

CALCULO DIGITAL DE CORTOCIRCUITOS
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

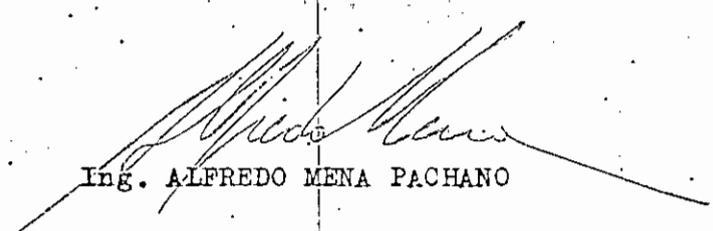


TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTRICA EN LA ESCUELA
POLITECNICA NACIONAL

MAURO VINICIO BRAZO PAEZ

QUITO, MARZO DE 1976

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO FUE ELABORADO
POR EL SR. MAURO ERAZO PAEZ BAJO MI DIRECCION.



Ing. ALFREDO MENA PACHANO

Z
H
2
1953
H

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a los ingenieros: Hernán Sanhueza, Alfredo Mena, Victor Orejuela, Juan Saavedra y Guillermo Romero, quienes con su ayuda han hecho posible la consecución de éste trabajo. También hago extensivo mi agradecimiento al Ing. Hugo Ruiz y Srta. Rosario Boada del Centro de Computación de la Escuela Politécnica Nacional, por su colaboración.



Mauro Vinicio Erazo Páez

DEDICO A .

A MIS PADRES Y HERMANOS

QUIENES HAN SIDO SIEMPRE APOYO

Vinicio

PREFACIO

Existen muchos textos y artículos bastante buenos que se han escrito, sobre operación en condiciones de falla de sistemas eléctricos de potencia, por ejemplo: "Analysis of Faulted Power Systems" de Paul Anderson, "Circuit Analysis of A-C Power Systems" de Edith Clarke, "Modern Power Systems" de J. Neuenswander, "Computer Methods in Power System Analysis" de Stagg and El-Abiad, etc.

La parte teórica de éste trabajo, es un resumen parcial, de lo que se puede decir sobre éste extenso y por cierto interesante tema.

La parte práctica del trabajo, que es propiamente el objetivo de éste, se trata de desarrollar un programa para computadora, para el estudio de cortocircuitos en sistemas eléctricos de potencia, que sea lo más práctico posible. No estoy en condiciones de realizar un trabajo bastante bueno, como serían mis deseos, porque para eso se necesita mucha experiencia y es algo de lo que carezco por el momento.

Pero deseando que el objetivo pretendido sea alcanzado por lo menos en una mínima parte, sigamos adelante.

I N D I C E



Página

CAPITULO I.- INTRODUCCION.

1.1.- Generalidades.	1.
1.1.1.- Objetivos del Cálculo de Cortocircuitos (CCG)	2
1.2.- Matrices de Red.	3
1.2.1.- Definiciones Básicas de Geometría de Redes.	3
1.2.2.- Matrices Primitivas	4
1.2.3.- Características de las Matrices Primitivas	8
1.2.4.- Matriz $[A]$ de Incidencia Elemento-Nodo	8
1.2.5.- Matriz $[A]$ de Barra de Incidencia	9
1.2.6.- Matrices Admitancia e Impedancia de Barras.	9
1.3.- Componentes Simétricas.	11
1.3.1.- Componentes de Secuencias Para Redes con Impedancias Desbalanceadas.	14
1.3.2.- Componentes Simétricas en Circuitos Trifásicos Balanceados.	18

CAPITULO II.- ESTUDIO MATEMATICO DEL PROBLEMA.

2.1.- Consideraciones Generales.	21
2.2.- Simplificaciones de la Red.	21
2.3.- Representación de Redes Para Cálculos de Cortocircuitos.	25
2.3.1.- Teorema de Thevenin.	25
2.3.2.- Representación Matricial.	26
2.4.- Aplicación de Componentes Simétricas.	27
2.4.1.- Redes de Secuencia.	27
2.4.2.- Circuitos Equivalentes de Secuencia Para Fallas.	29

CAPITULO III.- CALCULO DIGITAL DE CORRIENTES DE CORTOCIRUITO.

3.1.- Generalidades.	34
3.2.- Algoritmo Para Formar la Matriz Impedancia de Barras.	35
3.2.1.- El Elemento p-q Añadido es Rama.	37
3.2.2.- El Elemento p-q Añadido es Enlace.	39
3.3.- Matriz Admitancia de Falla.	43
3.4.- Cálculo Digital de Cortocircuitos.	47
3.4.1.- Falla Trifásica.	50
3.4.2.- Falla Fase-Tierra.	51
3.4.3.- Falla Fase-Fase.	52
3.4.4.- Falla Dos Fases-Tierra.	52

CAPITULO IV.- DESCRIPCION DE UN PROGRAMA PARA EL CALCULO DE CORTOCIRCUITOS.

4.1.- Introducción.	54
4.2.- Descripción del Programa Principal.	59
4.3.- Descripción de las Subrutinas.	59
4.3.1.- Subrutina ENTRA	59
4.3.2.- Subrutina CLASI	59
4.3.3.- Subrutina BETAX	60
4.3.4.- Subrutina RECIP	60
4.3.5.- Subrutina COLOC	60
4.3.6.- Subrutina IDENT	60
4.3.7.- Subrutina DELTX	60
4.3.8.- Subrutina SUPRE	60
4.3.9.- Subrutina BUSFA	61
4.3.10.- Subrutinas SFLFT, SF3FT, SF2FT y SFFFA	61
4.3.11.- Subrutina HALLA	62
4.3.12.- Subrutina TRANS	62
4.3.13.- Subrutina FORMA	62

4.3.14.- Subrutina ACSC	62
4.3.15.- Subrutina SALID	62
4.4.- Diagrama de Bloques.	62
4.5.- Entrada de Datos.	73
4.6.- Salida de Datos.	78

CAPITULO V.- EJEMPLO DE APLICACION Y CONCLUSIONES.

5.1.- Introducción.	80
5.2.- Solución del Problema.	82
5.3.- Análisis de los Resultados.	103
5.4.- Conclusiones.	104

APENDICE "A" : Circuitos de Secuencia Cero Para Bancos de Transformadores Trifásicos.	106
--	-----

APENDICE "B" : Cambio de Fases en Transformadores Del- ta-Estrella y Estrella-Delta.	108
---	-----

APENDICE "C" : Consideraciones Especiales Sobre los Elementos Acoplados Para la Formación de la Matriz Impedancia de Barras.	110
--	-----

APENDICE "D" : Listado de las Subrutinas y del Progra ma Principal.	114
--	-----

REFERENCIAS.	131
--------------	-----

C A P I T U L O I

INTRODUCCION.-

1.1.- GENERALIDADES.- El gran desarrollo de la Industria Eléctrica en las últimas décadas, ha obligado a cambiar y perfeccionar los métodos de cálculo y análisis de los sistemas eléctricos de potencia (SEP).

Por el año de 1920, para el análisis de SEP, se comenzaron a utilizar las computadoras analógicas de corriente continua y alterna, comúnmente conocidas como "analizadores de redes". Las computadoras analógicas están formadas por resistencias, reactancias, fuentes de tensión y corrientes lo que permite tener una réplica a escala de un SEP en por unidad y por fase.

A partir de la década de los 40, debido a la complejidad y tamaño de los SEP desarrollados, las computadoras analógicas fueron quedando pequeñas, desarrollándose rápidamente las "computadoras digitales", que por su velocidad y exactitud para realizar operaciones aritméticas y lógicas, proporcionaban un medio eficaz para el estudio de SEP. El continuo perfeccionamiento de estas últimas computadoras, han hecho eficiente, económica e indispensable su utilización para este tipo de estudios en la actualidad. (1,3).

Las principales ventajas de utilización de las computadoras digitales sobre las analógicas, son (2,4,5):

- a) Reducción de hombres-hora, aproximadamente de 5 a 1.
- b) Reducción en el tiempo de solución, de una semana a un minuto.
- c) Reducción en los costos de estudios, aproximadamente en un 80%.

- d) Relativa facilidad para incluir efectos de impedancias mutuas y negativas.
- e) Eliminación de errores de lectura y registros.
- f) Facilidad en la interpretación de los resultados.
- g) Automatización en la búsqueda de soluciones óptimas.
- h) La supervisión de ingeniería no es necesaria durante los cálculos.

1.1.1.- OBJETIVOS DEL CALCULO DE CORTOCIRCUITOS (CCC).- Tensiones y corrientes deberán ser analizadas para diferentes condiciones de operación de un SEP.

Los análisis que se estudian en un SEP, pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de fenómeno, en dos ⁽⁶⁾:

- a) Análisis en condiciones estables; y
- b) Análisis en condiciones transitorias.

El primero de ellos implica soluciones con ecuaciones algebraicas, independientes del tiempo, lo que no significa que el SEP esté estático, sino que puede estar cambiando rápidamente como es el caso de cortocircuitos, pero las soluciones son para tiempos instantáneos.

Cuando se analiza un SEP en estados transitorios, las soluciones son a base de ecuaciones diferenciales que incluyen como parámetro el tiempo.

Las soluciones a estos dos tipos de problemas, debido a su magnitud y complejidad, deben ser orientadas a métodos computacionales de algún tipo. El ingeniero servirá de puente entre la teoría y la utilización de las computadoras para la solución de problemas que se presentan. Este trabajo tiene por objeto el estudio de sistemas eléctricos de potencia en condiciones de cortocircuitos.

El diseño de sistemas eléctricos de potencia, exige que

se haga estudios de CCC , con el fin de conocer tensiones y corrientes en el punto de falla y otros; fallas que inevitablemente ocurren, y que tendrán que ser analizadas en los diseños para tratar de disminuir al mínimo los efectos perjudiciales. Esta información es necesaria para determinar entre otras cosas (7):

- a) Capacidad de interrupción momentánea de los disyuntores.
- b) Diseños adecuados de protecciones.
- c) Estudio de sobretensiones por fallas.
- d) Diseños de mallas de tierras en subestaciones.

Esta información, hace que se requiera un detallado y extensivo pre-cálculo de corrientes de cortocircuito para el diseño y planificación de sistemas eléctricos.

1.2.- MATRICES DE RED.- La representación matemática de una red a base de ecuaciones matriciales, es un modelo adecuado para el análisis cuando se utilizan computadoras digitales. (2)

Pueden desarrollarse varios métodos de solución de redes dependiendo de cuales sean las variables seleccionadas. Para un tipo de problema siempre existirá uno que sea el más adecuado y éste deberá ser el seleccionado. La formación de las matrices de redes apropiadas es una parte integral de un programa digital para un problema planteado.

El modelo matemático que representará al sistema físico, deberá especificar las características de los componentes individuales, así como también las interconexiones de estos para formar la red.

1.2.1.- DEFINICIONES BASICAS DE GEOMETRIA DE REDES (9).- Para describir matemáticamente una red, es suficiente identificar cada uno de sus elementos, independientemente de sus características, por medio de "rectas orientadas", que representarán formas matemáticas inva-

riables del distorsionamiento de la figura que representará a la red.

La figura obtenida cortocircuitando las f.e.m., abriendo fuentes de corrientes y considerando los elementos como cero, se denomina " gráfico " de la red; los puntos terminales de los elementos se denominan " nodos ". Un " árbol " de un gráfico es aquella parte de la red, formada por los elementos suficientes para unir todos los nodos sin que se formen caminos cerrados; los elementos que conforman el árbol se denominan " ramas ", y los demás elementos de la red " enlaces ".

La clasificación en ramas y enlaces de los elementos de una red, permite encontrar un número de variables independientes, suficientes para la solución completa de la red. Así tenemos que, las corrientes en los enlaces proporciona el número suficiente y necesario de variables independientes de corrientes; de igual manera las tensiones de las ramas, forman un grupo posible de variables en función de las cuales se puede expresar el estado de una red en forma unívoca.

Si e representa el número de elementos de una red n , es el número de nodos de la misma, el número b de ramas viene dado por:

$$b = n - 1 \quad (1.1)$$

y el número L de enlaces es:

$$L = e - b = e - n + 1 \quad (1.2)$$

1.2.2.- MATRICES PRIMITIVAS .- Un sistema de transmisión puede ser considerado como una red lineal, bilateral, pasiva formada por impedancias o admitancias, las que están interconectadas de alguna manera en el sistema. Los elementos representan impedancias por fase de líneas y transformadores, y generalmente sólo se representa una fase del sistema, excepto en los puntos de desbalanceamiento donde se requiere un

tratamiento especial, el resto se supone balanceado de tal manera que la representación por fase es posible.

El conjunto de éstos elementos considerados aisladamente, constituyen lo que se denomina la "red primitiva".

Para resolver una red, por medio de computadoras, es necesario introducir y guardar los datos en la memoria del mismo de un modo conveniente y organizado ⁽⁶⁾. Las matrices de la red primitiva permiten hacer ésto.

Los elementos de una red se caracterizan en general, por tener elementos pasivos y/o activos; la mayoría de ellos sólo tienen pasivos, se supondrá que tienen los dos tipos. En la red primitiva los elementos se encuentran orientados y por lo general se toma como sentido positivo, la dirección positiva del flujo de corriente asumida en ese elemento.

Las variables y parámetros de cada uno de los elementos de las matrices primitivas, son:

v_{pq}	diferencia de potencial entre los nodos p-q del elemento
i_{pq}	flujo positivo de corriente en el elemento p-q
e_{pq}	fuentes de tensión en serie con el elemento p-q
j_{pq}	fuentes de corriente en paralelo con el elemento p-q
$z_{pq,pq}, y_{pq,pq}$	impedancia y admitancia propia del elemento
$z_{pq,rs}, y_{pq,rs}$	impedancia y admitancia mútua del elemento p-q con el elemento r-s.

Los elementos de la red primitiva pueden ser representados de dos maneras ^(2,10):

a) En forma impedancia.- Como se indica en la figura (1.1).

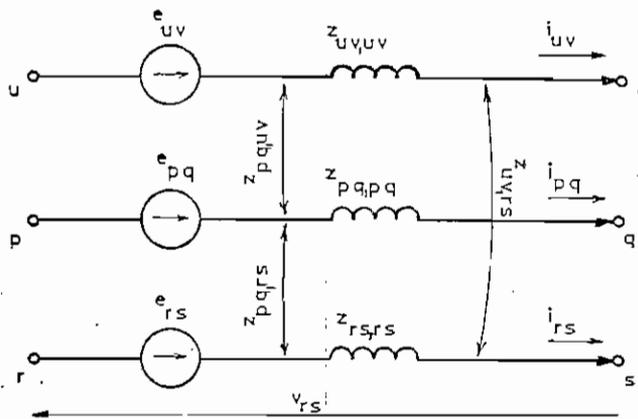


Fig. 1.1.- Representación de la red primitiva en forma impedancia

La ecuación de comportamiento de éste sistema, está dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{pq} \\ v_{uv} \\ \dots \\ v_{rs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{pq} \\ e_{uv} \\ \dots \\ e_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & z_{pq,uv} & \dots & z_{pq,rs} \\ z_{uv,pq} & z_{uv,uv} & \dots & z_{uv,rs} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{rs,pq} & z_{rs,uv} & \dots & z_{rs,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pq} \\ i_{uv} \\ \dots \\ i_{rs} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

dividiendo en submatrices ésta expresión tenemos:

$$\begin{bmatrix} v_{pq} \\ \bar{v}_{tw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{pq} \\ \bar{e}_{tw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & \bar{z}_{pq,tw} \\ \bar{z}_{tw,pq} & \bar{z}_{tw,tw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pq} \\ \bar{i}_{tw} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

y, en general:

$$\bar{v} + \bar{e} = [z] \bar{i} \quad (1.5)$$

La matriz $[z]$ es la matriz impedancia primitiva. Si la red está formada sólo por elementos pasivos:

$$\bar{v} = [z] \bar{i} \quad (1.6)$$

b) En forma admitancia.- La figura es la 1.2.

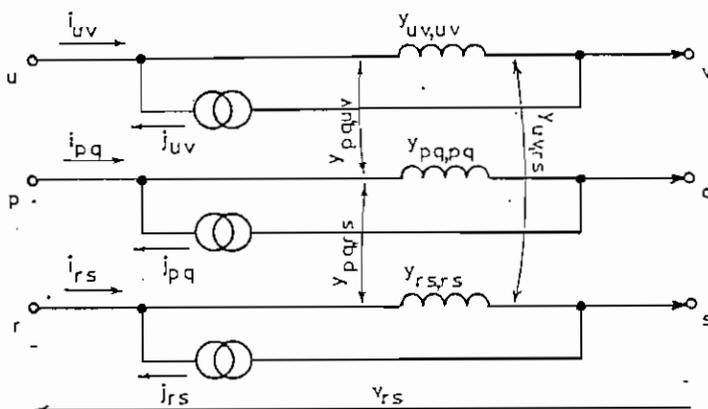


Fig. 1.2.- Representación de la red primitiva en forma admitancia
La ecuación de comportamiento está dada por:

$$\begin{bmatrix} i_{pq} \\ i_{uv} \\ \dots \\ i_{rs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_{pq} \\ j_{uv} \\ \dots \\ j_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{pq,pq} & y_{pq,uv} & \dots & y_{pq,rs} \\ y_{uv,pq} & y_{uv,uv} & \dots & y_{uv,rs} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{rs,pq} & y_{rs,uv} & \dots & y_{rs,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pq} \\ v_{uv} \\ \dots \\ v_{rs} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

simplificando la ecuación:

$$\begin{bmatrix} i_{pq} \\ i_{tw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_{pq} \\ j_{tw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{pq,pq} & \bar{y}_{pq,tw} \\ \bar{y}_{tw,pq} & [y_{tw,tw}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pq} \\ \bar{v}_{tw} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

en general:

$$\mathbf{I} + \mathbf{J} = [\mathbf{y}] \bar{\mathbf{v}} \quad (1.9)$$

donde $[\mathbf{y}]$ representa la matriz admitancia primitiva. Si la red es tá formada sólo por elementos pasivos:

$$\mathbf{I} = [\mathbf{y}] \bar{\mathbf{v}} \quad (1.10)$$

Además tenemos que:

$$[y] = [z]^{-1} \quad (1.11)$$

1.2.3.- CARACTERISTICAS DE LAS MATRICES PRIMITIVAS.- En SEP reales las matrices admitancias e impedancias primitivas, se caracterizan por:

- a) en general son matrices complejas
- b) son simétricas
- c) son matrices bastante dispersas, la mayoría de los elementos no diagonales son ceros.
- d) son matrices no singulares, los elementos de la diagonal principal son finitos diferentes de cero.
- e) los elementos de la diagonal principal son mayores que cualquier elemento de la fila o columna correspondiente.

1.2.4.- MATRIZ $[\hat{A}]$ DE INCIDENCIA ELEMENTO-NODO.- Las matrices primitivas por si mismas no proveen información de la manera en que se encuentran interconectados los elementos para formar la red. Esta información puede ser tabulada en una matriz de incidencia $[\hat{A}]$ elemento-nodo de dimensiones $e \times n$, indica la incidencia de los elementos en los nodos.

Es conveniente recordar que la dirección de los elementos, tanto para su orientación como para su conexión, es la dirección positiva asumida de la corriente por cualquier convención, por ejemplo que la corriente circule en el elemento, del nodo de identificación menor hacia el mayor ⁽⁶⁾. La matriz $[\hat{A}]$ tiene la siguiente forma:

$$[\hat{A}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{b1} & a_{b2} & \dots & a_{bn} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

donde los elementos a_{ij} se definen como:

$a_{ij} = +1$ si la corriente en el elemento i está saliendo por el nodo j .

$a_{ij} = -1$ si la corriente en el elemento i está entrando en el nodo j .

$a_{ij} = 0$ si el elemento i no está conectado al nodo j .

1.2.5.- MATRIZ $[A]$ DE BARRA DE INCIDENCIA.- Cualquier nodo de un gráfico conectado puede tomarse como referencia, para medir los potenciales de los demás nodos con respecto a ese punto. Cuando se hace esto los nodos del gráfico pasan a denominarse "barras" del sistema. La matriz obtenida a partir de $[\hat{A}]$ eliminando la columna correspondiente al nodo de referencia, es la matriz de incidencia $[A]$, en donde cada uno de los elementos de ésta se define de la misma manera que $[\hat{A}]$.

1.2.6.- MATRICES ADMITANCIA E IMPEDANCIA DE BARRAS.- Cuando uno de los nodos de un grafo es escogido como nodo de referencia, el número de corrientes independientes es $n-1$ donde n es el número de nodos. La red tendrá las mismas matrices primitivas, independientemente de cual sea el nodo de referencia escogido.

En el sistema de referencia de barras, el comportamiento de una red interconectada está definida por:

$$\bar{E}_B = [Z_B] \bar{I}_B \quad (1.13)$$

o también:

$$\bar{I}_B = [Y_B] \bar{E}_B \quad (1.14)$$

donde:

\bar{E}_B es el vector tensiones de barras, medido con respecto al de referencia.

$[Z_B]$ es la matriz impedancia de barras, donde los elementos son definidos con todas las barras abiertas excepto una. Los elementos de ésta matriz se denominan " impedancias del punto motriz y de transferencia en circuito abierto " (impedancias Thevenin) (11).

\bar{I}_B vector corrientes inyectadas en las barras.

$[Y_B]$ es la matriz admitancia de barras, cuyos elementos son las admitancias del punto motriz y transferencia en cortocircuito.

La matriz admitancia de barras, puede obtenerse a partir de las matrices admitancia primitiva y barra de incidencia (2,6).

Si $[A]^t$ representa la matriz transpuesta de $[A]$; pre-multiplicando la ecuación 1.9 por $[A]^t$, tenemos:

$$[A]^t \bar{I} + [A]^t \bar{J} = [A]^t [y] \bar{v} \quad (1.15)$$

El producto:

$$[A]^t \bar{I} = 0 \quad (1.16)$$

porque es la suma de corrientes entrando a cada nodo, y según la ley de Kirchhoff vale cero. El producto $[A]^t \bar{J}$ es el vector suma de todas las fuentes de corrientes entrando en cada barra, y si los elementos de la red son pasivos, éstas serán fuentes externas conectadas a las barras. Por eso:

$$[A]^t \bar{J} = \bar{I}_B \quad (1.17)$$

La ecuación número 1.15 nos queda:

$$\bar{I}_B = [A]^t [y] \bar{v} \quad (1.18)$$

\bar{I}_B^* representará el vector conjugado de \bar{I}_B . La potencia liberada por los elementos de la red será igual a la entregada por las fuentes, la potencia es invariante:

$$(\bar{I}_B^*)^t \bar{E}_B = (\bar{J}^*)^t \bar{v} \quad (1.19)$$

reemplazando la ecuación 1.17 y tomando en cuenta que $[A]^* = [A]$:

$$[A] \bar{E}_B = \bar{v} \quad (1.20)$$

Sustituyendo en la ecuación 1.18, tenemos:

$$\bar{I}_B = [A]^t [y] [A] \bar{E}_B \quad (1.21)$$

y comparando con la ecuación 1.14, llegamos a la conclusión que:

$$[Y_B] = [A]^t [y] [A] \quad (1.22)$$

La matriz impedancia de barras es la inversa de la admitancia:

$$[Z_B] = [Y_B]^{-1} = ([A]^t [y] [A])^{-1} \quad (1.23)$$

1.3.- COMPONENTES SIMÉTRICAS.- Se indicó que la representación por fase de un sistema trifásico, sólo es posible cuando la red está formada por elementos balanceados, pero no es posible en los puntos donde se producen desbalanceamientos, como en el caso de fallas asimétricas.

Cuando un SEP se representa en un sistema por fase, las condiciones de desbalanceamientos de fallas del circuito, son analizadas con la ayuda de las "componentes simétricas", que permite reducir el análisis a un grupo de sistemas balanceados.

C. L. Fortescue, demostró que cualquier sistema desbalanceados de n fasores, puede descomponerse en $n-1$ sistemas balanceados de diferente secuencia de fase y en un sistema de secuencia cero ⁽⁶⁾. Matemáticamente se puede expresar como en la ecuación 1.24.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ \dots \\ V_{a(n-1)} \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \\ 1 & a^2 & a^4 & \dots & a^{2(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & a^{n-1} & a^{2(n-1)} & \dots & a^{(n-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

en donde:

$V_a, V_b, V_c, \dots, V_n$ es el grupo de fasores desbalanceados.

$V_{a0}, V_{a1}, V_{a2}, \dots, V_{a(n-1)}$ son sistemas de fasores balanceados en los que se descompone el grupo anterior.

$a = e^{j2\pi/n} = \cos \frac{2\pi}{n} + j \operatorname{sen} \frac{2\pi}{n}$ operador que hace rotar cualquier fasor en $2\pi/n$ radianes.

Escribiendo en forma simplificada la ecuación 1.24, tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} & \dots & V_{a(n-1)} \end{bmatrix}^t = [C] \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c & \dots & V_n \end{bmatrix}^t \quad (1.25)$$

La transformación $[C]$ es no singular y su inversa existe.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a^{n-1} & a^{n-2} & \dots & a \\ 1 & a^{n-2} & a^{n-4} & \dots & a^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ \dots \\ V_{a(n-1)} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Para circuitos trifásicos $n=3$, y el operador a hace rotar cualquier cantidad en 120° . Para éste caso las ecuaciones 1.24 y 1.26 se reducen a :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

simplificando ésta última transformación:

$$\bar{V}_{abc} = [D] \bar{V}_{012} \quad (1.29)$$

donde los fasores con subíndice 1 son de secuencia positiva y tienen el mismo sentido de fase que los fasores originales; los fasores de secuencia negativa con subíndice 2, tienen sentido de fase contraria a los originales; y los fasores de secuencia cero con subíndice cero, tienen diferencia de fase nula.

Para un sistema trifásico la potencia total activa es:

$$P_{3\phi} = \text{Re} (\bar{V}_{abc}^t \bar{I}_{abc}^*) \quad (1.30)$$

Pasando a componentes simétricas, nos queda:

$$P_{3\phi} = \text{Re} (([D] \bar{V}_{012})^t ([D] \bar{I}_{012})^*) \quad (1.31)$$

$$= \text{Re} (\bar{V}_{012}^t [D]^t [D]^* \bar{I}_{012}^*) \quad (1.32)$$

realizando operaciones intermedias nos queda:

$$P_{3\phi} = 3 \operatorname{Re} (\bar{V}_{012}^t \bar{I}_{012}^*) \quad (1.33)$$

no existe acoplamiento entre potencias, pero se produce una varia ción en la relación de potencias, como se puede ver comparando las ecuaciones 1.30 y 1.33. Para la invariancia de potencias tene mos que emplear las transformaciones (6,2):

$$[T] = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

de manera que:

$$\bar{V}_{abc} = [T] \bar{V}_{012}$$

y la inversa de ésta:

$$[T]^{-1} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

de manera que:

$$\bar{V}_{012} = [T]^{-1} \bar{V}_{abc}$$

y la ecuación 1.33 se convierte en:

$$P_{3\phi} = \operatorname{Re} (\bar{V}_{012}^t \bar{I}_{012}^*) \quad (1.36)$$

Las transformaciones 1.34 y 1.35 se encuentran en recie^u ente literatura de SEP, y son las que se emplearán en éste traba^u jo.

1.3.1.- COMPONENTES DE SECUENCIAS PARA REDES CON IMPEDANCIAS DES-
BALANCEADAS.- Para simplificar la escritura de fórmulas, la si-
guiente notación será introducida en adelante:

$$\begin{aligned} \underline{v}_{pq}^{abc} &= \underline{v}_{pq}^f = \begin{bmatrix} v_{pq}^a & v_{pq}^b & v_{pq}^c \end{bmatrix}^t \\ \underline{v}_{pq}^{012} &= \underline{v}_{pq}^s = \begin{bmatrix} v_{pq}^0 & v_{pq}^1 & v_{pq}^2 \end{bmatrix}^t \\ \left[z_{pq}^{abc} \right] &= \left[z_{pq}^f \right] = \begin{bmatrix} z_{pq}^{aa} & z_{pq}^{ab} & z_{pq}^{ac} \\ z_{pq}^{ba} & z_{pq}^{bb} & z_{pq}^{bc} \\ z_{pq}^{ca} & z_{pq}^{cb} & z_{pq}^{cc} \end{bmatrix} \\ \left[z_{pq}^{012} \right] &= \left[z_{pq}^s \right] = \begin{bmatrix} z_{pq}^{00} & z_{pq}^{01} & z_{pq}^{02} \\ z_{pq}^{10} & z_{pq}^{11} & z_{pq}^{12} \\ z_{pq}^{20} & z_{pq}^{21} & z_{pq}^{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.37)$$

y notaciones similares para otras variables que no se indican.

Consideremos una red bilateral con impedancias desbalanceadas, como se indica en la figura 1.3.

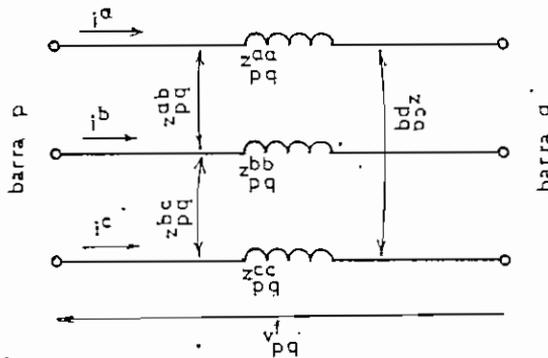


Fig. 1.3.- Red bilateral con impedancias desbalanceadas.

Para ésta red tenemos:

$$\underline{v}_{pq}^f = \left[z_{pq}^f \right] \underline{i}_{pq}^f \quad (1.38)$$

Pasando a componentes simétricas, tenemos:

$$[T] \bar{v}_{pq}^s = [z_{pq}^f][T] \bar{i}_{pq}^s \quad (1.39)$$

$$\bar{v}_{pq}^s = [T]^{-1} [z_{pq}^f][T] \bar{i}_{pq}^s$$

$$\bar{v}_{pq}^s = [z_{pq}^s] \bar{i}_{pq}^s$$

de donde se deduce que:

$$[z_{pq}^s] = [T]^{-1} [z_{pq}^f] [T] \quad (1.40)$$

Desarrollando ésta última expresión, llegamos a obtener (6):

$$[z_{pq}^s] = \begin{bmatrix} z_{s0} + 2z_{m0} & z_{s2} - z_{m2} & z_{s1} - z_{m1} \\ z_{s1} - z_{m1} & z_{s0} - z_{m0} & z_{s2} + 2z_{m2} \\ z_{s2} - z_{m2} & z_{s1} + 2z_{m1} & z_{s0} - z_{m0} \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

en donde:

$$\begin{aligned} z_{s0} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{aa} + z_{pq}^{bb} + z_{pq}^{cc}) \\ z_{s1} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{aa} + a z_{pq}^{bb} + a^2 z_{pq}^{cc}) \\ z_{s2} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{aa} + a^2 z_{pq}^{bb} + a z_{pq}^{cc}) \\ z_{m0} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{bc} + z_{pq}^{ca} + z_{pq}^{ab}) \\ z_{m1} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{bc} + a z_{pq}^{ca} + a^2 z_{pq}^{ab}) \\ z_{m2} &= \sqrt{3} (z_{pq}^{bc} + a^2 z_{pq}^{ca} + a z_{pq}^{ab}) \end{aligned} \quad (1.42)$$

Según la igualdad 1.41 existe acoplamiento entre las componentes de secuencia, y éste acoplamiento es no recíproco. Existen algunos casos en que ésta igualdad se simplifica.

En sistemas de potencias, para elementos estáticos balanceados como líneas y transformadores, se tiene que:

$$z_{pq}^{aa} = z_{pq}^{bb} = z_{pq}^{cc} = z^p \quad (1.43)$$

$$z_{pq}^{ab} = z_{pq}^{ba} = z_{pq}^{ca} = z^m$$

la igualdad 1.41 se reduce a :

$$[z_{pq}^s] = \begin{bmatrix} z^p + 2 z^m & 0 & 0 \\ 0 & z^p - z^m & 0 \\ 0 & 0 & z^p - z^m \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

se diagonaliza no existiendo acoplamiento entre secuencias.

