$$

$$V_B = V_C = 0$$

$$V_{AC} = V_A - V_C = V_A - 0 = 0.66$$

$$V_{BA} = V_B - V_A = -V_A = -0.66$$

$$V_{CB} = V_C - V_B = 0$$



Las bases en el punto de falla son:

$$V = 115kV; \quad P = 100MVA$$

$$I_{Base} = \frac{P}{\sqrt{3}V} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 115 \times 10^3} = 502.04A$$

Por lo tanto, los valores en el punto de la falla son:

$$I_A = 0$$

$$V_{AC} = 0.66 \times \frac{11500}{\sqrt{3}} \times \frac{115}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{115000} = 43.82 \angle 0^\circ V$$

$$I_B = 4.64 \angle 135.86^\circ \times 502.04 \times \left(\frac{5}{500}\right) = 23.29 \angle 135.86^\circ A$$

$$V_{BA} = -0.66 \times \frac{11500}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} = 43.82 \angle 180^\circ V$$

$$I_B = 4.64 \angle 44.14^\circ \times 502.04 \times \left(\frac{5}{500}\right) = 23.29 \angle 44.14^\circ A$$

$$V_{CB} = 0$$

$$I_{3\Phi} = \frac{1}{j0.26} = -j3.48 \quad I_{1\Phi} = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 3I_{A1}$$

y

$$I_{A1} = \frac{1}{j0.26 + j0.26 + j0.102} = -j1.6077$$

de modo que

$$I_{1\Phi} = 3 \times (-j1.6077) = -j4.823$$

En el punto donde se encuentra el relé habrá valores de corriente positivos y de secuencia negativa iguales, ya que hay en el punto de falla, sin embargo, la corriente en el propio relé de secuencia cero es diferente debido a la división de la corriente.

En el relé,  $I_{AB} = j2.154 (1.5/1.61) = j2 p.u.$ , de modo que en el relé

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = -j3.0 + j0.845 + j2 = -j0.155$$

y se verá que, en este caso,  $I_A \neq 0$ :

$$\begin{aligned} I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0} = 1 \angle 240^\circ (-j3.0) + 1 \angle 120^\circ (j0.845) + j2 \\ &= 3.0 \angle 150^\circ + 0.845 \angle 210^\circ + 2.0 \angle 90^\circ \end{aligned}$$



$$= -3.33 + j3.077 = 4.534 \angle 134.26^\circ$$

$$I_C = aI_{A1} + a^2I_{A2} + I_{A0} = 1 \angle 120^\circ (-j3.0) + 1 \angle 240^\circ (j0.845) + j2$$

$$= 3.0 \angle 30^\circ + 0.845 \angle -30^\circ + 2.0 \angle 90^\circ$$

$$= 3.33 + j3.077 = 4.534 \angle 42.73^\circ$$

$$V_{A1} = V_{A2} = I_{A2}(j0.26) = 0.845 \times 0.26 = 0.22$$

$$V_{A0} = -I_{A0}(j0.11) = -j2.0(j0.11) = 0.22$$

$$V_A + V_{A1} + V_{A2} + V_{A0} = 3V_{A1} = 3 \times 0.22 = 0.66$$

$$V_B = V_C = 0$$

Las señales que alimentan el relé son:

$$\Phi_A$$

$$I_A = 0.155 \angle -90^\circ \times 502.04 \times (5/500) = 0.728 \angle -90^\circ A$$

$$V_{AC} = 0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{115\sqrt{3}}{115000\sqrt{3}} = 43.82 \angle 0^\circ$$

$$\Phi_B$$

$$I_B = 4.543 \angle 134.26^\circ \times 502.04 \times (5/500) = 22.76 \angle 134.26^\circ A$$

$$V_{BA} = -0.66 \times \frac{115000}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} = 43.82 \angle 180^\circ V$$

$$\Phi_C$$

$$I_C = 4.543 \angle 42.73^\circ \times 502.04 \times (5/500) = 22.76 \angle 42.73^\circ A$$

$$V_{BC} = 0$$

Análisis de funcionamiento de los relés direccionales:

Polarización:

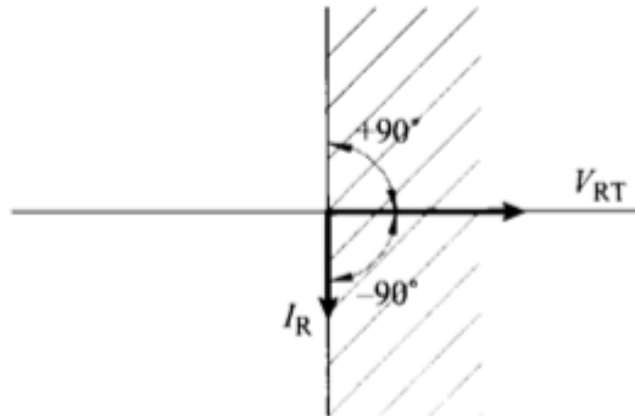
|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| $\Phi_A$ | $\Phi_B$ | $\Phi_C$ |
| $I_A$    | $I_B$    | $I_C$    |
| $V_{AC}$ | $V_{BA}$ | $V_{CB}$ |

Fase A del relé:

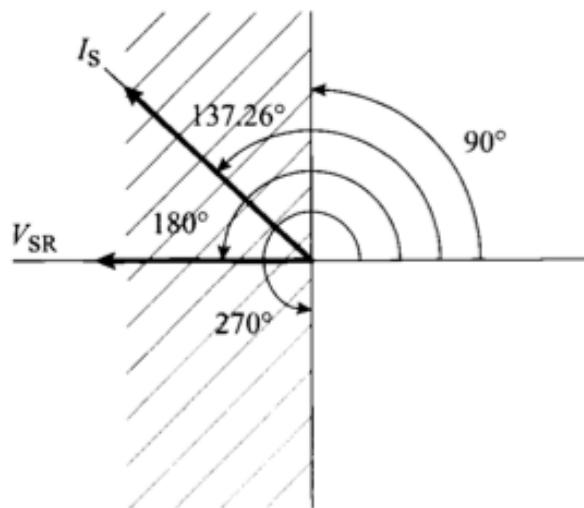
$$I_A = 0.728 \angle 90^\circ A$$

$$V_{AC} = 43.82 \angle -0^\circ A$$

Para el funcionamiento,  $-90^\circ < \text{ángulo de } I_A < 90^\circ$ . El relé en la fase A está en el límite de funcionamiento (véase la Figura 3.10) creando así algunas dudas acerca de la operación de su unidad direccional.



**Figura 3.10** Análisis de funcionamiento del relé para la fase A



**Figura 3.11** Análisis de funcionamiento del relé para la fase B

Fase B del relé:

$$I_B = 22.76 \angle 134.26^\circ A$$

$$V_{BA} = 43.82 \angle 180^\circ V$$



Para la operación,  $90^\circ < \text{ángulo de } I_B < 270^\circ$ . El relé en la fase B funciona, ya que el ángulo de  $I_B$  es  $134.26^\circ$ ; véase la Figura 3.11.

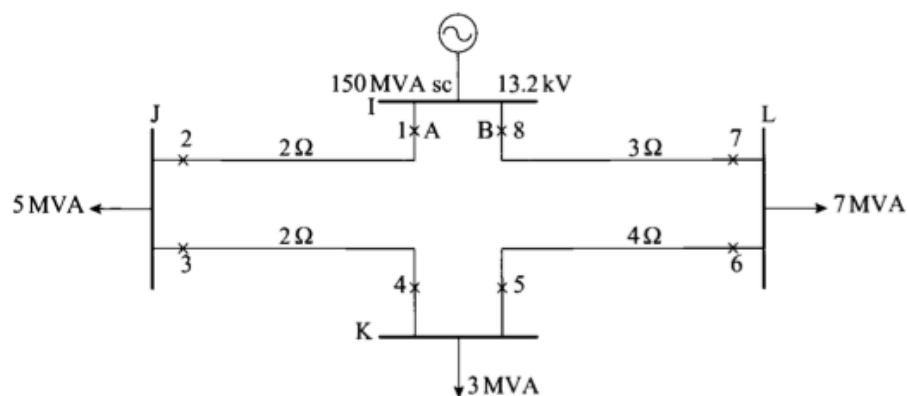
Fase C del relé: este no opera por que  $V_{CB} = 0$ .

### 3.6 Coordinación de las unidades instantáneas

Los cálculos para la configuración de una unidad instantánea en un sistema de anillo se llevan a cabo utilizando el nivel de cortocircuito en los próximos relé aguas abajo, con el anillo abierto, multiplicado por un factor de sobrecarga de seguridad con el fin de mantener la coordinación, teniendo en cuenta el componente transitorio de DC de la corriente. El criterio utilizado aquí es el mismo que para el establecimiento de relés de sobrecorriente bidireccionales protección de líneas entre las subestaciones. Cuando el anillo tiene una sola fuente, los relés instalados en las subestaciones adyacentes a la subestación fuente nunca deben registrar cualquier corriente de la subestación hacia la fuente. Por lo tanto, se recomienda que, para estos relés, las unidades instantáneas deben fijarse a 1,5 veces la corriente de carga máxima. Un valor más bajo no debe utilizarse ya que esto podría resultar en un viaje false si el elemento direccional capta inadvertidamente en condiciones de transferencia de carga severas. Con estos ajustes de las unidades instantáneas entonces tienen el mismo valor de recogida actual como el de las unidades de retardo de tiempo para que la coordinación no se vea comprometida.

#### Ejemplo 4.2

Para el sistema que se muestra en la Figura 3.12 determinan las corrientes máximas de carga, las relaciones de transformación de los CT y la configuración actual de las unidades instantáneas para garantizar un régimen de protección coordinada. Los ajustes instantáneos se debe dar en amperes primarios, ya referencia a los modelos de relés específicos no se da.



**Figura 3.12** Diagrama unifilar de un sistema de anillo con una apertura en el Ejemplo 3.2



## Cálculo de las corrientes máximas de carga

Con el anillo abierto en A:

Corriente de carga total que fluye a través de B =  $(7 + 3 + 5MVA)/\sqrt{3(13200V)}$  Relés

$$= (15MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 656.08A \quad (7)(8)$$

$$\text{Corriente de carga total de L a K} = (8MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 349.9A \quad (5)(6)$$

$$\text{Corriente de carga total de K a J} = (5MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 218.69A \quad (3)(4)$$

$$\text{Corriente de carga total de L a K} = (8MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 349.9A \quad (5)(6)$$

$$\text{Corriente de carga total que fluye por J} = 0 A \quad (1)(2)$$

Con el anillo abierto en B:

$$\text{Corriente de carga total que fluye a través de A} = (15MVA)/\sqrt{3(13200V)}=656.08 \quad (1)(2)$$

$$\text{Corriente de carga total de J a K} = (10MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 434.38A \quad (3)(4)$$

$$\text{Corriente de carga total de K a L} = (7MVA)/(\sqrt{3} (13200V)) = 306.17A \quad (5)(6)$$

$$\text{Corriente de carga total que fluye por L} = 0 A \quad (7)(8)$$

## Selección de los TCs

Se supone que los TC disponibles tienen espiras del primario en múltiplos de 100 hasta 600, y a partir de entonces en múltiplos de 200. Las relaciones de TC se calculan para las condiciones de carga máxima primero. Por lo tanto, las relaciones de TC seleccionados son:

$$I_{\max 1} = 656.08 A \quad \text{Relacion TC} = 800/5$$

$$I_{\max 2} = 656.08 A \quad \text{Relacion TC} = 800/5$$

$$I_{\max 3} = 434.38 A \quad \text{Relacion TC} = 500/5$$

$$I_{\max 4} = 434.38 A \quad \text{Relacion TC} = 500/5$$

$$I_{\max 5} = 349.90 A \quad \text{Relacion TC} = 400/5$$

$$I_{\max 6} = 349.90 A \quad \text{Relacion TC} = 400/5$$

$$I_{\max 7} = 656.08 A \quad \text{Relacion TC} = 800/5$$

$$I_{\max 8} = 656.08 A \quad \text{Relacion TC} = 800/5$$

Con el fin de confirmar esta selección, es necesario comprobar si o no la saturación está presente en el nivel de máxima de falla en cada interruptor, utilizando las relaciones de TC más arriba. Con los valores de falla más críticos, calculados en la siguiente sección, se puede demostrar que ningún TC está saturado ya que el valor de  $0,05 \times I_{sc}$  es muy inferior al número de espiras del primario para cada uno.





