

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

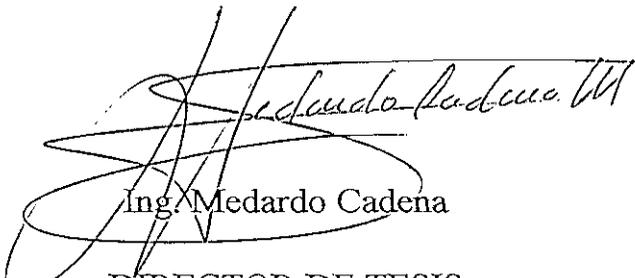
PROGRAMA COMPUTACIONAL INTERACTIVO DE
CORTOCIRCUITOS PARA EL LABORATORIO DE
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero
en Sistemas Eléctricos de Potencia

VINICIO GEOVANNY PARDO SALAZAR

Quito, Octubre de 1998

Certifico que la presente Tesis fue desarrollada en su totalidad por el Señor Vinicio Geovanny Pardo Salazar.



Ing. Medardo Cadena
DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

A mis hijos: Andrés David y Doménica Anahí

AGRADECIMIENTO

A mi Director de Tesis Ing. Medardo Cadena quién con su acertada conducción me ayudó a la culminación del presente trabajo.

A mis profesores y compañeros de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
OBJETIVO	2
ALCANCE	2
CAPITULO I: ANTECEDENTES	4
1.1. Estudios Preliminares	4
1.2. Metodología General a Seguir	5
1.2.1. Algoritmo Clásico	5
1.2.2. Nuevo Algoritmo	5
CAPITULO II: CALCULO DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	7
2.1. Componentes Simétricas	8
2.2. Corrientes y Voltajes de Cortocircuito	9
2.2.1. Falla Trifásica	12
2.2.2. Falla Dos Fases - Tierra	13
2.2.3. Falla Bifásica	15
2.2.4. Falla Monofásica	17
2.3. Construcción de la Matriz Impedancia de Barra. Algoritmo Clásico	18
2.3.1. Elementos Topológicos	19
2.3.2. Construcción de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva y secuencia cero	20
2.3.2.1. Algoritmo para el ordenamiento de elementos	21
2.3.2.2. Tratamiento cuando el elemento es una rama	22
2.3.2.3. Tratamiento cuando el elemento es un enlace	24
2.3.2.4. Tratamiento de ramas de impedancia infinita	26
2.3.3. Incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz impedancia de barra de secuencia cero	28
2.4. Construcción de la Matriz Impedancia de Barra. Nuevo Algoritmo	33
2.4.1. Construcción de la matriz admitancia de barra	34
2.4.2. Flujos de potencia para determinar voltajes de barra	36
2.4.2.1. Flujo de potencia para la red de secuencia positivo	37
2.4.2.2. Flujo de potencia para la red de secuencia cero	43
2.4.3. Construcción de la matriz impedancia de barra	44
2.4.3.1. Matriz Z_B de secuencia positiva	44
2.4.3.2. Matriz Z_B de secuencia cero	46
CAPITULO III: DESCRIPCION Y ALCANCE DEL PROGRAMA	50
3.1. El Computador y los Problemas de Ingeniería	50
3.2. Programación en Visual Basic V4.0 para 32 bits	52
3.3. Concepción Básica del Programa	53
3.4. Ingreso de Datos al Programa	54

3.4.1.	Datos generales del sistema	55
3.4.2.	Datos de elementos del sistema	56
	3.4.2.1. Ingreso de datos para en modo de operación 1	57
	3.4.2.2. Ingreso de datos para en modo de operación 2	62
3.4.3.	Acoplamientos mutuos	68
3.4.4.	Barras de generación y carga	69
3.4.5.	Selección del tipo de falla	72
3.4.6.	Selección de la barra fallada	72
3.5.	Calculo de Voltajes y Corrientes de Cortocircuito	74
	3.5.1. En el modo de operación 1	74
	3.5.2. En el modo de operación 2	78
3.6.	Presentación de Reportes	83
	3.6.1. Modo de operación 1	83
	3.6.2. Modo de operación 2	85
3.7.	Almacenamiento de la Información	87

CAPITULO IV: EJEMPLOS DE APLICACIÓN 89

4.1.	Ejemplo 1	89
	4.1.1. Descripción general del sistema.	89
	4.1.2. Comparación con la Referencia	91
	4.1.3. Comparación entre los dos modos de operación	91
4.2.	Ejemplo 2	95
	4.2.1. Descripción general del sistema.	95
	4.2.2. Comparación con la Referencia	96
	4.2.3. Comparación entre los dos modos de operación	96
4.3.	Ejemplo 3	99
	4.3.1. Descripción general del sistema.	99
	4.3.2. Comparación con la Referencia	100
	4.3.3. Comparación entre modos de operación	100

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 105

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

ANEXO 1: MANUAL DE USUARIO

ANEXO 2: REPORTES

ANEXO 3: RESULTADOS DE EJEMPLOS DE APLICACIÓN

INTRODUCCION.

El conocimiento y la determinación de las características de los Sistemas Eléctricos de Potencia se basa en la realización de una serie de estudios, entre los cuales se encuentra el estudio de cortocircuitos, que consiste en someter al sistema en estado estable, a condiciones de falla, para obtener como resultado su comportamiento, reflejado en voltajes y corrientes de cortocircuito.

Para el cálculo de cortocircuitos se parte de ciertos datos fundamentales como son los voltajes de prefalla en las barras y la matriz impedancia de barra. Para los voltajes de prefalla se puede asumir el valor de uno por unidad (1 p.u.) o pueden ser calculados mediante un flujo de potencia. Por otro lado la matriz impedancia de barra puede ser construida mediante la inclusión progresiva de elementos a través de algoritmos simples que consideran las características particulares de cada uno de ellos.

Cuando en el Sistema se ha producido una falla, las corrientes que circulan por éste pueden ser las más críticas y generalmente son mucho mayores que las corrientes normales de carga, razón por la cual, es de suma importancia conocer con precisión el valor de dichas corrientes para dimensionar adecuadamente los equipos de seccionamiento y calibrar los dispositivos de protección del Sistema.

Es por esta razón que un estudio de cortocircuitos debe ser desarrollado con rapidez y alto grado de exactitud, para lo cual es de gran ayuda el computador personal y en particular un programa digital que permita realizar este estudio.

El programa digital que ha sido desarrollado permite simular diferentes tipos de falla, permite además modificar las condiciones de operación previas a la

falla; y el tiempo que se emplea en el proceso es corto y sus resultados son confiables.

OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un programa computacional interactivo de tipo didáctico que permita la simulación de un sistema bajo diferentes condiciones de falla, y que esté destinado principalmente al uso en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia,.

El desarrollo del programa digital se realiza en un ambiente Windows y es completamente amigable al usuario, lo que significa que su manejo es completamente sencillo y ágil.

Para la implementación de este programa se ha tomado como referencia los algoritmos desarrollados en la Tesis de Ingeniería "Nuevos Algoritmos para el cálculo de cortocircuitos en grandes sistemas de potencia" cuyo autor es el Dr. Claudio Cañizares. Este programa integrará los dos algoritmos planteados en dicho documento, los mismos que serán modificados y adaptados de tal manera que el usuario pueda trabajar con facilidad y en forma independiente con cualquiera de los dos, para llegar a obtener resultados precisos en cualquier caso.

ALCANCE.

A partir de los algoritmos antes mencionados, se pretende mejorar el ambiente de trabajo para el usuario, permitiendo que el ingreso de datos sea interactivo, con la posibilidad de verificar y corregir los datos ingresados, antes de ejecutar la simulación. Asimismo, una vez modelado el sistema es posible obtener resultados en la barra que se seleccione. Con esto, sumado a una adecuada

presentación de los reportes, se consigue brindar al usuario un programa completamente amigable.

Los algoritmos han sido modificados en función de los requerimientos, limitantes y nuevas funciones que tiene el lenguaje de programación escogido para su desarrollo.

El programa dispondrá de una ayuda, a la que puede acceder el usuario en cualquier momento y donde se puede seleccionar el tema sobre el que desee información.

El desarrollo de los algoritmos del programa se realizará en el lenguaje de programación Visual Basic 4.0, compartiendo información con una base de datos propia de este lenguaje para la presentación e impresión de datos y resultados. La selección de este lenguaje de programación obedece a la capacidad que posee para trabajar en ambiente Windows y además por su rapidez para realizar procesos iterativos, ya que trabaja con 32 bits.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1. ESTUDIOS PRELIMINARES.

Para el presente desarrollo se tomará como punto de partida los algoritmos desarrollados por el Dr. Claudio Cañizares, en su Tesis de Ingeniería "Cálculo de cortocircuitos en grandes sistemas de potencia", presentada en el año 1982.[1]

Los algoritmos desarrollados por el Dr. Cañizares, fueron implementados originalmente en el lenguaje de programación Fortran IV, en el cual el proceso de lectura se realizaba por medio de tarjetas perforadas. No fue posible ejecutar este programa en un computador personal puesto que la extensión de los programas superaba la capacidad de memoria del DOS, sistema operativo bajo el cual se ejecuta Fortran.

Bajo el nuevo esquema del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia basado en el uso de computadores personales, se sintió la necesidad de contar con programas digitales que permitan estudiar los sistemas de potencia. Por tal motivo, tomando como punto de partida el estudio del Dr. Cañizares, se decidió desarrollar un programa digital que pueda ser ejecutado en un computador personal y en un ambiente Windows , en el que el usuario pueda trabajar en forma interactiva.

1.2. METODOLOGIA GENERAL A SEGUIR.

Para el análisis de un Sistema de Potencia en general, y en particular para el estudio de cortocircuitos, es importante construir la matriz impedancia de barra, por lo que será el primer tema a tratar. Dependiendo de la forma de construir la matriz impedancia de barra se han definido dos modos de operación del programa basados en los algoritmos que se describen brevemente a continuación.

1.2.1. Algoritmo Clásico .

En este algoritmo no se consideran las cargas, los taps de los transformadores, ni los elementos shunt (capacitores o reactores), para la construcción de la matriz impedancia de barra, por lo tanto se asume que los voltajes de prefalla en las barras serán iguales a uno por unidad (1 p.u.). Este algoritmo permite construir la matriz impedancia de barra de secuencia positiva y de secuencia cero, para lo cual se plantea el siguiente proceso:

- Construcción de la matriz impedancia de barra por el método clásico sin considerar los acoplamientos mutuos, esto es construir la Z_B añadiendo elemento por elemento.[3]
- En caso de existir acoplamientos mutuos, se los introducirá en la matriz impedancia de barra de secuencia cero, utilizando el algoritmo desarrollado por H. A. Daniels y M. Chen.[4]

1.2.2. Nuevo Algoritmo.

A diferencia del algoritmo clásico, en este nuevo algoritmo se consideran las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt para la construcción de la matriz impedancia de barra, por lo tanto será necesario implementar

algoritmos de flujos de potencia para determinar los voltajes de prefalla en las barras. Básicamente en este algoritmo se considera lo siguiente:

- Se construye la matriz admitancia de barra para incorporar los acoplamientos mutuos, en caso de existir, en base al algoritmo desarrollado por por F. L. Alvarado.[7]
- Se procede a incorporar en la matriz admitancia de barra las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt tomando como referencia el algoritmo planteado por R. Proulx y D. Creiver en 1982; con lo cual se llega a obtener la columna de la matriz impedancia de barra correspondiente a la barra fallada.[5]

Estos son de manera general los algoritmos por medio de los cuales se construye la matriz impedancia de barra de secuencia, a través de la cual se llega a obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito.

CAPITULO II

CALCULO DE CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Las condiciones de operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia se determinan en base a la realización de una serie de estudios, entre los cuales se encuentra el estudio de cortocircuitos, mediante el cual se somete al sistema de potencia en estado estable, a una condición de falla, con lo cual se puede analizar su comportamiento bajo esta condición.

Las fallas pueden ser de dos tipos: simétricas, cuando no se produce un desbalance entre las fases; y asimétricas, cuando se produce un desbalance en las fases. Los cortocircuitos trifásicos corresponden al primer grupo, en cambio los cortocircuitos línea-línea a tierra, línea-línea o línea-tierra corresponden al segundo grupo.

Para poder determinar las corrientes y voltajes de cortocircuito, se recurre a una herramienta que permite manejar circuitos trifásicos desbalanceados, como es el método de las componentes simétricas, en el que un sistema desbalanceado de n fasores, se puede resolver con n sistemas de fasores balanceados llamados componentes simétricas de los fasores originales.[2]

El método de las componentes simétricas es útil para determinar las corrientes y voltajes en todas las barras del sistema luego de ocurrida la falla, porque

cualquier falla asimétrica da origen a que fluyan corrientes desbalanceadas en el sistema.[2]

2.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS.[2]

Tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores. Los conjuntos balanceados de componentes son:

- Componentes de secuencia positiva que consisten en tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de 120° y que tienen la misma secuencia de fase que los fasores originales.
- Componentes de secuencia negativa que consiste en tres fasores de igual magnitud, desplazados uno de otro por una fase de 120° y que tienen una secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales, y
- Componentes de secuencia cero que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno de otro.

Cuando se resuelve un problema por componentes simétricas, es costumbre designar las tres fases del sistema como a, b y c, de forma que la secuencia de fase de voltajes y corrientes en el sistema es abc. Los tres conjuntos de componentes simétricas se designan por el superíndice adicional 1 para las componentes de secuencia positiva, 2 para las de secuencia negativa y 0 para las componentes de secuencia cero. Como cada uno de los fasores desbalanceados originales es la suma de sus componentes, los fasores originales expresados en términos de sus componentes de secuencia son:

$$\begin{aligned}V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\V_b &= V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \\V_c &= V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)}\end{aligned}$$

(Ec. 2.1)

El número de variables desconocidas se puede reducir al expresar cada componente de V_b y V_c como el producto de la componente de V_a y alguna función del operador a .

$$\begin{aligned} a &= 1\angle 120^\circ \\ a^2 &= 1\angle 240^\circ \end{aligned} \tag{Ec. 2.2}$$

Con esta reducción, la ecuación 2.1, en forma matricial quedará:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \tag{Ec. 2.3}$$

donde la matriz A se la llama matriz de transferencia, y su inversa será:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{Ec. 2.4}$$

Con la matriz A y A^{-1} se puede obtener las componentes de fase a partir de las componentes de secuencia o las componentes de secuencia a partir de las componentes de fase respectivamente.

Esta breve descripción de las componentes simétricas permitirá un mejor entendimiento al lector cuando analice las ecuaciones de corrientes y voltajes de cortocircuito y las ecuaciones que describen cada tipo de falla.

2.2. CORRIENTES Y VOLTAJES DE CORTOCIRCUITO. [1]-[3]

Se asume una falla en una barra "p" del sistema, por lo tanto los voltajes y las corrientes de fase en esta barra serán:

$$V_{pf}^{abc} = (U + Z_{pp}^{abc} Y_r^{abc})^{-1} V_{p0}^{abc} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$I_{pf}^{abc} = Y_r^{abc} V_{pf}^{abc} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

V_{pf}^{abc} = voltaje de fase en la barra "p" durante la falla.

U = matriz unitaria 3x3.

Z_{pp}^{abc} = impedancia propia de fase de la barra "p".

Y_r^{abc} = admitancia de falla de las fases en la barra "p".

V_{p0}^{abc} = voltaje de prefalla en la barra "p".

I_{pf}^{abc} = corriente de fase en la barra "p" durante la falla.

Asimismo los voltajes en las demás barras del sistema durante la falla en la barra "p" se determinan con la ecuación:

$$V_{if}^{abc} = V_{i0}^{abc} - Z_{ip}^{abc} I_{pf}^{abc} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

V_{if}^{abc} = voltajes de fase en la barra "i" durante la falla.

V_{i0}^{abc} = voltajes de fase en la barra "i" antes de la falla.

Z_{ip}^{abc} = impedancia de fase entre la barra "i" y la barra "p".

Para calcular las corrientes que circulan por los diferentes elementos del sistema una vez ocurrida la falla, se utiliza la siguiente expresión:

$$I_{ijr}^{abc} = y_{ij,\rho\sigma}^{abc} (V_{pr}^{abc} - V_{\sigma r}^{abc}) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

I_{ijr}^{abc} = corrientes de fase que circulan por el elemento conectado entre "i" y "j" durante la falla.

$y_{ij,\rho\sigma}^{abc}$ = vector formado por las admitancias de fase de los acoples entre los elementos " $\rho\sigma$ " y el elemento " ij ", y por la admitancia de fase propia de dicho elemento.

V_{pf}^{abc} = vector formado por los voltajes de fase en las barras " p " durante la falla.

V_{of}^{abc} = vector formado por los voltajes de fase en las barras " σ " durante la falla.

Como los datos de los elementos que se tiene a disposición para la formación de la matriz impedancia de barra, están en componentes simétricas, no se trabaja directamente con las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8, por lo tanto estas ecuaciones deben ser convertidas a componentes de secuencia, con lo cual las ecuaciones a utilizar serán las siguientes:

$$V_{pf}^{012} = (U + Z_{pp}^{012} Y_r^{012})^{-1} V_{p0}^{012} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$I_{pr}^{012} = Y_r^{012} V_{pf}^{012} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$V_{ir}^{012} = V_{i0}^{012} - Z_{ip}^{012} I_{pr}^{012} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$I_{ijr}^{012} = y_{ij,\rho\sigma}^{012} (V_{pr}^{012} - V_{of}^{012}) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Estas son las ecuaciones con las que se trabaja para encontrar los voltajes y corrientes de secuencia durante la falla, y luego, con la ayuda de la matriz de transferencia A, se determinarán los voltajes y corrientes de fase durante la falla.

Se realizará a continuación una breve descripción de las ecuaciones a utilizarse para cada tipo de falla, sin entrar en mayor detalle. Si el lector desea entrar en mayor detalle, la deducción de estas ecuaciones en forma completa se puede encontrar en las referencias [1] y [3].

2.2.1 Falla Trifásica.[1]

La representación esquemática de la falla trifásica se presenta en la figura 2.1, y las ecuaciones que la describen son:

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= Z_f I_a - Z_f I_b \\ V_a - V_c &= Z_f I_a - Z_f I_c \\ I_a + I_b + I_c &= 0 \end{aligned}$$

(Ec. 2.13)

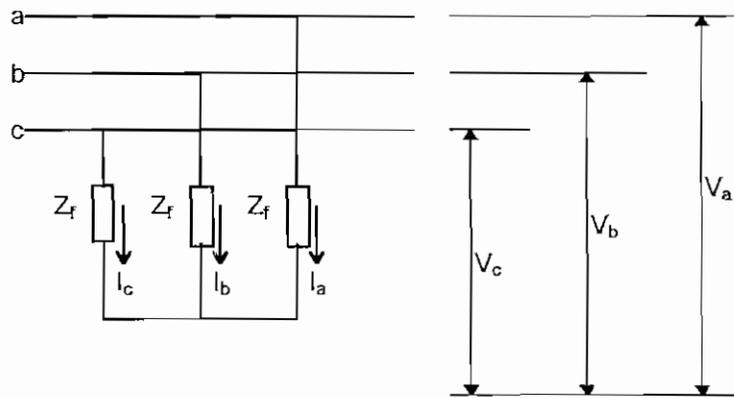


Fig. 2.1

Despejando las corrientes de las ecuaciones 2.13 y escribiéndolas en forma matricial, se llega a obtener la matriz admitancia de falla de secuencia y que es igual a:

$$Y_f^{012} = \frac{1}{Z_f} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.14)

Desarrollando la ecuación matricial 2.9, 2.10, 2.11, y reemplazando la matriz Y_f^{012} por su equivalente (Ec. 2.14), se obtienen los voltajes y corrientes de secuencia en la barra fallada "p" y los voltajes de secuencia en el resto de barras, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{pr}^0 \\ V_{pr}^1 \\ V_{pr}^2 \end{bmatrix} = V_{p0}^1 \frac{Z_r}{Z_r + Z_{pp}^1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.15)

$$\begin{bmatrix} I_{pr}^0 \\ I_{pr}^1 \\ I_{pr}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{Z_r + Z_{pp}^1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.16)

$$\begin{bmatrix} V_{if}^0 \\ V_{if}^1 \\ V_{if}^2 \end{bmatrix} = V_{i0}^1 - V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^1}{Z_r + Z_{pp}^1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.17)

Las corrientes en los elementos se encuentran aplicando la ecuación 2.12, una vez que ya se han calculado los voltajes en las barras. El mismo criterio se aplica en el resto de casos que se analizan más adelante.

Estas ecuaciones son las mismas que para el caso de una falla tres fases - tierra, por cuanto el sistema es balanceado y no circula corriente a tierra.

2.2.2. Falla Dos Fases - Tierra.[1]

Esta falla se la representa en figura 2.2, cumpliéndose para este circuito las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ V_b &= (Z_r + Z_g)I_b + Z_g I_c \\ V_c &= Z_g I_b + (Z_r + Z_g)I_c \end{aligned}$$

(Ec. 2.18)

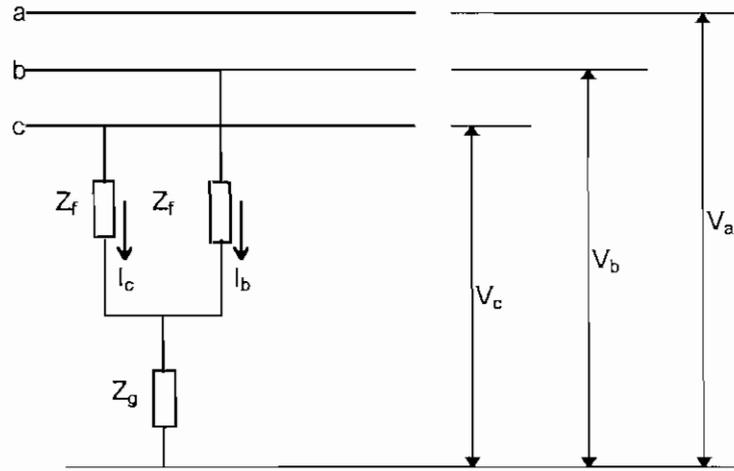


Fig. 2.2

Realizando los agrupamientos respectivos en función de despejar I_b e I_c , y expresando en forma matricial, se llega a determinar que la matriz admitancia de falla de secuencia es:

$$Y_r^{012} = \frac{1}{3Z_r(Z_r + 2Z_g)} \begin{bmatrix} 2Z_r & -Z_r & -Z_r \\ -Z_r & 2Z_r + 3Z_g & -(Z_r + 3Z_g) \\ -Z_r & -(Z_r + 3Z_g) & 2Z_r + 3Z_g \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Reemplazando la matriz admitancia de falla (Ec. 2.19) en las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11, y realizando los productos matriciales correspondientes se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{pf}^0 \\ V_{pf}^1 \\ V_{pf}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{(Z_r + Z_{pp}^1)(3Z_r + 6Z_g + 2Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1)} \begin{bmatrix} Z_{pp}^0(Z_r + Z_{pp}^1) \\ 3Z_r(Z_r + Z_g) + (2Z_r + 3Z_g)Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0(2Z_r + Z_{pp}^1) \\ Z_{pp}^1(Z_r + 3Z_g + Z_{pp}^0) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

$$\begin{bmatrix} I_{pf}^0 \\ I_{pf}^1 \\ I_{pf}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{(Z_r + Z_{pp}^1)(3Z_r + 6Z_g + 2Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1)} \begin{bmatrix} -Z_r + Z_{pp}^1 \\ Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0 + 2Z_r + 3Z_g \\ -Z_{pp}^0 - Z_r - 3Z_g \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

$$\begin{bmatrix} V_{if}^0 \\ V_{if}^1 \\ V_{if}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{p0}^1 (Z_r + Z_{pp}^1) Z_{ip}^0}{(Z_r + Z_{pp}^1)(3Z_r + 6Z_g + 2Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1)} \\ V_{i0}^1 - \frac{V_{p0}^1 (Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0 + 2Z_r + 3Z_g) Z_{ip}^1}{(Z_r + Z_{pp}^1)(3Z_r + 6Z_g + 2Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1)} \\ \frac{V_{p0}^1 (Z_{pp}^0 + Z_r + 3Z_g) Z_{ip}^1}{(Z_r + Z_{pp}^1)(3Z_r + 6Z_g + 2Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1)} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.22)

Estas serán las ecuaciones a utilizar para calcular los voltajes y corrientes de cortocircuito en las barras del sistema de potencia bajo análisis. Para calcular las corrientes que circulan por los elementos durante la falla se aplica la ecuación 2.12.

2.2.3. Falla Bifásica.[1]

El esquema de este tipo de falla se presenta a continuación en la figura 2.3, y las ecuaciones que describen este circuito son:

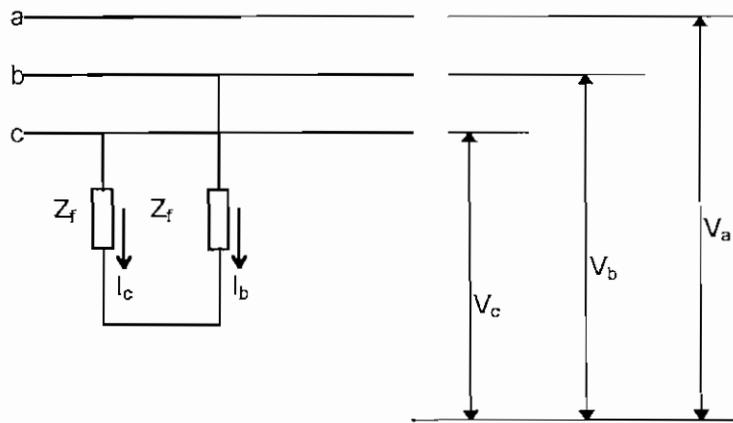


Fig. 2.3

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b - I_c &= \frac{1}{Z_r} (V_b - V_c) \\ I_c &= -I_b \end{aligned}$$

(Ec. 2.23)

De igual forma se hace el desarrollo de estas ecuaciones, despejando las corrientes, con lo cual se llega a obtener que la matriz admitancia de falla de secuencia es:

$$Y_r^{012} = \frac{1}{2Z_r} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.24)

Las ecuaciones que permiten calcular los voltajes y corrientes de secuencia en la barra fallada y los voltajes de secuencia en el resto de barras, se las obtiene a partir de las ecuaciones 2.9, 2.10, 2.11 y 2.24, y son:

$$\begin{bmatrix} V_{pr}^0 \\ V_{pr}^1 \\ V_{pr}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{2(Z_r + Z_{pp}^1)} \begin{bmatrix} 0 \\ 2Z_r + Z_{pp}^1 \\ Z_{pp}^1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.25)

$$\begin{bmatrix} I_{pr}^0 \\ I_{pr}^1 \\ I_{pr}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{2(Z_r + Z_{pp}^1)} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.26)

$$\begin{bmatrix} V_{ir}^0 \\ V_{ir}^1 \\ V_{ir}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{i0}^1 - V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^1}{2(Z_r + Z_{pp}^1)} \\ V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^1}{2(Z_r + Z_{pp}^1)} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.27)

Una vez que se obtienen los voltajes y corrientes de falla en las barras del sistema con las ecuaciones que se acaba de describir, se procede a determinar las corrientes en los elementos durante la falla, para lo cual se aplica la ecuación 2.12.

2.2.4. Falla Monofásica.[1]

La falla monofásica se representa con el esquema mostrado en la figura 2.4, y las ecuaciones que describen esta falla son:

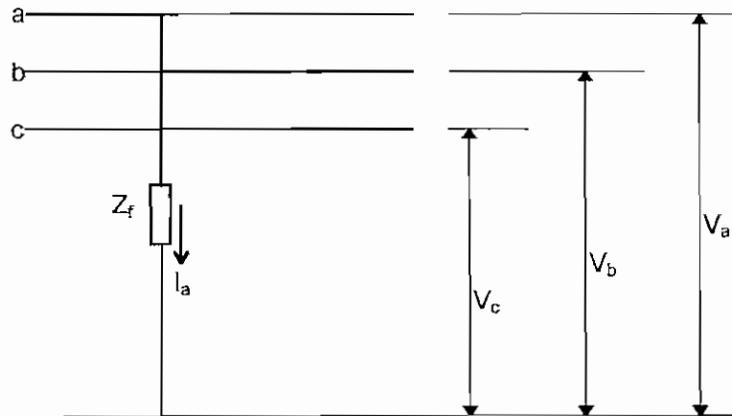


Fig. 2.4

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{1}{Z_f} V_a \\ I_b &= I_c = 0 \end{aligned}$$

(Ec. 2.28)

De igual forma que en los casos anteriores, se realiza el desarrollo matricial, de modo que se llega a obtener la matriz admitancia de falla de secuencia, y que es igual a:

$$Y_f^{012} = \frac{1}{3Z_f} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.29)

A partir de las ecuaciones 2.9, 2.10, 2.11 y 2.29, se obtienen los voltajes y corrientes de secuencia en la barra fallada y los voltajes de secuencia en el resto de barras del sistema, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{pr}^0 \\ V_{pr}^1 \\ V_{pr}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{2Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0 + 3Z_r} \begin{bmatrix} Z_{pp}^0 \\ 3Z_r + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0 \\ -Z_{pp}^1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.30)

$$\begin{bmatrix} I_{pr}^0 \\ I_{pr}^1 \\ I_{pr}^2 \end{bmatrix} = \frac{V_{p0}^1}{2Z_r + 2Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.31)

$$\begin{bmatrix} V_{ir}^0 \\ V_{ir}^1 \\ V_{ir}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^0}{3Z_r + 2Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0} \\ V_{i0}^1 - V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^1}{3Z_r + 2Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0} \\ -V_{p0}^1 \frac{Z_{ip}^1}{3Z_r + 2Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.32)

Como se puede dar cuenta, las ecuaciones que permiten calcular los voltajes y corrientes de cortocircuito, para los diferentes tipos de fallas, están básicamente en función de la matriz impedancia de barra. Por tal razón a continuación se presenta la descripción de los algoritmos utilizados para la construcción de dicha matriz, que involucran además, específicamente en el modo de operación 2, el correr flujos de potencia para determinar los voltajes de barra.

2.3. CONSTRUCCION DE LA MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA. ALGORITMO CLASICO.

Este algoritmo es la base del modo de operación 1 del programa principal y se compone de dos partes: la primera en donde se construye la matriz impedancia de barra sin considerar los acoplamientos mutuos y la segunda parte donde se consideran los acoplamientos mutuos y se los incluye en la matriz impedancia de barra de secuencia cero.

En realidad este algoritmo permite obtener dos matrices, tanto la de secuencia positiva y la de secuencia cero, con las cuales se puede hacer el análisis de cortocircuitos y obtener los voltajes y corrientes de secuencias y de fases. Cabe recalcar que como es este modo de operación no existen cargas ni elementos en paralelo, los voltajes de prefalla en todas las barra del sistema son iguales a 1 por unidad.

El trabajo vinculado en la construcción de la matriz impedancia de barra es mucho mayor que el requerido para construir la matriz admitancia de barra, pero el contenido de la información de la matriz impedancia de barra es, por mucho, mayor al de la matriz admitancia de barra. La matriz impedancia de barra de un sistema interconectado nunca está esparcida y solo contiene ceros cuando se considera que el sistema está subdividido en partes independientes a través de circuitos abiertos. [2]

2.3.1. Elementos Topológicos.[8]

La Topología es una rama de las matemáticas que estudia las propiedades de las formas geométricas que permanecen invariables bajo ciertas transformaciones. La topología o también llamada geometría de la red tiene que ver con la manera como están interconectados los elementos en la red y no con su naturaleza.

El gráfico de una red es un diagrama simple donde se muestra cada elemento mediante un segmento de línea llamado rama y cada terminal es un punto denominado nodo. A continuación se darán algunas definiciones que se las utilizará durante la descripción del algoritmo clásico de construcción de la matriz impedancia de barra, que es la base del modo de operación 1 del programa principal.

- Nodo: punto, en el cual dos o más elementos tienen conexión común.

- Rama: camino aislado, conteniendo un elemento simple, que conecta un nodo con otro nodo cualquiera.
- Lazo: es un conjunto de ramas formando un camino cerrado que no pasa por ningún nodo más de una vez.

2.3.2. Construcción de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva y secuencia cero.

Para poder construir la matriz impedancia de barra se debe tener definidos los nodos inicial y final de los elementos componentes del sistema, tomando en cuenta que el nodo de referencia siempre será el nodo 0. Esto es de mucha importancia ya que este algoritmo va añadiendo elemento por elemento a la barra que se analiza dentro de la matriz, en otras palabras lo que realiza es la construcción de la matriz barra por barra, formando en cada paso matrices Z_B parciales.

Al incluir un elemento en la matriz, este puede partir de una barra ya considerada y llegar a una barra nueva, lo cual hace que en la matriz se cree una nueva barra y aumente su dimensión. Estos elementos son las ramas. Si por el contrario el elemento ingresado está entre dos barras ya consideradas en la matriz, esta no aumenta su dimensión ni se crea una nueva barra. Estos elementos son los enlaces.[1]

Las ecuaciones en el caso de ramas son diferentes a las de los enlaces, por las razones indicadas anteriormente, de ahí que a continuación se presenta el desarrollo para estos dos tipos de elementos. El presente desarrollo se basa en las deducciones realizadas en el libro "Computer Methods in Power System Analysis" cuyos autores son G. Stagg y A. El-Abiad.

2.3.2.1. Algoritmo para el ordenamiento de elementos.

Como la matriz impedancia de barra se va construyendo barra a barra, es necesario que los elementos sean ordenados de tal forma que se pueda identificar los elementos conectados a la referencia (nodo 0) y luego se vayan añadiendo los elementos conectados a estos. Para realizar este ordenamiento de los elementos, a continuación se presenta el algoritmo que permite realizar esta tarea.[1]

- Se encuentra un elemento conectado a la referencia (nodo 0). A este elemento se lo utiliza para construir la primera columna de la matriz impedancia de barra.
- A continuación se saca una lista de todas las barras que se encuentran conectadas a la primera barra encontrada anteriormente.
- De esta lista, se toma la siguiente barra y se procede a escoger el orden en que se irán aumentando a la matriz impedancia de barra, usando los siguientes criterios:
 - * los elementos conectados entre esta barra y la referencia son los primeros que se aumentan a la matriz.
 - * los elementos conectados entre esta barra y la que le antecede en la lista, son los siguientes que se aumentan a la matriz.
 - * los elementos que están conectados entre esta barra y barras que le preceden en la lista, no son tomados en cuenta y se los deja para ser utilizados posteriormente.
 - * se completa la lista con todas las barras que estén unidas por elementos a la barra que se está añadiendo a la matriz impedancia de barra.
- El último punto es el que se repite para cada una de las barras de la lista.

Una vez ordenados los elementos del sistema de potencia, se pasa a determinar que elemento es rama y que elemento es enlace, cuyos

tratamientos en la formación de la matriz impedancia de barra de secuencia son diferentes. Estos tratamientos se describen a continuación.

2.3.2.2. Tratamiento cuando el elemento es una rama.[3]

Se asume un sistema de "n" barras, donde se aumenta un elemento que va de una barra "p" existente a una barra "q" nueva, tal como se puede ver en la figura 2.5.

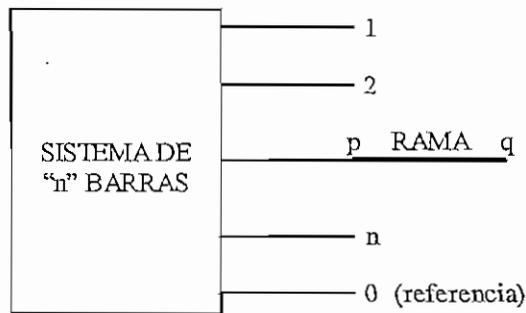


Fig. 2.5

En general para cualquier sistema se cumple la ecuación matricial siguiente:

$$V_{BARRA} = Z_{BARRA} \times I_{BARRA} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Como el elemento que se ingresa es una rama, la matriz Z_{BARRA} aumentará su dimensión. Además como no circula corriente por el sistema, el vector de corrientes será cero.