En máquinas sincrónicas y de inducción, tenemos un caso especial. La matriz $[z_{pq}^f]$ tiene la forma de una matriz circulante (6), así:

$$[z_{pq}^f] = \begin{bmatrix} z_{pq}^k & z_{pq}^m & z_{pq}^n \\ z_{pq}^n & z_{pq}^k & z_{pq}^m \\ z_{pq}^m & z_{pq}^n & z_{pq}^k \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

pasando a componentes simétricas:

$$[z_{pq}^s] = \begin{bmatrix} z_{pq}^k + z_{pq}^m + z_{pq}^n & 0 & 0 \\ 0 & z_{pq}^k + a^2 z_{pq}^m + a z_{pq}^n & 0 \\ 0 & 0 & z_{pq}^k + a z_{pq}^m + a^2 z_{pq}^n \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

y nos queda una matriz diagonalizada. Lo que hace de las componentes simétricas, una transformación ideal para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

1.3.2.- COMPONENTES SIMÉTRICAS EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS BALAN-
 CEADOS (10).- En el sistema de referencia de barras, la ecuación
 de comportamiento para un circuito trifásico está
 dada por:

$$\bar{E}_B^f = [Z_B^f] \bar{I}_B^f \quad (1.47)$$

Desarrollando ésta ecuación tenemos:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_1^f \\ \bar{E}_2^f \\ \dots \\ \bar{E}_p^f \\ \dots \\ \bar{E}_n^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}^f] & [Z_{12}^f] & \dots & [Z_{1p}^f] & \dots & [Z_{1n}^f] \\ [Z_{21}^f] & [Z_{22}^f] & \dots & [Z_{2p}^f] & \dots & [Z_{2n}^f] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [Z_{p1}^f] & [Z_{p2}^f] & \dots & [Z_{pp}^f] & \dots & [Z_{pn}^f] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [Z_{n1}^f] & [Z_{n2}^f] & \dots & [Z_{np}^f] & \dots & [Z_{nn}^f] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1^f \\ \bar{I}_2^f \\ \dots \\ \bar{I}_p^f \\ \dots \\ \bar{I}_n^f \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

en donde para cualquier i, j tenemos:

$$\bar{E}_i^f = [E_i^a \quad E_i^b \quad E_i^c]^t \quad (1.49)$$

$$\bar{I}_j^f = [I_j^a \quad I_j^b \quad I_j^c]^t$$

$$[Z_{ij}^f] = \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Cuando el sistema está formado por impedancias balan-
 ceadas, la transformación 1.40 tiene la propiedad de diagonali-

zar los elementos de la matriz $[Z_B^f]$. La igualdad 1.50 se reduce:

$$[Z_{ij}^s] = \begin{bmatrix} Z_{ij}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ij}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

Suponiendo las tensiones generadas también balanceadas y asumiendo la magnitud de la tensión fase-tierra igual a E_1 , la igualdad 1.49 nos queda:

$$\bar{E}_1^f = E_1 [1 \quad a^2 \quad a]^t \quad (1.52)$$

$$\bar{I}_j^f = I_j [1 \quad a^2 \quad a]^t \quad (1.53)$$

pasando a componentes simétricas:

$$\bar{E}_1^s = E_1 [0 \quad \sqrt{3} \quad 0]^t \quad (1.54)$$

$$\bar{I}_j^s = I_j [0 \quad \sqrt{3} \quad 0]^t$$

La ecuación de comportamiento del sistema, en componentes de secuencia es:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_1^s \\ \bar{E}_2^s \\ \dots \\ \bar{E}_p^s \\ \dots \\ \bar{E}_n^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}^s] & [Z_{12}^s] & \dots & [Z_{1p}^s] & \dots & [Z_{1n}^s] \\ [Z_{21}^s] & [Z_{22}^s] & \dots & [Z_{2p}^s] & \dots & [Z_{2n}^s] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [Z_{p1}^s] & [Z_{p2}^s] & \dots & [Z_{pp}^s] & \dots & [Z_{pn}^s] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [Z_{n1}^s] & [Z_{n2}^s] & \dots & [Z_{np}^s] & \dots & [Z_{nn}^s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1^s \\ \bar{I}_2^s \\ \dots \\ \bar{I}_p^s \\ \dots \\ \bar{I}_n^s \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

donde todas las submatrices son diagonales. Escribiendo en forma simplificada ésta ecuación:

$$\bar{E}_B^s = [Z_B^s] \bar{I}_B^s \quad (1.56)$$

C A P I T U L O II

ESTUDIO MATEMATICO DEL PROBLEMA.-

2.1.- CONSIDERACIONES GENERALES.- Para el estudio de cortocircuitos, el sistema eléctrico es dividido en dos sectores: la parte balanceada y el punto de falla del SEP. En la solución de este tipo de problemas se procede de la manera siguiente: en el punto de falla se realiza un estudio de voltajes y corrientes en términos de componentes simétricas y luego se transforman a componentes de fase.

Vamos a definir lo que el " punto de falla " significará para nosotros. En un SEP balanceado el punto de falla es aquel donde se hace una conexión desbalanceada, o también puede ser balanceada pero a través de una impedancia considerada de un valor no normal para el sistema.

2.2.- SIMPLIFICACIONES DE LA RED (1,2,6,11,12).- En sistemas eléctricos de potencia las corrientes de fallas son funciones de muchas variables, entre otras por ejemplo: el cambio continuo de carga, condiciones de operación del sistema, nivel de tensión, temperatura, etc; de manera que tratar de realizar un cálculo de CCC de forma detallada y exacta resulta sofisticado y talvés poco práctico. De aquí que para reducir el problema, se asumen algunas simplificaciones y suposiciones, de manera que normalmente los resultados son considerados prácticos.

Las simplificaciones y suposiciones que normalmente se hacen en el CCC para SEP son:

a) La red supuesta de antemano que es trifásica; su estudio

se hará en un sistema por fase, lo que supone que se trata de una red de tensiones e impedancias balanceadas.

b) Los generadores se representarán como una fuente de tensión constante detrás de la reactancia subtransitoria o transitoria. Los generadores alimentan a la red desde el neutro del sistema (Fig. 2.1).

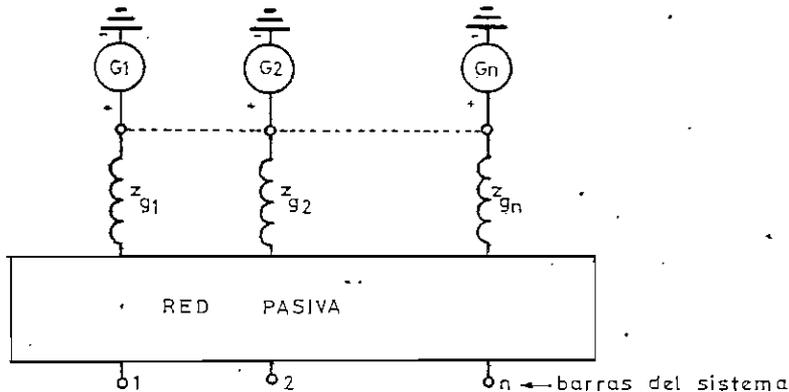


Fig.2.1.- Representación de generadores para el CCC

c) Las tensiones generadas por las máquinas (generadores), se asumen que son iguales en magnitud y fase. Esto permite reemplazar todos los generadores por uno sólo. Para CCC se supone que el voltaje fase-neutro generado es $1/0^\circ$ voltios por unidad.

Esta suposición no introduciría mayor error en los cálculos de fallas, porque en condiciones normales de operación las tensiones generadas son cercanas a 1 p.u. y factor de potencia alto.

d) Cualquier carga conectada en el SEP tiene una impedancia relativamente alta, de manera que resulte que toda corriente de carga comparada con la de cortocircuito es despreciable. La red pasiva no incluye éstas impedancias.

Las corrientes de carga son pequeñas en comparación a las de falla en general y se encuentran fuera de fase con éstas. En algunos sistemas pueden ser significantes y se deben tomarlos

en cuenta; éstas se deberán sumar a los aportes de corrientes de secuencia positiva de la falla, obteniéndose el flujo de corriente total en los elementos del sistema. La tensión de secuencia positiva en cualquier punto, puede calcularse añadiendo a la tensión de secuencia calculada en la falla, la tensión debida a la corriente de carga. La simplificación que se hace sólo se refiere a los elementos de secuencia positiva.

e) El estudio se hará utilizando componentes simétricas, entonces se necesitarán tres redes pasivas, una para cada secuencia. Pero supondremos que la red de secuencia positiva es igual a la de secuencia negativa.

Para elementos estáticos como líneas y bancos de transformadores, las impedancias de secuencias positivas y negativas son iguales, porque son independientes de la secuencia de fases. Pero para elementos rotatorios son diferentes. En generadores sincrónicos, las impedancias de secuencia positiva y negativa son aproximadamente las mismas, si consideramos únicamente el estado subtransitorio, en éste caso:

$$x_d'' = x_2 \quad (2.1)$$

En motores y condensadores sincrónicos esto no es exactamente igual, pero éstos aparatos son pequeños en comparación con los generadores, de manera que el error es aceptable (6).

f) En SEP es muy común que la reactancia tenga un valor alto en comparación con la resistencia, pudiendo ser despreciada ésta última.

Cuando la relación de reactancia a resistencia X/R del sistema de impedancias es mayor que 4 los errores al despreciar la resistencia, resultan pequeños (menores que el 3%) (12). En líneas de muy alta tensión en vez de la reactancia, se puede utilizar la impedancia escalar, la diferencia no es muy apreciable, pero los resultados son más exactos en magnitud (7,22).

g) Los transformadores se suponen con el tap en su posición nominal.

h) El efecto de acoplamiento entre líneas paralelas puede ser despreciada para secuencia positiva y negativa pero no en se cuencia cero.

Existe inducción electromagnética entre circuitos que tienen recorridos paralelos. En secuencias positiva y negativa la corriente total en cada circuito tiende a ser cero y no existiría acoplamiento mutuo entre dos circuitos trifásicos, si la distancia de cada uno de los conductores del un circuito a los del otro fuese igual, pero éste arreglo físico no es posible; en estas secuencias el valor de impedancia mutua es pequeño, menor que el 10% de la impedancia propia, generalmente está comprendido entre el 3% y el 7% para líneas no transpuestas, y la transposición puede reducir éstos valores al 50% o más.

En secuencia cero tenemos sistemas monofásicos, en cada circuito circula una corriente $3 I_{a0}$, la impedancia mutua puede ser tan grande como el 50% hasta el 70% de la impedancia propia y por eso tienen que ser tomadas en cuenta en el cálculo de fallas. (18)

La representación del SEP para estudios de CCC, puede ser como el sistema indicado en la figura 2.2.

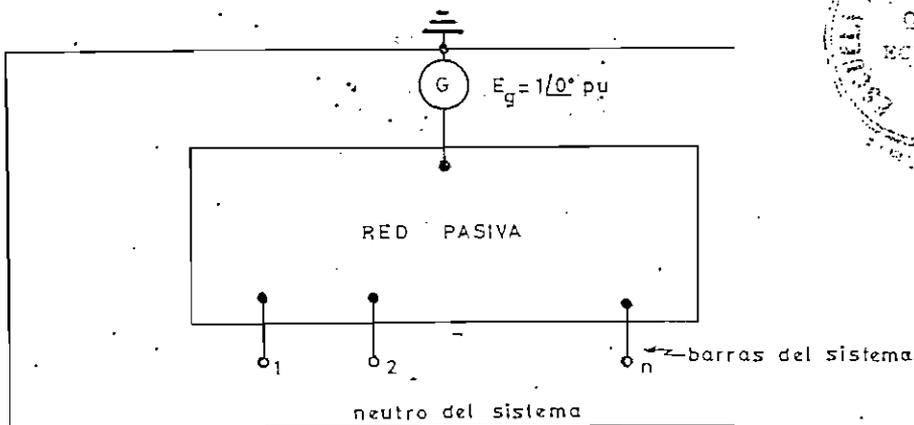


Fig. 2.2.- Representación de un sistema eléctrico para CCC

En la actualidad el aumento en complejidad y el empleo de EHV y UHV en sistemas de potencia, hacen de algunas de las simplificaciones indicadas no validas (14,15), lo que obliga a realizar estudios de sistemas basándose en modelos más reales y por supuesto más complejos, aunque éste no es nuestro caso presente.

2.3.- REPRESENTACION DE REDES PARA CALCULOS DE CORTOCIRCUITOS.-

Los primeros cálculos de cortocircuitos fueron hechos empleando la matriz admitancia de barra o planteando ecuaciones de mallas que para su solución empleaban métodos iterativos, pero tenían desventajas en aplicación para grandes redes, porque para cada falla se requería una solución iterativa completa; un completo análisis de una red de 1000 barras requiere tanto como 20000 a 30000 condiciones de falla, lo que era un proceso sumamente largo (20). El desarrollo de métodos aplicables a computadoras para formar la matriz impedancia de barras, hizo factible utilizar el teorema de Thevenin para el CCC.

2.3.1.- TEOREMA DE THEVENIN.- Este teorema es sumamente poderoso en análisis de redes cuando se desea encontrar relaciones para un par de puntos en particular, como es el caso de cálculo de corrientes de cortocircuito en el punto de falla del sistema. (8)

Este teorema dice que dado un par de terminales cualquiera de la red, ésta puede ser remplazada por una rama simple de impedancia Z_{11} igual a la impedancia medida en esos terminales mirando hacia la red (con las f.e.m. reducidas a cero), y conteniendo una f.e.m. $E_1(0)$ igual al voltaje en circuito abierto medido en el par de terminales dados.

La aplicación de éste teorema para CCC puede ser ilustrada para una falla trifásica, en donde sólo existen componentes de secuencia positiva. Los terminales del circuito equivalente

son los puntos de falla F y la barra de referencia N (potencial cero) de la red. El sistema mirado desde éste par de terminales es remplazado por una f.e.m. $E_{i(0)}^1$ equivalente, en serie con la impedancia de secuencia positiva (impedancia del punto motriz) Z_{ii}^1 (figura 2.3). La falla se produce cortocircuitando los terminales del circuito equivalente.

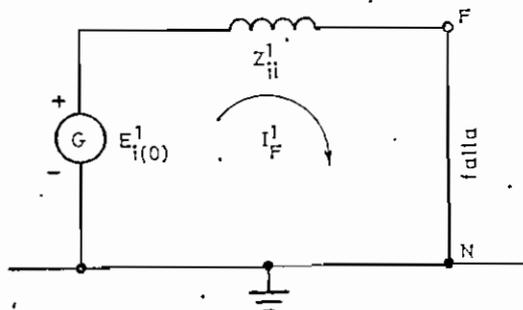


Fig. 2.3.- Aplicación del Teorema de Thevenin para una falla trifásica

La corriente de cortocircuito de secuencia positiva, por fase será igual a:

$$I_F^1 = E_{i(0)}^1 / Z_{ii}^1 \quad (2.2)$$

2.3.2.- REPRESENTACION MATRICIAL.- Se ha observado que la matriz impedancia de barra aunque más difícil de obtenerse tiene muchas ventajas para el CCC. Junto con el teorema de Thevenin, corrientes y tensiones de falla pueden calcularse con simples operaciones aritméticas que involucran pocos elementos de la matriz.

Las suposiciones que normalmente se hacen en estudios de cortocircuitos, permite reducir la red a un circuito equivalente como el indicado en la figura 2.4.

La matriz impedancia de barra, o también llamada "tensor de cortocircuitos" esta indicada en la relación 2.3.

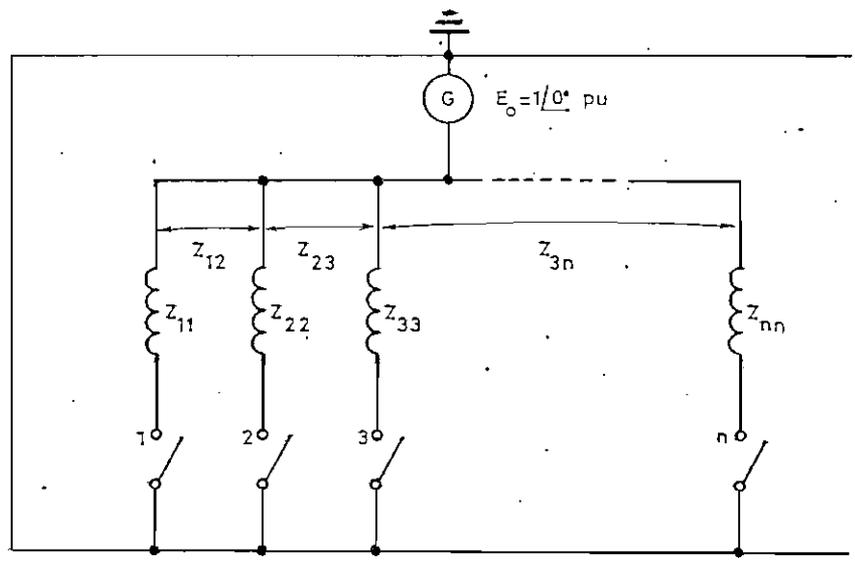


Fig. 2.4.- Circuito equivalente de un SEP para estudios de CCC

$$[Z_B] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Para una falla en la barra n el interruptor n es cerrado y para el cálculo de tensiones y corrientes la fila y columna n de la matriz Z_B se emplean.

2.4.- APLICACIÓN DE COMPONENTES SIMÉTRICAS.-

2.4.1.- REDES DE SECUENCIA (6,17).- Una red de secuencia es una copia por fase del sistema original, en donde constan el punto de falla como las impedancias del sistema, pero sus valores son únicos para cada secuencia.

Las corrientes de secuencias positiva y negativa generalmente ven un valor único de impedancia, las de secuencia cero ven valores diferentes, en algunos casos ven impedancias infinitas.

Las redes de secuencia esquemáticamente pueden indicarse como en la figura 2.5. Siendo Z^{012} las impedancias equivalentes, miradas desde los puntos F y N, de las tres redes de secuencia que se oponen al flujo de I_F^{012} respectivamente. El voltaje Thevenin equivalente es E_O^1 para secuencia positiva, para las demás secuencias son cero.

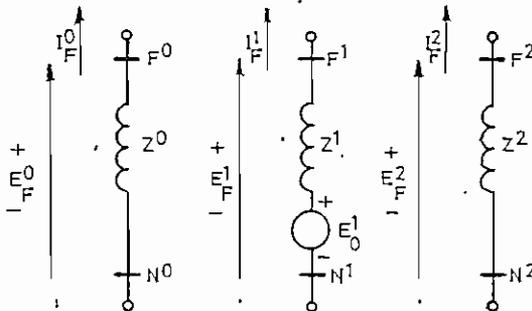


Fig. 2.5.- Redes equivalentes de secuencias

Se asumirá que la corriente de falla sale de la barra F y fluye hacia la falla; también se asume que la tensión a través de la red de secuencia crece de N a F. Para éste circuito se puede escribir la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} E_F^0 \\ E_F^1 \\ E_F^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_O^1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F^0 \\ I_F^1 \\ I_F^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

simplificando:

$$\bar{E}_F^s = \bar{E}_O^s - [Z^s] \bar{I}_F^s \quad (2.5)$$

2.4.2.- CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIAS PARA FALLAS (6,17) .-

Encontraremos la manera en que se encuentran relacionadas las redes de secuencias, para diferentes tipos de falla en la barra F.

Para realizar éste estudio se seguirá un procedimiento general, que consistirá de los siguientes pasos (6):

1) Bosquejar un diagrama de la barra fallada indicando conexión de fases, sentido de corrientes y tensiones asumiendo conocido los equivalentes Thevenin para ese punto.

2) Definir las condiciones de borde, relacionando tensiones y corrientes de fase para ese tipo de falla.

3) Transformar corrientes y tensiones de fase encontradas en el punto 2 a componentes de secuencia.

4) Examinar las corrientes de secuencia para determinar las conexiones de los terminales F y N de las redes de secuencia.

5) Examinar las tensiones de secuencia para determinar las conexiones restantes añadiendo impedancias si se requieren para satisfacer los puntos 3 y 4 .

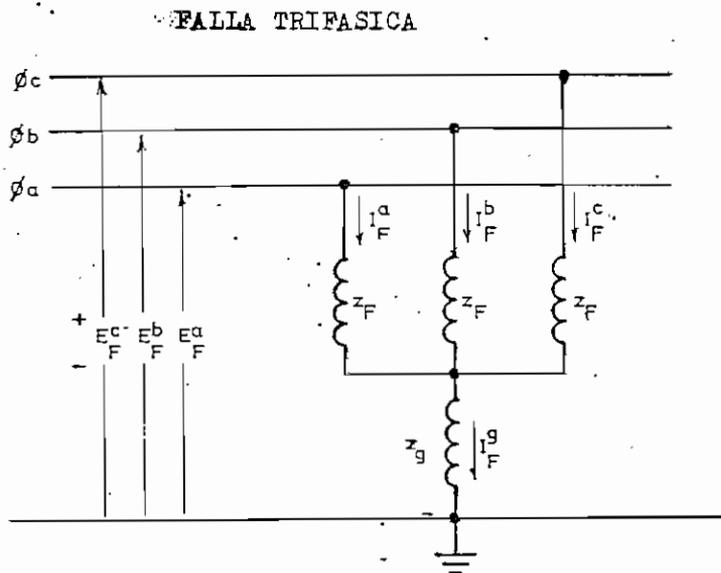


Fig. 2.6.- Representación de cortocircuito trifásico

Las condiciones de borde son:

$$E_F^a = z_F I_F^a + z_G I_F^g \quad (2.6)$$

$$E_F^b = z_F I_F^b + z_G I_F^g \quad (2.7)$$

$$E_F^c = z_F I_F^c + z_G I_F^g \quad (2.8)$$

Estas ecuaciones transformamos a componentes de secuencia:

$$E_F^0 + E_F^1 + E_F^2 = z_F (I_F^0 + I_F^1 + I_F^2) + \sqrt{3} z_G I_F^0 \quad (2.9)$$

$$E_F^0 + a^2 E_F^1 + a E_F^2 = z_F (I_F^0 + a^2 I_F^1 + a I_F^2) + \sqrt{3} z_G I_F^0 \quad (2.10)$$

$$E_F^0 + a E_F^1 + a^2 E_F^2 = z_F (I_F^0 + a I_F^1 + a^2 I_F^2) + \sqrt{3} z_G I_F^0 \quad (2.11)$$

de donde se deduce las siguientes igualdades:

$$E_F^1 - z_F I_F^1 = -2 (E_F^0 - z_F I_F^0 - 3 z_G I_F^0) \quad (2.12)$$

$$E_F^1 - z_F I_F^1 = E_F^0 - z_F I_F^0 - 3 z_G I_F^0 \quad (2.13)$$

$$E_F^1 - z_F I_F^1 = E_F^2 - z_F I_F^2 = 0 \quad (2.14)$$

analizando éstas tres últimas ecuaciones se deduce que sólo existe componentes de secuencia positiva. La conexión de las redes de secuencia para representar la falla trifásica es la siguiente:

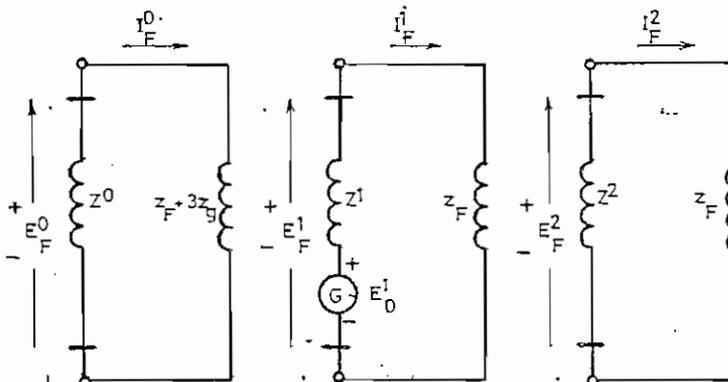


Fig. 2.7.- Conexión de redes de secuencia para una falla trifásica.

FALLA FASE-TIERRA

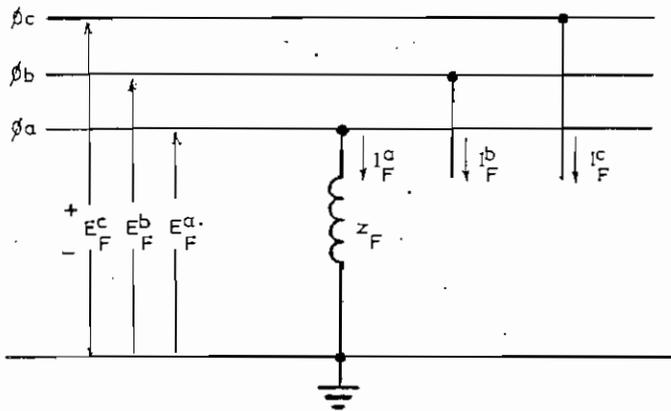


Fig. 2.8.- Cortocircuito fase-tierra

Las ecuaciones de borde son:

$$I_F^b = I_F^c = 0 \quad (2.15)$$

$$E_F^a = z_F I_F^a \quad (2.16)$$

Pasando éstas ecuaciones a componentes simétricas, tenemos:

$$\bar{I}_F^S = I_F^a / \sqrt{3} [1 \quad 1 \quad 1]^t \quad (2.17)$$

$$E_F^0 + E_F^1 + E_F^2 = 3 z_F I_F^1 \quad (2.18)$$

Conectando las redes de secuencia de acuerdo a éstas dos ecuaciones últimas:

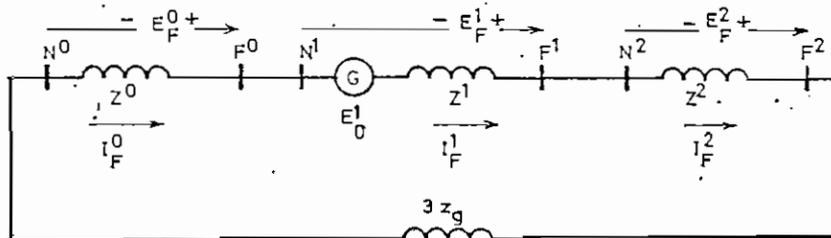


Fig. 2.9.- Conexión de redes de secuencia para una falla fase-tierra

FALLA FASE-FASE

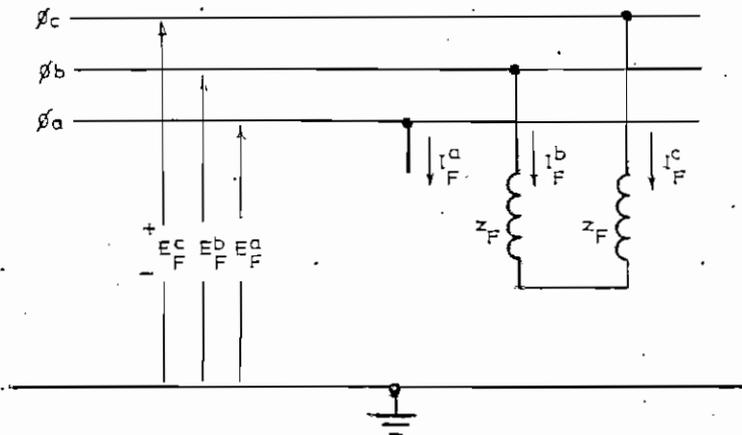


Fig. 2.10.- Cortocircuito fase-fase

De la figura, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$I_F^a = 0 \quad (2.19)$$

$$I_F^b = - I_F^c \quad (2.20)$$

$$E_F^b = E_F^c = 2 z_F I_F^b \quad (2.21)$$

Estas ecuaciones en términos de componentes simétricas:

$$\bar{I}_F^s = j I_F^b [0 \quad 1 \quad -1]^t \quad (2.22)$$

$$2 z_F I_F^b = E_F^1 - E_F^2 \quad (2.23)$$

De estas últimas ecuaciones tenemos el siguiente gráfico:

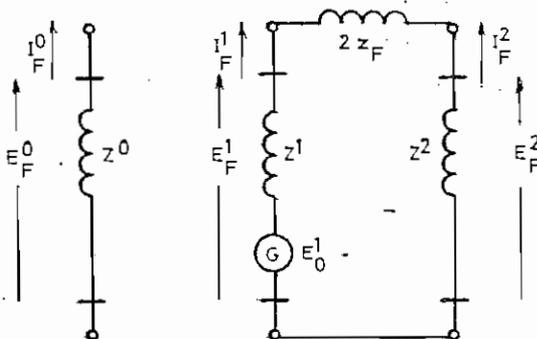


Fig. 2.11.- Conexión de redes de secuencia para una falla fase-fase

FALLA DOS FASES-TIERRA

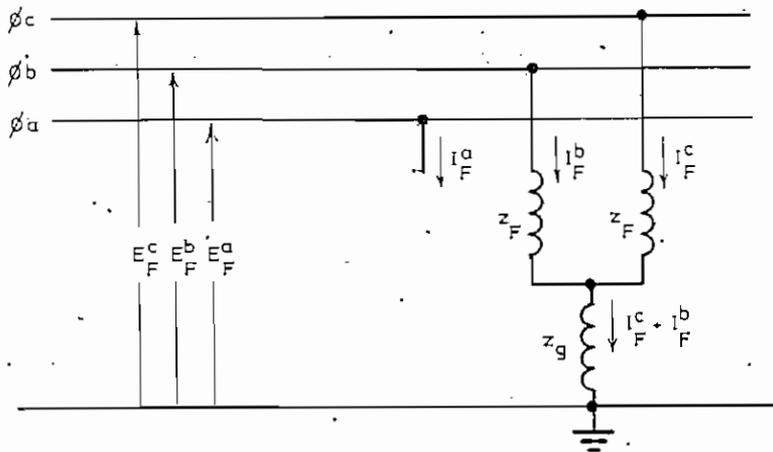


Fig. 2.12.- Cortocircuito dos fases-tierra

Las ecuaciones de borde para este caso son:

$$I_F^a = 0 \quad (2.24)$$

$$E_F^b = (z_F + z_g) I_F^b + z_g I_F^c \quad (2.25)$$

$$E_F^c = (z_F + z_g) I_F^c + z_g I_F^b \quad (2.26)$$

Pasando a componentes simétricas y haciendo simplificaciones :

$$I_F^a = 0 = (I_F^0 + I_F^1 + I_F^2) / \sqrt{3} \quad (2.27)$$

$$E_F^0 - z_F I_F^0 - 3 z_g I_F^0 = E_F^1 - z_F I_F^1 \quad (2.28)$$

$$E_F^1 - z_F I_F^1 = E_F^2 - z_F I_F^2 \quad (2.29)$$

el circuito equivalente para estas tres últimas ecuaciones es:

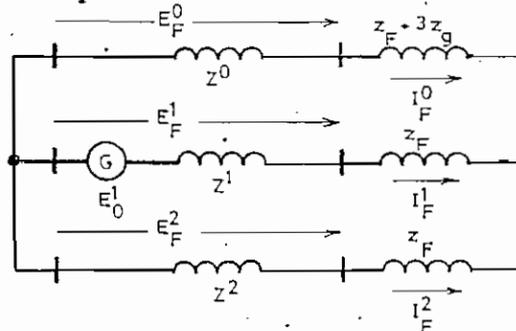


Fig. 2.13.- Conexión de redes de secuencia para una falla dos fases-tierra

C A P I T U L O I I I

CALCULO DIGITAL DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.-

3.1.- GENERALIDADES.- Vamos a repetir algo que ya se dijo en el capítulo anterior. Los primeros estudios de CCC empleando métodos digitales planteaban soluciones a base de procesos iterativos, que exigían soluciones y estudios completos para cada tipo de falla y localización, es un proceso relativamente largo.

La matriz impedancia de barras presenta soluciones más directas para este tipo de estudios, pero la dificultad de obtenerse (ecuación 1.23) , hacía prácticamente muy difícil su utilización. A partir del año de 1960, se desarrollaron métodos eficientes para formar la matriz impedancia de barras lo que facilitó y simplificó el CCC.

Las ventajas que presenta la matriz impedancia de barra sobre otras técnicas, para el estudio de CCC, tenemos (1,4) :

1) La descripción de la red en circuito abierto es la matriz impedancia de barras, coincide con la suposición que normalmente se hace en estudios de CCC.

2) Se tiene gran exactitud en los cálculos por no tener que recurrir a técnicas iterativas, en donde la precisión es cuestionable, especialmente en donde existen impedancias de bajo valor ⁽²³⁾.