## Cálculo de corrientes de falla

Barra 1

$$I_{sc} = 150 \text{ MVA} / (\sqrt{3} (13200 \text{ V})) = 6560.8 \text{ A}$$

$$Z_{fuente} = \frac{(13200 \text{ V})^2}{150 \text{ MVA}} = 1.16 \Omega$$

Barra J

El circuito equivalente para una falla en J se muestra en la Figura 3.13:

$$I_{scJ} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 1.64)} = 2721.79 \text{ A, con anillo cerrado.}$$

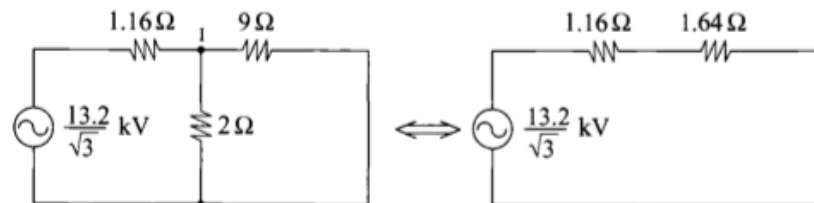
El reparto de la flujos de corriente en la proporción inversa de la impedancia del circuito:

$$I_{scJ}(\text{en el lado derecho}) = 2721.79 \times (2/11) = 494.87 \text{ A}$$

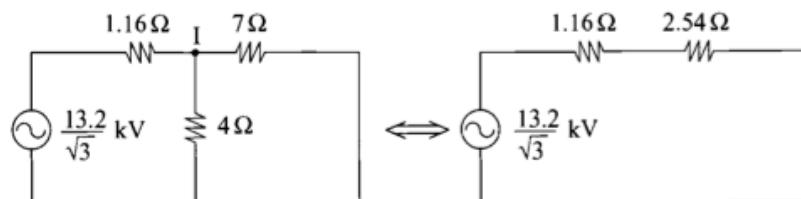
$$I_{scJ}(\text{en el lado izquierdo}) = 2721.79 \times (9/11) = 2226.92 \text{ A}$$

Con el Interruptor A abierto:

$$I_{scJ} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 9)} = 750.1 \text{ A}$$



**Figura 3.13 Circuito Equivalente para una falla en J (ejemplo 3.2)**



**Figura 3.14 Circuito Equivalente para una Falla en K (ejemplo 3.2)**



Con el Interruptor B abierto:

$$I_{scJ} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 2)} = 2411.71 \text{ A}$$

Barra K

El circuito equivalente para una falla en L se muestra en la Figura 3.14:

$$I_{scK} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 2.54)} = 2059.74 \text{ A, con el anillo cerrado.}$$

$$I_{scK}(\text{en el lado derecho}) = 2059.74 \times (4/11) = 748.99 \text{ A}$$

$$I_{scK}(\text{en el lado izquierdo}) = 2059.74 \times (4/11) = 748.99 \text{ A}$$

Con el Interruptor abierto en A:

$$I_{scK} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 7)} = 933.94 \text{ A}$$

con el interruptor abierto en B:

$$I_{scK} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 4)} = 1476.94 \text{ A}$$

Barra L

El circuito equivalente para una falla en L se muestra en la Figura 3.15:

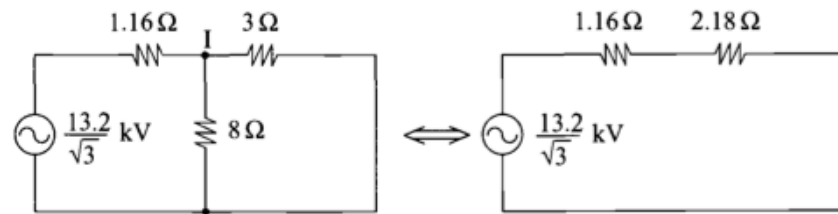
$$I_{scL} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 2.18)} = 2281.74 \text{ A, con el anillo cerrado.}$$

$$I_{scL}(\text{en el lado derecho}) = 2281.74 \times (8/11) = 1659.45 \text{ A}$$

$$I_{scL}(\text{en el lado izquierdo}) = 2281.74 \times (3/11) = 622.29 \text{ A}$$

Con el interruptor A abierto:

$$I_{scL} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 3)} = 1831.97 \text{ A}$$



**Figura 3.15 Circuito Equivalente para una falla en L (ejemplo 3.2)**

Con el interruptor B abierto:

$$I_{scL} = \frac{13200}{\sqrt{3}(1.16 + 8)} = 831.99 \text{ A}$$

Configuración de la unidad instantánea

Sentido a las manecillas del reloj:

$$\text{Relé 7: } 1.50 \times 656.08 \text{ A} = 984.12 \text{ A}$$

$$\text{Relé 5: } 1.25 \times 831.99 \text{ A} = 1039.99 \text{ A}$$

$$\text{Relé 3: } 1.25 \times 1476.94 \text{ A} = 1846.17 \text{ A}$$

$$\text{Relé 1: } 1.25 \times 2411.71 \text{ A} = 3014.64 \text{ A}$$

Sentido contrario a las manecillas del reloj:

$$\text{Relé 2: } 1.50 \times 656.08 \text{ A} = 984.12 \text{ A}$$

$$\text{Relé 4: } 1.25 \times 750.10 \text{ A} = 934.62 \text{ A}$$

$$\text{Relé 6: } 1.25 \times 933.94 \text{ A} = 1164.42 \text{ A}$$

$$\text{Relé 8: } 1.25 \times 1831.97 \text{ A} = 2289.96 \text{ A}$$

### 3.7 Ajuste del tiempo de las unidades de sobrecorriente direccional

Al igual que en el caso de los relés de sobrecorriente bidireccionales, las unidades de retardo de tiempo de los relés de sobrecorriente direccionales en un anillo se establecen mediante la selección de los valores adecuados de los valores de marcación pick-up actual y la hora. El procedimiento para cada uno de ellos se indica en las siguientes secciones.

#### 3.7.1 Ajuste de pick-up

El ajuste de operación de un relé de sobrecorriente direccional se calcula teniendo en cuenta la transferencia de la carga máxima que puede ser visto por el relé en cualquier



dirección, multiplicado por el factor de sobrecarga. La transferencia de carga en ambas direcciones se toma en cuenta para evitar la posibilidad de relé de funcionamiento real si la unidad direccional se activa incorrectamente por la polarización incorrecta, especialmente bajo condiciones de transferencia fuertes.

### 3.7.2 Ajustes Tiempo

El ajuste del tiempo de retardo se puede definir mediante dos procedimientos. La primera de ellas se basa en los valores de configuración instantánea, mientras que el segundo tiene en cuenta los viajes de contacto y es más riguroso, ya que requiere cálculos de falla para topologías de anillo de varios. Sin embargo, hay que destacar que ambos métodos garantizar una coordinación adecuada, aunque el primero puede producir valores de línea de tiempo un poco más altas y es más usado en los sistemas simples o cuando la ubicación de las curvas de coordinación no son críticos.

### 3.7.3 Ajuste de Tiempo por el método directo

La configuración de las unidades de Tiempo por el método directo se basa en los valores de falla utilizados para establecer las unidades instantáneas. Al igual que en el caso de los relés de bi-direccionales, el valor de tiempo se ajusta de modo que, teniendo el ajuste de corriente instantánea dada a los relés aguas abajo, su tiempo de funcionamiento está por encima de la del relé aguas abajo por el margen de tiempo de discriminación requerido. Este procedimiento debe llevarse a cabo para todos los relés en el anillo, tanto en sentido horario y en sentido antihorario, normalmente a partir de los relés asociados con la fuente de barras principal. La aplicación de este método se ilustra en los ajustes instantáneos calculados para los relés en el Ejemplo 4.2.

1. Determinar los valores de tiempo iniciales de los relés en el anillo de tal manera que la coordinación está garantizada con los relés asociados a las líneas y máquinas alimentadas por la barra adyacente en la dirección de viaje.
2. Calcular el tiempo requerido para el primer relé para funcionar durante una falla en sus terminales asociadas del interruptor, con el anillo decerrado. Cualquier relé puede ser elegido como el primero, aunque lo habitual es tomar uno de los relés asociados con el equipo conectado a la fuente de la barra colector principal. Para esta condición debe hacerse una revisión para asegurar que existe una discriminación adecuada entre el relé elegido y los relés de respaldo en subestaciones adyacentes. Si no es así, se deben modificar los valores de tiempo de los relés en las subestaciones adyacentes. Además, el tiempo de funcionamiento del relé en el interruptor en el extremo opuesto de la línea debe ser calculado, así como los tiempos de respaldo de los relés.
3. A continuación, considere una falla en el extremo opuesto de la línea con el anillo abierto y, por esta condición, se calcula el tiempo de operación del



relé más cercano al defecto y comprobar que existe una discriminación adecuada entre ésta y las copias de seguridad de los relés en las subestaciones adyacentes. Como en el caso anterior, si la coordinación no se logra entonces se deben aumentar los valores de tiempo. Para este caso, es importante tener en cuenta el recorrido de contacto durante la falla antes de que el anillo se abra por el funcionamiento del primer relé. Para ello, las siguientes expresiones se deben utilizar:

$$t_{\text{relé siguiente a la falla}} = t_{\text{relé adyacente con el anillo cerrado}} + t_{\text{relé siguiente a la falla con anillo abierto}} \left( 1 - \frac{t_{\text{relé adyacente con anillo cerrado}}}{t_{\text{relé siguiente a la falla con anillo cerrado}}} \right)$$

y

$$t_{\text{relé de respaldo}} = t_{\text{relé adyacente con el anillo cerrado}} + t_{\text{relé de respaldo con anillo abierto}} \left( 1 - \frac{t_{\text{relé remoto con anillo cerrado}}}{t_{\text{relé de retardo con anillo cerrado}}} \right)$$

$$t_{\text{relé de respaldo}} \geq t_{\text{relé siguiente a la falla}} + t_{\text{margen de discriminación}}$$

- El mismo procedimiento se repite para cada relé, es decir, teniendo en cuenta un fallo en sus terminales del interruptor asociados con el anillo cerrado, y luego para una falla en el extremo opuesto de la línea con el anillo abierto. El procedimiento se completa cuando no se requieren más cambios en la configuración del tiempo.

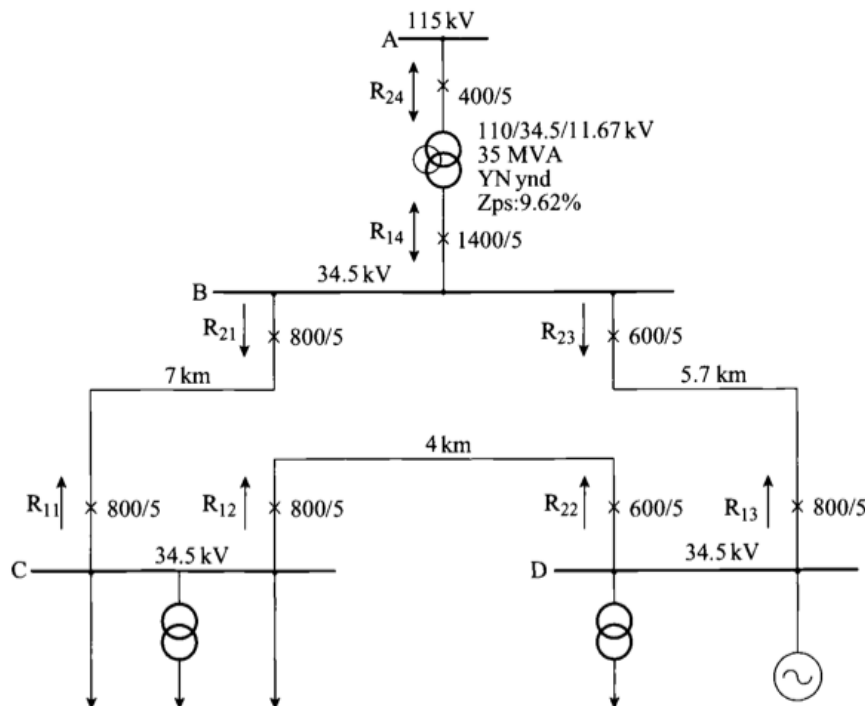
Cabe señalar que el cálculo del ajuste de tiempos sobre la base del recorrido de contacto garantiza una coordinación adecuada de los relés en un anillo, ya que el ajuste se lleva a cabo para las condiciones más severas, es decir, para una falla en las diversas barras de distribución con el anillo cerrado, y con el anillo de apertura. Para ilustrar el procedimiento anterior, consideramos el sistema que se muestra en la Figura 3.16, con un anillo de 34,5 kV conexión de tres barras colectoras.