Si tenemos en cuenta que en un sistema de potencia, la gran mayoría de sus elementos son pasivos, se tiene que la matriz impedancia de barra es simétrica, por lo tanto se cumple:

$$Z_{iq} = Z_{qi} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

El elemento Z_{qi} puede ser determinado al inyectar corriente en cualquier barra "i" y calculando el voltaje en la barra "q" con respecto al nodo de referencia. Si el resto de corrientes de barra son iguales a cero y si el valor de la corriente inyectada en la barra "i" es igual a 1 por unidad se tiene:

$$V_i = Z_{ii} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

El voltaje y la corriente asociados con la nueva rama "p-q" son:

$$v_{pq} = V_p - V_q \quad (\text{Ec. 2.36})$$

$$i_{pq} = \frac{v_{pq}}{Z_{pq,pq}} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

donde:

$Z_{pq,pq}$ = impedancia de la rama "p - q".

Como en esta rama no circula corriente, de las ecuaciones 2.36 y 2.37 en combinación con la ecuación 2.35 se deduce que:

$$Z_{pi} = Z_{qi} \quad (\text{Ec. 2.38})$$

donde:

$i = 1, 2, \dots, n$; para $i \neq q$

El elemento Z_{qq} puede ser calculado inyectando una corriente en la barra "q". Si todas las demás corrientes de barra son iguales a cero y si el valor de la corriente inyectado en "q" es igual a 1 por unidad se tiene:

$$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq,pq}$$

(Ec. 2.39)

Una consideración especial se tiene que hacer en la ecuación 2.39 cuando el nodo "p" es el nodo de referencia, ya que Z_{pi} es igual a cero, por lo tanto esta ecuación quedará:

$$Z_{qq} = z_{pq,pq}$$

(Ec. 2.40)

2.3.2.3. Tratamiento cuando el elemento es un enlace.[3]

Se parte de un sistema de "n" barras, donde se añade un enlace entre el nodo "p" y el nodo "q". El procedimiento para calcular los elementos de la matriz impedancia de barra, es conectando en serie con este elemento añadido una fuente de voltaje e_f , tal como se indica en la figura 2.6.

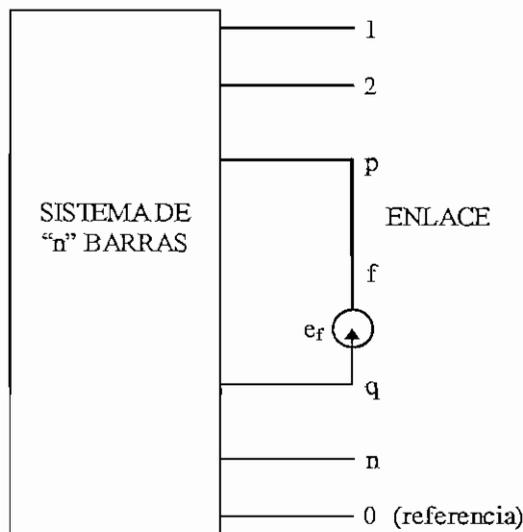


Fig. 2.6

Esta fuente hace que se cree un nodo ficticio "f", el cual será eliminado mas adelante. La fuente de voltaje e_f es seleccionada de tal manera que la corriente que circula por el enlace sea cero. En este sistema se cumple también la

ecuación 2.33, donde la matriz impedancia de barra aumenta su dimensión debido a la presencia de la barra ficticia "f".

El elemento Z_{fi} puede ser determinado por inyección de corriente en la barra "i" y calculando el voltaje en el nodo "f" con respecto a la barra "q". Si el valor de la corriente inyectada en la barra "i" es igual a 1 por unidad y todas las demás corrientes de barra son cero, entonces:

$$\begin{aligned} V_i &= Z_{ii} \\ e_r &= Z_{fi} \end{aligned} \tag{Ec. 2.41}$$

Para el nodo "q - f", se tiene las ecuaciones, de voltaje

$$e_r = V_p - V_q - v_{pf} \tag{Ec. 2.42}$$

y de corriente:

$$i_{pr} = \frac{v_{pr}}{Z_{pr,pr}} \tag{Ec. 2.43}$$

Como se conoce que no circula corriente entre los nodos "p" y "f", la corriente i_{pr} es igual a cero, por lo tanto, el voltaje v_{pr} también será igual a cero, con lo cual se tiene:

$$Z_{fi} = Z_{pi} - Z_{qi} \tag{Ec. 2.44}$$

donde:

$i = 1, 2, \dots, n$; para $i \neq f$

Para calcular el elemento Z_{fi} se inyecta una corriente en la barra "f" con la barra "q" como referencia y se calcula el voltaje en la barra "f" con respecto a la barra "q". Si la corriente inyectada en la barra "f" es igual a 1 por unidad y

todas las demás corrientes de barra son iguales a cero, y además como e_f es una fuente ideal ($Z_{pf,pf} = Z_{pq,pq}$) se llega a:

$$Z_{rr} = Z_{pr} - Z_{qr} + Z_{pq,pq} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

Como la barra "r" es ficticia, se hace necesario eliminarla y así reducir en una dimensión a la matriz impedancia de barra, para ello se cortocircuita la fuente de voltaje e_f y se usa el método de reducción de Kron de la siguiente manera:

$$Z_{ij(\text{nuevo})} = Z_{ij(\text{antiguo})} - \frac{Z_{ir}Z_{rj}}{Z_{rr}} \quad (\text{Ec. 2.46})$$

Asimismo es necesario un tratamiento especial para cuando el nodo "p" es la referencia, ya que Z_{pr} es igual a cero, por lo tanto la ecuación 2.45 tendrá la forma:

$$Z_{rr} = -Z_{qr} + Z_{pq,pq} \quad (\text{Ec. 2.47})$$

Se ha determinado entonces las expresiones para calcular la matriz impedancia de barra de secuencia, tanto en el caso de un elemento ser enlace como cuando un elemento es una rama, dentro de la formación de esta matriz. A continuación se analiza la presencia de ramas de impedancia infinita en la red de secuencia cero, como consecuencia del tipo de conexión de los transformadores.

2.3.2.4. Tratamiento de ramas de impedancia infinita.

En un sistema con transformadores Δ -Y, se requiere una atención especial en los circuitos abiertos que se encuentran en la red de secuencia cero. Estos circuitos abiertos se los interpreta como ramas de impedancia infinita en la formación de la matriz impedancia de barra de secuencia cero, por lo tanto

necesitan un tratamiento especial. Para el caso de enlaces no se necesita realizar tratamiento alguno por cuanto no produce variación alguna dentro de la matriz impedancia de barra.

Para realizar el tratamiento especial de las ramas de impedancia infinita durante la construcción de la matriz impedancia de barra, se sigue el siguiente algoritmo:[1]

- Se define una rama ficticia de impedancia finita ($0 + j0.5$), que vaya de la referencia (nodo 0) a la barra que está creando la rama de impedancia infinita.
- La nueva barra creada anteriormente, hace que el resto de elementos conectados entre esta y cualquiera de las barras existentes hasta ese puntos sean enlaces, los mismos que serán procesados como tales. Este proceso se repite si existiesen otras ramas de este tipo.
- Procesados todos los elementos del sistema, se analiza las filas correspondientes a las barras afectadas por ramas de impedancia infinita en la matriz impedancia de barra.

Si estas filas tienen a los elementos fuera de la diagonal igual a cero y al de la diagonal igual a la impedancia de rama ficticia, estas ramas están aisladas del sistema, por lo tanto las elimina de la matriz. Si esto no sucede, se aumentan líneas ficticias cuyas impedancias son iguales a la de la rama ficticia pero de signo cambiado, y que van de la referencia a cada una de las ramas en análisis. Consiguiendo con esto que se remuevan las ramas ficticias colocadas en un principio y la matriz adquiere sus valores correctos.

Se ha terminado con el análisis de la construcción de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, quedando por analizar, en caso de existir, los acoplamientos mutuos en el sistema para incluirlos dentro de la matriz impedancia de barra de secuencia cero; tema que será tratado en detalle a continuación.

2.3.3. Incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz impedancia de barra de secuencia cero.[1]-[4]

Una vez que se tiene construida la matriz impedancia de barra de secuencia cero sin acoplamientos mutuos, se procede a incluir los mismos, para ello se utiliza el algoritmo desarrollado por H. A. Daniels y M. Chen en 1969. A continuación se presenta el desarrollo de las ecuaciones para aplicar este algoritmo a una matriz impedancia de barra simétrica, que es el caso que se analiza.

Se parte de un sistema en el cual existen acoplamientos mutuos, pero que al no considerarlos se cumple la siguiente ecuación matricial:

$$Y_b' \times V_b' = I_b \quad (\text{Ec. 2.48})$$

donde:

Y_b' = matriz admitancia de barra del sistema sin acoplamientos mutuos.

V_b' = vector de voltajes de barra del sistema sin acoplamientos mutuos.

I_b = vector de corrientes de barra del sistema.

Al considerar los acoplamientos mutuos, se debe forzar los voltajes de barra, con el fin de que las corrientes de barra sean las mismas que en el sistema sin considerar los acoplamientos mutuos, dando lugar a la siguiente ecuación matricial:

$$Y_b \times V_b = I_b \quad (\text{Ec. 2.49})$$

donde:

Y_b = matriz admitancia de barra del sistema con acoplamientos mutuos.

V_b = vector de voltajes de barra del sistema con acoplamientos mutuos.

Entre los vectores de voltajes de barra sin acoplamientos y con acoplamientos va a existir una diferencia expresada por:

$$V_b' = V_b - \Delta V_b \quad (\text{Ec. 2.50})$$

si se define:

$$\Delta I_b = Y_b' \Delta V_b \quad (\text{Ec. 2.51})$$

$$\Delta Y_b = Y_b' - Y_b \quad (\text{Ec. 2.52})$$

y por otro lado se sabe que:

$$Y_b' = \frac{1}{Z_b'} = (Z_b')^{-1} \quad (\text{Ec. 2.53})$$

realizando los productos matriciales correspondientes se llega a:

$$V_b = (U - Z_b' \Delta Y_b)^{-1} Z_b' I_b \quad (\text{Ec. 2.54})$$

donde:

U = matriz unitaria.

Z_b' = matriz impedancia de barra del sistema sin acoplamientos mutuos.

Sustituyendo el valor de V_b en la ecuación 2.54 da como resultado lo siguiente:

$$Z_b = (U - Z_b' \Delta Y_b)^{-1} Z_b' \quad (\text{Ec. 2.55})$$

donde:

Z_b = matriz impedancia de barra del sistema con acoplamientos mutuos.

La matriz admitancia de barra puede ser obtenida usando la matriz admitancia primitiva de los elementos del sistema y la matriz incidencia de barra, por lo tanto:

$$\begin{aligned} Y_b &= A^T [y] A \\ Y'_b &= A^T [y'] A \end{aligned} \tag{Ec. 2.56}$$

donde:

$[y]$ = matriz admitancia primitiva del sistema con acoplamientos mutuos.

$[y']$ = matriz admitancia primitiva del sistema sin acoplamientos mutuos.

A = matriz incidencia de barra del sistema. Esta matriz es independiente de que se consideren o no los acoplamientos mutuos, por lo tanto será la misma en ambos casos.

A continuación se detalla las submatrices que forman las matrices de las ecuaciones 2.56.

$$[z'] = [y']^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{B} \end{array} \right] \tag{Ec. 2.57}$$

donde:

$[z']$ = matriz impedancia primitiva del sistema sin acoplamientos mutuos.

E = submatriz diagonal de elementos no afectados por acoplamientos mutuos.

B = submatriz diagonal de elementos afectados por acoplamientos, pero sin considerar el valor de estos.

$$[z] = [y]^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{array} \right] \tag{Ec. 2.58}$$

donde:

$[z]$ = matriz impedancia primitiva del sistema con acoplamientos mutuos.

D = submatriz no diagonal de elementos afectados por acoplamientos, considerando el valor de los acoplamientos.

La matriz incidencia de barra del sistema puede ser representada en función de tres submatrices, las cuales se detallan a continuación:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} & \mathbf{A}_1 & \\ \mathbf{A}_2 & & \\ & & \mathbf{A}_3 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.59)

donde:

A_1 = submatriz de incidencia de los elementos no acoplados en todas las barras del sistema.

A_2 = submatriz de incidencia de los elementos acoplados en las barras no afectadas por acoplamientos mutuos. Esta submatriz es nula ya que los elementos acoplados no inciden nunca en dichas barras.

A_3 = submatriz de incidencia de los elementos acoplados en las barras afectadas por acoplamientos mutuos.

Realizando los productos matriciales correspondientes, se tiene:

$$\Delta \mathbf{Y}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & | & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & | & \mathbf{R} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.60)

donde la submatriz R es de dimensiones $p \times p$, siendo p el número de barras afectadas por acoplamientos y es igual a:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}_3^T (\mathbf{B}^{-1} - \mathbf{D}^{-1}) \mathbf{A}_3$$

(Ec. 2.61)

Como la matriz $\Delta \mathbf{Y}_b$ se encuentra conformada por submatrices, para facilitar las operaciones, se puede definir la matriz Z_b' de la siguiente manera:

$$Z'_b = \begin{bmatrix} L & K^T \\ K & M \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.62)

donde:

L = submatriz de barras no afectadas por acoplamientos: (n-p)x(n-p)

M = submatriz de barras afectadas por acoplamientos: (pxp)

K = submatriz que contiene los dos tipos de barras: px(n-p)

Desarrollando los productos matriciales se llega a obtener:

$$(U - Z'_b \Delta Y_b)^{-1} = \begin{bmatrix} sm1 & sm2 \\ sm3 & sm4 \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.63)

donde:

$$sm1 = I$$

$$sm2 = K^T R (U' - MR)^{-1}$$

$$sm3 = 0$$

$$sm4 = (U' - MR)^{-1}$$

I = matriz unitaria de dimensiones (n-p)x(n-p)

U' = matriz unitaria de dimensiones (pxp)

Si se reemplaza las ecuaciones 2.62 y 2.63 en la ecuación 2.55 y se realizan los productos matriciales se llega:

$$Z_b = \begin{bmatrix} Z_{b1} & Z_{b2} \\ Z_{b3} & Z_{b4} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.64)

donde:

$$Z_{b1} = L + K^T R (U' - MR)^{-1} K$$

$$Z_{b2} = K^T (U' - MR)^{-1}$$

$$Z_{b3} = (U' - MR)^{-1} K$$

$$Z_{b4} = (U' - MR)^{-1} M$$

De esta manera se llega a determinar la matriz impedancia de barra de secuencia cero considerando los acoplamientos mutuos. Con las matrices impedancia de barra de secuencia positiva y cero, y además considerando los voltajes de prefalla en las barras igual a 1 por unidad, se procede a aplicar las ecuaciones correspondientes para calcular los voltajes y corrientes de cortocircuito.

2.4. CONSTRUCCION DE LA MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA. NUEVO ALGORITMO.

El método que se presentará a continuación y que fuera desarrollado por Proulx y Crevier, es el punto de partida para implementar el modo de operación 2 del programa. El método presentado anteriormente, no considera las cargas, los elementos shunt y los taps de los transformadores dentro del análisis, sin embargo estos factores pueden tener una influencia significativa en el cálculo de cortocircuitos.[5]

Para incluir estos elementos en el análisis de cortocircuitos, se debe desarrollar un algoritmo que utilice el flujo de potencia para obtener los voltajes de prefalla, provocando que se incremente el tiempo requerido para la formación de la matriz impedancia de barra. Los algoritmos de flujo de potencia utilizados serán dos, un algoritmo de flujo de potencia desacoplado rápido de Newton Raphson para hallar la matriz impedancia de barra de secuencia positiva y algoritmo de flujo de potencia de Gauss Seidel para hallar la matriz impedancia de barra de secuencia cero. En realidad lo que se obtiene con estos algoritmos es una columna de la matriz admitancia de barra, y esta columna corresponde a la barra fallada.

Los acoplamientos mutuos, en caso de existir, deben ser considerados antes de correr los flujos de potencia, para lo cual se trabaja con el algoritmo desarrollado por F. Alvarado, que incorpora los acoplamientos mutuos en la matriz admitancia de barra de secuencia cero. Por lo tanto se empezará por analizar la construcción de la matriz admitancia de barra del sistema.[7]

2.4.1. Construcción de la matriz admitancia de barra.

Este algoritmo considera la matriz admitancia de barra primitiva de los elementos con acoplamientos mutuos y la matriz admitancia de barra. A continuación se explica la forma en que se construyen estas matrices, aclarando que los acoplamientos mutuos solo se dan secuencia cero.[7]

Para la construcción de la matriz admitancia de barra de secuencia, sin considerar los acoplamientos mutuos, se utiliza la ecuación:

$$\begin{aligned} Y_{ii} &= \sum_k y_{ik} \\ Y_{ij} &= -y_{ij} \end{aligned} \tag{Ec. 2.65}$$

donde:

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

$i, j =$ barras del sistema

$k =$ barras a las cuales están conectados todos los elementos que salen de "i".

Con este algoritmo se llega a construir la matriz admitancia de barra de secuencia positiva y de secuencia cero, quedando por analizar, en caso de existir, los acoplamientos mutuos para incorporarlos dentro de la matriz admitancia de barra de secuencia cero.

La matriz admitancia primitiva de los elementos acoplados tiene la siguiente forma:

$$y = z^{-1} = \begin{bmatrix} y_{11} \cdots y_{1i} \cdots y_{1r} \\ y_{i1} \cdots y_{ii} \cdots y_{ir} \\ y_{r1} \cdots y_{ri} \cdots y_{rr} \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.66)

donde:

r = número de elementos acoplados

y_{ii} = admitancia propia del elemento.

y_{ir} = admitancia mutua entre el elemento i y el elemento r .

En base a la matriz primitiva de los elementos acoplados se construye la matriz admitancia de barra primitiva, cuya forma es:[7]

$$Y_{BP} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix}$$

(Ec. 2.67)

Una vez obtenidas las dos matrices, esto es, la matriz admitancia de barra de secuencia cero y la matriz admitancia de barra primitiva, se procede a la construcción de la matriz admitancia de barra total del sistema, siguiendo el siguiente proceso:[1]

- Se elabora una lista de los elementos acoplados, y sin considerar estos, se construye la matriz admitancia de barra aplicando el algoritmo descrito por la ecuación 2.65.
- Se construye la matriz admitancia de barra primitiva de los elementos acoplados en base a la lista que se elaboró anteriormente, para lo cual se sigue el proceso descrito por las ecuaciones 2.66 y 2.67.
- Con estas dos matrices se construye la matriz admitancia de barra final en base a la siguiente expresión:

$$Y_{ij(\text{nuevo})} = Y_{ij(\text{antiguo})} + Y_{ij(\text{primitiva})}$$

(Ec. 2.68)

donde:

$Y_{ij(\text{antiguo})}$ = elemento de la matriz admitancia de barra del sistema sin considerar los acoples.

$Y_{ij(\text{primitiva})}$ = elemento de la matriz admitancia de barra primitiva de los elementos acoplados.

$Y_{ij(\text{nuevo})}$ = elemento de la matriz admitancia de barra final del sistema.

Una vez obtenidas las matrices admitancia de barra de secuencia positiva y de secuencia cero, se procederá a describir los algoritmos para el flujo de potencia, los mismos que permiten obtener los voltajes de prefalla en todas las barras del sistema.

2.4.2. Flujos de potencia para determinar voltajes de barra.

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia, así como también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. La información principalmente que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y las potencias real y reactiva que fluye en cada línea. Sin embargo, puesto que la finalidad es determinar la matriz impedancia de barra, la única información que interesa como resultado, del estudio de flujo de potencia, es la magnitud y ángulo del voltaje en cada barra.

Existen cuatro cantidades potencialmente desconocidas que se asocian con cada barra y son: potencia activa (P), potencia reactiva (Q), módulo del voltaje ($|V|$) y el ángulo del voltaje (δ). En cada barra se especifican dos de estas cuatro cantidades y se calculan las dos restantes. Las cantidades especificadas se seleccionan de acuerdo con el siguiente análisis:[2]

- Barras de carga: estas barras por lo general no tienen generación pero en ciertos casos se puede especificar los valores de P_g y Q_g . Los valores a ingresar son las potencias de la carga (P_c y Q_c) y los valores a ser determinados son $|V|$ y δ . A estas barras por lo general se les llama barras P-Q.
- Barras de voltaje controlado: este tipo de barras mantienen constante el valor de la magnitud del voltaje. Controlando la generación de MW por medio del ajuste de la fuente de energía mecánica y la magnitud del voltaje puede ser controlada al ajustar la excitación del generador. Se especifica la potencia real de generación (P_g) y el módulo del voltaje ($|V|$) y lo que se quiere determinar es el valor de ángulo del voltaje (δ). Estas barras tiene conectado un generador y se las conoce como barras P-V.
- Barra slack: el ángulo del voltaje en esta barra sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de barra ($\delta = 0^0$), así, la magnitud del voltaje se especifica como la otra cantidad conocida y por lo general es igual a 1 por unidad. Además esta barra se debe asignar a una barra con generación.

2.4.2.1. Flujo de potencia para la red secuencia positiva.

Como se mencionó anteriormente, para construir la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, se necesita obtener los voltajes de barra del sistema, para ello es preciso correr flujos de potencia para determinar estos valores.

Cuando se corren flujos de potencia en sistemas relativamente grandes, el método de Newton Raphson desacoplado rápido representa una alternativa para mejorar tiempos de respuesta y reducir requisitos de memoria. Este método hace uso de una versión aproximada del procedimiento de Newton Raphson. El principio de desacoplamiento se sustenta en dos observaciones:[2]

- Un cambio en el ángulo de voltaje δ en una barra afecta principalmente al flujo de potencia real P en las líneas de transmisión y deja sin cambio relativamente, a la potencia reactiva Q .
- Un cambio en la magnitud del voltaje $|V|$ en una barra afecta principalmente al flujo de potencia reactiva Q en las líneas de transmisión y deja al flujo de potencia real P , sin cambiar, relativamente.

Con lo cual se obtienen dos ecuaciones desacopladas de la siguiente manera:[6]

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [H][\Delta\delta] \\ [\Delta Q] &= [L][\Delta V / V] \end{aligned} \tag{Ec. 2.69}$$

donde:

$[H]$ y $[L]$ = submatrices jacobianas

Asimismo se tiene que:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= L_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \text{cos}(\delta_i - \delta_j)) \\ H_{ii} &= -B_{ii} V_i^2 - Q_i \\ L_{ii} &= -B_{ii} V_i^2 + Q_i \end{aligned} \tag{Ec. 2.70}$$

Pero se pueden todavía realizar más simplificaciones que se justifican a través de la física de los flujos de potencia en líneas de transmisión, como se explica a continuación:[1]

- Las diferencias angulares $(\delta_i - \delta_j)$ entre dos barras típicas del sistema son, por lo general, tan pequeñas que:

$$\text{cos}(\delta_i - \delta_j) \approx 1 \tag{Ec. 2.71}$$

- Las susceptancias de las líneas B_{ij} son muchas veces más grandes que las conductancias G_{ij} , así que:

$$G_{ij} \operatorname{sen}(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (\text{Ec. 2.72})$$

- La potencia reactiva Q_i que se inyecta en cualquier barra "i" del sistema durante la operación normal es mucho menor que la potencia reactiva que fluiría si todas las líneas de la barra estuvieran en cortocircuito con la referencia. esto es:

$$Q_i \ll V_i^2 B_{ii} \quad (\text{Ec. 2.73})$$

Con estas simplificaciones, las ecuaciones del flujo de potencia desacoplado rápido son:[6]

$$\begin{aligned} \left[\frac{\Delta P}{V} \right] &= [B'] [\Delta \delta] \\ \left[\frac{\Delta Q}{V} \right] &= [B''] [\Delta V] \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.74})$$

donde:

ΔP = variación de la potencia activa neta en las barras.

ΔQ = variación de la potencia reactiva neta en las barras.

V = módulo de los voltajes de barra.

$\Delta \delta$ = variación de los ángulos del voltaje de barra.

ΔV = variación del módulo del voltaje de barra.

La matriz $[B']$ es la matriz formada por las susceptancias de barra, su dimensión es $(n-1) \times (n-1)$ (n = número de barras del sistema) y es igual a:

$$B_{ii}' = -B_{ii}$$

$$B_{ij}' = B_{ij}$$

(Ec. 2.75)

Asimismo, la matriz $[B'']$ es la matriz formada por las susceptancias de barra, pero su dimensión es $(n-1-c) \times (n-1-c)$ (n = número de barras del sistema y c = número de barras de voltaje controlado) y es igual a:

$$B_{ii}'' = -B_{ii}$$

$$B_{ij}'' = B_{ij}$$

(Ec. 2.76)

En los algoritmos de construcción de la matriz impedancia de barra, que serán descritos más adelante, interviene una impedancia de falla ficticia (Z_s), la misma que permite obtener los voltajes de barra necesarios para construir Z_B . Los pasos a seguirse para calcular los voltajes de barra antes de colocar la impedancia de falla ficticia Z_s entre la barra fallada y la referencia (nodo 0) siguiendo este método son: [1]

- Se construye la matriz admitancia de barra.
- Se calculan las potencia netas en las barras del sistema con las siguientes expresiones:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j)]$$

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i V_j [G_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

(Ec. 2.77)

- Se calculan las variaciones de potencia activa y reactiva, a excepción de la barra slack, y en las barras de voltaje controlado solo se calculan las variaciones de potencia activa.
- Se realiza la prueba de convergencia.

- De no cumplirse la prueba de convergencia, se calculan las variaciones de los voltajes de barra en módulo y ángulo, y se calculan los nuevos valores voltajes.
- Este proceso se repite hasta alcanzar convergencia para luego calcular la potencia activa y reactiva de la barra slack y las potencia reactiva de las barras de voltaje controlado.
- Si las potencias reactivas calculadas en las barras de voltaje controlado no han excedido los límites, el proceso termina, caso contrario se fija este valor al límite más cercano y se convierte a esta barra en una barra de carga, repitiendo nuevamente el proceso.

Para tener una idea más clara de este procedimiento, se presenta en la figura 2.7 un diagrama de bloques correspondiente al flujo de potencia desacoplado rápido.

Para hallar los voltajes de barra luego de colocar la impedancia de falla ficticia Z_s , el procedimiento a seguirse es básicamente el mismo con ciertas modificaciones que se detallan a continuación:[1]

- Se modela las cargas como impedancia constante, y se las incluye en la matriz admitancia de barra con la siguiente ecuación:

$$Y_{C_i}^{(1)} = \frac{P_{C_i} - jQ_{C_i}}{|V_{i0}^{(1)}|^2}$$

(Ec. 2.78)

Para incluir esta carga en la matriz Y_{BARRA} de secuencia positiva, se suma $Y_{C_i}^{(1)}$ al elemento Y_{ii} de dicha matriz.

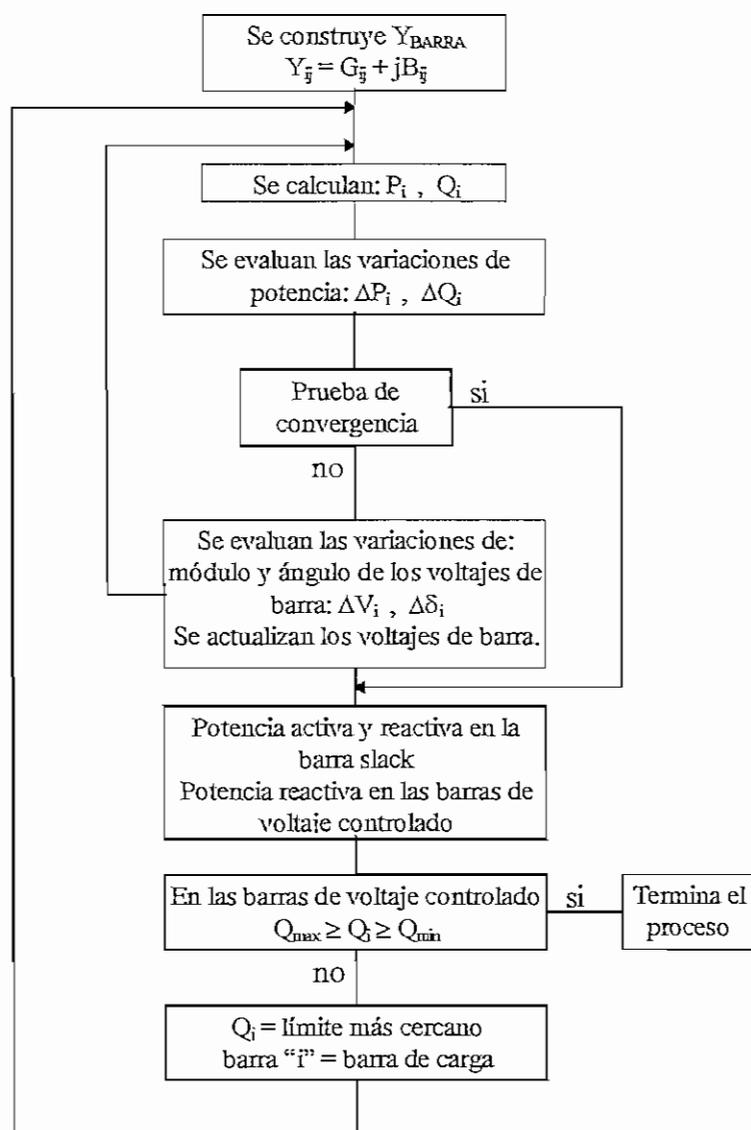


Fig. 2.7

- Para calcular los voltajes luego de colocar la impedancia de falla ficticia Z_s , las barras de generación se comportan como barras slack dentro del algoritmo utilizado, manteniendo constante los voltajes de barra tanto en módulo como en ángulo. Esto se debe a que al momento de introducir la impedancia ficticia de falla Z_s , todos los generadores se fijan a sus voltajes anteriores, ya que estos son reemplazados por fuentes de voltaje constante entre el nodo de referencia (nodo 0) y la impedancia del generador.
- Por la razón expuesta anteriormente, la prueba de máxima y mínima generación de reactivos no se la realiza.

2.4.2.2. Flujo de potencia para la red secuencia cero.

El algoritmo basado en el flujo de potencia, que fue utilizado para formar la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, suele tener problemas de convergencia cuando solamente una fuente de voltaje es representada en la red. Por esta razón se adopta el algoritmo de Gauss Seidel simplificado para los cálculos en secuencia cero. De hecho se considera solamente una barra generadora en la red de secuencia cero.[5]

El objetivo es calcular los voltajes de barra luego de incluir la impedancia de falla ficticia Z_s , los mismos que servirán para determinar la matriz impedancia de barra de secuencia cero.

Como se mencionó anteriormente, la red de secuencia cero solo tiene generación en la barra "q" (slack) y además como las cargas son balanceadas no tienen componente de secuencia cero; por ello las potencias en todas las barras, con excepción de la barra slack, son cero. Con estas consideraciones se llega a establecer la siguiente ecuación que permite obtener los voltajes de barra:[5]-[3]

$$V_{ps}^{(0)[k+1]} = V_{ps}^{(0)[k]} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq p}}^n \frac{Y_{ip}^{(0)} V_{is}^{(0)[k]}}{Y_{pp}^{(0)}} \quad (\text{Ec. 2.79})$$

donde:

$p = 1, 2, \dots, n$; para $p \neq q$ (barra slack)

Como esta ecuación es lineal la convergencia se alcanza rápidamente, adoptando el siguiente criterio:[1]

$$\max |V_{ps}^{(0)[k+1]} - V_{ps}^{(0)[k]}| \leq \epsilon \quad (\text{Ec. 2.80})$$

2.4.3. Construcción de la matriz impedancia de barra.

En base a los voltajes de barra obtenidos con los flujos de potencia, corresponde ahora analizar cómo formar la matriz impedancia de barra. En realidad lo que se forma con el algoritmo que se va a describir, es una columna de la matriz impedancia de barra, y esta columna corresponde a la de la barra fallada.

2.4.3.1. Matriz Z_B de secuencia positiva.[5]

Si se tiene un sistema de "n" barras, el voltaje en el nodo "p" cuando una falla con una impedancia " Z_f " ocurre en cualquier nodo "q" es:

$$V_{pf}^{(1)} = V_{p0}^{(1)} - \frac{V_{q0}^{(1)} Z_{qp}^{(1)}}{Z_{qq}^{(1)} + Z_f}$$

(Ec. 2.81)

donde:

$V_{pf}^{(1)}$ = voltaje de falla en el nodo "p" cuando una falla con una impedancia Z_f ocurre en el nodo "q".

$V_{p0}^{(1)}$, $V_{q0}^{(1)}$ = voltajes de prefalla en los nodos "p" y "q".

$Z_{qp}^{(1)}$, $Z_{qq}^{(1)}$ = "pq" y "qq" son componentes de la matriz impedancia de barra.

Z_f = impedancia de falla en el nodo "q".

La ecuación 2.81 es válida para cualquier valor de la impedancia de falla Z_f . Por lo tanto si se reemplaza Z_f por una impedancia de valor conocido Z_s en el nodo "q", la expresión para el voltaje de falla en esta barra de acuerdo con la ecuación 2.81 es:

$$V_{qs}^{(1)} = V_{q0}^{(1)} - \frac{V_{q0}^{(1)} Z_{qq}^{(1)}}{Z_{qq}^{(1)} + Z_s}$$

(Ec. 2.82)

En la ecuación 2.82 el valor de Z_s es conocido, mientras que el valor del voltaje inicial en la barra "q" ($V_{q0}^{(1)}$) es determinado mediante un flujo de potencia sin considerar el valor de Z_s . De las dos restantes variables desconocidas, $Z_{qq}^{(1)}$ y $V_{qs}^{(1)}$, esta última es calculada usando un flujo de potencia con el valor de Z_s conocido y añadido entre la barra fallada y tierra. Por lo tanto, de la ecuación 2.82, se despeja el valor de Z_{qq} y se obtiene:

$$Z_{qq}^{(1)} = Z_s \frac{V_{q0}^{(1)} - V_{qs}^{(1)}}{V_{qs}^{(1)}} \quad (\text{Ec. 2.83})$$

reemplazando el valor de $Z_{qq}^{(1)}$ de la ecuación 2.83 en la ecuación 2.81 se llega a obtener:

$$Z_{qp}^{(1)} = Z_s \frac{V_{p0}^{(1)} - V_{ps}^{(1)}}{V_{qs}^{(1)}} \quad (\text{Ec. 2.84})$$

Una vez conocidos los elementos de la matriz impedancia de barra, las corrientes y voltajes de cortocircuito pueden ser fácilmente calculadas para cualquier falla en el nodo "q", y es aquí en donde juega un papel importante el valor de Z_s , ya que de este dependen el cálculo de $V_{qs}^{(1)}$ y $V_{ps}^{(1)}$.

Por ejemplo si se usa un valor de Z_s muy pequeño o igual a cero, un cortocircuito real es simulado con el programa de flujo de potencia y el voltaje final será muy pequeño, consumiendo mucho mas tiempo (más iteraciones) y por consiguiente produce problemas de convergencia. Con todo esto lo que se llega a obtener es que el valor de $Z_{qp}^{(1)}$ es una indeterminación.

Por otro lado si el valor de Z_s es demasiado grande, la diferencia entre los voltajes antes y después de la perturbación pueden ser menor que la tolerancia del programa de flujo de potencia y los valores de los elementos de

la matriz impedancia de barra calculados con estos voltajes serán consecuentemente irrelevantes.

La aproximación de los elementos de la matriz impedancia de barra depende de la tolerancia (criterio de convergencia) del programa de flujo de potencia. Además la selectividad que tiene el valor de Z_s es para obtener un máximo grado de precisión con el mínimo número de iteraciones y el correspondiente tiempo del CPU.

Según pruebas realizadas por Proulx y Crevier en su estudio "Nuevo algoritmo iterativo para el cálculo de cortocircuitos" se llega a determinar que el valor de Z_s , con el cual se llega a tener el máximo grado de exactitud en la construcción de la matriz impedancia de barra y con un mínimo número de iteraciones es:[5]

$$Z_s = (0 + j2)[pu] \quad (\text{Ec. 2.85})$$

Este mismo valor es obtenido en la tesis "Nuevos algoritmos para el cálculo de cortocircuitos en grandes sistemas de potencia".[1]

2.4.3.2. Matriz Z_B de secuencia cero.[5]

La matriz impedancia de barra de secuencia cero, es formada de la misma manera que la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, pero con la diferencia de que se añade una sola fuente de voltaje en el nodo de estudio, ya que en esta secuencia no existen fuentes más fuentes.