3) La matriz impedancia de barras, en si mismo, implica una solución completa de CCC para todo un sistema, descuidando de cuál es la barra fallada ⁽¹⁾. La matriz tiene que ser calculada solamente una vez.

4) La matriz impedancia de barras puede ser modificada fácilmente para cualquier cambio en el sistema.

5) Facilidad para incluir efectos de impedancias mutuas y negativas.

El método para formar la matriz impedancia de barras, consiste en simular la construcción de la red añadiendo un elemento al mismo tiempo.

3.2.- ALGORITMO PARA FORMAR LA MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRAS (2).-

Este método fué desarrollado primeramente por Brown, Person, Kirchmayer y Stagg en el año de 1960⁽²⁴⁾ y consiste en formar la matriz impedancia para una red parcialmente formada, cada vez que un elemento es añadido a ésta.

Una dificultad asociada con la formación de la matriz impedancia de barras, es la ordenación de los elementos. Cualquier elemento no conectado a la barra de referencia de alguna manera no tiene matriz de impedancia finita. Esto es debido a la forma en que los elementos de ésta matriz son definidos. De manera que el primer elemento de la red tendrá que ser uno conectado a la barra de referencia, y todos los demás deberán estar conectados por lo menos a unas de las barras de la red formada.

Quando el elemento $p-q$ es añadido a la red, éste puede ser rama o enlace. La "dirección" del elemento añadido será siempre de p a q .⁽²³⁾

Si el elemento añadido es rama, la barra q aumenta en el sistema; la dimensión de la impedancia hasta aquí formada aumenta en una fila y columna, y se deben calcular el valor de los elementos añadidos.

Si el elemento $p-q$ es enlace, la matriz de barras del sistema no aumenta de dimensión, pero tiene que ser modificada completamente.

Un elemento cualquiera que se añada a la red puede ser uno de los siguientes tipos:

- a) Adición de una impedancia (transformador, generador) del neutro a una nueva barra.
- b) Adición de una impedancia (transformador, generador) del neutro a una barra ya existente.
- c) Adición de una impedancia (línea, transformador) de una barra ya existente a una nueva barra.
- d) Adición de una impedancia (línea, transformador) entre dos barras ya existentes.

El elemento p-q que se añade a la red, puede estar o no acoplado con otros elementos que se encuentran en la red.

La ecuación de comportamiento de la red "parcial" es:

$$\bar{E}_B = [Z_B] \bar{I}_B \quad (3.1)$$

expandiendo ésta ecuación para el sistema parcialmente formado e indicado en la figura 3.1, tenemos:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_p \\ \dots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} & \dots & Z_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & Z_{pp} & \dots & Z_{pm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mp} & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_p \\ \dots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Consideraremos separadamente los casos en que el elemento p-q es rama y es enlace.

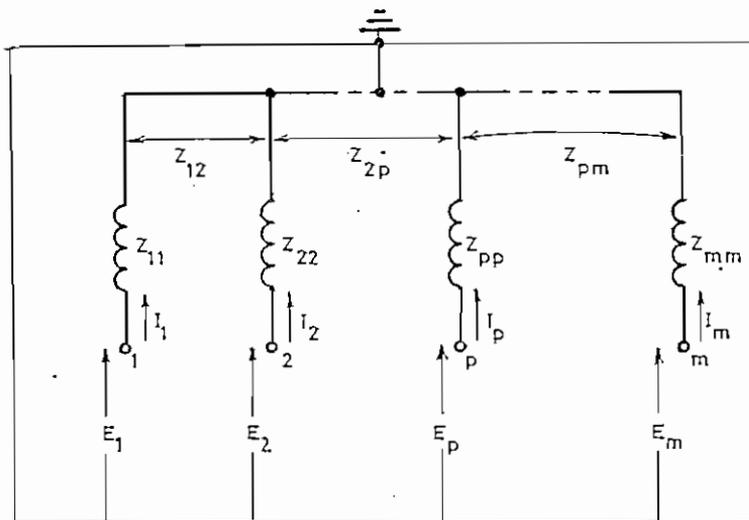


Fig. 3.1.- Circuito equivalente de la red parcialmente formada.

3.2.1.- EL ELEMENTO p-q AÑADIDO ES RAMA.- La barra q aumenta en la red (fig. 3.2)

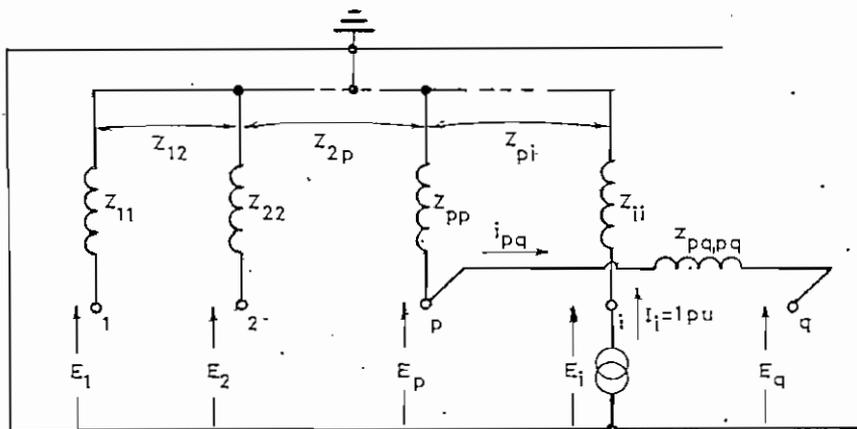


Fig. 3.2.- Aumento de un elemento "rama" en la red.

La ecuación de comportamiento de la red, está dada por la ecuación 3.3, en donde los términos con subíndice q deberán calcularse. Para ésto inyectamos corriente 1 p.u. en la barra i y calculamos tensiones en la barra q con todas las demás barras del

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_p \\ \dots \\ E_m \\ \hline E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} & \dots & Z_{1m} & Z_{1q} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} & \dots & Z_{2m} & Z_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & Z_{pp} & \dots & Z_{pm} & Z_{pq} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mp} & \dots & Z_{mm} & Z_{mq} \\ \hline Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & Z_{qp} & \dots & Z_{qm} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_p \\ \dots \\ I_m \\ \hline I_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

sistema equivalente abiertas. La ecuación 3.3 nos queda:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & \dots & E_p & \dots & E_i & \dots & E_m & E_q \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} Z_{1i} & Z_{2i} & \dots & Z_{pi} & \dots & Z_{ii} & \dots & Z_{mi} & Z_{qi} \end{bmatrix}^t \quad (3.4)$$

para todo $i \neq q$.

También tenemos que:

$$v_{pq} = E_p - E_q \quad (3.5)$$

El elemento p-q está acoplado con otros elementos que ya forman parte del sistema. La ecuación de comportamiento del "grupo" de elementos acoplados está dada por la relación 1.8, pero el elemento p-q es un elemento pasivo, por tanto:

$$i_{pq} = y_{pq,pq} v_{pq} + \bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs} = 0$$

de donde:

$$v_{pq} = - \frac{\bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs}}{y_{pq,pq}} \quad (3.6)$$

de igual manera que en 3.5, tenemos:

$$v_{rs} = E_r - E_s \quad (3.7)$$

De las ecuaciones 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se deduce la siguiente relación:

$$Z_{qi} = Z_{pi} + \frac{\bar{y}_{pq,rs} (\bar{Z}_{ri} - \bar{Z}_{si})}{\bar{y}_{pq,pq}} \quad (3.8)$$

para todo $i \neq q$.

De igual manera calculamos Z_{qq} . Inyectamos corriente 1 p.u. en la barra q y medimos la tensión en ésta misma barra con respecto a la de referencia, con todas las demás corrientes reducidas a cero. Siguiendo el mismo procedimiento anterior:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & \dots & E_p & \dots & E_m & E_q \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} Z_{1q} & Z_{2q} & \dots & Z_{pq} & \dots & Z_{mq} & Z_{qq} \end{bmatrix}^t \quad (3.9)$$

$$i_{pq} = -I_q = -1 \text{ p.u.} \quad (3.10)$$

$$i_{pq} = \bar{y}_{pq,pq} v_{pq} + \bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs} \quad (3.11)$$

Combinando las ecuaciones 3.5, 3.7, 3.9, 3.10, 3.11 tenemos que:

$$Z_{qq} = Z_{pq} + \frac{1 + \bar{y}_{pq,rs} (\bar{Z}_{rq} - \bar{Z}_{sq})}{\bar{y}_{pq,pq}} \quad (3.12)$$

Empleando las ecuaciones 3.8 y 3.12 podemos encontrar todos los términos desconocidos de la nueva matriz impedancia de barras (ecuación 3.3).

3.2.2.- EL ELEMENTO p - q AÑADIDO ES ENLACE.- Las barras p y q existen en la red.

Todos los elementos de la matriz impedancia de barras tendrán que ser modificados.

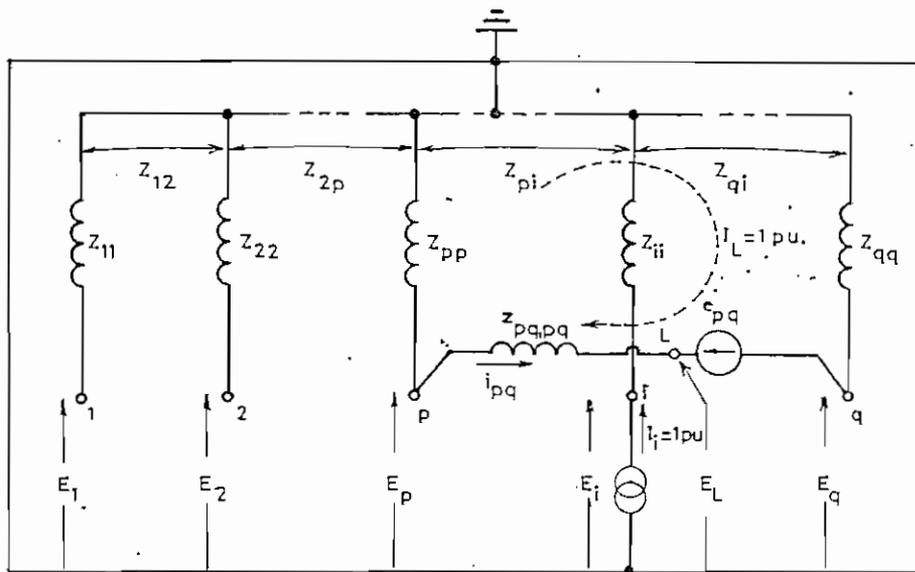


Fig. 3.3.- Aumento de un elemento "enlace" en la red.

Para calcular la nueva matriz impedancia de barras, su pondremos que el elemento p-q añadido no es pasivo ⁽²³⁾, tiene conectada en serie una fuente de tensión de un valor determinado, que normalmente vale cero.

El valor de la fuente de tensión e_{pq} escogemos de tal manera que la corriente en el elemento p-q sea cero, para cuando todas las corrientes de barra sean cero excepto la de la barra i que valdrá 1 p.u. En éstas condiciones el elemento p-q podrá ser considerado como rama conectado a una barra ficticia L que luego tendrá que ser eliminada. Si procedemos de ésta manera podremos calcular los elementos Z_{Li} de la nueva barra en la ecuación 3.13.

Cuando todas las corrientes de barras son cero excepto la de la barra i que hacemos que valga 1 p.u., tenemos que la ecuación 3.13 se reduce a la ecuación 3.14.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_p \\ \dots \\ E_q \\ \dots \\ e_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} & \dots & Z_{1q} & \dots & Z_{1L} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} & \dots & Z_{2q} & \dots & Z_{2L} \\ \dots & \dots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & Z_{pp} & \dots & Z_{pq} & \dots & Z_{pL} \\ \dots & \dots \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & Z_{qp} & \dots & Z_{qq} & \dots & Z_{qL} \\ \dots & \dots \\ Z_{L1} & Z_{L2} & \dots & Z_{Lp} & \dots & Z_{Lq} & \dots & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_p \\ \dots \\ I_q \\ \dots \\ I_L \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & \dots & E_p & \dots & E_q & \dots & e_{pq} \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} Z_{1i} & Z_{2i} & \dots & Z_{pi} & \dots & Z_{qi} & \dots & Z_{Li} \end{bmatrix}^t \quad (3.14)$$

La tensión de la fuente de tensión, vale:

$$e_{pq} = E_p - E_q - v_{pL} \quad (3.15)$$

$$i_{pq} = i_{pL} = y_{pq,pq} v_{pL} + \bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs} = 0 \quad (3.16)$$

de donde:

$$v_{pL} = - \frac{\bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs}}{y_{pq,pq}} \quad (3.17)$$

Sustituyendo 3.5, 3.7, 3.14, 3.17 en 3.15, tenemos finalmente:

$$Z_{Li} = Z_{pi} - Z_{qi} + \frac{\bar{y}_{pq,rs} (\bar{Z}_{ri} - \bar{Z}_{si})}{y_{pq,pq}} \quad (3.18)$$

para todo $i \neq L$.

Para tener el valor de Z_{LL} , la fuente de tensión del elemento le ajustamos a determinado valor de tal manera que la corriente en el lazo $I_L = 1$ p.u. El elemento Z_{LL} representa todas las impedancias encontradas por la corriente $I_L^{(1)}$ (indicada con línea segmentada en la figura 3.3). Cuando ajustamos la tensión de la fuente de manera que la corriente en el lazo sea 1 p.u., estamos definiendo la impedancia del punto motriz del lazo ⁽²⁰⁾. Todas las demás corrientes del sistema les hacemos iguales a cero. La ecuación 3.13 nos queda:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & \dots & E_p & \dots & E_q & \dots & e_{pq} \end{bmatrix}^t = \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{1L} & Z_{2L} & \dots & Z_{pL} & \dots & Z_{qL} & \dots & Z_{LL} \end{bmatrix}^t$$

$$i_{pL} = -I_L = y_{pq,pq} v_{pL} + \bar{y}_{pq,rs} \bar{v}_{rs} = -1 \text{ p.u.} \quad (3.20)$$

de donde se tiene:

$$v_{pL} = \frac{-1 - \bar{y}_{pq,rs} (\bar{Z}_{rL} - \bar{Z}_{sL})}{y_{pq,pq}} \quad (3.21)$$

Combinando las ecuaciones 3.5, 3.19, 3.21 y 3.15 tenemos:

$$Z_{LL} = Z_{pL} - Z_{qL} + \frac{1 + \bar{y}_{pq,rs} (\bar{Z}_{rL} - \bar{Z}_{sL})}{y_{pq,pq}} \quad (3.22)$$

Los elementos de la matriz 3.13 con subíndice L, pueden ser eliminados reduciendo la fuente de tensión e_{pq} a su valor normal que es cero. La ecuación 3.13 se reduce a:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_B \\ \hline 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Z_B] & | & \bar{Z}_{1L} \\ \hline \bar{Z}_{Lj} & | & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_B \\ \hline I_L \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

De esta última ecuación se tiene:

$$[Z_{B(\text{modificada})}] = [Z_{B(\text{sin modificar})}] - \frac{\bar{Z}_{iL} \bar{Z}_{Lj}}{Z_{LL}} \quad (3.24)$$

para todo $i, j \neq L$.

Después de añadir el elemento p-q a la red, la ecuación de comportamiento del sistema está dada por la ecuación 3.3 y su circuito equivalente es el de la figura 3.4.

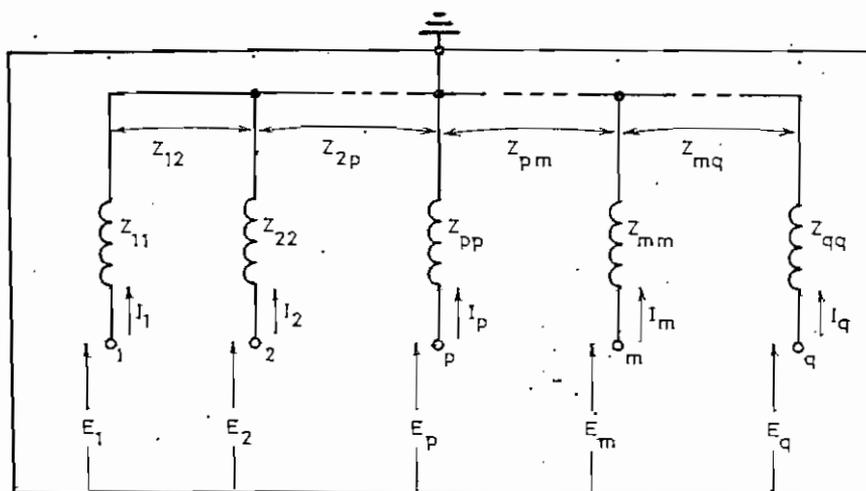


Fig. 3.4.- Circuito equivalente de la red luego de aumentarse el elemento p-q

3.3.- MATRIZ ADMITANCIA DE FALLA (10).- Una falla se produce en cualquier barra, a través de un circuito cuya representación más general es la indicada en la figura 3.5. Dependiendo del tipo de falla, las admitancias pueden tomar valores comprendidos entre cero e infinito.

La ecuación de comportamiento del circuito está dada por la ecuación:

$$\bar{I}_P^f = [Y_F^f] \bar{E}_F^f \quad (3.25)$$

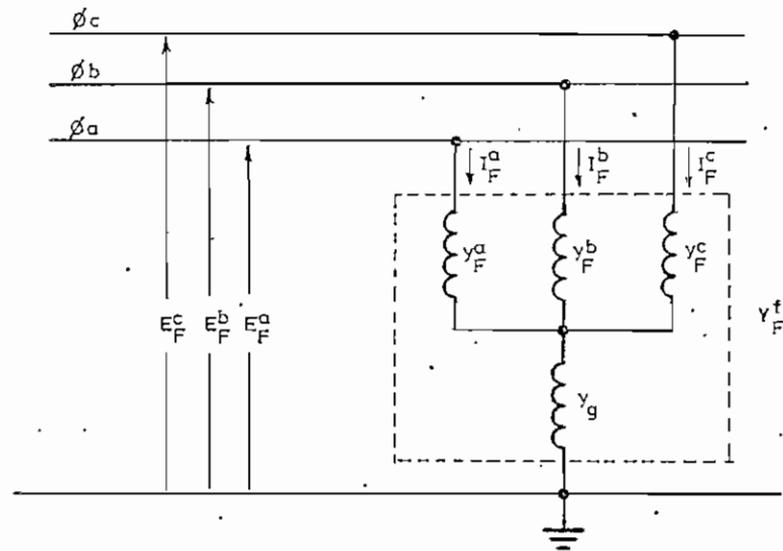


Fig. 3.5.- Circuito equivalente para una falla.

expandingo ésta última ecuación:

$$\begin{bmatrix} I_F^a \\ I_F^b \\ I_F^c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_F^a & 0 & 0 & | & -y_F^a \\ 0 & y_F^b & 0 & | & -y_F^b \\ 0 & 0 & y_F^c & | & -y_F^c \\ \hline -y_F^a & -y_F^b & -y_F^c & | & y_F^a + y_F^b + y_F^c + y_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_F^a \\ E_F^b \\ E_F^c \\ E_F^n \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

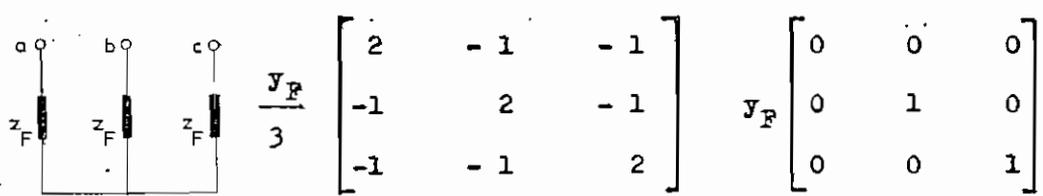
$$\begin{bmatrix} \bar{I}_F^f \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_F^{ff}] & | & \bar{Y}_F^{fn} \\ \hline \bar{Y}_F^{nf} & | & Y_F^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_F^f \\ \bar{E}_F^n \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

eliminando el nodo n :

$$\bar{I}_F^f = \left([Y_F^{ff}] - \frac{\bar{Y}_F^{fn} \bar{Y}_F^{nf}}{Y_F^{nn}} \right) \bar{E}_F^f$$

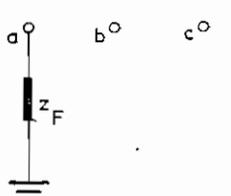
TIPO DE FALLA

MATRICES ADMITANCIAS DE FALLAS DE:
FASE SECUENCIA



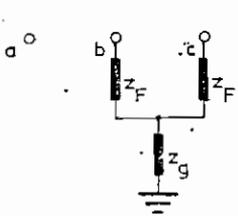
$$\frac{y_F}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$y_F \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} y_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{y_F}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



$$L \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_F+z_g & -z_g \\ 0 & -z_g & z_F+z_g \end{bmatrix}$$

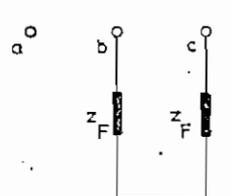
$$M \begin{bmatrix} 2z_F & -z_F & -z_F \\ -z_F & 2z_F+3z_g & -z_F-3z_g \\ -z_F & -z_F-3z_g & 2z_F+3z_g \end{bmatrix}$$

donde:

donde:

$$L = (z_F + 2z_F z_g)^{-1}$$

$$M = (3(z_F^2 + 2z_F z_g))^{-1}$$



$$\frac{y_F}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{y_F}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Tabla 3.1.- Admitancias de fallas para los diferentes tipos de cortocircuitos.

de donde se deduce:

$$[Y_F^f] = [Y_F^{ff}] - \frac{\overline{y}_F^{fn} \overline{y}_F^{nf}}{y_F^{nn}} \quad (3.28)$$

$$[Y_F^f] = \begin{bmatrix} y_F^a & 0 & 0 \\ 0 & y_F^b & 0 \\ 0 & 0 & y_F^c \end{bmatrix} - \frac{[-y_F^a \quad -y_F^b \quad -y_F^c]^t [-y_F^a \quad -y_F^b \quad -y_F^c]}{y_F^a + y_F^b + y_F^c + y_G} \quad (3.29)$$

Si definimos :

$$y_F' = (y_F^a + y_F^b + y_F^c + y_G)^{-1}$$

la ecuación 3.29 se reduce a :

$$[Y_F^f] = y_F' \begin{bmatrix} y_F^a(y_F^b + y_F^c + y_G) & -y_F^a y_F^b & -y_F^a y_F^c \\ -y_F^a y_F^b & y_F^b(y_F^a + y_F^c + y_G) & -y_F^b y_F^c \\ -y_F^a y_F^c & -y_F^b y_F^c & y_F^c(y_F^a + y_F^b + y_G) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Pasando a componentes simétricas, utilizando una transformación similar a la empleada en la relación 1.40, obtenemos la siguiente expresión:

$$[Y_F^s] = y_F' \begin{bmatrix} y_F^{p0} & y_F^{m2} & y_F^{m1} \\ y_F^{m1} & y_F^{p1} + y_F^{p0} & y_F^{m12} + y_F^{m2} \\ y_F^{m2} & y_F^{m21} + y_F^{m1} & y_F^{p1} + y_F^{p0} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

cada uno de los términos empleados están definidos a continuación:

$$y_F^{p0} = \frac{1}{3} y_g (y_F^a + y_F^b + y_F^c)$$

$$y_F^{m1} = \frac{1}{3} y_g (y_F^a + a y_F^b + a^2 y_F^c)$$

$$y_F^{m2} = \frac{1}{3} y_g (y_F^a + a^2 y_F^b + a y_F^c)$$

$$y_F^{p1} = y_F^a y_F^b + y_F^a y_F^c + y_F^b y_F^c$$

$$y_F^{m21} = - (a^2 y_F^a y_F^b + a y_F^a y_F^c + y_F^b y_F^c)$$

$$y_F^{m12} = - (a y_F^a y_F^b + a^2 y_F^a y_F^c + y_F^b y_F^c)$$

En la tabla 3.1 se indican las formas que toma esta matriz para los diferentes tipos de fallas.

3.4.- CALCULO DIGITAL DE CORTOCIRCUITOS (2).- Empleando el teorema de Thevenin, en condiciones de falla un SEP puede ser representado como en la figura 3.6. La ecuación de comportamiento del sistema durante la falla está dada por:

$$\bar{E}_{B(F)}^f = \bar{E}_{B(0)}^f - [Z_B^f] \bar{I}_{B(F)}^f \quad (3.32)$$

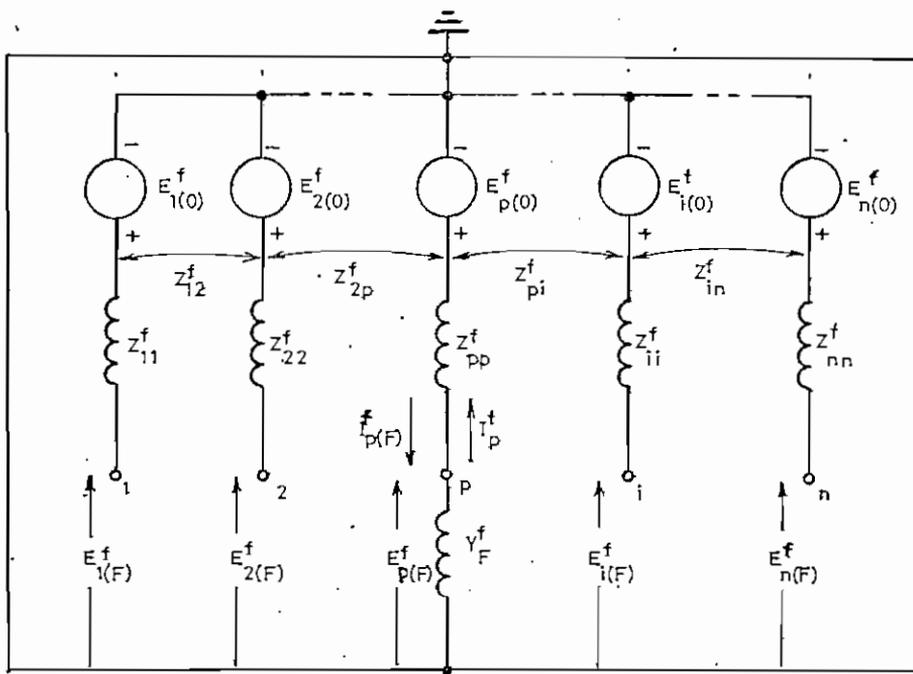
en donde:

$$\bar{E}_{B(F)}^f = [\bar{E}_{1(F)}^f \quad \bar{E}_{2(F)}^f \quad \dots \quad \bar{E}_{p(F)}^f \quad \dots \quad \bar{E}_{n(F)}^f]^t \quad (3.33)$$

son tensiones de barras con respecto a la de referencia durante la falla.

$$\bar{E}_{B(0)}^f = [\bar{E}_{1(0)}^f \quad \bar{E}_{2(0)}^f \quad \dots \quad \bar{E}_{p(0)}^f \quad \dots \quad \bar{E}_{n(0)}^f]^t \quad (3.34)$$

son las tensiones Thevenin con respecto a la barra de referencia antes de la falla.



$$\bar{I}_{B(F)}^f = [\bar{I}_{1(F)}^f \quad \bar{I}_{2(F)}^f \quad \dots \quad \bar{I}_{p(F)}^f \quad \dots \quad \bar{I}_{n(F)}^f]^t \quad (3.35)$$

son corrientes de fallas saliendo de las barras.

$[Z_B^f]$ es la matriz impedancia de barras del sistema.

Cuando se produce sólo una falla en el sistema y ésta tiene lugar en la barra p , la expresión 3.35 se reduce a :

$$\bar{I}_{B(F)}^f = [0 \quad 0 \quad \dots \quad \bar{I}_{p(F)}^f \quad \dots \quad 0]^t \quad (3.36)$$

La ecuación matricial se transforman en una serie de ecuaciones, así de la ecuación 3.32 tenemos:

$$\bar{E}_{i(F)}^f = \bar{E}_{i(0)}^f - [Z_{ip}^f] \bar{I}_{p(F)}^f \quad (3.37)$$

para $i = 1, 2, 3, \dots, p, \dots, n$.

éstas ecuaciones dan las tensiones de cualquier barra con respecto a tierra durante la falla.

La corriente en la barra fallada viene dado por:

$$\bar{I}_{p(F)}^f = [Y_F^f] \bar{E}_{p(F)}^f \quad (3.38)$$

De las ecuaciones 3.37 y 3.38, para $i = p$, tenemos:

$$\bar{E}_{p(F)}^f = ([U] + [Z_{pp}^f] [Y_F^f])^{-1} \bar{E}_{p(0)}^f \quad (3.39)$$

donde $[U]$ es la matriz unitaria.

El flujo de corriente en cualquier elemento del sistema (figura 3.7), está dado por:

$$\bar{I}_{ij(F)}^f = \bar{Y}_{ij,rs}^f (\bar{E}_r^f - \bar{E}_s^f) \quad (3.40)$$

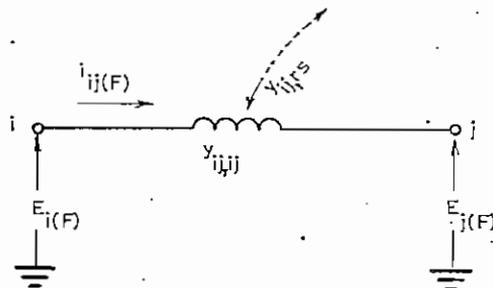


Fig. 3.7.- Corriente en el elemento $i-j$ para una falla en la barra p

Para pasar a componentes simétricas las relaciones encontradas anteriormente, empleamos las transformaciones:

$$\begin{aligned} \bar{E}^s &= [T]^{-1} \bar{E}^f \\ \bar{I}^s &= [T]^{-1} \bar{I}^f \\ [Z^s] &= [T]^{-1} [Z^f] [T] \end{aligned} \quad (3.41)$$

Las ecuaciones 3.39, 3.38, 3.37 y 3.40 se transforman en:

$$\bar{E}_{p(F)}^s = ([U] + [Z_{pp}^s] [Y_F^s])^{-1} \bar{E}_{p(0)}^s \quad (3.42)$$

$$\bar{I}_{P(F)}^S = [Y_F^S] \bar{E}_{P(F)}^S \quad (3.43)$$

$$\bar{E}_{1(F)}^S = \bar{E}_{1(0)}^S - [Z_{ip}^S] \bar{I}_{P(F)}^S \quad (3.44)$$

$$\bar{I}_{ij(F)}^S = \bar{Y}_{ij,rs}^S (\bar{E}_{r(F)}^S - \bar{E}_{s(F)}^S) \quad (3.45)$$

A base de las ecuaciones deducidas en términos de componentes simétricas, se hará un análisis de los diferentes tipos de cortocircuitos. Supondremos que las componentes de impedancias de secuencia positiva son iguales a las de secuencia negativa.

Para obtener resultados en términos de componentes de fase, los valores de componentes simétricas encontrados tenemos que multiplicarles por las transformaciones inversas dadas por las ecuaciones 3.41.