Después de ajustar los valores actuales de arranque e instantánea, los pasos para configurar los valores de tiempo se consideran el contacto viaja como se indica a continuación:

- Los valores de tiempo de los relés están configurados inicialmente de tal manera que la coordinación se garantiza con los relés asociados con las líneas o máquinas suministradas desde las tres barras de distribución del anillo.

- Un fallo en los terminales del interruptor asociado con el relé  $R_{21}$  con el anillo de cierre se considera en primer lugar. En la Figura 3.17a, el nivel de cortocircuito trifásico es 5157A.
- Los tiempos de funcionamiento de los relés  $R_{13}$  y  $R_{14}$  deben ser evaluados para verificar que no haya una coordinación adecuada con el relé  $R_{21}$ . De lo contrario, los ajustes de tiempo deben ser aumentados.
- Los tiempos de funcionamiento del relé  $R_{11}$  y su respaldo  $R_{22}$  se calculan para asegurar que el error especificado se eliminará con el anillo cerrado.
- El valor de la corriente de cortocircuito para una falla en los terminales del interruptor asociado con el relé  $R_{11}$  se calcula, con el anillo abierto. De la Figura 3.17, este valor es 2471A.
- Los tiempos de funcionamiento del relé  $R_{11}$  y su respaldo  $R_{22}$  se calculan para esta condición con las siguientes ecuaciones:

$$t''_{\text{relé } R_{11} \text{ siguiente a la falla}} = t_{\text{relé } R_{21} \text{ adyacente con el anillo cerrado}} + t'_{\text{relé } R_{11} \text{ siguiente a la falla con anillo abierto}} \left( 1 - \frac{t_{R_{21} \text{ relé adyacente con anillo cerrado}}}{t_{\text{relé } R_{11} \text{ siguiente a la falla con anillo cerrado}}} \right)$$



**Figura 3.16 Sistema de anillo para ilustrar el procedimiento de ajuste del relé direccional de sobrecorriente**



y

$$t''_{\text{rele } R_{22} \text{ de respaldo}} = t_{\text{rele } R_{21} \text{ remoto con el anillo cerrado}} + t'_{\text{rele } R_{22} \text{ de respaldo con anillo abierto}} \left( 1 - \frac{t_{\text{rele } R_{21} \text{ remoto con anillo cerrado}}}{t_{\text{rele } R_{22} \text{ de respaldo con anillo cerrado}}} \right)$$

donde: t = tiempo de operación del relé para el fallo inicial con el anillo de cerrado;

t' = tiempo de funcionamiento del relé con la nueva topología después de la primera opera relé;

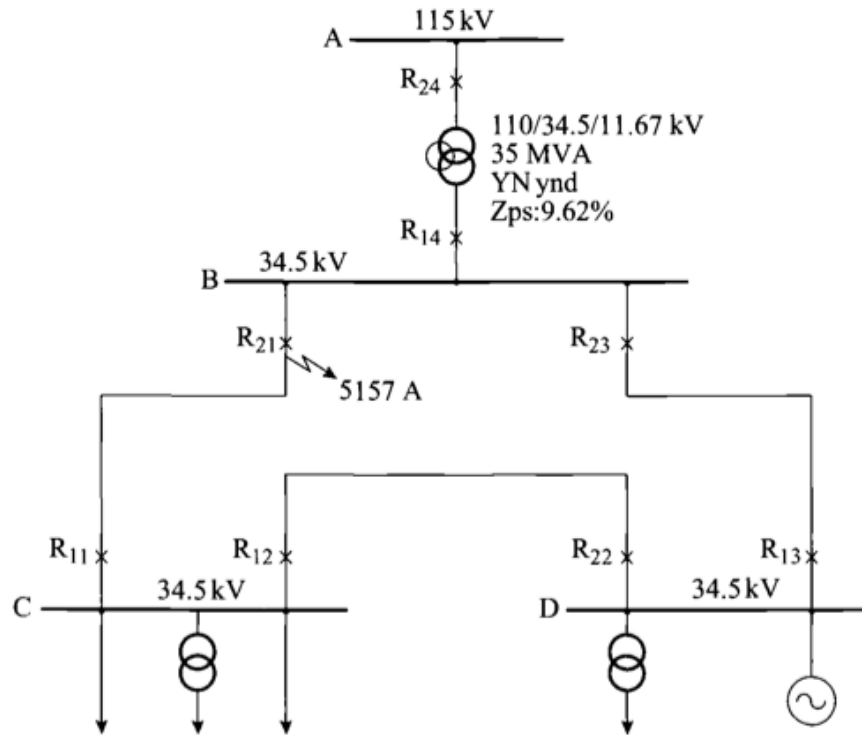
t'' = tiempo de funcionamiento del relé teniendo en cuenta la nueva topología y teniendo en cuenta del recorrido del contacto.

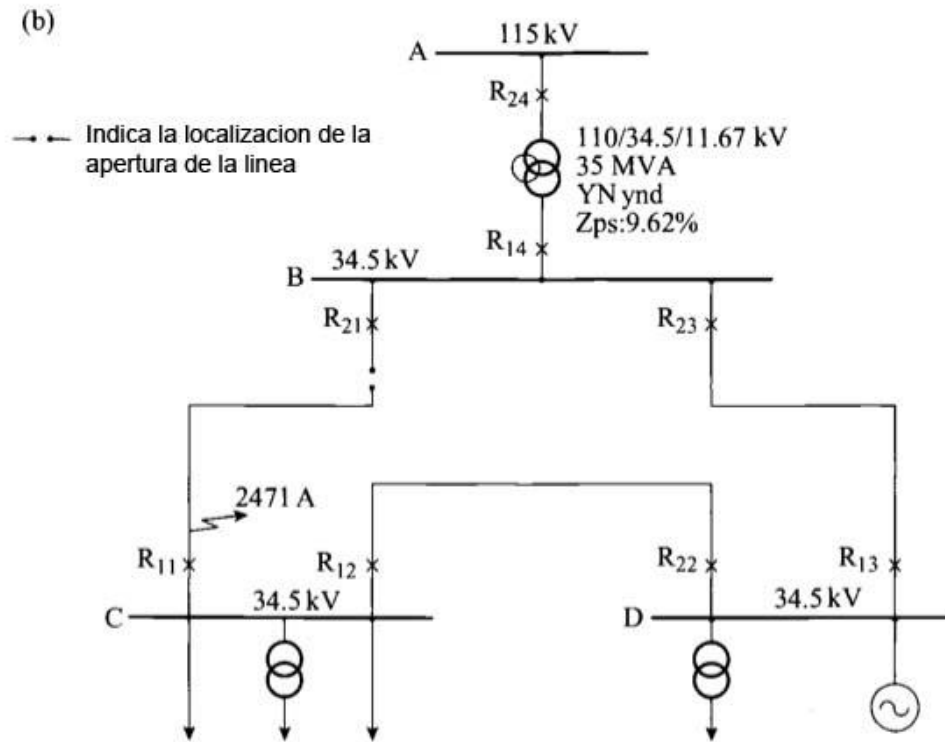
7. Por último, el ajuste de dial de tiempo del relé R22 deben ser evaluados para confirmar que se cumple la siguiente expresión:

$$t''_{R22} \geq t''_{R11} + t_{\text{margen de discriminacion}}$$

Este procedimiento se repite entonces para el resto de los relés del anillo. LaTabla 3.1 resume los pasos como guía para completar este ejercicio de coordinación.

(a)





**Figura 3.17** Corriente de cortocircuito para fallas en automático "(a) falla asociada con  $R_{21}$  con anillo cerrado,. (b) fallo asociado con  $R_{11}$  con el anillo abierto en  $R_{21}$



