

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

PROGRAMA DIGITAL PARA SIMULACION DE  
CONTINGENCIAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICO EN LA ESPECIALIZACION  
DE SISTEMAS DE POTENCIA.

EDGAR PATRICIO GARZON AVILA

Quito, Octubre de 1981

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO FUE  
REALIZADO POR EL SEÑOR EDGAR PATRICIO  
GARZON AVILA BAJO MI DIRECCION

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Barragan R.', with a large, stylized flourish at the end.

ING. JOSE BARRAGAN R.

DEDICO A MIS ABUELOS, PADRES Y HERMANOS  
QUIENES SIEMPRE ME HAN APOYADO.

## AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento al Ing. José Barragán R. por sus sanos consejos e invaluable ayuda prestada a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Quiero también dejar constancia de mi agradecimiento a la Srta. Lilia Medina por su ayuda moral, y a todas las personas que en una u otra forma me han brindado su colaboración.

## I N D I C E

	PAGINA
<u>CAPITULO I.- INTRODUCCION</u>	
I.1 Generalidades	1
I.2 Objetivos	4
I.3 Alcance del programa a desarrollar	5
<u>CAPITULO II.- ASPECTOS TEORICOS PARA EL ESTUDIO DE SIMULACION DE CONTINGENCIAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA</u>	
II.1 Introducci3n	6
II.2 M3todo de soluci3n directa	6
II.3 Desarrollo del algoritmo de soluci3n	11
II.3.1 Desarrollo del modelo de potencia activa	13
II.3.2 Desarrollo del modelo de potencia reactiva	16
II.4 Simulaci3n de contingencias	23
<u>CAPITULO III.- PROGRAMA FORTRAN</u>	
III.1 Introducci3n	29
III.2 Descripci3n del programa, diagramas de bloques y listado	30
III.3 Variables del programa	50
<u>CAPITULO IV.- APLICACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	
IV.1 Descripci3n de ejemplos	56

## I N D I C E

	PAGINA
CAPITULO IV.- CONTINUACION.....	
IV.2 Solución del problema	60
IV.3 Conclusiones y recomendaciones	66
ANEXO 1 : Algoritmo de la BI-FACTORIZACION	69
ANEXO 2 : Manual de uso del programa	86
BIBLIOGRAFIA.	

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

I.1. GENERALIDADES

El continuo incremento del consumo y la necesidad de mantener un servicio permanente y en las mejores condiciones, obliga a un estudio planificado de los sistemas de potencia.

En la planificación de la expansión y operación de sistemas de potencia se requiere estudios de flujo de carga, estos estudios deben ser rápidos, más aún cuando se analizan posibles casos de pérdida de elementos en el sistema y con una aproximación aceptable.

Partiendo de un caso base de flujo de carga, se requiere conocer las variaciones que se introducirían al sufrir modificaciones en las condiciones iniciales del sistema, las cuales pueden ser retiro de líneas, transformadores, generadores o cambios en la carga. De ésta manera se puede prever posibles adecuaciones en el diseño o en la operación del sistema.

Frente a ésta expectativa y dada la magnitud de estudios de flujos de carga requeridos y la com-

plejidad de los problemas, resulta bastante útil el uso de computadoras y algoritmos matemáticos que permitan resolverlos en tiempos adecuados.

Generalmente la introducción de modificaciones en la topología del sistema eléctrico se lo ha definido comunmente como estudio de contingencias, considerando como contingencia en un sistema la perturbación aleatoria, interna o externa a él, que lo conduce a salir del estado normal.

El estudio de contingencias utilizando un algoritmo de flujo de carga normal, presupone de hecho un gasto elevado en tiempo de utilización de computadoras y de personal, lo que no siempre es factible y recomendable, por lo que se han sugerido nuevos planteamientos respecto a incrementar la velocidad de cálculo, tratando de mantener la exactitud de los resultados en márgenes técnicamente aceptables y la capacidad de memoria de las calculadoras digitales en valores similares o menores a los utilizados en flujos de carga.

Se han planteado algoritmos entre los cuales se pueden mencionar:

Análisis de contingencias haciendo uso de



la matriz de impedancias, pero el tamaño del sistema se limitó por la matriz  $Z$  que requiere ser almacenada en la memoria de la computadora, ya que dicha matriz no presenta características de porosidad (1).

Evaluación de contingencias calculando factores de distribución para salida múltiple de líneas a partir de factores de distribución de contingencias simples. En éste método los factores de distribución son calculados a partir de elementos de la matriz  $Z$ , y el tamaño del sistema es limitado nuevamente por la capacidad de memoria de la computadora (2,3).

En el presente trabajo se describe un flujo de carga en corriente alterna, aproximado, involucrando potencia activa y reactiva al cual se lo define como "Flujo de Potencia Lineal e Iterativo" (F.P.L.I.).

A diferencia de otros métodos lineales, el FPLI permite tener una buena aproximación de la no linealidad de las ecuaciones de flujo, por lo que los resultados son más exactos.

El tiempo de ejecución que requiere el FPLI es reducido y por consiguiente es factible de intentar éste tipo de aplicaciones, además, no requiere exce-

siva memoria en el computador (4).

I.2. OBJETIVOS

Mediante la simulación de contingencias en un S.E.P., se puede estudiar posibles casos de inseguridad que pueden presentarse en el sistema debido a la pérdida de elementos en la red.

Por lo cual el objetivo principal es elaborar un programa digital para la computadora IBM 370/125, como instrumento de cálculo para realizar este tipo de estudios.

Con los resultados de un flujo de carga bajo condiciones de contingencias, permitirá:

- Evaluación de la seguridad del sistema frente a posibles contingencias.
- Estudiar efectos sobre la distribución de potencia bajo estas condiciones.
- Programar ampliaciones del sistema y determinar su operación óptima.
- Determinar la localización óptima de nuevas centrales de generación y nuevas líneas de transmisión.
- Determinar programas de despacho económico de carga para estas condiciones.
- Determinar cuales elementos violan criterios previamente establecidos como: sobrecargas, bajos voltajes, so-

bre voltajes, etc.

### I.3. ALCANCE DEL PROGRAMA A DESARROLLAR

Con la finalidad de conseguir un ahorro de memoria en la computadora, la formación de matrices y sus respectivos cálculos serán almacenados y realizados en forma vectorial; aprovechando la porosidad de las matrices de barra del sistema.

Se consideran transformadores con relación de taps fuera del nominal, pero no se incluirán cambio de taps bajo carga.

El programa a desarrollarse, calculará relativamente rápido los voltajes de barras, el flujo de potencia en los elementos del sistema, y resaltarán cuáles de los elementos han violado determinado criterio especificado al simularse la contingencia.

El proceso de cálculo deberá permitir realizar en forma cíclica estudios de contingencias, considerando una a la vez

## C A P I T U L O   I I

### ASPECTOS TEORICOS PARA EL ESTUDIO DE SIMULACION DE CONTINGENCIAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

#### II.1 INTRODUCCION.-

En el presente capítulo se describe la formulación matemática y el algoritmo que permita realizar el estudio de contingencias. (4)

A través de adecuadas substituciones, las ecuaciones de flujo son linealizadas y desacopladas.

Al tener las ecuaciones de flujo linealizadas, la solución puede encontrarse aplicando el método de solución directa, el cual se describe a continuación.

#### II.2. METODO DE SOLUCION DIRECTA.-

El método descrito en la referencia (6,7) el cual va a ser desarrollado en el presente trabajo para

el cálculo de la solución de las ecuaciones de flujo de potencia se basa en:

- Un sistema de ecuaciones lineales
- Reducción de la matriz aumentada A,b en forma de una matriz triangular superior mediante adecuadas substituciones, para luego encontrar la solución del sistema.

Los procesos de reducción se ilustran como sigue:

Considerese el siguiente sistema de ecuaciones lineales :

$$\left. \begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= b_2 \\
 a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= b_3
 \end{aligned} \right\} \rightarrow Ax = b \quad (2.1)$$

donde

A matriz no singular

x vector dependiente

b vector independiente

Por una serie de operaciones elementales realizadas en las filas, los coeficientes  $a_{21}$ ,  $a_{31}$ ,  $a_{32}$  pueden ser reducidos a cero, y los coeficientes de la diagonal  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{33}$  son hechos igual a uno. Los coeficientes de A y los elementos en b son entonces cambiados de valor a consecuencia de las técnicas de reducción; por lo que el sistema queda como sigue:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 + a'_{12}x_2 + a'_{13}x_3 = b'_1 \\ 0 + x_2 + a'_{23}x_3 = b'_2 \\ 0 + 0 + x_3 = b'_3 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} [L][A][X] = [L][b] \\ \text{ó} \\ [U][X] = [b] \end{array} \quad (2.2)$$

Notese que  $[L][A] = [U]$ , donde  $[L]$  es una matriz triangular inferior, conteniendo unicamente valores tál que éste con el producto de la matriz A den la matriz triangular superior unidad

Dado que la matriz A es no singular, también lo será  $[L]$  y es igualmente triangular inferior, esto es:

$$[A] = [L][U] = [L][U] \quad (2.3)$$

donde:  $[L] \triangleq [L]^{-1}$  (2.4)

Ejemplo:

$$\begin{array}{c}
 A \\
 \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ -a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 L \\
 \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 U \\
 \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} \\ 0 & 1 & u_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Con la matriz  $A$  factorada en las matrices triangulares  $L$  y  $U$ , el sistema de ecuaciones viene dado por:

$$[L][U][x] = [b] \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) puede ser resuelta para  $[x]$  en dos pasos:

Primero, resolviendo por medio del vector  $[Y]$  por substitución progresiva sobre  $[L]$  así:

$$\begin{bmatrix} l_{11} & & \\ l_{21} & l_{22} & \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

$$l_{11}Y_1 = b_1$$

$$Y_1 = b_1 / l_{11}$$

$$l_{21}Y_1 + l_{22}Y_2 = b_2$$

$$Y_2 = (b_2 - l_{21}Y_1) / l_{22} \quad (2.6)$$

$$l_{31}Y_1 + l_{32}Y_2 + l_{33}Y_3 = b_3$$

$$Y_3 = (b_3 - l_{31}Y_1 - l_{32}Y_2) / l_{33}$$

Segundo, resolviendo para el vector  $[x]$  por substitución regresiva sobre  $[U]$  así:

$$\begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} \\ & 1 & u_{23} \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix}$$

$$x_3 = Y_3$$

$$x_3 = Y_3$$

$$x_2 + u_{23}x_3 = Y_2$$

$$x_2 = Y_2 - u_{23}x_3 \quad (2.7)$$

$$x_1 + u_{12}x_2 + u_{13}x_3 = Y_1$$

$$x_1 = Y_1 - u_{12}x_2 - u_{13}x_3$$

Este método de resolución directa de ecuaciones será adaptado al algoritmo de Flujo de Potencia Lineal e Iterativo. Este método permite explotar con una programación adecuada las características que presenta la matriz de impedancia de barra, tales como simetría y porosi-



dad, con la finalidad de tener almacenamientos de memoria bajos y soluciones iterativas rápidas. (Forma de almacenamiento y técnica de programación, se detalla en el Anexo 1)

### II.3. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE SOLUCION (4)

El algoritmo de solución para el estudio de contingencias en SEP se basa en dos matrices reales y simétricas las cuales permanecerán constantes para el ciclo completo de solución. Entonces cada matriz es triangulizada solamente una vez, y el efecto de contingencia es simulada sin cambio de matrices.

#### EXPRESIONES BASICAS

Considerese el sistema ilustrado en la

FIG. 2.1

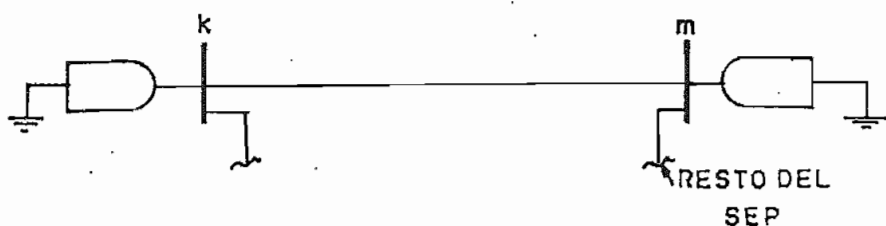


FIG. 2.1 SISTEMA DE POTENCIA

La potencia compleja neta en una barra K del sistema indicado en la FIG 2.1 viene dada por

$$S_k = P_k + j Q_k = \dot{V}_k I_k^* \quad (2.8)$$

Se tiene que la corriente en la barra K es igual:

$$\dot{I}_k = \sum_{m=1}^N Y_{km} V_m \quad (2.9)$$

$$m=1, \dots, N$$

N= número de barras del SEP

Definiendo:

$$\dot{V}_K = V_K (\cos \theta_K + j \text{Sen } \theta_K)$$

$$Y_{km} = G_{km} + j B_{km}$$

$$\psi_{km} = \theta_k - \theta_m$$

donde:

$Y_{km}$  = Admitancia mutua entre las barras k,m

$G_{km}$  = Conductancia mutua

$B_{km}$  = Suceptancia mutua

$V_k$  = Magnitud del voltaje en el nodo k

$\theta_k$  = Angulo de fase de voltaje en el nodo k

$\psi_{km}$  = Angulo de fase del voltaje a través de la rama k,m

Realizando estas substituciones en la ecuac(2.8) se tiene:

ne:

$$P_k - j Q_k = V_k (\cos \theta_k - j \text{Sen } \theta_k) \sum_{m=1}^N V_m (\cos \theta_m + j \text{Sen } \theta_m) (G_{km} + j B_{km}) \quad (2.8.a)$$

Desarrollando la ecuac(2.8.a) se tiene:

$$P_k - j Q_k = V_k \sum_{m=1}^N V_m (\cos \theta_k - j \text{Sen } \theta_k) (\cos \theta_m + j \text{Sen } \theta_m) (G_{km} + j B_{km})$$

$$\begin{aligned}
P_k - jQ_k &= V_k \sum_{m=1}^N V_m [\cos\theta_k \cos\theta_m + \sin\theta_k \sin\theta_m \\
&\quad - j(\cos\theta_m \sin\theta_k - \cos\theta_k \sin\theta_m)(G_{km} + jB_{km})] \\
&= V_k \sum_{m=1}^N V_m [\cos(\theta_k - \theta_m) - j\sin(\theta_k - \theta_m)] \cdot (G_{km} + jB_{km}) \\
&= V_k \sum_{m=1}^N V_m (\cos\psi_{km} - j\sin\psi_{km})(G_{km} + jB_{km}) \\
&= V_k \sum_{m=1}^N V_m [G_{km}\cos\psi_{km} + B_{km}\sin\psi_{km} - j(G_{km}\sin\psi_{km} - B_{km}\cos\psi_{km})]
\end{aligned}$$

Igualando partes reales e imaginarias con la finalidad de desacoplar las ecuaciones de potencia, se tiene:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m (G_{km} \cos\psi_{km} + B_{km} \sin\psi_{km}) \quad (2.10.a)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m (G_{km} \sin\psi_{km} - B_{km} \cos\psi_{km}) \quad (2.10.b)$$

A partir de las ecuaciones (2.10.a) y (2.10.b) se desarrollará las ecuaciones para el estudio de contingencias.

### II.3.1 DESARROLLO DEL MODELO DE POTENCIA ACTIVA

La ecuación del sistema para resolver el flujo de potencia activa, puede ser desarrollada haciendo las siguientes consideraciones:

Primero:

Las siguientes ecuaciones son realizadas en la ecuac(2.10.a)

$$\text{Sen } \psi = \psi + \text{Sen } \psi - \psi \quad (2.11.a)$$

$$\text{Cos } \psi = 1 + \text{Cos } \psi - 1 \quad (2.11.b)$$

Con lo que se tiene:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \{ G_{km}(1 + \text{Cos } \psi_{km} - 1) + B_{km}(\text{Sen } \psi_{km} - \psi_{km}) \} + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m B_{km} \psi_{km} \quad (2.12)$$

La ecuac(2.12) puede ser escrita así:

$$V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m B_{km} \psi_{km} = P_k - V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m G_{km} - V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m G_{km} (\text{Cos } \psi_{km} - 1) + B_{km}(\text{Sen } \psi_{km} - \psi_{km}) \quad (2.13)$$

El lado izquierdo de la ecuac(2.13) puede ser arreglada en forma de un sistema de N ecuaciones lineales con N ángulos de fase de voltaje como variables, por tener la substitución:  $\psi_{km} = \theta_k - \theta_m$  (2.14)

Donde  $\theta_k$  y  $\theta_m$  son los ángulos de fase de voltaje en los nodos k y m. El lado izquierdo puede ser entonces escrito en notación matricial como  $[A] [\theta]$ . Donde  $\theta$  es un vector de dimensión N, y  $[A]$  una matriz de dimensión NxN con elementos  $G_{km}$  definidos como sigue:

$$a_{kk} = V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m B_{km} \quad (2.15.a)$$

$$a_{km} = -V_k V_m B_{km} \quad (2.15.b)$$

(ecuaciones utilizadas en la subrutina MATRZ)

El lado derecho de la ecuac(2.13) puede ser desarrollado (y tomando el 1<sup>ro</sup> y 2<sup>do</sup> términos) de las funciones seno y coseno en series de Taylor así:

$$\text{Sen} \psi_{km} = \psi_{km} - \frac{\psi_{km}^3}{6} \quad (2.16.a)$$

$$\text{Cos} \psi_{km} = 1 - \frac{\psi_{km}^2}{2} \quad (2.16.b)$$

El lado derecho de la ecuac(2.13) puede ser escrito en términos de nuevos símbolos  $[P'_k]$  y  $[P''_k]$  los cuales son definidos como sigue:

$$P'_k = P_k - V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m G_{km} \quad (2.17.a)$$

(ecuación utilizada en la subrutina MATRZ)

$$P''_k = V_k \sum_{m=1}^N V_m \left( G_{km} \frac{\psi_{km}^2}{2} + B_{km} \frac{\psi_{km}^3}{6} \right) \quad (2.17.b)$$

(ecuación utilizada en la subrutina CONTHE)

El sistema completo de ecuaciones para

la la potencia activa puede ser escrito como:

$$[A] [\theta] = \left[ [P'_k] + [P''_k] \right] \quad (2.18)$$

(ecuación utilizada en Subrutinas SIMORD, REDUC, SOLUC)

### II.3.2. DESARROLLO DEL MODELO DE POTENCIA REACTIVA

Partiendo de la ecuac(2.10.b), el término  $B_{kk}$  contiene la parte imaginaria de la admitancia de los elementos, por lo que se hace necesario primero estudiar la modelación de un transformador.