3.4.1.- FALLA TRIFASICA .-- Las tensiones de secuencia en la barra fallada está dada por la ecuación 3.42; el valor de $[Y_F^S]$ se encuentra en la tabla 3.1.

$$\begin{bmatrix} E_{P(F)}^0 \\ E_{P(F)}^1 \\ E_{P(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{pp}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{pp}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{pp}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (z_F + 3z_g)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & y_F & 0 \\ 0 & 0 & y_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix}$$

que se reduce a:

$$[E_{P(F)}^0 \quad E_{P(F)}^1 \quad E_{P(F)}^2]^t = [0 \quad \sqrt{3}z_F/(z_F + Z_{pp}^1) \quad 0]^t \quad (3.46)$$

ésta ecuación remplazamos en 3.43, y simplificando nos queda:

$$[I_{P(F)}^0 \quad I_{P(F)}^1 \quad I_{P(F)}^2]^t = [0 \quad \sqrt{3}/(z_F + Z_{pp}^1) \quad 0]^t \quad (3.47)$$

Tensiones en cualquier barra i , según la ecuación 3.44 vale:

$$\begin{bmatrix} E_{i(F)}^0 \\ E_{i(F)}^1 \\ E_{i(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ip}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ip}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ip}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{p(F)}^0 \\ I_{p(F)}^1 \\ I_{p(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{ip}^0 I_{p(F)}^0 \\ \sqrt{3} - Z_{ip}^1 I_{p(F)}^1 \\ -Z_{ip}^1 I_{p(F)}^2 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

3.4.2.- FALIA FASE-TIERRA.- El valor de la matriz de falla para éste caso se encuentra dado en la tabla 3.1. Calculamos tensiones en la barra fallada:

$$\begin{bmatrix} E_{p(F)}^0 \\ E_{p(F)}^1 \\ E_{p(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{pp}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{pp}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{pp}^1 \end{bmatrix} \frac{y_F}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix}$$

realizando operaciones y simplificando, nos queda:

$$\begin{bmatrix} E_{p(F)}^0 \\ E_{p(F)}^1 \\ E_{p(F)}^2 \end{bmatrix}^t = H \begin{bmatrix} -Z_{pp}^0 & Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + 3z_F & -Z_{pp}^1 \end{bmatrix}^t \quad (3.49)$$

donde:

$$H = \sqrt{3} / (Z_{pp}^0 + 2 Z_{pp}^1 + 3z_F)$$

Las corrientes de secuencia en la barra fallada, encontramos como en el caso anterior, empleando la ecuación 3.43, con los siguientes resultados:

$$\begin{bmatrix} I_{p(F)}^0 \\ I_{p(F)}^1 \\ I_{p(F)}^2 \end{bmatrix}^t = H \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^t \quad (3.50)$$

Las tensiones en cualquier otra barra que no sea la fallada, encontramos reemplazando los valores de 3.50 en 3.48.

3.4.3.- FALLA FASE-FASE .- El valor de $[Y_F^S]$ está dado en la tabla 3.1. Tensiones en la barra fallada:

$$\begin{bmatrix} E_{P(F)}^0 \\ E_{P(F)}^1 \\ E_{P(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{pp}^0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{pp}^1 & 0 \\ 0 & 0 & z_{pp}^1 \end{bmatrix} \frac{y_F}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix}$$

luego de simplificar nos queda:

$$[E_{P(F)}^0 \quad E_{P(F)}^1 \quad E_{P(F)}^2]^t = \sqrt{3}/2 (z_{pp}^1 + z_F) [0 \quad 2z_F + z_{pp}^1 \quad z_{pp}^1]^t \quad (3.51)$$

Corrientes de secuencia en la falla:

$$[I_{P(F)}^0 \quad I_{P(F)}^1 \quad I_{P(F)}^2]^t = \sqrt{3}/2 (z_{pp}^1 + z_F) [0 \quad 1 \quad -1]^t \quad (3.52)$$

Tensiones en otras barras se calculan como en los casos anteriores.

3.4.4.- FALLA DOS FASES-TIERRA.- Tensiones de secuencia en la barra fallada, según la ecuación 3.41 son:

$$\begin{bmatrix} E_{P(F)}^0 \\ E_{P(F)}^1 \\ E_{P(F)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{pp}^0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{pp}^1 & 0 \\ 0 & 0 & z_{pp}^1 \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} 2z_F & -z_F & -z_F \\ -z_F & 2z_F + 3z_g & -z_F - 3z_g \\ -z_F & -z_F - 3z_g & 2z_F + 3z_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

en donde :

$$R = \sqrt{3} (z_F^2 + 2z_F z_g)$$

Realizando operaciones y simplificando nos queda:

$$\begin{bmatrix} E_{p(F)}^0 \\ E_{p(F)}^1 \\ E_{p(F)}^2 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} Z_{pp}^0 (Z_{pp}^1 + z_F) \\ Z_{pp}^0 (Z_{pp}^1 + 2z_F) + Z_{pp}^1 (2z_F + 3z_g) + 3(z_F + 2z_F z_g) \\ Z_{pp}^1 (Z_{pp}^0 + z_F + 3z_g) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

en donde:

$$D = \sqrt{3} / ((Z_{pp}^1)^2 + 2 Z_{pp}^1 (2z_F + 3z_g + Z_{pp}^0) + 2z_F Z_{pp}^0 + 1/R)$$

Encontramos las corrientes en la barra fallada:

$$\begin{bmatrix} I_{p(F)}^0 \\ I_{p(F)}^1 \\ I_{p(F)}^2 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} -z_F - Z_{pp}^1 \\ 2z_F + 3z_g + Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 \\ -z_F - 3z_g - Z_{pp}^0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Tensiones en otras barras que no sean la barra fallada se calcula como en los casos anteriores.

Los flujos de corrientes de secuencias, en cualquier elemento del sistema se calcula a base de la ecuación 3.45.

C A P I T U L O IV

DESCRIPCION DE UN PROGRAMA EN FORTRAN PARA EL ESTUDIO DE CORTO-CIRCUITOS.-

4.1.- INTRODUCCION.- En éste capítulo se hará la descripción de un programa en lenguaje FORTRAN IV para computadora. Este programa fué desarrollado junto con éste trabajo.

El método empleado para el cálculo de CCC, es a base de las matrices impedancias de barras de secuencias, según lo explicado en el capítulo anterior.

El programa ha sido probado en la computadora existente en la "Escuela Politécnica Nacional", que es una IBM 370-125. Tal como se lo presenta en éste trabajo, puede analizar un SEP formado hasta por 20 barras y 30 elementos, no existiendo mayor dificultad en ampliar el tamaño de acuerdo a la capacidad de memoria disponible en la máquina. Se pueden calcular corrientes y tensiones de falla para cualquier barra y elemento de la red; puede analizar los siguientes tipos de cortocircuitos en barras:

- 1) Cortocircuito trifásico
- 2) Cortocircuito fase-tierra
- 3) Cortocircuito fase-fase
- 4) Cortocircuito dos fases-tierra

Las matrices impedancias de secuencia se forman simultáneamente, de manera que cada elemento del SEP deberán tener como datos las dos impedancias de secuencias (propias).

Se asumen las simplificaciones y suposiciones que normalmente se hacen en una red para el estudio de CCC, según lo in

dicado en el Capítulo II. La red debe reunir las siguientes condiciones para poder ser analizada por el programa:

a) Los gráficos de secuencia positiva y cero, deberán tener la misma configuración. Para el estudio de sistemas reales esto no es tan restrictivo como parece, porque se pueden poner valores altos de impedancias donde se requieran, obteniéndose resultados bastante correctos. Los datos de las impedancias están dados en por unidad, y poner una impedancia de valor 9999.99 afecta muy poco en los resultados correctos ⁽⁷⁾.

b) Los valores de impedancias, corrientes y tensiones están dados en por unidad.

c) La red puede tener cualquier número de elementos acoplados directa o indirectamente, siempre que formando "grupos" no excedan de tres los elementos de cada grupo.

d) No podrán existir elementos desconectados.

e) Ninguna de las impedancias propias de un elemento podrá ser cero. Cualquier impedancia de valor 0, podrá ser representado por un valor pequeño por ejemplo 0.00001 p.u. que no afecta a los resultados. ⁽⁷⁾

A lo largo del programa un gran número de errores pueden ser detectados, para asegurar la corrección de los resultados del problema. Cualquier detección de error, la computadora imprime un mensaje del tipo de error y cancela la ejecución. Son errores lo siguiente:

a) Una descripción incompleta del sistema, como impedancias propias iguales a cero o existencia de elementos desconectados de la barra de referencia.

b) Inconsistencia en los datos, por ejemplo: existencia de elementos acoplados con otros que no constan en la red.

c) Datos en exceso de : número de elementos, de barras o de elementos acoplados, mayor que el permitido.

d) No existencia de la matriz admitancia primitiva para un grupo de elementos acoplados.

e) Errores de códigos en las tarjetas de datos.

Las matrices de barras, impedancias de secuencias, se forman simulando la adición de un elemento al mismo tiempo. Debido a que éstas matrices son simétricas, las dos pueden ser localizadas en un sólo arreglo de dos dimensiones, para éste programa, en la parte superior la de secuencia positiva y en la inferior la de secuencia cero, como se indica en la igualdad 4.1.

Para el programa elaborado está presentado de ésta manera las matrices impedancias de barras, pero con la particularidad de que ese arreglo se le ha hecho de una sólo dimensión, colocando una fila a continuación de la otra, como se indica en la relación 4.2. La ventaja de tener un arreglo unidimensional es

$$[Z_B^s] = \begin{bmatrix} z_{11}^0 & z_{11}^1 & z_{12}^1 & z_{13}^1 & \dots & \dots & z_{1n}^1 \\ z_{21}^0 & z_{22}^0 & z_{22}^1 & z_{23}^1 & \dots & \dots & z_{2n}^1 \\ z_{31}^0 & z_{32}^0 & z_{33}^0 & z_{33}^1 & \dots & \dots & z_{3n}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1}^0 & z_{n2}^0 & z_{n3}^0 & z_{n4}^0 & \dots & z_{nn}^0 & z_{nn}^1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$[Z_B^s] = \begin{bmatrix} z_{11}^0 & z_{11}^1 & z_{12}^1 & z_{13}^1 & \dots & z_{1n}^1 & z_{21}^0 & z_{22}^0 & z_{22}^1 \\ z_{23}^1 & \dots & z_{2n}^1 & z_{31}^0 & z_{32}^0 & \dots & \dots & z_{nn}^0 & z_{nn}^1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

que la máquina puede ahorrar gran cantidad de memoria y trabaja más rápidamente que con arreglos de dos o tres dimensiones⁽¹⁹⁾.

Los elementos de la red son clasificados por la computadora en ramas y enlaces, con la condición de que las matrices impedancias primitivas formen matrices "block diagonal", de és

ta manera se facilita la obtención de la matriz admitancia primitiva de los elementos acoplados de secuencia cero, en el peor de los casos tenemos que invertir matrices simétricas de tercer orden.

Para la obtención de la matriz admitancia primitiva de un grupo de elementos acoplados, la computadora forma la matriz impedancia primitiva en un arreglo de cuatro por cuatro, identificado en el programa como ADM o ADMIT, de la siguiente manera:

$$[ADMIT] = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & z_{pq,uv} & z_{pq,rs} & q \\ z_{uv,pq} & z_{uv,uv} & z_{uv,rs} & v \\ z_{rs,pq} & z_{rs,uv} & z_{rs,rs} & s \\ p & u & r & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

hacia barras de elementos acoplados
 de 0

Esto se hace para cada grupo de acoplamiento, uno al mismo tiempo; de ésta manera las matrices primitivas primitivas no son necesarias guardar en la memoria de la computadora en forma de matrices.

Todos los artificios que se han hecho es con el fin de ocupar lo menos posible de memoria del computador.

A continuación se hará una lista de las principales variables que se emplean en el programa.

- ADMIT, ADM arreglo de 4 x 4, se utiliza para la inversión de la matriz impedancia primitiva y para el almacenamiento de la matriz admitancia, para un sólo grupo de elementos acoplados a la vez.
- CBUSF(£) arreglo de 1 x 9 , guarda información de corrientes de secuencia y de fase de la barra fallada.
- CEIJ similar a (£), pero se emplea en el cálculo de flujo de corrientes en un elemento.

DATOS, DAT	arreglo de 30 x 13, donde se guarda información de los elementos componentes del SEP.
HERTZ	arreglo de 1 x 7, contiene datos de un elemento donde se pide encontrar flujos de corrientes de falla.
HFALL	arreglo de 1 x 10, contiene información de la barra donde se produce una falla.
LINK	si el elemento que se añade a la red es rama vale 1, si es enlace vale 0.
MALK	si es diferente de cero, indica que existe algún tipo de error.
NE y NB	número de elementos y barras existentes en el sistema, respectivamente.
NBUSF, NBF	identificación de la barra donde se produce falla.
NP y NQ	variables para la identificación de las barras p y q.
NRO y NSI	variables para la identificación de las barras r y s.
NREF	variable para identificar la barra de referencia.
NUMER	clave para imprimir resultados.
PYZB	variable que representa el efecto del acoplamiento en la formación de la matriz impedancia de barras en secuencia cero.
TBUSF	similar a (ϵ), pero para tensiones en la barra fallada.
TBUSI	similar a (ϵ), para tensiones en la barra i.
TBUSJ	similar a (ϵ), para tensiones en la barra j.
ZBUS	arreglo de 1 x 462, son las matrices impedancias de barras.
ZFALL	representa la impedancia de falla. (z_F)
ZTIER	representa la impedancia de tierra (z_g)
ZPC	representa el valor: $z_{pq,pq}^0$
ZPP	representa el valor: $z_{pq,pq}^1$

4.2.- DESCRIPCION DEL PROGRAMA PRINCIPAL.- El programa principal está formado por cuatro partes bien diferenciadas:

- a) lectura de datos del SEP y clasificación de los elementos en ramas y enlaces.
- b) formación simultánea de las matrices impedancias de barras de secuencias positiva y cero.
- c) cálculo de fallas.
- d) escritura de resultados.

La mayor parte del programa principal está dedicado a la formación de las matrices impedancias de barras, el resto de cálculos se hacen a base de subrutinas.

4.3.- DESCRIPCION DE LAS SUBRUTINAS.- Se hará una breve descripción y su objetivo de cada una de las subrutinas, siguiendo el orden en que podrían ser solicitadas.

4.3.1.- SUBRUTINA ENTRA.- Esta subrutina lee datos de entrada que sirven para inicializar valores de variables del programa. Además lee la identificación del nodo de referencia y datos de los elementos que forman la red, imprimiendo éstos últimos con el mismo formato de lectura.

4.3.2.- SUBRUTINA CLASI.- Los elementos de la red son clasificados en ramas y enlaces, pero con la condición de que la matriz impedancia primitiva sea block diagonal. A las barras del sistema se les asigna nueva numeración, que es con la que la máquina trabajará; la barra de referencia tiene como número nuevo de identificación el 0. La clasificación se hace con la particularidad de que $p < q$ siempre. Las ramas del sistema son identificados por unos y los enlaces por ceros.

4.3.3.- SUBROUTINA BETAX.- El programa principal ha comenzado a formar la matriz impedancia de barras. Esta subrutina es llamada si el elemento que se está añadiendo a la red está acoplado. Del arreglo DATOS toma las impedancias mútuas y los coloca en ADMIT, formando la matriz impedancia primitiva para ese grupo de acoplamiento.

4.3.4.- SUBROUTINA RECIP.- Esta subrutina invierte la matriz impedancia primitiva del grupo de acoplamiento, para de ésta manera obtener la matriz admitancia.

4.3.5.- SUBROUTINA COLOC.- Esta subrutina reemplaza las admitancias obtenidas anteriormente, por las impedancias propias y mútuas en DATOS, para un "grupo completo" de acoplamiento.

4.3.6.- SUBROUTINA IDENT.- Identifica la situación de cualquiera de los elementos Z_{ij}^0 y Z_{ij}^1 en el arreglo ZBUS(462).

4.3.7.- SUBROUTINA DELTX.- Esta subrutina calcula el efecto del acoplamiento en la formación de la matriz impedancia de barras de secuencia cero. O sea:

$$\bar{y}_{pq,rs}^0 (\bar{z}_{ri}^0 - \bar{z}_{si}^0) / \bar{y}_{pq,pq}^0$$

4.3.8.- SUBROUTINA SUPRE.- Cuando el elemento que se añade a la red es enlace, se añade en el sistema la barra ficticia L que tiene que eliminarse. Esta subrutina elimina ésta barra ficticia.

Las subrutinas descritas hasta éste punto, son las que se necesitan para formar las matrices impedancias de barras.

Para cualquier elemento que se añada a la red:

- a) si es enlace y está acoplado desde la subrutina BETAX hasta SUPRE son llamadas por el programa principal.
- b) si es rama y está acoplada son llamadas todas las subrutinas del caso anterior a excepción de SUPRE.
- c) si es enlace y no está acoplado, sólo las subrutinas IDENT y SUPRE son llamadas por el programa principal.
- d) si es rama y no está acoplada, se necesita únicamente la subrutina IDENT.

4.3.9.- SUBROUTINA BUSFA.- Es llamada por el programa principal, lee tarjetas de datos de la barra fallada e impedancias de falla y de tierra; además localiza la posición de las impedancias del punto motriz en ZBUS(462) para la barra fallada.

4.3.10.- SUBROUTINAS SF1FT, SF3FT, SF2FT, SFFA .- Todas éstas subrutinas tiene la misma secuencia de operación, de tal manera que lo que se diga servirá para cualquiera de ellas. Son subrutinas para calcular corrientes y tensiones de falla, cuando se producen las fallas: fase-tierra, trifásica, dos fases-tierra y fase-fase, respectivamente.

La máquina imprime el tipo de falla y donde se produce; además imprime los valores de z_F , z_g , Z_{pp}^0 , Z_{pp}^1 . Calcula corriente y tensiones de secuencia en la falla y puede o no llamar dos veces a la subrutina TRANS y calcular corrientes y tensiones en componentes de fase en la falla. Luego llama a la subrutina HALLA y calcula flujos de corrientes y tensiones en las barras de elemento. Si el elemento donde está calculando flujos está acoplado llama a la subrutina FORMA y obtiene la matriz admitancia primitiva de éste grupo de acoplamiento, y luego calcula flujos de secuencia cero para ese elemento. Después puede o no calcular, según se lo haya pedido, lo anteriormente mencionado pero en componentes de

fase. Regresa al punto donde la subrutina HALLA fué llamada, y hace lo mismo pero con otro elemento del sistema.

4.3.11.- SUBROUTINA HALLA.- Esta subrutina localiza el elemento donde se desea calcular flujos de falla en el arreglo DAT. En el caso especial en que un elemento en especial desea ser analizado, lee datos de éste (HERTZ) y determina su existencia y ubicación en DAT.

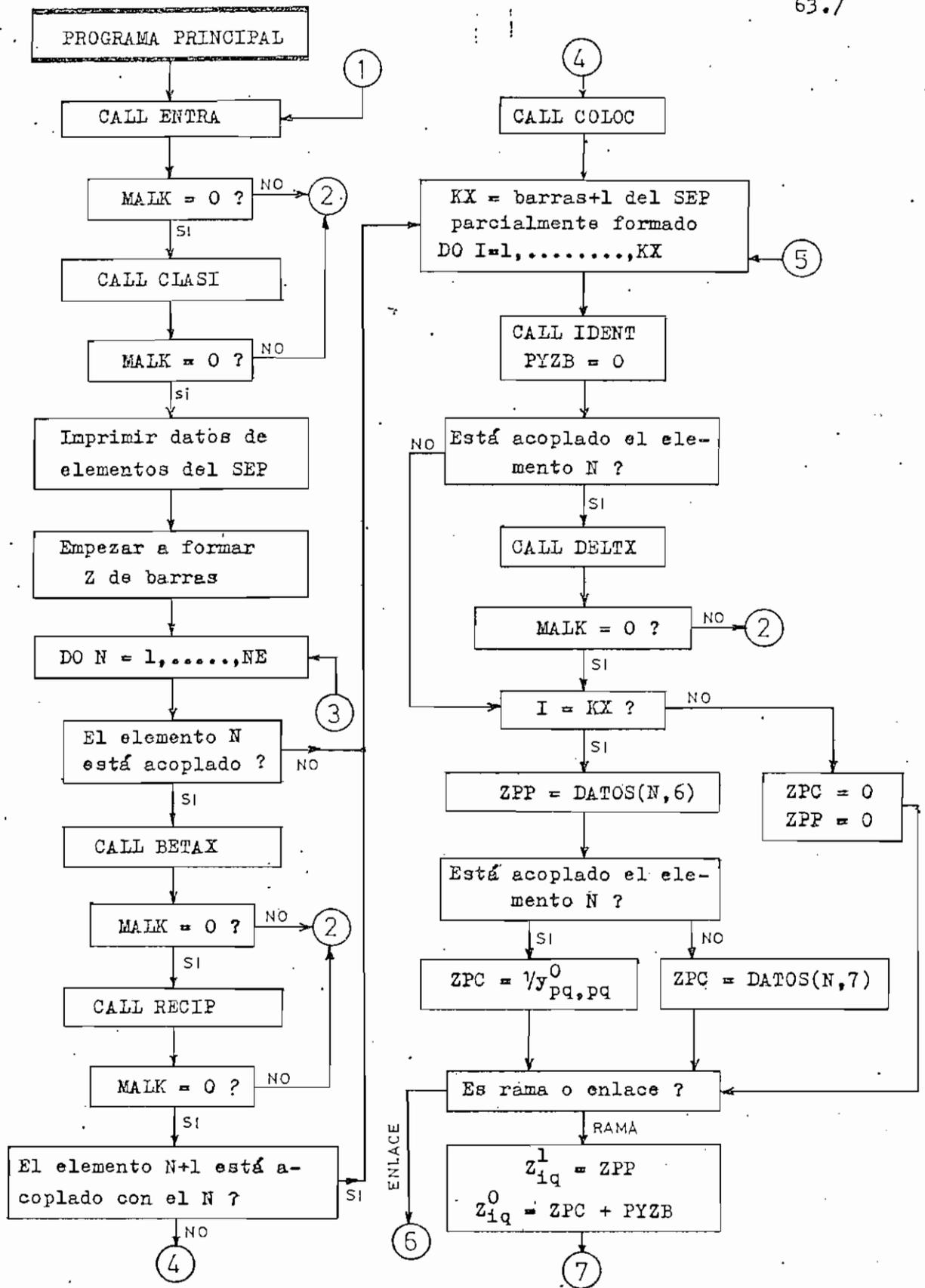
4.3.12.- SUBROUTINA TRANS.- Calcula componentes de fase a partir de las de secuencia, según la relación 1.34.

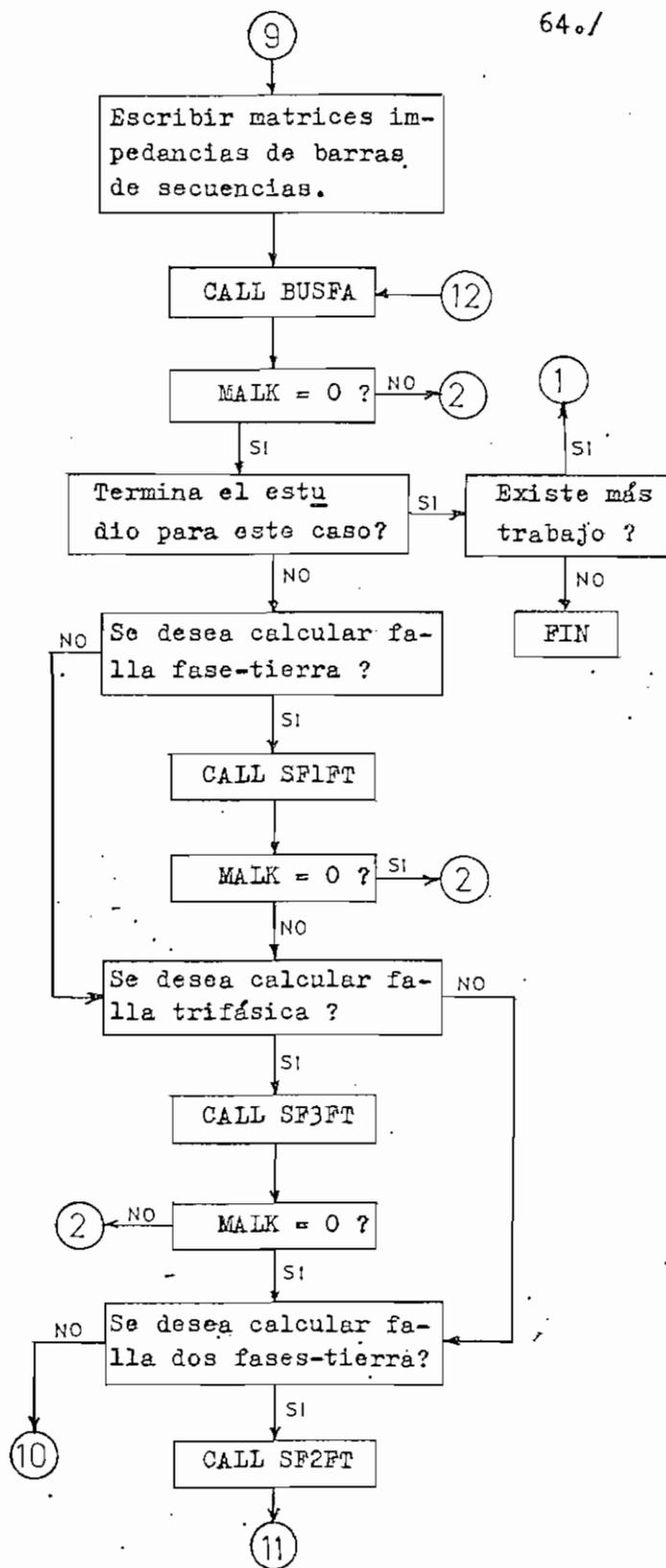
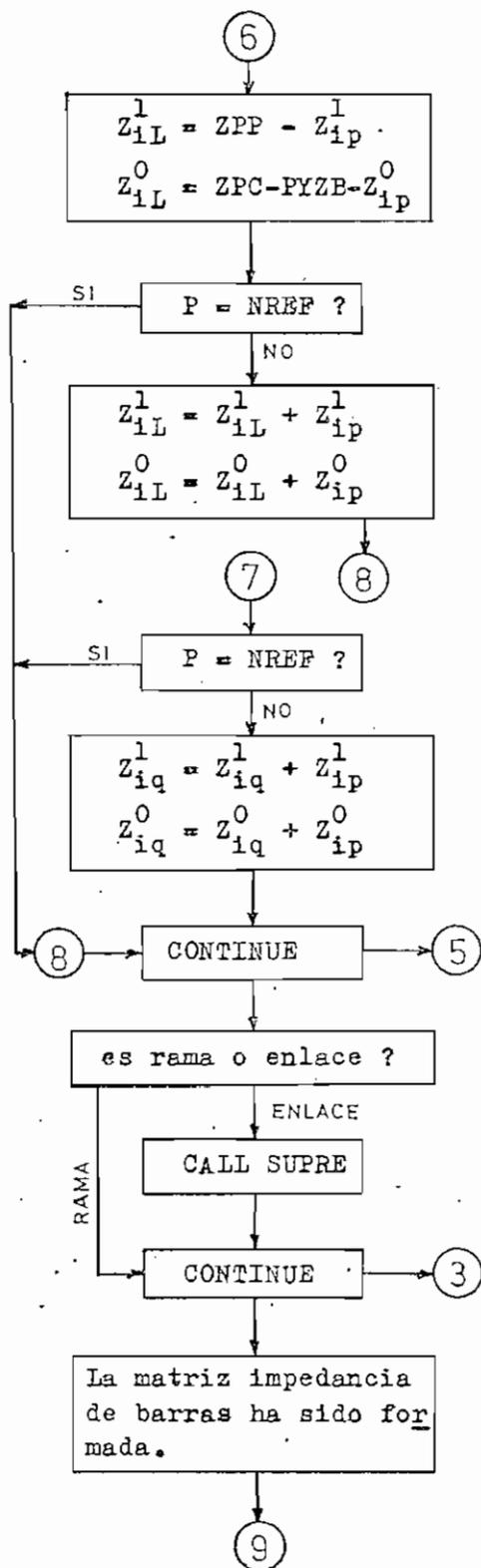
4.3.13.- SUBROUTINA FORMA.- Esta subrutina forma la matriz admittancia primitiva para un grupo de acoplamiento; ésta matriz se forma en el arreglo ADM con datos obtenidos de DAT.

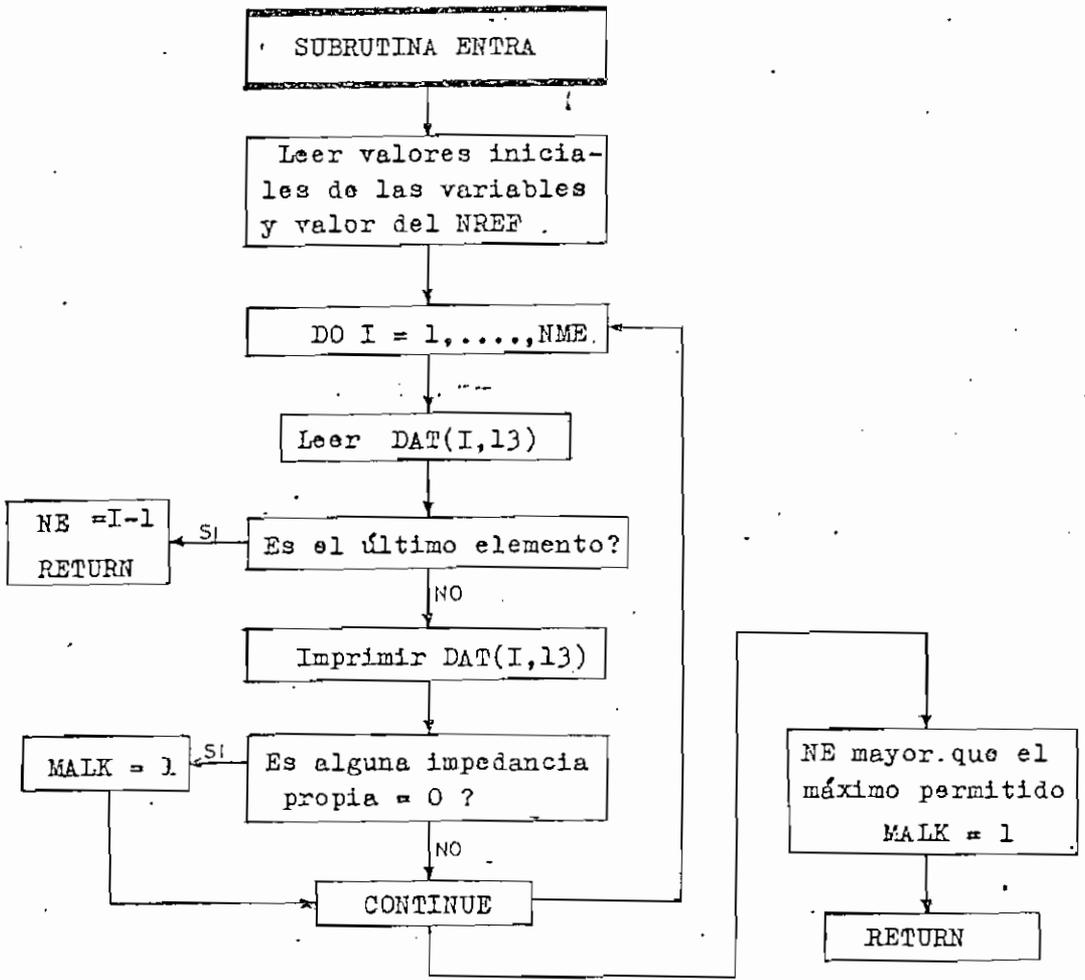
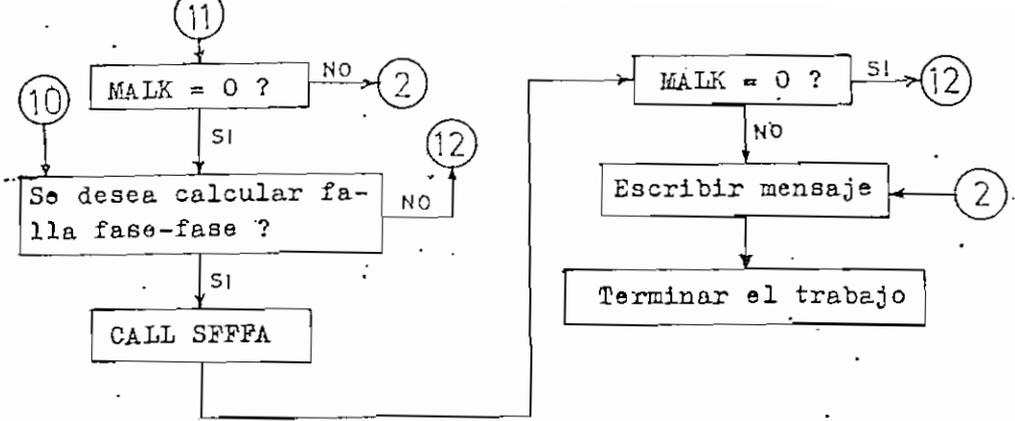
4.3.14.- SUBROUTINA ACSC.- Calcula aportes de corrientes de secuencia cero en un elemento acoplado, según la ecuación 3.45.

4.3.15.- SUBROUTINA SALID.- Esta subrutina es llamada cada vez que se desean imprimir resultados de los cálculos.