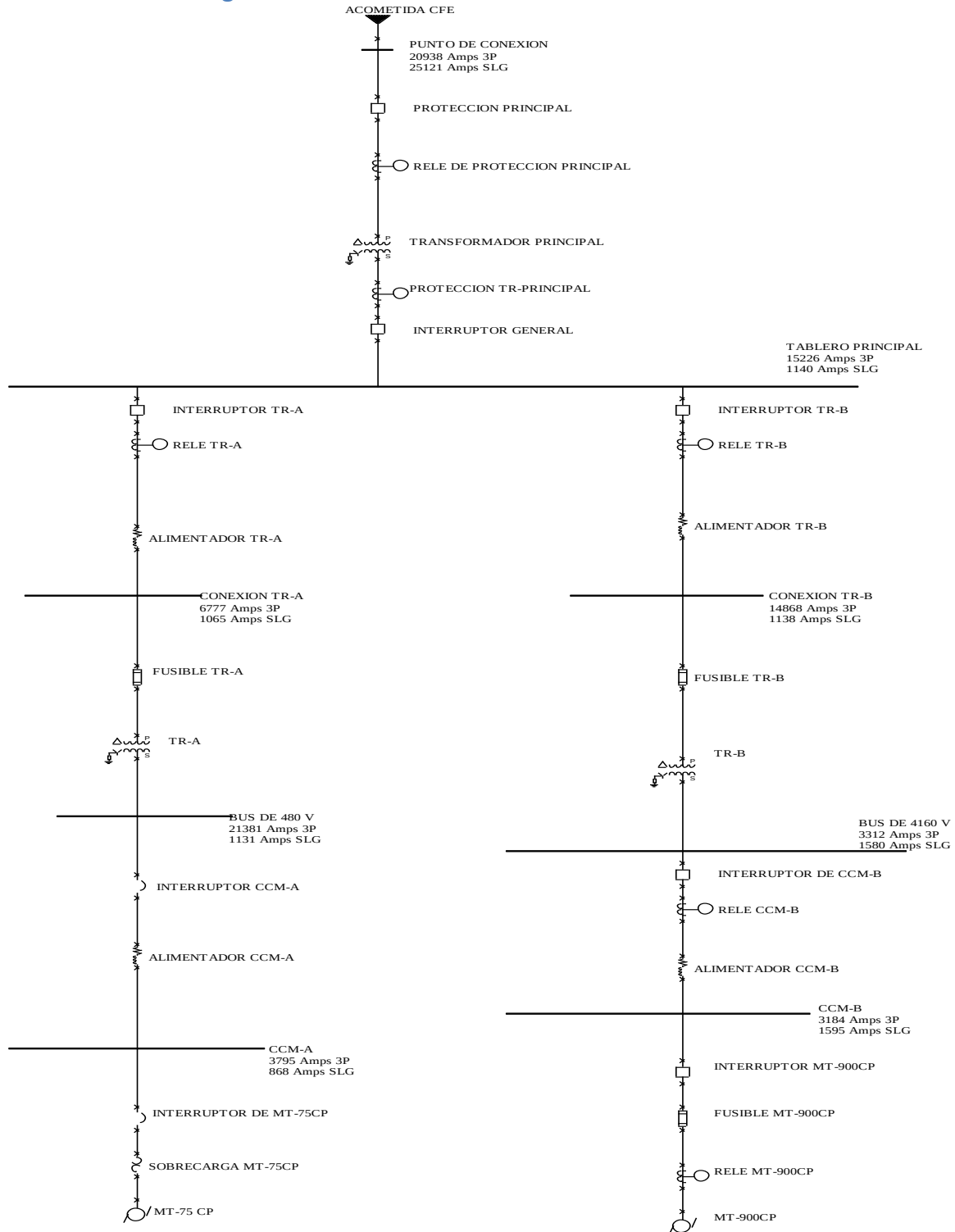


**Tabla 3.1 Resumen de los procedimientos para los ajustes de tiempo para el sistema de anillo de la Figura 3.16**

| Falla en        | Topologia del anillo | Calculo                                   | Comprovacion de Coordinacion |
|-----------------|----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| B <sub>21</sub> | Cerrado              | $t_{R21}, t_{R11}, t_{R22}$               | $t_{R13}, t_{R14}$           |
| B <sub>11</sub> | Abierto              | $t'_{R11}, t'_{R22}, t''_{R11}$           | $t''_{R22}$                  |
| B <sub>12</sub> | Cerrado              | $t_{R12}, t_{R22}, t_{R23}$               | $t_{R21}$                    |
| B <sub>22</sub> | Abierto              | $t'_{R22}, t'_{R23}, t''_{R22}$           | $t''_{R23}$                  |
| B <sub>13</sub> | Cerrado              | $t_{R13}, t_{R23}, t_{R14}, t_{R11}$      | $t_{R12}$                    |
| B <sub>23</sub> | Abierto              | $t'_{R23}, t'_{R14}, t'_{R11}, t''_{R23}$ | $t''_{R14}, t''_{R11}$       |
| B <sub>11</sub> | Cerrado              | $t_{R11}, t_{R21}, t_{R14}, t_{R13}$      | $t_{R22}$                    |
| B <sub>21</sub> | Abierto              | $t'_{R21}, t'_{R14}, t'_{R13}, t''_{R21}$ | $t''_{R13}, t''_{R14}$       |
| B <sub>22</sub> | Cerrado              | $t_{R22}, t_{R12}, t_{R21}$               | $t_{R23}$                    |
| B <sub>12</sub> | Abierto              | $t'_{R12}, t'_{R21}, t'_{R12}$            | $t'_{R21}$                   |
| B <sub>23</sub> | Cerrado              | $t_{R23}, t_{R13}, t_{R12}$               | $t_{R14}, t_{R11}$           |
| B <sub>13</sub> | Abierto              | $t'_{R13}, t'_{R12}, t''_{R13}$           | $t''_{R12}$                  |



### 3.8 Resultados del programa SKM PTW Power Tools para sistema de 138kV que suministra energía a dos motores



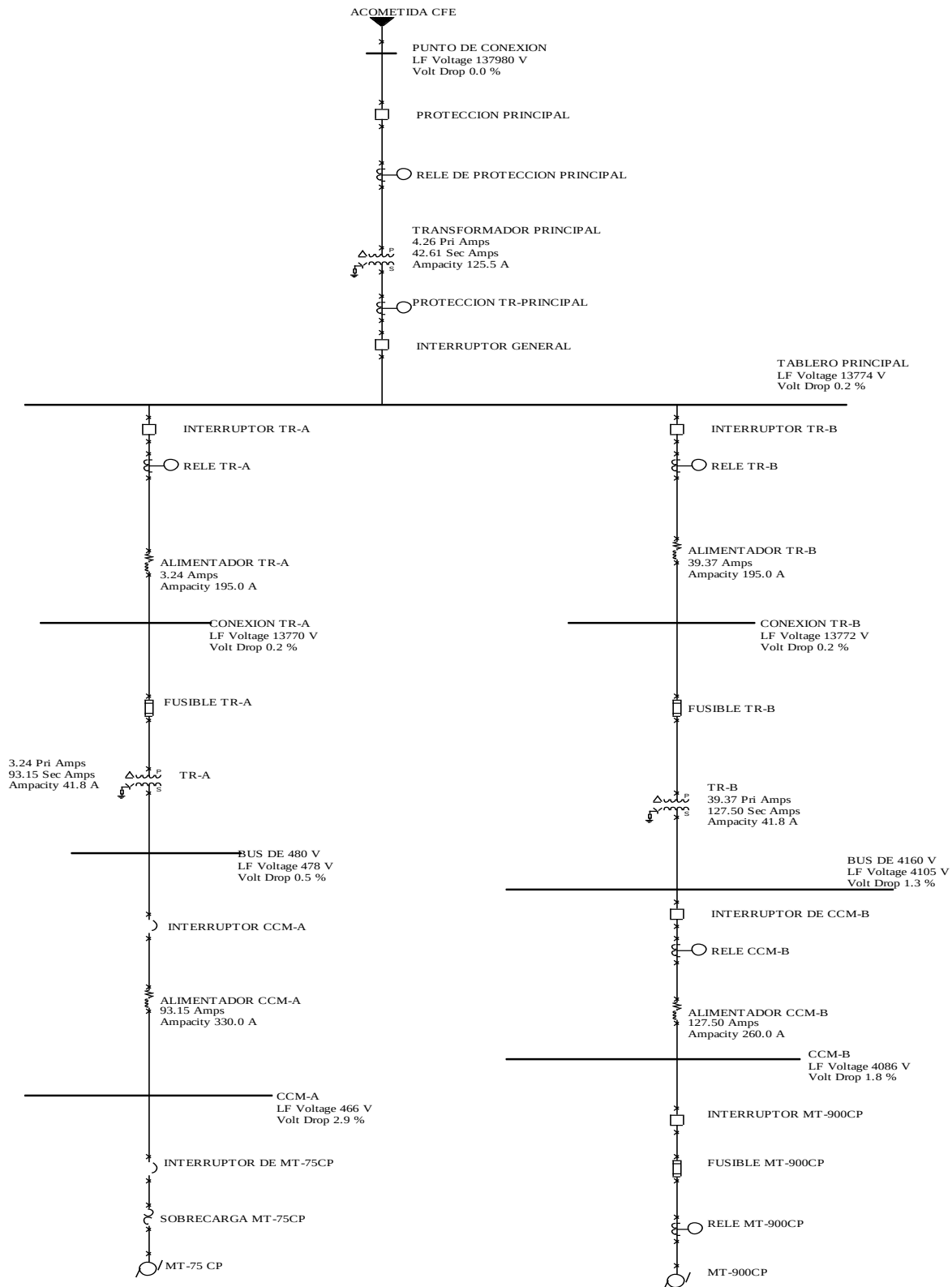
**Figura 3.18 Diagrama unifilar de la red eléctrica, mostrando los valores de corrientes de falla.**



Tabla de resultado de corrientes de falla trifásica y monofásica

**Tabla 3.2 Tabla de corrientes de falla.**

| Bus               | (A) 3F | (A)1F |
|-------------------|--------|-------|
| PUNTO DE CONEXIÓN | 20938  | 25121 |
| TABLERO PRINCIPAL | 15226  | 1140  |
| CONEXIÓN TR-A     | 6777   | 1065  |
| CONEXIÓN TR-B     | 14868  | 1138  |
| BUS DE 480V       | 21381  | 1131  |
| BUS DE 4160 V     | 3312   | 1580  |
| CCM-A             | 3795   | 868   |
| CCM-B             | 3184   | 1595  |



**Figura 3.19 Diagrama unifilar de la red eléctrica, mostrando los valores de caída de tensión**



**Tabla 3.3 Tabla de caídas de tensión**

| Bus               | Caída de tensión (V) | caída de tensión(%) |
|-------------------|----------------------|---------------------|
| PUNTO DE CONEXIÓN | 137980               | 0                   |
| TABLERO PRINCIPAL | 13774                | 0.2                 |
| CONEXIÓN TR-A     | 13770                | 0.2                 |
| CONEXIÓN TR-B     | 13772                | 0.2                 |
| BUS DE 480V       | 478                  | 0.5                 |
| BUS DE 4160 V     | 4105                 | 1.3                 |
| CCM-A             | 466                  | 2.9                 |
| CCM-B             | 4086                 | 1.8                 |

**Tabla 3.4 Tabla de capacidades conductivas y corriente nominal de los circuitos ramales**

| Cable             |                   |                          |
|-------------------|-------------------|--------------------------|
| circuito derivado | Corriente nominal | (A) capacidad conductiva |
| ALIMENTADOR TR-A  | 3.24              | 195                      |
| ALIMENTADOR TR-B  | 39.37             | 195                      |
| ALIMENTADOR CCM-A | 93.15             | 330                      |
| ALIMENTADOR CCM-B | 127.5             | 260                      |

**Tabla 3.5 Tabla de transformadores, se muestra las corrientes de operación**

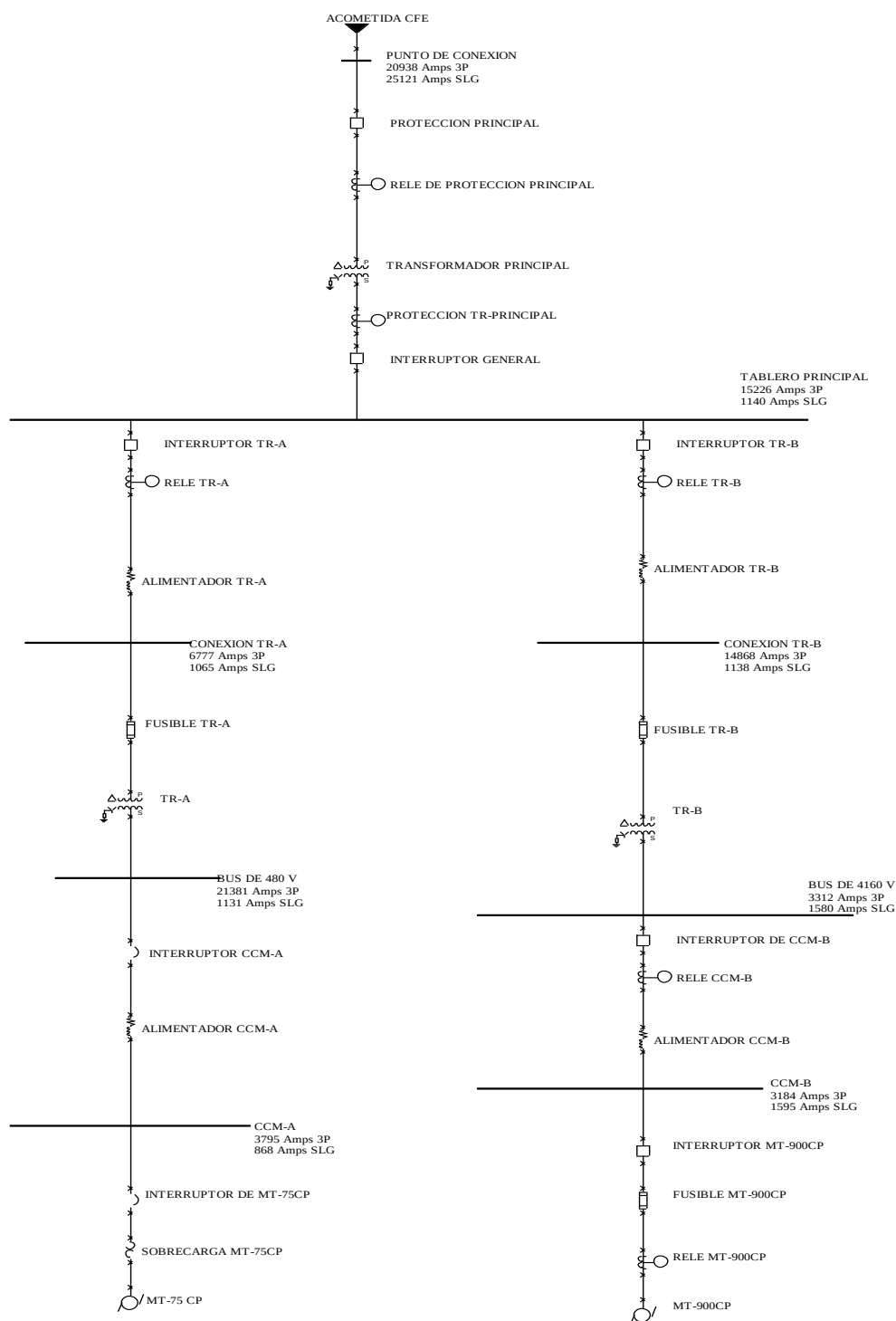
| TRANSFORMADORES         | Pri(A)mps | Sec(A) | Capacidad conductiva(A) |
|-------------------------|-----------|--------|-------------------------|
| TRANSFORMADOR PRINCIPAL | 4.26      | 42.61  | 125.5                   |
| TR-A                    | 3.24      | 93.15  | 41.8                    |
| TR-B                    | 39.37     | 127.5  | 41.8                    |

Como se observó en el capítulo 4, como emplear el SKM PTW Power Tools para realizar tus estudios eléctricos, las capacidades que tiene el software y las funciones, ahora mostraremos los resultados de nuestro problema de tesis.