Todos los voltajes son iguales a cero en magnitud y en ángulo y no circula corriente por los elementos del sistema, por lo que, para simular una falla con una impedancia Z_s se debe añadir una fuente de voltaje entre esta impedancia y la referencia (nodo 0). La ecuación 2.81 usada para el cálculo de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, es válida también en secuencia

cero, pero todos los voltajes deben ser descritos en términos del nuevo voltaje de referencia V_r . Por lo tanto la ecuación 2.81, que permite obtener el voltaje en una barra "p" cuando una falla con impedancia Z_s ocurre en la barra "q", para secuencia cero se expresa de la siguiente forma:

$$(V_{ps}^{(0)} - V_r) = (V_{p0}^{(0)} - V_r) - \frac{(V_{q0}^{(0)} - V_r)Z_{pq}^{(0)}}{Z_{qq}^{(0)} + Z_s} \quad (\text{Ec. 2.86})$$

Como los voltajes iniciales del sistema de secuencia cero ($V_{p0}^{(0)}$ y $V_{q0}^{(0)}$) son iguales a cero, la ecuación 2.86 puede ser simplificada y se tiene:

$$V_{ps}^{(0)} = \frac{V_r Z_{pq}^{(0)}}{Z_{qq}^{(0)} + Z_s} \quad (\text{Ec. 2.87})$$

Si lo que se quiere es determinar el voltaje en el nodo "q", se puede utilizar la ecuación 2.87:

$$V_{qs}^{(0)} = \frac{V_r Z_{qq}^{(0)}}{Z_{qq}^{(0)} + Z_s} \quad (\text{Ec. 2.88})$$

despejando de la ecuación 2.88 el valor de $Z_{qq}^{(0)}$:

$$Z_{qq}^{(0)} = Z_s \frac{V_{qs}^{(0)}}{V_r - V_{qs}^{(0)}} \quad (\text{Ec. 2.89})$$

sustituyendo el valor de $Z_{qq}^{(0)}$ de la ecuación 2.89 en la ecuación 2.87 y despejando el valor de $Z_{pq}^{(0)}$ se tiene:

$$Z_{pq}^{(0)} = Z_s \frac{V_{ps}^{(0)}}{V_r - V_{qs}^{(0)}} \quad (\text{Ec. 2.90})$$

donde:

$V_{ps}^{(0)}$ = voltaje de secuencia cero en la barra "p" cuando existe una impedancia cualquiera en la barra "q".

$V_{qs}^{(0)}$ = voltaje de secuencia cero en la barra "q" cuando en esta barra se coloca una impedancia Z_s .

La matriz impedancia de barra de secuencia cero es calculada de la misma manera que la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, pero los datos que se usa en cada caso son diferentes, dependiendo de cada sistema equivalente, por lo tanto todas las impedancias deben ser de secuencia cero.

Como en esta secuencia la única barra de generación es la barra "q", esta será la barra oscilante (barra slack) y se tiene:

$$V_{qs}^{(0)} = 1 \angle 0^\circ \quad (\text{Ec. 2.91})$$

Así mismo, los valores de Z_s y V_r son arbitrarios, pero se asume que el voltaje V_r se igual a:

$$V_r = 2V_{qs}^{(0)} \quad (\text{Ec. 2.92})$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.91 y 2.92 en la ecuación 2.89 se obtiene:

$$Z_{qq}^{(0)} = Z_s \quad (\text{Ec. 2.93})$$

de igual forma, si se reemplaza la ecuación 2.93 en la ecuación 2.90 se tiene:

$$Z_{pq}^{(0)} = Z_{qq}^{(0)} V_{ps}^{(0)} \quad (\text{Ec. 2.94})$$

Falta determinar el valor de $Z_{qq}^{(0)}$, para lo cual se parte de la definición de la potencia neta en la barra "q" y se llega a obtener la siguiente expresión:[3]

$$Z_{qq}^{(0)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Y_{qi}^{(0)} V_{is}^{(0)}}$$

(Ec. 2.95)

donde:

n = número de barras del sistema en secuencia cero.

$Y_{qi}^{(0)}$ = elemento "qi" de la matriz admitancia de barra en secuencia cero.

De esta manera se llega a determinar las matrices de secuencia positiva y secuencia cero, las mismas que serán utilizadas al momento de calcular las corrientes y voltajes de cortocircuito en el modo de operación 2.

CAPITULO III

DESCRIPCION Y ALCANCE DEL PROGRAMA

Este capítulo pretende dar una idea general sobre las habilidades del programa cuyo objetivo es obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito en un sistema eléctrico de potencia. Se empezará por analizar los datos requeridos y forma en que se los suministra al programa; cómo se realiza el manejo interno de los mismos y los reportes que se pueden obtener.

Asimismo se efectuará un breve análisis sobre las ventajas de programar en un lenguaje que permite trabajar con una interfaz gráfica para el manejo de pantallas, menús y reportes, con lo cual se llega a tener un producto bien presentado.

3.1. EL COMPUTADOR Y LOS PROBLEMAS DE INGENIERIA.[3]

La solución de los problemas de ingeniería que involucran la aplicación del computador digital tiene como marco de referencia un cierto número de pasos los cuales se detallan a continuación:

1. *Definición del Problema.*- Inicialmente el problema debe ser definido precisando y determinando los objetivos. Estos objetivos pueden ir aumentando en grado de dificultad a medida que se vaya desarrollando el problema.
2. *Formulación matemática.*- Luego de que el problema a sido definido, es necesario el desarrollo del modelo matemático que permita representar físicamente el sistema. Para esto se necesita especificar las

- características de los componentes individuales del sistema así como también las relaciones que rigen la interconexión de estos elementos.
3. *Selección de la Técnica de Solución.*- Para seleccionar la técnica de solución, se debe tomar en cuenta que el problema de ingeniería involucra expresiones matemáticas, tal como un conjunto de ecuaciones lineales, ecuaciones diferenciales, funciones trigonométricas, operaciones con números complejos, etc. Por ello se debe escoger una técnica de solución la cual permita obtener resultados con un alto grado de exactitud.
 4. *Diseño del Programa.*- La secuencia lógica de los pasos a seguirse para la solución del problema, los requerimientos de memoria, entrada y salida de datos, salida de resultados, etc., son aspectos a tomarse en cuenta en el diseño del programa. El diseño del programa es usualmente preparado en forma de diagrama.
 5. *Programación.*- El lenguaje de programación a utilizarse contiene una serie de instrucciones las cuales una vez escritas son interpretadas y ejecutadas por el computador. Las instrucciones serán utilizadas por el programador de acuerdo a los requerimientos y operaciones que necesite hacer para cumplir con el diseño del programa.
 6. *Verificación del Programa.*- Una vez elaborado el programa se debe someterlo a varias pruebas para poder verificar si los resultados que se entrega son correctos, de no ser así, se debe tomar medidas correctivas para entregar un producto con un alto grado de confiabilidad.
 7. *Aplicación.*- Los programas de ingeniería en general, se los puede clasificar en dos grupos:
 - Programas de propósito particular: los cuales son desarrollados en periodos relativamente cortos de tiempo y permite obtener la solución a un problema simple de ingeniería.
 - Programas de propósito general: programas que son desarrollados para el análisis de un gran problema de ingeniería

y que son utilizados como parte integral de la Ingeniería de los Sistemas de Potencia.

Una vez analizados estos pasos, se continúa con la implementación de los algoritmos descritos y presentados a lo largo del Capítulo II, para lo cual se parte con una breve descripción del lenguaje de programación escogido.

3.2. PROGRAMACION EN VISUAL BASIC V4.0 PARA 32 BITS.

Visual Basic es un sistema de desarrollo diseñado especialmente para crear aplicaciones gráficas de una forma rápida y sencilla. Incluye una utilidad para diseños gráficos y un lenguaje de alto nivel. Además está centrado en dos tipos de objetos: ventanas y controles, que permiten diseñar sin programar, un mecanismo de comunicación (interfaz) para una aplicación.[9]

Visual Basic ayuda a ser más productivo proporcionando herramientas apropiadas para los diferentes aspectos del desarrollo de la interfaz gráfica del usuario (IGU). Puede crear la IGU de una aplicación colocando objetos de manera gráfica. Se define las propiedades de estos objetos para concretar su apariencia y comportamiento, después se hace que esta interfaz se relacione con el usuario escribiendo el código que responde a los eventos que ocurren en la interfaz.[10]

Una de las muchas ventajas que presenta esta versión de Visual Basic es que todos los procesos los realiza con 32 bits, lo cual hace que las aplicaciones se ejecuten rápidamente. Otra de las ventajas es que permite realizar automáticamente, sin programar, los discos de instalación, con lo cual se puede distribuir la aplicación e instalarla en cualquier otra máquina con un sistema operativo Windows 95 o superior.

Queda claro que el lenguaje de programación escogido, es una herramienta muy poderosa, con la cual se llena todas las expectativas de tener un programa digital amigable al usuario y que el tiempo utilizado para calcular voltajes y corrientes de cortocircuito sea lo más corto posible, expectativas que se plantearon al inicio del presente estudio.

3.3. CONCEPCION BASICA DEL PROGRAMA.

Este programa fue concebido con la finalidad de ser utilizado a nivel didáctico en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia y que permita al usuario interactuar con el mismo en una forma ágil y sencilla.

Por las razones antes indicadas, se requería de un lenguaje de programación que permita manejar una interfaz gráfica (pantallas, menús y reportes) y que todo su desarrollo se realice en un ambiente Windows. El lenguaje seleccionado para desarrollar este programa es Visual Basic V4.0 (32 bits), que satisface los requerimientos previos.

El lenguaje de programación seleccionado, presenta limitaciones para el manejo de números complejos, razón por la cual, ha sido necesario trabajar con la parte real y parte imaginaria en forma separada.

El programa desarrollado presenta la posibilidad de realizar el cálculo de cortocircuitos por medio de dos algoritmos: el primero, en el que se desprecian los efectos de las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt; produciendo con esto un menor número de iteraciones y posiblemente un menor tiempo de simulación; y el segundo, donde se incorporan las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt, consiguiendo con esto una mayor precisión en los resultados, a cambio de un aumento en el número de iteraciones y por tanto, un posible aumento en el tiempo de simulación. La existencia de estos dos algoritmos, implica asimismo, la existencia de dos

formas diferentes para la construcción de la matriz impedancia de barra. Por esta razón, el programa ha sido dividido en dos modos de operación, cada uno de los cuales está ligado a un algoritmo.

Por las características del programa es necesario trabajar con un menú principal, a través del cual, se desplegarán una serie de ventanas conforme se avance en la simulación. En dichas ventanas se detalla los parámetros que debe ingresar el usuario, para luego presentar los reportes que seleccione.

Durante el proceso de simulación, el usuario puede editar, aumentar o imprimir los datos ingresados según sean sus requerimientos. Si se produce un error en este proceso aparecerá un mensaje que le permite al usuario corregir la situación presentada.

Para poder trabajar exitosamente con el programa, es necesario, tener el diagrama unifilar del sistema a simular, en el que se identifiquen las barras y elementos con números; esto hará que tanto el ingreso de datos, como la interpretación de resultados se facilite. Se requiere además que el usuario del programa tenga conocimientos básicos de trabajo en ambiente Windows.

3.4. INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA.

Al iniciar el programa, lo primero que se debe hacer es escoger el modo de operación que corresponde al algoritmo sobre el que se va a trabajar, esto depende de los datos del sistema que se posea. Para ello existe una opción en el menú principal, la cual despliega una pantalla que se indica en la figura 3.1.

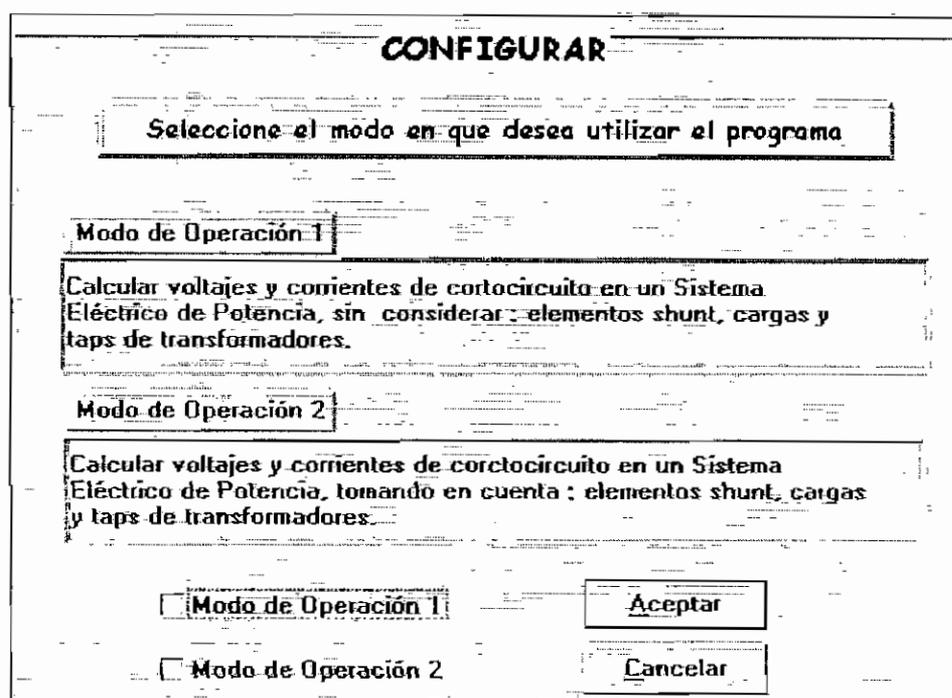


Fig. 3.1

El usuario puede simular el mismo sistema en los dos modos de operación, y así obtener los resultados que le permitan analizar los efectos que tiene en el análisis de cortocircuitos el desprestigiar las cargas, taps de transformadores y elementos shunt (capacitores o reactores).

Una vez seleccionado el modo de operación, se activan los menús y opciones que correspondan al modo de operación seleccionado, y se puede seguir con el proceso de ingreso de datos, cuyo detalle se lo presentará mas adelante.

3.4.1. Datos generales del sistema.

Al escoger esta opción se presentará una pantalla, como la que se muestra en la figura 3.2, que permite ingresar toda la información de tipo general del sistema como: título del caso a analizar, el número total de barras del sistema, la existencia o no de los datos de la red de secuencia cero, la existencia o no de acoplamiento mutuos en el sistema, y por último un comentario adicional acerca del caso a simular.

DATOS GENERALES DEL SISTEMA

Titulo del caso a analizarse:

Número total de barras:

Posee datos de la red de sec. cero: Si No

Existen acoplamientos mutuos: Si No

Comentario adicional del caso:

Fig. 3.2

Los datos ingresados se asignan a las variables respectivas, dependiendo del modo de operación escogido. La pantalla que se presenta en la figura 3.2 es la misma para los dos modos de operación.

La opción de existencia de acoplamientos mutuos, aparece desactivada en un principio, pero si el usuario posee datos de la red de secuencia cero, esta se activará automáticamente, dando al usuario la posibilidad de indicar si existe o no acoplamientos mutuos en el sistema. Es necesario aclarar que el usuario, al no poseer datos de la red de secuencia cero, podrá simular solamente una falla trifásica, falla tres fases - tierra y una falla bifásica, y además no se activará la opción de ingreso de los acoplamientos mutuos ya que estos solo existen en secuencia cero.

Se debe indicar que el programa trabaja sobre una potencia base de 100 MVA, para los dos modos de operación.

3.4.2. Datos de elementos del sistema.

El ingreso de los datos de los elementos es diferente dependiendo del modo de operación seleccionado, pero las pantallas en algunos casos son parecidas, por lo tanto se analizará por separado esta rutina de ingreso.

3.4.2.1. Ingreso de datos para el modo de operación 1.

En este modo de operación, se ingresan tres tipo de elementos: generadores, transformadores y líneas de transmisión, existiendo una pantalla común en la cual se ingresan los nodos inicial y final (nodos "p" y "q"), y luego se escoge el tipo de elemento para ingresar sus parámetros. La pantalla que se presenta al para el ingreso de estos elementos, se indica en la figura 3.3.

The screenshot shows a graphical user interface window titled "ELEMENTO:1". At the top, there are two input fields labeled "Nodo P" and "Nodo Q". Below these are three menu options, each in a rectangular box: "Datos de Generador >>>", "Datos de Transformador >>>", and "Datos de Línea >>>". At the bottom of the window, there are four buttons arranged in two rows: "Continuar" and "Terminar" in the top row, and "Cancelar" and "Ayuda" in the bottom row.

Fig. 3.3

a) Generadores.

Al presionar la opción de **Datos de Generador** en la pantalla de la figura 3.3, se desplegará la pantalla que se indica en la figura 3.4. Se debe aclarar, que para el caso particular de los generadores, el nodo inicial o nodo "p" es el nodo cero, el cual servirá de referencia durante todo el análisis. El usuario ingresará la impedancia de secuencia positiva, la impedancia de secuencia cero y la reactancia de puesta a tierra.

GENERADOR	
Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: X	<input type="text"/>
Reactancia de puesta a tierra p.u.: X_n	<input type="text"/>
<input type="button" value="Aceptar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>
<input type="button" value="Ayuda"/>	

Fig. 3.4

El valor total de la impedancia de secuencia cero se determina internamente sumando al valor ingresado de secuencia cero tres veces el valor de la reactancia de puesta a tierra. Si en el ingreso de los datos generales del sistema el usuario a indicado que no posee los datos de la red de secuencia cero, se presenta la misma pantalla de la figura 3.4, pero desactivadas las opciones de ingresar los parámetros de la red de secuencia cero.

Los datos ingresados son asignados a las variables respectivas y si se tienen más elementos se continuará con el ingreso. Se recomienda que los generadores sean los primeros elementos que se ingresen en el sistema.

b) Transformadores.

La pantalla de ingreso de los parámetros del transformador se presenta en la figura 3.5, y aparecerá si el usuario presiona de la pantalla de la figura 3.3 la opción **Datos de Transformador**.

En la pantalla de la figura 3.5 se ingresan la impedancia de secuencia positiva y, si en el ingreso de los datos generales del sistema el usuario a indicado que posee los datos de la red de secuencia cero, la impedancia de secuencia cero. Además al presionar el botón **Conexión**, se desplegará una pantalla, figura 3.6, en donde el usuario podrá escoger el tipo de conexión del transformador.

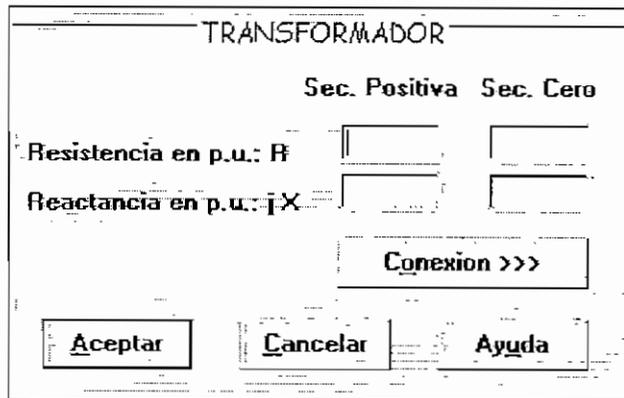


Fig. 3.5

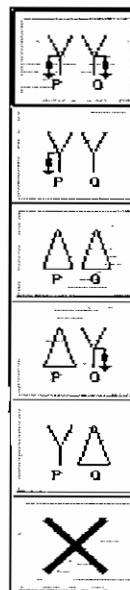


Fig. 3.6

En la selección del tipo de conexión se debe tener cuidado de que los nodos identificados como "p" y "q" en la pantalla de la figura 3.3, correspondan a los nodos "p" y "q" de los tipos de conexión que se presentan en la pantalla de la figura 3.6. Tal es el caso, por ejemplo, de una conexión Δ -Yt que podría ser identificada como Yt- Δ si los nodos "p" y "q" no son ingresados adecuadamente. Cuando se ha seleccionado la conexión Yt-Yt o Δ -Yt se presenta la pantalla que se indica en la figura 3.7 para ingresar la reactancia de puesta a tierra. Si ya se ha ingresado los datos de las impedancias en secuencia positiva y secuencia cero y se pasa directamente a botón **Aceptar**

sin presionar el botón **Conexión** para escoger el tipo de conexión del transformador, el programa por defecto asume una conexión Yt-Yt, con una reactancia de puesta a tierra igual a cero.

Si en el ingreso de los datos generales del sistema se ha indicado que no se dispone de los datos de la red de secuencia cero, aparecerán desactivados tanto el ingreso de la impedancia de secuencia cero como el botón **Conexión**.

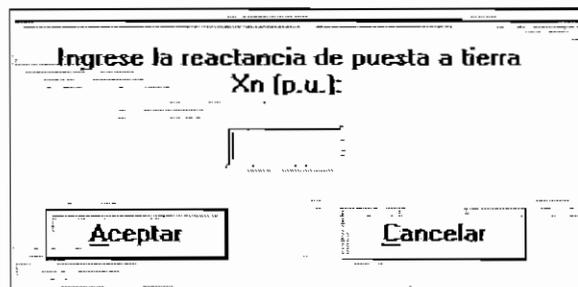


Fig. 3.7

El circuito equivalente del transformador en secuencia cero, depende del tipo de conexión y cuyo esquema se muestra en la figura 3.8.[2]

Como se puede ver en la figura 3.8, existen ramas de circuito abierto que corresponden a impedancia infinitas en la red de secuencia cero; por lo que se hace necesario un tratamiento especial durante la construcción de la matriz impedancia de barra de secuencias, principalmente cuando el elemento en cuestión es una rama, puesto que cuando se trata de un enlace, no se produce variación alguna en la matriz impedancia de barra de secuencias. Para ello se aplica el algoritmo descrito en el Capítulo II, sección 2.3.2.4.[1]

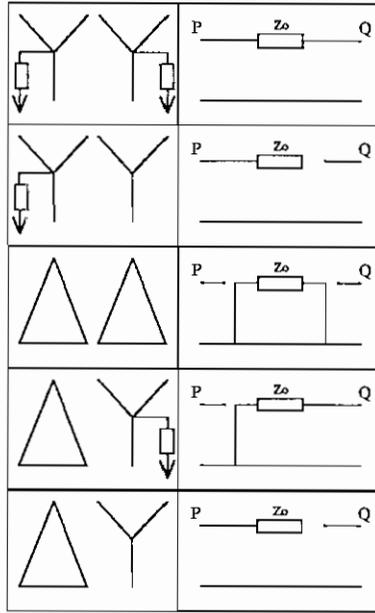


Fig. 3.8

c) Líneas de Transmisión.

Si el usuario presiona en la pantalla 3.3 la opción **Datos de Línea** se despliega la pantalla que se indica en la figura 3.9.

The screen is titled "LINEA DE TRANSMISION". It contains two columns of input fields. The left column has labels "Resistencia en p.u.: R" and "Reactancia en p.u.: X". The right column has labels "Sec. Positiva" and "Sec. Cero". Below these fields are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Ayuda".

Fig. 3.9

En esta pantalla el usuario debe ingresar la impedancia de la línea de transmisión, tanto de secuencia positiva como de secuencia cero. Pero si el usuario indicó en el ingreso de los datos generales del sistema que no posee

los datos de la red de secuencia cero, la opción para el ingreso de los parámetros de secuencia cero aparecerá desactivada.

“ Para optimizar recursos de memoria y velocidad del computador, así como agilizar la ejecución del algoritmo de ordenamiento de los elementos descrito en el capítulo II, sección 2.3.2.1., se recomienda que el orden de ingreso de los elementos sea: generadores, transformadores y por último las líneas de transmisión. Pero esto no limita al usuario a ingresar los elementos en el orden que desee.”

3.4.2.2. Ingreso de datos para el modo de operación 2.

En este modo de operación, se pueden ingresar datos de: generadores, transformadores con la posición de taps, líneas de transmisión y elementos shunt (capacitores o reactores). Además se necesitarán ingresar datos de las barras para poder correr los flujos de potencia y llegar a obtener los voltajes de prefalla en todas las barras del sistema.

Para el ingreso de datos existe una pantalla, figura 3.10, en donde se ingresan los nodos entre los cuales está conectado el elemento y a continuación se indica el tipo de elemento cuyos datos se desea ingresar. Posteriormente aparece una pantalla particular para cada tipo de elemento, en donde se ingresan los parámetros correspondientes al elemento seleccionado.

ELEMENTO:1

Nodo P

Nodo Q

Datos de Generador >>>

Datos de Transformador >>>

Datos de Línea >>>

Capacitor o Rector >>>

Continuar Terminar

Cancelar Ayuda

Fig. 3.10

a) Generadores.

Ingresados los nodos inicial o "p" y final o "q" del generador , se presiona el botón **Datos de Generador** y se desplegará la pantalla que se indica en la figura 3.11. El usuario debe tomar en cuenta que como se trata de un generador, el nodo inicial es el nodo de referencia.

GENERADOR

	Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: jX	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia de puesta a tierra p.u.: jX_n	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Aceptar Cancelar Ayuda

Fig. 3.11

Cuando en los datos generales, se ha indicado que el usuario no se posee datos de la red secuencia cero, la opción del ingreso de los datos del generador en esta secuencia se desactiva. El circuito equivalente de los generadores se indica en la figura 3.12.[1]

En secuencia cero, existe la reactancia de puesta a tierra, la misma que multiplicada por tres se suma a la reactancia de secuencia cero del generador para tener el valor total de la reactancia de secuencia cero. Para secuencia positiva, los datos que se deben ingresar son la resistencia y reactancia del generador. Los datos ingresados se asignan a las variables respectivas luego de verificar que su formato sea el correcto.

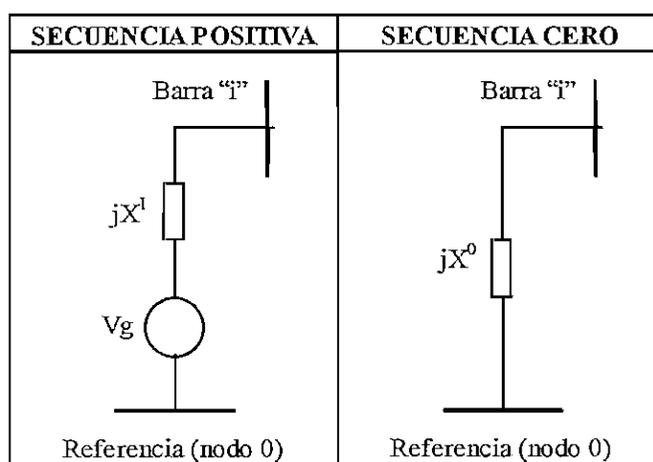


Fig. 3.12

b) Transformadores.

Al presionar en la pantalla de la figura 10 el botón **Datos de Transformador**, se despliega la pantalla que se indica en la figura 3.13. Aquí se presenta al usuario la posibilidad de ingresar la reactancia del transformador tanto en secuencia positiva como en secuencia cero. Además se debe ingresar la posición de los taps del transformador, tanto en el lado del nodo "p" como en el lado del nodo "q" y el tipo de conexión.[2]

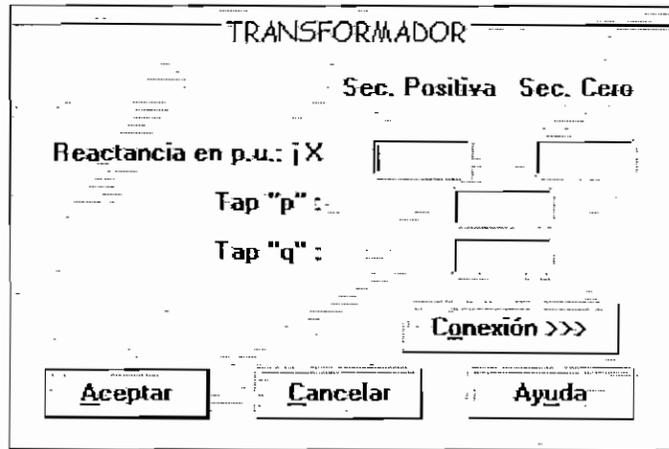


Fig. 3.13

Para seleccionar el tipo de conexión se debe presionar el botón **Conexión**, y se desplegará la pantalla que se indica en la figura 3.6. Si se escoge el primer tipo de conexión (Yt-Yt) o el cuarto tipo de conexión (Δ -Yt), aparece la pantalla que se indica en la figura 3.7, en donde se ingresa el valor de la reactancia de puesta a tierra en por unidad. Si, una vez llenados los campos de la pantalla de la figura 3.13, se pasa directamente a presionar el botón **Aceptar** sin presionar previamente el botón **Conexión** y escoger el tipo de conexión, el programa por defecto asume una conexión Yt-Yt y con una reactancia de puesta a tierra igual a cero.

Para tener una idea más clara, se presenta en la figura 3.14, los circuitos equivalentes del transformador, tanto en secuencia positiva como en secuencia cero.

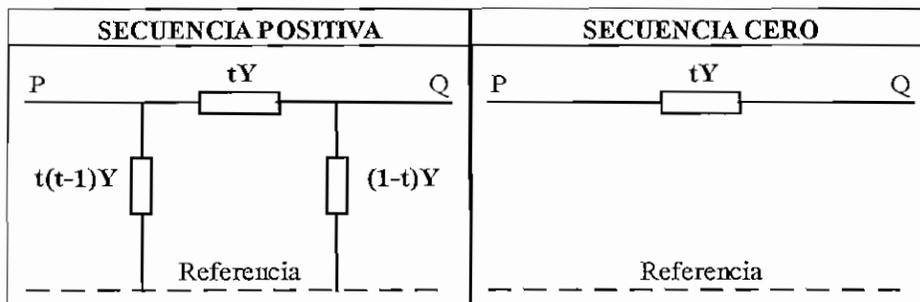


Fig. 3.14

donde:

Y = admitancia del transformador en por unidad.

t = tap "q" / tap "p".

La representación del transformador en secuencia cero es diferente, porque el sistema es balanceado. Como consecuencia de seleccionar el tipo de conexión de los transformadores, aparecen ramas de impedancia infinita tal como se indica en la figura 3.8, cuyo tratamiento es diferente al señalado en el modo de operación 1; ya que en este caso el elemento que crea una rama de impedancia infinita es eliminado de la lista de elementos en secuencia cero.

c) Líneas de Transmisión.

Si en la pantalla mostrada en la figura 3.10, se selecciona la opción **Datos de Línea**, se presenta la pantalla que se indica en la figura 3.15. Esta pantalla permite ingresar datos de secuencia positiva y de secuencia cero cuando esta última opción esté activada. Para ilustrar el significado de los datos que se deben ingresar, en la figura 3.16 se presenta el circuito equivalente de una línea de transmisión para secuencia positiva y secuencia cero.

	Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: jX	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Suceptancia en p.u.: jB	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fig. 3.15

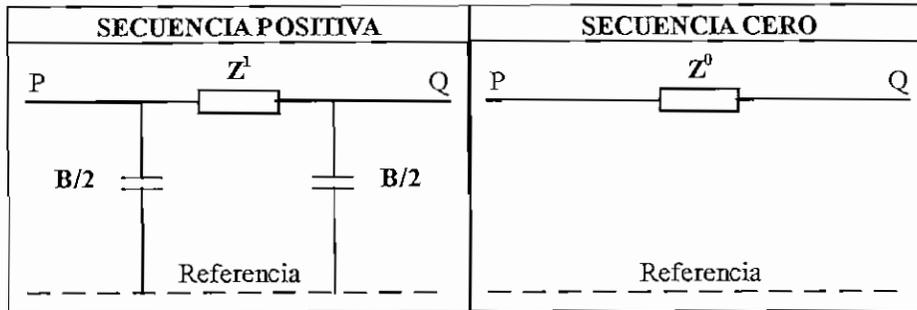


Fig. 3.16

Es necesario aclarar, respecto a la susceptancia, que se debe ingresar el valor total y no el de B/2. Este y todos los datos son asignados a las variables respectivas, luego de realizar una validación general de los mismos. Si en este proceso de validación se detectan inconsistencias de formato, aparecerán los mensajes de error correspondientes.

d) Capacitores y/o Reactores.

Estos elementos existen solo en secuencia positiva por ser el sistema balanceado y su conexión se la realiza entre una barra cualquiera y el nodo de referencia (nodo 0). Su ingreso se lo realiza a través de la pantalla que se indica en la figura 3.17.

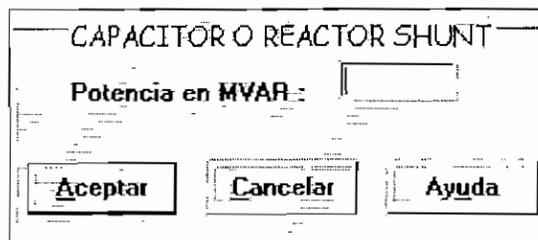


Fig. 3.17

Cuando el elemento que se incorpora al sistema es un capacitor la potencia que se ingresa será positiva, mientras que si el elemento es un reactor la potencia será negativa.

3.4.3. Acoplamiento mutuo.

El ingreso de los elementos acoplados es el mismo para el modo de operación 1 y 2 y la pantalla que nos permite realizarlo se muestra en la figura 3.18. Los acoplamiento mutuo en un sistema de potencia, se dan entre líneas de transmisión y son considerados solo en secuencia cero.

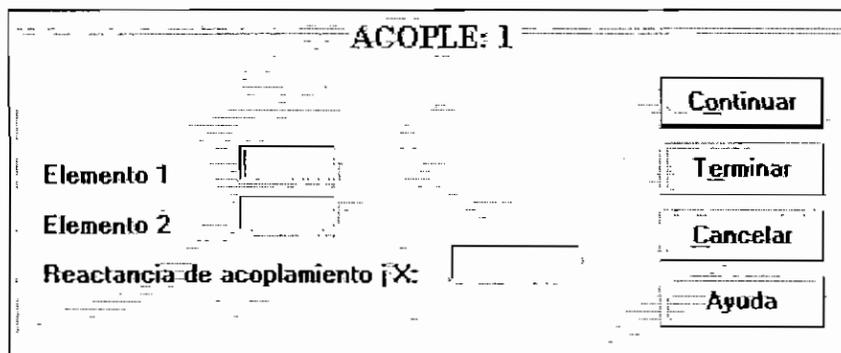


Fig. 3.18

La opción para el ingreso de acoplamiento mutuo se encontrará disponible siempre y cuando, en el ingreso de los datos generales, se indique que si se posee datos de la red de secuencia cero y además que existen acoplamiento mutuo en el sistema. Para poder ingresar correctamente los elementos acoplados se debe tener en cuenta el sentido de circulación de la corriente, tal como se indica en la figura 3.19.

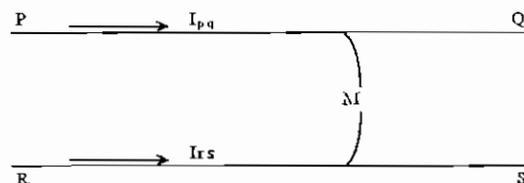


Fig. 3.19

Cuyo diagrama da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_{pq} &= Z_{pq} I_{pq} + MI_{rs} \\ V_{rs} &= Z_{rs} I_{rs} + MI_{pq} \end{aligned}$$

(Ec. 3.1)

Por esta razón, en los datos de los elementos acoplados, los nodos iniciales y finales deber ser definidos asumiendo que la corriente circula por cada elemento va del nodo inicial "p" al nodo final "q", y que estas corrientes entre elementos acoplados deben tener el mismo sentido para poder definir a la impedancia de acoplamiento mutuo como positiva.[1]

Una vez ingresados los acoplamientos mutuos, estos son asignados a las variables respectivas dependiendo del modo de operación en el que se esté trabajando, y su tratamiento en la construcción de la matriz impedancia de barra será diferente, tal como se indicó en detalle en el Capítulo II.

3.4.4. Barras de generación y carga.

Esta opción se encuentra disponible solo en el modo de operación 2, ya que como se indicó anteriormente, en este modo se tiene la posibilidad de ingresar cargas, por lo tanto los voltajes en las barras ya no serán 1 por unidad; necesitando por ello correr flujos de potencia para llegar a determinar los voltajes de prefalla en las barras, que luego servirán para construir la matriz impedancia de barra.