#### MODELACION DE UN TRANSFORMADOR CON INTERCAMBIADOR DE TAPS (5,8)

Considerese un transformador con cambio de taps en el primario y secundario conectado a las barras  $k, m$  de un sistema como se indica en la FIG. 2.2

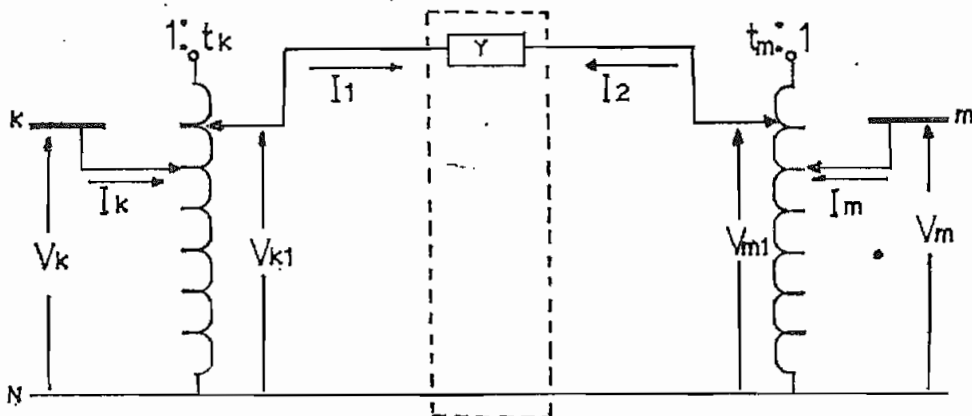


FIG. 2.2 TRANSFORMADOR CON CAMBIO DE TAPS EN EL PRIMARIO Y SECUNDARIO

Definiendo:

$$t_k = \frac{V_{k1}}{V_k} = \frac{I_k}{I_1}$$

(2.19)

$$t_m = \frac{V_{m1}}{V_m} = \frac{I_m}{I_2}$$

Para tener una similitud con el equivalente PI de una línea de transmisión, es conveniente tener el circuito equivalente PI del transformador, por lo que el objetivo será reemplazar la FIG 2.2 por la FIG 2.3

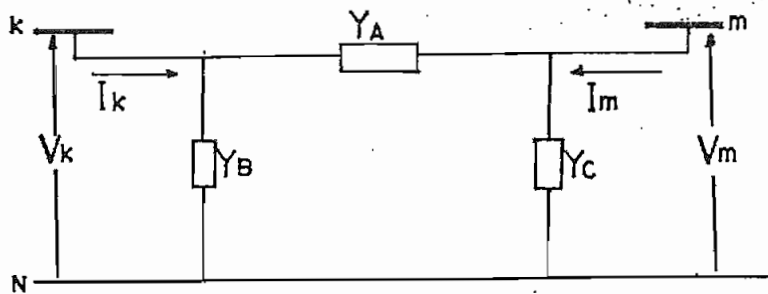


FIG. 2.3 REPRESENTACION PI DEL TRANSFORMADOR CON CAMBIO DE TAPS EN EL PRIMARIO Y SECUNDARIO

A partir de la FIG 2.2 se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -Y \\ -Y & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{m1} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_k & 0 \\ 0 & t_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Reemplazando las expresiones (2.21), (2.22) y (2.23) en (2.20) se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y & -Y \\ -Y & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_k & 0 \\ 0 & t_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

de donde:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_k^2 Y & -t_k t_m Y \\ -t_k t_m Y & t_m^2 Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Por otra parte, considerando el equivalente PI de la Fig. 2.3 se tiene:

$$\begin{aligned} I_k &= V_k Y_B + (V_k - V_m) Y_A \\ I_m &= V_m Y_C + (V_m - V_k) Y_A \end{aligned} \quad (2.26)$$

ó en forma matricial



$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A + Y_B & -Y_A \\ -Y_A & Y_A + Y_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Las relaciones (2.25) y (2.27) deben ser equivalentes, por lo tanto:

$$\begin{aligned} Y_A &= t_k t_m Y \\ Y_B &= Y(t_k^2 - t_k t_m) \\ Y_C &= Y(t_m^2 - t_k t_m) \end{aligned} \quad (2.28)$$

El equivalente  $\pi$  del transformador puede ser representado en términos de la admitancia de transferencia como en la FIG 2.4

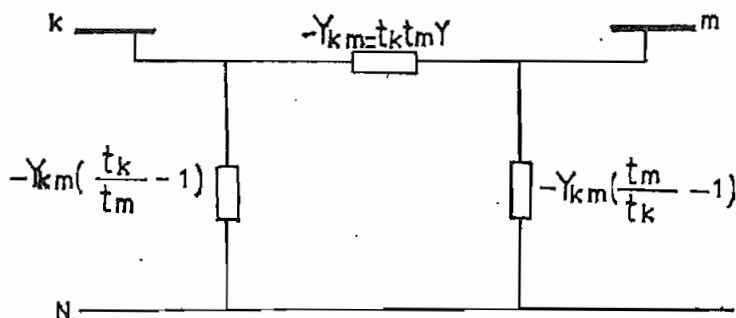


FIG. 2.4 EQUIVALENTE  $\pi$  DEL TRANSF. EN TERMINOS DE LA ADMITANCIA DE TRANSFERENCIA

La admitancia del transformador vista desde los nodos k y m son:

$$Y_{kk} = -Y_{km} - Y_{km} \left( \frac{t_k}{t_m} - 1 \right) = -Y_{km} \frac{t_k}{t_m} \quad (2.29.a)$$

$$Y_{mm} = -Y_{km} - Y_{km} \left( \frac{t_m}{t_k} - 1 \right) = -Y_{km} \frac{t_m}{t_k} \quad (2.29.b)$$

definiendo  $t_{km} \triangleq t_k/t_m$  las ecuac (2.29.a) y (2.29.b) quedan como sigue:

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= -t_{km} Y_{km} \\ Y_{mm} &= -Y_{km}/t_{km} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Al haber encontrado las ecuaciones del transformador, el término  $B_{kk}$  de la ecuac(2.10.b) puede ser expresada en el siguiente sumatorio:

$$B_{kk} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (-t_{km} B_{km} + B_{Y_{km}}) + B_{Ck} \quad (2.31)$$

donde:

$B_{km}$  es la susceptancia de transferencia de la rama  $km$

$t_{km}$  es la relación de taps ( $t_k/t_m$ ) cuando en la rama  $km$  está un transformador. (cuando entre la rama  $km$  existe una línea,  $t_{km}=1.0$ )

$B_{Y_{km}}$  es la susceptancia capacitiva de la rama local  $k$  del equivalente PI de la línea de transmisión entre los nodos  $km$ .

$B_{Ck}$  Susceptancia total del capacitor o reactor shunt conectado a la barra  $k$  (reactor shunt con signo negativo)

Haciendo las substituciones de (2.16.b) y (2.31) en la ecuac(2.10.b) se tiene:

$$Q_k = V_k^2 \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (t_{km} B_{km} - B_{\gamma km}) - V_k^2 B_{ck} - V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m B_{km} + \\ + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \{ G_{km} \text{Sen} \psi_{km} - B_{km} (\text{Cos} \psi_{km} - 1) \} \quad (2.32)$$

dividiendo toda la ecuac(2.32) para  $V_k$  :

$$\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (V_k t_{km} B_{km} - V_m B_{km}) = \frac{Q_k}{V_k} + V_k \left[ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (B_{\gamma km}) + B_{ck} \right] - \\ - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \{ G_{km} \text{Sen} \psi_{km} - B_{km} (\text{Cos} \psi_{km} - 1) \} \quad (2.33)$$

A continuación se reduce el número de ecuaciones representadas por ecuac(2.33)

Definiendo como nodo PQ (barra de carga) como un nodo donde P y Q son establecidos, y nodo PV (barra de voltaje controlado) donde P y V son establecidos, la ecuac(2.33) es reducida al incluir solamente los nodos PQ. El número de nodos Pq en un sistema es  $N'$ , por lo que la ecuac(2.33) puede ser reescrita para los  $N'$  tipo de nodos por transferencia de términos que incluye los nodos PV para el lado derecho.

$$V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N t_{km} B_{km} - \sum_{m \in \mathcal{L}_k} V_m B_{km} = \frac{Q_k}{V_k} + V_k \left[ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (B_{\gamma km}) + B_{ck} \right] - \\ - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m G_{km} \text{Sen} \psi_{km} - B_{km} (\text{Cos} \psi_{km} - 1) + \sum_{m \in \mathcal{L}_k} V_m B_{km} \quad (2.34)$$

donde los nuevos términos son definidos como sigue:

$\eta_k \rightarrow$  El sistema de ramas entre k y nodos PQ

$\mu_k \rightarrow$  El sistema de ramas entre k y nodos PV

El lado izquierdo de la ecuac(2.34) puede ser escrito en forma matricial como  $[C][V]$ ; donde  $[V]$  es un vector de dimensión  $N'$  que contiene las magnitudes de voltajes de barras;  $[C]$  es una matriz de dimensión  $N \times N'$  con elementos  $C_{km}$  definidos así:

$$C_{kk} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N t_{km} B_{km} \quad (2.35.a)$$

$$C_{km} = -B_{km} \quad \text{para } m \in \eta_k \quad (2.35.b)$$

(ecuaciones utilizadas en la subrutina MATRZ)

Las substituciones de las funciones seno y coseno en términos indicados por ecuac(2.11) son reemplazados en el lado derecho de la ecuac(2.34); por lo que la ecuac(2.34) puede ser escrito en términos de los nuevos símbolos  $Q'_k$  y  $Q''_k$  los cuales se definen así:

$$Q'_k = \frac{Q_k}{V_k} + V_k \left[ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (B_{\gamma km}) + B_{ck} \right] + \sum_{m \in \mu_k} V_m B_{km} \quad (2.36.a)$$

$$Q''_k = - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \left\{ G_{km} \left( \psi_{km} - \frac{\psi_{km}^3}{6} \right) + B_{km} \frac{\psi_{km}^2}{2} \right\} \quad (2.36.b)$$

(ecuaciones utilizadas en la subrutina CONVOL)

El sistema completo de ecuaciones para la

potencia reactiva puede ser escrito como sigue:

$$[C][V] = [Q_k'] + [Q_k''] \quad (2.37)$$

(ecuación utilizada en las subrutinas SIMORD, REDUC, SOLUC)

#### II.4. SIMULACION DE CONTINGENCIAS (4,8)

Al ser retirada una línea del sistema, la matriz admitancia de barras  $Y$ , sufre cuatro modificaciones ( dos en los elementos de la admitancia inscidente y dos en los de la admitancia de transferencia).