En la Figura 3.20. Se encuentra nuestra red eléctrica, la tensión en el bus 001 es de 138000V, los buses 002, 0027,0028 es de 13.8kV, en los buses 024 y 004 es de 4160V,



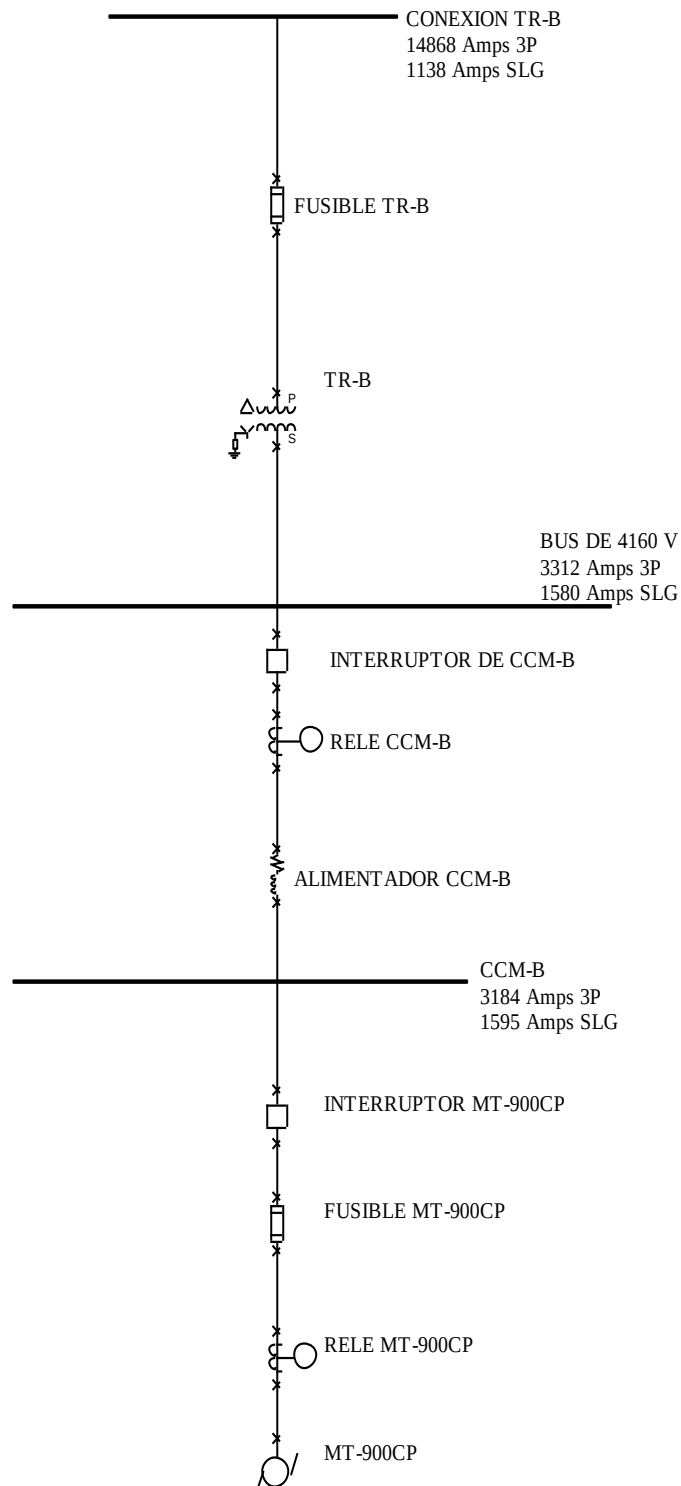
en el bus 003 y 0026 es de 480V. En esta sección se observara las curvas de operación de las líneas de transmisión, alimentadores, equipos de operación y protecciones eléctricas para su correcta operación en el sistema eléctrico.



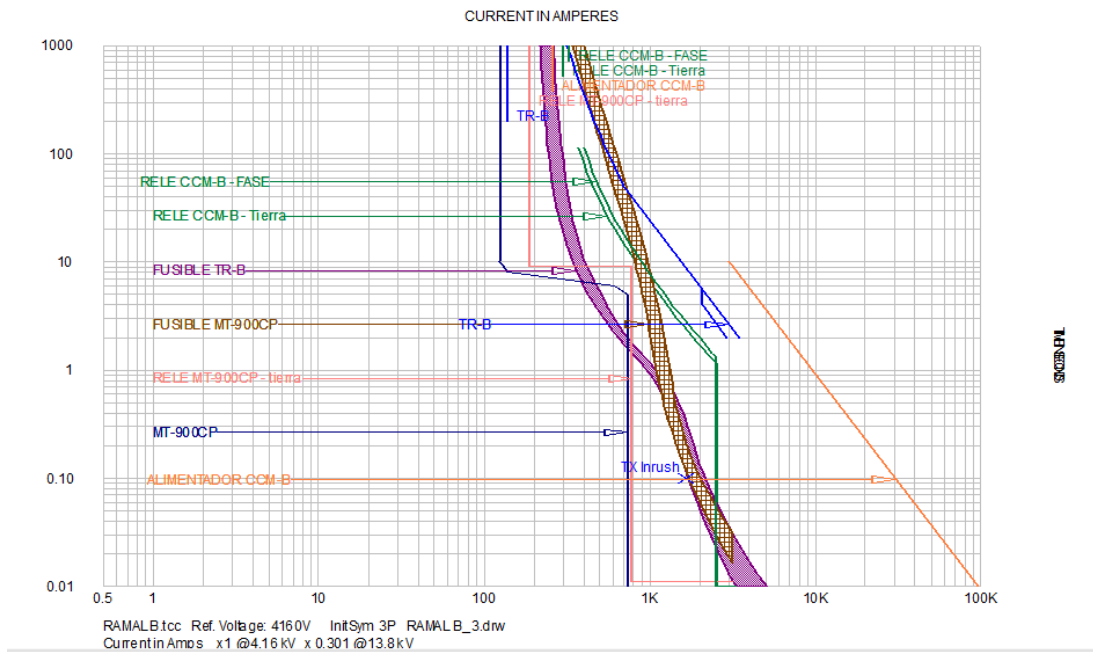
**Figura 3.20 Diagrama unifilar completo para alimentación de los motores, estudio de corto circuito**



La Figura 3.21 muestra la sección ramal B que alimenta al motor en 4160 V.



**Figura 3.21 ramal B conexiones de motor de 900HP en 4160V**



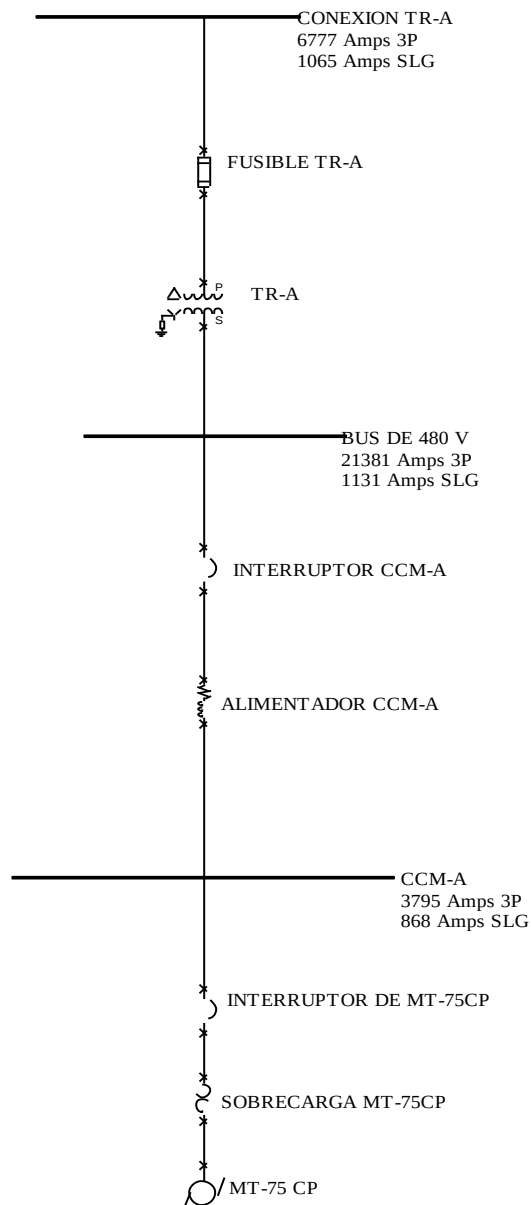
**Figura 3.22 Ramal B, curvas de operación de los equipos eléctricos.**

1. La curva MT-900HP es la curva de operación del motor de 900HP, en los primeros segundos de operación se observa claramente que la corriente de arranque es cercana a 1000 A y que casi al 10s se estabiliza la corriente en la nominal, quedando en estado permanente de operación.
2. La curva RELE MT-900HP es la curva de operación de falla entre fases del relevador 50/51 (instantáneo de sobre corriente y de tiempo inverso) con doble función, que tiene la capacidad de observar fallas entre fases y de fase a tierra. Por lo que se aprecia esta por encima de la curva de corriente del motor, lo que le permitirá arrancar sin inconveniente y en caso de falla detectara en 0.01s la sobrecorriente, actuando en el sistema.
3. La curva FUSIBLE MT-900HP cuchilla portafusible, es la protección contra falla simétrica del motor, en caso de que el RELE MT-900HP , no haya visto una falla de fase a tierra, este actuara en la línea de falla operando en 0.01s con una corriente de falla de 3000 A
4. La curva RELE CCM-B es el relevador 50/51N encargada de proteger la línea de transmisión en 4160V, este operara en 0.15s después de que ocurra una falla y tome una corriente de 3000 A.

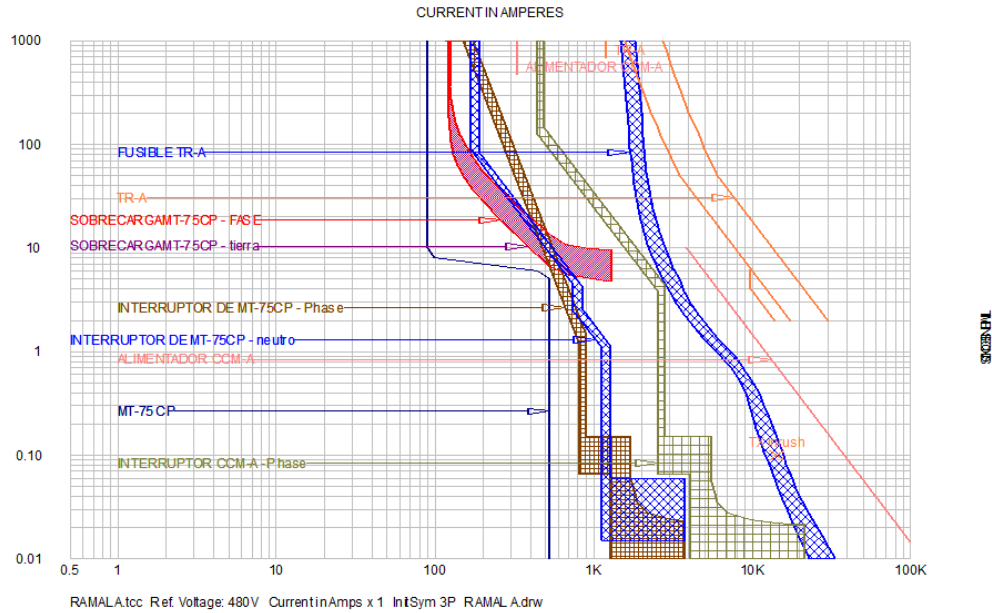




La Figura 3.213 muestra la sección ramal A que tiene conectado directamente el motor en 4160 V.



