

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**



**Programa Interactivo de Coordinación de Redes**

**T E S I S**

**Para Optar el Título Profesional de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**HILDEBRANDO MIGUEL GUTIERREZ PONCE**

**Promoción 1975 - 2**

**Lima - Perú**

**1986**

A MIS QUERIDOS PADRES

## E X T R A C T O

El presente proyecto desarrolla un programa que permite al diseñador de Sistemas de Potencia de Minas a determinar interactivamente, a través de una comunicación bilateral entre la microcomputadora y el usuario; los ajustes del tap, del elemento instantáneo y dial de tiempos de los relés de sobrecorriente para protección de Sistemas de Potencia radiales. También el programa permite verificar la coordinación de relés en instalaciones existentes. El usuario ingresa los datos acerca del sistema en estudio y el programa desarrolla inicialmente un análisis de falla. Luego se ingresa la relación de transformación de los transformadores de corriente, el tipo de relé y las corrientes pico de carga y el usuario selecciona los tiempos de disparo y los intervalos de coordinación. Finalmente las curvas de coordinación de relés son graficadas y los ajustes iniciales se pueden cambiar, si es necesario, hasta conseguir las características de protección deseados.

Se presenta así mismo el desarrollo de la teoría que soporta el procedimiento de coordinación de relés y a través de un ejemplo aplicado a un típico sistema de potencia de minas se muestra el uso y la capacidad del programa.

## A G R A D E C I M I E N T O

Al Ing. Carlos Arroyo que gracias a su experiencia, colaboración y consejos permitió una mejor realización del proyecto.

Es patente y, así se reconoce en la tesis, la amplia colaboración de los miembros del Departamento de Ingeniería de CENTROMIN PERU S.A. en especial mi agradecimiento a los Ings y Dibujantes de la División Proyectos - Droya en la persona de su jefe el Ing. E. Villar.

# "PROGRAMA INTERACTIVO DE COORDINACION DE RELES"

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS  
LISTA DE TABLAS  
INTRODUCCION

	<u>Pag.</u>
I. CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA	4
1.1 Desarrollo Teórico	
1.1.1 La matriz ZBUS	
1.1.2 Construcción del ZBUS por Algoritmo	
1.1.2.1 Adición de un branch	
1.1.2.2 Adición de un Link	
1.1.3 Análisis de Falla Usando la Matriz ZBUS	
1.2 Descripción del Programa	
1.2.1 Datos de Entrada	
1.2.2 Operación y Uso del Programa	
II. REPRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL RELE	17
2.1 Desarrollo Teórico	
2.1.1 Tabla Look Up versus Representación Matemática	
2.1.2 Tipo de ajuste de Curvas	
2.1.2.1 Ajuste de Curvas por el Método del "least squares"	
2.1.2.2 Descripción del Programa Preparación de Datos Uso del Programa	
III. COORDINACION INTERACTIVA POR EL METODO DEL TEMPLATE	28
3.1 Base Teórica	
3.2 Aplicación a Computación Digital	
3.3 Programa Interactivo de Coordinación de relés	
3.3.1 Desarrollo Teórico	
3.3.1.1 Calibración de Relés	
3.3.1.2 Display de la Información de Calibración	
3.3.1.3 Display de la Información de Disparo de los Relés	
3.3.1.4 Gráfica de las Curvas de los Relés	
3.3.2 Uso y Operación del Programa	
IV. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA INTERACTIVO DE COORDINACION DE RELES	66

- 4.1 Rutina de Análisis de Fallas
- 4.2 Rutina de Coordinación de Relés
  - 4.2.1 Estructura del Algoritmo de Calibración de Relés
  - 4.2.2 Estructura del Algoritmo de Gráficos
- 4.3 Aplicación del programa
  - 4.3.1 Cálculos Preliminares
  - 4.3.2 Resultados del Programa
- 4.4 Limitaciones del Programa
- 4.5 Estudio de Factibilidad

## V. CONCLUSIONES

105

### APENDICES:

- A. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE AJUSTE DE CURVAS
- B. LISTADO DEL PROGRAMA INTERACTIVO DE COORDINACION DE RELES

### BIBLIOGRAFIA

### LISTA DE PLANOS

- 001 Diagrama de Flujo del Programa Interactivo de Coordinación de Relés
- 002 Diagrama de Flujo de la Rutina de Calibración de Relés y Gráficos
- 003 Diagrama de Flujo del Programa de Ajuste de Curvas
- 004 Diagrama Unifilar de un Típico Sistema de Potencia
- 005 Diagrama de Impedancias del Diagrama del Plano Nº 004

## LISTA DE FIGURAS

<u>Número</u>	<u>Descripción</u>
1	Porción Típica de un Sistema de Potencia Radial
2	Salida de la Rutina de Reordenamiento de Datos
3	Salida de la Rutina de Análisis de Falla
4	Calibración de Relés de la Ruta Crítica
5	Calibración de Relés de la Ruta Lateral I
6	Calibración de Relés de la Ruta Lateral II
7	Calibración de Relés de la Ruta Lateral III
8	Gráfica de las Curvas de Coord. de Relés - Ruta Crítica
9	Gráfica de las Curvas de Coord. de Relés - Ruta Lateral I
10	Gráfica de las curvas de Coord. de Relés - Ruta Lateral II
11	Resultados para un Ajuste de 2 <sup>do</sup> Grado
12	Resultados para un Ajuste de 3 <sup>er</sup> Grado
13	Resultados para un Ajuste de 4 <sup>to</sup> Grado

## LISTA DE TABLAS

<u>Número</u>	<u>Descripción</u>
1	Constantes de las Curvas de los Relés
2	Codificación de los Relés Disponibles
3	Reactancias Típicas para Motores de Inducción
4	Resistencias y Reactancias para Cables
5	Reactancia de los Equipos de Potencia
6	Reactancia Subtransitoria de los Motores
7	Impedancia de los Cables
8	Parámetros de Ingreso



## INTRODUCCION

Uno de los problemas mas complejos en el diseño de los sistemas eléctricos de minas es la aplicación apropiada de los dispositivos de protección de sobrecarga y corto circuito. Estos dispositivos consisten principalmente de los relés de sobrecorrientes y sus interruptores asociados en caja moldeada o interruptores de potencia y fusibles. El propósito de estos dispositivos es interrumpir la corriente de falla selectivamente tan pronto como sea posible, esto es, retirar de servicio sólo aquella parte del sistema que debe ser aislada para aclarar la falla. Esto provee continuidad en el servicio del sistema permitiendo que el resto del sistema funcione normalmente mientras que la sección con la falla es reparada. El principal objetivo de un estudio de coordinación es determinar como aplicar estos dispositivos de protección de tal manera de optimizar los requerimientos de la producción de la planta y protección del sistema eléctrico.

La coordinación de los dispositivos de protección usando la técnica del cálculo manual es un proceso tedioso que requiere numerosos cálculos y gráficos de curvas. Como resultado se han publicado un número de procedimientos computarizados para la coordinación de los dispositivos

de protección (referencias 5 y 11). En la referencia 11 se describe un procedimiento para calcular las calibraciones de los relés por computadora en la cual las curvas del relé son representadas y manipuladas matemáticamente para determinar la calibración deseada. También se presenta un programa para aplicar a relés de sobrecorriente, relés direccionales y fusibles (referencia 11). Existe también un método para el chequeo de la coordinación de los dispositivos de protección ya instalados, y utilizando datos del sistema actual se determina si el sistema de protección eliminará la falla como se espera (referencia 1). Estos métodos iniciales de computación proveen sólo resultados numéricos por lo tanto el siguiente paso deseable para obtener las curvas de coordinación aún requieren procedimientos manuales. Recientemente, se han incorporado rutinas de gráficos en el programa de coordinación para proveer la gráfica de coordinación si se requiere (referencia 5).

Aunque los procedimientos dados en la referencia 5 son potentes y versátiles, hay una desventaja que para usarlo es necesario acceder sistemas de computación moderadamente grandes. Luego, el costo necesario para usarlos puede ser significativo, si no es prohibido, para los pequeños y medianos usuarios. Sería, por lo tanto, ventajoso desarrollar un programa con similares características para un sistema de microcomputadora que es más barato y fácilmente accesible.

## OBJETIVO DEL PROYECTO

El propósito del presente proyecto es desarrollar un programa interactivo de coordinación de relés para el uso de la microcomputadora. El software ha sido desarrollado para un sistema de microcomputadora IBM-PC, pero podría ser fácilmente modificado para ser usado en cualquier sistema de microcomputadora que soporte el lenguaje BASIC y punto flotante. Las fases específicas del presente trabajo son:

1. Desarrollar procedimientos para los cálculos de las corrientes de falla en la computadora.
2. Desarrollo y aplicación de métodos para la representación de las características del relé en la computadora.
3. Integrar los items 1 y 2 para lograr los procedimientos que ayuden en la determinación de la calibración y coordinación de los relés.

Estos tres pasos corresponden a los capítulos I, II y III respectivamente, con el programa explicado con detalles en el capítulo IV. Esta investigación inicial ha sido limitada a la coordinación de relés de sobrecorriente para protección entre fases de un sistema de potencia radial. En el capítulo V se hace recomendaciones de las áreas en las cuales se puede extender esta investigación.

## Capítulo I

### CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA

El primer componente del programa interactivo para coordinación de relés es la subrutina de análisis de falla. Este subprograma maneja la entrada de los parámetros del sistema de potencia; forma la ZBUS, matriz de impedancia de barras; calcula y muestra en la pantalla las corrientes de falla, voltajes en las barras, y el flujo de corriente en las líneas del sistema eléctrico para una falla en una barra dada.

#### 1.1 Desarrollo Teórico

1.1.1 La Matriz ZBUS: La matriz de impedancia de barras, ZBUS, es un medio de representar los parámetros de un sistema de potencia dado. En la siguiente discusión de la base teórica para la determinación del ZBUS y el algoritmo para su formación, las variables pueden ser especificados ya sea en por unidad, voltios, amperios u ohmios.

La ecuación del comportamiento de un sistema de potencia con "n" barras puede ser expresado como:

$$V = ZBUS * I \quad (1)$$

donde:

V = vector n\*1 de los voltajes de barras medido con respecto a un nodo de referencia.

ZBUS = matriz de impedancias de barras n\*n.

I = vector n\*1 de corrientes que entran a las barras.

Los elementos de la diagonal principal de la matriz ZBUS son las llamadas impedancias driving-point de los nodos, mientras los elementos fuera de la diagonal son las impedancias de transferencia de los nodos.

Por ejemplo, considerando un sistema con tres barras (más la barra de referencia 0) conduce al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde:

$V_1, V_2, V_3$  = voltajes de barra en las barras 1, 2 y 3.

$I_1, I_2, I_3$  = corrientes que entran a las barras  
1, 2, y 3.

$Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$  = impedancias driving-point de las  
barras 1, 2, y 3.

$Z_{12}, Z_{13}, Z_{21}, Z_{31}, Z_{32}$   
= impedancias de transferencia entre  
los varios pares de barras.

Expandiendo la ecuación 2,

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11} * I_1 + Z_{12} * I_2 + Z_{13} * I_3 \\ V_2 &= Z_{21} * I_1 + Z_{22} * I_2 + Z_{23} * I_3 \\ V_3 &= Z_{31} * I_1 + Z_{32} * I_2 + Z_{33} * I_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Se puede ver en la ecuación 3 que el voltaje  $V_1$ , en la barra 1, es la superposición de los voltajes resultantes en la barra 1 debido a cada una de las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ .  $Z_{11}$  es calculado al inyectar corriente en la barra 1 y midiendo el voltaje resultante en la barra 1. Las dos impedancias de transferencia asociadas,  $Z_{12}$ ,  $Z_{13}$ , son calculadas al inyectar corriente en las barras 2 y 3 una a la vez, y midiendo el voltaje en la barra 1 causada por cada corriente. Una similar situación existe para los voltajes de las barras  $V_2$  y  $V_3$ , quiere decir que cada una es causada por la contribución de las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  y las correspondientes impedancias del driving-point o transferencia.

1.1.2 Construcción del ZBUS por Algoritmo: Debido a la complejidad para calcular las impedancias del driving-point y transferencia de un sistema de potencia completamente ensamblado, ZBUS es usualmente construido por medio de un algoritmo. De esta manera, la matriz de impedancias ZBUS es construido en etapas, comenzando con un sistema de una sola línea de transmisión o cable. Una línea es adicionada a la vez, y la matriz es modificada para reflejar los cambios en el sistema después que cada nuevo elemento o línea es conectado.

Para formar la matriz ZBUS usando el algoritmo, cada elemento debe ser adicionado secuencialmente, tal que pueda ser conectado al sistema que ya ha sido ensamblado. Esto significa que el primer elemento debe ser uno desde la barra de referencia a alguna otra barra del sistema. Un extremo del elemento siguiente debe ser conectado a la barra de referencia o al terminal del primer elemento que fué adicionado. Este procedimiento se continúa para cada elemento sucesivo.

Cada línea o elemento conectado cae en una de las dos categorías siguientes:

1. Branch: Es una línea desde una barra existente (la cual puede ser la barra de referencia) a una nueva barra.
2. Link: Es una línea entre dos barras existentes (dos barras que ya han sido incluidos en la red parcialmente construida).

Un método diferente se usa para modificar la matriz por la adición de cada línea o elemento dependiendo de la categoría al que pertenece el elemento que es adicionado.

1.1.2.1 Adición de un Branch. Cuando el elemento p-q que es adicionado a una red parcial de "m" barras es un branch, la dimensión de la matriz ZBUS se convierte en  $(m+1)*(m+1)$ ;  $V_{bus}$  e  $I_{bus}$  se convierten en vectores de dimensión  $(m+1)*1$ .

En este caso, p es una barra existente, y q es la nueva barra que es adicionada. Las siguientes ecuaciones se usan para determinar los elementos de la nueva fila y columna de ZBUS:

$$\begin{aligned}
 Z_{qi} &= Z_{pi} & i=1,2,\dots,m; i \neq q \\
 Z_{iq} &= Z_{ip} & i=1,2,\dots,m; i \neq q \\
 Z_{qq} &= Z_{pq} + Z_{línea pq}
 \end{aligned} \tag{4}$$

donde:



$Z_{ij}$  = elementos de la matriz ZBUS.

$Z_{i100000000} pq$  = impedancia del elemento adicionado.

Si "p" es el nodo de referencia, se usa la sgte ecuación:

$$Z_{qi} = Z_{iq} = 0 \quad i=1,2,\dots,m; i \neq q \quad (5)$$

$$Z_{qq} = Z_{i100000000} pq$$

Esta situación no crea una configuración especial en el programa de corrientes de falla, pues ZBUS es almacenado como una matriz con subíndices que varían desde 0 hasta m. (por lo tanto, es realmente una matriz de  $(m+1) \times (m+1)$  antes que el nuevo elemento es añadido). La 0<sup>ésima</sup> fila y columna son llenados con zeros, esto es,  $Z_{pi} = Z_{ip} = 0$  cuando  $p=0$ . Por consiguiente la ecuación 4 cuando p es el nodo de referencia dará el mismo resultado que si se usa la ecuación 5.

**1.1.2.2 Adición de un Link.** Cuando un elemento p-q a añadirse es un link, no se necesita añadir una nueva barra a la red parcial. Por lo tanto, ZBUS, V, e I retienen sus dimensiones originales, pero todos los elementos de ZBUS deben ser cambiados para incluir el efecto del link añadido. La adición de un link se logra en dos etapas.

Primero, se añade una fila y columna temporal a la matriz ZBUS, usando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Z_{1i} &= Z_{pi} - Z_{qi} \quad i=1,2,\dots,m; i \neq 1 \\ Z_{i1} &= Z_{ip} - Z_{iq} \quad i=1,2,\dots,m; i \neq 1 \\ Z_{11} &= Z_{p1} - Z_{q1} + Z_{110000 \text{ } pq} \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

$Z_{i,j}$  = elementos de ZBUS.

$Z_{1i}, Z_{i1}, Z_{11}$  = elementos de ZBUS en la 1<sup>ésima</sup> fila y columna añadida.

$Z_{110000 \text{ } pq}$  = la impedancia del elemento del circuito añadido.