La admitancia de la línea a ser retirada debe ser restada desde los elementos de la diagonal de la matriz admitancia(ed. correspondiente a las admitancias de inscendencia de los nodos al que pertenece la línea retirada) y sumado a los dos elementos fuera de la diagonal(ed. correspondiente a las admitancias de transferencia de los nodos al que pertenece la línea retirada).

Por lo que al remover una línea entre los nodos  $k$  y  $m$ , la cual tiene una admitancia  $y_{km}$ , las modificaciones que se deben hacer en los cuatro elementos de la matriz admitancia son:

$$Y'_{kk} = Y_{kk} - y_{km}$$

$$Y'_{mm} = Y_{mm} - y_{km}$$

$$Y'_{km} = Y_{km} + j_{km} \quad (2.38)$$

$$Y'_{mk} = Y_{mk} + j_{km}$$

donde:

$Y_{kk}$  indica un elemento original de la matriz admitancia de barra.

$Y'_{kk}$  indica el elemento modificado

$j_{km}$  es la admitancia de la línea a ser retirada

Estos cuatro cambios pueden ser adaptados para la matriz  $[A]$ ; estos cambios son definidos como sigue:

$$\Delta a_{kk} = \Delta a_{mm} = -\Delta a_{km} = -\Delta a_{mk} = V_k V_m B_{km} \quad (2.39)$$

El cambio en la matriz  $[A]$  puede ser expresada en forma matricial como:

$$[A'] = [A] + \Delta a_{km} [MA] [MA]^T \quad (2.40)$$

donde:

$MA$  es un vector de dimensión  $N$  en el cual todos los elementos son ceros, excepto el elemento  $k$  el cual es  $+1$  y el elemento  $m$  el cual es  $-1$

La inversa de  $[A']$  esta dada por:

$$[ [A] + \Delta a_{km} [MA] [MA]^T ]^{-1} = [A]^{-1} - \left( \frac{1}{\Delta a_{km}} + [MA]^T [A]^{-1} [MA] \right)^{-1} \times$$

$$[A]^{-1} [MA] [MA]^T [A]^{-1} \quad (2.41)$$

Para la simulación de contingencias, la ecuac(2.18) puede ser reescrita como sigue:

$$\left[ [A] + \Delta C_{km} [MA] [MA]^T \right] \left[ [\theta] + [\Delta\theta] \right] = \left[ [P'] + [P''] \right] \quad (2.42)$$

donde  $[\Delta\theta]$  es el vector de la corrección del ángulo de fase que causa la contingencia.

Una similar ecuación puede ser escrita para la ecuac(2.37) para la corrección del voltaje.

$$\left[ [C] + \Delta C_{km} [MC] [MC]^T \right] \left[ [V] + [\Delta V] \right] = \left[ [Q'] + [Q''] \right] \quad (2.43)$$

donde:

$\Delta C_{km}$  es el cambio en el elemento km de  $[C]$  para la salida o retiro del elemento,  $[MC]$  es un vector de dimensión  $N'$  en el cual todos los elementos son ceros, excepto para el elemento k el cual es +1 y para el elemento m el cual es -1

Substituyendo los resultados de la ecuac(2.41) en la ecuac(2.42) se tiene:

$$\left[ [\theta] + [\Delta\theta] \right] = \left[ [A]^{-1} - \left( \frac{1}{\Delta C_{km}} + [MA]^T [A]^{-1} [MA] \right) \cdot [A]^{-1} [MA] [MA]^T [A]^{-1} \right] \cdot \left[ [P'] + [P''] \right] \quad (2.44)$$

Realizando una similar substitución en la ecuac(2.43) se tiene:

$$[[V] + [\Delta V]] = \left\{ [C]^{-1} - \left( \frac{1}{\Delta C_{km}} + [MC]^T [C]^{-1} [MC] \right)^{-1} [C]^{-1} [MC] [MC]^T [C]^{-1} \right\} [[Q'] + [Q'']] \quad (2.45)$$

Usando los resultados de las ecuacs(2.18) y (2.37), las ecuac(2.44) y (2.45) pueden ser simplificadas así:

$$[\Delta \theta] = - \left( \frac{1}{\Delta C_{km}} + [MA]^T [A]^{-1} [MA] \right)^{-1} [A]^{-1} [MA] [MA]^T [\theta] \quad (2.46.a)$$

$$[\Delta V] = - \left( \frac{1}{\Delta C_{km}} + [MC]^T [C]^{-1} [MC] \right)^{-1} [C]^{-1} [MC] [MC]^T [V] \quad (2.46.b)$$

además,

$$[MA]^T [\theta] = (\theta_k - \theta_m) \quad (2.47.a)$$

$$[MC]^T [V] = (V_k - V_m) \quad (2.47.b)$$

Para una notación conveniente, se definen dos nuevos vectores como sigue:

$$[ZA] = [A]^{-1} [MA] \quad (2.48.a)$$

$$[ZC] = [C]^{-1} [MC] \quad (2.48.b)$$

Premultiplicando ecuac(2.48.a) por MA y ecuac(2.48.b) por MC se tiene:

$$[MA]^T [ZA] = [MA]^T [A]^{-1} [MA] = (ZAK - ZAm) \quad (2.49.a)$$

$$[MC]^T [ZC] = [MC]^T [C]^{-1} [MC] = (ZCk - ZCm) \quad (2.49.b)$$



Incorporando las ecuaciones anteriores en (2.46.a) y (2.46.b) se tiene:

$$[\Delta\theta] = -\left(\frac{1}{\Delta Q_{km}} + Z_{Ak} - Z_{Am}\right)^{-1} (\theta_k - \theta_m) Z_A \quad (2.50.a)$$

(ecuación utilizada en la subrutina CONTHE)

$$[\Delta V] = -\left(\quad + Z_{Ck} - Z_{Cm}\right)^{-1} (V_k - V_m) Z_C \quad (2.50.b)$$

(ecuación utilizada en la subrutina CONVOL)

donde:

Los escalares  $Z_{Ak}$  y  $Z_{Am}$  son elementos de  $Z_A$ ; así como los escalares  $Z_{Ck}$  y  $Z_{Cm}$  son elementos de  $Z_C$ ;  $\theta_k$  y  $\theta_m$  son elementos de  $\theta$  solución de la ecuac(2.18) antes de producirse la contingencia, y  $V_k$  y  $V_m$  son elementos de  $V$ ; solución de la ecuac(2.37) también antes de producirse la contingencia

Las siguientes acotaciones son convenientes mencionarlos con respecto a la ecuac(2.46.b) para formar la ecuac(2.50.b) con respecto a la formación del vector MC.

- Solamente +1 es requerido para el elemento k del vector MC si la contingencia se produce en un elemento que esté conectada entre una barra PQ y una PV (o barra de referencia)