El ingreso de los datos de las barras, se lo realiza con la ayuda de la pantalla que se indica en la figura 3.20.

INGRESO DE DATOS DE LAS BARRAS

Barra número :

Barra tipo : Slack
 Voltaje controlado
 Carga

Módulo del voltaje (p.u.) :

Potencia de Generación Activa (MW) :

Potencia de Gener. Reactiva (MVAR) :

Potencia de Carga Activa (MW) :

Potencia de Carga Reactiva (MVAR) :

Pot. Reactiva máx. de Gene. (MVAR) :

Pot. Reactiva mín. de Gene. (MVAR) :

Fig. 3.20

El ingreso de los datos de las barras debe ser consistente, de lo contrario podría presentar problemas al momento de la simulación. La primera barra que se ingresa, por defecto, es la barra slack, luego se pueden ingresar tanto las barras de voltaje controlado como las barras de carga. Al ingresar mal u omitir un dato, dependiendo del tipo de barra ingresado, el programa le presenta un mensaje indicando el tipo de error que se ha cometido. Como por ejemplo en el caso de una barra de voltaje controlado, si no se ingresan los límites de generación de límites de reactivos, automáticamente se desplegará un mensaje impidiendo que se avance con el proceso de ingreso.

Al momento del ingreso de las barras de generación se debe considerar lo siguiente:

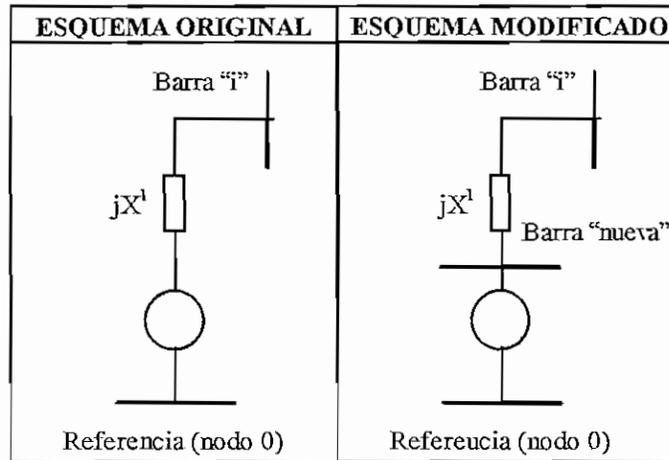


Fig. 3.21

Como se puede ver en la figura 3.21, para secuencia positiva se crea internamente una nueva barra, que será la barra de generación y cuyo número identificador será igual al número identificador máximo que ha sido ingresado más un número que depende del orden en el que ha sido ingresado este elemento. El número identificador de la nueva barra lo hace internamente el programa, por lo tanto el usuario debe ingresar como barra de generación la barra "i", y el programa identificará que la barra de generación es en realidad la barra "nueva" o barra ficticia.

Los datos que se ingresan por medio de esta pantalla, sirven para determinar los voltajes de las barras en la red de secuencia positiva, utilizando un algoritmo de Newton Raphson desacoplado rápido; mientras que para la red de secuencia cero, por no existir cargas ni barras de generación, excepto la barra fallada que se la considera como barra slack, se utiliza un algoritmo de Gauss Seidel simplificado.

La descripción de estos algoritmos, se lo puede encontrar en el capítulo II. Asimismo se ha fijado el valor del criterio de convergencia a 0.01%, valor con el cual los resultados son confiables y no se presentan problemas al momento de la simulación.

3.4.5. Selección del Tipo de falla.

El tipo de falla que se desea simular, se selecciona directamente en el menú principal en cualquiera de los dos modos de operación, tal como se indica en la figura 3.22. Este submenú aparece en el modo de operación 1 bajo el menú Simulación, y para el modo de operación 2, bajo el menú Parámetros para Simulación. Al escoger un tipo de falla en particular, aparecerá un visto a la izquierda del tipo escogido, con lo cual además se puede saber el tipo de falla que se está simulando.

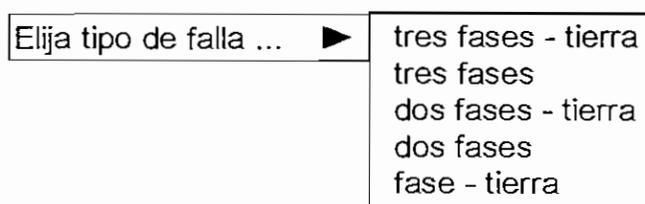


Fig. 3.22

Se puede escoger un tipo de falla a la vez, pero por la velocidad con la que se realizan los cálculos, luego de tener el reporte de los resultados; existe la opción de regresar al menú principal y seleccionar otro tipo de falla y volver a simular.

Los resultados obtenidos con el tipo de falla tres fases - tierra y tres fases son los mismos, por cuanto se asume que el sistema es balanceado y en el tipo de falla tres fases - tierra no circula corriente a tierra.

3.4.6. Selección de la barra fallada.

Una vez escogido el tipo de falla a simular, se procede a ingresar la barra en donde se produce la falla y su impedancia de falla. Si el tipo de falla escogido es dos fases - tierra, se presenta la pantalla de la figura 3.23.

DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

Impedancia de Falla a tierra: R: jX:

Fig. 3.23

Como se puede observar en la figura 3.23, a más de la impedancia de falla entre las fases, se debe ingresar la impedancia de falla a tierra.

Si, por el contrario, el tipo de falla es cualquier otro que no sea el dos fases - tierra, la pantalla para el ingreso de barra e impedancia de falla se presenta en la figura 3.24.

DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

Fig. 3.24

Si la falla escogida es monofásica, la impedancia que debe ingresar en esta pantalla es la de falla a tierra. Para los dos casos, si se desea someter al sistema a una serie de fallas en otros puntos, se lo puede hacer solo con cambiar la barra fallada y volver a simular. Igualmente las impedancias de falla se pueden cambiar y ver que efecto tienen sobre las corrientes y voltajes de

cortocircuito. Al realizar cualquier cambio, se debe pasar nuevamente por el proceso de simulación para poder ver los resultados.

Con esta información el ingreso de datos ha concluido, y el sistema está listo para realizar el proceso de simular el tipo de falla en la barra escogida, proceso que será descrito a continuación y que es diferente para los dos modos de operación.

3.5. CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.

3.5.1. En el modo de operación 1.

Este proceso de simulación es por lo general más rápido, por cuanto la cantidad de datos que se deben procesar es menor que en el modo de operación 2. Se tratará de describir los pasos que se van dando a medida que se realiza la simulación.

El primer paso a darse durante el proceso de simulación es el ordenamiento de los elementos ingresados, esto debido a que la matriz impedancia de barra se va construyendo barra a barra. Por esta razón es que se recomienda que el orden de los elementos a ingresar sea: generadores, transformadores y líneas de transmisión; ya que en este orden, el proceso iterativo de ordenamiento descrito en el Capítulo II, sección 2.3.2.1. se optimiza.

El paso siguiente es determinar que elemento es rama y cual es enlace, ya que los cálculos para construir la matriz impedancia de barra de secuencia, son diferentes dependiendo del tipo de elemento. Identificados los elementos, se construye la matriz impedancia de barra, tanto de secuencia positiva como de secuencia cero, considerando en un principio las ramas y añadiendo luego los enlaces. En este punto es necesario aclarar que la matriz impedancia de

barra se la almacena como vector, ya que como es simétrica, lo que se trata es de ahorrar espacio de memoria.[1]

Se debe mencionar que, como Visual Basic no trabaja directamente con números complejos, todas las operaciones se las debe realizar por separado, esto es parte real y parte imaginaria, por lo tanto se tendrá dos vectores (real e imaginario) donde se almacenará la matriz impedancia de barra de secuencia.

Para recuperar un dato del vector de almacenamiento de la matriz impedancia de barra, se lo hace con la siguiente expresión:[1]

$$Z_{ij} = A \left[i + \frac{(j-1)(2n-j)}{2} \right]$$

(Ec. 3.2)

donde:

$i = j, \dots, n$

$j = 1, \dots, n$

$n =$ número de barras

$A =$ vector de almacenamiento.

Obtenida la matriz impedancia de barra de secuencia, se procede a corregirla por la presencia, en caso de existir, de ramas de impedancia infinita originadas por el tipo de conexión de los transformadores.

Corregida la matriz impedancia de barra de secuencia, se incluye los acoplamientos mutuos, en caso de existir, dentro de la matriz de secuencia cero. Este algoritmo para introducir los acoplamientos mutuos, está explicado en detalle en el Capítulo II.

Una vez obtenida la matriz impedancia de barra de secuencia, se calculan las corrientes y voltajes de cortocircuito, tanto en barras como en elementos, con las ecuaciones descritas en el Capítulo II.

Durante este proceso de simulación se llaman a varias subrutinas para realizar una serie de cálculos específicos, tanto en el proceso de construcción de la matriz impedancia de barra de secuencia como para determinar los voltajes y corrientes de cortocircuito. Estas subrutinas se las explica a continuación.

- **Subrutina MZBII.**

En esta subrutina al ser llamada, lo que se hace es identificar las ramas que tengan impedancia infinita ($0+j0,5$), y se procede a aumentar un enlaces de impedancia ($0-j0,5$), entre la referencia y las barras afectadas por estas ramas. Con esto lo que se logra es que se remuevan las ramas ficticias, y la matriz adquiere sus valores correctos.

- Existe una subrutina de inversión de matrices, la cual esta inmersa en el procedimiento de simulación, por lo cual no es necesario llamarla en ningún punto. Este proceso de inversión de una matriz compleja, forma en primer lugar la matriz ampliada como se indica en la ecuación 3.3.

$$\mathbf{MA} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_R & -\mathbf{Z}_i \\ \mathbf{Z}_i & \mathbf{Z}_R \end{bmatrix}$$

(Ec. 3.3)

Una vez construida la matriz ampliada se procede a invertir esta matriz como si fuera una matriz real, y luego se extrae la parte real y la parte imaginaria de la matriz invertida en el mismo orden en que se formó la matriz ampliada, teniendo nuevamente en dos vectores, parte real y parte imaginaria, la matriz compleja invertida.

- **Subrutina Falla_3F.**

Esta subrutina es llamada si el usuario ha seleccionado el tipo de falla tres fases o tres fases - tierra, y devuelve los voltajes en todas las barras del sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_2FT.**

Cuando el usuario ha seleccionado una falla dos fases - tierra se ejecuta esta subrutina, dando como resultado los voltajes de barra de todo el sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_2F.**

Si se ha seleccionado una falla bifásica, se ejecuta esta subrutina, la misma que se encarga de calcular los voltajes de barra de todo el sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_FT.**

Del mismo modo que para las fallas anteriores, esta subrutina se ejecuta cuando se ha selecciona la falla fase - tierra, y calcula los voltajes de barra del sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Corr_elem.**

Esta subrutina se ejecuta luego de haber calculado los voltajes de barra y la corriente total en la barra fallada para un determinado tipo de falla. Su objetivo es calcular las corrientes de secuencia, durante la falla, que circulan por los elementos del sistema y además pasa todos los valores de secuencia a fases; utilizando para ello otras subrutinas.

- **Subrutina SEFAS.**

Esta subrutina permite pasar todos los valores de voltajes y corrientes de secuencia a fases, para ello se vale de la matriz de transferencia explicada en detalle en el Capítulo II.

- **Subrutina RAP.**

Cuando se ejecuta esta subrutina, convierte un número complejo de su forma rectangular a polar. Esto se hace con el objeto de presentar todos los resultados de voltajes y corrientes con su módulo y ángulo respectivos tanto en secuencia como en fases.

- **Subrutinas CORNAC y CORNAD.**

Estas subrutinas permiten obtener las corrientes por un elemento no acoplado, tanto en secuencia cero como en secuencia positiva y negativa respectivamente. Para ello se utiliza los voltajes de barra del sistema y la matriz admitancia primitiva de los elementos no acoplados.

- **Subrutinas COREAC y COREAD.**

Utilizando los voltajes de barra y la matriz admitancia primitiva de los elementos acoplados, estas subrutinas calculan las corrientes que circulan, durante la falla, por un elemento acoplado tanto en secuencia cero como en secuencia positiva y negativa respectivamente.

El procedimiento que se acaba de describir, es el que se sigue para el cálculo de las corrientes y voltajes de cortocircuito cuando se está simulando en el modo de operación 1. De igual forma, a continuación se describirá la forma en que se obtienen los voltajes y corrientes de cortocircuito para el modo de operación 2.

3.5.2. En el modo de operación 2.

El proceso de simulación empieza antes de ingresar los datos de las barras de generación y carga para poder correr los flujos de potencia. Lo que se realiza básicamente en este punto es construir la matriz admitancia de barra de secuencia considerando los acoplamientos mutuos en caso de existir, para ello se utiliza el algoritmo descrito en el Capítulo II.

Esta matriz es almacenada en dos vectores, la parte real y la parte imaginaria por separado, pero como esta matriz es porosa, solo se almacena en los vectores las admitancias diferentes de cero.

Una vez obtenida la matriz admitancia de barra de secuencia, se ingresan los datos de las barras de generación y carga, quedando listo para empezar el cálculo de la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia.

En primer lugar lo que se hace es correr un flujo de potencia en el circuito de secuencia positiva para determinar los voltajes iniciales de barra de este sistema. Para ello se utiliza un flujo de potencia desacoplado rápido de Newton - Raphson sin considerar la impedancia Z_s .

Obtenidas las condiciones iniciales, se procede a introducir las cargas dentro de la matriz admitancia de barra de secuencia positiva, esto se lo puede hacer ya que las cargas son modeladas como impedancia constante. Además se define a los generadores como fuentes de voltaje fija para poder correr los flujos de carga con Z_s incluida.

A continuación se construye la matriz admitancia primitiva de secuencia de los elementos no acoplados, con la finalidad de ocupar estos valores en el cálculo de las corrientes por lo elementos durante la falla.

Se introduce el valor de la admitancia ficticia Y_s en la matriz admitancia de barra correspondiente a la barra fallada, y se vuelve a correr un flujo de potencia desacoplado rápido de Newton Raphson, luego esta admitancia ficticia es retirada de la matriz admitancia de barra con lo cual se puede encontrar la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva.

En caso de que el usuario haya indicado que posee datos de la red de secuencia cero, se corre un flujo de potencia de Gauss Seidel simplificado para esta secuencia, obteniendo con ello los voltajes de barra que luego permitirán encontrar la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia cero.

Una vez obtenidas las columnas correspondientes a la barra fallada de las matrices de secuencia positiva y secuencia cero, se procede a realizar los cálculos de los voltajes y corrientes de cortocircuito. Durante todo el proceso de simulación hasta llegar a obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito, se han empleado una serie de subrutinas, muy parecidas a las del modo de operación 1, pero que se las describirá a continuación.

- Subrutina de inversión de matrices, la cual esta inmersa en el procedimiento de construcción de la matriz admitancia de barra de secuencia considerando los acoples mutuos, por lo cual no es necesario llamarla en ningún punto. Este proceso es explicado en detalle en el modo de operación 1.

- **Subrutina flujo_newton.**

Esta subrutina lo que permite en esencia, es calcular los voltajes de barra y las potencias de generación del circuito de secuencia positiva, utilizando un algoritmo de Newton Raphson desacoplado rápido y un proceso de bifactorización para trabajar con el jacobiano.

Esta subrutina se la llama dos veces durante el proceso de simulación, la primera para obtener los voltajes de barra y las potencia de generación sin considerar la impedancia ficticia Z_s ; y la segunda para obtener los mismos parámetros pero con la impedancia ficticia Z_s dentro del circuito de secuencia positiva, entre la barra fallada y el nodo de referencia.

- **Subrutina encero.**

Se la llama durante la corrida de los flujos de potencia de Newton Raphson desacoplado rápido, y lo que hace es encerar las matrices auxiliares usadas en el proceso de bifactorización.

- **Subrutina orden.**

Ordena la matrices que conforman el jacobiano durante la corrida del flujo de potencia de Newton Raphson.

- **Subrutina simord.**

Ejecutada durante el proceso de la corrida del flujo de potencia, su función es simular y ordenar las matrices del jacobiano.

- **Subrutina reduc.**

Reduce las matrices del jacobiano dentro del proceso de bifactorización, para hallar las variaciones de ángulo y módulo de los voltajes de barra durante la corrida del flujo de potencia de Newton Raphson.

- **Subrutina soluc.**

Luego de ejecutarse la subrutina reduc, se llama a la subrutina soluc, la cual encuentra las variaciones de ángulo y módulo de los voltajes de barra.

- **Subrutina Falla_3F2.**

Esta subrutina es llamada si el usuario ha seleccionado el tipo de falla tres fases o tres fases - tierra, y devuelve los voltajes en todas las barras del sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_2FT2.**

Cuando el usuario ha seleccionado una falla dos fases - tierra se ejecuta esta subrutina, dando como resultado los voltajes de barra de todo el sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_2F2.**

Si se ha seleccionado una falla bifásica, se ejecuta esta subrutina, la misma que se encarga de calcular los voltajes de barra de todo el sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Falla_FT2.**

Del mismo modo que para las fallas anteriores, esta subrutina se ejecuta cuando se ha selecciona la falla fase - tierra, y calcula los voltajes de barra del sistema y la corriente total en la barra fallada.

- **Subrutina Corr_elem2.**

Esta subrutina se ejecuta luego de haber calculado los voltajes de barra y la corriente total en la barra fallada para un determinado tipo de falla. Su objetivo es calcular las corrientes de secuencia, durante la falla, que circulan por los elementos del sistema y además pasa todos los valores de secuencia a fases; utilizando para ello otras subrutinas.

- **Subrutina SEFAS.**

Esta subrutina permite pasar todos los valores de voltajes y corrientes de secuencia a fases, para ello se vale de la matriz de transferencia explicada en detalle en el capítulo IV.

- **Subrutina RAP.**

Cuando se ejecuta esta subrutina, convierte un número complejo de su forma rectangular a polar. Esto se hace con el objeto de presentar todos los resultados de voltajes y corrientes con su módulo y ángulo respectivos tanto en secuencia como en fases.

- **Subrutinas Cornac2 y Cornad2.**

Estas subrutinas permiten obtener las corrientes por un elemento no acoplado, tanto en secuencia cero como en secuencia positiva y negativa

respectivamente. Para ello se utiliza los voltajes de barra del sistema y la matriz admitancia primitiva de los elementos no acoplados.

- **Subrutinas Coreac2 y Coread2.**

Utilizando los voltajes de barra y la matriz admitancia primitiva de los elementos acoplados, estas subrutinas calculan las corrientes que circulan, durante la falla, por un elemento acoplado tanto en secuencia cero como en secuencia positiva y negativa respectivamente.

- **Funciones par_real y par_imag.**

Estas funciones lo que hacen es transformar un número complejo de coordenadas polares a rectangulares. Se tiene por separado estas funciones, es decir parte real y parte imaginaria, por la sencilla razón de que, como se mencionó anteriormente, Visual Basic no trabaja directamente con números complejos.

Todo este procedimiento descrito anteriormente es el que se realiza en el modo de operación 2, para llegar a obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito para una determinada falla, luego de lo cual se presentan una serie de reportes con estos resultados, los mismos que pueden ser impresos.

3.6. PRESENTACION DE REPORTE.

Tanto en el modo de operación 1 como en el modo de operación 2, se presentan reportes en pantalla de los datos ingresados y de los resultados obtenidos, los cuales pueden ser impresos.

3.6.1. Modo de operación 1.

En este modo de operación se pueden obtener reportes en pantalla de los datos suministrados al programa como son: elementos ingresados y

acoplamientos mutuos; y reportes en pantalla de los resultados obtenidos, siendo estos: matriz de secuencia positiva, matriz de secuencia cero y voltajes y corrientes de cortocircuito en la barra escogida.

El reporte de los elementos ingresados sirve para determinar que todos los datos suministrados al programa hayan sido digitados correctamente, en caso de no ser así, se puede corregir los datos de un elemento ingresado o aumentar un elemento en caso de haberlo omitido al momento del ingreso. Estas dos últimas opciones se presentan dentro del mismo submenú Elementos.

El reporte de los acoplamientos mutuos, al igual que la opción de ingreso de acoplamientos, se habilitarán siempre que en el ingreso de los datos generales se haya especificado que existen acoplamientos mutuos en el sistema. Asimismo este reporte permite determinar si existe algún error de digitación u omisión, permitiendo la posibilidad de corregir estos inconvenientes con opciones que se presentan dentro del submenú Acoples.

Una vez que se ha escogido el tipo de falla, la barra e impedancia de falla y se ha simulado el sistema, se activa el menú de resultados, en el cual podemos ver la matriz impedancia de barra tanto de secuencia positiva como la de secuencia cero. La opción de ver la matriz de secuencia cero, dependerá de lo que el usuario indicó en los datos generales del sistema respecto a que si posee o no los datos de esta secuencia.

Los voltajes y corrientes de cortocircuito se presentarán en un solo reporte, para lo cual se debe indicar la barra en donde se desea ver los resultados. En este reporte se presenta el voltaje y la corriente durante la falla en la barra seleccionada; y los voltajes de las barras interconectadas con la barra seleccionada y las corrientes de los elementos conectados a ésta, durante la falla. Cabe señalar que los voltajes y las corrientes se presentan en sus

componentes tanto de secuencia como de fase, y como son cantidades complejas, se las representa en coordenadas polares, en módulo y ángulo.

3.6.2. Modo de operación 2.

Básicamente los reportes en pantalla que se obtienen en este modo de operación son los mismos que en el modo de operación 1, con ciertas diferencias que se las detallará más adelante. Por otro lado el número de reportes en este modo es mayor, por cuanto se debe ingresar adicionalmente a los elementos y acoplamientos mutuos, las barras de generación y carga.

El reporte en pantalla de los elementos que se ingresan permite detectar errores de digitación u omisión, en caso de no ser así, se puede corregir los datos de un elemento ingresado o aumentar un elemento en caso de haberlo omitido al momento del ingreso. Estas dos últimas opciones se presentan dentro del mismo submenú Elementos de secuencia.

El reporte en pantalla de los acoplamientos mutuos, al igual que la opción de ingreso de acoplamientos, se activarán siempre que en el ingreso de los datos generales se haya especificado que existen acoplamientos mutuos en el sistema. De la misma manera que el reporte de los elementos, este reporte permite determinar si existe algún error de digitación u omisión, dando la posibilidad de corregir estos errores con opciones que se presentan dentro del submenú Acoplamientos mutuos.

Una vez verificado el ingreso de datos, tanto de elementos como de acoplamientos mutuos en caso de existir, se pasa a verificar el ingreso de las barras de generación y carga, donde también se tiene la posibilidad de generar un reporte en pantalla en el cual se indica el tipo de barra y todos los parámetros que se han ingresado. Así mismo este reporte permitirá detectar errores que se pudieren producir al momento del ingreso, cuya corrección, el

usuario la podrá realizar dentro del mismo submenú Barras de generación y carga. En este reporte aparecen barras de generación que el usuario no ha ingresado por teclado, las cuales aparecen por el proceso descrito en el numeral 3.4.4. correspondiente al ingreso de barras de generación y carga; para su identificación irán acompañadas de una etiqueta relacionada con la barra a la cual están conectadas por medio de la reactancia del generador.

Una vez que se ha seleccionado el tipo de falla, la barra e impedancia de falla y se ha simulado el sistema, se activa el menú de resultados, en el cual se puede ver una columna de la matriz impedancia de barra correspondiente a la barra fallada, tanto de secuencia positiva como la de secuencia cero. La opción de ver la columna de la matriz de secuencia cero correspondiente a la barra fallada, dependerá de lo que el usuario indicó en los datos generales del sistema respecto a que si posee o no los datos de esta secuencia.

Los voltajes y corrientes de cortocircuito se presentarán en un solo reporte, para lo cual se debe indicar la barra en donde se desea ver los resultados. En este reporte se presenta el voltaje y la corriente durante la falla en la barra seleccionada; y los voltajes de las barras interconectadas con la barra seleccionada y las corrientes de los elementos conectados a esta durante la falla. Al igual que el modo de operación 1, los voltajes y las corrientes se presentan en sus componentes, tanto de secuencia como de fase y como son cantidades complejas, se las representa en coordenadas polares, en módulo y ángulo.

El detalle de los reportes que se obtienen del programa en los dos modos de operación, se presentan en el Anexo 2.

3.7. ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACION.

Al programa se le ha dotado de la opción de poder almacenar la información en medios magnéticos: diskettes y discos duros, y así mismo de recuperar esa información en cualquier momento, con lo cual se ahorra tiempo y trabajo. La información que se guarda en los archivos, básicamente corresponde a información general del sistema, a los datos de los elementos ingresados y acoplamientos mutuos.

Los archivos que se generan en el modo de operación 1 se guardan con la extensión "sc1" y los que se generan en el modo de operación 2 se guardan con la extensión "sc2". Esto con la finalidad de poder diferenciar bajo que modo han sido generados y no tener conflictos al momento de abrirlos. La opción de guardar la información, se activará una vez que se haya ingresado la información que se va a almacenar y se presionen ciertos botones de las pantallas de ingreso.

Antes de poder abrir un archivo, se debe seleccionar el modo en el cual se va a trabajar, por cuanto la forma en que se almacena la información es diferente en los dos modos de operación. Si se quiere abrir un archivo en el modo de operación 1, el cual ha sido generado en el modo de operación 2, el programa le presentará un mensaje de error y no le dejará realizar esta acción.

En el modo de operación 1, la opción de guardar la información se activa cuando: se ha indicado en los datos generales del sistema que no existen acoplamientos mutuos, y en el ingreso de los elementos se presiona el botón **Terminar**, y cuando, se ha indicado en los datos generales del sistema que existen acoplamientos mutuos y se presiona el botón **Terminar** en el ingreso de los acoplamientos mutuos. Una vez almacenada la información se puede continuar con la simulación. Al momento de abrir un archivo en este modo, el programa le deja al usuario listo para escoger el tipo de falla y poder avanzar

con la simulación; con esto se puede dar cuenta que el tipo de falla, barra fallada, la impedancia de falla y los resultados no se guardan.

En el modo de operación 2, la opción de guardar los datos se activa de la misma manera que en el modo de operación 1. Cuando se abre un archivo generado en este modo de operación, el usuario debe continuar con el proceso de simulación, para lo cual empieza por ingresar los datos de las barras de generación y carga, escoger tipo de falla, barra fallada, impedancia de falla y la simulación. Como se puede ver, los datos de las barras de generación y carga no se almacenan por cuanto, la matriz admitancia de barra debe ser formada antes de ingresar estos datos. El guardar los datos de las barras de generación y carga, produce un conflicto en el manejo de variables, ya que se realizan ciertas asignaciones y cambios a las mismas antes de ingresar los datos de las barras de generación y carga. Al igual que en el modo de operación 1, los resultados no se almacenan.

Se debe dejar claro que para presionar el botón **Terminar** en el ingreso de datos en los dos modos de operación, no necesariamente se deben ingresar todos los datos, ya que existe la posibilidad de corregir un dato ya ingresado o aumentar algún elemento omitido. Para detectar este tipo de errores, es de mucha utilidad los reportes en pantalla de los datos ingresados.

CAPITULO IV

EJEMPLOS DE APLICACION

El objetivo de este capítulo es poner a prueba las bondades del programa PCC y verificar la precisión de sus resultados. Para ello se han seleccionado tres ejemplos cuyos resultados ya se conocen, los mismos que se ejecutarán en los dos modos de operación.

4.1. EJEMPLO 1.[1]

4.1.1. Descripción general del sistema.

Nº de barras	5
Nº de total elementos	7
Nº de generadores	2
Nº de transformadores	2
Nº de líneas	3
Potencia base MVA	50
Referencia: Tesis del Dr. Claudio Cañizares	

Para correr este ejemplo se debe pasar todos los datos a una base de 100 MVA, con la cual trabaja el programa de cortocircuitos PCC. El esquema de este sistema se presenta en la figura 4.1.

En primer lugar se correrá el ejemplo en el modo de operación 1 y luego se lo correrá en el modo de operación 2, en cuyo caso se considera lo siguiente: la barra N° 1 será la barra slack, la barra N° 4 será de voltaje controlado con una generación de 50 MW y un voltaje de 1 por unidad, la barra N° 2 será de carga

(50 MW, 25 VMAR), la barra N° 5 también será de carga (25 MW), y por último en todas las líneas de transmisión se considera una susceptancia de 0,08 por unidad.

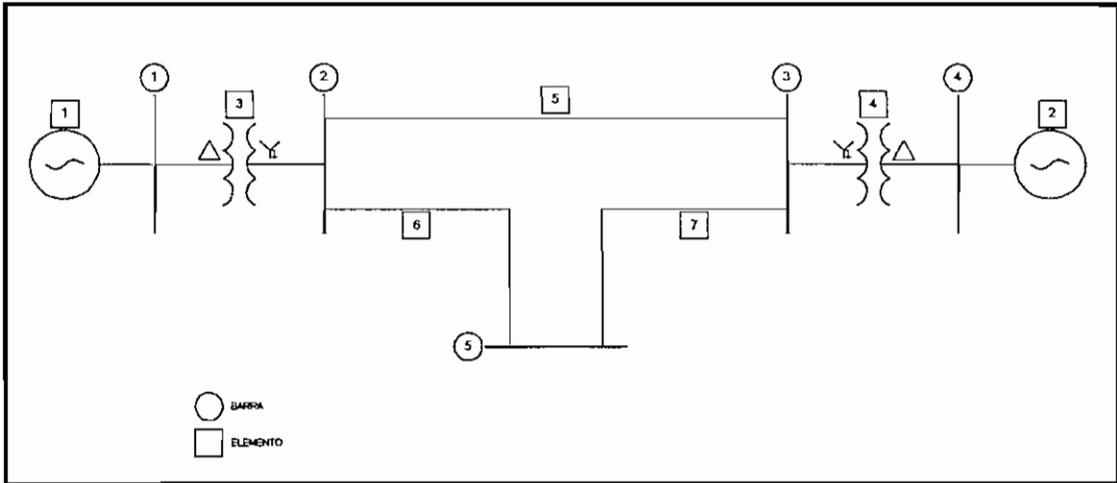


Fig. 4.1

Se analizan todas las fallas en la barra N° 5 y luego se comparan los resultados obtenidos para la corriente de cortocircuito tanto entre los dos modos de operación como con los resultados obtenidos en la referencia, como se indica en la tabla 1 .

Tipo de falla	barra fallada		Corriente de Cortocircuito					
			Referencia		Modo 1		Modo 2	
			Módulo	Angulo	Módulo	Angulo	Módulo	Angulo
3 ϕ	5	A	5.6920	-90	4.9296	-90	4.8986	-89.7
		B	5.6920	150	4.9296	150	4.8986	150.3
		C	5.6920	30	4.9296	30	4.8986	30.3
2 ϕ - T	5	A	0.0000	0.0	0.0000	90	0.0000	-89.7
		B	5.5580	152.5	4.8131	152.5	4.6731	152.1
		C	5.5580	27.5	4.8131	27.5	4.8978	27.2
2 ϕ		A	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		B	4.9300	180.0	4.2691	180	4.2423	180.3
		C	4.9300	0.0	4.2691	0.0	4.2423	0.3
1 ϕ - T		A	5.3980	-90.0	4.6750	-90.0	4.6568	-91.4
		B	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		C	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0

Tabla 1

4.1.2. Comparación con la Referencia.

Los resultados de la corriente de cortocircuito obtenidos con el programa de cortocircuitos PCC, difieren con los de la referencia en los valores de fases, por cuanto en la Tesis del Dr. Cañizares existe un tratamiento diferente en la definición de la matriz de transferencia para pasar los valores de secuencia a fases. Los resultados en componentes de secuencia son iguales. Un resumen de estos datos se presenta en la tabla 1.

4.1.3. Comparación entre los dos modos de operación.

Los resultados entre los dos modos de operación tienen una diferencia promedio expresada en porcentaje por debajo del 1% para el caso del módulo de la corriente en los todos los tipos de falla, excepto en la falla dos fases - tierra donde la diferencia en una de las fases llega alrededor del 3%. En el caso de los ángulo de las corrientes de falla en las fases presentan igualmente una pequeña diferencia. Como era de esperar, el mayor valor de corriente se alcanza en una falla trifásica.

Esta diferencia se debe a que en el modo de operación 2 se consideran las cargas y elementos shunt, por lo tanto los voltajes de prefalla en las barras son calculados con un flujo de potencia en función de las barras de carga y generación del sistema, dando como resultado que estos voltajes sean diferentes de uno por unidad (1 p.u.). En el modo de operación 1 los resultados, en este caso, son ligeramente menores que los obtenidos en el modo de operación 2.

A continuación se presentan los reportes de los datos suministrados al programa. Los resultados tanto de la matriz impedancia de barra de secuencia como de voltajes y corrientes de cortocircuito se pueden ver en los reportes del Anexo 3. En los reportes del modo de operación 2, aparecen ciertas barras

que el usuario no ingresó por teclado. Esto se debe a que para correr los flujos de potencia, las barras de generación deben fijar sus voltajes de barra detrás de la reactancia del generador, por ello el programa introduce barras ficticias entre la referencia y la reactancia del generador. Para obtener mayor detalle sobre este tema, el lector debe remitirse al Capítulo III en la parte correspondiente al ingreso de las barras de generación y carga.

Para el modo de operación 1 el reporte de elementos ingresados es el siguiente:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA DEPARTAMENTO DE POTENCIA PROGRAMA DE COTOCIRCUITOS PCC							
<u>ELEMENTOS INGRESADOS</u>							12/10/1998
MODO DE OPERACION 1							
NOMBRE: ejemplo1							
COMENTARIO:Tesis Cañizares							
Elemento	Tipo	Nodo P	Nodo Q	Z secuencia (+)		Z secuencia (0)	
				R	j X	R	j X
1	G	0	1	0.0000	0.2000	0.0000	0.1000
2	G	0	4	0.0000	0.1000	0.0000	0.0500
3	T	1	2	0.0000	0.1000	0.0000	0.1000
4	T	4	3	0.0000	0.0500	0.0000	0.0500
5	LT	2	3	0.0000	0.2000	0.0000	0.4000
6	LT	2	5	0.0000	0.2000	0.0000	0.4000
7	LT	3	5	0.0000	0.2000	0.0000	0.4000

Para el modo de operación 2 los reportes de los elementos ingresados y los datos de las barras de generación y carga son:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

GENERADORES INGRESADOS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cañizares

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva		Sec. Cero	
	P	Q	R	jX	R	jX
1	0	1	0.0000	0.2000	0.0000	0.1000
2	0	4	0.0000	0.1000	0.0000	0.0500

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMANETO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

TRANSFORMADORES INGRESADOS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cañizares

Elemento N°	Tipo de Conexión	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero
		P	Q	jX (%)	Tap "p"	Tap "q"	jX (%)
3	D-Yt	1	2	10.0000	1.00	1.00	10.0000
4	D-Yt	4	3	5.0000	1.00	1.00	5.0000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

LINEAS INGRESADAS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cañizares

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero	
	P	Q	R	jX	jB	R	jX
5	2	3	0.0000	0.2000	0.0800	0.0000	0.4000
6	2	5	0.0000	0.2000	0.0800	0.0000	0.4000
7	3	5	0.0000	0.2000	0.0800	0.0000	0.4000

TIPOS DE BARRAS INGRESADAS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:ejemplo1

COMETARIO: Tesis Cañizares

Barra	Tipo	Voltaje(pu)	Pot. de Generación		Potencia de Carga		Límite de Reactivos	
			MW	MVAR	MW	MVAR	máx. MVAR	mín. MVAR
6	F-1	Slack	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	F-4	V Cont.	1.00	50.00	0.00	0.00	100.00	-50.00
2		Carga	0.00	0.00	0.00	50.00	25.00	0.00
5		Carga	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00

4.2. EJEMPLO 2.[2]

4.2.1. Descripción general del sistema.

Nº de barras	4
Nº de total elementos	5
Nº de generadores	2
Nº de transformadores	2
Nº de líneas	1
Potencia base MVA	100
Referencia: Análisis de Sistemas de Potencia (Grainger/Stevenson)	

Este ejemplo tiene sus datos en una base de 100 MVA, por lo que no hace falta cambiar de base a los datos. El esquema de este sistema se presenta en la figura 4.2.