Si "p" es el nodo de referencia, luego,

$$\begin{aligned} Z_{pi} &= 0 \quad i=1,2,\dots,m \\ Z_{1i} &= -Z_{qi} \quad i=1,2,\dots,m; i \neq 1 \\ Z_{i1} &= -Z_{iq} \quad i=1,2,\dots,m; i \neq 1 \\ Z_{11} &= -Z_{q1} + Z_{110000 \text{ } pq}. \end{aligned} \quad (7)$$

Este caso especial es tomado en cuenta almacenando ceros en la 0<sup>ésima</sup> fila y columna de ZBUS.

Después que la matriz a sido aumentada, cada elemento de ZBUS,  $Z_{i,j}$  donde  $i,j=1,2,\dots,m$ , es modificado y la 1<sup>ésima</sup> fila y columna son

eliminados. La siguiente ecuación se usa para calcular los valores del nuevo elemento.

$$Z_{ij}(\text{modificado}) = Z_{ij}(\text{antes de la eliminación}) - \frac{Z_{i1} * Z_{1j}}{Z_{11}} \quad (8)$$

1.1.3 Análisis de Falla Usando la Matriz ZBUS: Una vez que la matriz ZBUS ha sido construida, la siguiente ecuación determina la corriente de falla para un corto circuito trifásico en cualquier barra p:

$$I_p = \frac{1}{Z_{pp}} \quad (9)$$

donde:

$I_p$  = corriente de falla en por unidad.

$Z_{pp}$  = elemento de la p<sup>ésima</sup> fila y p<sup>ésima</sup> columna en por unidad.

El voltaje con respecto a tierra de cualquier barra se calcula de la siguiente ecuación:

$$V_i = 1 - (Z_{ip} * I_p) \quad (10)$$

donde:

$V_i$  = voltaje en por unidad en cualquier barra  
 $i=1,2,\dots,m$ .

$Z_{ip}$  = elemento de la i<sup>ésima</sup> fila y p<sup>ésima</sup> columna en por unidad.

El voltaje en la barra "0" es considerado  $1+j0$  por unidad con el propósito de calcular el flujo de corriente en las líneas. Esto es debido a la asunción usualmente hecha para el cálculo de corto circuito, que todas las máquinas conectadas a la red están operando con un voltaje de 1.0 por unidad detrás de su reactancia interna en el momento que la falla ocurre. El flujo de corriente en cualquier línea después que la falla ocurre se obtiene dividiendo la diferencia en voltaje entre los dos extremos de la línea por la impedancia de la línea como se muestra:

$$I_{i,j} = \frac{(V_i - V_j)}{Z_{línea\ i,j}} \quad (11)$$

donde:

$I_{i,j}$  = flujo de corriente en por unidad desde barra i a la barra j.

$V_i$  = voltaje en por unidad de la barra i.

$V_j$  = voltaje en por unidad de la barra j.

$Z_{línea\ i,j}$  = impedancia en por unidad de la línea conectado entre la barra i y la barra j.

## 1.2 Descripción del Programa:

1.2.1 Datos de Entrada: Para facilitar el ingreso de datos se ha incluido, en la subrutina de análisis

de falla, una sección de reordenamiento de las impedancias de las líneas o elementos, del sistema eléctrico, ingresados. Esta subrutina permite el ingreso de las impedancias de la líneas del sistema en cualquier orden, luego, de numerar correctamente las barras. Las impedancias pueden ser ingresadas en valores por unidad u ohmios. Si la impedancia se ingresa en ohmios el programa solicita que se ingrese el voltaje de base nueva, al que ha de referirse, y con la potencia de base nueva que se ingresó previamente el programa calcula la impedancia en valores por unidad referida a la base nueva. Si el valor de la impedancia ingresada esta en por unidad, el programa solicita que se ingrese la potencia base dada al que esta referida la impedancia, luego, solicita los valores del voltaje base dada y voltaje base nueva y con la potencia base nueva ingresada anteriormente el programa calcula la impedancia en por unidad referida a la base nueva.

**1.2.2 Operación y Uso del Programa.** El programa interactivo de fallas empieza informando al usuario que la barra "0" será la barra de referencia y que la fuente deberá ser conectado a la barra "1"; luego el programa solicita se ingrese la potencia base nueva al que han de referirse todas las impedancias. El programa continúa solicitando que

se ingrese el número de elementos y el número de barras. Se ingresa a partir de este punto a la sección del bucle de ingreso de datos, solicitando al usuario que ingrese el par de barras al cual el primer elemento está conectado y a continuación solicita el número de impedancias en serie. El programa, luego, pregunta si los valores de la resistencia y reactancia ingresados están en por unidad. Si la respuesta es afirmativa, el programa solicita se ingrese la potencia base dada al que esta referida, continuando, el programa solicita los valores del voltaje base dada al que esta referida y el valor del voltaje base nueva al que será referida finalmente. Si la respuesta es negativa, el programa asume que los valores ingresados están en ohmios; y solicita el ingreso del valor del voltaje base nueva al que será referida. Finalmente el programa calcula la impedancia en valor por unidad referida a la base nueva. Este proceso se continúa hasta que todos los elementos han sido ingresados. A continuación, el programa ingresa a la sección de reordenamiento de datos; el cual ordena los datos para que sean ingresados correctamente a la siguiente sección, para la construcción de la matriz ZBUS.

Cuando el programa ha construido la matriz ZBUS, el usuario es solicitado que ingrese la corriente base

al cual la información de la falla será mostrada en la pantalla. Luego el programa solicita que se ingrese el número de la barra donde la falla trifásica está localizada. Después que el número correcto de la barra ha sido seleccionada, la siguiente información se muestra en la pantalla o se imprime:

1. Corriente de falla (magnitud y ángulo de fase en amperios y grados).
2. Voltajes en las barras durante la falla (magnitud y ángulo de fase en valores por unidad y grados).
3. Flujo de corrientes de línea durante la falla (magnitud y ángulo de fase en amperios y grados).

Esta información puede ser repetida para fallas en otras barras ingresando un nuevo número de barra; pulsando un "0" como número de barra se ingresa a la porción de coordinación de relés del programa. Es importante anotar que no es necesario que el usuario vea los cálculos de falla en cualquier barra para que la siguiente subrutina del programa, subrutina de coordinación, funcione apropiadamente. Los cálculos de falla requeridos son ejecutados independiente de la porción de coordinación y computados adicionalmente luego de completar la construcción del ZBUS y sólo serán mostrados en la

pantalla o impresos si el usuario desea examinar la información de la falla en ese punto.



## Capítulo II

### REPRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL RELE

El problema principal para computarizar la coordinación de relés es la determinación de un método apropiado para representar las características del relé por la computadora. La representación de las curvas del relé por medio de las ecuaciones determinadas por el método "least-squares" para ajuste de curvas es el más apropiado para un sistema de microcomputadora y los requerimientos del programa interactivo de coordinación de relés.

#### 2.1 Desarrollo Teórico

2.1.1 Tabla Look Up versus Representación Matemática. La primera consideración tomada en cuenta fue si almacenar las curvas del relé en forma de una tabla en la memoria o en un disco; o usar una representación matemática para las curvas y calcular puntos en las ubicaciones particulares de la curva como sean requeridos. La decisión se basó en los siguientes factores: precisión, requerimientos de memoria para almacenar las curvas

del relé y el rango de los dispositivos de protección que serán representados.

La expresión mas frecuente para representar las características del relé tiene la forma general siguiente:

$$\log(t) = \sum_{j=0}^n a_j * (\log i)^j \quad (12)$$

donde:

t = tiempo de operación del relé en seg. o ciclos.

i = corriente en Amperios o múltiplos de la corriente de arranque del relé.

$a_j$  = constantes de la ecuación evaluados para una curva específica y un número específico de términos (n).

Otra forma incluido en la literatura es:

$$\text{TIME} = \left[ \sum_{j=m}^n \sum_{i=0}^p a_{j,i} (\text{dial de tiempo})^j \right]^k * (\text{múltiplo del tap})^k \quad (13)$$

donde:

$a_{j,i}, m, n, o, p$  = constantes determinadas para cada tipo específico de relé.

Aunque no se dan información detallada respecto a la precisión de estas expresiones, muchas fuentes

indican que el relé de sobrecorriente electromagnético puede ser representado por la ecuación 12 con un máximo de error en el tiempo de más o menos 5% o menor a bajas corrientes, y más o menos 3 ciclos o menos a altas corrientes cuando se considera una representación polinómica de cuarto grado. Precisiones promedios de más o menos 1.5% son citados para la ecuación 13, pero el máximo error no es dado. Los errores asociados con la tabla "look-up", por otro lado, serían aquellos incurridos al interpolar el valor de corriente entre dos valores almacenados de la tabla corriente-tiempo para obtener el tiempo de disparo.

Junto a la consideración de requerimientos de capacidad de memoria, para almacenar las curvas del relé, fué la decisión de usar el método del "template" para la coordinación del relés, el cual se basa en la asunción que las curvas tiempo-corriente del relé tienen la misma forma para todo el rango del dial del tiempo de un tipo de relé particular, cuando es graficada en una escala log-log. El uso de este método requiere almacenar en memoria una sola curva por cada tipo de relé en lugar de una familia de curvas. La ecuación 12 es ventajosa para la aplicación de este método, pues sólo es necesario almacenar cuatro constantes  $a_1$  hasta  $a_4$  para una polinomial de cuarto grado, el

valor de  $a_0$  será determinado durante el proceso de coordinación del relé. La ecuación 13 es diseñada para representar una familia de curvas y requiere almacenar veinte constantes. La tabla "look-up" requeriría un promedio de veinte valores por curva. Un grupo común de corrientes se podría utilizar para todas las curvas; además se requiere que los valores de corriente al inicio y fin, por cada característica tiempo-corriente, sean almacenados. Esto incluye un total a almacenar de veintidos puntos por curva, más los valores comunes de corrientes.

Debido a que en el presente estudio de coordinación, se incluye sólo la coordinación de relés y la economía de memoria, para almacenar las curvas, fué la mayor restricción debido al tamaño de la computadora, se escogió la ecuación 12 para la representación de las curvas del relé. Para el uso de esta ecuación sólo necesita almacenar cuatro constantes por cada tipo de relé. En el futuro se puede expandir el programa para incluir fusibles e interruptores del tipo caja moldeada. Una representación matemática similar a la ecuación 12, puede ser usada para representar las curvas de los fusibles e interruptores; las constantes pueden ser almacenadas por cada curva individualmente, dependiendo si la representación de un tipo de

familia de curvas puede ser usado. Además, al menos de cuatro a siete constantes serían requeridos por cada curva almacenada, dependiendo de la precisión deseada. Si el número de constantes requeridas para representar ciertas formas de curvas sería mucho mayor de siete, la precisión obtenida con la tabla look-up podría garantizar el uso de este método con algunos dispositivos.

2.1.2 Tipo de Ajuste de Curvas. Una vez que la ecuación 12 se ha seleccionado para representar las características del relé, se requiere de un método para determinar las constantes  $a$ , desde las curvas del relé. Dos métodos se han considerado: el método "exact-fit" y el método "least-squares".

El método "exact-fit" ajusta una polinomial de grado  $N$  exáctamente a  $N+1$  puntos de la curva dada. Aunque los puntos escogidos se ajustan exáctamente, este método no da garantía de precisión en los otros puntos de la curva, y el modelo por lo tanto no provee una representación satisfactoria de la curva dada. Este problema puede ser resuelto usando más puntos de la muestra, pero esto resulta en un polinomio de mayor grado y consecuentemente, más coeficientes necesitan ser computados para obtener la precisión deseada.

El método "least-squares" provee una alternativa al método previo. Con este método, una polinomial de grado  $N$  se ajusta a un número de puntos  $M$ , donde  $N+1 < M$ . De esta manera más puntos pueden ser escogidos de la curva sin incrementar el grado de la polinomial. La base de este método es la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas representando las derivadas de los cuadrados del error entre la curva original y la curva calculada con respecto a los coeficientes  $a_j$ . La solución de estas ecuaciones dá como resultado los valores de  $a_j$ , resultante de la mínima suma de los cuadrados de los errores entre los puntos de las dos curvas.

2.1.2.1 Ajuste de la Curva por el Método del "Least-Squares". El método "Least-Squares" para ajuste de curvas, se ha usado para obtener las ecuaciones de las curvas de los relés y cuyas constantes no han sido publicadas. La ecuación 12 puede ser generalizada y escrita como:

$$y_i = \sum_{j=0}^N a_j x_i^j \quad (14)$$

donde:

$(x_i, y_i)$  = el  $i$ -ésimo punto de la curva calculada  
o es funcionalmente relacionada al  
 $i$ -ésimo punto de la curva calculada.

$a_j$  = constantes determinadas por el  
ajuste de la curva.

El error entre un punto de la curva dada y la  
curva calculada en cualquier punto  $x_i$  es:

$$e_i = Y_i - y_i \quad (15)$$

$$\text{ó } e_i = Y_i - a_0 - a_1x_i^1 - \dots - a_nx_i^N \quad (16)$$

donde:

$(X_i, Y_i)$  = el  $i^{\text{ésimo}}$  punto en la curva original.

La suma de los cuadrados de los términos del  
error para todos los puntos dados es:

$$S = \sum_{i=1}^M e_i^2 = \sum_{i=1}^M (Y_i - a_0 - a_1x_i^1 - \dots - a_nx_i^N)^2 \quad (17)$$

El ajuste más preciso se determina calculando los  
 $a_j$  que conducen al mínimo valor de  $S$ . Los  
valores de estas constantes son calculadas  
tomando las derivadas parciales de  $S$  con respecto  
a cada coeficiente, igualando estas derivadas a  
cero y resolviendo el sistema de ecuaciones, como  
se muestra:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial S}{\partial a_0} = 0 &= \sum_{i=1}^M 2 (Y_i - a_0 - a_1 x_i^1 - \dots - a_N x_i^N) (-1) \\
 \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 &= \sum_{i=1}^M 2 (Y_i - a_0 - a_1 x_i^1 - \dots - a_N x_i^N) (-x_i^1) \\
 &\vdots \\
 \frac{\partial S}{\partial a_N} = 0 &= \sum_{i=1}^M 2 (Y_i - a_0 - a_1 x_i^1 - \dots - a_N x_i^N) (-x_i^N)
 \end{aligned} \tag{18}$$

Dividiendo por 2 y simplificando se obtiene:

$$\begin{aligned}
 a_0 \sum_{i=1}^M 1 + a_1 \sum_{i=1}^M x_i^1 + \dots + a_N \sum_{i=1}^M x_i^N &= \sum_{i=1}^M Y_i \\
 a_0 \sum_{i=1}^M x_i^1 + a_1 \sum_{i=1}^M x_i^2 + \dots + a_N \sum_{i=1}^M x_i^{N-1} &= \sum_{i=1}^M x_i^1 Y_i \\
 &\vdots \\
 a_0 \sum_{i=1}^M x_i^N + a_1 \sum_{i=1}^M x_i^{N+1} + \dots + a_N \sum_{i=1}^M x_i^{2N} &= \sum_{i=1}^M x_i^N Y_i
 \end{aligned} \tag{19}$$

Estas ecuaciones también pueden ser escritas en forma matricial:



$$\begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^M 1 & \sum_{i=1}^M x_i^1 & \dots & \sum_{i=1}^M x_i^N \\
 \sum_{i=1}^M x_i^1 & \sum_{i=1}^M x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^M x_i^{N+1} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{i=1}^M x_i^N & \sum_{i=1}^M x_i^{N+1} & \dots & \sum_{i=1}^M x_i^{2N}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 \vdots \\
 a_N
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^M Y_i \\
 \sum_{i=1}^M x_i^1 Y_i \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^M x_i^N Y_i
 \end{bmatrix}
 \quad (20)$$

Los valores desde  $a_0$  hasta  $a_N$  se obtienen premultiplicando ambos lados por la inversa de la matriz que se encuentra a la izquierda del vector  $a_0 \dots a_N$ .

**2.1.2.2 Descripción del Programa.** El programa para el ajuste de curvas por el método "least-squares", ha sido desarrollado con el propósito de determinar las constantes para representar matemáticamente las curvas del relé, a través de la ecuación 14, dentro del programa de coordinación. Por lo tanto, este programa no es usado por la persona que opera el programa interactivo de coordinación de relés.

El programa ha sido escrito en lenguaje basic, para ser usado en una microcomputadora IBM-PC.

Preparación de Datos. Antes que el programa, de ajuste de curvas por el método "least-squares", se use; es necesario crear archivos conteniendo los valores de las abscisas y ordenadas de la curva. Se tomaron treinta puntos por cada curva.