- La ecuac(2.50.b) no requiere ser resuelta si el elemento

## C A P I T U L O   I I I

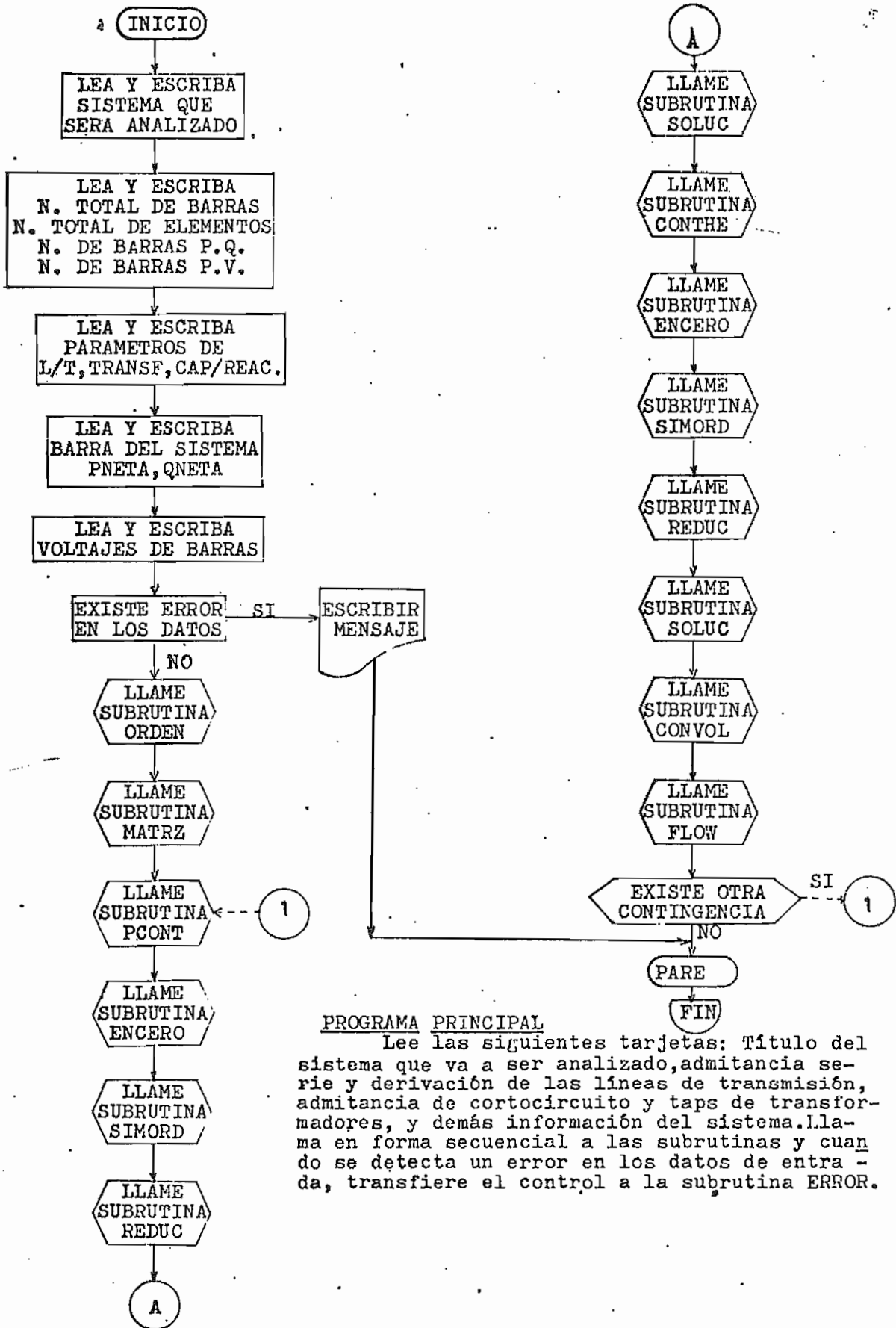
### PROGRAMA FORTRAN

#### III.1. INTRODUCCION

En este capítulo se presenta en detalle el programa en lenguaje FORTRAN IV , que ha sido elaborado en la computadora existente en la Escuela Politécnica Nacional.

El programa elaborado para el estudio de Simulación de Contingencias en SEP, se basa en la referencia (4), y consta de un programa principal y once subrutinas las cuales se mencionan y se describen a continuación:

- Subrutina ORDEN
- Subrutina MATRZ
- Subrutina PCONT
- Subrutina ENCERO
- Subrutina SIMORD
- Subrutina REDUC
- Subrutina SOLUC
- Subrutina CONTHE
- Subrutina CONVOL
- Subrutina FLOW
- Subrutina ERROR



**PROGRAMA PRINCIPAL**

Lee las siguientes tarjetas: Título del sistema que va a ser analizado, admitancia serie y derivación de las líneas de transmisión, admitancia de cortocircuito y taps de transformadores, y demás información del sistema. Llama en forma secuencial a las subrutinas y cuando se detecta un error en los datos de entrada, transfiere el control a la subrutina ERROR.



60 TO 68

```

34 IF(TK(I) .EQ. 0. .AND. TM(I) .EQ. 0.) GO TO 36
   IF(TK(I) .NE. 0. .AND. TM(I) .NE. 0.) GO TO 37
68 IF(TK(I) .EQ. 0.) GO TO 65
   PRINT 67,NE(I),NK(I),X,TK(I)
67 FORMAT(/,1X,T12,I3,T22,I3,T30,I3,T46,F7.4,T77,F7.4,/)
   GO TO 35
36 PRINT 38,NE(I),NK(I),NM(I),X
38 FORMAT(/,1X,T12,I3,T22,I3,T30,I3,T46,F7.4,/)
   TK(I)=1.
   TM(I)=1.
   GO TO 35
37 PRINT 39,NE(I),NK(I),NM(I),X,TK(I),TM(I)
39 FORMAT(/,1X,T12,I3,T22,I3,T30,I3,T46,F7.4,T77,F7.4,T84,F7.4,/)
   GO TO 35
65 PRINT 66,NE(I),NK(I),NM(I),X,TM(I)
66 FORMAT(/,1X,T12,I3,T22,I3,T30,I3,T46,F7.4,T84,F7.4,/)
35 YR(I)=0.
   YI(I)=TK(I)*TM(I)/X
   GO TO 4
68 YR(I)=R/(R**2+X**2)
   YI(I)=X/(R**2+X**2)
4 CONTINUE
   PRINT 7
7 FORMAT(//,T54,'DATOS DE BARRA',//,T54,I4('-',)//,T9,'N. DE',5X,'NOM
*BRE',5X,'TIPO DE',5X,'VMOD(PU)',5X,'ANG(GRAD)',5X,'POTENCIA DE GFN
*ERACIUN',5X,'POTENCIA DE CARGA',//,T9,'BARRA',17X,'BARRA',36X,'MW',
*11X,'MVAR',11X,'MW',7X,'MVAR',//)
→ DU 8 I=1,NTB
   READ 9,NBS(I),(NOMBRE(J),J=1,10),IB(I),V(I),THETA(I),PG,QG,PC,QC
9 FORMAT(I3,I0A1,I2,6F8.4)
   K2=K2+1
   DO 88 L=1,10
88 NJM(K2,L)=NOMBRE(L)
   P(I)=(PG-PC)/SBASE
   Q(I)=(QG-QC)/SBASE
   IF(I .NE. NBS(I)) GO TO 69
   IF(I .LE. NBC) GO TO 54
   IF(I .EQ. NTB) GO TO 55
   IF(IB(I) .EQ. 2) GO TO 30
   INF=2
   CALL ERROR(INF)
   STOP
54 IF(IB(I) .EQ. 1) GO TO 28
   INF=1
   CALL ERROR(INF)
   STOP
55 IF(IB(I) .EQ. 3) GO TO 56
   INF=3
   CALL ERROR(INF)
   STOP
69 INF=8
   CALL ERROR(INF)
   STOP
56 PRINT 32,NBS(I),(NOMBRE(J),J=1,10),V(I),THETA(I),PG,QG,PC,QC
32 FORMAT(/,T8,I3,7X,I0A1,T30,'REFER',T42,F6.4,T56,F6.2,T70,F8.4,3X,F
*8.4,T97,F3.4,3X,F8.4,/)
   GO TO 8
28 PRINT 29,NBS(I),(NOMBRE(J),J=1,10),V(I),THETA(I),PG,QG,PC,QC
29 FORMAT(/,T8,I3,7X,I0A1,T32,'PQ. ',T42,F6.4,T56,F6.2,T70,F8.4,3X,F
*8.4,T97,F3.4,3X,F8.4,/)
   GO TO 8
30 PRINT 31,NBS(I),(NOMBRE(J),J=1,10),V(I),THETA(I),PG,QG,PC,QC
31 FORMAT(/,T8,I3,7X,I0A1,T32,'PV. ',T42,F6.4,T56,F6.2,T70,F8.4,3X,F
*8.4,T97,F3.4,3X,F8.4,/)
8 CONTINUE
   DO 11 I=1,NTB
11 THETA(I)=THETA(I)*3.14159/180.
   DO 48 I=1,NTB
   VI(I)=V(I)
48 TI(I)=THETA(I)
   CALL ORDEN(NTE,NE,NK,NM,YR,YI,YIS,TK,TM),
   CALL MATRZ(NTE,NK,NM,YR,YI,INF,NFJC,A,C,I2,I2C,NTB,NBC,NTC,NTJC,TK,
→ *TM,V,I3,P1,P)
   NFA(NTJ+1)=NF(NTB+1)
   DO 14 M=1,NTB
   NFA(M)=NF(M)
   K=NF(M)
   J=NF(M+1)-1
   DO 14 I=K,J
   I2A(I)=I2(I)
   AA(I)=A(I)
14 CONTINUE
   NFJCA(NBC+1)=NFJC(NBC+1)
   DO 18 M=1,NBC
   NFJCA(M)=NFJC(M)

```

→ P... ..

open

P... ..