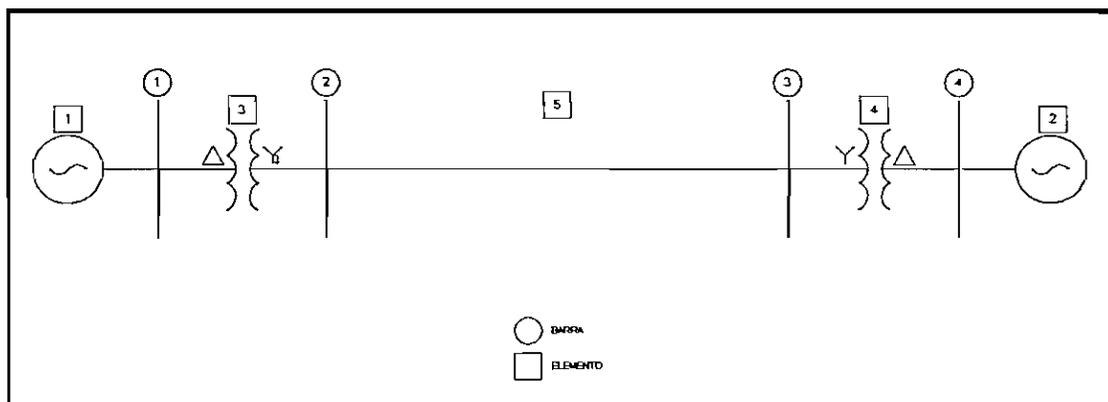


Fig. 4.2

Se simula una falla fase - fase en la barra Nº 3 y una falla dos fases - tierra en la barra Nº 4 y luego se comparan los resultados obtenidos en los dos modos de operación con los resultados que constan en la referencia. Este ejemplo sirve además para verificar el comportamiento del programa en el modo 2 cuando no se ingresan datos de cargas ni de elementos shunt.

Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 2.

Tipo de falla	barra fallada		Corriente de Cortocircuito					
			Referencia		Modo 1		Modo 2	
			Módulo	Angulo	Módulo	Angulo	Módulo	Angulo
2 ϕ - T	4	A	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		B	6.6726	154.6	6.6742	154.6	6.6742	154.6
		C	6.6726	25.4	6.6742	25.4	6.6742	25.4
2 ϕ	3	A	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		B	5.1061	180.0	5.1070	180	5.1070	180.0
		C	5.1061	0.0	5.1070	0.0	5.1070	0.0

Tabla 2

4.2.2. Comparación con la Referencia.

Los resultados obtenidos con el programa de cortocircuitos PCC, son iguales a los obtenidos en el Texto de Análisis de Sistemas de Potencia. Existen unas pequeñas diferencias irrelevantes debido a las aproximaciones en los cálculos. Esta igualdad de las corrientes y voltajes se da tanto en módulo como en ángulo.

4.2.3. Comparación entre los dos modos de operación.

Los resultados entre los dos modos de operación son los mismos por cuanto en ambos casos no se consideran las cargas, los taps de transformadores ni los elementos shunt.

En los reportes del modo de operación 2, aparecen ciertas barras que el usuario no ingresó por teclado. Esto se debe a que para correr los flujos de potencia, las barras de generación deben fijar sus voltajes de barra detrás de la reactancia del generador, por ello el programa introduce barras ficticias entre la referencia y la reactancia del generador. Para obtener mayor detalle, el lector debe remitirse al Capítulo III en la parte correspondiente al ingreso de las barras de generación y carga. Los reportes de los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo 3.

En el modo de operación 1 los datos de los elementos ingresados son:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE COTOCIRCUITOS PCC

ELEMENTOS INGRESADOS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Elemento	Tipo	Nodo P	Nodo Q	Z secuencia (+)		Z secuencia (0)	
				R	j X	R	j X
1	G	0	1	0.0000	0.2000	0.0000	0.1900
2	G	0	4	0.0000	0.2000	0.0000	0.1900
3	T	1	2	0.0000	0.0800	0.0000	0.0800
4	T	3	4	0.0000	0.0800	0.0000	0.0800
5	L/T	2	3	0.0000	0.1500	0.0000	0.5000

Para el caso del modo de operación 2, los reportes de los elementos ingresados y de las barras de generación y carga se presentan a continuación:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

GENERADORES INGRESADOS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Elemento Nº	Nodos		Sec. Positiva		Sec. Cero	
	P	Q	R	j X	R	j X
1	0	1	0.0000	0.2000	0.0000	0.1900
2	0	4	0.0000	0.2000	0.0000	0.1900

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

TRANSFORMADORES INGRESADOS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Elemento N°	Tipo de Conexión	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero
		P	Q	jX (%)	Tap "p"	Tap "q"	jX (%)
3	D-Yt	1	2	8.0000	1.00	1.00	8.0000
4	Y-D	3	4	8.0000	1.00	1.00	8.0000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

LINEAS INGRESADAS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Elemento N°	Nodos			Sec. Positiva		Sec. Cero	
	P	Q	R	jX	jB	R	jX
5	2	3	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000	0.5000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

TIPOS DE BARRAS INGRESADAS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Barra	Tipo	Voltaje(pu)	Pot. de Generación		Potencia de Carga		Límite de Reactivos	
			MW	MVAR	MW	MVAR	máx. MVAR	min. MVAR
5	F-1 Slack	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	F-4 V Cont.	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	-10.00

4.3. EJEMPLO 3.[3]

4.3.1. Descripción general del sistema

Nº de barras	3
Nº de total elementos	5
Nº de generadores	2
Nº de transformadores	0
Nº de líneas	3
Potencia base MVA	100
Referencia: Computer Methods in Power System Analysis (Stagg/EI-Abiad)	

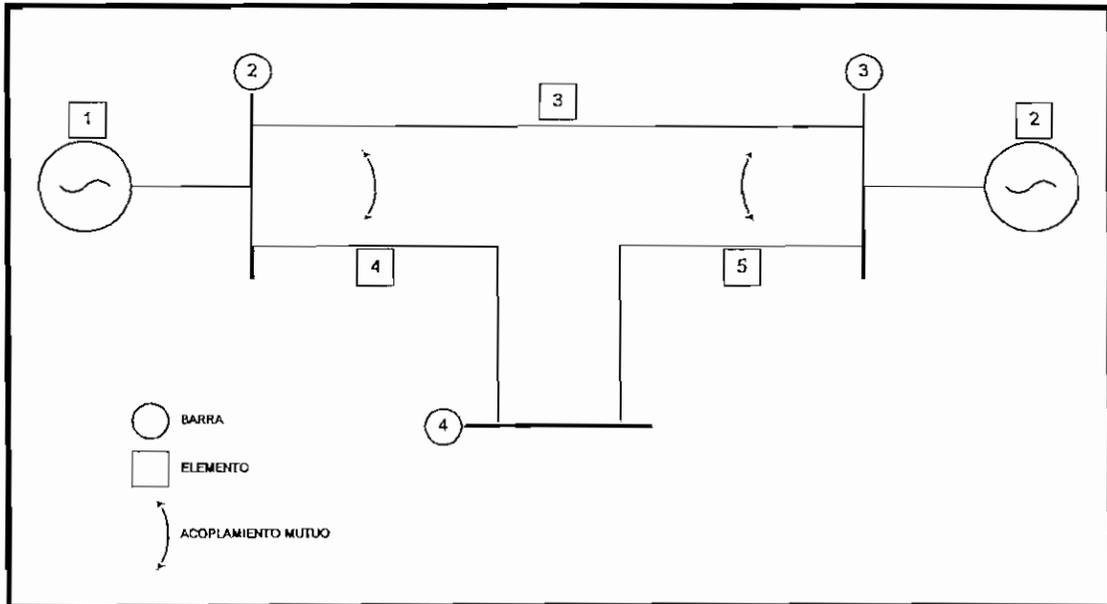


Fig. 4.3

En este ejemplo no se indica la potencia base del sistema, por tanto se asume que los datos en por unidad corresponden a la base de 100 MVA. Se comprobará por un lado la eficacia de los algoritmos de incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz impedancia de barra de secuencia cero; y por otro lado, la diferencia entre los valores de corriente de cortocircuito que

se obtienen considerando y sin considerar los acoplamientos mutuos en el sistema. El esquema de este sistema se presenta en la figura 4.3.

Se analizará una falla trifásica y una falla monofásica en la barra N° 3 y luego se comparan los resultados obtenidos en la referencia con los obtenidos con el Programa PCC .

4.3.2. Comparación con la Referencia.

Tipo de falla	barra fallada		Corriente de Cortocircuito					
			Referencia		Modo 1		Modo 2	
			Módulo	Angulo	Módulo	Angulo	Módulo	Angulo
3 ϕ	4	A	3.42	no disp.	3.4164	-90.0	3.4164	-90.0
		B	3.42	no disp.	3.4164	150.0	3.4164	150.0
		C	3.42	no disp.	3.4164	30.0	3.4164	30.0
1 ϕ	4	A	2.49	no disp.	2.4926	-90.0	2.4926	-90.0
		B	.000	no disp.	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		C	0.00	no disp.	0.0000	0.0	0.0000	0.0

Tabla 3

Los resultados obtenidos con el programa de cortocircuitos PCC, son iguales a los resultados de la referencia, por lo tanto se ha comprobado que los algoritmos de incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz de secuencia cero trabajan correctamente. La comparación con la referencia puede hacerse solamente en módulo, ya que no se dispone de los valores de ángulos.

4.3.3. Comparación entre modos de operación.

Los resultados en los dos modos de operación son los mismos, por lo tanto se analizará adicionalmente para el modo de operación 1, qué sucede cuando no se consideran los acoplamientos mutuos del sistema. Los resultados se presentan en la tabla 4.

Tipo de falla	barra fallada		Corriente de cortocircuito (Modo 1)			
			Con acoples		Sin acoples	
			Módulo	Angulo	Módulo	Angulo
3 ϕ	4	A	3.4164	-90.0	3.4164	-90.0
		B	3.4164	150.0	3.4164	150.0
		C	3.4164	30.0	3.4164	30.0
1 ϕ	4	A	2.4926	-90.0	2.4926	-90.0
		B	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		C	0.0000	0.0	0.0000	0.0

Tabla 4

Como en una falla trifásica no interviene la red de secuencia cero, es lógico que los resultados de la tabla 4 para esta falla sean iguales. Para la falla fase tierra si interviene la red de secuencia cero, por lo tanto las corrientes que circulan por los elementos son diferentes pero la corriente total en la barra fallada en este caso se mantiene.

En los reportes del modo de operación 2, aparecen ciertas barras que el usuario no ingresó por teclado. Esto se debe a que, para correr los flujos de potencia, las barras de generación deben fijar sus voltajes de barra detrás de la reactancia del generador, por ello el programa introduce barras ficticias entre la referencia y la reactancia del generador. Para aclarar este tema en detalle, el lector debe remitirse al Capítulo III, en la parte correspondiente al ingreso de las barras de generación y carga. Los reportes de los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo 3.

Los datos de los elementos y acoples que se ingresan en el sistema, se presentan en los siguientes reportes:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE COTOCIRCUITOS PCC

ELEMENTOS INGRESADOS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo3

COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Elemento	Tipo	Nodo P	Nodo Q	Z secuencia (+)		Z secuencia (0)	
				R	j X	R	j X
1	G	0	2	0.0000	0.1025	0.0000	0.0350
2	G	0	3	0.0000	0.1025	0.0000	0.0350
3	L/T	2	3	0.0000	1.0000	0.0000	2.5000
4	L/T	2	4	0.0000	0.4000	0.0000	1.0000
5	L/T	4	3	0.0000	0.6000	0.0000	1.5000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

ACOPLAMIENTOS MUTUOS INGRESADOS

11/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo3

COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Acople	Elementos Acoplados		j X Acople
1	4	y 3	0.6000
2	5	y 3	0.9000

De igual forma, para el modo de operación 2 se tienen los siguientes reportes con los datos de elementos y de acoplamiento mutuos ingresados.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

GENERADORES INGRESADOS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva		Sec. Cero	
	P	Q	R	j X	R	j X
1	0	2	0.0000	0.1025	0.0000	0.0350
2	0	3	0.0000	0.1025	0.0000	0.0350

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

LINEAS INGRESADAS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero	
	P	Q	R	j X	j B	R	j X
3	2	3	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	2.5000
4	2	4	0.0000	0.4000	0.0000	0.0000	1.0000
5	4	3	0.0000	0.6000	0.0000	0.0000	1.5000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

ACOPLAMIENTOS MUTUOS INGRESADOS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Acople	Elementos	Acoplados	jX	Acople
1	4	y	3	0.6000
2	5	y	3	0.9000

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

TIPOS DE BARRAS INGRESADAS

12/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:ejemplo3

COMETARIO: Stagg/El-Abiad

Barra	Tipo	Voltaje(pu)	Pot. de Generación		Potencia de Carga		Límite de Reactivos	
			MW	MVAR	MW	MVAR	máx. MVAR	mín. MVAR
5	F-2	Slack	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	F-3	V Cont.	1.00	0.00	0.00	0.00	10.00	-10.00

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los algoritmos, rutinas y subrutinas del Programa de Cortocircuitos que sirvió de referencia para este trabajo, debieron ser actualizados, y requirieron de ciertas modificaciones y correcciones para adaptarse al lenguaje de programación seleccionado y al ambiente Windows en el que se va a trabajar. Con esto se ha demostrado que sí es posible actualizar programas implementados en Fortran y adaptarlos a un lenguaje de alto nivel que maneje una interfaz gráfica como es Visual Basic, con lo cual se obtiene como resultado un programa amigable y comprensible para el usuario.
- Existe una diferencia radical entre Fortran y Visual Basic en lo que se refiere al esquema de manejo de datos para el ingreso y para la salida de reportes. En Fortran se suministran los datos al programa antes de ejecutar la aplicación, generalmente en archivos tipo texto; para lo cual se debe definir un formato específico ya que de estos archivos el programa lee la información, en el mismo formato en que fue ingresada y si se detecta un error durante este proceso, el usuario tendrá que editar el archivo de resultados y ver qué error se produjo. Con Visual Basic el esquema es totalmente diferente ya que el ingreso de datos se lo realiza cuando se está ejecutando la aplicación y además se puede visualizar, corregir o aumentar datos sin necesidad de salir de la aplicación; estos datos son directamente asignados a las variables respectivas conforme se vayan ingresando.

- Por la incompatibilidad que existe entre Fortran y Visual Basic en el esquema para manejo de datos, se hace difícil el trabajar con los algoritmos implementados en Fortran en combinación con la interfaz de Visual Basic. Si se intenta realizar esta combinación, se deben ingresar los datos en Visual Basic, escribirlos en archivos tipo texto con el formato en que serán leídos luego por Fortran, que ejecutará posteriormente las tareas respectivas de modo que entreguen los resultados en un archivo tipo texto, para ser leídos por Visual Basic y emitir los reportes. Este es un proceso complejo que toma demasiado tiempo y en el que se puede incurrir en una serie de errores si no se manejan bien los archivos que se generan; además la velocidad con la que trabaja Visual Basic es superior a la velocidad de Fortran, creando una incompatibilidad adicional en los procesos iterativos. Por lo señalado se concluye que este tipo de combinación no es adecuada, razón por la cual el Programa PCC adaptó las rutinas existentes para trabajar exclusivamente con Visual Basic.
- Un programa implementado en Fortran se ve limitado por el tamaño de la memoria básica del DOS (640 Kb), que es el sistema operativo en el cual se ejecutan las aplicaciones desarrolladas en este lenguaje. En Visual Basic no se tiene este problema de capacidad de memoria, a menos de que no se cumpla el requerimiento básico de memoria con el cual se ejecutará la aplicación. La conclusión que se obtiene es que al trabajar en Visual Basic en un ambiente Windows, la capacidad del programa en cuanto al número de barras, elementos, etc. es muy superior.
- En el análisis de cortocircuitos se realizan una serie de simplificaciones, como es el caso de considerar los voltajes de prefalla iguales a 1 p.u. y de no considerar por otro lado las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt; sin que esto signifique que el análisis arroje resultados erróneos. Esto se ha podido comprobar en los ejemplos de aplicación del Capítulo IV, en donde los resultados obtenidos para los dos modos de

operación son muy cercanos. Las pequeñas variaciones que se tienen en los valores de la corriente de cortocircuito se deben principalmente a la diferencia en los voltajes de prefalla que se consideran en uno y otro caso. De hecho, si no se tiene información de las barras de generación y carga del sistema, es preferible que el usuario trabaje con el modo de operación 1 para evitar asumir datos que pueden llevar a resultados erróneos.

- Al trabajar con el programa PCC, el usuario puede percibir la velocidad con la que se realizan los cálculos, esto se debe a que todas las operaciones y procesos se realizan en 32 bits, provocando con ello que los tiempos de simulación se reduzcan considerablemente. Esta es una de las razones por las cuales se escogió el lenguaje de programación Visual Basic V4.0 para 32 bits.
- Los tiempos de simulación son generalmente cortos y dependen básicamente del número de barras y de elementos ingresados. Las opciones que se le presentan al usuario para ingresar o no datos de la red de secuencia cero, así como datos de acoplamientos mutuos, permiten reducir substancialmente los tiempos de simulación, ya que en los casos en que no existen datos de secuencia cero o datos de acoplamientos mutuos, no se ejecutan rutinas previstas para estos casos.
- El manejo del programa es muy fácil, ya que este consta de un menú principal, a partir del cual se van desplegando una serie de ventanas en donde se indica al usuario la acción o tarea que debe realizar. Este mecanismo le permite al usuario navegar por el sistema sin mayor dificultad, salvo los casos en los que el usuario no tenga una idea clara sobre lo que tiene o quiere realizar. Esto se ha comprobado al ingresar datos, realizar la simulación de fallas y obtener reportes, en los ejemplos de aplicación realizados.

- Para que el programa llegue a ser completamente transparente al usuario, se han tenido que incorporar ciertas rutinas para manejar datos especiales. Por ejemplo elementos con impedancia infinita que aparecen al considerar transformadores con determinado grupo de conexión en la red de secuencia cero. En este caso el programa analiza internamente si se presentan o no ramas de impedancia infinita para darles el tratamiento respectivo. Con esto el usuario no tiene que preocuparse por este problema y puede ingresar los datos para un transformador independientemente del tipo de conexión seleccionado; el tratamiento de los datos lo realiza internamente el programa.
- El programa de cortocircuitos PCC ha sido probado para varios ejemplos tomados de estudios anteriores o de textos de Sistemas de Potencia, cuyos resultados se conocen, y se ha comprobado sus bondades y la exactitud de sus resultados.
- Se espera que este programa sea una herramienta valiosa en el proceso de aprendizaje de los estudiantes de Sistemas Eléctricos de Potencia y que sirva como base para desarrollos futuros. Se ha demostrado con este trabajo que es factible poner en vigencia algoritmos y programas que fueron desarrollados en el pasado; utilizando lenguajes nuevos de programación que por trabajar en un ambiente Windows presenta muchas alternativas adicionales en cuanto a facilidades para el manejo de los datos, obtención de reportes, mejores tiempos de ejecución y mejores capacidades de procesamiento, haciendo que el trabajo sea más ágil, eficiente y agradable.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] C. A. Cañizares, ***Nuevos Algoritmos para el cálculo de cortocircuitos en grandes sistemas de potencia.*** Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional - Quito, 1982.
- [2] J. Grainger, W. D. Stevenson Jr. ***Análisis de Sistemas de Potencia.*** McGraw-Hill, México, 1995.
- [3] S. W. Stagg, H. A. El-Abiad. ***Computer Methods in Power System Analysis.*** McGraw-Hill Book Company, USA, 1968.
- [4] H. A. Daniels, M. -S. Chen, ***Compensation of mutual coupling in the formation of the bus impedance matrix.*** IEEE PAS-90, 3, 1971.
- [5] R. Proulx, D. Crevier. ***New interactive short-circuit calculation algorithm.*** IEEE PAS-101, 8, 1982.
- [6] B. Stott, O. Alsac. ***Fast decoupled load flow.*** IEEE, 1973.
- [7] F. Alvarado. ***Formation of Y-node using the primitive Y-node concept.*** IEEE Vol. PAS-101, 12, 1982.
- [8] H. Vass. ***Circuitos Eléctricos III.*** Escuela Politécnica Nacional - Quito, 1985.
- [9] F. J. Ceballos. ***Microsoft Visual Basic, Aplicaciones para Windows.*** RA-MA Editorial, España, 1992.
- [10] Microsoft Corporation. ***Manual del Programador, Sistema de programación para Windows V 4.0.*** Microsoft Corporation, USA, 1995.

PROGRAMA INTERACTIVO DE CORTOCIRCUITOS PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA (PCC) MANUAL DE USUARIO

1. INTRODUCCION.

Este sistema básicamente permite calcular los voltajes y corrientes de cortocircuito en un sistema de potencia, al someterlo a una condición de falla, que puede ser: falla trifásica, falla trifásica a tierra, falla dos fases - tierra, falla fase - fase y falla monofásica.

El sistema se basa en la existencia de dos modos de operación, que se diferencian exclusivamente en la forma en que se construye la matriz impedancia de barra de secuencia y en los valores de voltaje de prefalla; puesto que la forma en que se calcula los voltajes y las corrientes de cortocircuito en las barras y elementos del sistema es la misma en los dos modos.

El modo de operación 1 no considera cargas, taps de transformadores ni elementos shunt en la construcción de la matriz impedancia de barra de secuencia, asumiendo por lo tanto un voltaje de prefalla igual a 1 p.u. en todas las barras del sistema. Una vez construida la matriz impedancia de barra se procede a la simulación del sistema bajo una determinada condición de falla, con lo cual se llega a obtener los voltajes y corrientes en todas las barras y elementos del sistema.

En el caso del modo de operación 2, para la construcción de la matriz impedancia de barra se consideran las cargas, los taps de transformadores y los elementos shunt; adicionalmente se deben correr flujos de potencia para poder determinar los voltajes de prefalla en todas las barras del sistema. En realidad con este algoritmo se construye la columna de la matriz impedancia de barra de secuencia correspondiente a la barra fallada, con la cual luego de seleccionar el tipo de falla y simular el sistema bajo esta condición se llega a obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito en todas las barras y elementos del sistema.

El sistema está implementado en un ambiente Windows, por lo cual su manejo se torna sencillo, permite presentar reportes tanto en la pantalla como en forma impresa, y además brinda la posibilidad de guardar y recuperar archivos en medios magnéticos.

2. OBJETIVO.

El objetivo fundamental del sistema es brindar al usuario una herramienta que facilite la tarea del cálculo de cortocircuitos en un sistema de potencia, de una manera ágil y rápida con la ayuda de una interfaz gráfica para el manejo de menús y pantallas, reportes y una base de datos para impresión de resultados.

Como existen dos formas de llegar a obtener las corrientes y voltajes de cortocircuitos, se puede realizar un análisis de resultados simulando el mismo sistema bajo los dos modos de operación.

3. REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE

Para ejecutar el sistema debe tener cierto hardware y software instalado en su PC. Los requisitos del sistema incluyen:

- Un sistema compatible IBM con un procesador Pentium o superior.
- 8 Mb de capacidad de memoria RAM
- Un disco duro con un mínimo de espacio disponible de 10 megabytes para instalar completamente el sistema.
- Un monitor aceptado por Windows 95.
- Un mouse (ratón) u otro dispositivo de puntero disponible.
- Windows 95 o posterior, o Windows NT 3.51 o posterior.
- Configuración de pantalla: 800 x 600 píxeles con fuentes pequeñas.

4. CAPACIDAD DEL PROGRAMA.

La capacidad del programa está limitada por el número de barras, elementos y acoplamientos mutuos que se ingresen.

Modo de Operación 1	Nº de barras	500
	Nº de elementos	1000 (500 transformadores)
	Nº acoples	100
Modo de Operación 2	Nº de barras	700 (200 de generación)
	Nº de elementos	1000 (500 transformadores)
	Nº acoples	100

5. INTERFAZ Y DESCRIPCION DEL SISTEMA.

A continuación se explica cómo se encuentran estructurados los menús y submenús del sistema y se describe en forma detallada lo que realiza cada uno de ellos.

5.1. MENU ARCHIVO.

Al iniciar el sistema los únicos menús que aparecen habilitados son el menú **Archivo** y el menú **Ayuda**, tanto para el modo de operación 1 como para el modo de operación 2.

La estructura del menú **Archivo** se presenta a continuación en la figura 1. Como se puede ver las opciones de **Nuevo**, **Abrir** y **Guardar** aparecen desactivadas en un inicio hasta no escoger el modo en el que se va a trabajar.

Archivo	
Nuevo	
Abrir	
Guardar	Ctrl+G
Configurar ...	Ctrl+C
Salir	Ctrl+X

Fig. 1

5.1.1. Configurar.

Es el primer paso que se debe hacer al entrar en el sistema. Al escoger esta opción se presentará la pantalla que se indica en la figura 2, en la cual se tiene la posibilidad de seleccionar el modo de operación.

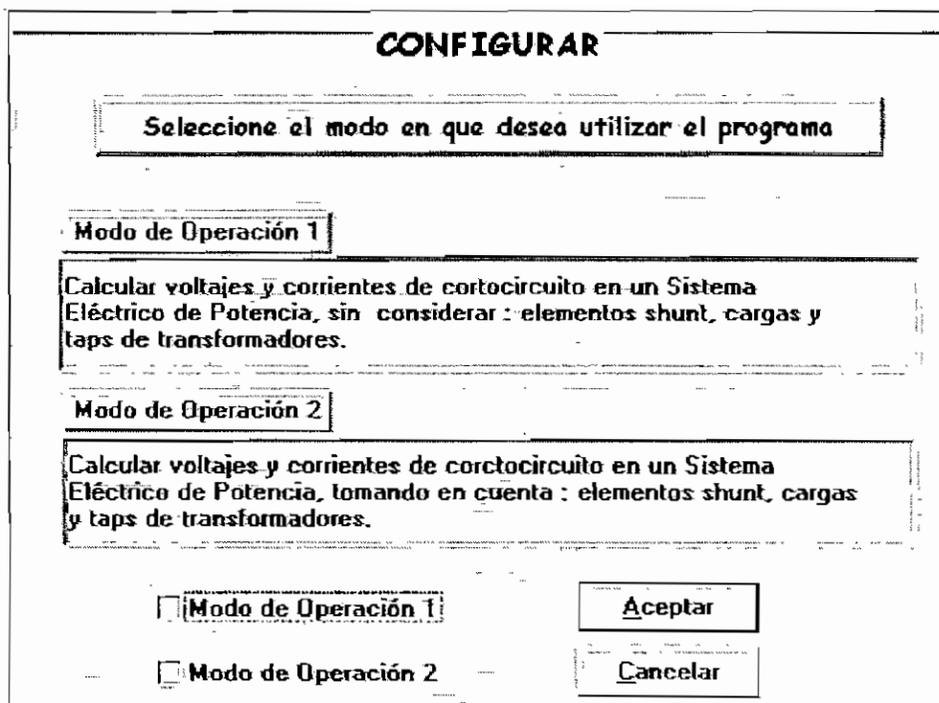


Fig. 2

El modo de operación se selecciona dando un click con el mouse sobre el recuadro correspondiente. Luego se debe presionar el botón **Aceptar** y se habilitarán las opciones **Nuevo** y **Abrir** dentro del menú **Archivo**; asimismo se habilitará todo el Menú principal dependiendo del modo de operación escogido.

En el modo de operación 1, no se dispondrá de la posibilidad de ingresar datos de cargas, taps de transformadores ni elementos shunt, por lo cual no se necesitará correr flujos de potencia. Al seleccionar este modo de operación aparecerán los Menús: **Datos**, **Simulación** y **Resultados** tal como se indica en la figura 3.



Fig. 3

Si el usuario opta por la opción del modo de operación 2, podrá ingresar cargas, taps de transformadores y elementos shunt, logrando con esto mayor precisión en los resultados. Para esto se deberá correr un flujo de potencia, por lo que el proceso tomará un poco más de tiempo. Al seleccionar este modo de operación aparecerán los Menús **Ingreso de Datos**, **Parámetros para Simulación** y **Resultados Obtenidos** como se indica en la figura 4.



Fig. 4

Por último si el usuario elige **Cancelar**, no se desactivará ni activará ningún menú adicional y por lo tanto no se podrá seguir adelante con el proceso de simulación.

Antes de seleccionar uno de los dos modos de operación, el usuario debe verificar con qué datos se cuenta, ya que el programa no le permitirá avanzar si no se ha ingresado todos los datos que se le presenten en pantalla.

5.1.2. Nuevo.

Al seleccionar esta opción del menú, lo que se hace es limpiar todas las matrices y variables del modo en que se está trabajando, con el objeto de que estas matrices y variables estén listos para ser llenados con nuevos datos que van a ser ingresados por parte del usuario. A más de las matrices y variables, las tablas de la base de datos también son limpiadas, ya que éstas serán llenadas nuevamente para la presentación de los reportes.

5.1.3. Abrir.

Esta opción brinda al usuario la posibilidad de recuperar un archivo en el modo de operación en el cual está trabajando, que debe haber sido guardado con anterioridad, para lo cual se presenta la pantalla que se indica en la figura 5.

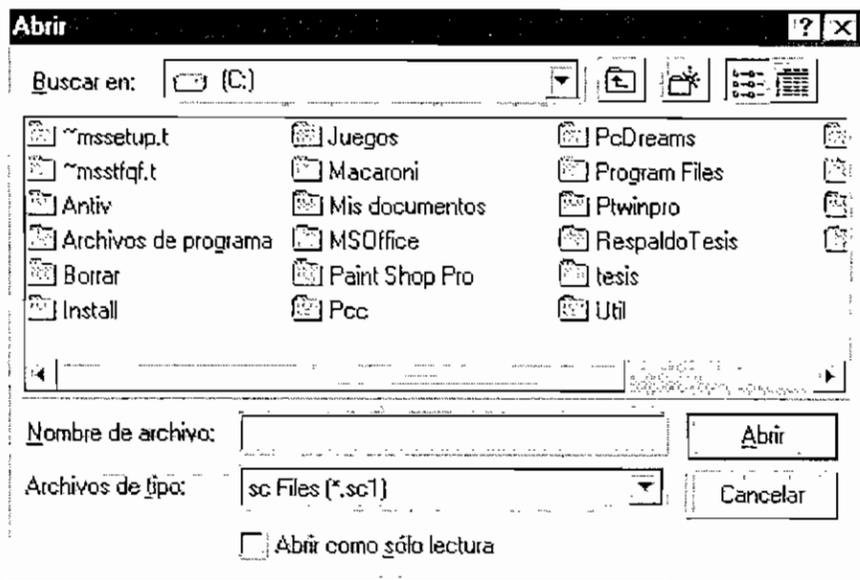


Fig. 5

Si el usuario ha seleccionado el modo de operación 1, podrá recuperar los archivos que tengan la extensión "sc1" y que hayan sido generados bajo este modo; de no ser así se presentará un mensaje de error indicando formato desconocido. Si el formato corresponde al modo de operación 1, recuperará el archivo, empezando por limpiar las matrices, variables y la base de datos, para luego asignar los valores recuperados a las mismas. Recuperados y asignados los datos, el usuario puede corregir algún dato o aumentar un elemento o acople a la lista; pero si los datos recuperados son correctos y no necesitan ser cambiados, el usuario puede escoger el tipo de falla y continuar con la simulación.

En el modo de operación 2, los archivos a recuperar serán los que tengan la extensión "sc2" y que han sido generados en este modo, caso contrario

aparecerá un mensaje de formato desconocido y no se podrá recuperar esta información. Al recuperar el archivo, primero se ponen en blanco las matrices, variables y base de datos, llenándolas luego con los datos que se recuperen. En este modo de operación, luego de recuperar los datos, se puede corregir o aumentar datos de elementos y/o acoples de ser necesario, caso contrario el usuario deberá empezar por ingresar los datos de las barras de generación y carga, y luego continuar con la simulación.

5.1.4. Guardar.

La pantalla que permite realizar esta acción se presenta en la figura 6, el instante en que se activa, así como la forma en que se ejecuta se encuentra ligado con el modo de operación seleccionado. La información se almacena con un formato tipo.

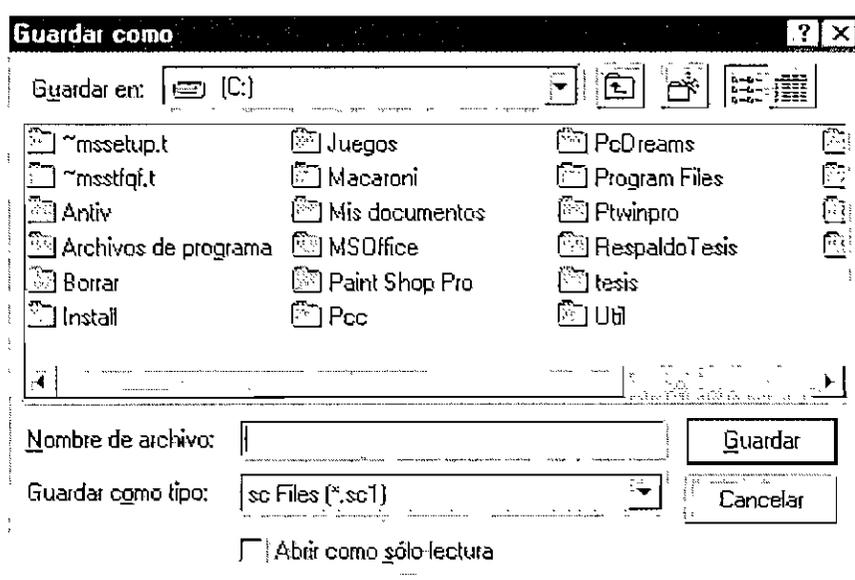


Fig. 6

La opción de **Guardar**, en los dos modos de operación, se activa cuando: se presiona el botón **Terminar** en la pantalla de ingreso de los elementos y no existen acoplamientos mutuos; y en caso de existir datos de acoplamientos mutuos en el sistema la opción de guardar se activa al presionar el botón

Terminar en la pantalla de ingreso de los acoplamientos mutuos. La información que se almacena en primer lugar es referente al sistema, luego se almacenan los datos de los elementos y por último, en caso de existir, los datos de los acoplamientos mutuos.

Los archivos que se generan bajo el modo de operación 1 se guardan con la extensión "sc1" y los archivos generados bajo el modo de operación 2 se guardan con la extensión "sc2".

5.1.5. Salir.

La única función de esta opción es cerrar el sistema cuando se ha terminado de simular un determinado caso u cuando el usuario lo considere oportuno. Antes de salir se debe guardar la información sobre la cual se ha trabajado.

A continuación se describirán los diferentes menús empezando por el modo de operación 1.

5.2. MENU DATOS.- MODO DE OPERACIÓN 1.

Este menú se encuentra estructurado como se indica en la figura 7, y como se puede observar solo la primera opción aparece activada.

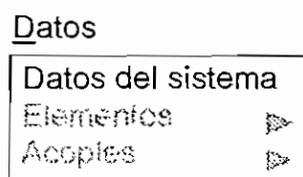
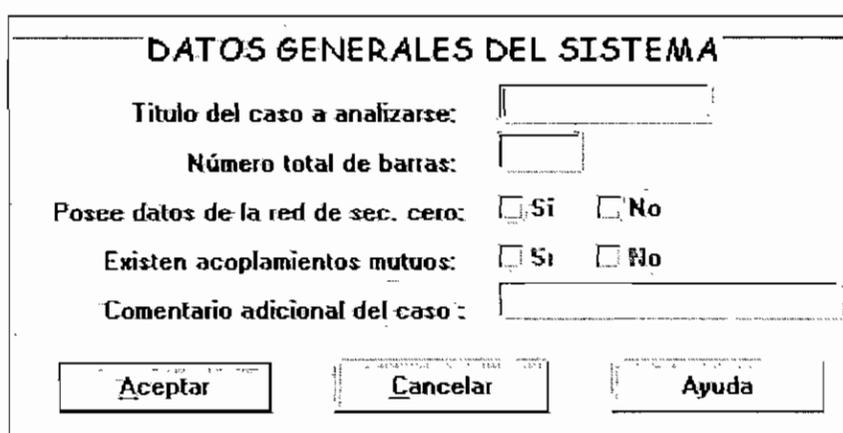


Fig. 7

5.2.1. Datos del sistema.

Al seleccionar esta opción aparecerá la pantalla que se indica en la figura 8, en donde se deben ingresar todos los parámetros generales del sistema. En primer lugar se debe ingresar el título del caso a analizar, el cual por defecto será el nombre del archivo donde se guardarán los datos; sin embargo este campo puede quedar vacío. Este campo acepta cualquier tipo de caracteres, sean estos numéricos o alfanuméricos.