Uso del Programa. El programa, de ajuste de curvas, primero pregunta al usuario que seleccione la dimensión del ajuste deseado, éste es igual al grado del polinomio más uno y su valor puede ser desde uno hasta siete. Luego, el programa solicita el número de puntos de la muestra (máximo 100 puntos), también en el programa se indica el nombre de los archivos de datos donde se encuentran los valores X e Y de la curva. El programa después de leer estos valores usa el método del "least-squares", descrito previamente, para determinar los coeficientes deseados. A continuación, el programa calcula los puntos de la curva modelo, la suma de los errores al cuadrado y el porcentaje de error en cada punto. Estos valores pueden ser examinados e intentar varios grados de ajuste hasta lograr la precisión deseada. Las constantes obtenidas, el porcentaje de error y los puntos calculados de la

curva modelo son almacenados en archivos para su  
examinación numérica y gráfica si se desea.

Los resultados obtenidos de la aplicación de este  
programa y una explicación más detallada de su  
estructura se encuentran en el apéndice A.

## Capítulo III

### COORDINACION INTERACTIVA POR EL METODO DEL TEMPLATE

3.1 Base Teórica. El método del "template" para coordinación de relés se basa en uso de una sola curva para representar todo el rango del dial de tiempo de un relé particular. Ciertas asunciones concernientes a la característica de tiempo inverso del relé de sobrecorriente permite la aplicación del método del "template", que provee un grado de precisión satisfactorio para la coordinación de relés.

La representación gráfica de las características del relé incluye la gráfica del tiempo de operación versus la magnitud de la corriente para un dial de tiempo. Variando la calibración del dial de tiempos se ajusta la separación inicial entre el contacto movable (localizado en el disco de inducción) y el contacto fijo, afectando la cantidad de tiempo que toma el relé para cerrar sus contactos. Esta variación del tiempo resulta en una curva característica diferente para cada calibración del dial del tiempo cuando se grafica en una escala lineal.

La asunción que nos permite el uso del método del template es que las curvas de los diferentes diales de tiempo están relacionadas por la relación del tiempo. Esto quiere decir, que la relación entre los tiempos de operación de dos curvas con diferentes diales de tiempo será la misma, independiente de la magnitud de la corriente. Por ejemplo, si un relé particular dispara en cierta cantidad de tiempo para un dial de tiempo A, y opera en un tiempo dos veces mayor para un dial de tiempo B para la misma corriente, los tiempos de disparo para el dial de tiempo B será doble que para el dial de tiempo A a cualquier otro valor de corriente.

Las dos propiedades del mecanismo del relé que evitan que este compartimiento se cumpla son: la fricción y la inercia. Sus efectos pueden ser explicados considerando el tiempo de operación del relé como la suma de dos periodos de tiempo distintos. El primero es el tiempo en el cual la fricción y la inercia rotacional son vencidos acelerando el disco de inducción hasta la velocidad angular de estado-estable, y el segundo es el tiempo en el cual el disco de inducción rota a velocidad constante hasta que los contactos se cierran. En la calibración con diales de tiempo bajos, un gran porcentaje del tiempo total de operación es utilizado en acelerar el disco

de inducción hasta la velocidad de estado estable (primer periodo de tiempo) mientras que en los diales de tiempo más altos un menor porcentaje del primer periodo es utilizado. Aunque esto ocasiona diferencias entre las formas de las curvas para los diferentes diales de tiempo, las desviaciones son pequeñas, permitiendo la asunción que las curvas de diales de tiempo están relacionadas por la relación de tiempos.

En una escala de tiempo logarítmico, relaciones idénticas de tiempos diferentes cubren la misma distancia, independiente del valor de los tiempos. Por ejemplo, la distancia entre 0.2 y 0.8 es la misma que la distancia entre 1.0 y 4.0. Por lo tanto, desde que dos curvas con diferentes diales de tiempo están relacionadas por la relación de tiempos, y una relación particular de tiempos se desplaza una misma distancia en cualquier lugar de una escala de tiempo logarítmica, los puntos de las dos curvas de diales diferentes estarán separados una misma distancia para cualquier valor de la corriente. En conclusión se desprende que los cambios en el ajuste de los diales de tiempo desplazan la curva en dirección paralela al eje de tiempos logarítmicos sin cambiar la forma de la curva.

El eje de corrientes puede ser tratado de manera similar. La respuesta del relé a la corriente depende de la relación de la corriente de operación a la toma de arranque, pero es independiente de la toma de arranque. Una relación entre dos valores del ajuste del tap resulta en la misma relación, pero invertida de "múltiplos del tap" asociado con una corriente particular. Por ejemplo, si el tap es cambiado de dos a cuatro, y la corriente de operación es veinte amperios, resultará en un cambio de diez a cinco múltiplos del tap. En una escala logarítmica de unidades amperios, esta corriente aún estará graficada en la misma posición de los ejes, pero ahora estará asociada con un valor más pequeño de múltiplos del tap. Esto, efectivamente ha desplazado la curva del relé asociado en la dirección de valores de corriente crecientes, paralelo al eje de corrientes. El hecho que la distancia que la curva se desplaza es igual para cada punto de la curva resulta del hecho que relaciones iguales de corrientes se desplazan la misma distancia cuando son graficadas en una escala logarítmica. Cada valor de corriente tiene un particular múltiplo de tap asociado, y cambiando el ajuste del tap cambia su valor asociado por la misma relación para todos los valores de corriente, desplazando cada punto de la curva por la misma cantidad. Esto puede también ser ilustrado dibujando una escala logarítmica de múltiplos del tap con las

curvas del relé asociado superpuesta en un eje logarítmico de corrientes de la misma escala. Cuando se cambie el ajuste del tap, la escala de múltiplos del tap y curvas asociadas serán desplazadas paralelamente al eje de corrientes tal que los valores de múltiplos del tap coincidirían con las corrientes correspondientes. Las curvas no cambiarán de forma, sino serán simplemente desplazadas. El valor de corriente al cual las curvas son asintóticas sería el ajuste del tap, desde que las curvas del relé son asintóticas a un valor de múltiplos del tap de uno.

Por lo tanto, si un eje indica tiempo de disparo en una escala logarítmica, y el otro eje indica la corriente de operación, también en escala logarítmica, una sola curva se puede utilizar para representar la relación entre la toma de arranque, ajuste del dial de tiempo, corriente de operación y tiempo para cualquier tipo de relé. Esta curva, referida con el nombre de "template", se desplaza a una posición apropiada en la gráfica de coordinación cuando el relé es calibrado. El desplazamiento horizontal corresponde a un ajuste del tap, mientras que el desplazamiento vertical, paralelo al eje de tiempos, corresponde a un cambio en el ajuste del dial de tiempos.



3.2 Aplicación a Computación Digital. La curva "template" escogida para representar a un tipo particular de relé es normalmente un promedio de las curvas de tiempo, típico del rango del dial tiempo. Puede ser representado matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$\log(t) = \sum_{j=0}^4 a_j (\log I)^j \quad (21)$$

donde:

t = tiempo de operación del relé en ciclos.

I = corriente en múltiplos de la toma de arranque.

$a_j$  = constantes para cada tipo de relé.

Mientras esta ecuación representa a una cierta curva específica en una cierta posición con respecto a los ejes logarítmicos tiempo-corriente, la curva puede ser desplazada paralela al eje de tiempos añadiendo un término constante en el miembro del lado derecho. Esto tiene el efecto de multiplicar los valores del tiempo de operación (en ciclos) por un factor constante, que corresponde a un cambio en el dial de tiempo, pero la forma de la curva no cambia. La adición de una constante en la ecuación 21 es efectivamente un cambio en una de las constantes,  $a_0$ , determinado por el programa de ajuste de curvas. Desde que esta constante está relacionado sólo con la

posición vertical de la curva, pero no de su forma, es solo necesario usar (y almacenar)  $a_1$  hasta  $a_4$  para la representación de la curva. La constante  $a_0$  es determinado hallando el valor necesario que conduzca al tiempo de disparo del relé deseado, desplazando efectivamente la curva del relé verticalmente a una posición apropiada una vez que el tap (posición horizontal) ha sido determinado. Debido a que el ajuste del dial de tiempo no es usado directamente por este método, la calibración del relé es especificado como el ajuste del tap (toma de arranque) y el tiempo de operación a un cierto múltiplo de la toma de arranque, una vez que  $a_0$  ha sido encontrado. Esta información puede ser posteriormente usada para referirse a las curvas del relé dadas por el fabricante para determinar el correspondiente ajuste del dial de tiempo.

Dos procedimientos que involucran a la Ecuación 21 son usados dentro del procedimiento de coordinación computarizado: (1) Encontrar la información de calibración del relé cuando la corriente de falla y el tiempo de operación deseado son dados y (2) Encontrar el tiempo de operación para una corriente de falla dada después que el relé ha sido calibrado. Estos procedimientos han sido detallados en la referencia 11.

Las cantidades dadas para el primer procedimiento son: (1) las constantes  $a_1$  hasta  $a_4$  para un tipo particular de relé, (2) el ajuste del tap del relé, (3) la corriente de falla, y (4) el tiempo de operación deseado a esta corriente. Los pasos seguidos en este procedimiento son:

1. Encontrar  $I$ , la corriente en múltiplos de la toma de arranque. Esto se obtiene dividiendo la corriente de falla entre el tap o toma de arranque seleccionado.
2. Usar la Ecuación 21 para encontrar el logaritmo del tiempo de operación del dispositivo en ciclos. Sólo las cuatro constantes que determinan la forma de la curva,  $a_1$  hasta  $a_4$ , son usados. La constante  $a_0$  es ajustado a cero para este cálculo.
3. Encontrar el logaritmo del tiempo de operación deseado en ciclos para la corriente de falla usado en (1).
4. Restar el valor obtenido en (2) del valor obtenido en (3). Este resultado es la constante,  $a_0$ , necesario para desplazar la curva del relé verticalmente a la posición apropiada.
5. La ecuación específica para este ajuste del relé particular ha sido determinado. Para proveer información de la calibración del relé, el tiempo de operación a cuatro veces la toma de arranque es calculado haciendo el valor de  $I$  igual a cuatro en la Ecuación 21 y resolviendo para  $t$ . La otra

pieza de información requerida para calibrar el relé es el ajuste del tap, el cual ya es conocido.

Las cantidades dadas para el segundo procedimiento son: (1) la ecuación específica para la calibración del relé conocido, (2) el ajuste del tap, y (3) la corriente de falla. El procedimiento es como sigue:

1. Encontrar  $I$ , la corriente en múltiplos de la toma de arranque, dividiendo la corriente entre el tap del relé.
2. Usar el valor de  $I$  y  $a_0$  hasta  $a_4$ , para resolver la Ecuación 21 y obtener  $t$ . Este es el tiempo, en ciclos, que el relé operará para la corriente de falla dada.

3.3 Programa Interactivo de Coordinación de Relés. El primer componente del programa interactivo de coordinación de relés es la subrutina de análisis de fallas, la cual maneja el ingreso de los parámetros del sistema de potencia, construye la matriz de impedancias ZBUS y muestra la información de falla al usuario si lo requiere. Esta parte fue previamente descrita en el capítulo I. La porción del programa que se describe a continuación es la rutina de coordinación de relés; ésta determina la calibración de los relés basado en la información de la falla, selección del tipo de relé, relación de

los transformadores de corriente, tiempos de operación y los intervalos de tiempo de coordinación. El programa provee luego información de la operación del relé así como también la gráfica tiempo-corriente para la verificación de la selectividad. Se han tomado provisiones para que el usuario pueda modificar la operación de los relés cambiando sus selecciones previas.

### 3.3.1 Desarrollo Teórico

3.3.1.1 Calibración de relés. El algoritmo para la calibración de relés está construido, tal que el ajuste del elemento instantáneo y los intervalos de tiempos de coordinación se puedan escoger para proveer coordinación entre los elementos de tiempo retardado e instantáneo en las zonas adyacentes de protección. Esto posibilita al diseñador del sistema protección cumplir los requerimientos de coordinación para fallas entre fases y protección de sobrecarga. Estos requerimientos pueden ser explicados considerando dos zonas adyacentes de protección, zona 1 y zona 2, donde la zona 2 se encuentra antes de la zona 1 (visto desde la fuente) en un típico sistema de potencia radial.

El elemento instantáneo de la zona 1 debe ser ajustado para disparar frente a una falla de

fase mínima en esta zona, mientras que el elemento de tiempo retardado debe disparar por una corriente de sobrecarga mínima en esta zona. Similarmente, los elementos instantáneo y de tiempo retardado de la zona 2 debe ser ajustado para operar frente a una falla de fase mínima y corriente de sobrecarga en su zona primaria de protección (zona 2). Además, el elemento instantáneo de la zona 2 debe disparar con una corriente más alta que el elemento instantáneo de la zona 1. Estos requerimientos fijan los máximos valores del ajuste de disparo para ambos elementos del relé en cada zona. Los ajustes que faltan determinar son la calibración de los diales de tiempo de los elementos de tiempo retardado. El elemento de tiempo retardado en la zona 2 debe tener su dial de tiempo ajustado de tal manera que su tiempo de disparo por sobrecarga o corrientes de falla en la zona 2 será mayor que el tiempo de disparo de los elementos de tiempo retardado e instantáneo de la zona 1. De manera similar, el ajuste del dial de tiempos del elemento de tiempo retardado de la zona 1 debe ser ajustado para coordinar con los elementos de tiempo retardado e instantáneo en la zona adyacente inferior. Los gráficos tiempo-corriente pueden ser examinados después que los relés han sido calibrados para

verificar que los requerimientos mencionados se han cumplido.

Los relés son calibrados en el orden especificado por el usuario, tal que la protección de la "ruta crítica" puede ser seleccionado desde el diagrama unifilar del sistema. Esto permite escoger una carga crítica y los pasos para la protección se siguen desde ésta hacia la fuente. Después que un grupo es seleccionado la siguiente información es ingresada para cada relé que será calibrado: la máxima corriente de carga; tap seleccionado, si no es dato se ingresa un "0" y el programa solicita el factor de sobrecarga para determinar el tap; calibración del elemento instantáneo en amperios, si no es dato se ingresa un "0" y el programa solicita el factor para calibrar el instantáneo; relación del transformador de corriente; tipo de relé; factor de asimetría. La calibración del relé es luego ejecutado mediante el uso del método del template mencionado anteriormente. Antes que la calibración sea ejecutada, ciertas cantidades debe ser conocida para cada relé a calibrar: (1) las constantes que representan la forma de su curva, (2) el ajuste del tap del relé, (3) la corriente de falla sobre la cual la calibración

se basa o ajuste del instantáneo, y (4) el tiempo de operación deseado a esta corriente.

Las constantes que representan la forma de la curva de los varios tipos de relés usados en el programa se muestran en la tabla 1. Algunos fueron tomados de la referencia 5; otros fueron determinados mediante el programa "ajuste de curvas" descrito anteriormente. Cuando el relé de una específica ubicación esta siendo calibrado, el programa usa las constantes propias que representan las características del relé, dependiendo del tipo de relé seleccionado por el usuario en dicha ubicación.

El ajuste del tap o ajuste de la toma de arranque, es el mínimo valor de la cantidad actuante (en este caso corriente) que causará el cierre de los contactos del relé. Este valor debe ser suficientemente alto para evitar la operación del relé por máxima carga o sobrecargas de tiempo corto, pero a su vez no debe ser tan alta que impida la operación del relé si ocurre una falla o sobrecarga. (sobrecargas de tiempo corto, el cual es mayor que la máxima corriente de carga normal, es el valor que resulta de la corriente de magnetización de los transformadores y arranque



Tabla 1. Constantes de las Curvas de los Relés

<u>Tipo de relé</u>	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}_3$	$\bar{a}_4$
CO-2	-4.3576	5.2136	-3.0521	0.6765
CO-5	-3.2505	3.8123	-2.1438	0.4501
CO-6	-3.1044	3.9513	-2.2996	0.5018
CO-7	-3.0586	3.4909	-2.0517	0.4632
CO-8	-4.6300	3.9000	-1.5667	0.2366
CO-9	-4.3694	3.1917	-0.9765	0.0794
CO-11	-3.7893	1.8875	-0.6239	0.1335
IAC51	-2.3897	2.3064	-1.2417	0.2594
IAC53	-4.4616	3.4979	-1.3032	0.1886
IAC55	-3.2581	4.6051	-3.1055	0.7901
IAC77	-3.1777	1.3605	-0.7420	0.2738

de motores). Existen varios métodos para determinar el ajuste del tap del relé de sobrecorriente de fase citados en la literatura. Una guía para determinar el ajuste del tap, es que debe ser igual al menos a 2 veces la máxima carga normal y generalmente no menor que 1.5 veces la máxima carga normal, o ajustar el tap a la siguiente calibración disponible no mayor que 1.25 la máxima corriente de carga de tiempo corto. Otra fuente afirma que el requerimiento general para protección de sobrecarga es que la toma de arranque del relé sea establecido a 125% de la capacidad nominal del conductor más pequeño de la porción protegida. Un valor de 125% de la corriente de plena carga es también recomendado para protección directa de equipos, tales como transformadores. El valor del factor de sobrecarga, queda a criterio del usuario y el programa selecciona el siguiente tap disponible. El usuario puede variar el valor de la corriente de carga ingresada para cambiar el valor del tap seleccionado anteriormente por el programa o ingresar directamente el valor del tap. Las calibraciones normales disponibles del tap son 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0 y 12.0.