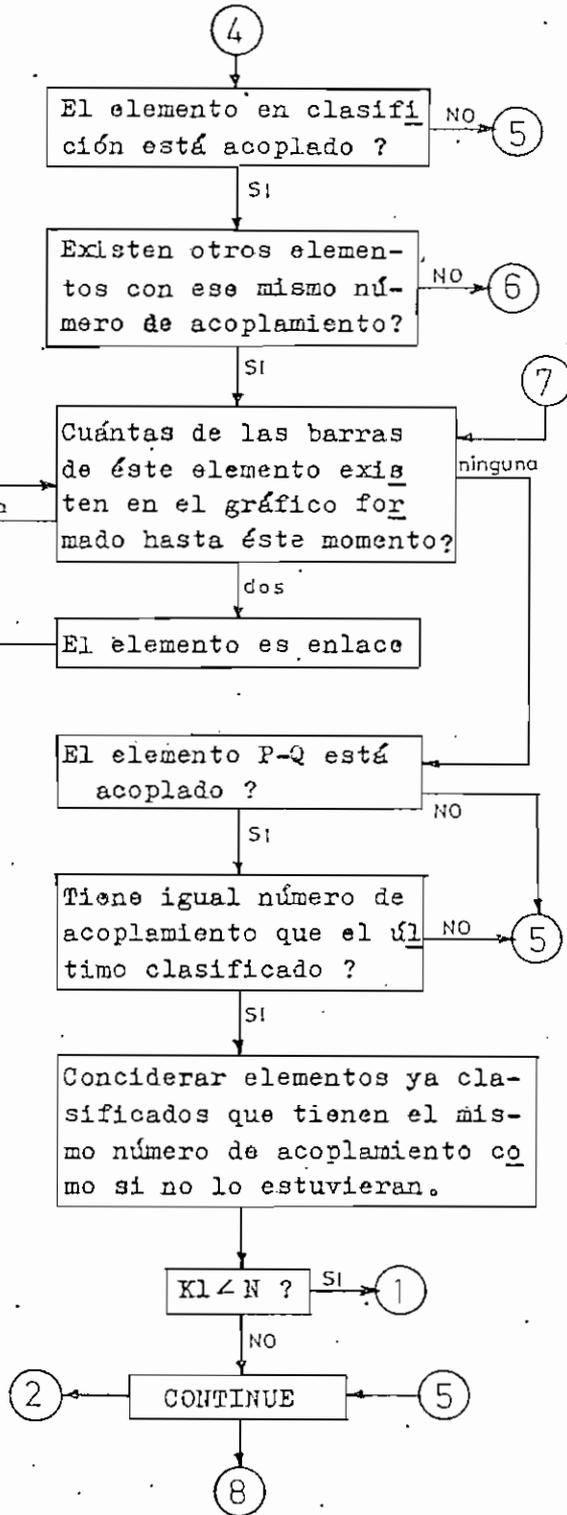
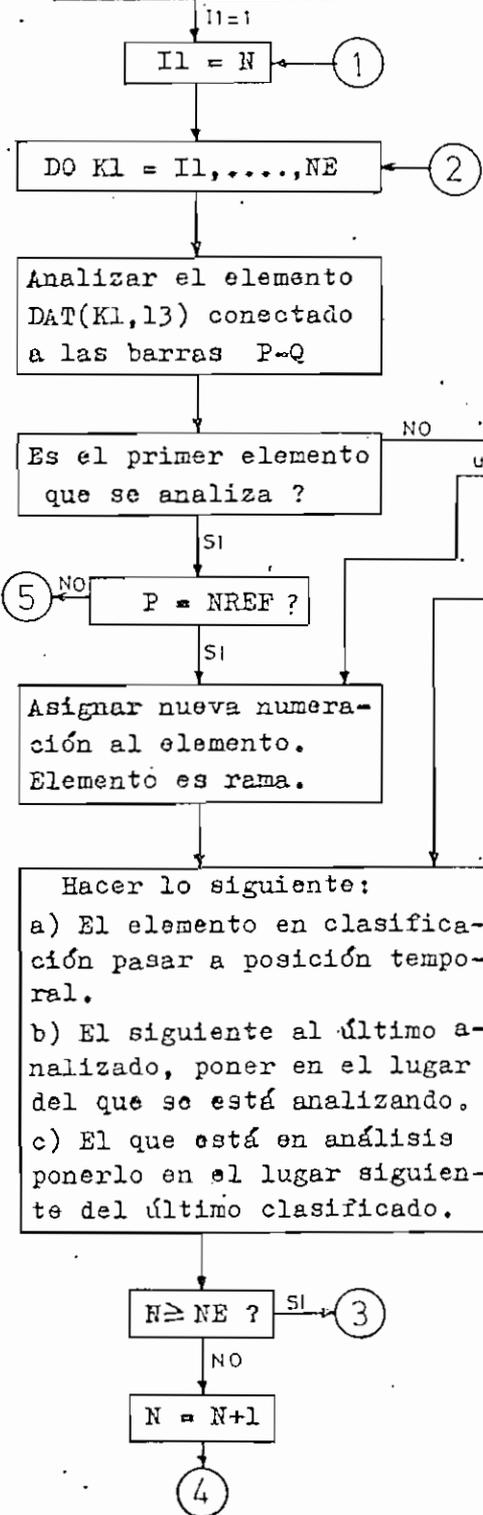
4.4.- DIAGRAMA DE BLOQUES.- Los diagramas de bloques del programa principal así como los de las subrutinas más importantes, se indicarán a continuación. Para las subrutinas de fallas se indicará un sólo diagrama que podrá servir para cualquiera de ellas.

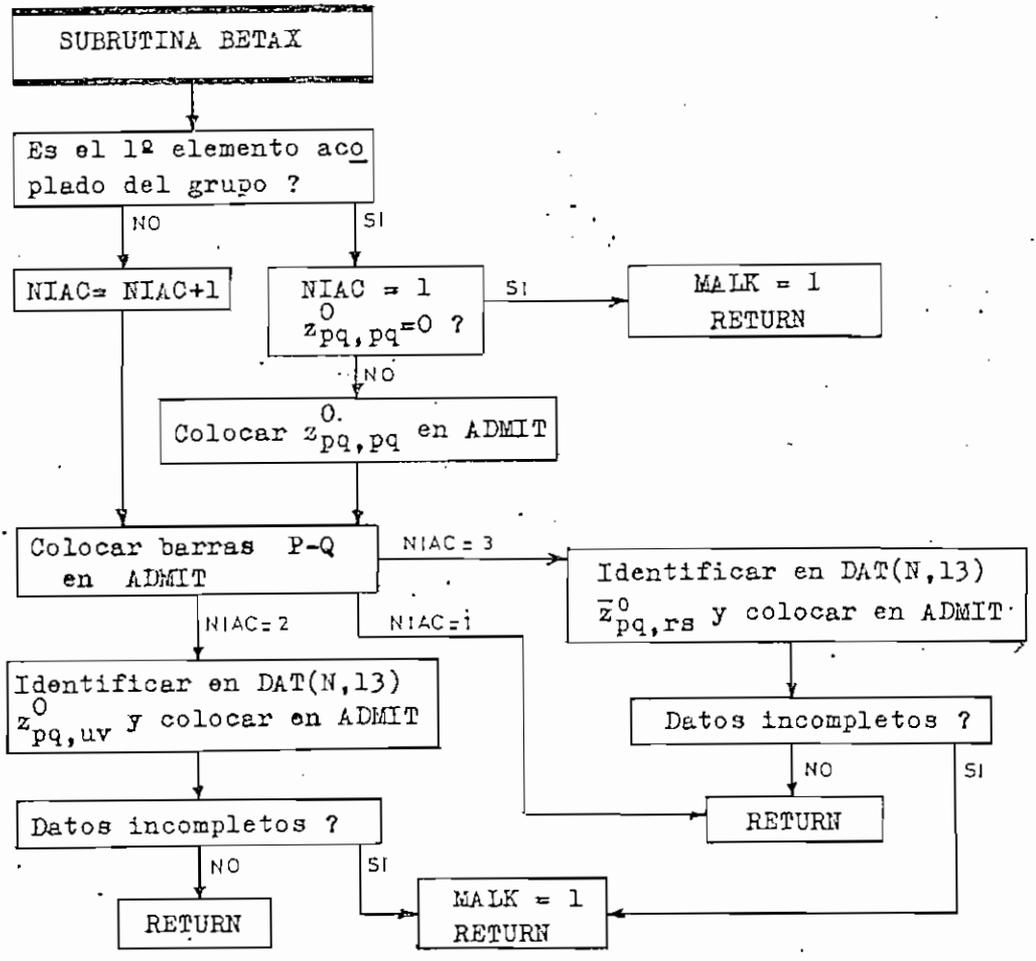
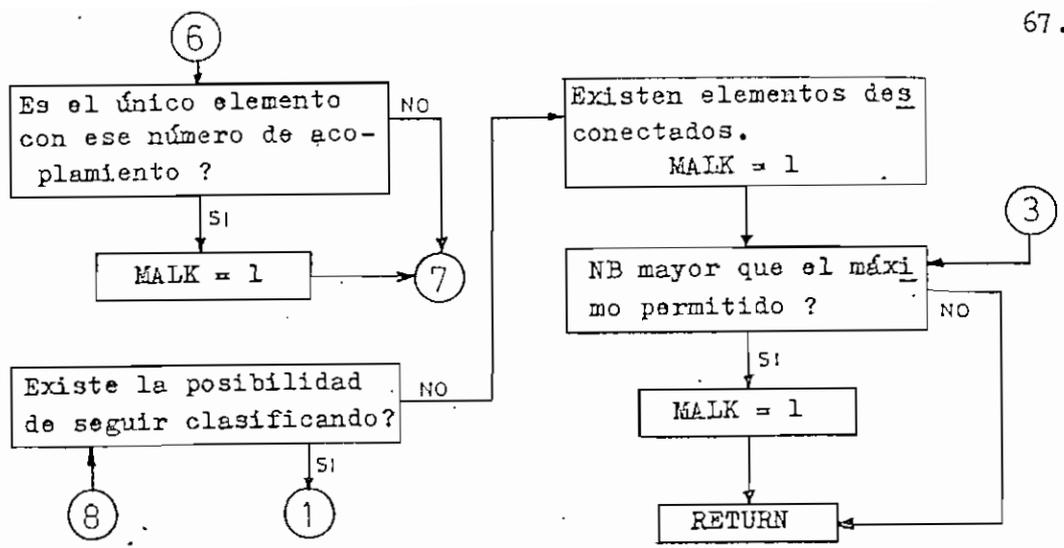


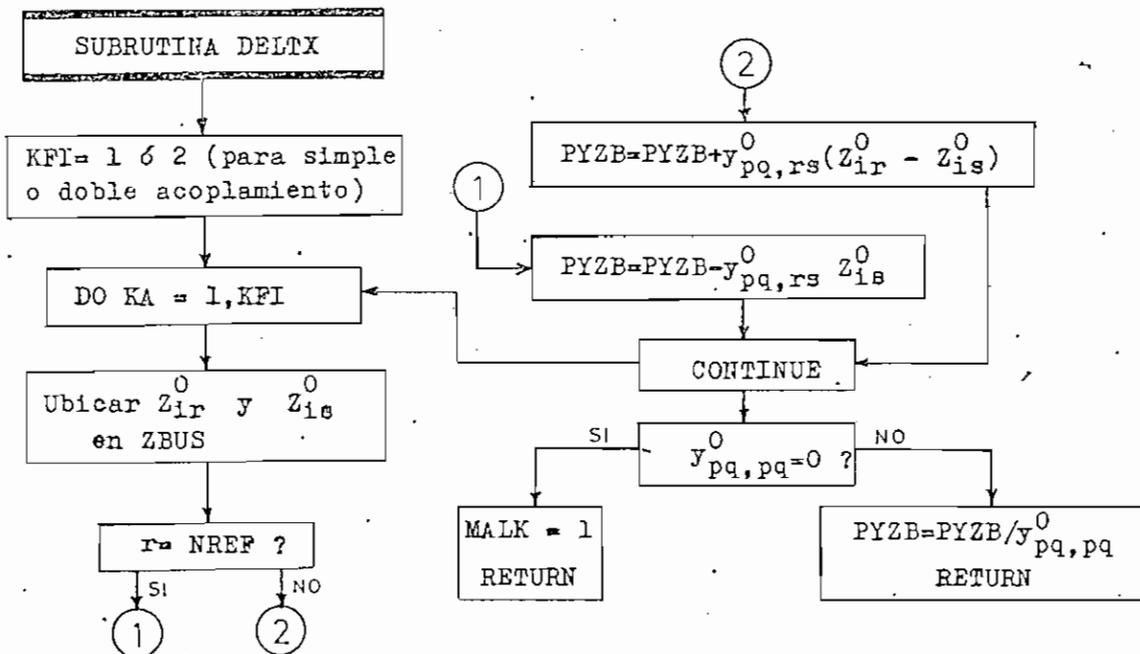
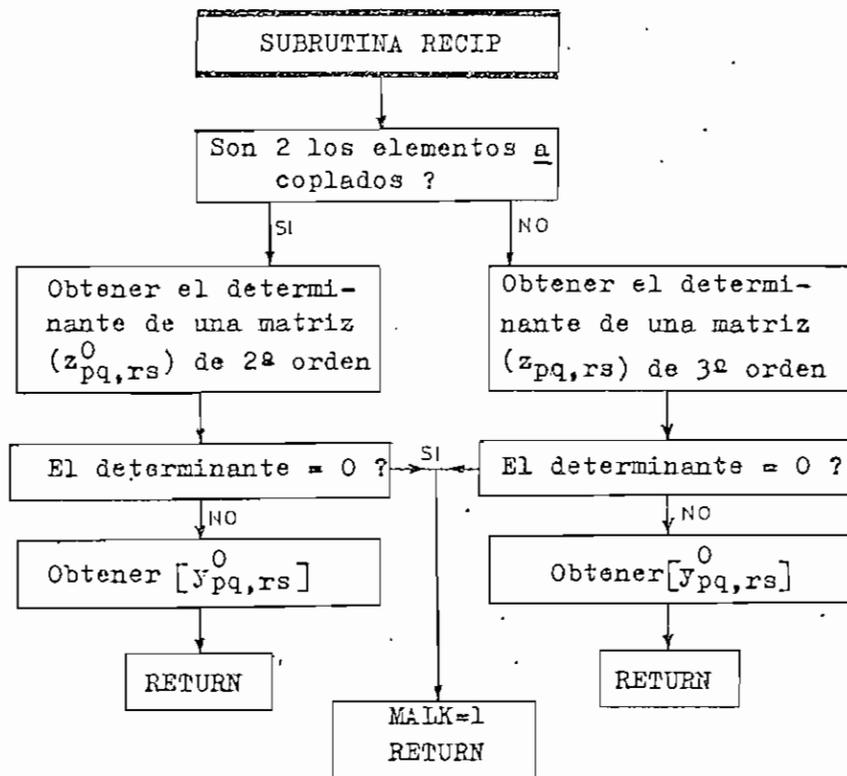


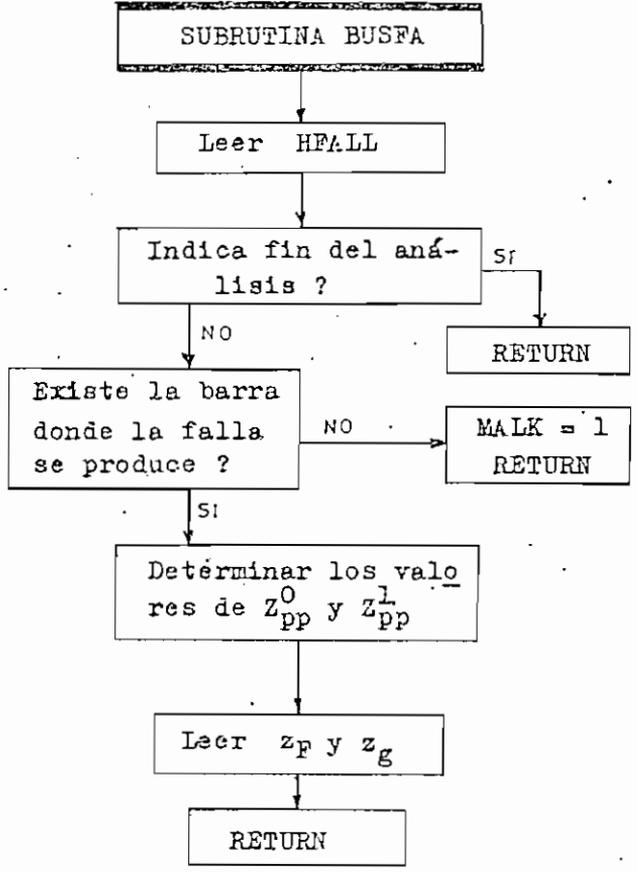
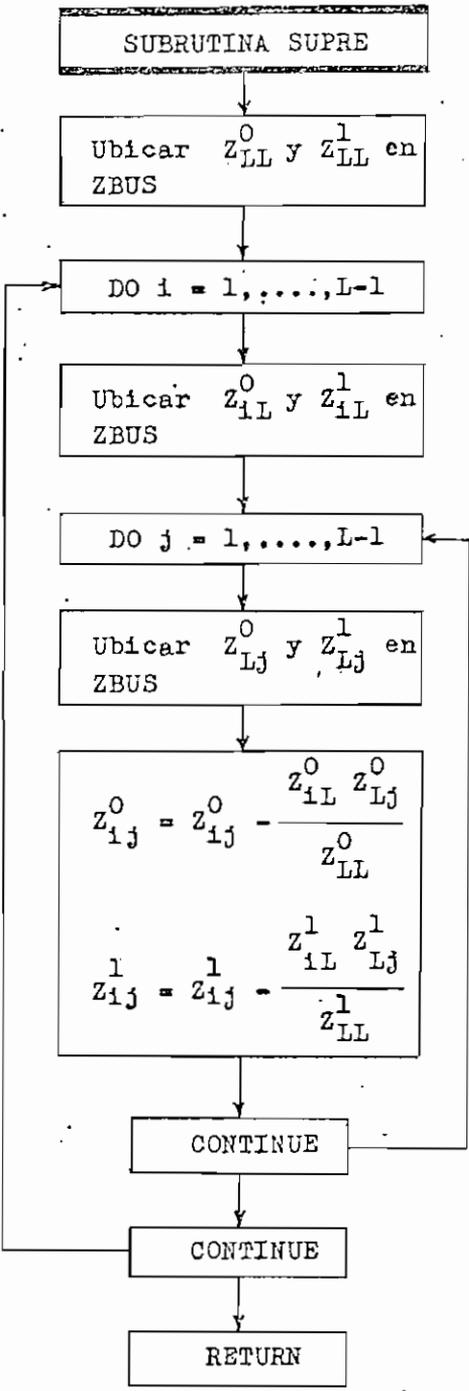


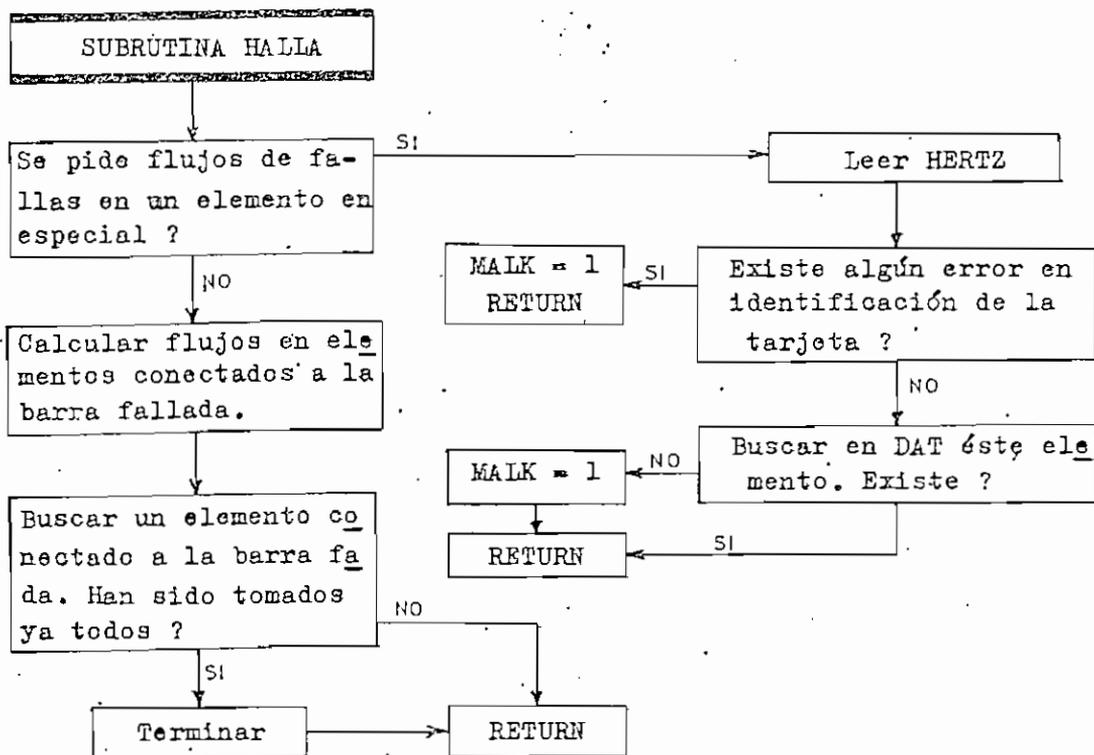
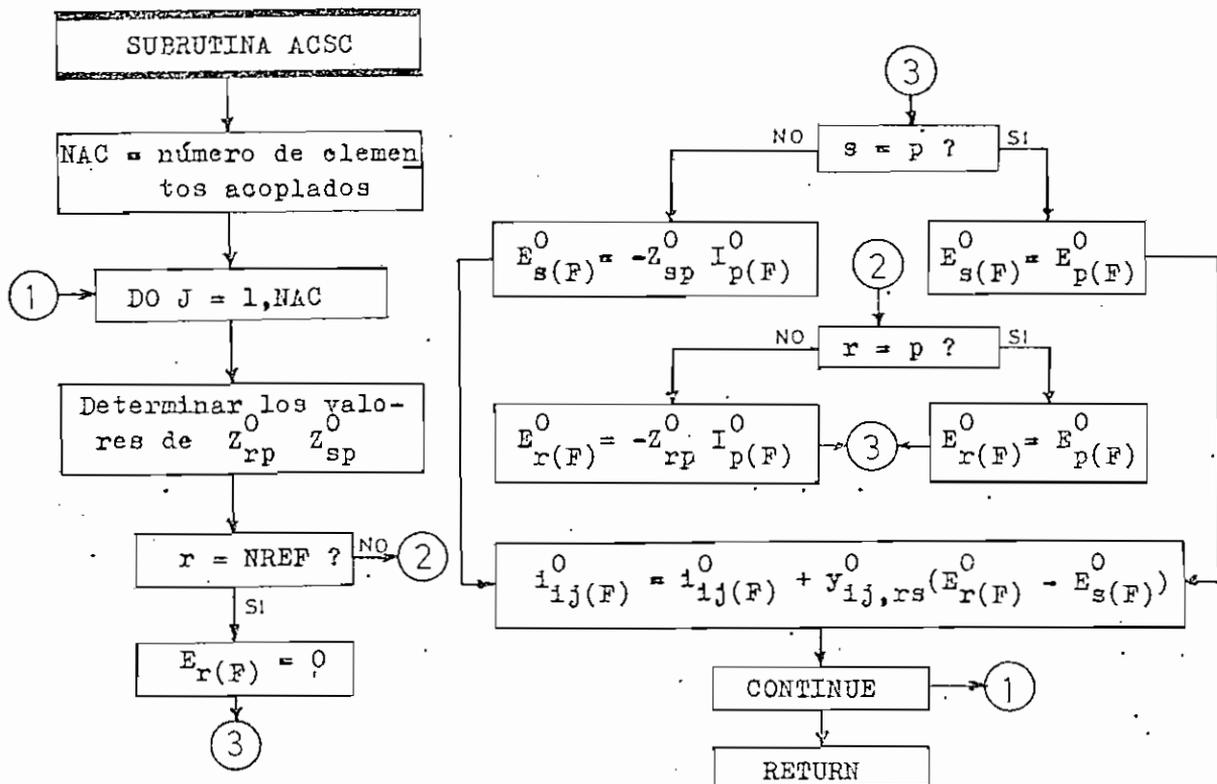
SUBROUTINA CLASI

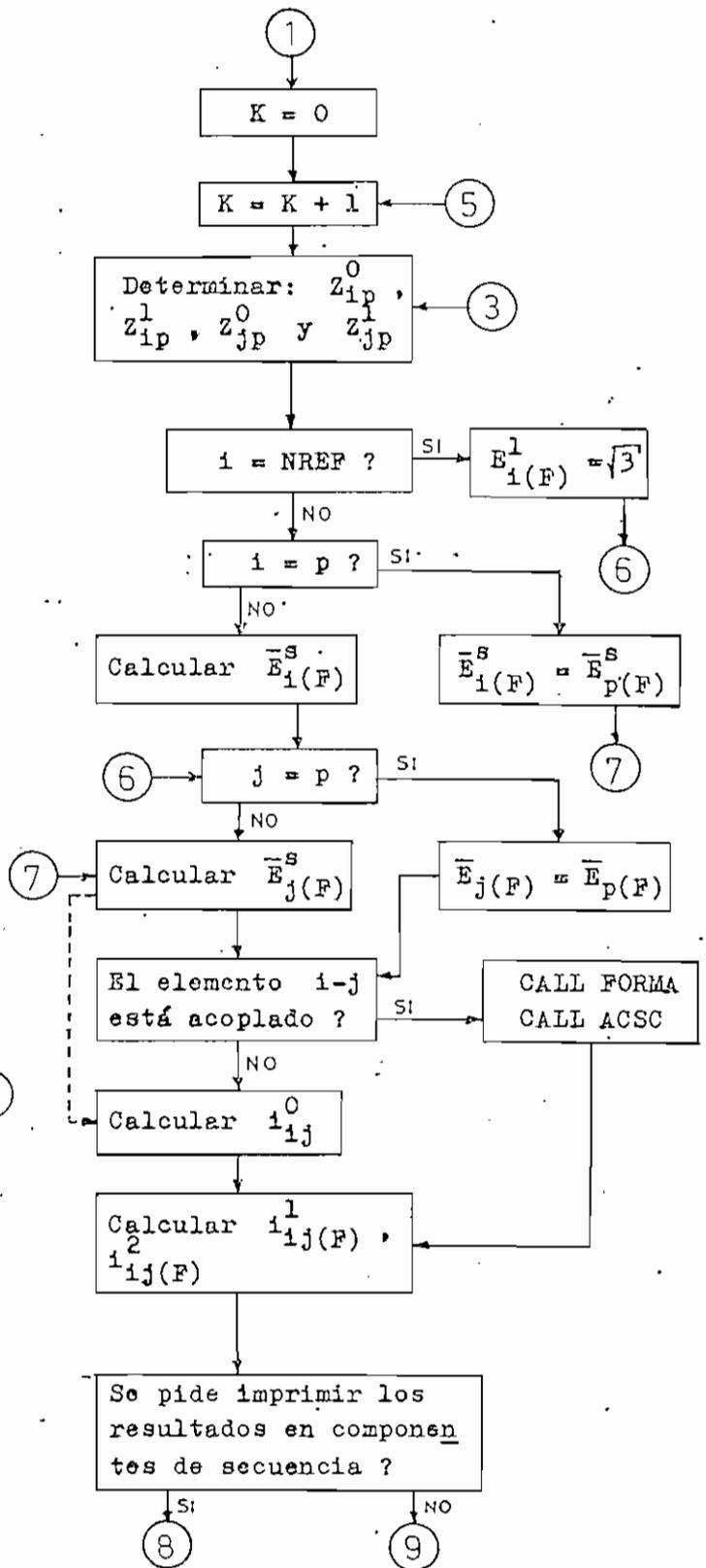
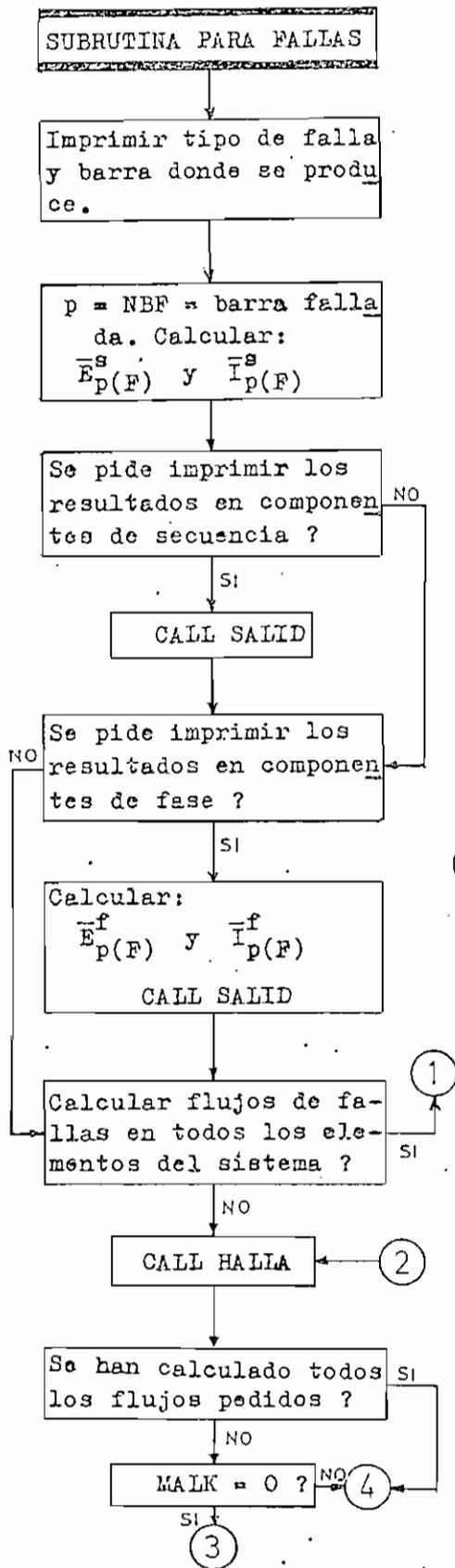


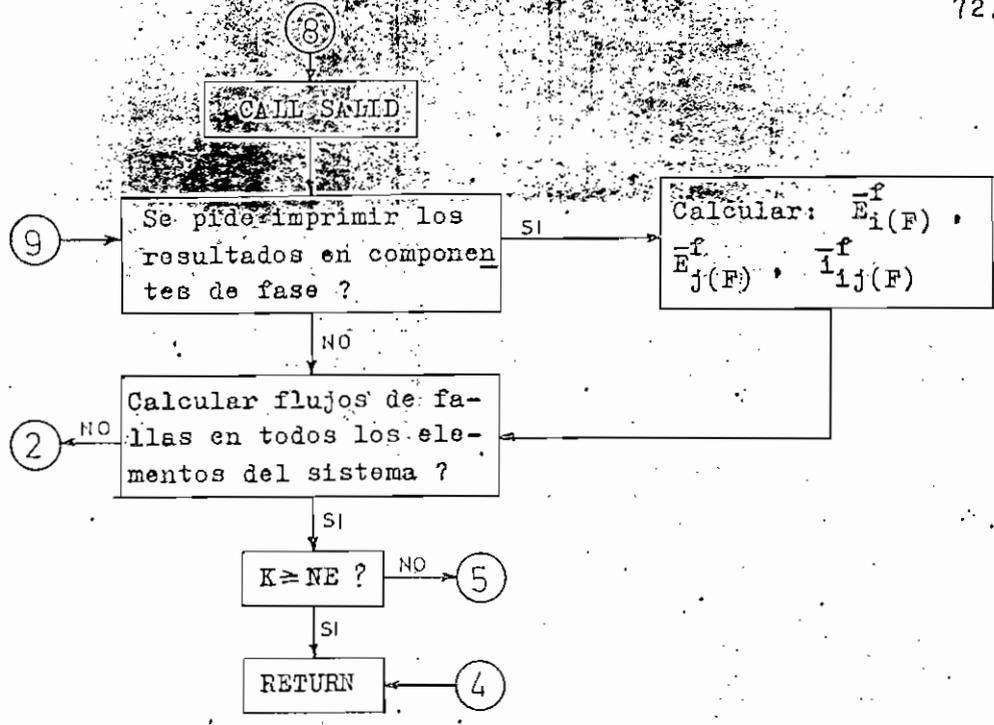












4.5.- ENTRADA DE DATOS.- Tenemos tres tipos de tarjetas de datos:

- a) tarjetas de datos de los elementos de la red.
- b) tarjeta de datos de las barras falladas
- c) tarjetas de datos de elementos donde se desea encontrar flujo de corrientes y tensiones de barras.