**Figura 3.23**ramal A conexiones de motor de 75 HP en 480 V



**Figura 3.24** Ramal A, curvas de operación de los equipos eléctricos.

La curva de operación del motor esta descrita por MT-75 HP, que muestra que dentro de los primeros segundos alcanza una corriente de arranque de 6 veces su corriente nominal.

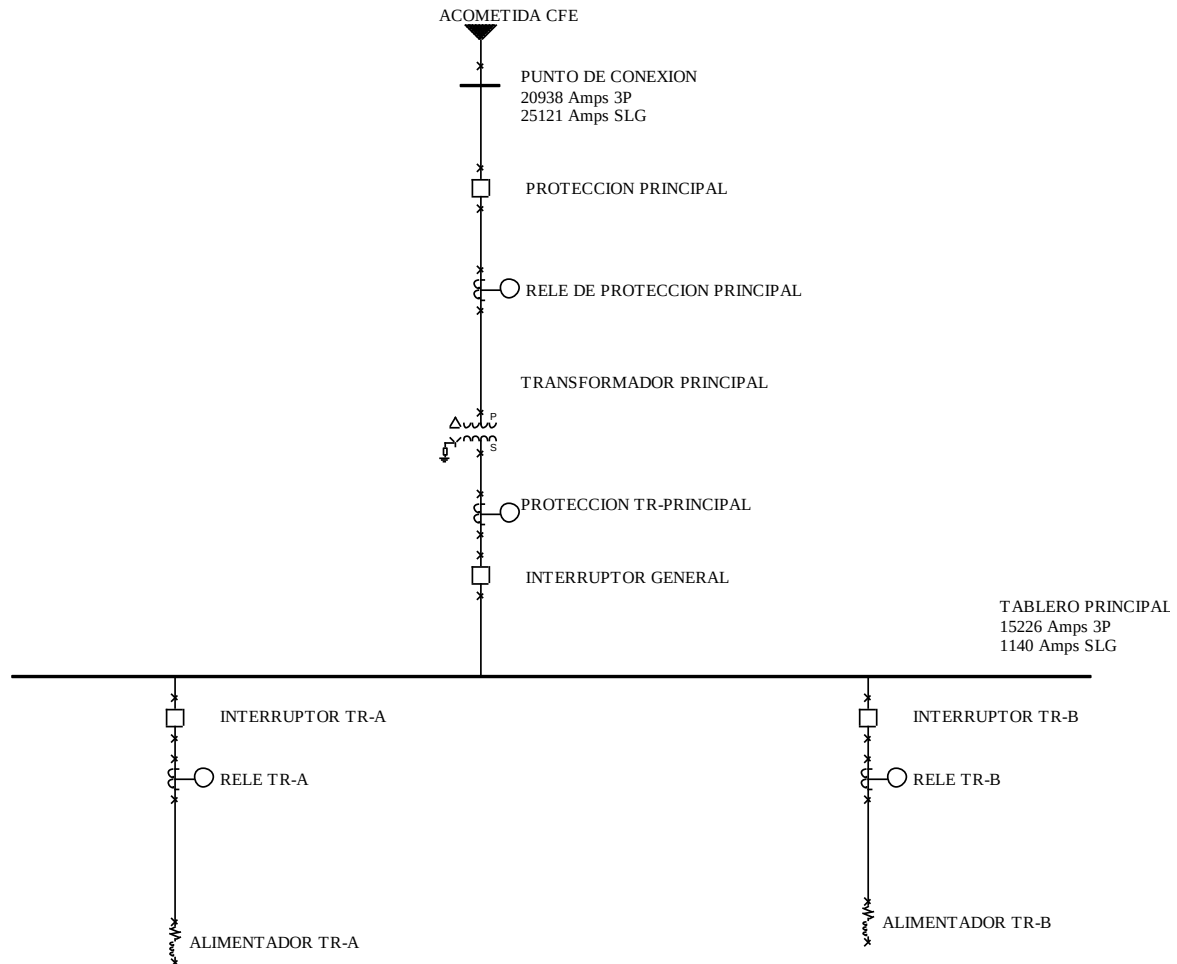
La curva TR-A muestra los parámetros del transformador, con los 4 puntos ANSI.

La curva descrita por ALIMENTADOR CCM-A son los parámetros del alimentador que suministra al CCM del motor 75 HP.

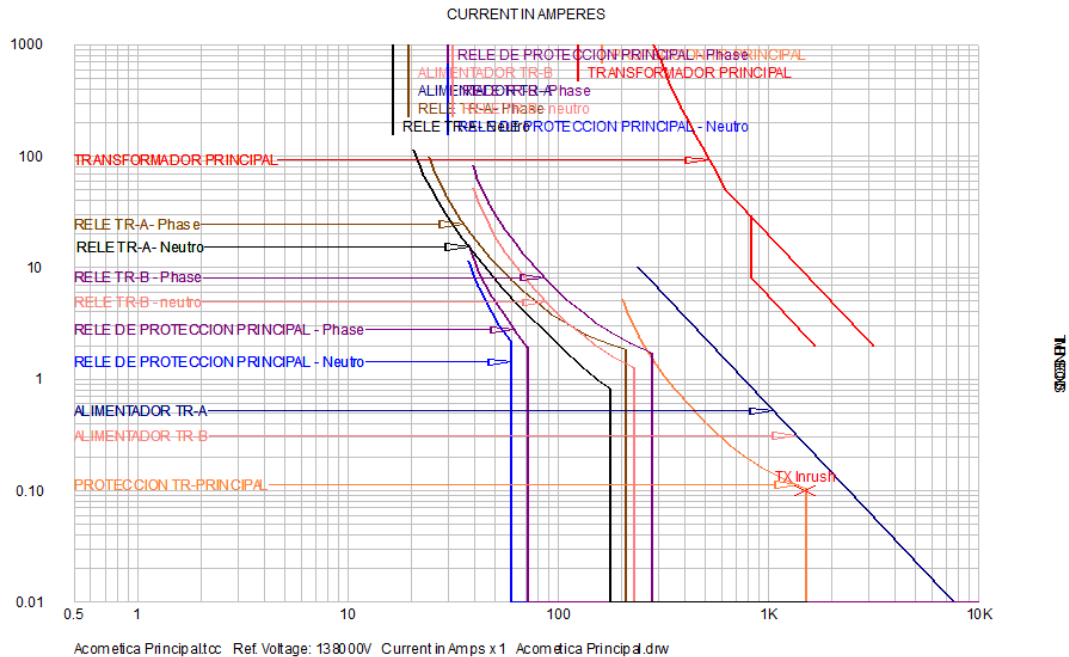
La curva SOBRECARGA MT-75 HP muestra el comportamiento del equipo encargado de proteger al motor en caso de alguna sobrecorriente por sobrecarga, con doble función aplicada, protección de fase y protección de falla a tierra.

La curva del INTERRUPTOR MT-75 HP muestra el comportamiento del equipo encargado de proteger al motor en caso de alguna sobrecorriente por corto circuito, con doble función aplicada, protección de fase y protección de falla a tierra.

La curva en CCM-A muestra el comportamiento del interruptor encargado de proteger al CCM-A en caso de alguna sobrecorriente por corto circuito, con doble función aplicada, protección de fase y protección de falla a tierra.



**Figura 3.25**Acometida principal 138000 V



**Figura 3.26 Coordinación de los equipos de la acometida principal en 138,000V.**

En este punto la tensión de la red de distribución es de 13800 V, de los dos ramales que se derivan de la barra principal de distribución. En este punto tenemos protección de fases y de tierra.

La curva en TRANSFORMADOR PRINCIPAL, muestra los 4 puntos ANSI, estos son los parámetros máximos que soporta el transformador en corriente y tiempo sin dañarse. Este transformador es el más importante ya que suministra energía a toda la instalación minera.

El dispositivo RELE TR-A se describe su curva de relevador de tiempo inverso e instantáneo, con doble función para protección de fase y neutro.

Si observamos las curvas de los relevadores RELE-TR-B, RELE DE PROTECCION PRINCIPAL y EL RELE DE PROTECCION PRINCIPAL, se ven representados de forma escalonada y de forma muy similar.



## Capítulo 4 Estudio Económico del Proyecto

### 4.1 Introducción

Este estudio económico tiene como finalidad evaluar si es viable el proyecto de titulación y determinar si es conveniente o no realizar la inversión económica para su ejecución.

### 4.2 Análisis Económico del Proyecto

Este análisis se realiza para terminar el costo de inversión del proyecto mediante el detalle de costo por concepto de :

- Equipos
- Ingeniería de proyecto
- Construcción, Instalación y Mano de Obra

**Tabla 4.1 Equipos**

| Nº           | Descripción                    | Cantidad | Costo (Pesos MXN)     |
|--------------|--------------------------------|----------|-----------------------|
| 1            | Relevador Sobrecorriente 50/51 | 8        | \$470,400.00          |
| 2            | Interruptor Coopler 6-50A      | 4        | \$26,000.00           |
| 3            | Interruptor Bussmann EBI 5.5kV | 5        | \$35,000.00           |
| 4            | Transformador (30000kV)        | 1        | \$1,059,000.00        |
| 5            | Transformador (10000kV)        | 1        | \$725,000.00          |
| 6            | Transformador (1000kV)         | 1        | \$325,000.00          |
| 7            | Motor 900 HP                   | 1        | \$304,000.00          |
| 8            | Motor 75 HP                    | 1        | \$104,000.00          |
| <b>TOTAL</b> |                                |          | <b>\$3,048,400.00</b> |

**Tabla 4.2 Ingeniería del Proyecto**

| Nº           | Descripción           | Cantidad | Costo (Pesos MXN)  |
|--------------|-----------------------|----------|--------------------|
| 1            | Ingeniería de Diseño  | 1        | \$65,000.00        |
| 2            | Ingeniería de Detalle | 1        | \$15,000.00        |
| 3            | Gestión de Ingeniería | 1        | \$8,000.00         |
| <b>TOTAL</b> |                       |          | <b>\$88,000.00</b> |

**Tabla 4.3 Construcción, Instalación y Mano de obra**

| Nº           | Descripción      | Cantidad | Costo (Pesos MXN)   |
|--------------|------------------|----------|---------------------|
| 1            | Obras Eléctricas | 1        | \$55,000.00         |
| 2            | Instalación      | 1        | \$20,000.00         |
| 3            | Mano de obra     | 1        | \$28,000.00         |
| <b>TOTAL</b> |                  |          | <b>\$103,000.00</b> |

Con estos precios de equipos y tenemos un costo total de **3,239,400** de pesos (MXN), deducimos que el estudio es viable a su ejecución y por lo tanto es sustentable.



## Capítulo 5 Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

La obtención de los parámetros eléctricos del sistema fue posible al aplicar la información contenida en el programa de simulación SKM Power Tools.

Con base a los resultados obtenidos del software SKM power tools, podemos observar como el sistema se comporta en las barras de la red eléctrica de la minera en caso de alguna falla, la barra de mayor valor de corriente de corto circuito es la “PRINCIPAL DE CONEXIÓN” con un valor de 15,226 A de falla simétrica, con una tensión de 13,800 V, los equipos que se interconectan a esta barra y estén en 13,800 V deben soportar este valor de falla.