El valor de corriente usado para la calibración de cada relé y el tiempo de operación deseado a esta corriente depende si el relé esta protegiendo sólo una barra de carga o provee protección de respaldo para otro relé. Otros factores a considerarse son si el relé de sobrecorriente incluye el elemento instantáneo para proveer protección de corto circuito, y si los relés adyacentes, debajo del relé a calibrar, han sido calibrados previamente. En el procedimiento de coordinación se presentan una de las cuatro condiciones para cada relé a calibrar. Las líneas de guía para determinar la corriente de operación y el tiempo de operación deseado se describe a continuación para cada una de las condiciones. A través de un breve ejemplo se muestra como estas guías son aplicadas. Los cuatro casos son:

CASO I. Cuando no hay relés adyacentes ya calibrados antes o después del relé a calibrar. Este es la situación usual para un relé protegiendo una barra de carga.

1. La corriente de operación es la corriente de falla en la barra protegida por el relé.
2. El usuario escoge el tiempo deseado de disparo del relé para esta corriente.

CASO II. Cuando no hay relés adyacentes, debajo del relé a calibrar, calibrados; pero el relé arriba de él ya ha sido calibrado. Esta situación se encuentra si los relés de la ruta crítica han sido calibrados antes que un relé de la ruta lateral.

1. La corriente de operación es la corriente de falla para una falla cerca al relé, si no tiene elemento instantáneo. Si tiene el elemento instantáneo la corriente de operación es la calibración del instantáneo.
2. El usuario selecciona el intervalo de tiempo de coordinación entre los dos relés para el punto de coordinación escogido en (1).

CASO III. Cuando un relé adyacente debajo del relé a calibrar ya ha sido calibrado independiente de si el relé adyacente arriba de él ha sido calibrado.

1. El punto de coordinación es la corriente para una falla cerca del relé debajo del relé a calibrar, o la calibración del elemento instantáneo del relé debajo de él si el instantáneo es incluido.
2. El usuario selecciona el intervalo de tiempo de coordinación entre los dos relés para el punto de coordinación seleccionado.

CASO IV. Cuando más de un relé adyacente debajo del relé a calibrar han sido calibrados, independiente de si el relé adyacente arriba del relé a calibrar han sido calibrados.

1. El usuario escoge el relé debajo del relé a calibrar sobre la cual la coordinación se basa.
2. Los pasos (1) y (2) del CASO III son seguidos.

Por el término de "corriente de falla para una falla cerca del relé" significa la corriente de falla calculada para una falla trifásica en la barra donde el relé esta localizado. Aunque cada relé esta localizado debajo de la barra en el cual la corriente falla es calculado, este valor de corriente es la misma que fluye para una falla exactamente debajo del relé. Este valor de corriente de falla incluye la contribución de los motores, algunos de los cuales puede realmente estar fluyendo a través del relé, y algunos de los cuales pueden estar fluyendo hacia la falla a través de un diferente camino. Esta corriente de falla puede ser multiplicado por un factor de corriente asimétrico para considerar el desplazamiento debido a la corriente continua, si el usuario lo desea. Aunque la corriente de falla incluirá la

contribución de los motores y puede incluir un factor asimétrico, ninguno de ellos son ordinariamente usados en la calibración de relés de tiempo retardado, la mayor corriente de falla obtenida añade un margen extra de seguridad, pues la corriente de falla máxima es usualmente la más crítica para coordinación. Si el usuario desea desprestigiar la contribución de los motores, podría omitir su impedancia cuando los parámetros del sistema son inicialmente ingresados en el programa de falla. Después que la corriente de operación ha sido elegido para un relé particular, este valor será dividido por la relación de transformación del transformador de corriente para obtener el valor real de corriente visto por el relé. Se ha tomado provisiones para los transformadores de potencia localizados dentro del sistema, pues estos afectan la magnitud (en amperios) de corriente que fluye a través del sistema cuando ocurre una falla trifásica. Cuando es necesario coordinar dos relés, separados por un transformador de potencia, usando el valor de la corriente de falla cerca de uno de los relés, el valor de esta corriente de falla en amperios es multiplicada por la relación de las corrientes de base en las dos ubicaciones de los relés para obtener la corriente de operación real vista por

el otro relé. Este procedimiento toma en cuenta el cambio de la corriente de falla que ocurrirá debido al transformador entre las dos relés, pues la relación de las corrientes de base es la misma que la relación de vueltas del transformador. El intervalo de tiempo de coordinación (ITC) es la cantidad de tiempo que permite al relé primario operar antes que el relé de respaldo opere. Un ITC de 0.3 a 0.4 sec. puede ser usado para tomar en cuenta: la etapa de interrupción, tiempo de inercia y proveer un margen de seguridad por variaciones en las características del relé.

La Figura 1 muestra una porción de un alimentador radial y el método usado para numerar los relés en el programa. Los motores y cables alimentadores conectados a las barras 3 y 4 se asume que están protegidos por interruptores en caja moldeada. El relé 2-3, localizado en la barra 2, protege el cable entre las barras 2 y 3, así como también a la barra 3, también provee protección de respaldo a los interruptores de la barra 3. El relé 2-4 tiene una función similar a la del relé 2-3, pero protege además a la barra de carga 4. El relé 1-2 está localizado en la barra 1 y provee protección primaria al alimentador entre las

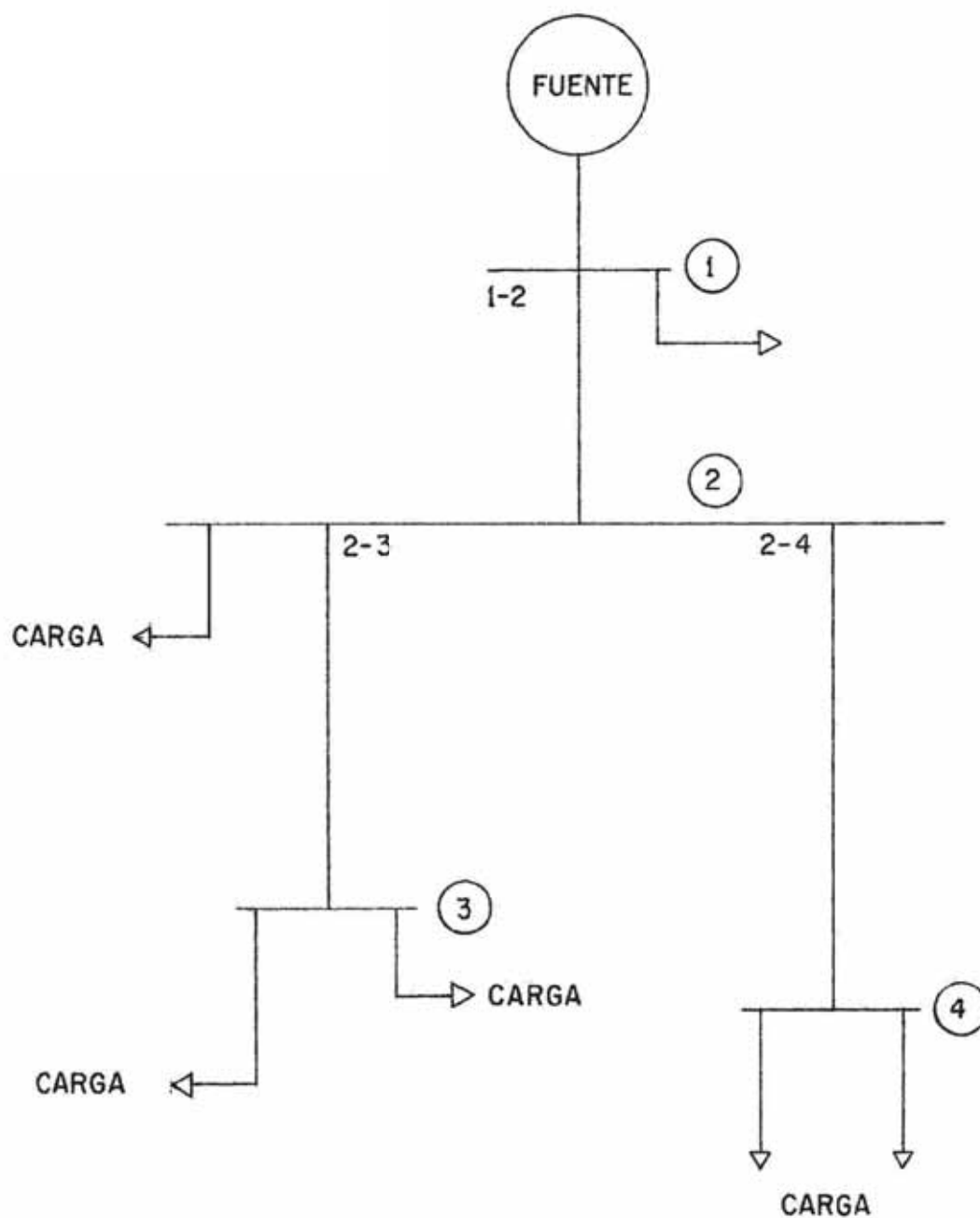


Figura 1. Porción Típica de un Sistema de Potencia Radial.



barras 1 y 2 y también a la barra 2. Este relé provee protección de respaldo a los relés 2-3 y 2-4. La secuencia típica para la calibración de los relés en esta porción del sistema sería calibrar cualquiera de los relés que protegen las barras de carga (relé 2-3 ó relé 2-4), calibrar luego el otro relé que protege la barra de carga, y finalmente calibrar el relé 1-2. Otra alternativa sería calibrar cualquiera de los relés 2-3 ó 2-4 luego el relé 1-2. El otro relé que protege la barra de carga sería luego coordinado con el relé 1-2.

Si se usa la primera opción y el relé 2-3 es calibrado primero, el valor de la corriente de falla es debido a una falla trifásica en la barra 3. El tiempo de disparo del relé 2-3 es ingresado por el usuario. Este tiempo debe ser suficiente para proveer coordinación entre el relé 2-3 y los interruptores localizados en la barra 3, los cuales no son incluidos en el programa. Luego el relé 2-4 es calibrado de la misma manera; el usuario ingresará el tiempo de disparo deseado para este relé debido a una falla trifásica en la barra 4. Luego el programa pide al usuario que ingrese el relé debajo del relé a calibrar (ya sea el relé 2-3 ó 2-4) sobre la cual la coordinación se basará.

Posteriormente, se ingresa el ITC entre el relé seleccionado y el relé 1-2 a calibrar, con el cual el programa calcula el tiempo de operación para el relé 1-2. El ITC se refiere al intervalo de tiempo de disparo entre los dos relés por una falla cerca a la barra 2 ó por una corriente igual al ajuste del elemento instantáneo del relé ubicado debajo del relé 1-2.

Un procedimiento similar se seguirá si el segundo método es elegido y el relé 2-3 es calibrado primero, excepto que no es necesario elegir el relé sobre la cual la coordinación se basará cuando el relé 1-2 es calibrado. El ITC ingresado automáticamente se refiere al ITC entre los relés 2-3 y 1-2. Luego el ITC entre los relés 1-2 y 2-4 es ingresado considerando una falla cerca a la barra 2. Si el relé 2-4 incluye el elemento instantáneo, el ajuste del instantáneo será utilizado para la coordinación.

3.3.1.2 Display de la Información de Calibración. La información de la calibración del relé mostrado en la pantalla para cualquier relé particular consiste: del tipo de relé, el ajuste del tap o toma de arranque, el ajuste del elemento instantáneo y el tiempo de operación en segundos a cuatro veces la corriente de arranque. El

ajuste del tap y el ajuste del elemento instantáneo, calculados previamente en el programa, es impreso directamente. El tiempo a cuatro veces la corriente de arranque es calculado de:

$$t = \left[ 10 ** \left( \sum_{j=0}^4 a_j (\log 4)^j \right) \right] / 60 \quad (22)$$

donde:

t = tiempo de operación en segundos.

a<sub>j</sub> = constantes para un tipo particular de relé.

El usuario puede posteriormente referirse a las curvas del fabricante para este tipo particular de relé y traducir esta información en la calibración del dial del tiempo el cual será realmente usado por el relé.

### 3.3.1.3 Display de la Información de Disparo del Relé.

La información de disparo del relé puede ser obtenida para una falla trifásica en cualquier barra protegida del sistema. Esta información consiste: del tiempo de operación del relé, en segundos, que provee protección primaria a la barra; así como también el tiempo de operación de los relés que proveen protección de respaldo. Si alguno de los relés que provee protección

primaria o de respaldo tiene elemento instantáneo que operará frente a una falla en la barra involucrada, se mostrará un mensaje para esta situación en lugar del tiempo de operación. Los tiempos de operación de los relés en la zona primaria y de respaldo son calculados de:

$$t = \frac{10^{**} \left( \sum_{j=0}^4 a_j (\log (i_F * i_B / r_{ct} / i_P)) \right)^2}{60} \quad (23)$$

donde:

$t$  = tiempo de operación en segundos,

$a_j$  = constantes para el tipo particular de relé,

$i_F$  = corriente de falla en por unidad en la barra fallada,

$i_B$  = corriente de base en amperios en la ubicación del relé,

$r_{ct}$  = relación del transformador de corriente asociado,

$i_P$  = corriente de arranque del relé considerado.

3.3.1.4 Gráfico de las Curvas del Relé. Las curvas del relé son mostrados en la pantalla usando la subrutina de gráficos en media resolución de la microcomputadora IBM-PC, el cual da una resolución de 320 (eje-x) por 200 (eje-y) puntos

para la pantalla completa del monitor. Este proceso es ejecutado en tres pasos: determinar el rango de corriente a usar y graficar los ejes, calcular los puntos de la curva a graficar y graficar estas curvas.

Los ejes logarítmicos con una escala de tiempos de 0.1 a 100 segundos y una escala de corrientes variable con un posible rango de 1.0 a 100,000 Amperios son usados para los gráficos de coordinación. Cada curva del relé es graficada para un rango de valores de corriente desde la máxima corriente de carga hasta la máxima corriente de falla (o ajuste del elemento instantáneo) para una falla cerca a la barra donde esta ubicado el relé. El rango del eje de corrientes se extiende desde la década más pequeña debajo de la corriente de carga a la década más próxima y mayor que la máxima corriente de falla para el grupo de relés que serán graficados.

Para cada curva del relé se calculan cincuenta puntos de tiempo-corriente, igualmente espaciados a lo largo de la escala logarítmica de corrientes, la siguiente fórmula:

$$t_s = \left[ \frac{4}{\sum_{j=0}^4 a_j (\log(i_s / r_{ct} / i_p))^j} \right] - \log(60) \quad (24)$$

donde:

- $t_i$  = logaritmo del tiempo de operación en segundos del  $i^{\text{ésimo}}$  valor de corriente,
- $a_j$  = constantes para un tipo particular de relé,
- $i_i$  = valor de la corriente  $i^{\text{ésimo}}$  en amperios,
- $r_{ct}$  = relación del transformador de corriente asociado,
- $i_p$  = ajuste del tap (corriente de arranque) del relé considerado.

Cada uno de estos puntos se grafica en una malla de 320\*200 puntos, usando ecuaciones apropiadas para escalar los valores de X e Y, y la curva es finalmente obtenida.

3.3.2 Uso y Operación del Programa. El procedimiento para el uso de la porción de análisis de falla del programa interactivo de coordinación fué descrito en el capítulo 1. Después que el usuario teclea "0" como el número de barra fallada, se ingresa a la porción de coordinación del relé. La rutina para la coordinación de relés esta escrito para que funcione en una manera de conversación. El usuario responde alimentando los datos requeridos por el programa y respondiendo las preguntas

generadas por el programa. A continuación se describe el procedimiento para el uso del programa, cada línea ingresada por el usuario se asume es seguido pulsando la tecla de retorno (return), si no se especifica otra cosa.