Cada uno de éstos tres tipos de tarjetas serán descri-
tas indicándose la información que contienen.

a) Tarjetas de datos de los elementos de la red.- Se necesi-
ta una tarjeta por elemento y cada una puede contener hasta 10
datos de entrada.

Los datos básicos de cada elemento son: barras a las
que está conectado, impedancias propias y mutuas y la identifica-
ción de los elementos con los que está acoplado.

Las barras p-q a las que está conectado el elemento
son identificadas por número enteros positivos comprendidos entre
0 y 998 inclusive; cualquier elemento conectado a la barra de re-
ferencia, la barra p siempre deberá ser ésta. Para cualquier
otro elemento la barra p o q podrá ser cualquiera de las dos.

Para explicar de una manera más comprensible la forma
en que los datos tienen que ser dados, tomemos un ejemplo de tres
elementos que forman un grupo de acoplamiento (figura 4.1).

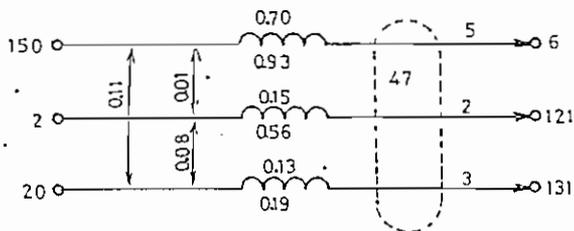


Fig. 4.1.- Elementos formando un grupo de acoplamiento

Las impedancias propias de secuencias positiva y cero se indican encima y adabajo de cada elemento, respectivamente. Las tarjetas de datos para éstos elementos se indican en la figura 4.2, y han sido formados de la siguiente manera:

BARRAS		IMPEDANCIAS SECUENCIAS				NUMEROS REFEREN.			NUM.
P	q	$z_{pq,pq}^1$	$z_{pq,pq}^0$	$z_{pq,uv}^0$	$z_{pq,rs}^0$	Prop.	Mut.1	Mut.2	Acop.
150	6	0.70	0.93	0.01	0.11	5	2	3	47
2	121	0.15	0.56	0.01	0.08	2	5	3	47
20	131	0.13	0.19	0.11	0.08	3	5	2	47

Fig. 4.2.- Datos necesarios para los elementos de la figura 4.1

Las dos primeras columnas indican las barras a las que el elemento se encuentra conectado. Las dos siguientes son las impedancias propias de secuencias positiva y cero. Todo el grupo de acoplamiento es identificado por un sólo número común para los tres elementos que se indica en la décima columna (47). Cada elemento del grupo tiene a su vez una identificación. En las columnas 7°, 8° y 9° van unos números que los llamo de referencia y se utilizan de la siguiente manera: el primer número de referencia "propio" va la identificación del elemento dentro del grupo. El segundo número de referencia: "mútua 1", indica que el elemento que tiene ese número, como número de referencia propio se encuentra acoplado con éste elemento y el valor de acoplamiento corresponde al dado en $z_{pq,uv}^0$. El tercer número de referencia "mútua 2", indica algo similar al anterior, el valor de acoplamiento viene dado por $z_{pq,rs}^0$.

Si los elementos no tienen acoplamiento, solamente se deberán ocupar las cuatro primeras columnas; en líneas paralelas para su diferenciación se puede ocupar la 7° columna.

Para indicar que los datos de los elementos han llega-

do a su fin , una tarjeta conteniendo un 999 en la primera columna deberá colocarse al final de éstas.

El orden de colocación de las tarjetas de datos de los elementos no importa.

b) Tarjetas de datos de barras falladas.- Se necesita una tarjeta por barra fallada, en donde se puede indicar el o los tipos de fallas que se producen en esa barra. Cada tarjeta puede contener hasta 9 datos, y son los siguientes: El primero será si empre un 3 que sirve como identificación del tipo de tarjeta. El segundo dato será el número de identificación de la barra fallada. El tercer dato puede ser lo siguiente: 1, 2 o 3 ; si se imprime 1 calcula flujo de corrientes en todos los elementos de la red; si se perfora un 2 calcula flujo de corrientes en elementos conectados a la barra fallada; y si se perfora un 3 calcula flujo de corrientes en elementos de especial interés y que deberán indicarse a continuación (tarjeta tipo " c "). Los datos cuarto, quinto, sexto y séptimo serán números cualesquiera diferentes de cero si se desea que en esa barra se produzca los siguientes tipos de fallas: fase-tierra, trifásica, dos fases-tierra y fase-fase. Los datos octavo y noveno irán en blanco si se desea que los resultados sean dados tanto en componentes de fase y secuencia respectivamente.

Como ejemplo tomemos el dado en la figura 4.3.

TIPO DE TARJETA	BARRA FALLA.	FLUJOS	TIPOS DE FALLAS			COMPONENTES	
			1Ø-T 3Ø	2Ø-T	1Ø-1Ø	FASE	SECU.
3	121	2	1	1	1		

Fig. 4.3.- Ejemplo de datos para una barra donde se producen fallas.

La tarjeta de la figura 4.3, indica lo siguiente: se produce fallas en la barra 121, se desea conocer flujo de corrientes en elementos que estén conectados a esa barra; los tipos de fallas que se producen en esa barra son: fase-tierra, trifásica y dos fases-tierra; los resultados de corrientes y tensiones se desea tanto en componentes de fase como de secuencia.

Cuando no existen más barras donde se producen fallas, una tarjeta conteniendo un 333 en la primera columna deberá colocarse. Esto indica que el estudio de CCC para éste sistema ha terminado.

c) Tarjetas de datos para calcular flujos de fallas.- Este tipo de tarjetas, se utilizan cuando en las tarjetas tipo "b" va perforado un 3 en la tercera columna.

Se necesita una tarjeta por elemento, cada una contiene cinco datos, que son: El primero será siempre un 2 que sirve como identificación del tipo de tarjeta. Los dos datos siguientes son las barras a las que el elemento está conectado. Los datos cuarto y quinto son el número de acoplamiento y el número de referencia propio del elemento. La finalización de éste tipo de tarjetas se indica con una tarjeta conteniendo un 222 como primer dato.

Existen otros tipos de tarjetas, fuera de éstas tres que son las principales. Así tenemos:

d) Dos tarjetas conteniendo datos que inicializan los valores de algunas variables del programa la primera de ellas; y la otra indica cual es el nodo de referencia del sistema.

e) Una tarjeta conteniendo un 2 se colocará luego de la tarjeta que indica finalización de datos de los elementos de la red, en éste caso las matrices impedancias de barras serán impresas.

Si ésto no es necesario irá una tarjeta en blanco.

f) Luego de cada tarjeta de datos de barra fallada (tipo b), irá una tarjeta conteniendo valores de z_F y z_g .

g) Una tarjeta conteniendo un número 777 irá al último de todas las tarjetas e indica finalización del trabajo.

Estas son todas las tarjetas que utiliza el programa, y la secuencia de lectura, se puede ver en la figura 4.4.

La utilización de éstos tipos de tarjetas, se puede ver en el ejemplo incluido en éste trabajo.

4.6.- SALIDA DE DATOS.- La computadora imprime, o en otros casos según se le pida o no, puede imprimir los siguientes resultados:

a) Imprime datos de los elementos del SEP con el mismo formato de lectura.

b) Una vez clasificados y ordenados los elementos del SEP, los datos son impresos en forma legible y clara.

c) Es opcional la impresión de las matrices impedancias de barras de secuencias.

d) Cuando se produce una falla imprime: el tipo de falla, la barra fallada, los valores de z_F , z_g , Z_{pp}^0 , Z_{pp}^1 .

e) Imprime corriente y tensiones en la barra fallada en componentes de secuencia (opcional) y en componentes de fase para las tres fases (opcional).

f) Cuando calcula flujos de corrientes imprime: barras del elemento donde se calcula el flujo, número de acoplamiento y número de referencia propio del elemento.

g) Imprime corrientes y tensiones de barras en el elemento en componentes de secuencia (opcional) y en componentes de fases, para las tres fases (opcional).

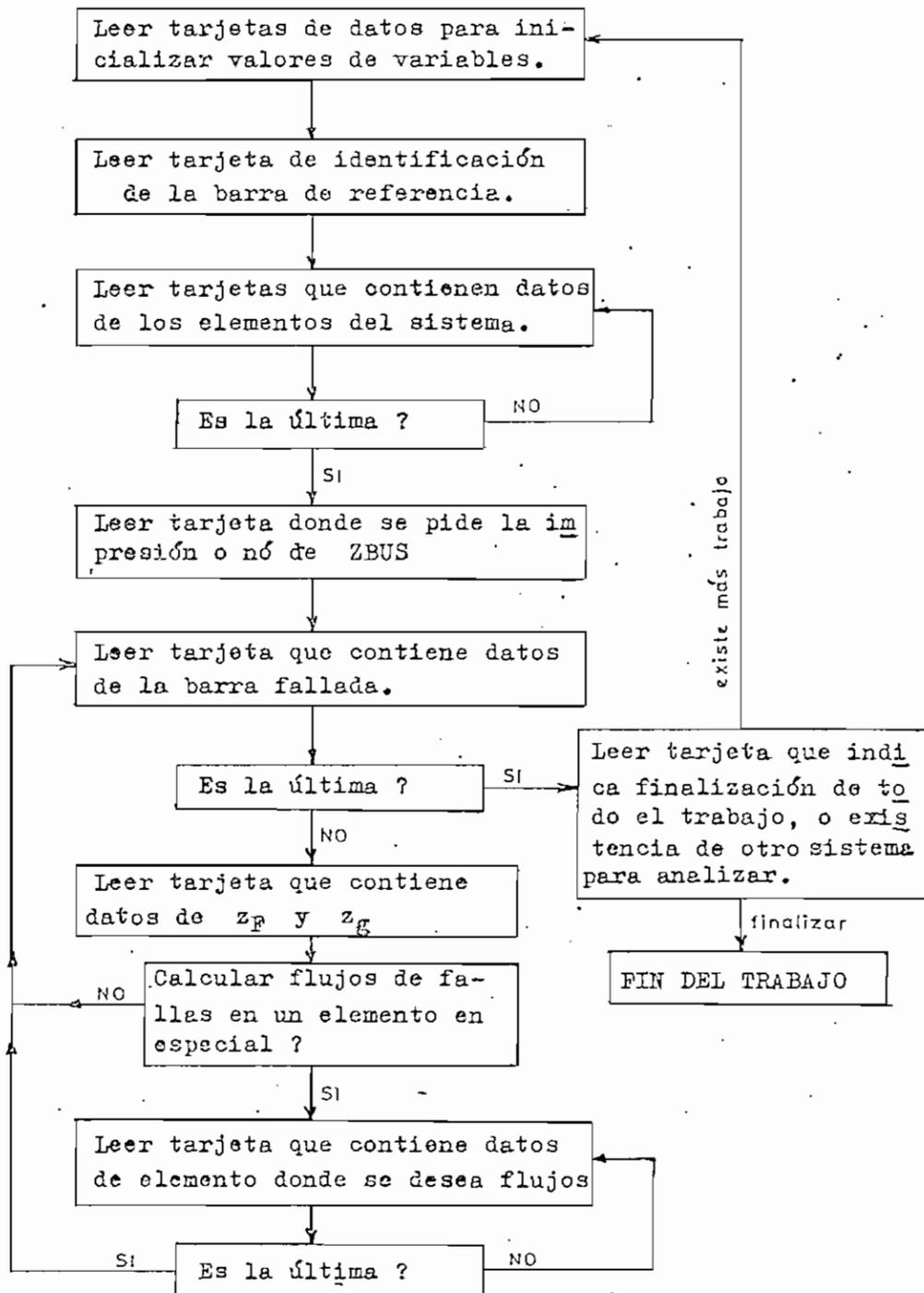


Fig. 4.4.- Secuencia de lectura de datos.

C A P I T U L O V

EJEMPLO DE APLICACION Y CONCLUSIONES.-

5.1.- INTRODUCCION.- Como ejemplo de aplicación del programa, se analizará un sistema eléctrico descrito en la referencia (6), en donde se encuentran los resultados para fallas fase-tierra y trifásica de todas las barras del sistema. El método que se utiliza para la solución del problema de fallas, es empleando la matriz impedancia de barras de secuencias, además asume todas las suposiciones y simplificaciones que se hacen en el estudio de CCC (Capítulo II) a excepción de despreciar la resistencia de los elementos. Los resultados de éste estudio se incluyen en éste trabajo, para comparar con los que se obtuvieron con el programa elaborado.

Antes de hacer el estudio de fallas, vamos a realizar un ligero análisis de las redes de secuencia y de los valores de impedancias del sistema.

El sistema del ejemplo está formado por 9 elementos y 6 barras (figura 5.1).

La red de secuencia positiva (negativa) del sistema es la de la figura 5.2. Se puede ver que no existen elementos aislados y sus valores se indican junto a cada uno. Con respecto a los valores de resistencia y reactancia de los elementos, existe cierta discrepancia con lo que nosotros suponemos, que $x/r > 4$, esto no se cumple para unos dos elementos del sistema, en donde el valor de resistencia es comparable al de reactancia.

Con respecto a la red de secuencia cero, que se indica

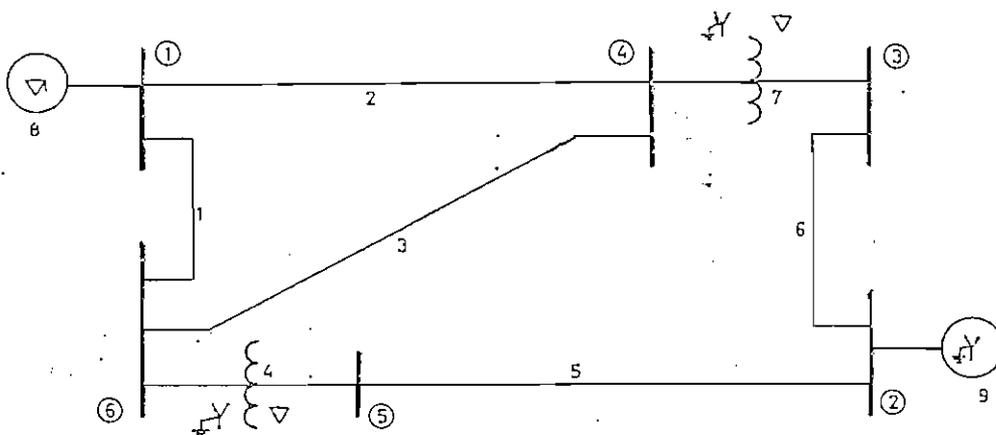


Fig. 5.1.- Sistema ha analizarse

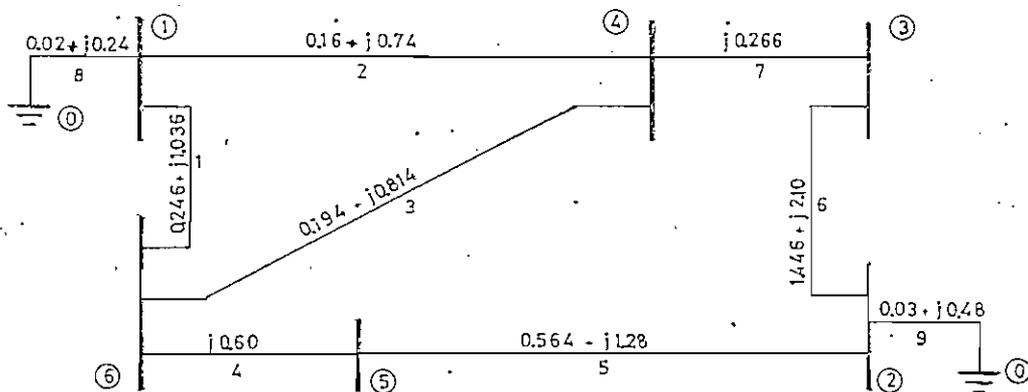


Fig. 5.2.- Red de secuencia positiva para el ejemplo.

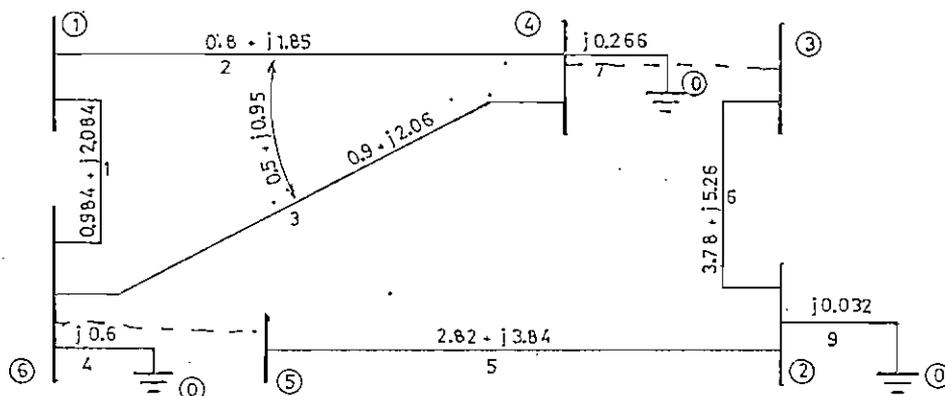


Fig. 5.3.- Red de secuencia cero para el ejemplo.

en la figura 5.3, todos los elementos se encuentran conectados de alguna manera a la barra de referencia, los valores de las impedancias también se indican. Existen dos elementos con acoplamiento mutuo $z_{14,46}$. Éste acoplamiento es positivo cuando el flujo de corriente de 4 a 6 produce una caída de potencial de 1 a 4 (28). Analizando las componentes de las impedancias de secuencia cero, se observa que para un gran número de elementos la relación $x/r < 4$, la resistencia es importante con respecto a la reactancia; lo mismo sucede con la impedancia mutua.

El estudio se hará sin tomar en cuenta los valores de resistencias de los elementos, y por lo que se dijo anteriormente, esperamos que los resultados de las matrices impedancias de barras de secuencias y por ende el estudio de CCC, no sean exactos como deseábamos. Los valores dados por (6) serán diferentes a los que obtengamos. Aunque no es exacto despreciar la parte real de las impedancias en éste sistema, haremos el estudio para analizar los resultados y los errores cometidos.

5.2.- SOLUCION DEL PROBLEMA.- Para la solución del problema, tenemos que regirnos a las condiciones que debe tener el sistema, para poder ser analizado por el programa; una de ellas es que: el gráfico de ambas secuencias tiene que ser idéntico, para lo cual nos vemos obligados a aumentar en la red dos elementos más (figura 5.4). La red a analizarse tiene 11 elementos y 6 barras. Los valores de reactancias de secuencias positiva y cero, se indican encima y adebajo de cada elemento, respectivamente.

El estudio de fallas se hará para varios tipos y localizaciones. Se analizarán:

- 1) Fallas fase-tierra y trifásica en las barras 1 y 3. Los resultados en componentes de fase y secuencia.
- 2) Fallas fase-tierra y trifásica en las barras 2 y 6. Los

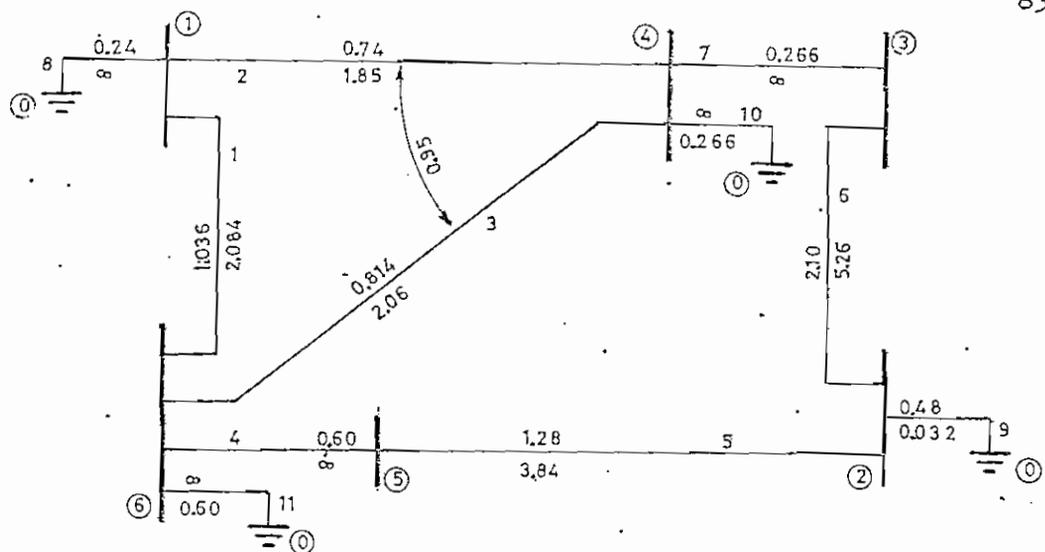


Fig. 5.4.- Sistema que debe ser analizado.

resultados sólo en componentes de fase.

- 3) Falla fase-tierra y trifásica en la barra 5. Los resultados sólo en componentes de secuencia.
- 4) Todos los tipos de fallas en la barra 4 a través de una impedancia de falla. Los resultados en componentes de secuencia.

Para todos los estudios de CCC, se pedirá calcular flujos de falla en elementos conectados a la barra fallada.

Los resultados que se obtuvieron en la referencia (6) y los obtenidos con el programa elaborado en éste trabajo se darán a continuación:

3 U S - O A T A

3 U S - O A T A
 3-0-4-1-E
 3 U S - O A T A
 3-0-4-1-E
 3 U S - O A T A
 3-0-4-1-E

1 CUE 4.625 -34.0
 0.6708 -1.5
 0.1914 -170.6
 0.1224 176.3
 1.562 -74.6T
 0.654 -74.6P
 0.634 -74.6M
 0.654 -74.6E

2 TMC 2.608 -83.4
 0.6159 0.2
 0.4401 179.7
 0.6401 -173.6
 3.756 -83.6T
 1.252 -83.6P
 1.252 -83.6M
 1.252 -83.6E

3 THREE 1.321 -77.6
 0.9101 -1.9
 0.0956 -161.2
 0.8214 173.7
 0.319 -58.8T
 0.126 -58.8P
 0.126 -58.8M
 0.126 -58.8E

4-0 0.2726 7.1 1.025 -82.9
 0.9332 -1.2
 0.0698 -163.8
 0.0 0.0
 0.185 -53.1T
 0.5841 -0.7
 0.0199 -143.0
 0.0040 -148.8
 0.126 0.126
 0.196 -64.1T
 0.0098 -64.1P
 0.0098 -64.1M
 0.0 0.0

000000

0	1.0	0.0	0.2400000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.0	0.0	0.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3.0	0.0	0.7000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	4.0	0.0	1.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	5.0	0.0	1.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	6.0	0.0	1.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	7.0	0.0	1.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	8.0	0.0	1.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	9.0	0.0	2.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	10.0	0.0	2.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	11.0	0.0	2.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	12.0	0.0	2.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	13.0	0.0	2.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	14.0	0.0	3.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	15.0	0.0	3.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	16.0	0.0	3.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	17.0	0.0	3.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	18.0	0.0	3.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	19.0	0.0	4.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	20.0	0.0	4.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	21.0	0.0	4.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	22.0	0.0	4.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	23.0	0.0	4.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	24.0	0.0	5.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	25.0	0.0	5.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	26.0	0.0	5.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	27.0	0.0	5.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	28.0	0.0	5.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	29.0	0.0	6.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	30.0	0.0	6.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	31.0	0.0	6.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	32.0	0.0	6.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	33.0	0.0	6.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	34.0	0.0	7.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	35.0	0.0	7.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	36.0	0.0	7.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	37.0	0.0	7.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	38.0	0.0	7.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	39.0	0.0	8.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	40.0	0.0	8.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	41.0	0.0	8.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	42.0	0.0	8.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	43.0	0.0	8.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	44.0	0.0	9.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	45.0	0.0	9.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	46.0	0.0	9.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	47.0	0.0	9.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	48.0	0.0	9.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	49.0	0.0	10.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	50.0	0.0	10.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	51.0	0.0	10.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	52.0	0.0	10.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	53.0	0.0	10.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	54.0	0.0	11.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	55.0	0.0	11.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	56.0	0.0	11.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56	57.0	0.0	11.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57	58.0	0.0	11.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58	59.0	0.0	12.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59	60.0	0.0	12.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	61.0	0.0	12.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61	62.0	0.0	12.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
62	63.0	0.0	12.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
63	64.0	0.0	13.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	65.0	0.0	13.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	66.0	0.0	13.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
66	67.0	0.0	13.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67	68.0	0.0	13.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
68	69.0	0.0	14.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	70.0	0.0	14.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	71.0	0.0	14.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71	72.0	0.0	14.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	73.0	0.0	14.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73	74.0	0.0	15.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
74	75.0	0.0	15.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	76.0	0.0	15.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76	77.0	0.0	15.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
77	78.0	0.0	15.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
78	79.0	0.0	16.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
79	80.0	0.0	16.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	81.0	0.0	16.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
81	82.0	0.0	16.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	83.0	0.0	16.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
83	84.0	0.0	17.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
84	85.0	0.0	17.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85	86.0	0.0	17.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
86	87.0	0.0	17.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87	88.0	0.0	17.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
88	89.0	0.0	18.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	90.0	0.0	18.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	91.0	0.0	18.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	92.0	0.0	18.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92	93.0	0.0	18.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
93	94.0	0.0	19.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
94	95.0	0.0	19.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95	96.0	0.0	19.4000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
96	97.0	0.0	19.6000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	98.0	0.0	19.8000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98	99.0	0.0	20.0000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99	100.0	0.0	20.2000000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

BARRAS DE HACIA		DE HACIA		PARA		IMPEDANCIAS DE FRECUENCIAS		NUMEROS DE REF.	
		P. CERO		M. CERO		M. CERO		MUT. 1	
		P. CERO		M. CERO		M. CERO		MUT. 2	
		P. CERO		M. CERO		M. CERO		MUT. 3	
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
1	3	0	3	0	3	0	3	0	3
1	4	0	4	0	4	0	4	0	4
1	5	0	5	0	5	0	5	0	5
2	6	0	6	0	6	0	6	0	6
2	7	0	7	0	7	0	7	0	7
3	8	0	8	0	8	0	8	0	8
3	9	0	9	0	9	0	9	0	9
4	10	0	10	0	10	0	10	0	10
4	11	0	11	0	11	0	11	0	11
5	12	0	12	0	12	0	12	0	12
5	13	0	13	0	13	0	13	0	13
6	14	0	14	0	14	0	14	0	14
6	15	0	15	0	15	0	15	0	15
7	16	0	16	0	16	0	16	0	16
7	17	0	17	0	17	0	17	0	17
8	18	0	18	0	18	0	18	0	18
8	19	0	19	0	19	0	19	0	19
9	20	0	20	0	20	0	20	0	20
9	21	0	21	0	21	0	21	0	21
10	22	0	22	0	22	0	22	0	22
10	23	0	23	0	23	0	23	0	23
11	24	0	24	0	24	0	24	0	24
11	25	0	25	0	25	0	25	0	25</

SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA BARRA
 *** ***** ** ** ** **

IMPEDANCIA DE FALLA (PU) = 0.0
 IMPEDANCIA DE TIERRA (PU) = 0.0
 TRUS(0.0) (PU) SEC. CEROP = 0.10159E 01
 TRUS(0.0) (PU) SEC. POSITIVA = 0.21309E 00
 COEFICIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

COEFICIENTES (PU) TENSIONES (PU) 06508

SEC. CEROP	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA	SEC. CEROP	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.11870E 01	0.11074E 01	0.11074E 01	-0.12259E 01	0.14780E 01	-0.25114E 00
FASE "M"	FASE "M"	FASE "M"	FASE "M"	FASE "M"	FASE "M"
REAL	IMAGI	REAL	IMAGI	REAL	IMAGI
0.0	0.0	0.0	-1.0415	-0.8660	-1.0615 0.8660

FLUJO DE COEFICIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 0. BARRA J = 1. ACOPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA = 0.
 SEC. POSITIVA NEGATIVA

SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.17720E 01	0.10548E 01
0.14780E 01	-0.25114E 00
FASE "M"	FASE "M"
REAL	IMAGI
0.0	0.0

FLUJO DE COEFICIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 1. BARRA J = 4. ACOPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA = 4.
 SEC. POSITIVA NEGATIVA

SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.17720E 01	-0.60095E-01
0.14780E 01	-0.25114E 00
0.14780E 01	-0.20135E 00
FASE "M"	FASE "M"
REAL	IMAGI
0.0	0.0

FLUJO DE COEFICIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 1. BARRA J = 6. ACOPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA = 0.
 SEC. POSITIVA NEGATIVA

SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.17720E 01	-0.58601E-01
0.14780E 01	-0.25114E 00
0.14780E 01	-0.10247E 00
FASE "M"	FASE "M"
REAL	IMAGI
0.0	0.0

IMPEDANCIAS DE FALLA (PU) = 0.0

IMPEDANCIAS DE TIPODA (PU) = 0.0

ZBUS(I,P) (PU) SEC. CERD = 0.10194E 01

ZBUS(O,P) (PU) SEC. POSITIVA = 0.21307E 00

CORRIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA-FALLADA

CORRIENTES (PU)

TENSIONES (PU)

SEC. CERD	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA	SEC. CERD	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.0	0.80067E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
FASE "A"	FASE "A"	FASE "A"	FASE "B"	FASE "B"	FASE "C"
REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.
0.0	-4.0484	-2.3373	0.0	0.0	0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 0. BARRA J = 1. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA = 0.

SECUNCIAS POSITIVA NEGATIVA

FRECUENCIAS 0.0 0.72100E 01 0.0

CORRIENTES BARRA I 0.0 0.17307E 01 0.0

TENSIONES BARRA J 0.0 0.0 0.0

FASES FASE "A" FASE "B" FASE "C"

CORRIENTES REAL IMAGI. REAL IMAGI. REAL IMAGI.

TENSIONES 0.0 0.41607E 01 -0.76004E 01 0.3608E 01 -0.20031E 01

TENSIONES BARRA I 0.10000E 01 0.0 -0.50000E 00 -0.86602E 00 0.86602E 00

TENSIONES BARRA J 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 4. BARRA J = 6. ACPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA = 4.

SECUNCIAS POSITIVA NEGATIVA

FRECUENCIAS 0.0 -0.87001E 00 0.0

CORRIENTES BARRA I 0.0 0.0 0.0

TENSIONES BARRA J 0.0 0.35430E 00 0.0

FASES FASE "A" FASE "B" FASE "C"

CORRIENTES REAL IMAGI. REAL IMAGI. REAL IMAGI.

TENSIONES 0.0 -0.27650E 00 0.27650E 00 0.13024E 00 -0.23045E 00

TENSIONES BARRA I 0.0 0.0 0.0

TENSIONES BARRA J 0.20661E 00 0.0 -0.10370E 00 -0.17720E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 1. BARRA J = 6. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA = 0.

SECUNCIAS POSITIVA NEGATIVA

FRECUENCIAS 0.0 -0.80004E 00 0.0

CORRIENTES BARRA I 0.0 0.0 0.0

TENSIONES BARRA J 0.0 0.41530E 00 0.0

FASES FASE "A" FASE "B" FASE "C"

CORRIENTES REAL IMAGI. REAL IMAGI. REAL IMAGI.