El formulario, titulado "DATOS GENERALES DEL SISTEMA", contiene los siguientes campos:

- Título del caso a analizarse: un campo de texto.
- Número total de barras: un campo de texto.
- Posee datos de la red de sec. cero: dos botones de opción etiquetados "Sí" y "No".
- Existen acoplamientos mutuos: dos botones de opción etiquetados "Sí" y "No".
- Comentario adicional del caso: un campo de texto.

En la parte inferior del formulario hay tres botones: "Aceptar", "Cancelar" y "Ayuda".

Fig. 8

El segundo campo a llenar es el número total de barras del sistema que se va a analizar, y solo podrá ser llenado con caracteres numéricos enteros mayores que cero (positivos), de no ser así se presentará un mensaje de error y no se podrá avanzar con el ingreso de datos hasta corregir este problema.

En el siguiente campo el usuario debe señalar si posee o no datos de la red de secuencia cero. El objetivo es desactivar o activar los campos correspondientes a esta secuencia para optimizar recursos del sistema. Si no se selecciona una de estas dos alternativas, se presentará un mensaje de error. Si la respuesta es **Sí**, se habilitará el siguiente campo que corresponde a la existencia o no de acoplamientos mutuos en el sistema; si por el contrario la

respuesta es **No**, el campo de los acoplamientos mutuos seguirá desactivado y solo se tendrá la opción de simular una falla trifásica o una falla bifásica.

En el cuarto campo se debe indicar si existe o no acoplamientos mutuos en el sistema, lo cual permite activar o desactivar el submenú para el ingreso correspondiente. Si la respuesta es negativa, se pasa por alto el algoritmo para la incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz impedancia de barra de secuencia cero, con lo cual se logra reducir tiempo y recursos de memoria. Cabe recalcar que no pueden existir acoplamientos mutuos si no existen datos de la red de secuencia cero.

En el último campo a ser llenado se puede ingresar un comentario adicional referente al caso que se analiza, el mismo que será impreso en todos los reportes. Se puede digitar cualquier tipo de caracteres o puede quedar vacío.

En este punto se debe señalar que el programa trabajo sobre una potencia base de 100 MVA.

Una vez completados todos los campos, se presiona el botón **Aceptar** para asignar estos datos a las variables correspondientes y poder activar el submenú **Elementos**. Al presionar el botón **Cancelar** no se realiza asignación alguna de variables, ni se activa o desactiva ningún submenú. Por último si se presiona el botón **Ayuda**, se desplegará una ventana para realizar consultas.

5.2.2. Elementos.

Luego de ingresar los datos generales del sistema, automáticamente se activa el submenú **Elementos**, el cual se encuentra estructurado como se indica en la figura 9.

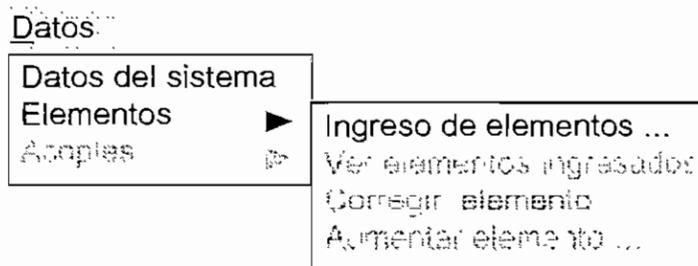


Fig. 9

5.2.2.1. Ingreso de elementos.

Esta opción le permite al usuario ingresar cada uno de los elementos con sus diferentes parámetros, para lo cual se parte de la pantalla que se indica en la figura 10.

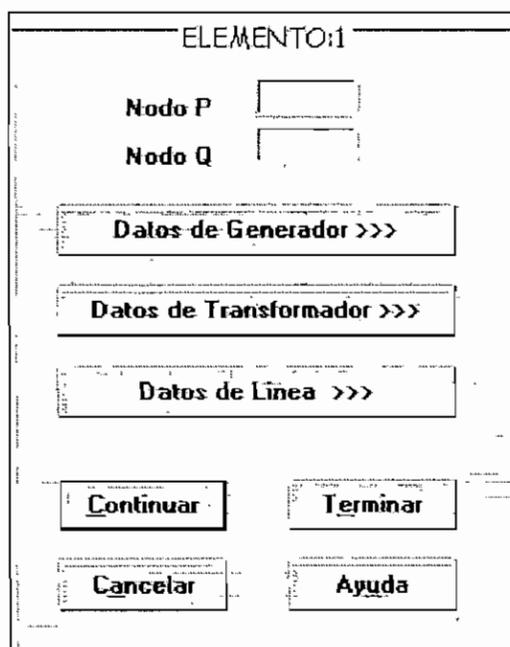


Fig. 10

En la parte superior de la pantalla aparecerá en forma automática y secuencial, el número del elemento que se ingresa. Además se presentan dos campos, en los cuales se deben ingresar los nodos inicial y final, entre los cuales está conectado el elemento, existiendo la posibilidad de ingresar varios

elementos entre los mismos nodos. Los nodos deben ser números enteros mayores o iguales a cero (nodo 0: nodo de referencia). Como recomendación para el usuario, se debe procurar ingresar en forma secuencial los nodos empezando por el nodo de referencia.

Una vez ingresados los nodos se escoge el tipo de elemento para poder definir sus parámetros, esto se lo hace con la ayuda de los botones que se encuentran dentro de la misma pantalla.

El primer botón **Datos de Generador** despliega la pantalla que se indica en la figura 11.

	Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: X	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia de puesta a tierra p.u.: Xn	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fig. 11

En la pantalla de la figura 11, todos los campos se deben llenar con valores numéricos. En el caso de la resistencia, debe ser un valor real mayor o igual a cero, la reactancia del generador y la reactancia de puesta a tierra puede ser cualquier valor real, pero lo que no puede darse es que tanto los valores de resistencia como reactancia en la misma secuencia sean iguales a cero.

Si el usuario ha señalado previamente en los datos generales del sistema que no posee datos de secuencia cero, los campos para el ingreso de estos datos se desactivarán. Cualquier error que se produzca en el ingreso de datos en esta pantalla, hará desplegar ciertos mensajes dependiendo del tipo de error

producido. No se podrá avanzar con el proceso de ingreso si no se corrigen los errores.

Al presionar el botón **Aceptar** en la pantalla de la figura 11, se asignan estos datos a las variables respectivas y se regresa a la pantalla de la figura 10; si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de datos del generador y se regresa a la pantalla de la figura 10. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla con las opciones de consulta.

Si el usuario presiona el botón **Datos de Transformador**, se desplegará la pantalla que se indica en la figura 12.

TRANSFORMADOR

Sec. Positiva Sec. Cero

Resistencia en p.u.: R

Reactancia en p.u.: jX

Conexion >>>

Aceptar Cancelar Ayuda

Fig. 12

En la pantalla de la figura 12 se ingresan la impedancia de secuencia positiva y la impedancia de secuencia cero. Los valores que se deben ingresar en los campos de esta pantalla deben ser valores numéricos. Si en el ingreso de los datos generales del sistema el usuario ha indicado que no se dispone de los datos de la red de secuencia cero, aparecerán desactivados tanto el ingreso de la impedancia de secuencia cero como el botón **Conexión**. Los valores de resistencia no pueden ser negativos, ni el valor de impedancia en cualquiera de las dos secuencia puede ser igual a cero.

Al presionar el botón **Conexión** se desplegará la pantalla de la figura 13, en donde el usuario podrá seleccionar el tipo de conexión del transformador y regresará a la pantalla de la figura 12. Dependiendo del tipo de conexión seleccionado se desplegará la pantalla de la figura 14.

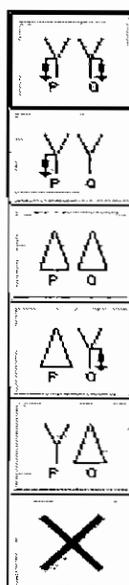


Fig. 13

Fig. 14

Al seleccionar el tipo de conexión, el usuario debe tener cuidado de que los nodos identificados como "p" y "q" en la pantalla de la figura 10, correspondan a los nodos "p" y "q" de los tipos de conexión que se presentan en la pantalla de la figura 13. Tal es el caso por ejemplo, de una conexión Δ -Yt que podría ser identificada como Yt- Δ si los nodos "p" y "q" no son ingresados adecuadamente. Cuando el usuario ha seleccionado la conexión Yt-Yt o Δ -Yt

se presenta la pantalla que se indica en la figura 14, y que permite ingresar la reactancia de puesta a tierra, cuyo valor debe ser real y puede ser igual a cero.

Si una vez ingresados los datos de las impedancias en secuencia positiva y secuencia cero, el usuario directamente presiona el botón **Aceptar** sin presionar previamente el botón **Conexión** (figura 12) el programa por defecto asume una conexión Yt-Yt, con una reactancia de puesta a tierra igual a cero.

Al presionar el botón **Aceptar** en la pantalla de la figura 12, se asignan estos datos a las variables respectivas y se regresa a la pantalla de la figura 10; si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de datos del transformador y se regresa a la pantalla de la figura 10. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá buscar la ayuda que necesite.

Al presionar el botón **Datos de Línea**, se pueden ingresar los parámetros de las líneas de transmisión del sistema, por medio de la pantalla que se indica en la figura 15.

	Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: X	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fig. 15

Si el usuario al ingresar los datos generales del sistema ha indicado que no existen datos para la red de secuencia cero, los campos correspondientes a parámetros de secuencia cero aparecerán desactivados.

Los valores a ser ingresados deben ser valores reales, pero con ciertas restricciones, como por ejemplo el valor de resistencia en cualquier secuencia no puede ser menor a cero, ni los valores de impedancia de cualquier secuencia pueden ser iguales a cero.

Al presionar el botón **Aceptar** en la pantalla de la figura 15, se asignan estos datos a las variables respectivas y se regresa a la pantalla de la figura 10; en cambio si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de datos de la línea de transmisión y se regresa a la pantalla de la figura 10. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá hacer las consultas necesarias.

Una vez que el usuario ha ingresado los datos de un elemento, pudiendo ser este generador, transformador o línea de transmisión, se debe presionar el botón **Continuar** para que los datos sean asignados a ciertas variables y se vuelva a presentar esta pantalla para ingresar otro elemento. Si el usuario no presiona este botón y en su lugar presiona otro botón, todos los datos del elemento que ha ingresado no se asignaran a variable alguna.

Si el usuario considera que ya ha terminado de ingresar todos los elementos del sistema deberá presionar el botón **Terminar**, luego de lo cual desaparecerá la pantalla de ingreso de elementos y se activarán las restantes opciones correspondientes al menú ***Elementos*** y en caso de existir acoplamientos mutuos en el sistema se activará también el submenú ***Acoples***. Si no existen acoplamientos mutuos en el sistema, al presionar el botón **Terminar** se activará la opción ***Guardar*** dentro del menú ***Archivo*** y el submenú ***Elija tipo de falla*** dentro del menú ***Simulación***.

Si el usuario presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el proceso de ingreso de datos de elementos sin haber almacenado ningún valor ni activar ninguna otra opción del menú o submenú. En cambio si se presiona el botón **Ayuda** aparecerá una ventana de ayuda.

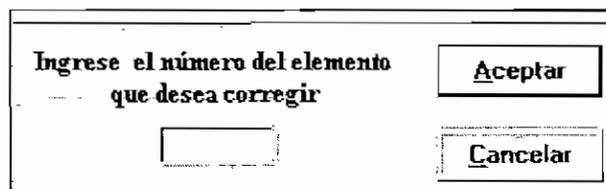
Se recomienda que el usuario ingrese los datos de los elementos en el siguiente orden: generadores, transformadores y líneas de transmisión.

5.2.2.2. Ver elementos ingresados.

En esta opción el usuario tendrá la oportunidad de observar en pantalla un reporte de todos los elementos ingresados, el mismo que puede ser impreso. Este reporte permitirá visualizar si se ha cometido algún tipo de error u omisión al momento de ingresar los datos de algún elemento. Todos los reportes se presentan en el Anexo 2 de esta tesis.

5.2.2.3. Corregir elemento.

Al seleccionar esta opción aparecerá una ventana donde el usuario debe ingresar el número del elemento que se desea corregir, tal como se indica en la figura 16.



Ingrese el número del elemento
que desea corregir

Aceptar

Cancelar

Fig. 16

Una vez que el usuario ingrese el número de elemento que desee corregir y presione el botón **Aceptar** aparecerá la pantalla mostrada en la figura 10, con el número del elemento que se va a corregir, en la cual se ingresa el o los

datos correctamente. Es necesario indicar que si se desea corregir más de un elemento se debe seleccionar la opción **Corregir elemento** tantas veces como elementos se desee corregir.

5.2.2.4. Aumentar elemento.

Esta opción del submenú **Elementos** trabaja de manera similar a la primera opción, esto es al ingreso de elementos. Al seleccionar la opción Aumentar elemento, se desplegará la pantalla de la figura 10, cuyos detalles ya se explicaron en el numeral 3.2.2.1. correspondiente al ingreso de elementos.

5.2.3. Acoples.

Este submenú se habilitará si el usuario ha indicado, en el ingreso de los datos generales del sistema, que existen acoplamientos mutuos en el sistema y se ha presionado el botón **Terminar** en la pantalla de ingreso de elementos. Su estructura se indica en la figura 17.

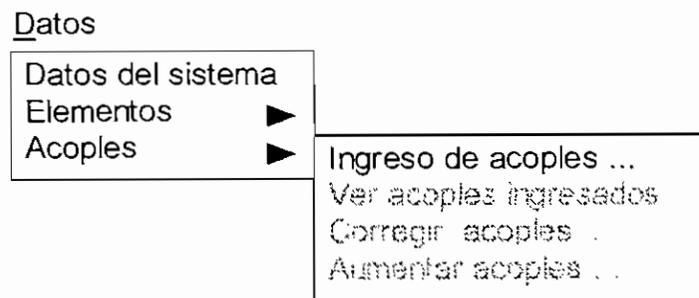


Fig. 17

5.2.3.1. Ingreso de Acoples.

Al seleccionar **Ingreso de acoples** se despliega la pantalla que se indica en la figura 18, en la cual se ingresan el número de los elementos que están acoplados y la reactancia de acoplamiento. El número de acoplamiento aparecerá automáticamente en la parte superior de esta pantalla.

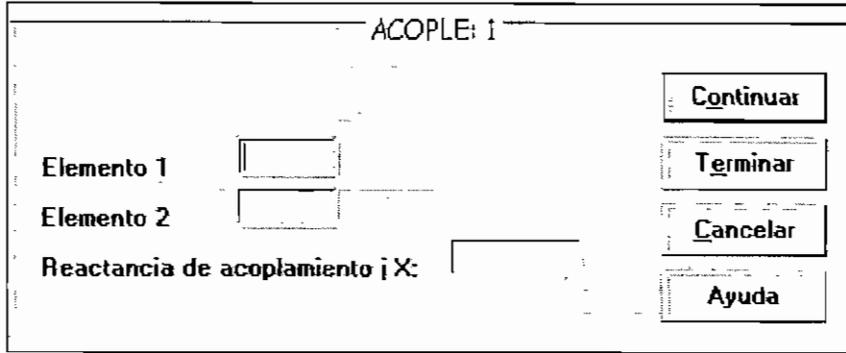


Fig. 18

Los campos de los elementos acoplados deben ser números enteros mayores a cero y serán ingresados de acuerdo con el número que se le ha asignado a cada elemento. Este número puede ser recordado desplegando el reporte de los elementos ingresados.

El tercer campo que el usuario debe llenar es el que corresponde a la reactancia de acoplamiento, cuyo valor debe ser un número real. Cabe aclarar en este punto que todos los campos deben ser llenados para poder seguir adelante.

Para que el usuario ingrese correctamente los elementos acoplados, debe tener en cuenta el sentido de circulación de la corriente, como indica la figura 19.

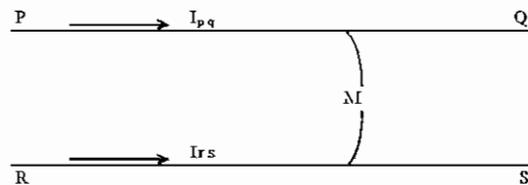


Fig. 19

Por esta razón, en los datos de los elementos acoplados, los nodos iniciales y finales deben ser definidos asumiendo que la corriente que circula por cada elemento va del nodo inicial "p" al nodo final "q", y que estas corrientes entre

elementos acoplados deben tener el mismo sentido para poder definir a la impedancia de acoplamiento mutuo como positiva.

Una vez que el usuario ha ingresado los datos de un acoplamiento mutuo, se debe presionar el botón **Continuar** para que los valores sean asignados a ciertas variables y se vuelva a presentar esta pantalla para ingresar otro acoplamiento. Si el usuario no presiona este botón y en su lugar presiona otro, todos los datos del acople ingresado no se asignaran a variable alguna.

Si el usuario considera que ha ingresado todos los acoplamientos mutuos del sistema, deberá presionar el botón **Terminar**, luego de lo cual desaparecerá la pantalla de ingreso de acoples y se activarán las restantes opciones correspondientes al submenú Acoples. Asimismo al presionar este botón se activará la opción Guardar dentro del menú Archivo y el submenú Elija tipo de falla dentro del menú Simulación.

Si el usuario presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el proceso de ingreso de los acoples mutuos sin haber almacenado ningún valor ni activar ninguna otra opción del menú o submenú. En cambio si se presiona el botón **Ayuda** aparecerá una ventana de ayuda donde el usuario podrá indagar acerca de la duda que tenga referente al ingreso de los acoplamientos mutuos.

5.2.3.2. Ver acoples ingresados.

El usuario al escoger esta opción, tendrá la oportunidad de observar un reporte en pantalla de todos los acoplamientos mutuos ingresados, el mismo que puede ser impreso. Este reporte permitirá visualizar si se ha cometido algún tipo de error u omisión al momento de ingresar los datos de los acoplamiento, en cuyo caso el usuario podrá hacer uso de las dos restantes opciones del submenú **Acoples**. Todos los reportes se presentan en el Anexo 2 de esta tesis.

5.2.3.3. Corregir acoples.

Esta opción le permitirá a usuario corregir uno o más datos de los acoplamientos mutuos ingresados, para lo cual aparecerá una ventana donde se le pida al usuario ingresar el número del acoplamiento que desea corregir, tal como se indica en la figura 20.

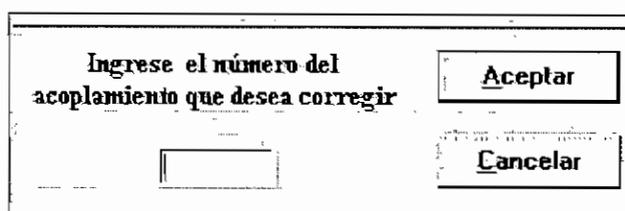
A screenshot of a software dialog box. The title bar is not visible. The main area contains the text "Ingrese el número del acoplamiento que desea corregir" in a bold font. Below this text is a rectangular input field. To the right of the input field are two buttons: "Aceptar" (Accept) and "Cancelar" (Cancel), both in bold font. The dialog box has a standard Windows-style border.

Fig. 20

Una vez que el usuario ingrese el número del acoplamiento que desee corregir y presione el botón **Aceptar** aparecerá la pantalla de la figura 18 con el número del acople que se va a corregir, en la cual se ingresa el o los nuevos datos. Es necesario indicar que si se desea corregir más de un acople se debe seleccionar la opción **Corregir acoples** tantas veces como acoples se desee corregir.

5.2.3.4. Aumentar acoples.

Esta opción del submenú **Acoples** es similar a la opción ingreso de acoples, ya que al seleccionar la opción **Aumentar acoples**, se desplegará la pantalla de la figura 18, cuyos detalles ya se explicaron en el numeral 3.2.3.1.

5.3. MENU SIMULACION.- MODO DE OPERACIÓN 1.

Este menú consta de tres opciones, tal como se indica en la figura 21, de las cuales solo la primera aparece activada y las demás se habilitarán conforme se avance en el proceso de simulación.

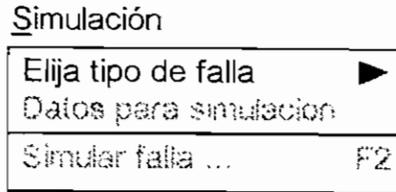


Fig. 21

A continuación se describirá cada uno de los submenús y opciones que presenta el menú Simulación, empezando por el tipo de falla.

5.3.1. Elija tipo de falla.

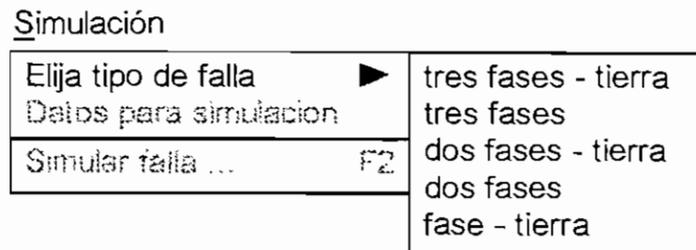


Fig. 22

El usuario deberá escoger el tipo de falla que se desea simular. En un principio todos los tipos de falla se encuentran activados, pero si el usuario en el ingreso de los datos generales del sistema indicó que no se posee los datos de la red secuencia cero, los tipos de falla que se pueden simular son: tres fases - tierra, tres fases y dos fases.

Para aclarar cual es el esquema de las fallas, se presentan estos con la finalidad de que el usuario esté seguro de qué tipo de falla escoger.

La falla tres fases, cuyos resultados son los mismos que los de la falla tres fases - tierra por cuanto el sistema es balanceado, se representa en la figura 23.

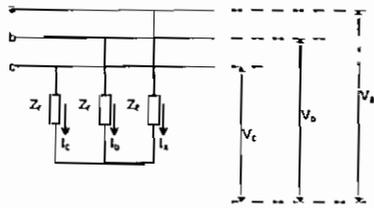


Fig. 23

El esquema de la falla dos fases - tierra se presenta, en la figura 24.

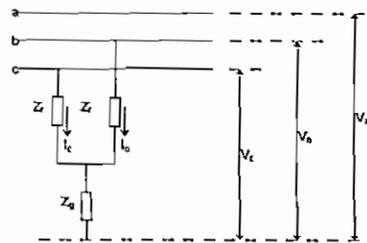


Fig. 24

La falla bifásica o fase - fase tiene el esquema que se presenta en la figura 25.

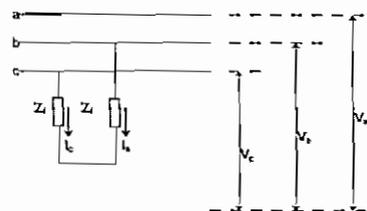


Fig. 25

Por último el esquema de la falla fase - tierra se presenta en la figura 26.

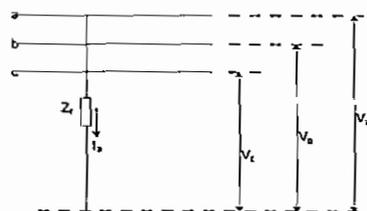


Fig. 26

Solo se puede seleccionar un tipo de falla a la vez y cuando el usuario lo hace aparecerá un visto (check) para indicar el tipo de falla escogido. Luego de definir el tipo de falla por parte del usuario, se activará la opción **Datos para simulación**, dentro del menú **Simulación**.

5.3.2. Datos para simulación.

En esta opción se debe ingresar la barra donde se produce la falla y la impedancia de falla, para lo cual existen dos posibilidades.

Si el usuario ha seleccionado falla dos fases - tierra aparecerá la pantalla que se indica en la figura 27.

DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

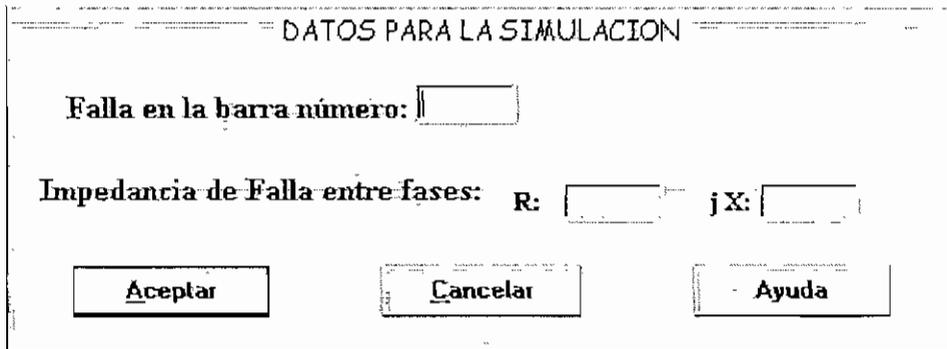
Impedancia de Falla a tierra: R: jX:

Fig. 27

En esta pantalla se debe ingresar la barra donde se produce la falla, cuyo valor debe ser un número entero mayor a cero y debe constar dentro de la lista de barras ingresadas. Los valores de resistencia y reactancia deben ser números reales, pero en el caso de las resistencias deben ser mayores o iguales a cero. En esta caso es factible que los valores de impedancia sean iguales a cero.

Cuando el usuario ha seleccionado un tipo de falla que no sea el dos fases - tierra, se desplegará la pantalla que se indica en la figura 28. El ingreso de

datos en esta pantalla es idéntico al señalado para la pantalla de la figura 27, con la única diferencia que en la pantalla de la figura 28 no aparece la opción del ingreso de la impedancia de falla a tierra.



DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

Fig. 28

Cuando el usuario ha seleccionado una falla fase - tierra, el valor de la impedancia que debe ingresar es la impedancia de falla a tierra.

Para las pantallas de las figuras 27 y 28, una vez llenados todos los campos, al presionar el botón **Aceptar**, se cargarán las variables con los datos ingresados y se activará la opción **Simular falla** del menú **Simulación**. En cambio si se presiona el botón **Cancelar** no se activa opción alguna de ningún menú ni se realiza asignaciones a variable alguna. Por último al presionar el botón **Ayuda** se despliega una pantalla para buscar ayuda sobre un tema específico.

5.3.3. Simular falla.

Una vez que el usuario ha ingresado todos los datos, se llega a la opción de **Simular falla**, la cual permite calcular las corrientes y voltajes de cortocircuito para el tipo de falla escogido.

A continuación y como información se describe brevemente el proceso interno que se desarrolla en la simulación. El primer paso en el proceso interno de

simulación es el ordenamiento de los elementos ingresados, debido a que la matriz impedancia de barra se va construyendo barra a barra. Por esta razón con la finalidad de optimizar el tiempo de procesamiento se recomienda que el orden de los elementos a ingresar sea: generadores, transformadores y líneas de transmisión.

El paso siguiente es determinar si el elemento es rama o enlace, ya que los cálculos para construir la matriz impedancia de barra de secuencia, son diferentes dependiendo del tipo de elemento. Identificados los elementos, se construye la matriz impedancia de barra, tanto de secuencia positiva como de secuencia cero, primero con las ramas y luego con los enlaces. Es necesario aclarar que la matriz impedancia de barra por ser simétrica es almacenada como vector para ahorrar espacio en la memoria.

Se debe mencionar que como Visual Basic no trabaja directamente con números complejos, todas las operaciones que involucran número complejos deben realizarse considerando por separado parte real y parte imaginaria; por lo tanto existirán dos vectores, real e imaginario, donde se almacenará la matriz impedancia de barra de secuencia.

Una vez obtenida la matriz impedancia de barra de secuencia, se procede a analizar, en caso de existir, las ramas de impedancia infinita y posteriormente se incluye el efecto de los acoplamientos mutuos.

Una vez obtenida la matriz impedancia de barra de secuencia, se procede a calcular las corrientes y voltajes de cortocircuito, tanto en barras como en elementos con las ecuaciones descritas en el capítulo II.

Durante este proceso de simulación se llaman a varias subrutinas para realizar una serie de cálculos específicos, tanto en el proceso de construcción de la

matriz impedancia de barra de secuencia como para determinar los voltajes y corrientes de cortocircuito. Estas subrutinas están descritas en el capítulo III.

Una vez que se termina con el proceso de simulación se activan los submenús **Matriz Impedancia de Barra y Voltaje y Corrientes de cortocircuito** pertenecientes al menú **Resultados**.

5.4. MENU RESULTADOS.- MODO DE OPERACIÓN 1.

Este menú tiene la siguiente estructura:

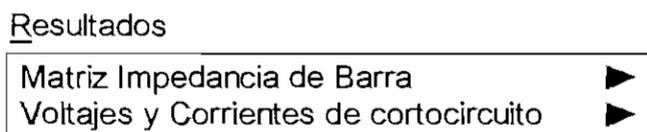


Fig. 29

Queda por analizar las opciones de cada submenú para que el usuario tenga una idea clara acerca del manejo del programa.

5.4.1. Matriz Impedancia de Barra.

En este menú se presentan dos opciones, tal como se indica en la figura 30.

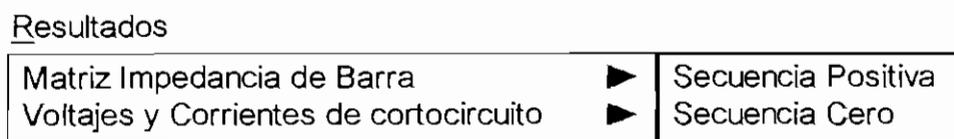


Fig. 30

La primera opción despliega un reporte de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva y la segunda opción presenta un reporte de la matriz impedancia de barra de secuencia cero; en ambos casos los reportes pueden ser impresos. La opción de la matriz de secuencia cero se desactivará si en el

ingreso de los datos generales del sistema, el usuario indicó que no existen los datos de la red de secuencia cero.

Las matrices son presentadas en forma de columnas, pero cada uno de sus elementos están claramente identificados. Los reportes pueden revisarse en el Anexo 2.

5.4.2. Voltajes y Corrientes de cortocircuito.

Este submenú tiene la siguiente estructura:



Fig. 31

En la primera opción de este submenú se pregunta la barra en la que se desea ver resultados de voltajes y corrientes de cortocircuito para el tipo de falla escogido, y se lo hace por medio de la siguiente pantalla.

```
graph TD
    Title[Ingrese el número de barra en donde desea  
ver los voltajes y corrientes de  
cortocircuito:] --- Input[ ]
    Input --- Aceptar[Aceptar]
    Input --- Cancelar[Cancelar]
```

Fig. 32

Si se ha ingresado el valor correcto y se presiona el botón **Aceptar** se regresa al menú y se puede observar que la opción **Ver voltajes y corrientes** se encuentra activada. Esta opción permite visualizar en un reporte los voltajes y

corrientes de cortocircuito para la barra y tipo de falla seleccionadas. Además se presentan las corrientes que circulan durante la falla por los elementos que están conectados a la barra seleccionada, así como los voltajes de las barras interconectadas con la barra seleccionada. Es posible visualizar resultados en diferentes barras del sistema pero se obtendrá un reporte por cada barra.

Cabe señalar que los reportes son diferentes dependiendo del tipo de falla y que su forma se puede revisar en el Anexo 2.

5.5. MENU INGRESO DE DATOS.- MODO DE OPERACIÓN 2.

Su estructura se indica en la figura 33, y como se puede observar solo la primera opción aparece habilitada. A continuación también se describirá las funciones de cada opción y submenú.

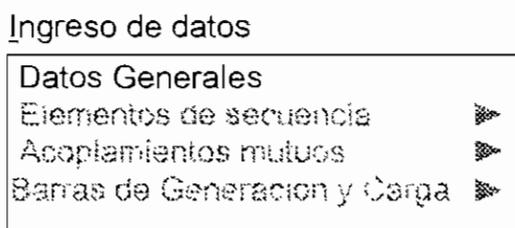


Fig. 33

5.5.1. Datos Generales.

Con esta opción aparecerá la pantalla que se indica en la figura 34, en donde se deben ingresar todos los parámetros generales del sistema. En primer lugar se debe ingresar el título del caso a analizar, el cual por defecto, será el nombre del archivo donde se almacenen los datos; indicando además que este campo puede quedar vacío. Este mismo campo acepta cualquier tipo de caracteres, sean estos numéricos o alfanuméricos.

DATOS GENERALES DEL SISTEMA

Título del caso a analizarse:

Número total de barras:

Posee datos de la red de sec. cero: Sí No

Existen acoplamientos mutuos: Sí No

Comentario adicional del caso:

Fig. 34

El segundo campo que debe ser llenado por el usuario es el número de barras totales en el sistema que se va a analizar y solo podrá ser llenado con valores numéricos enteros mayores que cero (positivos), ya que de no ser así se presentará un mensaje de error y no se podrá avanzar con el ingreso de los datos generales del sistema hasta enmendar el error.

En el campo siguiente se pregunta al usuario si va a ingresar o no datos de la red de secuencia cero, para activar o desactivar los campos correspondientes a esta secuencia y optimizar de esta forma los recursos del sistema. Si no se selecciona una de las dos alternativas, se presentará un mensaje de error.

Si la respuesta es **Sí**, se activa el siguiente campo que corresponde a la existencia o no de acoplamientos mutuos en el sistema, si por el contrario la respuesta es **No** el campo de los acoplamientos mutuos seguirá desactivado y solo se tendrá la opción de simular fallas trifásicas y bifásicas.

En el cuarto campo se debe indicar si existen o no acoplamientos mutuos en el sistema, lo cual permite activar o desactivar la opción del ingreso de acoplamientos mutuos, si la respuesta es negativa se pasa por alto el algoritmo de incorporación de los acoplamientos mutuos en la matriz admitancia de barra de secuencia cero, con lo cual se logra reducir tiempo y

recursos de memoria. Cabe recalcar que no pueden existir acoplamientos mutuos si no existen datos de la red de secuencia cero.

En el último campo a ser llenado se puede ingresar un comentario adicional referente al caso que se analiza, el mismo que será impreso en todos los reportes. Se puede digitar cualquier tipo de caracteres o puede quedar vacío.

Llenados todos los campos, se presiona el botón **Aceptar** para asignar estos datos a las variables correspondientes y poder activar el submenú ***Elementos de secuencia***. Al presionar el botón **Cancelar**, no se realiza asignación de variables ni se activa o desactiva ningún submenú. Por último si se presiona el botón **Ayuda**, se desplegará una ventana en la cual se puede hacer las consultas deseadas.

5.5.2. Elementos de secuencia.

Una vez ingresados los datos generales del sistema, automáticamente se activa el submenú ***Elementos de secuencia***, el cual se encuentra estructurado como se indica en la figura 35.

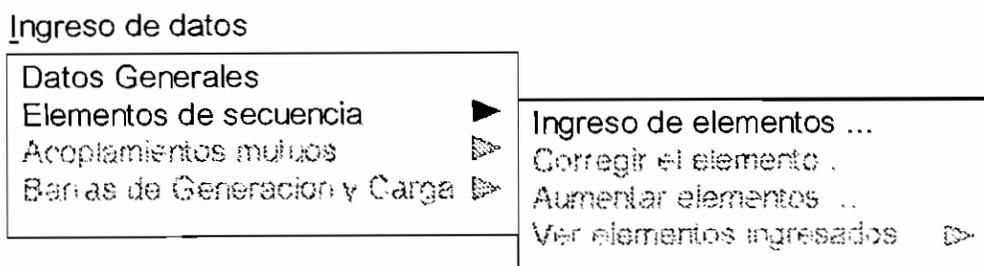


Fig. 35

5.5.2.1. Ingreso de elementos.

Esta opción permite al usuario ingresar cada uno de los elementos y sus diferentes parámetros, para lo cual se parte de la pantalla que se indica en la figura 36.