Primero, el programa solicita al usuario que ingrese la corriente de base (amperios) para cada barra del sistema. Luego el programa solicita el grupo de relés a calibrarse. Estos deben ser ingresados tecleando las ubicaciones de los relés escogidos con un espacio entre cada ubicación, tales como "3-5 3-4 2-3." Los espacios al inicio, al final y extra espacios entre las ubicaciones serán ignorados. El orden de ingreso de los relés es el orden en que serán calibrados más tarde en el programa.

Luego se solicita al usuario que ingrese la siguiente información para cada ubicación del relé seleccionado: la corriente máxima de carga (amperios); el tap seleccionado, si no es dato se ingresa un "0" y el programa solicita a continuación el factor de sobrecarga; la calibración del elemento instantáneo en amperios, si no es dato se ingresa un "0" y el programa solicita a continuación el factor para calibrar el instantáneo; relación del transformador de

corriente asociado; tipo de relé y el factor de asimetría. La Tabla 2 muestra los tipos de relés disponibles y su codificación respectiva de cada tipo para su identificación en el programa. La calibración del instantáneo es el valor de corriente (en amperios) al cual el elemento instantáneo del relé en esta ubicación operará. Si no es incluido el elemento instantáneo, se ingresa un "0" en lugar del valor de la corriente y otro "0" cuando el programa solicite el factor para calibrar el instantáneo.

La ejecución del programa luego procede a la sección donde las calibraciones son determinados para el grupo de relés seleccionados. Posteriormente, varias respuestas serán solicitados al usuario dependiendo si los relés adyacentes han sido previamente calibrados. Las situaciones que se pueden presentar son cuatro casos, previamente descritos en la primera sección de este capítulo.

Para el primer caso, calibración de un relé protegiendo a una barra de carga, el usuario ingresará el tiempo de disparo deseado en segundos para una falla trifásica en la barra que esta protegiendo. Luego se determina la calibración, y el programa continúa con el siguiente relé. Si se



Tabla 2. Codificación de los Relés Disponibles

<u>Tipo de Relé</u>	<u>Código</u>	<u>Fabricante</u>
CO-2	1	Westinghouse
CO-5	2	Westinghouse
CO-6	3	Westinghouse
CO-7	4	Westinghouse
CO-8	5	Westinghouse
CO-9	6	Westinghouse
CO-11	7	Westinghouse
IAC51	9	General Electric
IAC53	10	General Electric
IAC55	11	General Electric
IAC77	12	General Electric

aplica el segundo caso, el programa solicita al usuario el ITC (intervalo de tiempo de coordinación) en segundos entre el relé ubicado arriba del relé a coordinar y éste. Luego se determina la calibración si el ITC esta en el rango apropiado. Si el tiempo de disparo del relé ubicado arriba del relé a calibrar no es suficientemente grande para permitir el uso del ITC escogido, aparecerá un mensaje de error, "? tiempo negativo para el relé X-Y," donde X-Y es la designación del relé que esta siendo calibrado. Se presentan luego dos proposiciones al usuario: (1) solicitar un valor menor del ITC, ó (2) recalibrar otros relés para permitir un valor más grande de ITC, y el usuario teclea "1" ó "2" para indicar su selección. Si (1) es pulsado, la computadora solicita el ITC otra vez; si "2" es seleccionado, el usuario debe ingresar el grupo de relés a recalibrarse. Se puede seleccionar cualquier grupo de relés independiente si han sido calibrados anteriormente.

Si el caso 3 se aplica, el programa solicita el ITC deseado entre el relé que esta siendo calibrado y el relé adyacente ubicado debajo del primero que ya fué calibrado, y se ejecuta la calibración. Si más de un relé adyacente ubicado debajo del relé a calibrar han sido calibrados, la

siguiente pregunta aparecerá en la pantalla, "COORDINAR RELE X-Y CON RELE Y-\_", donde X-Y es el relé que está siendo calibrado y Y-\_ es el relé ubicado debajo de él sobre el cual la coordinación se basará. El usuario teclea el segundo número de la ubicación designada del relé. El programa luego solicita que se ingrese el ITC entre el relé escogido y el relé a calibrar.

Este proceso se continúa hasta que todos los relés del grupo seleccionado han sido calibrados, en este punto la computadora mostrará en la pantalla la siguiente lista de selección de comandos: "ZBUS," "INFO," "CALIBRAR," "GRAFICO," "FALLA" Y "END". El usuario luego pulsa uno de los tipos de estos comandos para determinar la siguiente acción del programa. Después que la apropiada acción ha sido tomada, la selección de comandos será mostrada en la pantalla otra vez al usuario.

Si "ZBUS" es pulsado, la ejecución retornará a la porción display de la sección de análisis de falla del programa. Esto permite al usuario examinar los datos de falla para el sistema otra vez, si es necesario.

Si "INFO" es pulsado, la computadora mostrará la información de los relés que han sido calibrados

hasta este punto. El mensaje será, "TODOS LOS RELES(A) HAN SIDO CALIBRADOS," o "ESTOS RELES(S) HAN SIDO CALIBRADOS," seguido por una lista de los relés calibrados. Las letras (A) y (S) representan "TODOS" y "CALIBRADOS" y puede ser usado mas tarde en el programa para designar cualquier grupo de relés cuando el usuario es solicitado que ingrese un grupo de relés para ser graficados o un grupo de relés cuyas calibraciones se mostrarán en pantalla. "A" o "S" no pueden ser usados para especificar un grupo de relés que serán calibrados o recalibrados, pues el usuario debe especificar el orden en que los relés serán calibrados en esta situación.

El comando "CALIBRAR" puede ser usado para calibrar relés que no han sido calibrados previamente y para modificar la calibración de los relés que ya han sido calibrados. Si el usuario teclea "CALIBRAR," el programa solicita que ingrese el grupo de relés para calibrar. Estos relés deberían ser ingresados como se mencionó anteriormente, con un espacio entre cada número de ubicación. Para un grupo de relés que no han sido calibrados, la ejecución procede como se describió previamente para el inicio del procedimiento de calibración de relés, y el usuario es solicitado que ingrese información para cada ubicación del

relé. No se necesita ingresar una nueva información para la ubicación de relés cuyas calibraciones o calibración serán cambiadas. En su lugar, la computadora imprime. "CAMBIOS EN UBIC X-Y (s/n) ?" antes que esta información sea ingresada, y el usuario pueda responder pulsando sólo una "S" ó "N" (seguido por la tecla return). Si la "S" es pulsado, se solicita al usuario que ingrese la corriente pico máxima, tap seleccionado o el factor de sobrecarga, la calibración del instantáneo en amperios o el factor para calibrar el elemento instantáneo, relación del transformador de corriente, tipo de relé y el factor de asimetría. Si se pulsa la "N", se usa la información previamente ingresada para esta ubicación. Este proceso se continúa hasta que los parámetros necesarios para cada ubicación han sido especificados (sean alterados o no). En este punto, los ITC y los tiempos de disparo son seleccionados para los relés que están siendo calibrados o recalibrados.

Si "CALIBRACION" es pulsado, la computadora responde con "SELECCIONE RELES" y el usuario ingresará una lista de las ubicaciones de los relés o una de las letras designadas ("A" o "S") para especificar los relés cuyas información de calibración se desea. La computadora mostrará en

pantalla el tipo de relé, calibración del elemento instantáneo, ajuste del tap y el tiempo de disparo en segundos a cuatro veces la corriente de arranque para cada ubicación del relé o relés. Si el ó los relés en alguna de las ubicaciones no ha sido calibrados, la computadora responderá con un mensaje para este efecto. Para evitar que la información de calibración de la parte superior de pantalla se pierda antes que ésta sea leída, la impresión puede ser detenida después que la información para tres relés ha sido mostrado. La impresión se puede continuar pulsando cualquier carácter de una sola letra.

Si se selecciona el comando "GRAFICA", la computadora imprime "SELECCIONE RELES" y el usuario ingresa un grupo de relés cuyas curvas serán graficadas. Si alguno de los relés seleccionados no ha sido calibrado, el programa solicita al usuario que ingrese un nuevo grupo de relés, en el cual todos han sido calibrados. Luego el usuario es requerido que ingrese el valor de la corriente base para el gráfico. Los valores por-unidad de la corriente de cada curva tiempo-corriente será multiplicada por este número antes que sea graficada. Si el grupo de curvas de los relés seleccionados han sido graficadas previamente a la misma corriente base, pero otras curvas no han

sido graficadas y ningún relé ha sido calibrado o recalibrado desde aquel tiempo, las curvas solicitadas serán inmediatamente mostradas en pantalla, después que el "beep" suene tres veces. El usuario puede luego pulsar la tecla return cuando quiera detener la gráfica. Si un nuevo grupo de relés es seleccionado; pero ninguna curva ha sido graficada previamente, ni los relés han sido calibrados o recalibrados desde el último gráfico y tampoco una nueva corriente de base ha sido seleccionado, la computadora preguntará "IMPRIMIR VALORES (S/N) ?", y el usuario puede teclear "S" para indicar una respuesta positiva; pulsar "N" significa una respuesta negativa. Si se teclaea una respuesta positiva, la computadora imprimirá la corriente en amperios y el tiempo en segundos para los cincuentaun puntos calculados de la primera curva del relé a graficar. La impresión será detenida durante este proceso cuando la pantalla se llena, pero puede ser continuada pulsando cualquier carácter. El "beep" luego sonará dos veces, y la tecla return será pulsada para ingresar al modo gráfico, después del cual los ejes y la curva del primer relé será graficada. El "beep" sonará dos veces, y pulsando la tecla return la computadora retorna al modo texto. Los valores de tiempo y corriente serán impresos para la segunda curva, el cual será

añadido al gráfico existente. Este proceso continuará hasta que todas las curvas requeridas han sido graficadas. Si el usuario no quiere tener los valores impresos, todas las curvas requeridas serán graficadas en sucesión, sin cambios entre el modo texto y gráfico. Cuando la gráfica de coordinación se completa, el "beep" sonará tres veces y pulsando la tecla return el programa retornará al modo texto y mostrará en pantalla el menú de comandos.

La curva característica del relé se mostrará en un eje de coordenadas logarítmicas con el eje X en el rango posible de 1 a 100,000 A. El eje Y es la escala de tiempos y tiene un rango fijo de 0.1 a 100 s. El número de la barra que el relé protege e identifica al relé aparecerá en la parte superior de su curva tiempo-corriente.

El tiempo de disparo del relé en la zona primaria y en la zona de respaldo para una falla trifásica en cualquier barra (excepto la barra 1) se obtiene ingresando "FALLA" como una opción del menú de comandos. El programa preguntará "ESCOGER BARRA FALLADA"; luego se pulsa el número de barra en el que se encuentra la falla, con un espacio entre cada número de barra (espacios al inicio, final y extra espacios son ignorados por el programa).



Seguidamente, los tiempos de disparo en segundos para todos los relés que se encuentran encima de barra con falla serán mostrados en la pantalla. Si uno o más de estos relés no han sido calibrados, se imprime mensaje para este efecto. Los relés que están separados desde la barra con falla por más de dos relés pueden no operar debido a su particular combinación de relación del transformador de corriente y ajuste del tap, o debido a los transformadores de potencia interpuestos; para estos relés se imprime en pantalla un mensaje apropiado. Si el elemento instantáneo en cualquier ubicación dispara para la falla de la barra seleccionada, esta información será mostrada en pantalla en lugar del tiempo de disparo del elemento de tiempo retardado en esta ubicación.

El comando "END" detiene la ejecución del programa, después del cual un nuevo sistema se puede estudiar; si se desea.

## Capítulo IV

### ESTRUCTURA DEL PROGRAMA INTERACTIVO

El programa interactivo consiste de dos partes principales: la porción de análisis de fallas y la porción de coordinación de relés. La ejecución empieza automáticamente con la porción de análisis de fallas, pero puede ser transferido a la porción de coordinación de relés según lo requiera el usuario una vez que la matriz de impedancias del sistema, ZBUS, ha sido construida. Similarmente, se puede reingresar a la rutina de análisis de falla una vez que el procedimiento de coordinación de relés se ha iniciado; esto provee al usuario la opción de examinar los datos de falla del sistema durante el procedimiento de coordinación, si es necesario. A continuación se describe la estructura de la rutina de análisis de falla, y luego se describe la estructura de la rutina de coordinación de relés.

4.1 Rutina de Análisis de Fallas. La estructura de la rutina de análisis de falla es simple y directa. El programa consiste de tres secciones principales: (1) una sección de ingreso de datos, (2) la sección en la

cual la matriz ZBUS es construida y (3) una sección de salida de datos, en la cual los datos de falla son calculados y mostrados en pantalla. El diagrama de flujo se muestra en el plano N° 001.

La ejecución del programa se inicia preguntando al usuario que ingrese el número de elementos y el número de barras del sistema a estudiar. A continuación, el programa solicita que se ingrese la potencia de base nueva en kVA. Estos datos son tipeados por el usuario, luego se ingresa al bucle de ingreso de datos del sistema, y el usuario ingresará el par de barras entre las que se encuentra cada línea o elemento. Después de ingresar el par de barras, el programa solicita al usuario que ingrese los valores de resistencia y reactancia comprendidos entre el par de barras ingresados anteriormente. Seguidamente el programa pregunta si los valores ingresados están en por unidad. Si la respuesta es afirmativa se debe ingresar a continuación, la potencia de base dada y los voltajes de base dada y base nueva respectivamente. Si la respuesta es negativa el programa asume que los valores ingresados están en ohmios, y se ingresará a continuación el voltaje de base nueva. Este proceso se continúa hasta que todos los elementos han sido ingresados. En este punto del programa, los valores en por unidad de las líneas o elementos del sistema y los pares de barras

correspondientes han sido almacenados en arreglos o matrices, a continuación el programa ingresa a la rutina de reordenamiento de datos; pero la matriz ZBUS no ha sido construída todavía.

La matriz ZBUS es construída por algoritmo usando el procedimiento descrito en el Capítulo I. El programa prueba cada elemento para ver si corresponde a un branch o un link determinando si las barras al cual esta conectado han sido ya incluídas en el sistema que se esta ensamblando por el algoritmo. Si el elemento es un branch, éste es añadido a la ZBUS usando las ecuaciones apropiadas, la lista de barras es modificado, y el siguiente elemento es procesado. Si el elemento ha añadirse es un link, se adiciona a la ZBUS una nueva fila y columna temporalmente. Esto se logra dimensionando inicialmente la ZBUS como una matriz de  $21 \times 21$  (un grado más que el necesario para un sistema de 20 barras), y almacenando la información adicional en la  $21^{\text{ava}}$  fila y en la  $21^{\text{ava}}$  columna. Los elementos de la matriz son luego modificados, y los valores de la extra fila y columna son posteriormente ignorados. Cada elemento sucesivo es luego añadido a la ZBUS hasta que todos los elementos han sido procesados y la matriz es completada.

En este punto, el programa solicita al usuario que ingrese la corriente base al cual los cálculos de falla serán referidos y mostrados en pantalla. El programa luego solicita se ingrese el número de la barra con la falla. Si el número ingresado no corresponde a un número del sistema de barras, el programa solicita otra vez que el usuario ingrese el número correcto de la barra con la falla. Si un "0" es pulsado y no se ha ingresado todavía a la porción de coordinación, la ejecución del programa se traslada al inicio de la rutina de coordinación de relés, donde se inicializan las variables usadas para la representación de las curvas del relé. Si estas variables han sido ya inicializadas, esto es, el usuario a pulsado un "0" para la barra con la falla antes e ingresado a la rutina de coordinación previamente, la ejecución se transfiere a la última porción de la rutina de coordinación. Si se ingresa un número válido diferente de zero para la barra con falla, el programa, a continuación, calcula y muestra en pantalla la corriente de falla trifásica en amperios en la barra seleccionada, los voltajes de las barras en por unidad y el flujo de corriente en las líneas en amperios, después del cual se puede ingresar otro número de barra con falla.

4.2 Rutina de Coordinación de Relés. En el plano Nº 002 se muestra el diagrama de flujo para la porción de

coordinación de relés. La sección inicial del programa inicializa las constantes del relé y ejecuta los cálculos preliminares necesarios. La segunda sección corresponde a la calibración de un grupo de relés y la tercera consiste de muchas rutinas para mostrar en pantalla la información de calibración, operación de disparo de los relés y las curvas de tiempo-corriente.