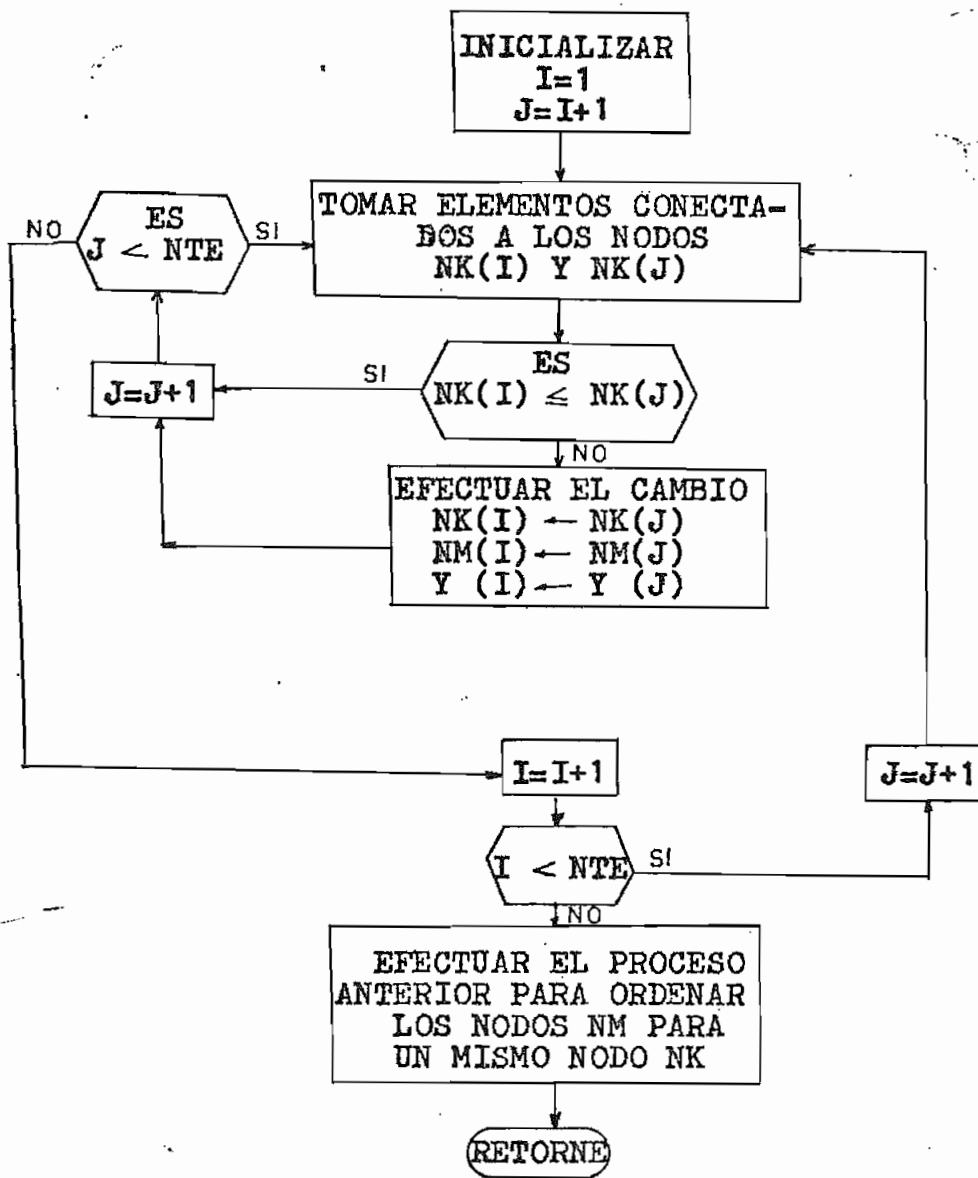
S=NTJCC(NTJ) - 1

```

DO 18 I=K,J
  I2CA(I)=I2C(I)
  CA(I)=C(I)
18 CONTINUE
READ 43,NLR
→ IF(NLR.GT.NL) GO TO 61
GO TO 62
61 INF=7

CALL ERROR(INF)
STOP
45 FORMAT(I3)
62 NC=1
44 CALL PCONT(NTB,P1,MA,V,NKC,NMC,NEC,AUXP)
→ NTND=1.50
CALL ENGERO(NTND,NTB,LNXT,NF,NOZE,ZA,NSEQ,MA,A,LF)
CALL SIMORD(NTB,LF,NF,NOZE,I2,LNXT,A,NSEQ)
CALL REDUC(NTB,NF,NOZE,I2,LNXT,A,NSEQ,LF)
CALL SULUC(NTB,NF,I2,LNXT,A,ZA,NSEQ)
→ CALL CONTHE(NTB,A,ZA,P1,YI,YR,THETA,NKC,NMC,AUXI,NEC,NTE,NF,
* I2,LNXT,NSEQ,NK,NM,V,AUXYR,MAXIT,EPSI,HT,NE)
IF(HT.GE.MAXIT) GO TO 20
YI(NEC)=AJXI
DO 22 I=1,NBC
22 MC(I)=0
IF(IB(NKC).EQ.1.AND.IB(NMC).EQ.1) GO TO 23
IF(IB(NKC).NE.1.AND.IB(NMC).NE.1) GO TO 100
GO TO 40
100 PRINT 41
41 FORMAT(/,T40,'LA LINEA RETIRADA ESTA CONECTADA ENTRE NODOS PV.')
```

SUBROUTINE CONECTADA ENTRE NODOS PV.



### SUBROUTINA ORDEN

Encargada de ordenar los nodos del sistema en forma ascendente de acuerdo al nodo NK al que están conectados; y para elementos que tienen el mismo nodo NK, los ordena en forma ascendente de acuerdo a los nodos NM. Este ordenamiento es fundamental para poder formar las matrices A y C

SUBROUTINE URDEN(NTE,NE,NK,NM,YR,YI,YIS,TK,TM)  
SUBROUTINA ENCARGADA DE URDENAR LOS NODOS, DE ACUERDO A LOS  
REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA.  
DIMENSION NL(50),NK(50),NM(50),YR(50),YI(50),YIS(50),TK(50),TM(50)

N=NTE-1  
ORDENAMIENTO DE LOS ELEMENTOS, DE ACUERDO AL NODO K AL QUE ESTAN  
CONECTADOS

DO 2 I=1,N

J=I+1

DO 2 M=J,NTE

IF(NK(I)-NK(M))2,2,3

3 K=NK(I)

L=NM(I)

A=YR(I)

B=YI(I)

C=NE(I)

D=YIS(I)

E=TK(I)

F=TM(I)

NK(I)=NK(M)

NM(I)=NM(M)

YR(I)=YR(M)

YI(I)=YI(M)

NE(I)=NE(M)

YIS(I)=YIS(M)

TK(I)=TK(M)

TM(I)=TM(M)

NK(M)=K

NM(M)=L

YR(M)=A

YI(M)=B

NE(M)=C

YIS(M)=D

TK(M)=E

TM(M)=F

2 CONTINUE

ORDENAMIENTO DE LOS ELEMENTOS, PARA UN MISMO NODO K, DE ACUERDO AL  
NODO M

DO 1 I=1,N

J=I+1

DO 1 M=J,NTE

IF(NK(I)-NK(M))1,4,1

4 IF(NM(I)-NM(M))1,1,5

5 L=NM(I)

A=YR(I)

B=YI(I)

C=NE(I)

D=YIS(I)

E=TK(I)

F=TM(I)

NM(I)=NM(M)

YR(I)=YR(M)

YI(I)=YI(M)

NE(I)=NE(M)

YIS(I)=YIS(M)

TK(I)=TK(M)

TM(I)=TM(M)

NM(M)=L

YR(M)=A

YI(M)=B

NE(M)=C

YIS(M)=D

TK(M)=E

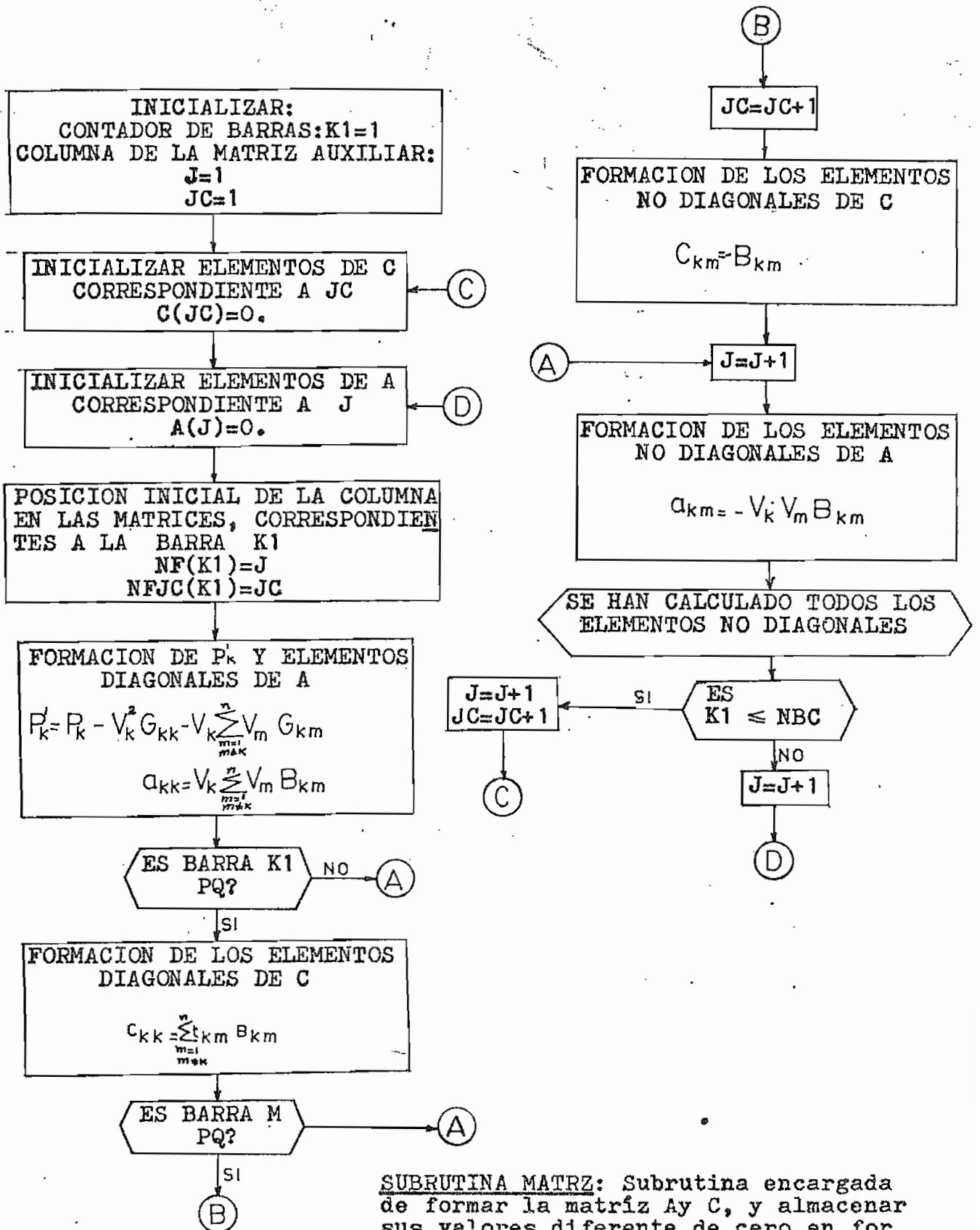
TM(M)=F

1 CONTINUE

RETURN

END





**SUBROUTINA MATRZ:** Subrutina encargada de formar la matriz  $A$  y  $C$ , y almacenar sus valores diferente de cero en forma vectorial; además realiza el cálculo del vector  $P'$