TENSIONES 0.0 -0.23149E 00 -0.20048E 00 0.11575E 00 -0.20048E 00

TENSIONES BARRA I 0.0 0.0 0.0

TENSIONES BARRA J 0.23013E 00 0.0 -0.11019E 00 -0.20770E 00

SE CONDUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA BARRA 2
 *** ***** ***** ***** ***** ***** ***** ***** ***** ***** ***** *****

IMPEDANCIA DE FALLA (PU) = 0.0
 IMPEDANCIA DE TIERRA (PU) = 0.0
 TRANSICION (PU) SEG. POSITIVA = 0.33000E-01
 TRANSICION (PU) SEG. NEGATIVA = 0.33000E-01

COEFICIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

COEFICIENTES (PU)		TENSIONES (PU)	
FASE "AA"	FASE "BB"	FASE "AA"	FASE "BB"
REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.
0.0	0.0	-0.0000	0.0
0.0	0.0	-0.0013	-0.0050
0.0	0.0	-0.0013	-0.0013

FLUJO DE COMPONENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL FLEQUENO

BARRA 1 = 0		BARRA 2 = 2		ACOND. NIJA = 0		NIJA REFERENCIAL = 0	
FASE "AA"		FASE "BB"		FASE "AA"		FASE "BB"	
REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.
0.0	0.0	0.33737E-01	-0.17700E-06	0.37730E-00	0.47694E-06	0.27730E-00	0.0
0.0	0.0	-0.50000E-00	-0.00000E-00	-0.50000E-00	-0.50000E-00	-0.50000E-00	0.00000E-00
0.0	0.0	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	0.00000E-00

FLUJO DE COMPONENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL FLEQUENO

BARRA 1 = 2		BARRA 2 = 2		ACOND. NIJA = 0		NIJA REFERENCIAL = 0	
FASE "AA"		FASE "BB"		FASE "AA"		FASE "BB"	
REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.
0.0	0.0	-0.33737E-01	0.0	0.12730E-00	0.0	0.12730E-00	0.0
0.0	0.0	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	0.00000E-00
0.0	0.0	-0.33737E-01	-0.00000E-00	-0.33737E-01	-0.00000E-00	-0.33737E-01	0.00000E-00

FLUJO DE COMPONENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL FLEQUENO

BARRA 1 = 2		BARRA 2 = 2		ACOND. NIJA = 0		NIJA REFERENCIAL = 0	
FASE "AA"		FASE "BB"		FASE "AA"		FASE "BB"	
REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.	REAL	IMAGI.
0.0	0.0	-0.10000E-00	-0.10000E-06	0.15000E-00	0.10000E-06	0.15000E-00	0.0
0.0	0.0	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	-0.00000E-00	-0.51272E-01	0.00000E-00
0.0	0.0	-0.33737E-01	-0.00000E-00	-0.33737E-01	-0.00000E-00	-0.33737E-01	0.00000E-00

SE CONDUCE UNA FALLA TIPO BASES-TIERRA EN LA BARRA 2

IMPEDANCIA DE FALLA (PU) = 0.0		IMPEDANCIA DE TIERRA (PU) = 0.0		ZBUS(B.C) (PU) SEG. CERCA = 0.32000E-01		ZBUS(D.C) (PU) SEG. POSITIVA = 0.71570E 00	
CORRIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA							
CORRIENTES (PU)							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	2.0517	-1.3300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TENSIONES (PU)							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.2097E 01	-0.10417E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 0.		BARRA J = 2.		ACPL. NUM. = 0.		NUM. REFERENCIA = 0.	
CORRIENTES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.2097E 01	-0.10417E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TENSIONES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.2097E 01	-0.10417E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 2.		BARRA J = 3.		ACPL. NUM. = 0.		NUM. REFERENCIA = 0.	
CORRIENTES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.27007E 00	-0.13277E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TENSIONES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.5576E 00	-0.27007E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I = 2.		BARRA J = 5.		ACPL. NUM. = 0.		NUM. REFERENCIA = 0.	
CORRIENTES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.27004E 00	-0.13277E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TENSIONES							
FASE "A"	REAL	IMAGI.	FASE "B"	REAL	IMAGI.	FASE "C"	REAL
0.0	0.40045E 00	-0.20022E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

SE COMPLETÓ UNA FASE-TIENDA EN LA BARRA 6

INFORMANCIA DE FALLA (PU) = 0.0
 INFORMANCIA DE TIENDA (PU) = 0.0
 ZUMBIENDO (PU) SFC. CERO = 0.17027E 00
 ZUMBIENDO (PU) SFC. POSITIVA = 0.00000E 00
 COMPLETOS Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

COMPLETOS (PU)	FASE "M"	FASE "C"	FASE "A"	FASE "B"	TENSIONES (PU)
PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI
0.0	1.0000	0.0	0.0	-0.0000	0.0
				-0.0000	-0.0000
				-0.0000	-0.0000

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA 1 = 6. ACPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIAS = 3.

COMPLETOS	FASE "M"	FASE "C"	FASE "A"	FASE "B"	TENSIONES (PU)
PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI
0.0	0.33239E 00	0.74506E-06	-0.72131E-01	-0.74506E-06	-0.72131E-01
BARRA I	0.0	-0.14249E 00	-0.86602E 00	-0.14249E 00	-0.86602E 00
BARRA J	-0.24000E-06	0.0	-0.30000E 00	-0.00000E 00	-0.30000E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA 1 = 1. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIAS = 0.

COMPLETOS	FASE "M"	FASE "C"	FASE "A"	FASE "B"	TENSIONES (PU)
PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI
0.0	0.01737E 00	0.50054E-06	-0.18714E 00	-0.50054E-06	-0.18714E 00
BARRA I	0.0	-0.01795E 00	-0.00000E 00	-0.01795E 00	-0.00000E 00
BARRA J	-0.24000E-06	0.0	-0.30000E 00	-0.00000E 00	-0.30000E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA 1 = 0. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIAS = 0.

COMPLETOS	FASE "M"	FASE "C"	FASE "A"	FASE "B"	TENSIONES (PU)
PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI
0.0	-0.20000E 00	-0.51000E-06	0.10000E 00	0.51000E-06	0.10000E 00
BARRA I	-0.20000E-06	0.0	-0.20000E 00	-0.00000E 00	-0.20000E 00
BARRA J	0.00000E 00	0.0	-0.21200E 00	-0.00000E 00	-0.21200E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA 1 = 0. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIAS = 0.

COMPLETOS	FASE "M"	FASE "C"	FASE "A"	FASE "B"	TENSIONES (PU)
PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI	PFAL	IVAGI
0.0	0.00000E 00	0.00000E-10	0.00000E 00	0.00000E-10	0.00000E 00
BARRA I	0.0	0.00000E 00	0.00000E 00	0.00000E 00	0.00000E 00
BARRA J	0.00000E 00	0.0	0.00000E 00	0.00000E 00	0.00000E 00

SE PRODUCE UNA FALLA PASSE-TIEMPO EN LA RAMA 4

INFORMACION DE FALLA (MI) = 0.0
 INFORMACION DE TIEMPO (MI) = 0.0
 ZUSUNDO (MI) SEC. CRON = 0.207000 01
 ZUSUNDO (MI) SEC. POSITIVA = 0.206700 00
 CONDICIONES Y TENSIONES EN LA RAMA FALLADA

SEC. CRON	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA	SEC. CRON	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.210000 00	0.210000 00	-0.157000 01	0.147000 01	-0.207000 00	

FLUJO DE CONDICIONES Y TENSIONES DE RAMAS (MI) EN EL ELEMENTO
 RAMA 1 = 0. ACOR. NUM. = 0. NUM. EXPERIENCIA = 0.

CONDICIONES Y TENSIONES DE RAMAS (MI) EN EL ELEMENTO
 RAMA 1 = 0.0
 RAMA 2 = 0.0
 RAMA 3 = 0.0
 RAMA 4 = 0.0
 RAMA 5 = 0.0
 RAMA 6 = 0.0
 RAMA 7 = 0.0
 RAMA 8 = 0.0
 RAMA 9 = 0.0
 RAMA 10 = 0.0
 RAMA 11 = 0.0
 RAMA 12 = 0.0
 RAMA 13 = 0.0
 RAMA 14 = 0.0
 RAMA 15 = 0.0
 RAMA 16 = 0.0
 RAMA 17 = 0.0
 RAMA 18 = 0.0
 RAMA 19 = 0.0
 RAMA 20 = 0.0
 RAMA 21 = 0.0
 RAMA 22 = 0.0
 RAMA 23 = 0.0
 RAMA 24 = 0.0
 RAMA 25 = 0.0
 RAMA 26 = 0.0
 RAMA 27 = 0.0
 RAMA 28 = 0.0
 RAMA 29 = 0.0
 RAMA 30 = 0.0
 RAMA 31 = 0.0
 RAMA 32 = 0.0
 RAMA 33 = 0.0
 RAMA 34 = 0.0
 RAMA 35 = 0.0
 RAMA 36 = 0.0
 RAMA 37 = 0.0
 RAMA 38 = 0.0
 RAMA 39 = 0.0
 RAMA 40 = 0.0
 RAMA 41 = 0.0
 RAMA 42 = 0.0
 RAMA 43 = 0.0
 RAMA 44 = 0.0
 RAMA 45 = 0.0
 RAMA 46 = 0.0
 RAMA 47 = 0.0
 RAMA 48 = 0.0
 RAMA 49 = 0.0
 RAMA 50 = 0.0
 RAMA 51 = 0.0
 RAMA 52 = 0.0
 RAMA 53 = 0.0
 RAMA 54 = 0.0
 RAMA 55 = 0.0
 RAMA 56 = 0.0
 RAMA 57 = 0.0
 RAMA 58 = 0.0
 RAMA 59 = 0.0
 RAMA 60 = 0.0
 RAMA 61 = 0.0
 RAMA 62 = 0.0
 RAMA 63 = 0.0
 RAMA 64 = 0.0
 RAMA 65 = 0.0
 RAMA 66 = 0.0
 RAMA 67 = 0.0
 RAMA 68 = 0.0
 RAMA 69 = 0.0
 RAMA 70 = 0.0
 RAMA 71 = 0.0
 RAMA 72 = 0.0
 RAMA 73 = 0.0
 RAMA 74 = 0.0
 RAMA 75 = 0.0
 RAMA 76 = 0.0
 RAMA 77 = 0.0
 RAMA 78 = 0.0
 RAMA 79 = 0.0
 RAMA 80 = 0.0
 RAMA 81 = 0.0
 RAMA 82 = 0.0
 RAMA 83 = 0.0
 RAMA 84 = 0.0
 RAMA 85 = 0.0
 RAMA 86 = 0.0
 RAMA 87 = 0.0
 RAMA 88 = 0.0
 RAMA 89 = 0.0
 RAMA 90 = 0.0
 RAMA 91 = 0.0
 RAMA 92 = 0.0
 RAMA 93 = 0.0
 RAMA 94 = 0.0
 RAMA 95 = 0.0
 RAMA 96 = 0.0
 RAMA 97 = 0.0
 RAMA 98 = 0.0
 RAMA 99 = 0.0
 RAMA 100 = 0.0

06512

CONDICIONES Y TENSIONES DE RAMAS (MI) EN EL ELEMENTO
 RAMA 1 = 0.0
 RAMA 2 = 0.0
 RAMA 3 = 0.0
 RAMA 4 = 0.0
 RAMA 5 = 0.0
 RAMA 6 = 0.0
 RAMA 7 = 0.0
 RAMA 8 = 0.0
 RAMA 9 = 0.0
 RAMA 10 = 0.0
 RAMA 11 = 0.0
 RAMA 12 = 0.0
 RAMA 13 = 0.0
 RAMA 14 = 0.0
 RAMA 15 = 0.0
 RAMA 16 = 0.0
 RAMA 17 = 0.0
 RAMA 18 = 0.0
 RAMA 19 = 0.0
 RAMA 20 = 0.0
 RAMA 21 = 0.0
 RAMA 22 = 0.0
 RAMA 23 = 0.0
 RAMA 24 = 0.0
 RAMA 25 = 0.0
 RAMA 26 = 0.0
 RAMA 27 = 0.0
 RAMA 28 = 0.0
 RAMA 29 = 0.0
 RAMA 30 = 0.0
 RAMA 31 = 0.0
 RAMA 32 = 0.0
 RAMA 33 = 0.0
 RAMA 34 = 0.0
 RAMA 35 = 0.0
 RAMA 36 = 0.0
 RAMA 37 = 0.0
 RAMA 38 = 0.0
 RAMA 39 = 0.0
 RAMA 40 = 0.0
 RAMA 41 = 0.0
 RAMA 42 = 0.0
 RAMA 43 = 0.0
 RAMA 44 = 0.0
 RAMA 45 = 0.0
 RAMA 46 = 0.0
 RAMA 47 = 0.0
 RAMA 48 = 0.0
 RAMA 49 = 0.0
 RAMA 50 = 0.0
 RAMA 51 = 0.0
 RAMA 52 = 0.0
 RAMA 53 = 0.0
 RAMA 54 = 0.0
 RAMA 55 = 0.0
 RAMA 56 = 0.0
 RAMA 57 = 0.0
 RAMA 58 = 0.0
 RAMA 59 = 0.0
 RAMA 60 = 0.0
 RAMA 61 = 0.0
 RAMA 62 = 0.0
 RAMA 63 = 0.0
 RAMA 64 = 0.0
 RAMA 65 = 0.0
 RAMA 66 = 0.0
 RAMA 67 = 0.0
 RAMA 68 = 0.0
 RAMA 69 = 0.0
 RAMA 70 = 0.0
 RAMA 71 = 0.0
 RAMA 72 = 0.0
 RAMA 73 = 0.0
 RAMA 74 = 0.0
 RAMA 75 = 0.0
 RAMA 76 = 0.0
 RAMA 77 = 0.0
 RAMA 78 = 0.0
 RAMA 79 = 0.0
 RAMA 80 = 0.0
 RAMA 81 = 0.0
 RAMA 82 = 0.0
 RAMA 83 = 0.0
 RAMA 84 = 0.0
 RAMA 85 = 0.0
 RAMA 86 = 0.0
 RAMA 87 = 0.0
 RAMA 88 = 0.0
 RAMA 89 = 0.0
 RAMA 90 = 0.0
 RAMA 91 = 0.0
 RAMA 92 = 0.0
 RAMA 93 = 0.0
 RAMA 94 = 0.0
 RAMA 95 = 0.0
 RAMA 96 = 0.0
 RAMA 97 = 0.0
 RAMA 98 = 0.0
 RAMA 99 = 0.0
 RAMA 100 = 0.0

SE PRODUCE UNA FALLA PASSE-TIEMPO EN LA RAMA 4

INFORMACION DE FALLA (MI) = 0.0
 INFORMACION DE TIEMPO (MI) = 0.0
 ZUSUNDO (MI) SEC. CRON = 0.207000 01
 ZUSUNDO (MI) SEC. POSITIVA = 0.206700 00
 CONDICIONES Y TENSIONES EN LA RAMA FALLADA

SEC. CRON	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA	SEC. CRON	SEC. POSITIVA	SEC. NEGATIVA
0.210000 01	0.210000 00	-0.157000 01	0.147000 01	-0.207000 00	

FLUJO DE CONDICIONES Y TENSIONES DE RAMAS (MI) EN EL ELEMENTO
 RAMA 1 = 0. ACOR. NUM. = 0. NUM. EXPERIENCIA = 0.

SE BRINDA UNA FALLA TIPORA EN LA BARRA 4
 *** ***** **

IMPEDANCIA DE FALLA (PU) = 0.40000E-02
 IMPEDANCIA DE TIERRA (PU) = 0.0
 ZBUS(B,P) (PU) SEC. CERD = 0.22629E 00
 ZBUS(C,P) (PU) SEC. POSITIVA = 0.37023E 00
 CORRIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

CORRIENTES (PU) TENSIONES (PU)
 SEC. CERD SEC. POSITIVA SEC. CERD SEC. POSITIVA
 0.12946E 01 0.12946E 01 0.22046E 00 0.10157E 01 -0.71636E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 1. BARRA J = 4. ACPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA = 4.

SECUNCIAS CERD POSITIVA NEGATIVA
 CORRIENTES 0.71704E-01 0.67020E 00 0.67020E 00
 TENSIONES BARRA I 0.15137E 01 -0.21375E 00
 BARRA J -0.22046E 00 -0.71636E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 4. BARRA J = 6. ACPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA = 3.

SECUNCIAS CERD POSITIVA NEGATIVA
 CORRIENTES -0.11443E 00 -0.34816E 00 -0.34816E 00
 TENSIONES BARRA I -0.22046E 00 0.10157E 01 -0.71636E 00
 BARRA J -0.11262E 00 0.12973E 01 -0.43279E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 4. BARRA J = 7. ACPL. NUM. = 9. NUM. REFERENCIA = 0.

SECUNCIAS CERD POSITIVA NEGATIVA
 CORRIENTES -0.22046E-01 -0.22046E 00 -0.22046E 00
 TENSIONES BARRA I -0.22046E 00 0.10157E 01 -0.71636E 00
 BARRA J -0.15137E-01 0.10765E 01 -0.65554E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = 6. BARRA J = 4. ACPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA = 0.

SECUNCIAS CERD POSITIVA NEGATIVA
 CORRIENTES 0.10047E 01 0.71636E-04 0.71636E-04
 TENSIONES BARRA I 0.0 0.17320E 01 0.0
 BARRA J -0.22046E 00 0.10157E 01 -0.71636E 00

SE MANEJÓ UNA FALLA EN EL CASO-TIPO EN LA BARRA A

IMPEDANCIAS DE FALLA (PU) = 0.40000E-02
 IMPEDANCIAS DE TIPO (PU) = 0.0
 ZANGUANO (PU) SEC. FRON = 0.22000E 00
 ZANGUANO (PU) SEC. POSITIVA = 0.57000E 00
 CORRIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

CORRIENTES (PU) TENSIONES (PU)
 SEC. FRON SEC. POSITIVA SEC. NEGATIVA SEC. FRON SEC. POSITIVA SEC. NEGATIVA
 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 0.17065E-01 0.0 0.12065E-01 0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = A. BARRA J = B. ACIOL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIAL = A.

SECUNCIAS CORRIENTES TENSIONES
 BARRA I 0.0 0.0 0.16700E 01 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.12065E-01 0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = A. BARRA J = B. ACIOL. NUM. = 5. NUM. REFERENCIAL = B.

SECUNCIAS CORRIENTES TENSIONES
 BARRA I 0.0 0.0 -0.27000E 00 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.12065E-01 0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = A. BARRA J = B. ACIOL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIAL = 0.

SECUNCIAS CORRIENTES TENSIONES
 BARRA I 0.0 0.0 -0.54000E 00 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.12065E-01 0.0

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO
 BARRA I = A. BARRA J = B. ACIOL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIAL = 0.

SECUNCIAS CORRIENTES TENSIONES
 BARRA I 0.0 0.0 0.17000E-03 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.17120E 01 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.12065E-01 0.0

06513

SE PRODUCE UNA FALLA DOS FASES-TIERRA EN LA BARRA A
***** ** ***** ** ** *****

IMPEDANCIAS DE FALLA (PU)= 0.40000E-02
IMPEDANCIAS DE TIERRA (PU)= 0.0
ZBUS(I,0) (PU) SEC. CEROS 0.27676E 00
ZBUS(I,0) (PU) SEC. POSITIVA= 0.57023E 00
CORRIENTES Y TENSIONES EN LA BARRA FALLADA

CORRIENTES (PU) TENSIONES (PU)
SEC. CERO SEC. POSITIVA SEC. NEGATIVA SEC. CERO SEC. POSITIVA SEC. NEGATIVA
-0.16739E 01 0.23450E 01 -0.07129E 00 0.37875E 00 0.30803E 00 0.38276E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I= 1. BARRA JE 4. ACCPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA= 4.
CERO POSITIVA NEGATIVA

SECUENCIAS CORRIENTES TENSIONES
CORRIENTES -0.05661E-01 0.12670E 01 -0.20620E 00
TENSIONES BARRA I 0.30916E 00 0.17720E 01 0.11421E 00
BARRA J 0.37875E 00 0.30803E 00 0.38276E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I= 6. BARRA JE 6. ACCPL. NUM. = 6. NUM. REFERENCIA= 3.
CERO POSITIVA NEGATIVA

SECUENCIAS CORRIENTES TENSIONES
CORRIENTES 0.15511E 00 -0.05029E 00 0.10613E 00
TENSIONES BARRA I 0.37875E 00 0.30803E 00 0.38276E 00
BARRA J 0.15005E 00 0.02416E 00 0.23125E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I= 4. BARRA JE 3. ACCPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA= 0.
CERO POSITIVA NEGATIVA

SECUENCIAS CORRIENTES TENSIONES
CORRIENTES 0.37855E-01 -0.02677E 00 0.12215E 00
TENSIONES BARRA I 0.37875E 00 0.30803E 00 0.38276E 00
BARRA J 0.20165E-01 0.50835E 00 0.35027E 00

FLUJO DE CORRIENTES Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

BARRA I= 0. BARRA JE 4. ACCPL. NUM. = 0. NUM. REFERENCIA= 0.
CERO POSITIVA NEGATIVA

SECUENCIAS CORRIENTES TENSIONES
CORRIENTES -0.14230E 01 0.13172E-03 -0.23427E-04
TENSIONES BARRA I 0.0 0.17720E 01 0.0
BARRA J 0.37875E 00 0.30803E 00 0.38276E 00

SE PRODUCIÓ UNA FALLA PARCIAL EN LA BARRA 4
 *** ***** ** ***** ** *****

DEPENDENCIA DE FALLA (PU) = 0.40000E-02
 DEPENDENCIA DE TENSION (PU) = 0.0
 TENSION (PU) SFC. CERNO = 0.22698E 00
 TENSION (PU) SFC. POSITIVA = 0.57023E 00
 TENSION (PU) SFC. NEGATIVA = 0.57023E 00

COMPLETOS (PU) TENSIONES (PU)
 SFC. CERNO SFC. POSITIVA SFC. NEGATIVA
 0.0 0.13091E 01 -0.15091E 01 0.0 0.07206E 00 0.40000E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

SECUENCIAS
 BARRA I 0.0 0.0 0.17254E 01 -0.21577E 00 0.25661E 00
 BARRA J 0.0 0.0 0.87206E 00 0.86000E 00 0.86000E 00

06514

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

SECUENCIAS
 BARRA I 0.0 0.0 -0.41920E 00 0.41821E 00 0.46000E 00
 BARRA J 0.0 0.0 0.87206E 01 0.81957E 00 0.81957E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

SECUENCIAS
 BARRA I 0.0 0.0 -0.27443E 00 0.27446E 00 0.66000E 00
 BARRA J 0.0 0.0 0.87206E 00 0.78690E 00 0.78690E 00

FLUJO DE COMPLETOS Y TENSIONES DE BARRAS (PU) EN EL ELEMENTO

SECUENCIAS
 BARRA I 0.0 0.0 0.85000E-04 -0.85000E-04 0.0
 BARRA J 0.0 0.0 0.17206E 01 0.87206E 00 0.87206E 00

TESTE DE BARRA: CALCULO DIGITAL DE CONDICIONES

5.3.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS.- Las corrientes de fallas deben ser consideradas como corrientes inductivas, en los resultados no están así. Para esto las componentes de fase tanto real como imaginaria tienen que ser tomadas con el signo cambiado.

También tenemos que analizar el tipo de transformación a componentes simétricas que se utilizó en éste trabajo (para invariancia de la potencia), y la que se utiliza en la referencia dada (6) (transformación Fortescue).

Nosotros utilizamos la transformación dada por la ecuación 1.35:

$$\bar{V}_{012} = [T]^{-1} \bar{V}_{abc} \quad (5.1)$$

En el libro de donde el ejemplo se tomó, utiliza la transformación dada por la ecuación 1.27 :

$$\bar{V}'_{012} = [D]^{-1} \bar{V}_{abc} \quad (5.2)$$

Comparando los dos tipos de transformación, tenemos:

$$\bar{V}'_{012} = \sqrt{3} \bar{V}_{012} \quad (5.3)$$

Lo mismo con las corrientes de secuencia.

En resumen: nuestros resultados deberán ser multiplicados por $\sqrt{3}$, para ser comparados con los dados en el libro (6); esto sólo con lo que respecta a corrientes y tensiones de secuencia.

Analizando las matrices impedancias de barras, y si sólo lo comparamos las partes imaginarias, los máximos errores que se cometen son:

- a) En la de secuencia positiva en el término $Z(2,3)$ el error

es del 5.7%. Esta impedancia corresponde precisamente a las barras donde se encuentra conectado el elemento con relación $x/r=1.45$ que es la menor de todas.

b) En la de secuencia cero, el término que más error tiene es el $Z(4,6)$ y éste es del orden del 4.1%. En las barras 4-6 tenemos conectado un elemento acoplado, para la impedancia propia $x/r=2.3$ no es muy alta, pero para el acoplamiento $x/r=1.9$ y posiblemente es lo que más influye en éste resultado.

Las corrientes y tensiones de fallas en magnitud, dependerán de los valores de impedancias de Z de barras, de aquí que los errores de corrientes y tensiones tanto en magnitud como en ángulo de fase, serán notables en las barras cuyas impedancias $Z(i,i)$ tengan un gran valor de resistencia comparada con la reactancia, ejemplo las barras 3 y 5, que para secuencia cero $X/R = 1.4$ y 1.37 respectivamente.

5.4.- CONCLUSIONES.- De lo analizado en el punto anterior, los resultados empleando el programa desarrollado en éste trabajo, son correctos siempre y cuando todas las suposiciones y simplificaciones que normalmente se hacen en la red para éste tipo de estudios se cumplen. Para otros casos como el del ejemplo, los resultados dan ideas de los valores que esperamos para ese sistema, pero de ninguna manera son totalmente correctos (según lo que nosotros entendemos por correctos).

Normalmente los estudios digitales de CCC no dan valores de corrientes y tensiones en las tres fases^(26,27), éste programa si da esos resultados, que pueden servir para estudios de sobretensiones cuando se producen fallas fase-tierra y dos fases-tierra. Para secuencia abc, las sobretensiones que se producen en las fases b y c cuando en la fase a existe una falla fase-tierra, son iguales en magnitud si la resistencia del sistema es despreciable, pero si no lo es, en general, el efecto es incrementar

el voltaje en la fase c y disminuir en la b (29).

Con respecto a la severidad de las fallas, aunque con los resultados obtenidos, sólo podemos analizar directamente los tipos fase-tierra y trifásico, en general son en éste orden:

- 1ª fase-tierra (70%)
- 2ª trifásica (5%)
- 3ª dos fases-tierra (10%)
- 4ª fase-fase (15%)

Las cantidades entre paréntesis son la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los tipos de falla⁽²⁵⁾.

Como sugerencias para trabajos posteriores, con fin de que el presente trabajo tenga una mayor oportunidad de aprovechamiento práctico, será necesario introducir algunas mejoras, entre las cuales estaría:

- a) Introducción de cantidades complejas.
- b) Estudios de despeje de fallas (salida y entrada de líneas automáticamente)
- c) Estudio de fallas al final de las líneas.
- d) Mejoramiento del formato de salida, que con el actual ocupa mucho espacio.
- f) Posibilidad de integrar en un sólo programa éste trabajo con otros similares de estudios de "Flujo de Carga" que ya existen en la Escuela, lo que permitirá tener trabajos que dejando de ser de pura investigación, pasen a ser de utilización práctica que es lo que actualmente necesita el País.

A P E N D I C E " A "

CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA CERO PARA BANCOS DE TRANSFORMADORES TRIFASICOS .- Las componentes de secuencia cero forman un sistema monofásico, las tensiones y corrientes en los tres conductores de un circuito se encuentran en fase.

Las redes de secuencia cero, dependen del valor de impedancia encontradas por las corrientes I_a^0 que fluye por cada conductor, y de la corriente total $3I_a^0$ que fluye por el neutro. Si no existe un circuito cerrado para estas corrientes, la impedancia de secuencia cero tendrá un valor infinito. Las corrientes de secuencia cero, sólo pueden circular por el neutro de un sistema trifásico.

Una conexión estrella con el neutro aislado, presenta una impedancia de valor infinito para las corriente de secuencia cero.

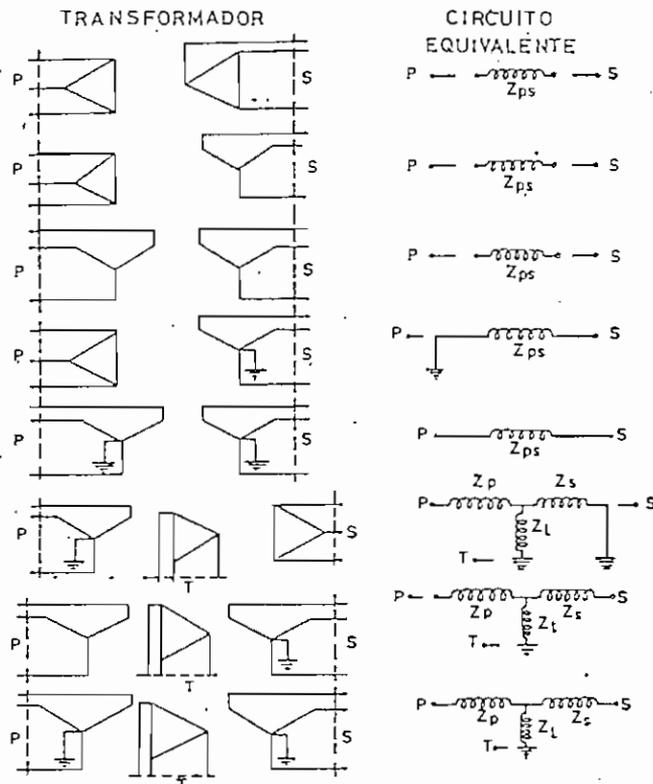
Una conexión delta , visto desde sus terminales no presenta camino alguno para circulación de corrientes de secuencia cero, pero si pueden circular dentro de la conexión delta. Para secuencia cero, la representación de esta red será una impedancia con sus terminales cortocircuitados.

Una conexión estrella con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia z_n , presenta un camino para circulación de corrientes de secuencia cero. La representación unifilar de este circuito será, la impedancia del transformador en serie con una impedancia de valor $3z_n$ conectada a tierra.

En un banco de transformadores trifásicos de dos devana

dos, la ausencia de camino para la circulación de corrientes de secuencia cero en uno de los devanados, impide la circulación en el otro.

Los circuitos equivalentes de secuencia cero, para bancos de transformadores trifásicos, formados por unidades idénticas y despreciando la corriente de magnetización, se indican en el dibujo siguiente:



A P E N D I C E " B "

CAMBIO DE FASE EN TRANSFORMADORES Δ - \angle y \angle - Δ .- Las componentes de secuencia positiva rotan en sentido contrario a las de secuencia negativa; de manera que el cambio de fase en una secuencia corresponde exactamente igual en la otra pero en sentido contrario.

En transformadores estrella-estrella o delta-delta, el cambio de fase para componentes de una misma secuencia entre ambos lados puede ser 0° o 180° .

En transformadores delta-estrella o estrella-delta, existe el problema que una corriente en una fase en el un lado del transformador, aparece como corrientes en dos fases en el otro lado, porque existe un cambio de fase de las componentes fase-neutro entre los dos lados. Esto no tiene importancia en el CCC, a no ser que las corrientes y tensiones de ambos lados desean ser comparadas.

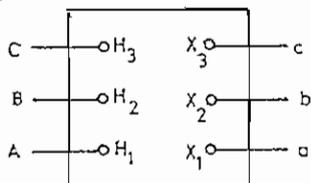
El cambio de fases depende de que si el transformador es delta-estrella o estrella-delta y de las polaridades de las fases.

La terminología estadounidense nomina como H1, H2, H3 y X1, X2, X3 los terminales de alta y baja tensión respectivamente, en los transformadores, de manera que si la secuencia de fases es abc en el un lado también lo sea en el otro. Las normas también establecen que el desplazamiento angular sea tal que, las tensiones fase-neutro de secuencia positiva, del lado de alta adelante 30° a la de baja tensión (en secuencia negativa atrazará 30°) (6,25).

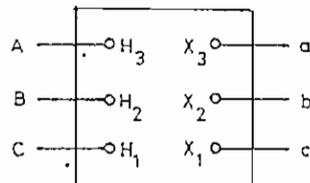
Despreciando las corrientes de excitación, el defasamien

to de corrientes de líneas corresponderá exactamente al de tensiones, si no fuera así la potencia en ambos lados del transformador no sería igual. (11)

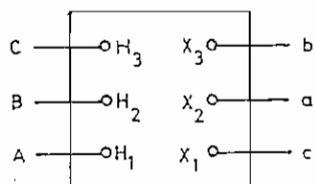
En general para una misma secuencia de fases, el desplazamiento angular puede ser $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 150^\circ$ como se indica en la figura (25):



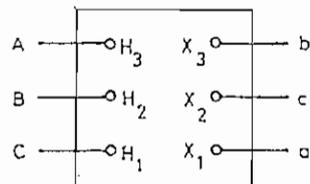
E_{an} atraza a E_{AN} en 30° ..