ELEMENTO:1

Nodo P

Nodo Q

Datos de Generador >>>

Datos de Transformador >>>

Datos de Línea >>>

Capacitor o Reactor >>>

Continuar Terminar

Cancelar Ayuda

Fig. 36

En la parte superior de la pantalla aparecerá en forma automática y secuencial, el número del elemento que se ingresa. Además se presentan dos campos en los cuales se deben ingresar los nodos entre los cuales está conectado el elemento: nodo inicial y nodo final, existiendo la posibilidad de ingresar varios elementos entre los mismos nodos; estos valores deben ser números enteros mayores o iguales a cero (nodo 0 = nodo de referencia). Como recomendación para el usuario, se debe procurar ingresar en forma ordenada y consecutiva los nodos empezando por el nodo de referencia.

Una vez ingresados los nodos, se escoge el tipo de elemento para poder definir sus parámetros, para ello se utilizan los botones que se encuentran dentro de la misma pantalla.

El primer botón **Datos de Generador** despliega la pantalla que se indica en la figura 37, donde el usuario podrá ingresar todos los parámetros correspondiente a los generadores del sistema.

GENERADOR		
	Sec. Positiva	Sec. Cero
Resistencia en p.u.: R	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia en p.u.: jX	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reactancia de puesta a tierra p.u.: jX_n		<input type="text"/>
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="Ayuda"/>		

Fig. 37

En esta pantalla todos los datos de los campos deben ser valores numéricos. En el caso de la resistencia debe ser un valor real mayor o igual a cero, pero no es aceptable que tanto los valores de resistencia como de reactancia en la misma secuencia, sean iguales a cero.

Si el usuario indica en los datos generales del sistema que no posee datos de secuencia cero, los campos para el ingreso de datos de secuencia cero se desactivan. Cualquier error que se produzca en el ingreso de datos en esta pantalla, hará desplegar mensajes de error cuyo texto depende del tipo de error cometido. No se podrá avanzar con el proceso de ingreso si no se corrigen los errores.

Al presionar el botón **Aceptar** en la pantalla de la figura 37, se asignan estos datos a las variables respectivas y se regresa a la pantalla de la figura 36; en cambio si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de datos del generador y regresa a la pantalla de la figura 36. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá buscar la ayuda sobre el tema que requiera.

Continuando con los botones de la pantalla 36, si el usuario presiona **Datos de Transformador**, despliega la pantalla que se indica en la figura 38.

TRANSFORMADOR

Sec. Positiva Sec. Cero

Reactancia en p.u.: jX

Tap "p" :

Tap "q" :

Conexión >>>

Fig. 38

En esta pantalla se ingresan las reactancias del transformador en por unidad tanto en secuencia positiva, como en secuencia cero, así como la posición de los taps en el lado del nodo "p" y en el lado del nodo "q". Los valores que se deben ingresar en los campos de esta pantalla deben ser valores numéricos. Si en el ingreso de los datos generales del sistema el usuario ha indicado que no se dispone de los datos de la red de secuencia cero, aparecerán desactivados tanto el ingreso de la reactancia de secuencia cero como el botón **Conexión**. Todos los campos de esta pantalla deben ser valores numéricos mayores a cero.

Al presionar el botón **Conexión** se desplegará la pantalla de la figura 39, en donde el usuario podrá escoger el tipo de conexión del transformador solo con presionar el tipo que desee y regresará automáticamente a la pantalla de la figura 38 o, dependiendo del tipo de conexión se desplegará la pantalla de la figura 40.

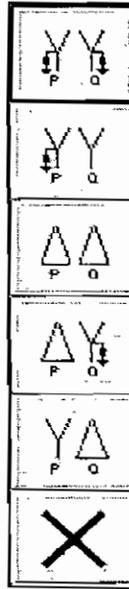


Fig. 39

Fig. 40

En la selección del tipo de conexión el usuario debe tener cuidado de que los nodos identificados como "p" y "q" en la pantalla de la figura 36, correspondan a los nodos "p" y "q" de los tipos de conexión que se presentan en la pantalla de la figura 39. Por ejemplo, de una conexión Δ -Yt que podría ser identificada como Yt- Δ si los nodos "p" y "q" no son ingresados adecuadamente. Cuando el usuario ha seleccionado la conexión Yt-Yt o Δ -Yt se presenta la pantalla que se indica en la figura 40 para ingresar la reactancia de puesta a tierra, cuyo valor debe ser real y puede ser igual a cero.

Si una vez ingresados los datos de las impedancias en secuencia positiva y secuencia cero el usuario presiona el botón **Aceptar** sin presionar previamente

el botón **Conexión** de la pantalla de la figura 38, el programa por defecto asume una conexión Yt-Yt, con una reactancia de puesta a tierra igual a cero.

Al presionar el botón **Aceptar** en la pantalla de la figura 38, se asignan estos datos a las variables correspondientes y se regresa a la pantalla de la figura 36; en cambio si se presiona el botón **Cancelar**, se interrumpe el ingreso de datos del transformador y se regresa a la pantalla de la figura 36. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá buscar la ayuda que necesite.

Al presionar el botón **Datos de Línea**, el usuario tiene la posibilidad de ingresar los parámetros de las líneas de transmisión del sistema bajo análisis, por medio de la pantalla que se indica en la figura 41.

The screenshot shows a window titled "LINEA DE TRANSMISION". It has two columns: "Sec. Positiva" and "Sec. Cero". Under "Sec. Positiva", there are three input fields labeled "Resistencia en p.u.: R", "Reactancia en p.u.: jX", and "Suceptancia en p.u.: jB". Under "Sec. Cero", there are three corresponding input fields. At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Ayuda".

Fig. 41

Si el usuario ha indicado en el ingreso de los datos generales del sistema que no posee los datos de la red de secuencia cero, los campos correspondientes para el ingreso de los parámetros de secuencia cero aparecerán desactivados. Los valores a ser ingresados en estos campos deben ser valores reales, pero con ciertas restricciones como por ejemplo el valor de resistencia en cualquier secuencia no puede ser menor a cero, ni los valores totales de impedancia de cualquier secuencia pueden ser iguales a cero. El valor de la suceptancia que

se ingresa, es el valor total B y no el valor de $B/2$, ya que el programa internamente distribuye la mitad de la susceptancia a cada lado de la línea. Este campo puede ser igual a cero.

Al presionar el botón **Aceptar** en esta pantalla, se llenan las variables respectivas y se regresa a la pantalla de la figura 36; en cambio si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de datos de la línea de transmisión y se regresa a la misma pantalla. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá buscar la ayuda que necesite.

Por último si el usuario desea ingresar el dato de un capacitor o reactor, debe presionar el botón **Capacitor o Reactor Shunt** y se despliega la pantalla:

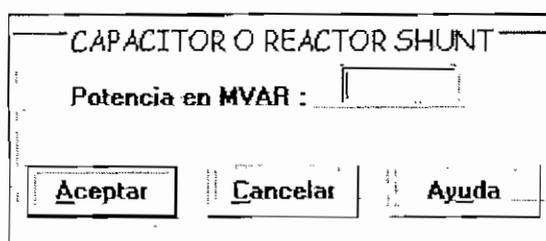


Fig. 42

El usuario debe tomar en cuenta que para ingresar la potencia de un capacitor esta debe ser positiva, en cambio la potencia será negativa cuando se trate de un reactor. Uno de los nodos entre los que se conecta este elemento será necesariamente el nodo de referencia (nodo 0), ya que estos elementos se conectan en paralelo al sistema.

Al presionar el botón **Aceptar** en esta pantalla, se asigna el valor ingresado a la variable correspondiente y se regresa a la pantalla de la figura 36; en cambio si se presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el ingreso de la potencia del elemento shunt (capacitor o reactor) y se regresa a la pantalla de la figura 36. Por último al presionar el botón de **Ayuda** aparecerá una pantalla en donde podrá buscar la ayuda sobre el tema que requiera.

Una vez que el usuario ha ingresado los datos de un elemento, pudiendo ser este generador, transformador, línea de transmisión y elemento shunt (capacitor o reactor), se debe presionar el botón **Continuar** para que los valores sean asignados a ciertas variables, se compruebe la existencia de algún error y se vuelva a presentar esta pantalla (figura 36) para ingresar otro elemento. Si el usuario no presiona este botón y en su lugar presiona otro botón, todos los datos del elemento que ha ingresado no se asignaran a variable alguna y es como que no se hubiera ingresado.

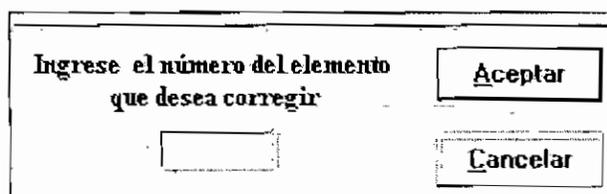
Si el usuario considera que ha terminado de ingresar todos los elementos del sistema, deberá presionar el botón **Terminar**, luego de lo cual desaparecerá la pantalla de ingreso de elementos y se activarán las restantes opciones correspondientes al submenú ***Elementos de secuencia*** y en caso de existir acoplamientos mutuos se activará también el submenú ***Acoplamientos mutuos***. Si no existen acoplamientos mutuos en el sistema, se activará el submenú ***Barras de Generación y Carga*** dentro del menú ***Ingreso de datos*** y la opción de ***Guardar*** dentro del menú ***Archivo***.

Si el usuario presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el proceso de ingreso de datos de elementos sin haber almacenado ningún valor ni activado ninguna otra opción del menú o submenú. En cambio si se presiona el botón **Ayuda** aparecerá una ventana de ayuda donde el usuario podrá indagar acerca de la duda que tenga con respecto al ingreso de elementos.

Se recomienda que el usuario ingrese los datos de los elementos en el siguiente orden: generadores, transformadores, líneas de transmisión y elementos shunt (capacitor o reactor).

5.5.2.2. Corregir el elemento.

Al seleccionar esta opción aparecerá una ventana donde se le pide al usuario ingresar el número del elemento que desea corregir, tal como se indica en la figura 43.



The image shows a rectangular dialog box with a thin border. Inside the box, the text "Ingrese el número del elemento que desea corregir" is centered at the top. Below this text is a small, empty rectangular input field. To the right of the input field, there are two buttons stacked vertically. The top button is labeled "Aceptar" and the bottom button is labeled "Cancelar". Both buttons have a simple rectangular border.

Fig. 43

Una vez que el usuario ingrese el número de elemento que desee corregir y presione el botón **Aceptar** aparecerá la pantalla de la figura 36 con el número del elemento que se va a corregir, en la cual se ingresa el o los datos correctamente. Es necesario indicar que si se desea corregir más de un elemento, se debe seleccionar la opción **Corregir el elemento** tantas veces como elementos se deseen corregir.

5.5.2.3. Aumentar elementos.

Esta opción del submenú **Elementos de secuencia** es parecida a la primera opción, esto es al Ingreso de elementos. Al seleccionar la opción **Aumentar elementos**, se desplegará la pantalla de la figura 36, cuyos detalles ya se explicaron en el numeral 3.5.2.1.

5.5.2.4. Ver elementos ingresados.

Este submenú tiene la siguiente estructura:

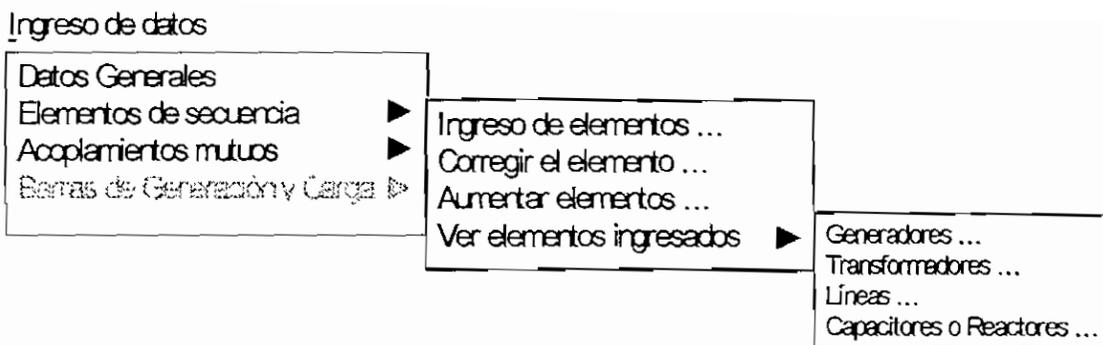


Fig. 44

En este submenú el usuario tendrá la oportunidad de observar un reporte en pantalla de todos los elementos ingresados y clasificados por tipo de elemento, el mismo que puede ser impreso. Este reporte permitirá visualizar si se ha cometido algún tipo de error u omisión al momento de ingresar los datos de alguno de los elementos, para lo cual el usuario podrá hacer uso de las dos restantes opciones del submenú **Elementos de secuencia**. Todos los reportes se presentan en el Anexo 2.

5.5.3. Acoplamiento mutuos.

Este submenú se activa si el usuario ha indicado, en el ingreso de los datos generales del sistema, que existen acoplamiento mutuos en el sistema y se ha presionado el botón **Terminar** en la pantalla de ingreso de elementos. Su estructura se indica en la figura 45.

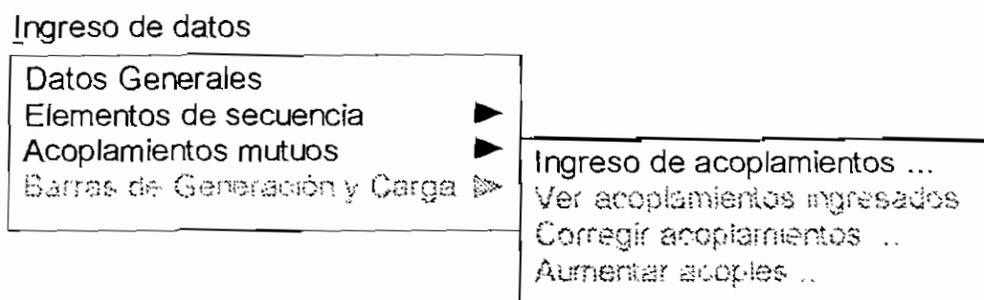
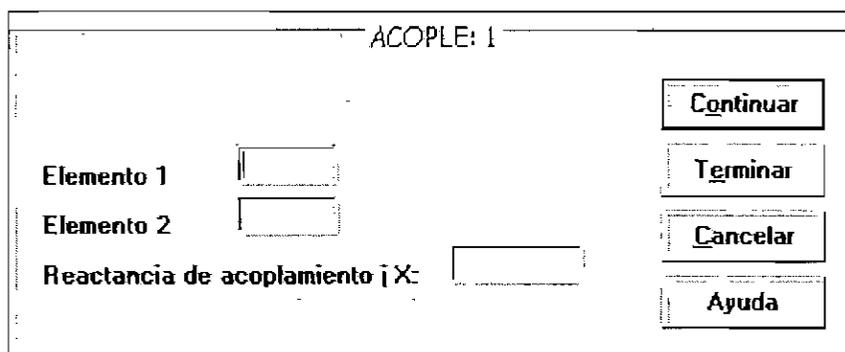


Fig. 45

5.5.3.1. Ingreso de acoplamientos.

Al seleccionar **Ingreso de acoplamientos** se despliega la pantalla que se indica en la figura 46, en la cual se ingresan los elementos que están acoplados y la reactancia de acoplamiento. El número de acoplamiento aparecerá automáticamente en la parte superior de esta pantalla.

Los campos de los elementos acoplados deben ser números enteros mayores a cero y serán ingresados de acuerdo con el número que se le ha asignado a cada elemento. Este número puede ser observado desplegando el reporte de los elementos ingresados.



The screenshot shows a software interface window titled "ACOPLE: 1". On the left side, there are three input fields. The first is labeled "Elemento 1", the second "Elemento 2", and the third "Reactancia de acoplamiento | X:". To the right of these fields is a vertical column of four buttons: "Continuar", "Terminar", "Cancelar", and "Ayuda".

Fig. 46

El tercer campo que el usuario debe llenar es el que corresponde a la reactancia de acoplamiento, cuyo valor debe ser real. Para que el usuario ingrese correctamente los elementos acoplados, debe tener en cuenta el sentido de circulación de la corriente, como se indicó en el ingreso de acoples para el modo de operación 1.

Una vez que el usuario ha ingresado los datos de un acoplamiento mutuo, se debe presionar el botón **Continuar** para que los valores sean asignados a las variables correspondientes y se vuelva a presentar esta pantalla para ingresar otro acoplamiento. Si el usuario no presiona este botón y en su lugar presiona

otro botón, todos los datos del acople ingresado no se asignarán a variable alguna.

Si el usuario considera que ha ingresado todos los acoplamientos mutuos del sistema, deberá presionar el botón **Terminar**, luego de lo cual desaparecerá la pantalla de ingreso de acoples y se activarán las restantes opciones correspondientes al submenú **Acoples**. Asimismo al presionar este botón se activará el submenú **Barras de Generación y Carga** y la opción **Guardar** dentro del menú **Archivo**.

Si el usuario presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el proceso de ingreso de los acoplamientos mutuos sin haber almacenado ningún valor ni activado ninguna otra opción del menú o submenú. En cambio si se presiona el botón **Ayuda** aparecerá una ventana de ayuda donde el usuario podrá indagar acerca de la duda que tenga referente al ingreso de los acoplamientos mutuos.

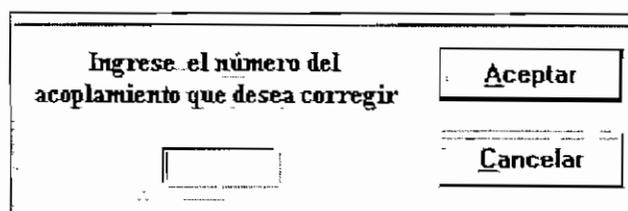
5.5.3.2. Ver acoplamientos ingresados.

El usuario al escoger esta opción, tendrá la oportunidad de observar un reporte en pantalla de todos los acoplamientos mutuos ingresados, el mismo que puede ser impreso. Este reporte permitirá visualizar si se ha cometido algún tipo de error u omisión al momento de ingresar los datos de un acoplamiento en particular, para lo cual el usuario podrá hacer uso de las dos restantes opciones del submenú **Acoplamientos mutuos**. Todos los reportes se presentan en el Anexo 2.

5.5.3.3. Corregir acoplamientos.

Esta opción le permitirá a usuario corregir uno o más datos de los acoplamientos mutuos ingresados, para lo cual aparecerá una ventana donde

se le pide al usuario ingresar el número del acoplamiento que desea corregir, tal como se indica en la figura 47.



El formulario muestra un campo de entrada con el texto "Ingrese el número del acoplamiento que desea corregir" y dos botones: "Aceptar" y "Cancelar".

Fig. 47

Una vez que el usuario ingrese el número del acoplamiento que desee corregir y presione el botón **Aceptar** aparecerá la pantalla de la figura 46 con el número del acople que se va a corregir, en la cual se ingresa el o los datos corregidos. Es necesario indicar que si se desea corregir más de un acople se debe seleccionar la opción **Corregir acoplamientos** tantas veces como acoples se desee corregir.

5.5.3.4. Aumentar acoples.

Esta opción del submenú **Acoples** es similar a la opción ingreso de acoplamientos, ya que al seleccionar la opción **Aumentar acoples**, se desplegará la pantalla de la figura 46, cuyos detalles ya se explicaron en el numeral 3.5.3.1.

5.5.4. Barras de Generación y Carga.

La estructura de este submenú se indica a continuación en la figura 48.

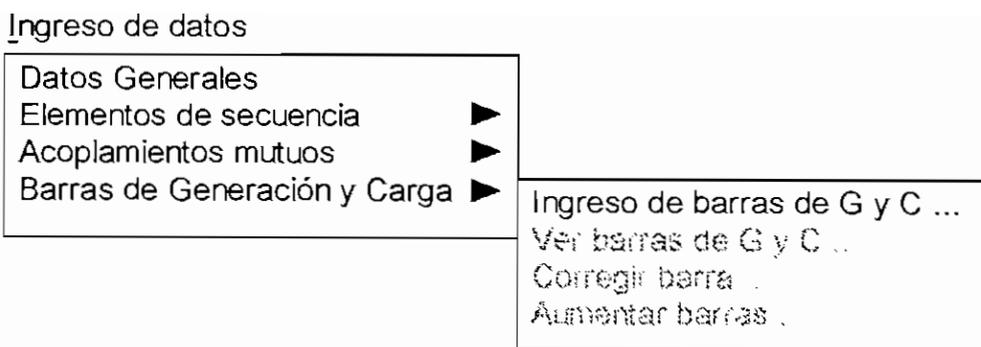


Fig. 48

En este submenú se ingresan los datos de las barras necesarios para correr los flujos de potencia para la red de secuencia positiva. A continuación se describirán las opciones de este submenú.

5.5.4.1. Ingreso de Barras de Generación y Carga.

Al ejecutarse esta opción y antes de que aparezca la pantalla de la figura 49, se forma la matriz admitancia de barra de secuencia, incorporando en caso de existir, los acoplamientos mutuos en la matriz admitancia de barra de secuencia cero. Una vez que se construye la matriz admitancia de barra de secuencia, se carga la pantalla de la figura 49 para el ingreso de los datos de barras de generación y carga.

En esta pantalla se deben llenar todos los campos disponibles, empezando por el número de la barra cuyos datos se van ingresar. Este dato debe ser un valor numérico entero mayor a cero y que haya sido ingresado en el programa. Identificada la barra por medio de su número, se debe ingresar el tipo de barra; siendo necesario aclarar que por defecto la primera barra que se ingresa deberá ser la barra *slack*.

INGRESO DE DATOS DE LAS BARRAS

Barra número :

Barra tipo : Slack
 Voltaje controlado
 Carga

Módulo del voltaje (p.u.) :

Potencia de Generación Activa (MW) :

Potencia de Gener. Reactiva (MVAR) :

Potencia de Carga Activa (MW) :

Potencia de Carga Reactiva (MVAR) :

Pot. Reactiva máx. de Gene. (MVAR) :

Pot. Reactiva mín. de Gene. (MVAR) :

Fig. 49

Acto seguido se deben ingresar los parámetros correspondientes al tipo de barra, para lo cual se deben tomar en cuenta de manera general los siguientes criterios:

- Barras de carga: estas barras por lo general no tienen generación pero en ciertos casos se puede especificar los valores de P_g y Q_g . Los valores a ingresar son las potencias de la carga (P_c y Q_c) y los valores a ser determinados son $|V|$ y δ . A estas barras por lo general se les llama barras P-Q.
- Barras de voltaje controlado: este tipo de barras mantienen constante el valor de la magnitud del voltaje. Controlando la generación de MW por medio del ajuste de la fuente de energía mecánica y la magnitud del voltaje puede ser controlada al ajustar la excitación del generador. Se especifica la potencia real de generación (P_g) y el módulo del voltaje ($|V|$) y lo que se

quiere determinar es el valor de ángulo del voltaje (δ). Estas barras tiene conectado un generador y se las conoce como barras P-V.

- Barra slack: el ángulo del voltaje en esta barra sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de barra ($\delta = 0^0$), así, la magnitud del voltaje se especifica como la otra cantidad conocida y por lo general es igual a 1 por unidad. Además esta barra se debe asignar a una barra con generación.

Una vez que el usuario ha ingresado todos los parámetros correspondientes a una determinada barra, se debe presionar el botón **Aceptar** para que estos valores sean asignados a las variables respectivas y se vuelva a cargar la misma pantalla para ingresar los datos de otra barra. En la misma pantalla se indican las unidades en las que debe ingresar los datos. Si el usuario no presiona este botón y en su lugar presiona otro, todos los datos de la barra ingresada no se asignarán a variable alguna.

Si el usuario considera que ha ingresado todos los acoplamientos mutuos del sistema, deberá presionar el botón **Terminar**, luego de lo cual desaparecerá la pantalla de ingreso de datos de las barras y se activarán las restantes opciones correspondientes al submenú ***Barras de Generación y Carga***. Asimismo al presionar este botón se activará el submenú ***Elija tipo de falla*** dentro del menú ***Parámetros para Simulación***.

Si el usuario presiona el botón **Cancelar** se interrumpe el proceso de ingreso de datos de las barras sin haber almacenado ningún valor ni activar ninguna otra opción del menú o submenú. En cambio si se presiona el botón **Ayuda** aparecerá una ventana de ayuda donde el usuario podrá indagar acerca de la duda que tenga referente al ingreso de los datos de las barras de generación y carga.

5.5.4.2. Ver barras de G y C (Generación y Carga).

El usuario al escoger esta opción, tendrá la oportunidad de observar un reporte en pantalla de todas las barras ingresadas, el mismo que puede ser impreso. Este reporte permitirá visualizar si se ha cometido algún tipo de error u omisión al momento de ingresar los datos de una barra en particular, para lo cual el usuario podrá hacer uso de las dos restantes opciones del submenú ***Barras de Generación y Carga.***

Aparecen en este reporte barras ficticias que el usuario no ha ingresado por teclado, las mismas que son creadas antes de correr los flujos de potencia para fijar los voltajes de las barras generadoras; estas barras se acompañan de una etiqueta para que sean reconocidas por el usuario. Todos los reportes se presentan en el Anexo 2.

5.5.4.3. Corregir barra.

Esta opción le permitirá a usuario corregir uno o más datos de las barras ingresadas, para lo cual volverá a aparecer la pantalla de la figura 49 cuyas características ya se detallaron en la sección Ingreso de barras de Generación y Carga en el numeral 3.5.4.1.

5.5.4.4. Aumentar barras.

Esta opción del submenú ***Barras de Generación y Carga*** es similar a la opción Ingreso de barra de Generación y Carga, ya que al seleccionar la opción Aumentar barras, se desplegará la pantalla de la figura 49, cuyos detalles ya se explicaron en el numeral 3.5.4.1.

5.6. MENU PARAMETROS PARA SIMULACION.- MODO DE OPERACIÓN 2.

Este menú consta de tres opciones, tal como se indica en la figura 50; de las cuales solo la primera aparece activada y las demás se activarán conforme se avance en el proceso de simulación.

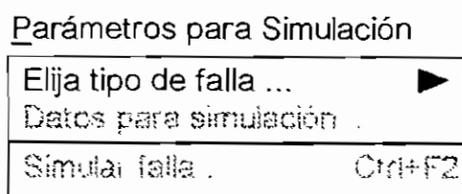


Fig. 50

A continuación se describirá cada uno de los submenús y opciones que presenta el menú Parámetros para Simulación, empezando por el tipo de falla.

5.6.1. Elija tipo de falla.

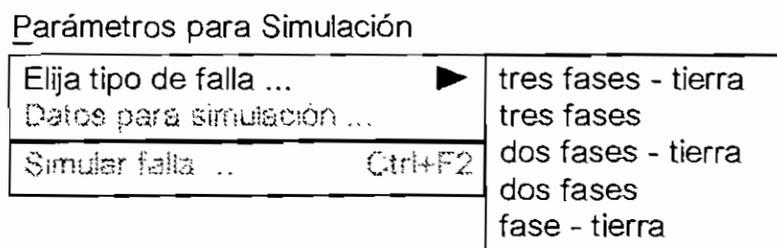


Fig. 51

En este submenú, el usuario deberá escoger el tipo de falla que se desea simular. En un principio todos los tipos de falla se encuentran activados, pero si el usuario en el ingreso de los datos generales del sistema indicó que no posee los datos de la red secuencia cero, únicamente se pueden simular fallas tres fases - tierra, tres fases y dos fases.

Solo se puede seleccionar un tipo de falla a la vez y cuando el usuario lo hace aparecerá un visto (check) para indicar el tipo de falla escogido. Luego de definir el tipo de falla por parte del usuario, se activará la opción **Datos para simulación**, dentro del menú **Parámetros para Simulación**.

5.6.2. Datos para simulación.

En esta opción el usuario debe ingresar: la barra donde se produce la falla y la impedancia de falla, para lo cual existen dos posibilidades.

Si el usuario escoge un tipo de falla dos fases - tierra, aparecerá la pantalla que se indica en la figura 52.

DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

Impedancia de Falla a tierra: R: jX:

Aceptar Cancelar Ayuda

Fig. 52

En esta pantalla se debe ingresar la barra donde se produce la falla, cuyo valor debe ser un número entero mayor a cero y debe constar dentro de la lista de barras ingresadas. Los valores de resistencia y reactancia deben ser números reales, pero en el caso de las resistencias deben ser mayores o iguales a cero. En este es aceptable que los valores de impedancia sean iguales a cero.

Cuando el usuario ha seleccionado un tipo de falla diferente, se desplegará la pantalla que se indica en la figura 53. El ingreso de datos en esta pantalla es

idéntico al señalado para la pantalla de la figura 52, con la única diferencia que en la pantalla de la figura 53 no aparece la opción del ingreso de la impedancia de falla a tierra.

DATOS PARA LA SIMULACION

Falla en la barra número:

Impedancia de Falla entre fases: R: jX:

Fig. 53

Cuando el usuario ha seleccionado una falla fase - tierra, el valor de la impedancia que debe ingresar es la impedancia de falla a tierra.

Para las pantallas de las figuras 52 y 53, una vez llenados todos los campos, al presionar el botón **Aceptar**, se cargarán las variables con los datos ingresados y se activará la opción **Simular falla** del menú **Parámetros para Simulación**. En cambio si se presiona el botón **Cancelar** no se activa opción alguna de ningún menú ni se realiza asignaciones a ninguna variable. Por último al presionar el botón **Ayuda** se despliega una pantalla para buscar ayuda sobre un tema específico.

5.6.3. Simular falla.

Una vez que el usuario ha ingresado todos los datos, se llega a la opción de Simular falla, la cual permite calcular las corrientes y voltajes de cortocircuito para el tipo de falla escogido.

El proceso de simulación empieza antes de ingresar los datos de las barras de generación y carga para poder correr los flujos de potencia, tal como se

explicó anteriormente. Lo que se realiza básicamente en ese punto es la construcción de la matriz admitancia de barra de secuencia considerando los acoplamientos mutuos en caso de existir. Esta matriz es almacenada en dos vectores, la parte real y la parte imaginaria por separado, pero como esta matriz es porosa, solo se almacena en los vectores las admitancias diferentes de cero. Una vez obtenida la matriz admitancia de barra de secuencia, se ingresan los datos de las barras de generación y carga, quedando listo para empezar el cálculo de la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia.

Como información se describe brevemente el proceso interno que se desarrolla en la simulación, en la cual se empieza por correr un flujo de potencia en el circuito de secuencia positiva para determinar los voltajes iniciales de barra de este sistema. Para ello se utiliza un flujo de potencia desacoplado rápido de Newton - Raphson. Obtenidas las condiciones iniciales, se procede a introducir las cargas dentro de la matriz admitancia de barra de secuencia positiva, esto se lo puede hacer ya que las cargas son consideradas de impedancia constante. Además se define a los generadores como fuentes de voltaje fija para poder correr los flujos de carga con Z_s incluida.

A continuación se construye la matriz admitancia primitiva de secuencia de los elementos no acoplados, con la finalidad de utilizar estos valores en el cálculo de las corrientes por los elementos durante la falla.

Se introduce el valor de la admitancia ficticia Y_s en la matriz admitancia de barra correspondiente a la barra fallada y se vuelve a correr un flujo de potencia desacoplado rápido de Newton Raphson. Luego esta admitancia ficticia es retirada de la matriz admitancia de barra con lo cual se puede encontrar la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva.

Si existen datos de secuencia cero, se corre un flujo de potencia utilizando el algoritmo de Gauss Seidel simplificado, obteniendo con ello los voltajes de barra que luego permitirán encontrar la columna correspondiente a la barra fallada de la matriz impedancia de barra de secuencia cero.

Una vez obtenidas las columnas correspondientes a la barra fallada de las matrices de secuencia positiva y secuencia cero, se procede a realizar los cálculos de los voltajes y corrientes de cortocircuito.

Durante todo el proceso de simulación hasta llegar a obtener los voltajes y corrientes de cortocircuito, se han empleado una serie de subrutinas muy parecidas a las del modo de operación 1 que se las explica en el capítulo III.

Una vez que se termina con el proceso de simulación se activan los submenús **Matriz Impedancia de Barra** y **Voltaje y Corrientes de cortocircuito** pertenecientes al menú **Resultados Obtenidos**.

5.7. MENU RESULTADOS OBTENIDOS.- MODO DE OPERACIÓN 2.

Este menú tiene la siguiente estructura:

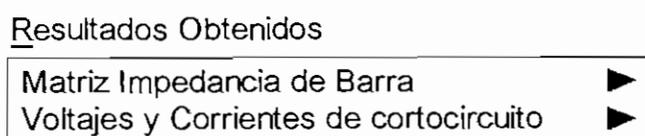


Fig. 54

A continuación se analizarán las opciones de cada submenú para que el usuario tenga una idea clara acerca del manejo del programa en este modo de operación.

5.7.1. Matriz Impedancia de Barra.

En este menú se presentan dos opciones, tal como se indica en la figura en la figura 55.

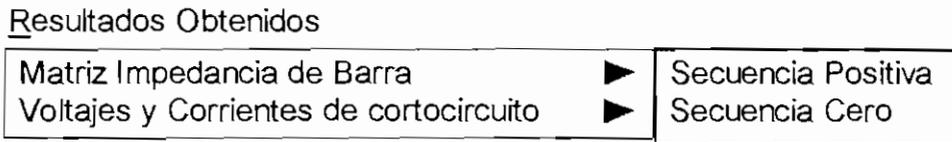


Fig. 55

La primera opción despliega un reporte con los valores de la columna de la matriz impedancia de barra de secuencia positiva, que corresponde a la barra fallada; y la segunda opción presenta un reporte con los valores de la columna de la matriz impedancia de barra de secuencia cero, que corresponde a la barra fallada. En ambos casos los reportes pueden ser impresos.

La opción de la matriz de secuencia cero se desactivará si en el ingreso de los datos generales del sistema, el usuario indicó que no posee los datos de la red de esta secuencia. Los reportes pueden revisarse en el Anexo 2.

5.7.2. Voltajes y Corrientes de cortocircuito.

Este submenú tiene la siguiente estructura:

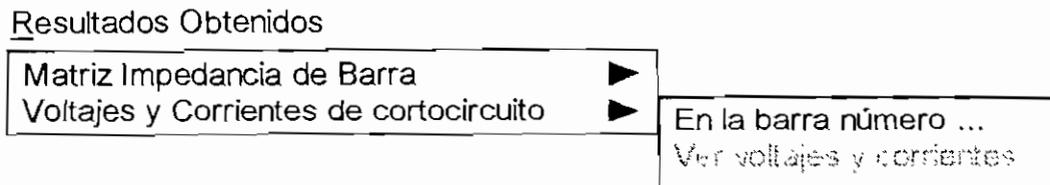


Fig. 56

En la primera opción de este submenú se pregunta para que barra se desean ver los resultados de los voltajes y corrientes de cortocircuito para el tipo de falla escogido, por medio de la siguiente pantalla.

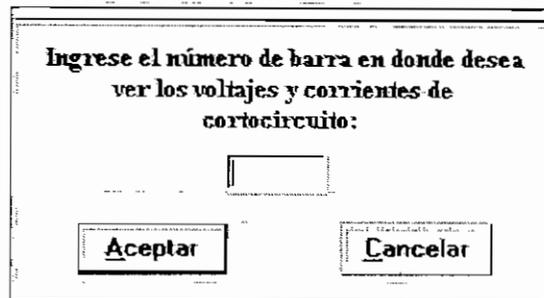


Fig. 57

Si se ha ingresado el valor correcto y se presiona el botón **Aceptar** se regresa al menú y se puede observar que la opción ***Ver voltajes y corrientes*** se encuentra activada. Esta opción permite visualizar en un reporte los voltajes y corrientes de cortocircuito para la barra y tipo de falla seleccionada. Además se presentan las corrientes de cortocircuito que circulan por los elementos que se encuentran conectados a esta barra, así como los voltajes de las barras interconectadas con la barra fallada.