SUBROUTINE MATRZ(NTE,NK,NM,YR,YI,NF,NFJC,A,C,I2,I2C,NTB,NBC,NTC,NT  
\*JC,TK,TV,IB,PI,P)

DIMENSION NK(50),NM(50),YR(50),YI(50),NF(51),NFJC(51),A(150),C(150)  
\*,I2(150),I2C(150),TK(50),TV(50),IB(50),PI(50),P(50)

37

C

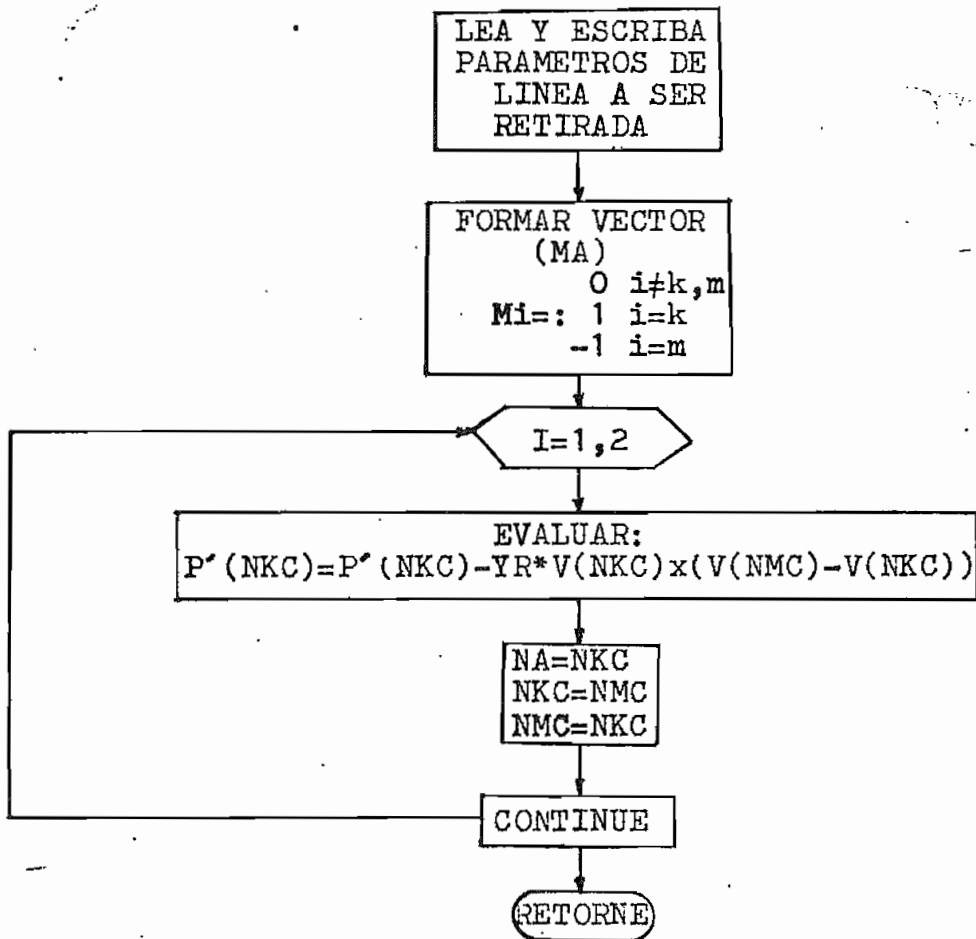
```
J=1
JC=1
K1=1
NF(K1)=J
NFJC(K1)=JC
FORMACION DE LOS ELEMENTOS DIAGONALES Y PI
2 C(JC)=0.
1 A(J)=0.
GKK=0.
SUM=0.
DO 3 K=1,NTE
  IF(NK(K).EQ.K1) GO TO 4
  GO TO 3
4 KK=NK(K)
  MM=NM(K)
  A(J)=A(J)+V(MM)*YI(K)
  SUM=SUM-V(MM)*YR(K)
  GKK=GKK+YR(K)
  IF(IB(KK).NE.1) GO TO 3
  C(JC)=C(JC)+YI(K)*TK(K)/TM(K)
  I2C(JC)=K1
3 CONTINUE
DO 5 K=1,NTE
```

```
  IF(NM(K).EQ.K1) GO TO 6
  GO TO 5
6 KK=NM(K)
  MM=NK(K)
  A(J)=A(J)+V(MM)*YI(K)
  SUM=SUM-V(MM)*YR(K)
  GKK=GKK+YR(K)
  IF(IB(KK).NE.1) GO TO 5
  C(JC)=C(JC)+YI(K)*TM(K)/TK(K)
  I2C(JC)=K1
5 CONTINUE
A(J)=V(K1)*A(J)
PI(K1)=P(K1)-V(K1)**2*GKK-V(K1)*SUM
I2(J)=K1
```

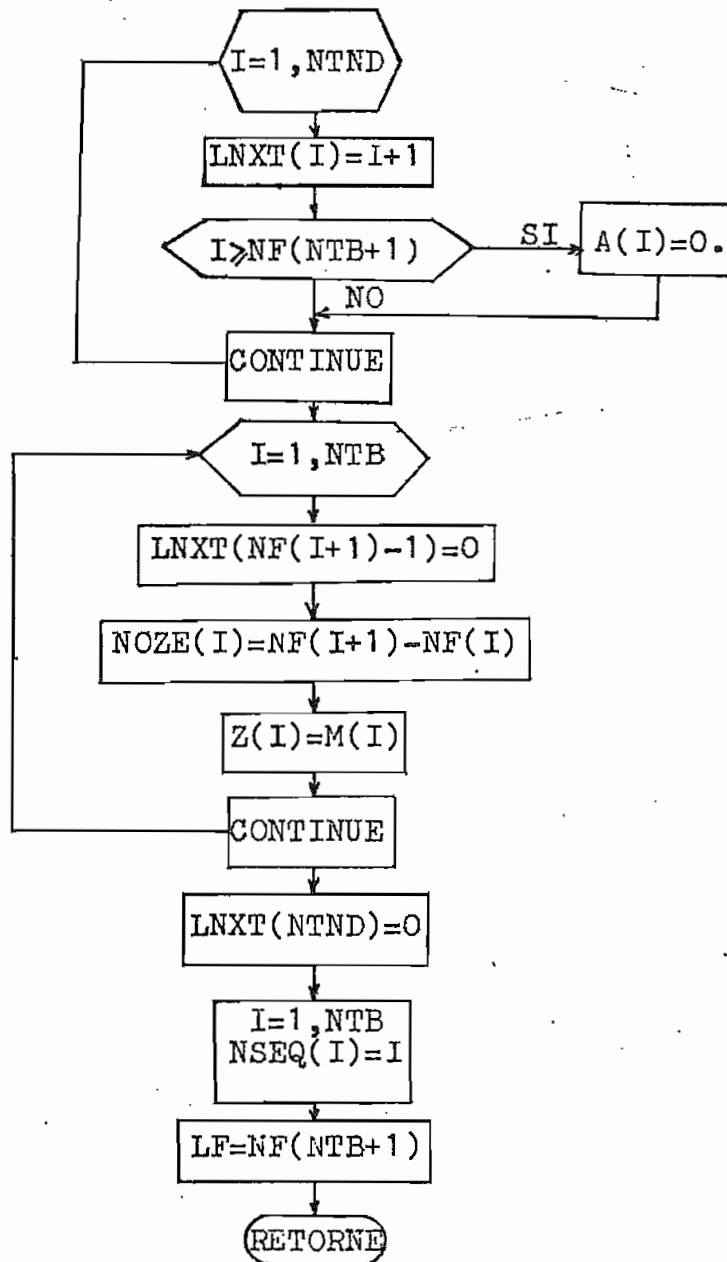
C

```
FORMACION DE LOS ELEMENTOS NO DIAGONALES
N=0
IF(K1.EQ.NTB) GO TO 24
DO 7 M=1,NTE
  IF(NK(M).EQ.K1) GO TO 8
  GO TO 7
8 IF(NM(M)-N) 7,9,10
9 KK=NK(M)
  MM=NM(M)
  IF( (IB(KK).EQ.1).AND.(IB(MM).EQ.1) ) GO TO 11
  GO TO 12
10 N=NM(M)
  J=J+1
  KK=NK(M)
  MM=NM(M)
  A(J)=0.
  IF( (IB(KK).EQ.1).AND.(IB(MM).EQ.1) ) GO TO 13
  GO TO 12
13 JC=JC+1
  C(JC)=0.
11 C(JC)=C(JC)-YI(M)
  I2C(JC)=N
12 A(J)=A(J)-V(KK)*V(MM)*YI(M)
  I2(J)=N
7 CONTINUE
GO TO 25
26 N=0
DO 14 M=1,NTE
  IF(NM(M).EQ.K1) GO TO 15
  GO TO 14
```

```
15 IF(NK(M)-N) 14,16,17
16 KK=NK(M)
   MM=NM(M)
   IF(IB(KK) .EQ. 1 .AND. IB(MM) .EQ. 1)GO TO 18
   GO TO 19
17 N=NK(M)
   J=J+1
   KK=NK(M)
   MM=NM(M)
   A(J)=0.
   IF(IB(KK) .EQ. 1 .AND. IB(MM) .EQ. 1)GO TO 20
   GO TO 19
20 JC=JC+1
   C(JC)=0.
18 C(JC)=C(JC)-YI(M)
   I2C(JC)=N
19 A(J)=A(J)-V(KK)*V(MM)*YI(M)
   I2(J)=N
14 CONTINUE
   IF(K1 .NE. 1) GO TO 27
25 K1=K1+1
   IF(K1 .LE. NBC) NFJC(K1)=JC+1
   NF(K1)=J+1
   GO TO 26
27 IF(K1 .LE. NBC) GO TO 21
   GO TO 22
21 J=J+1
   JC=JC+1
   GO TO 2
22 NTJC=JC
   J=J+1
   GO TO 1
24 NTC=J
   NF(NTB+1)=NTC+1
   NFJC(NBC+1)=NTJC+1
RETURN
END
```