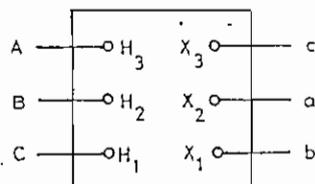
E_{an} adelanta a E_{AN} en 30°



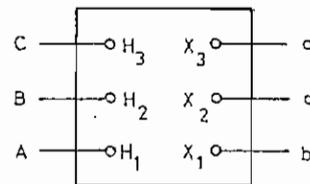
E_{an} atraza a E_{AN} en 150°



E_{an} adelanta a E_{AN} en 150°



E_{an} atraza a E_{AN} en 90°



E_{an} adelanta a E_{AN} en 90°

Desplazamiento angular en banco de transformadores estrella-delta. (25)

A P E N D I C E " C "

CONSIDERACIONES ESPECIALES SOBRE LOS ELEMENTOS ACOPLADOS PARA LA FORMACION DE LA MATRIZ IMPEDANCIA DE BARRAS.- Los elementos acoplados, presentan ciertas características particulares, que no se notan a simple vista y tienen que ser tomadas en cuenta para la formación correcta de la matriz impedancia de barra de secuencia cero.

a) EFECTO DE LA DIRECCIÓN DE LOS ELEMENTOS ACOPLADOS.-

En geometría de redes⁽⁹⁾ todos los elementos tienen su sentido positivo, dada por el flujo de corrientes positivo en ese elemento (es una convención que se asume)

El orden de la identificación de las dos barras del elemento p-q da la dirección de éste: de p hacia q, y carece de importancia para la formación de la matriz impedancia de barras, excepto en los elementos acoplados.

Consideremos el caso de dos elementos acoplados p-q y r-s, siendo éstas las direcciones positivas asumidas para ambos elementos, como se indica en la figura 1.

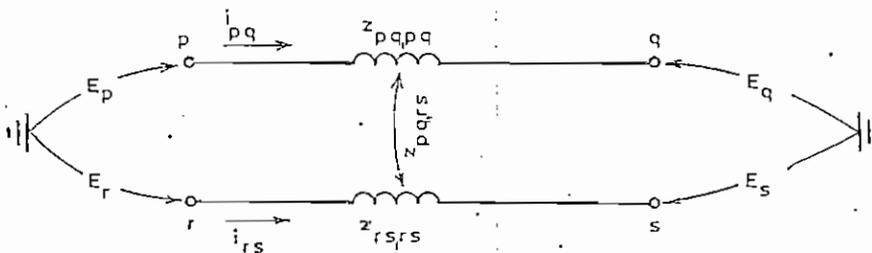


Fig. 1.- Direcciones positivas del flujo de corriente en un par de elementos acoplados.

La ecuación de comportamiento de éstos elementos está dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{pq} \\ v_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p - E_q \\ E_r - E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & z_{pq,rs} \\ z_{rs,pq} & z_{rs,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pq} \\ i_{rs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ahora consideremos el caso de que la dirección del elemento $r-s$, no sea esa sino $s-r$, de manera que:

$$i_{rs} = -i_{sr} \quad (2)$$

La ecuación de comportamiento del nuevo sistema es:

$$\begin{bmatrix} v_{pq} \\ v_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p - E_q \\ E_s - E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & z_{pq,rs} \\ z_{sr,pq} & z_{sr,rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pq} \\ i_{sr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

De las ecuaciones 1 y 3 tenemos:

$$E_r - E_s = z_{rs,pq} i_{pq} + z_{rs,rs} i_{rs} \quad (4)$$

$$E_s - E_r = z_{sr,pq} i_{pq} + z_{sr,rs} i_{sr} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que

$$z_{rs,rs} = z_{sr,rs}$$

sumando las ecuaciones 4 y 5, y reemplazando 3 llegamos a deducir que:

$$z_{sr,pq} = -z_{rs,pq} \quad (6)$$

O sea que el signo de la impedancia mutua está gobernado por el

arreglo físico que se les da a los elementos. Como regla tendremos (26,27):

ELEMENTO DE HACIA		ELEMENTO ACOPLADO DE HACIA		SIGNO DE LA IM PEDANCIA MUTUA
p	q	r	s	+
p	q	s	r	-
q	p	r	s	-
q	p	s	r	+

Esto también se tiene que tomar en cuenta para tres elementos acoplados o más.

b) NUMERO DE ELEMENTOS ACOPLADOS MAYOR QUE EL PERMITIDO.-

Cuando tenemos un grupo de elementos acoplados formados por más de tres elementos, éste sistema puede ser adaptado de tal manera de poder ser procesado por el programa presentado en éste trabajo. Una línea puede ser dividida en cualquier número de secciones creando barras intermedias ficticias, y a cualquiera de éstas secciones se les puede asignar el acoplamiento mutuo (1,16,26) quedando las otras secciones de las líneas libres de acoplamiento magnético. De ésta manera cualquier grupo de acoplamiento formado por más de cuatro elementos, puede ser arreglado para ser procesado por el programa. El inconveniente de éste procedimiento es que se crean barras ficticias y aumentan el número de elementos del sistema.

Como ejemplo de ilustración tomemos un grupo de cuatro elementos acoplados directa e indirectamente alguno de ellos. El ejemplo se indica en la figura 2.

El sistema de la figura 2, tal como se le presenta no puede ser procesado por el programa, pero se le puede hacer ciertos cambios para solucionar el inconveniente. La figura 3 presenta la solución para éste caso.

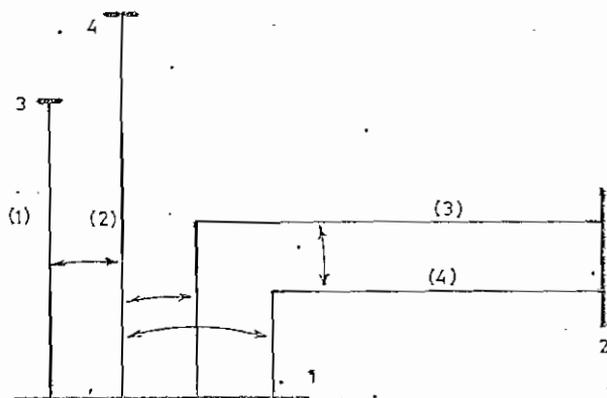


Fig. 2.- Grupo de acoplamiento formado por cuatro elementos.

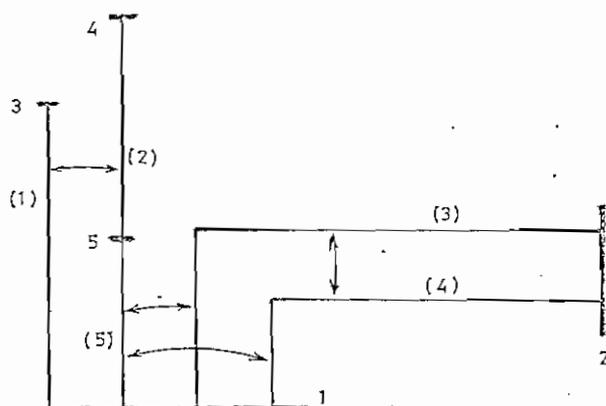


Fig. 3.- División de un grupo de acoplamiento en dos.

A P E N D I C E " D "

LISTADO DE LAS SUBROUTINAS Y DEL PROGRAMA PRINCIPAL .-

El programa de computadora desarrollado, ha sido probado con varios ejemplos obteniéndose buenos resultados.

A continuación se dará el listado del programa en lenguaje FORTRAN IV para estudios de cortocircuitos en sistemas eléctricos de potencia.


```

0004 C*** EL PROGRAMA 0-0 ES FINALC
0005 25P MEXXANXX(1,KY)+1
0006 MEXXANXX(1,KY)+1
0007 20US(LIN)=10US(LIN)+1200
0008 IF (NO) AND 2AS(LIN) +30010V78
0009 400 20US(LIN)=20US(LIN)+120US(LIN)
0010 20US(LIN)=20US(LIN)+120US(LIN)
0011 20P
0012 IF (LINV) 200,701,700
0013 C*** FLUVIDAR LAS CONDUCCIONES 70US(L) ADEUNTANAS
0014 101 CALL SUPRE
0015 100 FIVEFIVE
0016 0000 (MEXXANXX) MUXP
0017 100 FIVEFIVE(10X,11)
0018 IF (MEXXANXX) 200,700,700
0019 C*** RESERVA LA VARIETZ INEQUADIA DE DABNA DE SECURNCIAS GRND Y POSITIVA
0020 105 FAL-SALLA
0021 105 LOCALIFICAR LA ABONA DOND LA FALLA SE PRODUCE
0022 C***
0023 100 CALL MEXCA
0024 IF (WALK) 200,702,200
0025 100 IF (LFIN) 100,700,100
0026 100 IF (WALL(1)) 001,002,001
0027 100 FIVEFIVE-1
0028 C***
0029 CALL STRIT
0030 IF (WALK) 200,000,200
0031 IF (WALL(5)) 001,000,000
0032 003 FIVEFIVE
0033 C*** FALLA ENCS BASES-11009A
0034 100 FIVEFIVE
0035 IF (WALL) 200,100,100
0036 100 FIVEFIVE
0037 C*** FALLA ENCS BASES-11009A
0038 100 FIVEFIVE
0039 IF (WALL) 200,100,100
0040 100 FIVEFIVE
0041 C*** FALLA ENCS BASES-11009A
0042 100 FIVEFIVE
0043 IF (WALK) 200,000,200
0044 100 FIVEFIVE(7) 002,700,002
0045 C***
0046 FALLA ENCS BASES-11009A
0047 CALL SUPRE
0048 IF (WALK) 200,100,200
0049 IF (WALL(7)) 002,700,200
0050 C***
0051 100 WRITE (WESCH,2000)
0052
0053
0054
0055
0056
0057
0058
0059
0060
0061
0062
0063
0064
0065
0066
0067
0068
0069
0070
0071
0072
0073
0074
0075
0076
0077
0078
0079
0080
0081
0082
0083
0084
0085
0086
0087
0088
0089
0090
0091
0092
0093
0094
0095
0096
0097
0098
0099
0100
0101
0102
0103
0104
0105
0106
0107
0108
0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168
0169
0170
0171
0172
0173
0174
0175
0176
0177
0178
0179
0180
0181
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0190
0191
0192
0193
0194
0195
0196
0197
0198
0199
0200
0201
0202
0203
0204
0205
0206
0207
0208
0209
0210
0211
0212
0213
0214
0215
0216
0217
0218
0219
0220
0221
0222
0223
0224
0225
0226
0227
0228
0229
0230
0231
0232
0233
0234
0235
0236
0237
0238
0239
0240
0241
0242
0243
0244
0245
0246
0247
0248
0249
0250
0251
0252
0253
0254
0255
0256
0257
0258
0259
0260
0261
0262
0263
0264
0265
0266
0267
0268
0269
0270
0271
0272
0273
0274
0275
0276
0277
0278
0279
0280
0281
0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0289
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
0297
0298
0299
0300
0301
0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
0310
0311
0312
0313
0314
0315
0316
0317
0318
0319
0320
0321
0322
0323
0324
0325
0326
0327
0328
0329
0330
0331
0332
0333
0334
0335
0336
0337
0338
0339
0340
0341
0342
0343
0344
0345
0346
0347
0348
0349
0350
0351
0352
0353
0354
0355
0356
0357
0358
0359
0360
0361
0362
0363
0364
0365
0366
0367
0368
0369
0370
0371
0372
0373
0374
0375
0376
0377
0378
0379
0380
0381
0382
0383
0384
0385
0386
0387
0388
0389
0390
0391
0392
0393
0394
0395
0396
0397
0398
0399
0400
0401
0402
0403
0404
0405
0406
0407
0408
0409
0410
0411
0412
0413
0414
0415
0416
0417
0418
0419
0420
0421
0422
0423
0424
0425
0426
0427
0428
0429
0430
0431
0432
0433
0434
0435
0436
0437
0438
0439
0440
0441
0442
0443
0444
0445
0446
0447
0448
0449
0450
0451
0452
0453
0454
0455
0456
0457
0458
0459
0460
0461
0462
0463
0464
0465
0466
0467
0468
0469
0470
0471
0472
0473
0474
0475
0476
0477
0478
0479
0480
0481
0482
0483
0484
0485
0486
0487
0488
0489
0490
0491
0492
0493
0494
0495
0496
0497
0498
0499
0500
0501
0502
0503
0504
0505
0506
0507
0508
0509
0510
0511
0512
0513
0514
0515
0516
0517
0518
0519
0520
0521
0522
0523
0524
0525
0526
0527
0528
0529
0530
0531
0532
0533
0534
0535
0536
0537
0538
0539
0540
0541
0542
0543
0544
0545
0546
0547
0548
0549
0550
0551
0552
0553
0554
0555
0556
0557
0558
0559
0560
0561
0562
0563
0564
0565
0566
0567
0568
0569
0570
0571
0572
0573
0574
0575
0576
0577
0578
0579
0580
0581
0582
0583
0584
0585
0586
0587
0588
0589
0590
0591
0592
0593
0594
0595
0596
0597
0598
0599
0600
0601
0602
0603
0604
0605
0606
0607
0608
0609
0610
0611
0612
0613
0614
0615
0616
0617
0618
0619
0620
0621
0622
0623
0624
0625
0626
0627
0628
0629
0630
0631
0632
0633
0634
0635
0636
0637
0638
0639
0640
0641
0642
0643
0644
0645
0646
0647
0648
0649
0650
0651
0652
0653
0654
0655
0656
0657
0658
0659
0660
0661
0662
0663
0664
0665
0666
0667
0668
0669
0670
0671
0672
0673
0674
0675
0676
0677
0678
0679
0680
0681
0682
0683
0684
0685
0686
0687
0688
0689
0690
0691
0692
0693
0694
0695
0696
0697
0698
0699
0700
0701
0702
0703
0704
0705
0706
0707
0708
0709
0710
0711
0712
0713
0714
0715
0716
0717
0718
0719
0720
0721
0722
0723
0724
0725
0726
0727
0728
0729
0730
0731
0732
0733
0734
0735
0736
0737
0738
0739
0740
0741
0742
0743
0744
0745
0746
0747
0748
0749
0750
0751
0752
0753
0754
0755
0756
0757
0758
0759
0760
0761
0762
0763
0764
0765
0766
0767
0768
0769
0770
0771
0772
0773
0774
0775
0776
0777
0778
0779
0780
0781
0782
0783
0784
0785
0786
0787
0788
0789
0790
0791
0792
0793
0794
0795
0796
0797
0798
0799
0800
0801
0802
0803
0804
0805
0806
0807
0808
0809
0810
0811
0812
0813
0814
0815
0816
0817
0818
0819
0820
0821
0822
0823
0824
0825
0826
0827
0828
0829
0830
0831
0832
0833
0834
0835
0836
0837
0838
0839
0840
0841
0842
0843
0844
0845
0846
0847
0848
0849
0850
0851
0852
0853
0854
0855
0856
0857
0858
0859
0860
0861
0862
0863
0864
0865
0866
0867
0868
0869
0870
0871
0872
0873
0874
0875
0876
0877
0878
0879
0880
0881
0882
0883
0884
0885
0886
0887
0888
0889
0890
0891
0892
0893
0894
0895
0896
0897
0898
0899
0900
0901
0902
0903
0904
0905
0906
0907
0908
0909
0910
0911
0912
0913
0914
0915
0916
0917
0918
0919
0920
0921
0922
0923
0924
0925
0926
0927
0928
0929
0930
0931
0932
0933
0934
0935
0936
0937
0938
0939
0940
0941
0942
0943
0944
0945
0946
0947
0948
0949
0950
0951
0952
0953
0954
0955
0956
0957
0958
0959
0960
0961
0962
0963
0964
0965
0966
0967
0968
0969
0970
0971
0972
0973
0974
0975
0976
0977
0978
0979
0980
0981
0982
0983
0984
0985
0986
0987
0988
0989
0990
0991
0992
0993
0994
0995
0996
0997
0998
0999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2
```


- 27.- SHORT CIRCUIT ANALYSIS. USER'S REFERENCE MANUAL.- Utility Consulting Services.
- 28.- AN IMPROVED METHOD OF INCORPORATING MUTUAL COUPLINGS IN SINGLE-PHASE SHORT-CIRCUIT CALCULATIONS.- J. Storry and H. E. Brown. IEEE Trans. PAS-89. January 1970.
- 29.- TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS. H. Peterson. Dover Publications, Inc. 1951.

- Otras Referencias de Interés -

- 30.- DIGITAL CALCULATION OF SINGLE-PHASE-TO-GROUND FAULTS.- H. E. Brown and C. E. Person. Trans. AIEE. October 1960. pág. 657-660.
- 31.- MODIFICATION OF BUS IMPEDANCE MATRIX FOR SYSTEM CHANGES INVOLVING MUTUAL COUPLINGS.- D. Retain and K. Kruempel. Proceedings of the IEEE. August 1969. pág. 1432-1433.
- 32.- NEW DIGITAL COMPUTER SHORT-CIRCUIT PROGRAM FOR RELAY STUDIES.- G. Taylor, G. Carter and E. MacDonald. Trans. AIEE. February 1961. pág. 1257-1264.
- 33.- COMPENSATION OF MUTUAL COUPLING IN THE FORMATION OF THE BUS IMPEDANCE MATRIX.- H. Daniels and Mo-Shing Chen. IEEE Trans. 1970. pág. 1007-1016.
- 34.- A NEW DEVELOPMENT OF THE BUS IMPEDANCE ALGORITHM.- M. Pai and R. Jegatheesan. IEEE Trans. 1973.

- 13.- NODAL REPRESENTATION OF LARGE COMPLEX-ELEMENT NETWORKS INCLUDING MUTUAL REACTANCES.- Siegel and Bills. Trans. AIEE. February 1959. pág 1226-1229.
- 14.- ADVANCED POWER SYSTEM FAULT ANALYSIS METHOD.- J. Undrill and T. Kostyniak. IEEE Trans. PAS-94. pág. 2141-2150.
- 15.- ANALYSIS OF POWER SYSTEMS FAULTS BY PHASE IMPEDANCE MATRIX. METHOD: 1. GENERAL FAULT ANALYSIS. Pradipta Dash. IEEE Trans. October 1970. pág. 592-600.
- 16.- DIGITAL SOLUTION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS FOR NETWORKS INCLUDING MUTUAL IMPEDANCES.- A. L. Toalston. Trans. AIEE. February 1960. pág. 1720-1726.
- 17.- ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.- W. G. Stevenson. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1965.
- 18.- VOLTAGE INDUCTION IN PARALLEL TRANSMISSION CIRCUITS.- J. L. Blackburn. Trans. AIEE. February 1963. pág. 921-929.
- 19.- PROGRAMACION DEL IBM 1130.- R. Loudon/ G. Ledin. Editorial Prentice/Hall International. 1972. pág. 72.
- 20.- SOLUTION OF LARGE NETWORKS BY MATRIX METHODS.- H. E. Brown. A. Wiley-Interscience Publication. 1975.
- 21.- SYMMETRICAL COMPONENTS.- C. Wagner and R. Evans. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1933.
- 22.- SHORT CIRCUIT COMPARISON STUDY.- R. Shipley, D. Coleman and W. Nason. Trans. AIEE. February 1962. pág. 1162-1166.
- 23.- DIGITAL CALCULATION OF LINE-TO-GROUND SHORT CIRCUIT BY MATRIX METHOD.- A. El-Abiad. Trans. AIEE. June 1960. pág. 323-332.
- 24.- DIGITAL CALCULATION OF 3-PHASE SHORT CIRCUITS BY MATRIX METHOD.- H. E. Brown, C. Person, L. Kirchmayer and G. Stagg. Trans. AIEE. February 1961. pág. 1277-1282.
- 25.- ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK.- Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation. 1964.
- 26.- SHORT CIRCUIT ANALYSIS.- IBM Area Sul Americana. Biblioteca de Programas. 1968.

R E F E R E N C I A S

- 1.- MODERN POWER SYSTEMS.- J. R. Neuenschwander. International Text Book Company. 1971.
- 2.- COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEM ANALYSIS.- Stagg and El-Abiad. McGraw-Hill Book Company. 1968.
- 3.- FLUJO DE CARGAS: ESTUDIO POR MEDIO DE COMPUTADORAS DIGITALES.- C. Carrillo, P. Guerrero, J. Hidalgo. Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Diciembre 1974.
- 4.- CALCULATION OF SHORT CIRCUITS USING A HIGH-SPEED DIGITAL COMPUTER.- A. El-Abiad, R. Guidone, G. Stagg. Trans. AIEE. December 1961. pág. 702-708.
- 5.- DIGITAL CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN LARGE COMPLEX-IMPEDANCE NETWORKS.- L. Coombe and D. Lewis. Trans. AIEE February 1957. pág. 1394-1397.
- 6.- ANALYSIS OF FAULTED POWER SYSTEMS.- Paul Anderson. The Iowa State University Press / AMES. 1973.
- 7.- DIGITAL SHORT-CIRCUIT SOLUTION OF POWER SYSTEM NETWORKS INCLUDING MUTUAL IMPEDANCE.- M. Lantz. Trans. AIEE. February 1958. pág. 1230-1235.
- 8.- DIGITAL CALCULATION OF POWER SYSTEM NETWORKS UNDER FAULTED CONDITIONS.- Byerly, Long, Baldwin and King. Trans. AIEE. February 1959. pág. 1296-1307.
- 9.- INTRODUCCION A LA TEORIA DE LOS CIRCUITOS.- E. A. Guillemin. Editorial Reverté S.A. 1959
- 10.-ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.- Ing. Hernán Sanhueza. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 1974.
- 11.-CIRCUIT ANALYSIS OF A. C. POWER SYSTEMS. -Volumen I. Edith Clarke. John Wiley & Sons, Inc. 1961.
- 12.-SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATIONS FOR INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS.- Application Engineering Information. General Electric.

SUBROUTINE ACSC

C ***** CALCULO DE COPRODUCTOS EN S.F.P. *****

```

0001 C
0002 C
0003 C
0004 C
0005 C
0006 C
0007 C
0008 C
0009 C
0010 C
0011 C
0012 C
0013 C
0014 C
0015 C
0016 C
0017 C
0018 C
0019 C
0020 C
0021 C
0022 C
0023 C
0024 C
0025 C
0026 C
0027 C
0028 C
0029 C
0030 C

```

***** CALCULO DE COPRODUCTOS EN S.F.P. *****

```

0011 C
0012 C
0013 C
0014 C
0015 C
0016 C
0017 C
0018 C
0019 C
0020 C
0021 C
0022 C
0023 C
0024 C
0025 C
0026 C
0027 C
0028 C
0029 C
0030 C
0031 C
0032 C
0033 C
0034 C
0035 C
0036 C
0037 C
0038 C
0039 C
0040 C

```

SUBROUTINE ACSC

C ***** CALCULO DE COPRODUCTOS EN S.F.P. *****

```

0001 C
0002 C
0003 C
0004 C
0005 C
0006 C
0007 C
0008 C
0009 C
0010 C
0011 C
0012 C
0013 C
0014 C
0015 C
0016 C
0017 C
0018 C
0019 C
0020 C
0021 C
0022 C
0023 C
0024 C
0025 C
0026 C
0027 C
0028 C
0029 C
0030 C

```

***** CALCULO DE COPRODUCTOS EN S.F.P. *****

```

0011 C
0012 C
0013 C
0014 C
0015 C
0016 C
0017 C
0018 C
0019 C
0020 C
0021 C
0022 C
0023 C
0024 C
0025 C
0026 C
0027 C
0028 C
0029 C
0030 C
0031 C
0032 C
0033 C
0034 C
0035 C
0036 C
0037 C
0038 C
0039 C
0040 C

```



```

0027 CALL SALTO
0028 IC (MALLC) 1105,110A,1109
C*** COMPONENTES DE FASE DE CORRIENTES Y TENSIONES EN LA DABRA FALLADA
110A MURDES
0029 CALL TRANS (TRAUSE)
0030 CALL TRANS (TRAUSE)
0031 CALL TRANS (TRAUSE)
0032 CALL TRANS (TRAUSE)
0033 CALL TRANS (TRAUSE)
0034 IC (MALLC)-1 1106,1112,1106
0035 K=0
0036 TRANS=0
C*** IDENTIFICAR EL ELEMENTO DONDE SE PUEDE ENCONTRAR CORRIENTES Y TENSIONES
1107 CALL MALLA 1171,1100,1131
1108 IC (ICMALL) 1171,1100,1131
1109 IC (WALK) 1172,111A,1172
1110 K=0
1111 K=K+1
1112 MDD=DAIK(A)
1113 MDD=DAIK(A)
1114 MDD=DAIK(A)
MURDES
CALL SALTO
CALL TOENT (NF, NRP, NRP, NRP, NRP, NRP, NRP, NRP, NRP, NRP)
DO 1115 J=1,9
TRANS=0
DO 1116 I=1,9
CALL MALLA
C*** CALCULAR COMPONENTES DE SECUENCIA DE CORRIENTES Y TENSIONES (ELEMENTO)
1115 CALL MALLA
1116 IC (MDD) 1116,1101,1116
GO TO 1119
1117 IC (MDD-NRP) 111A,1117,111A
1118 TRANS(1)=TRAUSE(1)
1119 TRANS(7)=TRAUSE(7)
GO TO 1121
111A Z=Z+TRAUSE(MDD)
111B Z=Z+TRAUSE(MDD)
111C TRANS(1)=Z+MDD*Z01SC
111D TRANS(7)=Z+MDD*Z01SC
111E IC (MDD-NRP) 1121,1120,1121
1120 TRANS(1)=TRAUSE(1)
1121 TRANS(7)=TRAUSE(7)
GO TO 1122 (MDDC)
1122 Z=Z+TRAUSE(MDD)
0037
0038
0039
0040
0041
0042
0043
0044
0045
0046
0047
0048
0049
0050
0051
0052
0053
0054
0055
0056
0057
0058
0059
0060
0061
0062
0063
0064
0065
0066
0067
0068
0069
0070

```

```

005 FORTRAN IV 1604-50-470 7-B SCRIPT DATE 09/07/76 TIME 16.13.39 PAGE 0002
0071 TRANS(1)=Z+MDD*Z01SC
0072 TRANS(7)=Z+MDD*Z01SC
0073 TRANS(1)=Z+MDD*Z01SC
0074 TRANS(7)=Z+MDD*Z01SC
0075 IC (MALLC,171) 112A,112A,112A
0076 CALL MURDES
0077 CALL MURDES
0078 GO TO 1125
0079 IC (MALLC)-1 1125,1125,1125
0080 TRANS(1)=TRAUSE(1)
0081 TRANS(7)=TRAUSE(7)
0082 IC (MALLC,171) 112A,112A,112A
0083 IC (MALLC,171) 1125,1125,1125
0084 MURDES
0085 CALL SALTO
0086 IC (MALLC,171) 1125,1125,1125
0087 IC (MALLC,171) 1125,1125,1125
0088 IC (MALLC,171) 1125,1125,1125
MURDES
C*** CALCULAR CORRIENTES Y TENSIONES DE FASE EN UNO DE LOS ELEMENTOS
0089 CALL TRANS (TRAUSE)
0090 CALL TRANS (TRAUSE)
0091 CALL TRANS (TRAUSE)
0092 CALL TRANS (TRAUSE)
0093 CALL TRANS (TRAUSE)
0094 IC (MALLC,171) 1107,1130,1107
0095 IC (MDD-NRP) 1111,1111,1111
0096 MALLA=1
0097 CALL MURDES
0098
0099
0100
0101
0102
0103
0104
0105
0106
0107
0108
0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168
0169
0170
0171
0172
0173
0174
0175
0176
0177
0178
0179
0180
0181
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0190
0191
0192
0193
0194
0195
0196
0197
0198
0199
0200

```



```

0074      ME1
0075      NO 27 J=1,NF
0076      LE (DATE(5)) 21,27,21
0077      N=DATE(1:2)
0078      J=J1
0079      NO 27 J=1,NF
0080      LE (DATE(5)) 22,27,22
0081      N=DATE(1:2)
0082      N=DATE(1:2)
0083      N=DATE(1:2)
0084      N=DATE(1:2)
0085      N=DATE(1:2)
0086      N=DATE(1:2)
0087      N=DATE(1:2)
0088      N=DATE(1:2)
0089      N=DATE(1:2)
0090      N=DATE(1:2)
0091      N=DATE(1:2)
0092      N=DATE(1:2)
0093      N=DATE(1:2)
0094      N=DATE(1:2)
0095      N=DATE(1:2)
0096      N=DATE(1:2)
0097      N=DATE(1:2)
0098      N=DATE(1:2)
0099      N=DATE(1:2)
0100      N=DATE(1:2)
0101      N=DATE(1:2)
0102      N=DATE(1:2)
0103      N=DATE(1:2)
0104      N=DATE(1:2)
0105      N=DATE(1:2)
0106      N=DATE(1:2)
0107      N=DATE(1:2)
0108      N=DATE(1:2)
0109      N=DATE(1:2)
0110      N=DATE(1:2)
0111      N=DATE(1:2)
0112      N=DATE(1:2)
0113      N=DATE(1:2)
0114      N=DATE(1:2)
0115      N=DATE(1:2)
0116      N=DATE(1:2)
0117      N=DATE(1:2)
0118      N=DATE(1:2)
0119      N=DATE(1:2)
0120      N=DATE(1:2)
0121      N=DATE(1:2)
0122      N=DATE(1:2)
0123      N=DATE(1:2)
0124      N=DATE(1:2)
0125      N=DATE(1:2)
0126      N=DATE(1:2)
0127      N=DATE(1:2)
0128      N=DATE(1:2)
0129      N=DATE(1:2)
0130      N=DATE(1:2)
0131      N=DATE(1:2)
0132      N=DATE(1:2)
0133      N=DATE(1:2)
0134      N=DATE(1:2)
0135      N=DATE(1:2)
0136      N=DATE(1:2)
0137      N=DATE(1:2)
0138      N=DATE(1:2)
0139      N=DATE(1:2)
0140      N=DATE(1:2)
0141      N=DATE(1:2)
0142      N=DATE(1:2)
0143      N=DATE(1:2)
0144      N=DATE(1:2)
0145      N=DATE(1:2)
0146      N=DATE(1:2)
0147      N=DATE(1:2)
0148      N=DATE(1:2)
0149      N=DATE(1:2)
0150      N=DATE(1:2)
0151      N=DATE(1:2)
0152      N=DATE(1:2)
0153      N=DATE(1:2)
0154      N=DATE(1:2)
0155      N=DATE(1:2)
0156      N=DATE(1:2)
0157      N=DATE(1:2)
0158      N=DATE(1:2)
0159      N=DATE(1:2)
0160      N=DATE(1:2)
0161      N=DATE(1:2)
0162      N=DATE(1:2)
0163      N=DATE(1:2)
0164      N=DATE(1:2)
0165      N=DATE(1:2)
0166      N=DATE(1:2)
0167      N=DATE(1:2)
0168      N=DATE(1:2)
0169      N=DATE(1:2)
0170      N=DATE(1:2)
0171      N=DATE(1:2)
0172      N=DATE(1:2)
0173      N=DATE(1:2)
0174      N=DATE(1:2)
0175      N=DATE(1:2)
0176      N=DATE(1:2)
0177      N=DATE(1:2)
0178      N=DATE(1:2)
0179      N=DATE(1:2)
0180      N=DATE(1:2)
0181      N=DATE(1:2)
0182      N=DATE(1:2)
0183      N=DATE(1:2)
0184      N=DATE(1:2)
0185      N=DATE(1:2)
0186      N=DATE(1:2)
0187      N=DATE(1:2)
0188      N=DATE(1:2)
0189      N=DATE(1:2)
0190      N=DATE(1:2)
0191      N=DATE(1:2)
0192      N=DATE(1:2)
0193      N=DATE(1:2)
0194      N=DATE(1:2)
0195      N=DATE(1:2)
0196      N=DATE(1:2)
0197      N=DATE(1:2)
0198      N=DATE(1:2)
0199      N=DATE(1:2)
0200      N=DATE(1:2)

```