En la sección de 480 V, la barra de mayor corriente de falla es la “BUS DE 480 V” con 21,181 A con tensión de 480 V, por lo que los equipos de esta sección deben soportar mínimo esta corriente. (Éste valor se modificara si se incrementan los circuitos derivados dentro del tablero de distribución de la barra “BUS DE 480 V”)

En la sección de 4160 V, la barra de mayor corriente de falla es la “BUS DE 4160 V” con 3,312 A con tensión de 4160 V, por lo que los equipos de esta sección deben soportar mínimo esta corriente.

Los ajustes de los equipos se muestran a continuación:

**Tabla 5.1 Ajuste de relevadores**

| NOMBRE DEL EQUIPO                   | FUNCION | CONECTADO A LA BARRA | FABRI CANTE | DESCRIPCIÓN     | Tc        | AJUSTES                     |                      |                         |                              |
|-------------------------------------|---------|----------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| <b>PROTECCIÓN TR-PRINCIPAL</b>      | FASE    | TABLERO PRINCIPAL    | ABB         | Microshield O/C | 2,500 : 5 | 51N, (1.5 - 12 x CTR) 3.25  | Very Inverse 1.70    | 50N, (1 - 20 x PU) 9.3  | 50N Delay, Standard No Delay |
| <b>RELE CCM-B</b>                   | FASE    | CCM-B                | ABB         | Microshield O/C | 500 : 5   | 51N, (1.5 - 12 x CTR) 3.25  | Ext Inverse 10       | 50N, (1 - 20 x PU) 7.8  | 50N Delay, Standard No Delay |
| <b>RELE CCM-B</b>                   | Tierra  | CCM-B                | ABB         | Microshield O/C | 500 : 5   | 51N, (1.5 - 12 x CTR) 3     | Ext Inverse 10       | 50N, (1 - 20 x PU) 8.6  | 50N Delay, Standard No Delay |
| <b>RELE DE PROTECCIÓN PRINCIPAL</b> | Phase   | PUNTO DE CONEXION    | ABB         | Microshield O/C | 100 : 5   | 51P, (1.5 - 12 x CTR) 1.5   | Ext Inverse 1.40     | 50P, (1 - 20 x PU) 2.4  | 50P Delay, Standard No Delay |
| <b>RELE DE PROTECCIÓN PRINCIPAL</b> | Neutro  | PUNTO DE CONEXION    | ABB         | Microshield O/C | 100 : 5   | 51N, (1.5 - 12 x CTR) 1.5   | Ext Inverse 1        | 50N, (1 - 20 x PU) 2    | 50N Delay, Standard No Delay |
| <b>RELE TR-A</b>                    | Phase   | CONEXION TR-A        | ABB         | Microshield O/C | 300 : 5   | 51LT, (1.5 - 12 x CTR) 3.25 | LT Very Inverse 1.90 | 50P, (1 - 20 x PU) 10.8 | 50P Delay, Standard No Delay |



|           |        |               |     |                 |         |                             |                      |                         |                              |
|-----------|--------|---------------|-----|-----------------|---------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| RELE TR-A | Neutro | CONEXION TR-A | ABB | Microshield O/C | 150 : 5 | 51N, (1.5 - 12 x CTR) 5.5   | Ext Inverse 10       | 50N, (1 - 20 x PU) 10.8 | 50N Delay, Standard No Delay |
| RELE TR-B | Phase  | CONEXION TR-B | ABB | Microshield O/C | 300 : 5 | 51LT, (1.5 - 12 x CTR) 5.25 | LT Very Inverse 1.60 | 50P, (1 - 20 x PU) 8.9  | 50P Delay, Standard No Delay |
| RELE TR-B | neutro | CONEXION TR-B | ABB | Microshield O/C | 300 : 5 | 51LT, (1.5 - 12 x CTR) 5.25 | LT Very Inverse 1    | 50P, (1 - 20 x PU) 7.3  | 50P Delay, Standard No Delay |

Todos estos dispositivos soportaran las condiciones críticas de falla en el sistema eléctrico de 138000V, que alimenta a dos motores, 900HP y 75HP.

## 5.2 Aportaciones

- Se describieron de manera detallada los conceptos básicos para incorporar modelos de generación distribuida al estudio de flujos de potencia, corto circuito y coordinación de protecciones en sistemas. Para aplicar estos conceptos se utilizó el programa de SKM Power Tools, comprendiendo los resultados y estudios que nos puede proporcionar dicho programa.
- Utilizando los resultados del programa se muestra una aplicación para realizar una coordinación de protecciones eléctricas, empleando los relevadores de la librería que cuenta el SKM power tools.



# Anexo





## A.1 Especificaciones de los equipos y elementos del sistema

**Tabla A.1 Especificaciones de los conductores**

| Elemento          | Estatus | Bus               | Bus   | Rango | VD%  | LF     | Ampacidad | LF%   |
|-------------------|---------|-------------------|-------|-------|------|--------|-----------|-------|
|                   |         |                   | Volts | Volts |      | Amps   |           |       |
| ALIMENTADOR CCM-A | Pass    | BUS DE 480 V      | 480   | 5000  | 2.38 | 93.15  | 330.0     | 28.23 |
| ALIMENTADOR CCM-B | Pass    | BUS DE 4160 V     | 4160  | 15000 | 0.45 | 127.50 | 260.0     | 49.04 |
| ALIMENTADOR TR-A  | Pass    | TABLERO PRINCIPAL | 13800 | 15000 | 0.03 | 3.24   | 195.0     | 1.66  |
| ALIMENTADOR TR-B  | Pass    | TABLERO PRINCIPAL | 13800 | 15000 | 0.02 | 39.37  | 195.0     | 20.19 |

**Tabla A.2 Especificaciones de los Transformadores**

| Elemento                      | Estatus         | Bus               | Bus    | Rango  | VD%  | LF      | Ampacidad | LF%    |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------|--------|------|---------|-----------|--------|
|                               |                 |                   | Volts  | Volts  |      | Amps    |           |        |
| TR-A (Pri)                    | Pass            | CONEXIÓN TR-A     | 13800  | 13800  | 0.30 | 3.24    | 41.8      | 7.74   |
| TR-A (Sec)                    |                 | BUS DE 480 V      | 480    | 480    | 0.30 | 93.15   | 1202.8    | 7.74   |
| TR-B (Pri)                    | Marginal *(P,S) | CONEXIÓN TR-B     | 13800  | 13800  | 1.12 | *39.37  | 41.8      | *94.11 |
| TR-B (Sec)                    |                 | BUS DE 4160 V     | 4160   | 4160   | 1.12 | *127.50 | 135.5     | *94.11 |
| TRANSFORMADOR PRINCIPAL (Pri) | Pass            | PUNTO DE CONEXIÓN | 138000 | 138000 | 0.17 | 4.26    | 125.5     | 3.40   |
| TRANSFORMADOR PRINCIPAL (Sec) |                 | TABLERO PRINCIPAL | 13800  | 13800  | 0.17 | 42.61   | 1255.1    | 3.40   |

**Tabla A.3 Especificaciones de los Motores**

| Elemento | Status | Bus   | Bus   | Rango | VD%  | LF     |
|----------|--------|-------|-------|-------|------|--------|
|          |        |       | Volts | Volts |      | Amps   |
| MT-75 HP | Pass   | CCM-A | 480   | 480   | 2.89 | 93.15  |
| MT-900HP | Pass   | CCM-B | 4160  | 4160  | 1.77 | 127.50 |



## A.5 RESULTADO DEL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

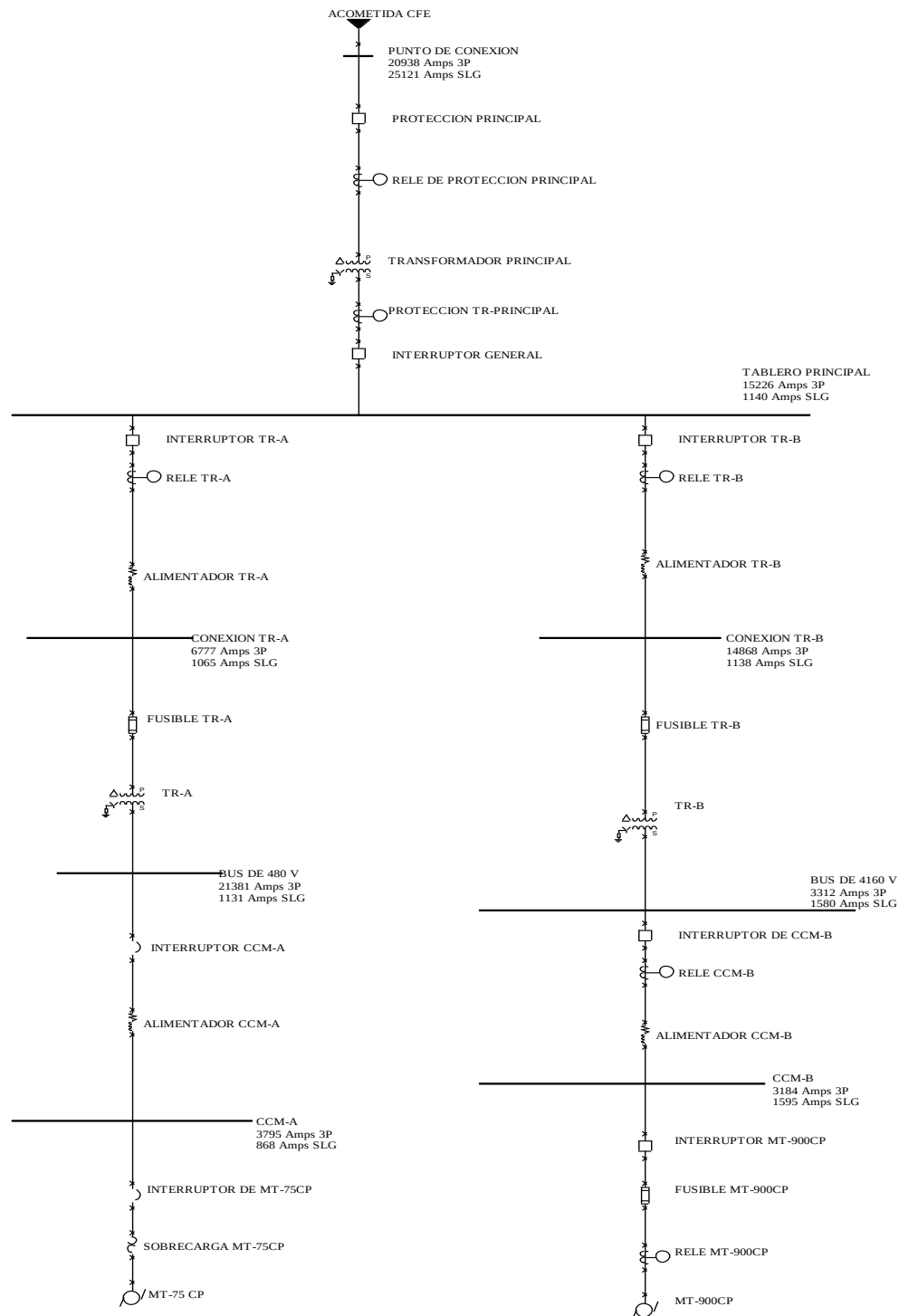


Figura A.6 Diagrama Unifilar con los cortos circuitos del sistema.