Se puede imprimir más de un reporte con diferentes barras, para lo cual se debe escoger el número de la barra tantas veces como barras se desee observar. Cabe señalar que los reportes son diferentes dependiendo del tipo de falla y que su forma se puede visualizar en el Anexo 2.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE COTOCIRCUITOS PC

ELEMENTOS INGRESADOS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE:

COMENTARIO:

Elemento	Tipo	Nodo P	Nodo Q	Z secuencia (+)		Z secuencia (0)	
				R	j X	R	j X

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

GENERADORES INGRESADOS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:

COMENTARIO:

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva		Sec. Cero	
	P	Q	R	jX	R	jX

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

TRANSFORMADORES INGRESADOS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:

COMENTARIO:

Elemento N°	Tipo de Conexión	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero
		P	Q	jX (%)	Tap "p"	Tap "q"	jX (%)

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

LINEAS INGRESADAS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
NOMBRE:
COMENTARIO:

Elemento N°	Nodos		Sec. Positiva			Sec. Cero	
	P	Q	R	jX	jB	R	jX

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

CAPACITORES O REACTORES INGRESADOS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:

COMENTARIO:

Elementos Nº	Nodos		Potencia
	P	Q	MVAR

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

ACOPLAMIENTOS MUTUOS INGRESADOS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
NOMBRE:
COMENTARIO:

Acople	Elementos Acoplado	X Acople
	y	

TIPOS DE BARRAS INGRESADAS

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE:

COMETARIO:

Barra	Tipo	Voltaje(pu)	Potencia de Generació		Potencia de Carga		Límite de Reactivos	
			MW	MVAR	MW	MVAR	máx. MVAR	mín. MVAR

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA POSITIVA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
NOMBRE:
COMENTARIO:

Fila	Columna	R	j X

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA CERO

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
NOMBRE:
COMENTARIO:

Fila	Columna	R	j X

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

15/10/1998

MODO DE OPERACION

NOMBRE:

COMENTARIO:

FALLA EN LA BARRA N°

IMPEDANCIA DE FALLA: +j

BARRA						ELEMENTOS						
Barra	Pot. de CC MVA	VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2	VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo				Modulo	Angulo	Modulo	Angulo

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA 2 FASES - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION

NOMBRE:

COMENTARIO:

FALLA EN LA BARRA N°

IMPEDANCIA DE FALLA: +j

IMPEDANCIA DE FALLA A TIERRA +j

BARRA						ELEMENTOS							
Barra	VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)		
	Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo	

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - FASE

15/10/1998

MODO DE OPERACION

NOMBRE:

COMENTARIO:

FALLA EN LA BARRA N°

IMPEDANCIA DE FALLA +j

BARRA					ELEMENTOS							
Barra	VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
	Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION

NOMBRE:

COMENTARIO:

FALLA EN LA BARRA N°

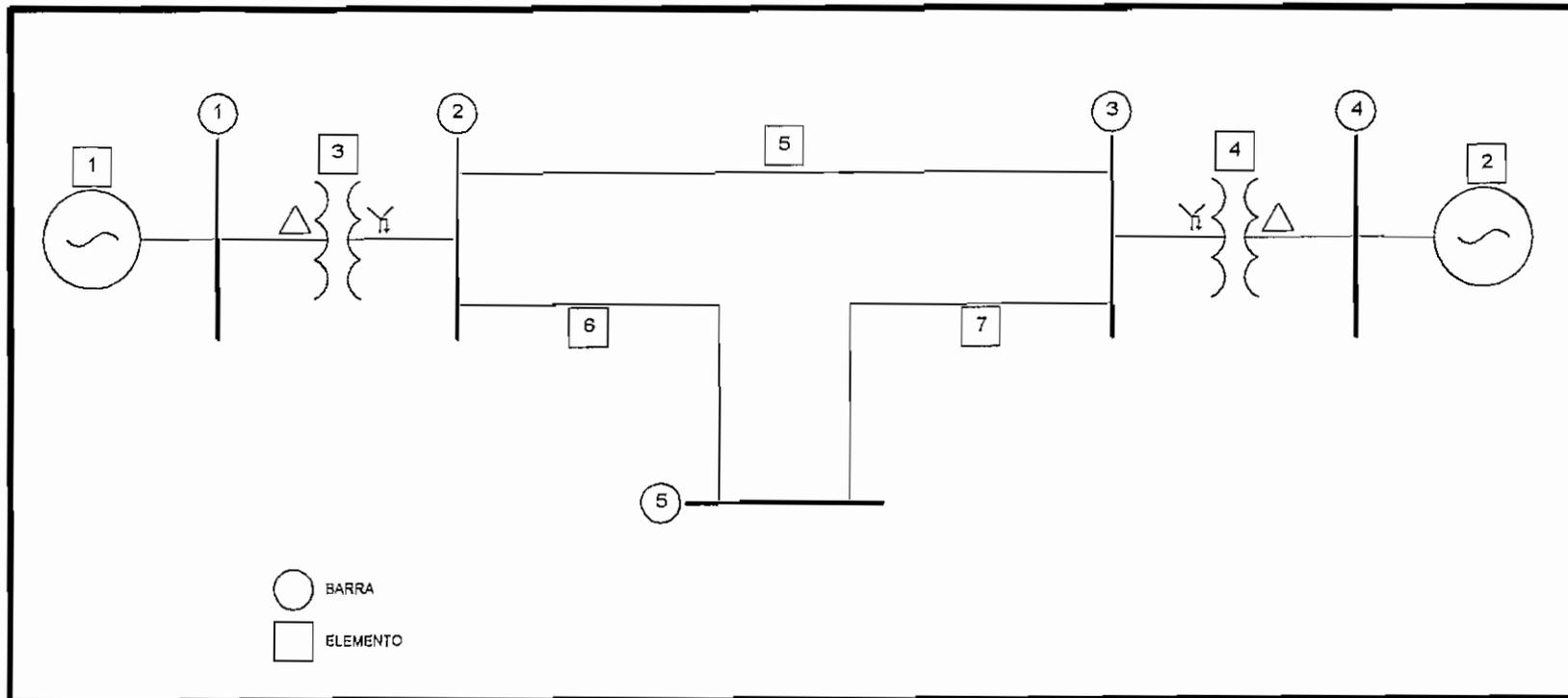
IMPEDANCIA DE FALLA +j

BARRA					ELEMENTOS							
Barra	VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2	VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)		
	Modulo	Angulo	Modulo	Angulo				Modulo	Angulo	Modulo	Angulo	

ANEXO 3

RESULTADOS DE EJEMPLOS DE APLICACION

EJEMPLO 1



MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA POSITIVA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cañizares

Barra 1	Barra 2	R	j X
1	1	0.0000	0.1314
1	2	0.0000	0.0971
1	3	0.0000	0.0514
1	5	0.0000	0.0743
1	4	0.0000	0.0343
2	1	0.0000	0.0971
2	2	0.0000	0.1457
2	3	0.0000	0.0771
2	5	0.0000	0.1114
2	4	0.0000	0.0514
3	1	0.0000	0.0514
3	2	0.0000	0.0771
3	3	0.0000	0.1114
3	5	0.0000	0.0943
3	4	0.0000	0.0743
5	1	0.0000	0.0743
5	2	0.0000	0.1114
5	3	0.0000	0.0943
5	5	0.0000	0.2029
5	4	0.0000	0.0629
4	1	0.0000	0.0343
4	2	0.0000	0.0514
4	3	0.0000	0.0743
4	5	0.0000	0.0629
4	4	0.0000	0.0829

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA CERO

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cañizares

Barra 1	Barra 2	R	j X
1	1	0.0000	0.1000
1	2	0.0000	0.0000
1	3	0.0000	0.0000
1	5	0.0000	0.0000
1	4	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0760
2	3	0.0000	0.0120
2	5	0.0000	0.0440
2	4	0.0000	0.0000
3	1	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0120
3	3	0.0000	0.0440
3	5	0.0000	0.0280
3	4	0.0000	0.0000
5	1	0.0000	0.0000
5	2	0.0000	0.0440
5	3	0.0000	0.0280
5	5	0.0000	0.2360
5	4	0.0000	0.0000
4	1	0.0000	0.0000
4	2	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	5	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0500

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cañizares
 FALLA EN LA BARRA N° 5
 IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

BARRA							ELEMENTOS							
Barra	Pot. de CC MVA		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	492.958	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	6	5	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		SEC. P	0.0000	0.0	4.9296	-90.0				SEC. P	0.4507	0.0	2.2535	90.0
		SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0				SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		FASE A	0.0000	0.0	4.9296	-90.0				FASE A	0.4507	0.0	2.2535	90.0
		FASE B	0.0000	0.0	4.9296	150.0				FASE B	0.4507	240.0	2.2535	330.0
		FASE C	0.0000	0.0	4.9296	30.0				FASE C	0.4507	120.0	2.2535	210.0
							7	5	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										SEC. P	0.5352	0.0	2.6761	90.0
										SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										FASE A	0.5352	0.0	2.6761	90.0
										FASE B	0.5352	240.0	2.6761	330.0
										FASE C	0.5352	120.0	2.6761	210.0

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA 2 FASES - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cafizares

FALLA EN LA BARRA N° 5

IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

IMPEDANCIA DE FALLA A TIERRA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.3497	0.0	1.4818	90.0	6	5	2	SEC. 0	0.0652	0.0	0.7113	270.0
	SEC. P	0.3497	0.0	3.2057	-90.0				SEC. P	0.6428	0.0	1.4655	90.0
	SEC. N	0.3497	0.0	1.7239	90.0				SEC. N	0.1921	0.0	0.7881	270.0
	FASE A	1.0491	0.0	0.0000	-90.0				FASE A	0.9001	0.0	0.0339	270.0
	FASE B	0.0000	0.0	4.8131	152.5				FASE B	0.5258	227.9	2.2161	331.7
	FASE C	0.0000	0.0	4.8131	27.5				FASE C	0.5258	132.1	2.2161	208.3
						7	5	3	SEC. 0	0.0415	0.0	0.7705	270.0
									SEC. P	0.6977	0.0	1.7402	90.0
									SEC. N	0.1625	0.0	0.9358	270.0
									FASE A	0.9018	0.0	0.0339	90.0
									FASE B	0.6049	230.0	2.5974	333.2
									FASE C	0.6049	130.0	2.5974	206.8

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - FASE

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cafizares
 FALLA EN LA BARRA N° 5
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	6	5	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
	SEC. P	0.5000	0.0	2.4648	-90.0				SEC. P	0.7254	0.0	1.1268	90.0
	SEC. N	0.5000	0.0	2.4648	90.0				SEC. N	0.2746	0.0	1.1268	270.0
	FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0				FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
	FASE B	0.5000	180.0	4.2691	180.0				FASE B	0.6343	218.0	1.9516	360.0
	FASE C	0.5000	180.0	4.2691	0.0				FASE C	0.6343	142.0	1.9516	180.0
						7	5	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
									SEC. P	0.7676	0.0	1.3380	90.0
									SEC. N	0.2324	0.0	1.3380	270.0
									FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
									FASE B	0.6818	222.8	2.3175	360.0
									FASE C	0.6818	137.2	2.3175	180.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo
 COMENTARIO: Tesis Cañizares
 FALLA EN LA BARRA Nº 5
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.3678	180.0	1.5583	-90.0	6	5	2	SEC. 0	0.0686	180.0	0.7480	90.0
	SEC. P	0.6839	0.0	1.5583	-90.0				SEC. P	0.8264	0.0	0.7124	90.0
	SEC. N	0.3161	180.0	1.5583	-90.0				SEC. N	0.1736	180.0	0.7124	90.0
	FASE A	0.0000	0.0	4.6750	-90.0				FASE A	0.5841	0.0	2.1728	90.0
	FASE B	1.0268	237.5	0.0000	0.0				FASE B	0.9518	245.5	0.0356	90.0
	FASE C	1.0268	122.5	0.0000	0.0				FASE C	0.9518	114.5	0.0356	450.0
						7	5	3	SEC. 0	0.0436	180.0	0.8103	90.0
									SEC. P	0.8531	0.0	0.8459	90.0
									SEC. N	0.1469	180.0	0.8459	90.0
									FASE A	0.6625	0.0	2.5022	90.0
									FASE B	0.9526	245.4	0.0356	270.0
									FASE C	0.9526	114.6	0.0356	270.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA POSITIVA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
NOMBRE:ejemplo1
COMENTARIO: Tesis Cañizares

Fila	Columna	R	jX
1	5	0.0092	0.0730
2	5	0.0137	0.1095
3	5	0.0092	0.0942
4	5	0.0061	0.0628
5	5	0.0167	0.2031

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA CERO

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
NOMBRE:ejemplo1
COMENTARIO: Tesis Cañizares

Fila	Columna	R	jX
1	5	0.0000	0.0000
2	5	0.0000	0.0440
3	5	0.0000	0.0280
4	5	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.2360

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cañizares

FALLA EN LA BARRA N° 5

IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

BARRA							ELEMENTOS							
Barra	Pot. de CC MVA		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	490.770	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	6	5	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		SEC. P	0.0000	0.0	4.8986	-89.7				SEC. P	0.4445	-1.4	2.2225	448.6
		SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0				SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		FASE A	0.0000	0.0	4.8986	-89.7				FASE A	0.4445	-1.4	2.2225	448.6
		FASE B	0.0000	0.0	4.8986	150.3				FASE B	0.4445	238.6	2.2225	328.6
		FASE C	0.0000	0.0	4.8986	30.3				FASE C	0.4445	118.6	2.2225	208.6
							7	5	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										SEC. P	0.5356	1.8	2.6782	91.8
										SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										FASE A	0.5356	1.8	2.6782	91.8
										FASE B	0.5356	241.8	2.6782	331.8
										FASE C	0.5356	121.8	2.6782	211.8

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA 2 FASES - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo1

COMENTARIO: Tesis Cañizares

FALLA EN LA BARRA N° 5

IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

IMPEDANCIA DE FALLA A TIERRA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.3488	-2.9	1.4781	87.1	6	5	2	SEC. 0	0.0650	-2.9	0.7095	267.1
	SEC. P	0.3488	-2.9	3.1874	269.6				SEC. P	0.6331	-2.6	1.4215	447.8
	SEC. N	0.3488	-2.9	1.7120	91.7				SEC. N	0.1889	-5.4	0.8014	270.0
	FASE A	1.0465	-2.9	0.0000	180.0				FASE A	0.8869	-3.2	0.0910	280.5
	FASE B	0.0000	90.0	4.6731	152.1				FASE B	0.5089	225.8	2.1444	330.2
	FASE C	0.0000	90.0	4.8978	27.2				FASE C	0.5260	129.7	2.2117	206.0
						7	5	3	SEC. 0	0.0414	-2.9	0.7686	267.1
									SEC. P	0.6971	0.5	1.7477	93.9
									SEC. N	0.1621	-3.8	0.9340	267.8
									FASE A	0.9002	-0.4	0.1991	167.6
									FASE B	0.5952	231.1	2.6006	335.0
									FASE C	0.6142	130.9	2.5980	208.6

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - FASE

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cafizares
 FALLA EN LA BARRA N° 5
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	6	5	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
	SEC. P	0.4991	-4.4	2.4493	-89.7				SEC. P	0.7141	-3.4	1.0760	448.7
	SEC. N	0.4991	-4.4	2.4493	90.3				SEC. N	0.2703	-6.8	1.1465	268.5
	FASE A	0.9981	-4.4	0.0000	0.0				FASE A	0.9840	-4.4	0.0706	266.6
	FASE B	0.4991	175.6	4.2423	180.3				FASE B	0.6088	214.8	1.9263	359.7
	FASE C	0.4991	175.6	4.2423	0.3				FASE C	0.6403	138.7	1.9239	177.6
						7	5	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
									SEC. P	0.7663	-0.3	1.3538	97.1
									SEC. N	0.2319	-5.2	1.3362	266.4
									FASE A	0.9975	-1.5	0.2518	177.8
									FASE B	0.6616	223.0	2.4450	361.6
									FASE C	0.7001	137.1	2.1938	182.0

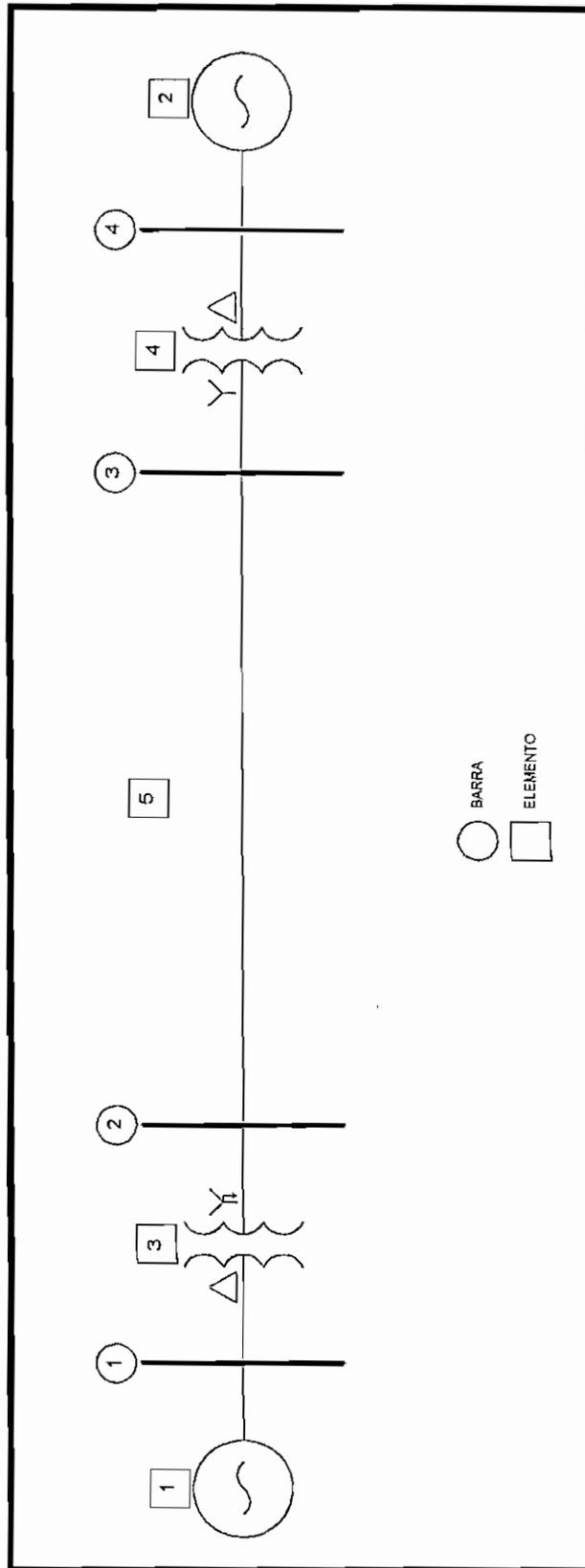
VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo1
 COMENTARIO: Tesis Cañizares
 FALLA EN LA BARRA Nº 5
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
5	SEC. 0	0.3663	178.6	1.5523	268.6	6	5	2	SEC. 0	0.0683	178.6	0.7451	448.6
	SEC. P	0.6821	-3.6	1.5523	268.6				SEC. P	0.8133	-3.5	0.6560	446.8
	SEC. N	0.3163	173.9	1.5523	268.6				SEC. N	0.1713	171.5	0.7266	446.8
	FASE A	0.0000	0.0	4.6568	268.6				FASE A	0.5745	-2.2	2.1275	447.5
	FASE B	1.0481	234.1	0.0000	180.0				FASE B	0.9515	241.5	0.0999	144.4
	FASE C	1.0000	118.9	0.0000	180.0				FASE C	0.9224	110.6	0.0654	411.3
						7	5	3	SEC. 0	0.0435	178.6	0.8072	448.6
									SEC. P	0.8514	-0.5	0.8704	101.5
									SEC. N	0.1470	173.1	0.8468	444.7
									FASE A	0.6621	1.0	2.5042	91.7
									FASE B	0.9631	244.3	0.1921	427.0
									FASE C	0.9375	113.5	0.2655	282.7

EJEMPLO 2



MÁTRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA POSITIVA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

Barra 1	Barra 2	R	j X
1	1	0.0000	0.1437
1	2	0.0000	0.1211
1	3	0.0000	0.0789
1	4	0.0000	0.0563
2	1	0.0000	0.1211
2	2	0.0000	0.1696
2	3	0.0000	0.1104
2	4	0.0000	0.0789
3	1	0.0000	0.0789
3	2	0.0000	0.1104
3	3	0.0000	0.1696
3	4	0.0000	0.1211
4	1	0.0000	0.0563
4	2	0.0000	0.0789
4	3	0.0000	0.1211
4	4	0.0000	0.1437

MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA CERO

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo2
 COMENTARIO: Grainger/Steven

Barra 1	Barra 2	R	jX
1	1	0.0000	0.1900
1	2	0.0000	0.0000
1	3	0.0000	0.0000
1	4	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0800
2	3	0.0000	0.0800
2	4	0.0000	0.0000
3	1	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0800
3	3	0.0000	0.5800
3	4	0.0000	0.0000
4	1	0.0000	0.0000
4	2	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.1900

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA 2 FASES - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

FALLA EN LA BARRA N° 4

IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

IMPEDANCIA DE FALLA A TIERRA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	SEC. 0	0.3628	0.0	1.9096	90.0	2	4	0	SEC. 0	0.0000	0.0	1.9096	270.0
	SEC. P	0.3628	0.0	4.4352	-90.0				SEC. P	1.0000	0.0	3.1859	90.0
	SEC. N	0.3628	0.0	2.5256	90.0				SEC. N	0.0000	0.0	1.8141	270.0
	FASE A	1.0885	0.0	0.0000	-90.0				FASE A	0.5770	0.0	0.5379	270.0
	FASE B	0.0000	0.0	6.6742	154.6				FASE B	0.5770	-120.0	5.0484	329.1
	FASE C	0.0000	0.0	6.6742	25.4				FASE C	0.5770	120.0	5.0484	210.9
						4	4	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
									SEC. P	0.4628	0.0	1.2494	90.0
									SEC. N	0.3059	0.0	0.7114	270.0
									FASE A	0.7687	0.0	0.5379	90.0
									FASE B	0.4076	199.5	1.7193	351.0
									FASE C	0.4076	160.5	1.7193	189.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - FASE

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo2
 COMENTARIO: Grainger/Steven
 FALLA EN LA BARRA N° 3
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	5	3	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
	SEC. P	0.5000	0.0	2.9485	-90.0				SEC. P	0.6744	0.0	1.1628	90.0
	SEC. N	0.5000	0.0	2.9485	90.0				SEC. N	0.3256	0.0	1.1628	270.0
	FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0				FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
	FASE B	0.5000	180.0	5.1070	180.0				FASE B	0.5842	211.1	2.0140	360.0
	FASE C	0.5000	180.0	5.1070	0.0				FASE C	0.5842	148.9	2.0140	180.0
						4	3	4	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
									SEC. P	0.6429	0.0	1.7857	90.0
									SEC. N	0.3571	0.0	1.7857	270.0
									FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
									FASE B	0.5579	206.3	3.0929	360.0
									FASE C	0.5579	153.7	3.0929	180.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA 2 FASES - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2

NOMBRE: ejemplo2

COMENTARIO: Grainger/Steven

FALLA EN LA BARRA N° 4

IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

IMPEDANCIA DE FALLA A TIERRA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	SEC. 0	0.3628	0.0	1.9096	90.0	2	4	6	SEC. 0	0.0000	0.0	1.9096	270.0
	SEC. P	0.3628	0.0	4.4352	-90.0				SEC. P	1.0000	0.0	3.1859	90.0
	SEC. N	0.3628	0.0	2.5256	90.0				SEC. N	0.0000	0.0	1.8141	270.0
	FASE A	1.0885	0.0	0.0000	-90.0				FASE A	1.0000	0.0	0.5379	270.0
	FASE B	0.0000	0.0	6.6742	154.6				FASE B	1.0000	240.0	5.0484	329.1
	FASE C	0.0000	0.0	6.6742	25.4				FASE C	1.0000	120.0	5.0484	210.9
						4	4	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.7257	270.0
									SEC. P	0.4628	0.0	1.2494	90.0
									SEC. N	0.3059	0.0	0.7114	270.0
									FASE A	0.7687	0.0	0.1877	270.0
									FASE B	0.4076	199.5	1.9679	329.6
									FASE C	0.4076	160.5	1.9679	210.4

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

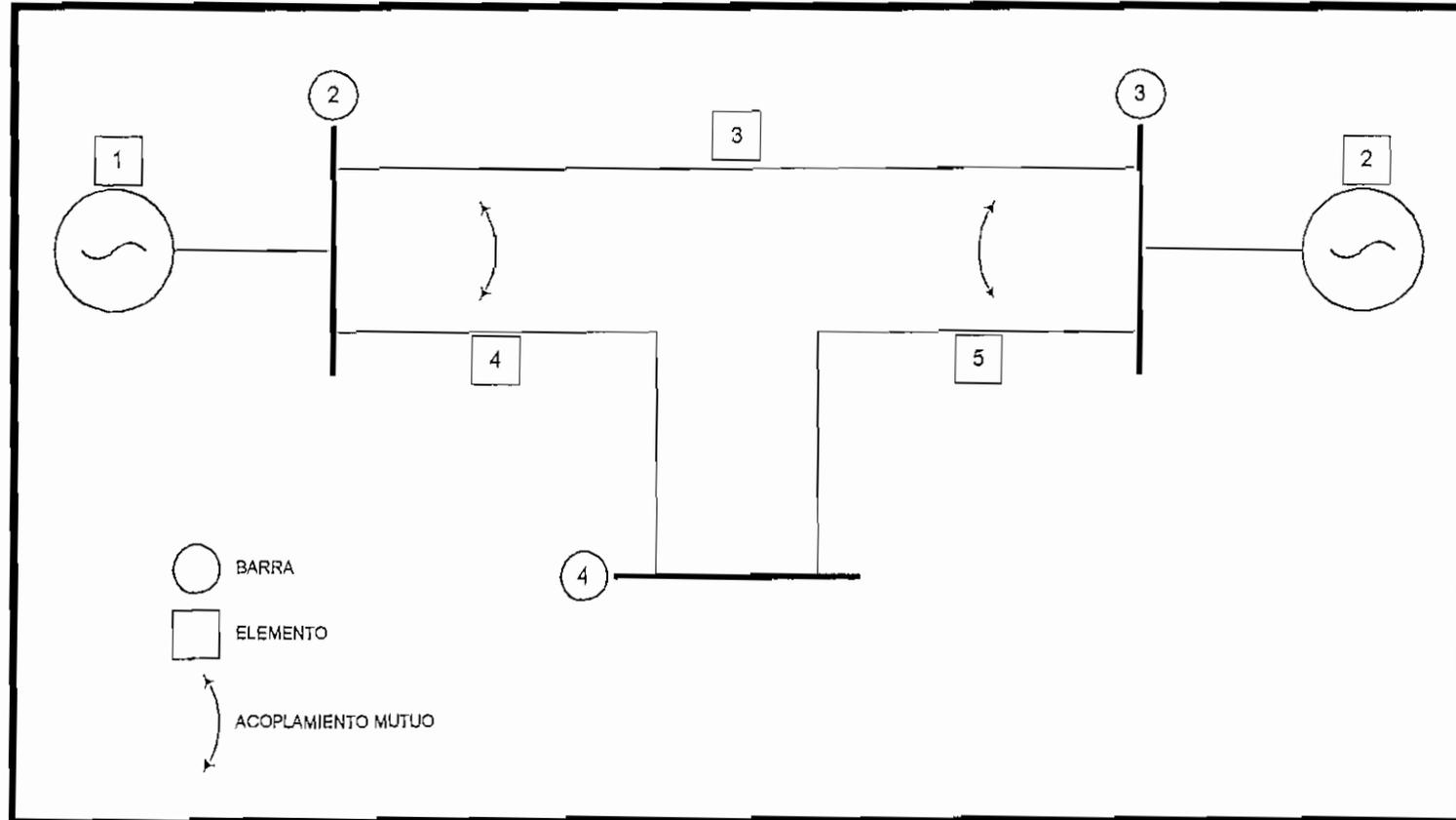
VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - FASE

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo2
 COMENTARIO: Grainger/Steven
 FALLA EN LA BARRA Nº 3
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	4	3	4	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
	SEC. P	0.5000	0.0	2.9485	-90.0				SEC. P	0.6429	0.0	1.7857	90.0
	SEC. N	0.5000	0.0	2.9485	90.0				SEC. N	0.3571	0.0	1.7857	270.0
	FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0				FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
	FASE B	0.5000	180.0	5.1070	180.0				FASE B	0.5579	206.3	3.0929	0.0
	FASE C	0.5000	180.0	5.1070	0.0				FASE C	0.5579	153.7	3.0929	180.0
						5	3	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
									SEC. P	0.6744	0.0	1.1628	90.0
									SEC. N	0.3256	0.0	1.1628	270.0
									FASE A	1.0000	0.0	0.0000	0.0
									FASE B	0.5842	211.1	2.0140	360.0
									FASE C	0.5842	148.9	2.0140	180.0

EJEMPLO 3



MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA POSITIVA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
NOMBRE: ejemplo3
COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

Barrá 1	Barra 2	R	jX
2	2	0.0000	0.0876
2	3	0.0000	0.0149
2	4	0.0000	0.0585
3	2	0.0000	0.0149
3	3	0.0000	0.0876
3	4	0.0000	0.0440
4	2	0.0000	0.0585
4	3	0.0000	0.0440
4	4	0.0000	0.2927

MÁTRIZ IMPEDANCIA DE BARRA
SECUENCIA CERO

15/10/1998

MODO DE OPERACIÓN 1
NOMBRE: ejemplo3
COMENTARIO: Stagg/El-Abiad

Barra 1	Barra 2	R	jX
2	2	0.0000	0.0344
2	4	0.0000	0.0209
2	3	0.0000	0.0006
4	2	0.0000	0.0209
4	4	0.0000	0.6182
4	3	0.0000	0.0141
3	2	0.0000	0.0006
3	4	0.0000	0.0141
3	3	0.0000	0.0344

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad
 FALLA EN LA BARRA N° 4
 IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

BARRA							ELEMENTOS							
Barra	Pot. de CC MVA		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	341.642	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	4	4	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		SEC. P	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				SEC. P	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0				SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		FASE A	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				FASE A	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		FASE B	0.0000	0.0	3.4164	150.0				FASE B	0.8001	240.0	2.0002	330.0
		FASE C	0.0000	0.0	3.4164	30.0				FASE C	0.8001	120.0	2.0002	210.0
							5	4	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										SEC. P	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										FASE A	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										FASE B	0.8497	240.0	1.4162	330.0
										FASE C	0.8497	120.0	1.4162	210.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA

15/10/1998

MODO DE OPERACION 1

NOMBRE: ejemplo3

COMENTARIO: Stagg/EI-Abiad

FALLA EN LA BARRA N° 4

IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	SEC. 0	0.5136	180.0	0.8309	-90.0	4	4	2	SEC. 0	0.0173	180.0	0.4971	90.0
	SEC. P	0.7568	0.0	0.8309	-90.0				SEC. P	0.9514	0.0	0.4864	90.0
	SEC. N	0.2432	180.0	0.8309	-90.0				SEC. N	0.0486	180.0	0.4864	90.0
	FASE A	0.0000	0.0	2.4926	-90.0				FASE A	0.8854	0.0	1.4700	90.0
	FASE B	1.1591	228.3	0.0000	0.0				FASE B	0.9847	241.6	0.0107	450.0
	FASE C	1.1591	131.7	0.0000	0.0				FASE C	0.9847	118.4	0.0107	90.0
						5	4	3	SEC. 0	0.0117	180.0	0.3337	90.0
									SEC. P	0.9635	0.0	0.3444	90.0
									SEC. N	0.0365	180.0	0.3444	90.0
									FASE A	0.9152	0.0	1.0226	90.0
									FASE B	0.9878	241.2	0.0107	270.0
									FASE C	0.9878	118.8	0.0107	270.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

15/10/1998.

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/El-Abiad
 FALLA EN LA BARRA Nº 4
 IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

BARRA							ELEMENTOS							
Barra	Pot. de CC MVA		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	341.644	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	4	4	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		SEC. P	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				SEC. P	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0				SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		FASE A	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				FASE A	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		FASE B	0.0000	0.0	3.4164	150.0				FASE B	0.8001	240.0	2.0002	330.0
		FASE C	0.0000	0.0	3.4164	30.0				FASE C	0.8001	120.0	2.0002	210.0
							5	4	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										SEC. P	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										FASE A	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										FASE B	0.8497	240.0	1.4162	330.0
										FASE C	0.8497	120.0	1.4162	210.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA.

15/10/1998

MODO DE OPERACION 2
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: Stagg/El-Abiad
 FALLA EN LA BARRA N° 4
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	SEC. 0	0.5136	180.0	0.8309	-90.0	4	4	2	SEC. 0	0.0173	180.0	0.4971	90.0
	SEC. P	0.7568	0.0	0.8309	-90.0				SEC. P	0.9514	0.0	0.4864	90.0
	SEC. N	0.2432	180.0	0.8709	-90.0				SEC. N	0.0486	180.0	0.4864	90.0
	FASE A	0.0000	0.0	2.4926	-90.0				FASE A	0.8854	0.0	1.4700	90.0
	FASE B	1.1591	228.3	0.0000	0.0				FASE B	0.9847	241.6	0.0107	90.0
	FASE C	1.1591	131.7	0.0000	0.0				FASE C	0.9847	118.4	0.0107	90.0
						5	4	3	SEC. 0	0.0117	180.0	0.3337	90.0
									SEC. P	0.9635	0.0	0.3444	90.0
									SEC. N	0.0365	180.0	0.3444	90.0
									FASE A	0.9152	0.0	1.0226	90.0
									FASE B	0.9878	241.2	0.0107	270.0
									FASE C	0.9878	118.8	0.0107	270.0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE POTENCIA
 PROGRAMA DE CORTOCIRCUITOS PCC

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA FASE - TIERRA

14/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: sin acoples
 FALLA EN LA BARRA N° 4
 IMPEDANCIA DE FALLA 0.000 +j 0.000

BARRA						ELEMENTOS							
Barra		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
		Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	SEC. 0	0.5136	180.0	0.8309	-90.0	4	4	2	SEC. 0	0.0173	180.0	0.4963	90.0
	SEC. P	0.7568	0.0	0.8309	-90.0				SEC. P	0.9514	0.0	0.4864	90.0
	SEC. N	0.2432	180.0	0.8309	-90.0				SEC. N	0.0486	180.0	0.4864	90.0
	FASE A	0.0000	180.0	2.4926	-90.0				FASE A	0.8855	0.0	1.4692	90.0
	FASE B	1.1591	228.3	0.0000	0.0				FASE B	0.9847	241.6	0.0099	450.0
	FASE C	1.1591	131.7	0.0000	0.0				FASE C	0.9847	118.4	0.0099	90.0
						5	4	3	SEC. 0	0.0118	180.0	0.3345	90.0
									SEC. P	0.9635	0.0	0.3444	90.0
									SEC. N	0.0365	180.0	0.3444	90.0
									FASE A	0.9151	0.0	1.0234	90.0
									FASE B	0.9879	241.2	0.0099	270.0
									FASE C	0.9879	118.8	0.0099	270.0

VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO
FALLA TRIFASICA

14/10/1998

MODO DE OPERACION 1
 NOMBRE: ejemplo3
 COMENTARIO: sin acoples
 FALLA EN LA BARRA N° 4
 IMPEDANCIA DE FALLA: 0.000 +j 0.000

BARRA							ELEMENTOS							
Barra	Pot. de CC MVA		VOLTAJE		CORRIENTE		Elemento	Barra 1	Barra 2		VOLTAJE (2)		CORRIENTE (1-2)	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo					Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
4	341.642	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	4	4	2	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		SEC. P	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				SEC. P	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0				SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
		FASE A	0.0000	0.0	3.4164	-90.0				FASE A	0.8001	0.0	2.0002	90.0
		FASE B	0.0000	0.0	3.4164	150.0				FASE B	0.8001	240.0	2.0002	330.0
		FASE C	0.0000	0.0	3.4164	30.0				FASE C	0.8001	120.0	2.0002	210.0
							5	4	3	SEC. 0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										SEC. P	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										SEC. N	0.0000	0.0	0.0000	0.0
										FASE A	0.8497	0.0	1.4162	90.0
										FASE B	0.8497	240.0	1.4162	330.0
										FASE C	0.8497	120.0	1.4162	210.0