Cuando se ingresa a la porción de coordinación de relés por primera vez, la ejecución se inicia en el conector B del plano Nº 002. Donde el usuario define dos funciones que serán usadas más tarde en el programa: la primera,  $LG10(x)$ , calcula el logaritmo en base 10 de  $x$  dividiendo el logaritmo natural (función suministrada por el software del IBM) de  $x$  por el logaritmo natural de 10; la segunda,  $RELT(R)$ , como se muestra a continuación:

$$RELT(R) = A1(R)*LM + A2(R)*LM^2 + A3(R)*LM^3 + A4(R)*LM^4 \quad (25)$$

Donde:

$RELT(R)$  = el logaritmo del tiempo de operación del relé de tipo  $R$ , menos  $A0(R)$ , en ciclos,

$A1(R)-A4(R)$  = constantes que representan la curva tiempo-corriente del relé de tipo  $R$ ,

LM = el logaritmo del múltiplo de la corriente de arranque visto por el relé.

Esta función se usa para calcular el tiempo de operación de un relé particular. Las constantes  $A1(R)$  hasta  $A4(R)$  son establecidos como valores propios de cada tipo de relé modelado por el programa, y los elementos del vector  $TL(I)$  son inicializados con los 16 valores normalizados del ajuste del tap (capítulo III).

El siguiente proceso, señalado como "Determinar Adyacencia de las Barras Hacia Arriba", representa la porción del programa en la cual la lista de pares de barras a los cuales los elementos están conectados es examinado para determinar la adyacencia hacia arriba de cada barra (excepto las barras 0 y 1). A cada barra,  $J$ , se le asigna un número correspondiente en el vector entero,  $AZ(J)$ , igual al número de la barra que está inmediatamente arriba de la barra  $J$ . Cada relé es identificado dentro del programa por la barra que está protegiendo ( $J$ ), mientras que la comunicación con el usuario referente a cada relé es por un esquema de identificación de dos números que consisten del número de la barra donde el relé está localizado y el número de la barra que protege el relé ( $AZ(J)-J$ ). Este método es usual en sistemas de

potencia radiales porque existe una correspondencia biunívoca entre la barra protegida y el relé que lo protege, mientras que la barra en la cual un relé particular está ubicado puede aparecer como el primer número en muchos otros donde el relé está ubicado. Por ejemplo, en la Figura 1, el número de la barra "2" aparece primero en las designaciones de las ubicaciones "2-3" y "2-4", pero aparece última en sólo un número de ubicación, "1-2".

El programa solicita luego al usuario que ingrese la corriente de base de cada barra del sistema. Luego el programa calcula la corriente de falla trifásica (en amperios) para una falla en cada una de las barras, y los resultados son almacenados en el arreglo  $FI(I)$  para su posterior uso en el programa.

En este punto el programa pregunta al usuario que escoga los relés a calibrarse, e ingresará los números de las ubicaciones de los relés deseados, separado por uno o más espacios, como una variable alfanumérica. Esta variable es luego procesada por una subrutina que retorna el segundo número, de cada ubicación designada, en el vector  $CZ(I)$  y el número de relés escogidos en la variable  $Q$ . El programa, luego, solicita al usuario que ingrese la siguiente información por cada ubicación del relé seleccionado: la corriente de carga pico, tipo de relé, factor de



asimetría de la corriente de falla y la calibración del elemento instantáneo. Si alguno de los relés ha sido ya calibrado, el usuario tiene la opción de modificar la información si lo desea. Si el usuario decide no modificar la información, la información previamente ingresada será usada y no necesita ingresarla otra vez. Los valores reales de las corrientes de falla y carga visto por cada relé son luego calculados y almacenados en MX(K) y MN(K) respectivamente. Los ajustes del tap son escogidos para cada ubicación seleccionada al mismo tiempo.

Los relés seleccionados son luego calibrados interactivamente usando el método de coordinación del template de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo III. La estructura del programa para el proceso, "CALIBRAR RELES SELECCIONADOS", se describe en detalle en una subsecuente sección.

Luego del procedimiento de calibración de relés, se puede ingresar nuevamente a la porción de coordinación de relés desde el programa de fallas, o ejecutar una de las rutinas de display en la porción de coordinación; para lo cual el programa muestra en la pantalla la lista de opción de comandos: ZBUS, INFO, CALIBRAR, CALIBRACION, FALLA, GRAFICAR Y END. La ejecución procede con el comando seleccionado por el usuario. Si "ZBUS" es teclado la ejecución del

programa salta a la sección de display de la rutina de análisis de fallas. Tecleando "CALIBRAR", permite calibrar más relés o alterar la presente calibración retornando el programa al punto donde se solicita al usuario: "escoger relés a calibrar". Tecleando "END" se termina la ejecución del programa, mientras "INFO" muestra en pantalla una lista de las ubicaciones de relés que han sido calibrados. Escogiendo "CALIBRACION" se mostrará en pantalla las informaciones de calibración para ubicación del relé solicitado, y pulsando "FALLA" se muestra en pantalla los tiempos de disparo de los relés primarios y de respaldo para una falla trifásica de la barra seleccionada. La base teórica y uso de estas subrutinas han sido descritos en el capítulo III. Las curvas de tiempo-corriente de los relés pueden ser graficados tecleando "GRAFICAR" y seleccionando los relés cuyas curvas se desea graficar. La estructura de la rutina de gráficos se describe posteriormente.

Siguiendo la ejecución de cualquiera de las rutinas descritas previamente, la lista de opción de comandos será nuevamente mostrado en pantalla. El usuario puede ejecutar varias partes del programa como lo requiera hasta obtener un apropiado diseño de protección.

4.2.1 Estructura del Algoritmo de Calibración. En el plano N° 002 se detalla la estructura del algoritmo representado por el rectángulo "CALIBRAR RELES SELECCIONADOS" en el plano N° 001. Como se explicó en el capítulo III, una de las cuatro condiciones se presentará para cada relé a calibrar, dependiendo si el relé adyacente arriba de él y el relé adyacente debajo de él ha sido ya calibrado. El propósito de este algoritmo es determinar cual de los casos se aplicará a cada relé, y calcular las calibraciones de estos relés basados en el ingreso de los datos de los intervalos de tiempos (ITC) y tiempos de disparo, por el usuario.

El algoritmo consiste de un bucle FOR....NEXT al que se ingresa luego de computar las corriente del relé y la calibración del tap del relé (plano N° 002). Un sólo relé es calibrado durante cada paso a través del bucle hasta que el bucle es satisfecho y todos los relés solicitados han sido calibrados.

Cuando un relé es calibrado, el programa primero determina si hay algún relé adyacente debajo de él que ha sido ya calibrado. Si esto ocurre, y si el número de relés adyacentes debajo de él ya calibrados es mayor de uno, el usuario es solicitado que ingrese el número de relé debajo de él sobre el cual la coordinación se basará.

Después que el programa chequea la validez del relé seleccionado, el programa solicita al usuario que ingrese el ITC entre el relé seleccionado y el relé a calibrar. Si hay sólo un relé calibrado debajo de él, no se necesita seleccionar alguno y el programa pide al usuario que ingrese el ITC inmediatamente. El relé a calibrar es luego coordinado con el relé apropiado debajo de él basado en el presente tiempo de disparo del relé debajo de él y el ITC seleccionado por el usuario.

Si ningún relé adyacente debajo de él ha sido calibrado, el programa chequea si el relé adyacente arriba de él ha sido calibrado. Si no, el usuario es solicitado que seleccione el tiempo de disparo para el relé a calibrar, y su calibración es luego determinado. Si el relé adyacente arriba de él ha sido calibrado, el programa solicita al usuario que ingrese el ITC entre este relé y el relé a calibrar. Si es posible lograr la calibración del relé usando este ITC, la calibración del relé es determinada y el programa continúa con el siguiente relé. En el caso que el ITC seleccionado es demasiado grande, esto es, la curva tiempo-corriente del relé a calibrar estaría ubicado muy por debajo de la curva del relé adyacente arriba de él que el físicamente posible, el mensaje de "?TIEMPO NEG SOLICITADO PARA RELE AZ(I)-I" se

imprime en pantalla. El programa dá al usuario la opción de disminuir el valor del ITC o recalibrar otros relés. Si la primera opción se escoge, se ingresa un nuevo valor de ITC que será luego chequeado como anteriormente. Si la segunda opción se escoge, la ejecución del programa salta fuera del bucle FOR....NEXT, donde se solicita al usuario: "escoger relés a calibrar (plano Nº 001). Todos los relés no calibrados en el grupo que estuvo siendo calibrado serán ignorados hasta que se seleccione nuevamente. Esto permite al usuario modificar las calibraciones de otros relés antes de retornar al relé que no pudo ser calibrado usando el ITC solicitado.

4.2.2 Estructura del Algoritmo de Gráficos. Un diagrama de flujo detallado de la rutina de gráficos, representado por "GRAFICAR CURVAS DE RELES" en el plano Nº 001, se muestra en el plano Nº 002. Esta porción del programa provee la gráfica de las varias curvas de los relés en la pantalla y muestra los valores numéricos de estos puntos de la curva si es requerido por el usuario.

Entrando a la rutina de gráficos, el programa primero solicita al usuario que ingrese el grupo de relés cuyas curvas serán graficadas. Si uno ó más de los relés escogidos no han sido calibrados, un

mensaje para este efecto se imprimirá en pantalla y el programa solicitará hacer una nueva selección. Después que un grupo válido de relés es seleccionado, el usuario es requerido que ingrese la corriente de base al cual las curvas serán referidas. Las siguientes tres decisiones que se muestran en el plano Nº 002 determinan si las curvas previamente graficadas puede ser mostrada en pantalla, si uno existe, ó si un nuevo gráfico debe ser generado. Si la última gráfica hecha consistió de las curvas del mismo grupo de relés escogidos graficadas a la misma corriente de base, y si ningún relé ha sido calibrado desde que aquella gráfica fué hecha, esta gráfica será inmediatamente mostrada en pantalla. El "beep" del computador sonará tres veces, y el programa se detiene hasta que el usuario pulse la tecla return para salir de la rutina de gráficos y retornar a la lista de opciones de comandos. Si las condiciones de arriba no se cumplen; esto es, la última gráfica consistió de un grupo diferente de relés, los mismos relés graficados en una corriente de base diferente, otros relés han sido calibrados desde que la última gráfica fue hecha ó ningún gráfico fué hecho todavía, luego un nuevo gráfico será generado.

El primer paso es preguntar al usuario si desea tener impresos los valores de los puntos de la

curva del relé antes que cada curva sea graficada. Si la respuesta es afirmativa, el usuario responde pulsando una "Y". Cualquier otra letra significa una respuesta negativa. Después que se ha ingresado al bucle FOR....NEXT, la computadora calcula los puntos de la curva  $I^{n+1ma}$  del grupo de curvas de relés que serán graficadas. Si el usuario solicita la impresión de estos valores, ellos son mostrados en pantalla. Al completar este display el "beep" suena dos veces, y el programa se detiene hasta que se pulse la tecla return. Si los valores de los puntos no son impresos, o después que la tecla return ha sido pulsada después de la impresión, el programa chequea si la curva del relé a graficarse es la primera del grupo (primer paso a través del bucle FOR....NEXT). Si esto se cumple, los ejes son graficados y el eje Y es dimensionado. Luego se determina el rango necesario del eje X chequeando la magnitud de la máxima corriente de falla y corrientes de carga de todos relés a graficarse, y el eje X es finalmente dimensionado. Al completar la gráfica de los ejes, o si los ejes han sido graficados previamente, la curva de tiempo-corriente del relé  $I^{n+1mo}$  es graficada. Si los valores de estas curvas fueron impresos y hay más curvas a graficarse, el programa hace sonar dos veces el "beep" y se detiene para permitir que el usuario examine los gráficos antes de retornar al

modo texto e imprimir más valores. Si los valores no fueron impresos o si los valores fueron impresos y la curva graficada más reciente fué la última ( $Q^{*+m}$ ) en el grupo, el programa no se detiene esta vez y el índice del bucle FOR....NEXT es chequeado. El procedimiento arriba descrito se repite, cuantas veces sea necesario, hasta que todas las curvas solicitadas han sido graficadas. El término de la gráfica de las curvas se señaliza por tres "beeps", después del cual pulsando la tecla return se retorna al modo texto y se muestra en pantalla la opción de comandos (plano N° 001).

4.3 Aplicación del Programa. En el plano N° 003 se muestra el diagrama unifilar de un típico sistema de potencia radial.

La potencia base seleccionada es 10000 kVA y los voltajes base son los voltajes nominales de los transformadores. En el plano N° 004 se muestra el diagrama de impedancias del diagrama del plano N° 003, donde las impedancias se indican en su propia base. También se muestra la numeración correcta de las barras de acuerdo al algoritmo, descrito en el capítulo I, para la construcción de la matriz ZBUS. A continuación se identifican los relés por dos números: el primero corresponde a la barra donde esta



ubicado el relé y el segundo corresponde a la barra que protege el relé.

Los motores se representan por su reactancia subtransitoria y conectados a la barra de referencia (barra 0). Los motores conectados a las barras de carga (barras 4, 7, 9, 10, 11 y 12) se asume que tienen protección instantánea contra fallas con un máximo tiempo de disparo de 0.03 seg.

4.3.1 Cálculos Preliminares. Las siguientes ecuaciones se aplican, para calcular las impedancias del Sistema de Potencia mostrado en el plano Nº 003.

$$\text{Potencia Base: } kVA_b = 10000 \text{ kVA}$$

$$\text{Voltaje Base : } kV_{b66.9} = 66.9 / 1.73 = 38.62 \text{ kV}$$

$$kV_{b2.3} = 2.3 / 1.73 = 1.328 \text{ kV}$$

$$kV_{b0.44} = 0.44 / 1.73 = 0.254 \text{ kV}$$

$$\text{Corriente Base : } I_{b66.9} = 86.3 \text{ A}$$

$$I_{b2.3} = 2510 \text{ A}$$

$$I_{b0.44} = 13123 \text{ A}$$

Valores Base de la Fuente: Para el sistema eléctrico del ejemplo se tiene un nivel de corto circuito de 1000 MVA y la impedancia de la fuente igual a 1.0 por unidad al voltaje base de 66.9 kV.

Reactancias de los Equipos de Potencia.

1. S.E. Principal:  $kVA_{bdada} = 7500 \text{ kVA}$

$$kV_{bdada} = 38.62 \text{ kV}$$

$$X_{pu} = 0.08$$

2. Centro de Carga de 400kVA:

$$kVA_{bdada} = 400 \text{ kVA}$$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X_{pu} = 0.045$$

3. Centro de Carga de 750 kVA:

$$kVA_{bdada} = 750 \text{ kVA}$$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X_{pu} = 0.045$$

4. Centro de Carga de 225 kVA:

$$kVA_{bdada} = 225 \text{ kVA}$$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X_{pu} = 0.045$$

Reactancias Subtransitorias de los Motores. Estos valores han sido obtenidos de la tabla 3, asumiendo un factor de potencia de 0.8.

1. Faja de 300 HP:  $kVA_{bdada} = 300 \text{ kVA}$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X''_{pu} = 0.17$$

Tabla 3. Algunas Reactancias Típicas para Motores de Inducción y Síncronos.

Tipo de Motor	$X_d''$	$X_d'$
Motores Síncronos:	0.15	0.23
6 polos	0.20	0.30
8 a 14 polos	0.28	0.40
16 polos o más	0.24	0.37
Motores de Inducción Individuales	0.17	----
Grupos de Motores de Inducción, cada uno menor de 50 hp.	0.25	----

Los valores arriba mencionados están en por unidad referidos a los kVA base del motor.

Las potencias bases aproximadas pueden ser determinados de la potencia nominal del motor como sigue:

fp 0.8 del motor, kVA base = hp nominal;

fp 1.0 del motor, kVA base = 0.8 (hp nominal).

2. Faja de 150 HP:  $kVA_{bdada} = 150 \text{ kVA}$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X''_{pu} = 0.17$$

3. Motor de 40 HP:  $kVA_{bdada} = 40 \text{ kVA}$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X''_{pu} = 0.17$$

4. Equipos Varios en Total 400 HP: El grupo de motores se trata como si fuera un solo motor cuya potencia es la suma de las potencias de cada motor.

$$kVA_{bdada} = 400 \text{ kVA}$$

$$kV_{bdada} = 0.254 \text{ kV}$$

$$X''_{pu} = 0.17$$

Impedancias de los Cables. Las impedancias de los cables se han obtenido de la tabla 4.