**Tabla A.5 Tabla de corto circuitos**

| BUS                  | VOLTAGE<br>L-L | DISPONIBLE<br>3 Fases | X/R  | CORRIENTE DE FALLA<br>LINEA/TIERRA | X/R   |
|----------------------|----------------|-----------------------|------|------------------------------------|-------|
| BARRA DE 4160 V      | 4160           | 3311.9                | 6.2  | 1579.74                            | 7.3   |
| BARRA DE 480 V       | 480            | 21381.1               | 4.1  | 1130.65                            | 0.1   |
| CCM-A                | 480            | 3795.3                | 0.9  | 868.23                             | 0.2   |
| CCM-B                | 4160           | 3184                  | 4.8  | 1594.94                            | 7.6   |
| CONEXION TR-A        | 13800          | 6777.1                | 0.9  | 1065.28                            | 7.2   |
| CONEXION TR-B        | 13800          | 14868.4               | 9.6  | 1137.53                            | 116.5 |
| PUNTO DE<br>CONEXION | 138000         | 20937.9               | 8    | 25120.87                           | 8     |
| TABLERO<br>PRINCIPAL | 13800          | 15226                 | 21.8 | 1140.14                            | 312.8 |



### A.3 RESULTADO DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE CARGA

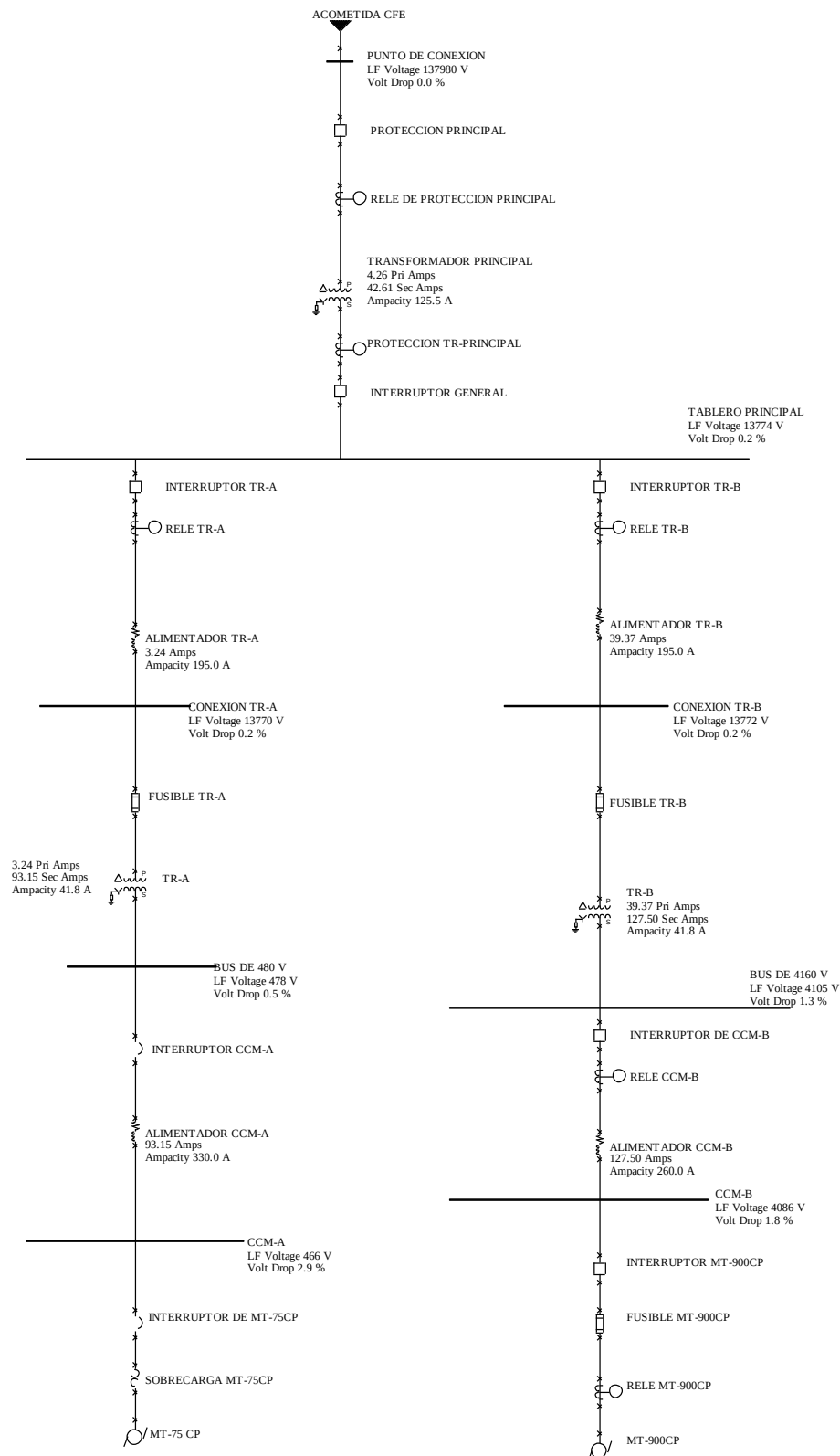


Figura A.2 Diagrama Unifilar con las Caídas de Tensión del Sistema



**Tabla A. 6 Tabla de caídas de tensión**

| Bus                                 | Voltaje | LF Volts | % Caída de Tensión |
|-------------------------------------|---------|----------|--------------------|
| BUS DE 4160 V                       | 4,160   | 4,105    | 1.33               |
| BUS DE 480 V                        | 480     | 478      | 0.52               |
| CCM-A                               | 480     | 466      | 2.89               |
| CCM-B                               | 4,160   | 4,086    | 1.77               |
| CONEXIÓN TR-A                       | 13,800  | 13,770   | 0.22               |
| CONEXIÓN TR-B                       | 13,800  | 13,772   | 0.20               |
| PUNTO DE CONEXIÓN TABLERO PRINCIPAL | 138,000 | 137,980  | 0.01               |
|                                     | 13,800  | 13,774   | 0.19               |

**Tabla A. 7 Tabla de dimensionamiento**

| Dispositivo/Bus   | Estado   | Descripción     | Tensión(V)            | corriente nominal | INT kA         | Close-Latch kA | ALCAN CE% | K     | TIEMPO DE OPERACIÓN  |
|-------------------|----------|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------|----------------|-----------|-------|----------------------|
| Fabricante        |          |                 | BUS/DISPOSITIVO       | BT/DIS/ALC%       | Calc/DIS/Serie | Calc/DIS       | V/INT/C-L |       | VELOCIDAD EN CICLOS. |
| FUSIBLE 900HP     | MT-      | Pass            | ECL055, 5.5kV E-Rated | 4160              | 127.50         | 4.20           | 4.44      | 75.64 |                      |
| CCM-B             |          |                 | 10E-600E              | 5500              | 175.00         | 63.00          | 78.60     | 6.67  |                      |
| BUSSMANN          |          |                 | ECL055-175E           |                   | 72.86          |                |           | 5.65  | Symm                 |
| FUSIBLE TR-A      | Pass     | ELF, 15kV       | 13800                 | 3.24              |                |                | 92.00     |       |                      |
| CONEXION TR-A     |          | 6-50A           | 15000                 | 30.00             | 43.00          | 68.80          | 68.80     |       |                      |
| COOPER            |          | ELF             |                       | 10.80             |                |                |           |       | Symm                 |
| FUSIBLE TR-B      | Marginal | ELF, 15kV       | 13800                 | *39.37            |                |                | 92.00     |       |                      |
| CONEXION TR-B     |          | 6-50A           | 15000                 | 40.00             | 43.00          | 68.80          | 68.80     |       |                      |
| COOPER            |          | ELF             |                       | *98.43            |                |                |           |       | Symm                 |
| INTERRUPTOR CCM-A | Pass     | CHKD, Optim 550 | 480                   | 93.15             | 33.13          |                | 100.00    |       |                      |
| BUS DE 480 V      |          | LSI, 63-400A    | 480                   | 400.00            | 65.00          |                | 50.97     |       |                      |



|                                                                                                                   |                  |                           |         |        |        |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|---------|--------|--------|-------|
| CUTLER-HAMMER                                                                                                     | CHKD             |                           | 23.29   |        | Symm   |       |
|                                                                                                                   |                  |                           |         |        |        |       |
| INTERRUPTOR DE CCM-B                                                                                              | Unknown (No Lib) | 4160                      | *127.50 | *2.86  |        |       |
| BUS DE 4160 V                                                                                                     |                  |                           |         |        |        |       |
|                                                                                                                   |                  |                           |         |        |        |       |
| INTERRUPTOR DE MT-75HP                                                                                            | Pass             | CHLD, Optim 550/750/10 50 | 480     | 93.15  | 100.00 |       |
| CCM-A                                                                                                             |                  | LS (LTD=I4t), 63-600A,    | 480     | 110.00 | 65.00  | 81.05 |
| CUTLER-HAMMER                                                                                                     |                  | CHLD                      |         | 84.68  | Symm   |       |
|                                                                                                                   |                  |                           |         |        |        |       |
| INTERRUPTOR GENERAL                                                                                               | Unknown (No Lib) | 13800                     | *42.61  | *16.38 |        |       |
| (*N2) Dis Icc kA corregido en corrección basada en la corriente máxima, tensión y el factor K.                    |                  |                           |         |        |        |       |
| (*Tensión de dispositivos) corriente de falla, Marginal 100% - falla 100% de la 85ensión nominal del dispositivo. |                  |                           |         |        |        |       |
| (*baja corriente) corriente de falla, Marginal 90% - falla 100% corriente nominal.                                |                  |                           |         |        |        |       |
| (*Calc INT kA) corriente de falla, Marginal 90% - Falla 100% capacidad del dispositivo, en librería.              |                  |                           |         |        |        |       |

**Tabla A. 8 Tabla de características de los fusibles**

| NOMBRE DEL FUSIBLE | FUNCIÓN | CONEXIÓN      | TENSIÓN | FABRICANTE | TIPO                  | DESCRIPCIÓN | CARTUCHO    | TAMAÑO | DISPARO |
|--------------------|---------|---------------|---------|------------|-----------------------|-------------|-------------|--------|---------|
| FUSIBLE MT-900CP   | Phase   | CCM-B         | 4,160   | BUSSMANN   | ECL055, 5.5kV E-Rated | 10E-600E    | ECL055-175E | 175    | 175     |
| FUSIBLE TR-A       | Phase   | CONEXION TR-A | 13,800  | COOPER     | ELF, 15kV             | 6-50A       | ELF         | 30     | 30      |
| FUSIBLE TR-B       | Phase   | CONEXION TR-B | 13,800  | COOPER     | ELF, 15kV             | 6-50A       | ELF         | 40     | 40      |



## BIBLIOGRAFIA

- [1]COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE PARA SISTEMAS INDUSTRIALES, TEORIA Y ANALISIS, Instituto Mexicano del Petroleo, M. I. Arturo Flores Lopez, Octubre 2009
- [2]ABC DE LA COORDINACION, Publicado por electrical engineers powerengineering,Enero del 2006
- [3]Calculo de flujos de potencia Capitulo 3, ESIME Zacatenco, Tesis: Estudios de coordinación de las protecciones eléctricas por métodos computarizados, MexicoMarzo del 2010
- [4]STEVENSON WILLIAM. GREIGNER, JOHN; "POWER SYSTEM ANALYSIS"; McGraw Hill; Estados Unidos - 1992.
- [5] POWER SYSTEM RELAINING, Third Edition, Stanley H. Horowitz, Cosultin Enginner, Formerly whit American Electric Power Corporaton Columbus, Ohio Usa.



## GLOSARIO

HP CABALLOS DE POTENCIA (HORSE POWER)

SEP SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

V. VOLTAJE

A. AMPERE

$\Omega$ . OHM

NOM NORMA OFICIAL MEXICANA

CFP CÁLCULO DE FLUJO DE POTENCIA

CA CORRIENTE ALTERNA

CD CORRIENTE DIRECTA

$\dot{S}$  Potencias complejas

TAP Derivación de un transformador

$\Delta$  Incremento

C.C. Corto Circuito

KVA KILO VOLTSAMPERES

VA VOLTSAMPERES

TC TRANSFORMADOR DE CORRIENTE





---

|      |                                               |
|------|-----------------------------------------------|
| TP   | TRANSFORMADOR DE POTENCIA                     |
| I    | CORRIENTE                                     |
| V    | TENSION                                       |
| R    | RESISTENCIA                                   |
| P    | POTENCIA                                      |
| W    | WATTS                                         |
| RELE | RELEVADOR                                     |
| CDT% | CAIDA DE TENSION                              |
| TR   | TRANSFORMADOR                                 |
| M    | MOTOR                                         |
| CFE  | COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD (SUMINISTRO) |
| 3P   | FALLA TRISAFICA (3 PHASES)                    |
| SLG  | FALLA MONOFOSICA A TIERRA                     |