Un resumen de las impedancias del sistema eléctrico se muestran en las tablas 5,6 y 7.

Factor de Sobrecarga. En el presente ejemplo de aplicación, el programa selecciona el tap disponible igual o mayor a 1.25 veces la máxima corriente de carga visto por el relé.

La tabla 8 muestra un resumen de los parámetros de ingreso requerido por el programa.

**Tabla 4. Resistencia y Reactancia de Cables de Energía para Minas.**

Calibre del Conductor AWG o MCM	R [ $\Omega$ ] $\Omega/1000$ ft.		$X_L$ [60 Hz] $\Omega/1000$ ft.		
	75°C	90°C	2 kV	5 kV	8 kV
			SHD-GC	SHD-GC	SHD-GC
8	.838	.878			
7	.665	.696			
6	.528	.552	.038	.043	
5	.418	.438	.036	.042	
4	.332	.347	.035	.040	.043
3	.263	.275	.034	.039	.042
2	.209	.218	.033	.038	.040
1	.165	.173	.033	.036	.039
1/0	.128	.134	.032	.035	.037
2/0	.102	.107	.031	.034	.036
3/0	.081	.085	.030	.033	.035
4/0	.065	.068	.029	.032	.034
250	.055	.057	.030	.031	.033
300	.046	.048	.029	.031	.032
350	.039	.041	.029	.030	.032
400	.035	.036	.028	.030	.031
500	.028	.029	.028	.029	.030
600	.023	.024	.027	.028	.030
700	.020	.021	.027	.028	.029
800	.018	.019	.026	.028	.029
900	.016	.017	.026	.027	.028
1000	.014	.015	.026	.027	.028

Tabla 5. Reactancia de los Equipos de Potencia.

Equipos	kVA <sub>bdada</sub>	kV <sub>bdada</sub>	Reactancia en p.u.	kVA <sub>nueva</sub>
S.E. Principal	7500	38.62	0.08	38.62
C.C de 400 kVA	400	0.254	0.045	0.254
C.C. de 750 kVA	750	0.254	0.045	0.254
C.C. de 225 kVA	225	0.254	0.045	0.254

Tabla 6. Reactancia Subtransitoria de los Motores.

Motor	kVA <sub>bdada</sub>	kV <sub>bdada</sub>	Reactancia en p.u.	kVA <sub>nueva</sub>
Faja de 300 HP	300	0.254	0.17	0.254
Faja de 150 HP	150	0.254	0.17	0.254
Motor de 40 HP	40	0.254	0.17	0.254
Equipos Varios	400	0.254	0.17	0.254

Tabla 7. Impedancia de los Cables

Cable entre Barras	Resistencia en ohmios	Reactancia en ohmios
1-2	0.0252	0.0270
2-3	0.0640	0.0185
3-4	0.0166	0.0010
2-5	0.2600	0.1360
5-6	0.0640	0.0185
6-7	0.0166	0.0010
5-8	0.1280	0.0370
8-9	0.1660	0.0175
8-10	0.1660	0.0175
8-11	0.1660	0.0175
8-12	0.1660	0.0100

Tabla 8. Parámetros de Ingreso para el Ejemplo de Aplicación

Ubicación del Relé	Máxima Corriente de Carga	Factor de Sobre-carga	Relación del T.C.	Tipo de Relé	Factor de Asimetría	Intervalo de Coord. (ITC)
1-2	190 A	1.25	400:5	7	1.0	0.4 s.
2-3	65 A	1.25	100:5	7	1.0	0.4 s.
3-4	320 A	1.25	400:5	7	1.0	0.4 s.
2-5	170 A	1.25	300:5	7	1.0	0.4 s.
5-6	40 A	1.25	50:5	7	1.0	0.4 s.
6-7	180 A	1.25	250:5	7	1.0	0.1 s.
5-8	90 A	1.25	100:5	7	1.0	0.4 s.
8-9	50 A	1.25	100:5	7	1.0	0.1 s.
8-10	50 A	1.25	100:5	7	1.0	0.1 s.
8-11	50 A	1.25	100:5	7	1.0	0.1 s.
8-12	400 A	1.25	400:5	7	1.0	0.1 s.



#### 4.3.2 Resultados del Programa.

Salida de la Rutina de Reordenamiento de Datos. En la figura 2 se muestra los resultados de esta rutina: En la primera parte se imprime los datos en el mismo orden en que fueron ingresados, en la segunda parte se tienen los datos reordenados, de acuerdo al algoritmo explicado en el capítulo I, para ser leídos correctamente por la siguiente sección del programa.

Salida de la Rutina de Análisis de Fallas. Una salida típica de esta rutina se muestra en la figura 3, cuando ocurre una falla en la barra 12 del sistema. En la primera parte se tiene la corriente de falla en forma vectorial (en magnitud y ángulo); a continuación se tienen los voltajes en valores por unidad de cada en forma vectorial; finalmente se tiene información sobre el flujo de corriente, en forma vectorial, en las diferentes líneas del sistema.

Salida de la Rutina de Calibración de Relés. Una de las alternativas de calibración de los relés del sistema de potencia del plano Nº 003, se muestra en las figuras 4, 5, 6 y 7. La información dada por cada relé consta de: su ubicación; el tipo de relé seleccionado; el ajuste del elemento instantáneo en amperios, referido al primario del transformador de corriente; el ajuste del tap seleccionado por el

## DATOS DE INGRESO

BARRAS	R	X
0 - 1	0.000000	0.117000
1 - 2	0.047700	0.014300
2 - 5	0.492400	0.026200
5 - 6	0.121200	2.035000
6 - 7	0.167500	0.074700
7 - 0	0.000000	11.330000
2 - 3	0.121200	1.160000
3 - 4	0.167500	0.074700
4 - 0	0.000000	5.670000
5 - 8	0.242400	0.670000
8 - 9	8.556700	0.902100
9 - 0	0.000000	42.500000
8 - 10	8.556700	0.902100
10 - 0	0.000000	42.500000
8 - 11	8.556700	0.902100
11 - 0	0.000000	42.500000
8 - 12	1.675000	0.747000
12 - 0	0.000000	4.250000

## DATOS REORDENADOS

BARRAS	R	X
0 - 1	0.000000	0.117000
1 - 2	0.047700	0.014300
2 - 3	0.121200	1.160000
3 - 4	0.167500	0.074700
4 - 0	0.000000	5.670000
2 - 5	0.492400	0.026200
5 - 6	0.121200	2.035000
6 - 7	0.167500	0.074700
7 - 0	0.000000	11.330000
5 - 8	0.242400	0.670000
8 - 9	8.556700	0.902100
9 - 0	0.000000	42.500000
8 - 10	8.556700	0.902100
10 - 0	0.000000	42.500000
8 - 11	8.556700	0.902100
11 - 0	0.000000	42.500000
8 - 12	1.675000	0.747000
12 - 0	0.000000	4.250000

Figura 2. Entrada / Salida de la Rutina de Reordenamiento de Datos.

## CALCULOS DE FALLA EN LA BARRA 12

CORRIENTE DE FALLA (AMPERIOS)= 1307.634 /\_ -55.62115

## VOLTAJES EN LAS BARRAS DURANTE LA FALLA (P.U.)

1	.9825313	/_ -1.915249
2	.9668431	/_ -1.748769
3	.9726823	/_ -1.466217
4	.9737917	/_ -1.491041
5	.822868	/_ 2.866923
6	.8492762	/_ 2.287187
7	.8497119	/_ 2.121509
8	.6469585	/_ -9.459607
9	.699052	/_ -13.8605
10	.699052	/_ -13.8605
11	.699052	/_ -13.8605
12	2.980232E-08	/_ -90

## FLUJO DE CORRIENTES DE LINEA (AMPERIOS)

0	1	803.5326	/_ -28.75335
1	2	803.5309	/_ -28.75333
2	3	16.24294	/_ -226.3248
3	4	16.24276	/_ -226.3249
4	0	16.24289	/_ -226.3247
2	5	819.032	/_ -29.09635
5	6	34.14189	/_ 78.2233
6	7	34.14223	/_ 78.22523
7	0	34.14193	/_ 78.22333
5	8	829.8365	/_ -31.34738
8	9	21.3985	/_ -242.4717
9	0	21.39851	/_ -242.4717
8	10	21.3985	/_ -242.4717
10	0	21.3985	/_ -242.4717
8	11	21.39849	/_ -242.4717
11	0	21.39851	/_ -242.4717
8	12	885.4128	/_ -33.49515
12	0	590.5883	/_ -270.0004

Figura 3. Salida de la Rutina de la Rutina de Análisis de Fallas.

## CALIBRACION DE RELES

UBICACION 8 - 12 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 4500 A

AJUSTE DEL TAP : 7

.6129874 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

UBICACION 5 - 8 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 770 A

AJUSTE DEL TAP : 6

1.677868 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

UBICACION 2 - 5 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 3200 A

AJUSTE DEL TAP : 4

.6748383 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

UBICACION 1 - 2 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 4100 A

AJUSTE DEL TAP : 3

3.39593 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

Figura 4. Calibración de Relés la Ruta Crítica.

## CALIBRACION DE RELES

UBICACION 6 - 7 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 3139 A

AJUSTE DEL TAP : 5

1.258179 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

UBICACION 5 - 6 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 900 A

AJUSTE DEL TAP : 6

2.842974 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

Figura 5. Calibración de Relés de la Ruta Lateral I.

## CALIBRACION DE RELES

UBICACION 3 - 4 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 5480 A

AJUSTE DEL TAP : 6

1.19495 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

UBICACION 2 - 3 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 1880 A

AJUSTE DEL TAP : 5

3.091957 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

Figura 6. Calibración de Relés la Ruta Lateral II.

## CALIBRACION DE RELES

## UBICACION 8 - 9 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 2060 A

AJUSTE DEL TAP : 3.5

1.088803 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

## UBICACION 8 - 10 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 2060 A

AJUSTE DEL TAP : 3.5

1.088803 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

## UBICACION 8 - 11 :

TIPO DE RELE: 7

AJUSTE DEL EL. INST : 2060 A

AJUSTE DEL TAP : 3.5

1.088803 SEGUNDOS A 4 VECES LA TOMA DE ARRANQUE

Figura 7. Calibración de Relés de la Ruta Lateral III.

programa y el tiempo de operación del relé a cuatro veces el tap seleccionado.

Salida de rutina de Gráficos. En las figuras 8, 9 y 10 se muestran las curvas de coordinación de los relés pertenecientes a la ruta crítica y a las rutas laterales.

4.4 Limitaciones del Programa. El programa presenta muchas limitaciones que el usuario debe conocerlas para aplicar correctamente el programa. Algunas de estas limitaciones son producto del tamaño del sistema de computación usado; otros provienen del intento de limitar la complejidad del programa, pero pueden superarse éstas, si se desea, mediante modificaciones en el programa.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño del sistema de potencia que puede estudiarse con el programa está limitado a 20 barras (más la barra de referencia 0) y 50 elementos. Si el sistema a estudiar es más grande, se tienen que efectuar varios estudios de coordinación. Por ejemplo; mientras se estudie la ruta crítica, las rutas laterales se pueden representar por su impedancia equivalente. Luego, la porción inferior de la ruta crítica puede ser representado por una impedancia equivalente; mientras otra ruta se estudia. Este proceso se continúa hasta que todos los relés del sistema se han calibrado.

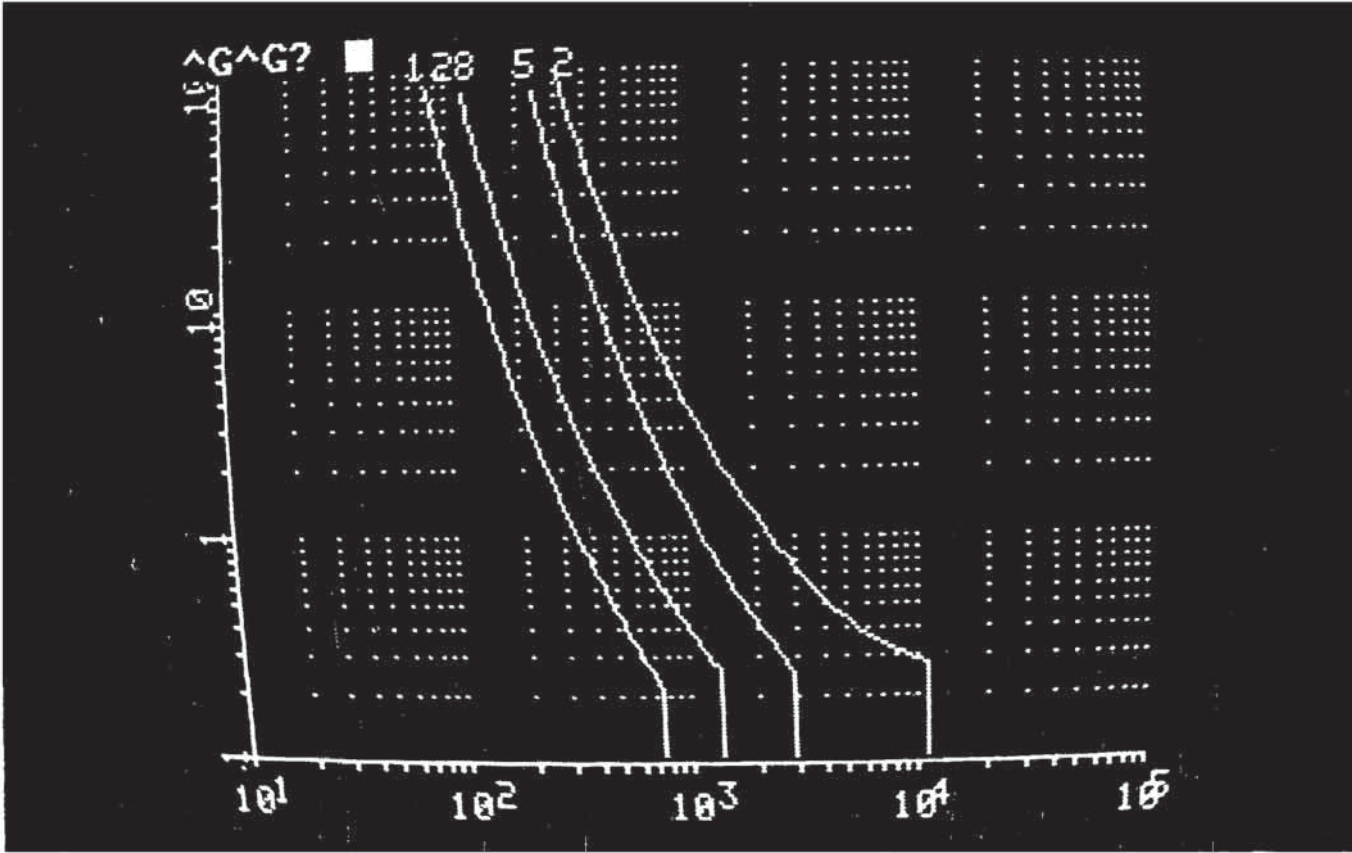


Figura 8. Curvas de Coordinación de los Relés de la Ruta Crítica.



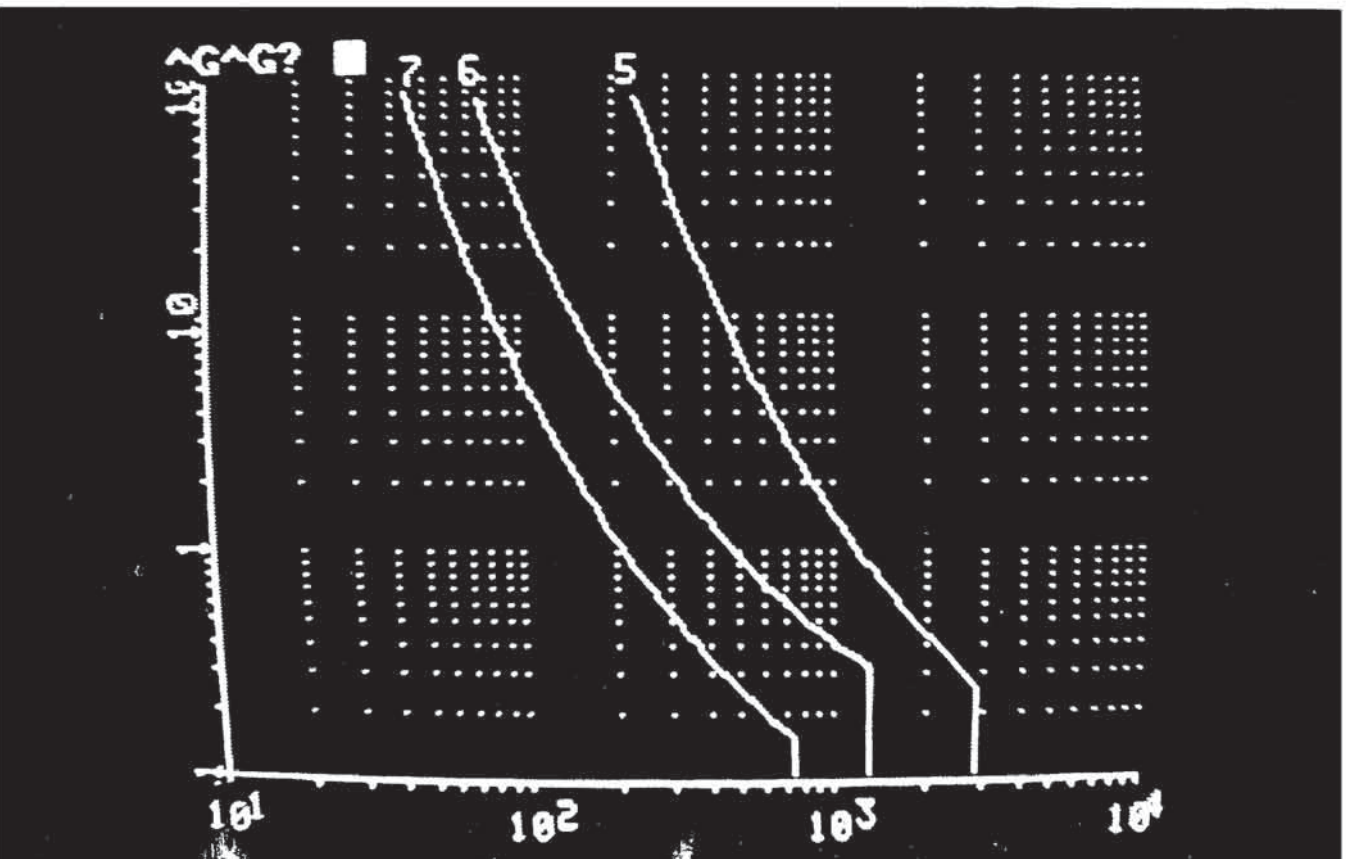


Figura 9. Curvas de Coordinación de los Relés de la Ruta Lateral I.

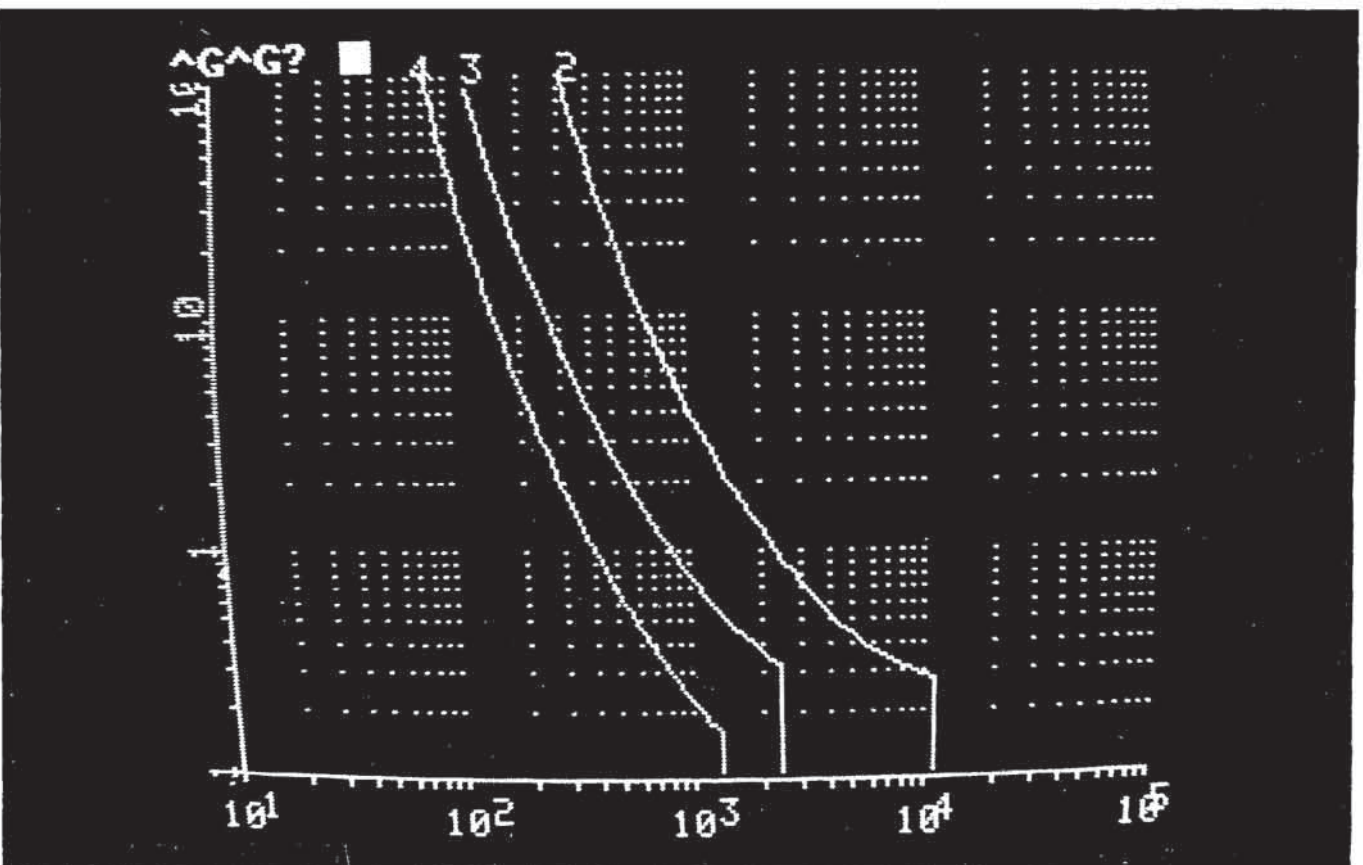


Figura 10. Curvas de Coordinación de los Relés de la Ruta Lateral II.

Otro factor que debe considerarse es referente a la precisión de los transformadores de corriente. Los cálculos en el programa, que involucran la relación de los transformadores de corriente, se efectúan asumiendo que el comportamiento de los transformadores de corriente es ideal; pero el efecto de saturación podría causar que los relés del sistema operen más lentamente que el tiempo de operación esperado. Por esta razón, los cálculos de precisión de los transformadores de corriente deben ser efectuados adicionalmente por el diseñador para asegurarse que los transformadores de corriente operarán correctamente; especialmente si la máxima corriente de falla disponible es mayor que veinte veces la corriente primaria nominal del transformador de corriente.

El método para representar las características del relé no permite la calibración directa del dial de tiempos; por lo tanto esta calibración se muestra al usuario como el tiempo de disparo del relé a cuatro múltiplos del tap seleccionado. Un problema que se puede presentar con este método es: si la calibración obtenida está fuera del rango del dial de tiempos del relé a calibrar. El programa no chequea esta situación, este problema se notaría cuando el usuario se refiere a las curvas del relé dadas por el fabricante para determinar el ajuste real del dial de tiempos con la información dada por el programa. El

diseño del sistema de protección podría ser modificado hasta conseguir una calibración realmente posible (dentro del rango del dial de tiempos del relé).

**4.5 Estudio de Factibilidad.** A continuación presentamos el estudio de factibilidad del presente proyecto para implementarlo en la unidad de producción de Casapalca perteneciente a la Empresa Centromin Perú S. A.

La unidad de producción de Casapalca se encuentra a 4500 m.s.n.m. y a 95 Km. de la capital, Lima, en la sierra central.

Esta unidad produce concentrado compuesto principalmente de cobre, plomo, zinc y plata. Su volumen de producción diaria asciende a 3000 Ton. cortas secas (TCS); por su volumen de producción esta unidad independiente puede ser considerada como perteneciente a la mediana minería.

A continuación se presenta el análisis del estudio en dólares.

Valor del Mineral:	\$ 34.80/TCS
Costos Fijos de Producción:	\$ 6.60/TCS
Costos Indirectos:	-----

-----

Contribución Marginal:                   \$ 28.20/TCS

El valor del mineral y costos de producción son valores promedios del año 1985 obtenidos del reporte "Resultados Económicos de Minerales Extraídos y Comprados" editado por la Gerencia de Finanzas y Contabilidad de la empresa.

Considerando la utilización de la planta estimada en 97%, dato promedio obtenido de "Reporte Mensual de Operaciones de la Planta"; y las paradas de la planta por fallas eléctricas en 4 horas anuales, dato promedio obtenido del reporte de fallas eléctricas de la Div. de Mantenimiento Eléctrico de la unidad de producción de Casapalca; la implementación del presente proyecto se asume que reducirá en 50% el tiempo de parada actual de la planta por fallas eléctricas. Por lo tanto se tiene:

Paradas por Fallas Eléctricas:           2 hrs/año

Por lo tanto las toneladas adicionales de producción de la unidad de producción de Casapalca será:

Producción Adicional:  $3000 * 2 / 24 = 250$  TCS/año

Ingreso Adicional:            $250 * 28.20 = \$ 7050.00$ /año

Costo de Operación del Proyecto: Del diagrama unifilar del plano Nº 003 se tiene un total de once relés a calibrar y considerando la tarifa interna de la empresa se tiene:

Ing. del Proyecto	24 hrs.	105 hr/H	I/. 2520.00
Personal Técnico	96 hrs.	40 hr/H	3840.00
Materiales			440.00
			-----
Subtotal:			I/. 6800.00
Imprevistos 10%			600.00
			-----
Total (1):			I/. 7400.00
En dolares (1\$ = I/. 14)		\$	530.00

Se estima, en la Ing. del Proyecto, que para obtener la coordinación óptima de los once relés se requiere tres días (8 hrs/día) de ingeniería. El personal técnico (dos hombres) debe calibrar cuatro relés y verificar la operación de los mismos en un día; esta operación debe realizarse por lo menos dos veces al año, dependiendo del grado contaminación donde están ubicados los relés, para garantizar su correcta operación.

Restando el total (1) del ingreso adicional tenemos:

Contribución Bruta:	\$.	6520.00
Impuestos 50%:		3260.00
		-----
Contribución Neta:	\$.	3260.00

Inversión: Se estima la compra de una microcomputadora IMC-PC con monitor a colores y 64 Kbytes, que es compatible con la IBM-PC.

Hardware:	\$.	3800.00
Software:		300.00
		-----
Subtotal:		4100.00
Imprevistos 10%		400.00
		-----
Total (2):	\$	4500.00

Si estimamos que el tiempo de vida de la microcomputadora y el software respectivo en 5 años, obtenemos:

$$\text{VNA} = \$ 6428.00$$

$$\text{TIR} = 66.8\%$$

$$\text{PR} = 1.4 \text{ años}$$

donde:

VNA = valor neto actual

TIR = tasa interna de retorno

PR = período de retorno.

En conclusión el proyecto es rentable, tiene una tasa mayor del 15% (en dólares) que es la mínima exigida por la empresa y el período de retorno es bajo.



## Capítulo V

### CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha presentado un programa interactivo, a través de un sistema de microcomputación, que permite el diseño de la protección entre fases de un sistema de potencia radial típico de las minas e industrias. Se pueden estudiar sistemas radiales con 20 barras o menos y un máximo de 50 elementos o impedancias. Luego que el usuario ingresa los valores de los elementos del sistema, se efectúa un análisis de falla y la corriente de falla, el flujo de corrientes en las otras líneas del sistema y los voltajes en las barras se pueden mostrar en la pantalla o imprimir. Luego se ingresa información por cada ubicación del relé que consiste de: máxima corriente de carga, tipo de relé, relación del transformador de corriente, factor de sobrecarga, factor de asimetría y factor para calibrar el instantáneo; los valores de estos tres últimos factores serán seleccionados según el criterio del diseñador. Posteriormente el usuario escoge los intervalos de tiempo (ITC) que cumplen los requerimientos para la coordinación

entre fases y protección de sobrecarga. Se obtiene, a continuación, los ajustes de los relés y los tiempos de disparo y las curvas de coordinación de los relés se pueden examinar para verificar la coordinación. Se pueden cambiar los ajustes iniciales de los relés, interactivamente, cambiando los parámetros ingresados inicialmente y sus efectos en la coordinación se pueden evaluar. Los relés pueden ser recalibrados hasta conseguir las características de protección deseada. La efectividad de este procedimiento se muestra en su aplicación al diseño del sistema de protección del sistema eléctrico de la unidad de producción de Casapalca, que consiste de 12 barras y 18 elementos. Se logra la coordinación de los elementos instantáneo y de tiempo retardado del relé que se muestran en las fotos de las curvas de coordinación de tiempo-corriente generados.

El programa también permite chequear la coordinación de los relés que se encuentran en operación. En este modo el usuario ingresa los parámetros del sistema, tap seleccionado, relación de los transformadores de corriente, tipo de relé, ajuste del instantáneo y los intervalos de tiempo (ITC). Estos últimos se obtienen desde la curva del fabricante del relé con el dial de tiempo al cual fué ajustado el relé. Finalmente se obtienen las curvas de coordinación tiempo-corriente, que permite verificar si los relés operarán como se espera.

El estudio de factibilidad muestra la rentabilidad del proyecto para implementación del sistema de microcomputadora en la mediana minería para el diseño y mantenimiento del sistema de protección. En este estudio no se consideró los otros usos de la microcomputadora que directa e indirectamente elevarán la producción de la unidad de producción de Casapalca.

Una de las principales expansiones del programa sería incluir modelos para fusibles e interruptores de potencia en caja moldeada, esto permitirá la coordinación de éstos con los relés de sobrecorriente. Para representar estos dispositivos hay dos procedimientos ya descritos: la representación matemática y la tabla look-up; la selección depende la eficiencia de cada procedimiento para representar las curvas.

Es importante mencionar que en análisis de fallas del presente estudio sólo se ha considerado el caso de falla trifásica debido a que este tipo de falla es el más crítico que se presenta en sistema de distribución con neutro aislado típico en el sistema de Centromin Perú S.A.

## BIBLIOGRAFIA

1. Albrecht, R. E., Nisja, M. J., Feero, W. E., Rockefeller, G. D. y Wagner, C. L. "Digital Computer Protective Device Coordination Program I - General Program Description". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-83 (Abril 1964): 402-410.
2. Applied Protective Relaying. Newark, Westinghouse Electric Corporation, Relay-Instrument Division, 1976.
3. Brown, Homer E. Solution of Large Networks by Matrix Methods. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1975.
4. Ender, R.C. "The Numerical Representation of Time-Current Characteristics". The Line, Enero-Marzo 1972, pag. 6-10.
5. Langhans, J. D. y Ronat, A. E. "Protective Devices Coordination Via Computer Graphics". Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Octubre 1979, pag. 1209-1217
6. Mason, C. Russell. The Art and Science of Protective Relaying. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1956.
7. Miller, J. H. y Stanek, E. K. "Interactive Program For Checking Coordination Of Protective Devices". Modeling and Simulation, Vol. 7 (Abril 1976), pag. 51-56
8. Mining Cable Engineering Handbook. The Anaconda Company, 1977.
9. Morley, Lloyd A. Mine Electrical Systems. University Park, Pennsylvania, Enero 1982. B. Stagg, Glenn W. and El-Abiad, Ahmed H. Computer Methods in Power System Analysis. New York, McGraw-Hill Book Company, 1968.
10. Personal Computer Hardware Reference Library. IBM Corp., Florida, Versión 1.10.
11. Radke, G. E. "A Method For Calculating Time Overcurrent Relay Settings By Digital Computer", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-82, Special Supplement (1965), pag.189-205.
12. Smolleck, H. A. and Stark, M. P. "An Efficient Computer Algorithm for Modeling and Storing Power-System

Protective Device Characteristics". Proceeding of the Tenth Annual Southeastern symposium on System Theory, Marzo 1978, pag. 13-24.

13. Stagg, Glenn W. y El-Abid, Ahmed H., Computer Methods in Power System Analysis. New York, McGraw-Hill Book Company, 1968.