SUBROUTINA PCONT

Retira los efectos de  $P_k$  y  $P_m$  del vector ( $P'$ ) al retirarse la línea de transmisión entre los nodos  $k, m$ ; además se encarga de formar el vector (MA) correspondiente.

SUBROUTINA ENCERO

Se encarga de almacenar información requerida por las subrutinas SIMORD, REDUC y SOLUC.

SUBROUTINE PCOUNT(NTB,PI,MA,V,NKC,NMC,NEC,AUXP)  
SUBROUTINA ENCARGADA DE RETIRAR LOS EFECTOS DE P1(K),P1(M),AL  
RETIRARSE LA LINEA K M; ADEMÁS, SE ENCARGA DE FORMAR EL VECTOR MA  
DIMENSION P1(50),MA(50),V(50),AUXP(2),IB(50)

41

```
1 READ 1,NEC,NKC,NMC,R,X
1 FORMAT(3I3,2F7.4)
PRINT 2,NKC,NKC,NMC,R,X
2 FORMAT(//,T40,'DATOS DE LINEA A SER RETIRADA',/,T46,29(' '),//,T44
*, 'NEC',T49,'NKC',T54,'NMC',T62,'R(PU)',T72,'X(PU)',//,T43,I3,T48,I
*3,T53,I3,T60,F7.4,T70,F7.4,5(/),T56,'RESULTADOS',/,T56,10(' '),//)
YR=R/(R**2+X**2)
DO 3 I=1,NTB
MA(I)=J
3 CONTINUE
IF(NKC.LT.NMC) GO TO 4
MENOR=NMC
NMC=NKC
NKC=MENOR
4 MA(NKC)=1
MA(NMC)=-1
AUXP(1)=P1(NKC)
AUXP(2)=P1(NMC)
DO 9 I=1,2
P1(NKC)=P1(NKC)-YR*V(NKC)*(V(NMC)-V(NKC))
NA=NKC
NKC=NMC
NMC=NA
9 CONTINUE
RETURN
END
```

SUBROUTINE ENCERU(NTND,NTB,LNXT,NF,NOZE,Z,NSEQ,M,A,LF)  
DIMENSION LNXT(150),NF(51),NOZE(80),Z(50),NSEQ(80),M(50),A(NTND)

```
DO 22 I=1,NTND
LNXT(I)=I+1
IF(I.GE.NF(NTB+1)) A(I)=0.
22 CONTINUE
DO 23 I=1,NTB
IK=NF(I+1)-1
LNXT(IK)=0
NOZE(I)=NF(I+1)-NF(I)
Z(I)=M(I)
23 CONTINUE
LNXT(NTND)=0
DO 24 I=1,NTB
NSEQ(I)=I
LF=NF(NTB+1)
RETURN
END
```



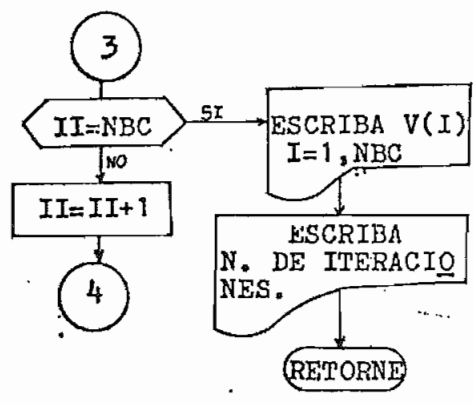
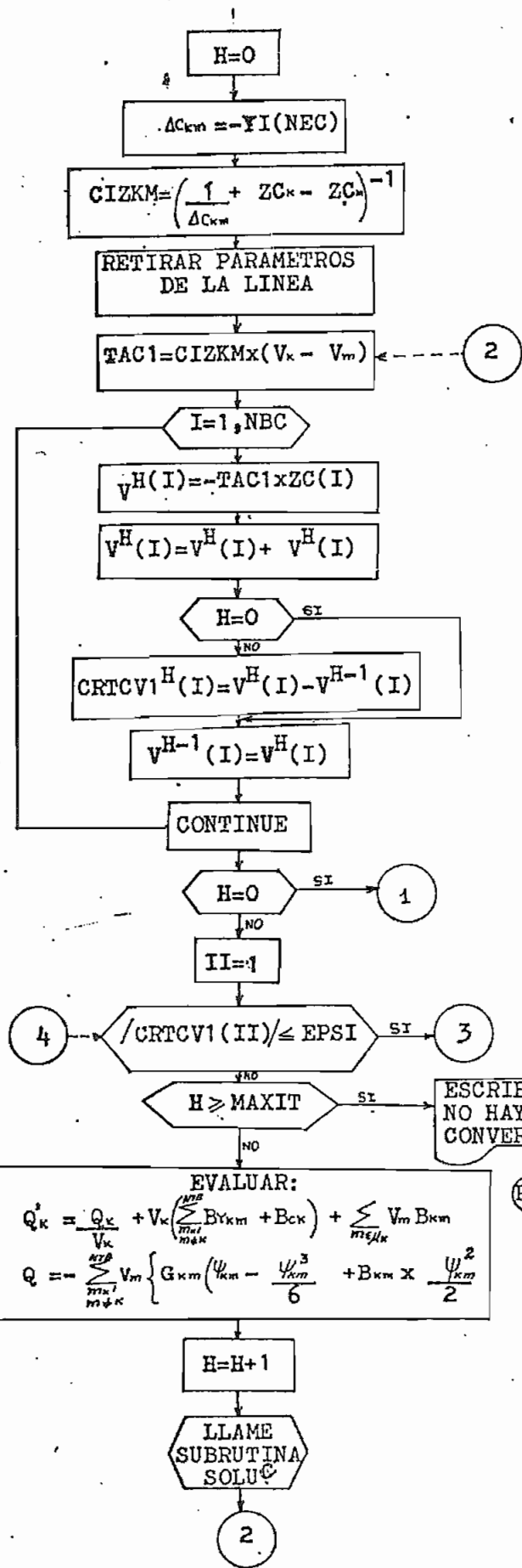
```

SUBROUTINE CONTHE(NTB,A,ZA,P1,YI,YR,THETA,NKC,NMC,AUXI,NEC,NTE,NF,
*12,LNXT,NSEQ,NK,NM,V,AUXYR,MAXIT,EPSI,H,NE)
SUBROUTINA ENCARGADA DE ENCONTRAR LOS ANGULOS DE BARRA DEL SISTEMA
AL PRODUCIRSE LA CONTINGENCIA
DIMENSIONA(150),ZA(50),P1(50),YI(50),V(50),YR(50),THETA(50),P2(50)
DIMENSIONDTHETA(50),THETAU(50),CRITCV(50),NF(50),I2(150),LNXT(150)
*) ,NSEQ(40),NK(50),NM(50),NE(50)
INTEGER H,HT
L=1
14 IF(NE(L) .EQ. NEC) GO TO 20
L=L+1
GO TO 14
20 NEC=L
AUXYR=YR(NEC)
YR(NEC)=0.
AUXI=YI(NEC)
H=0
DAKM=-V(NKC)*V(NMC)*YI(NEC)
AZKM=1./DAKM+ZA(NKC)-ZA(NMC)
AIZKM=1./AZKM
YI(NEC)=0.
10 TAC=AIZKM*(THETA(NKC)-THETA(NMC))
DO 3 I=1,NTB
DTHETA(I)=-TAC*ZA(I)
THETA(I)=THETA(I)+DTHETA(I)
IF(H .EQ. 0) GO TO 17
CRITCV(I)=THETA(I)-THETAU(I)
17 THETAU(I)=THETA(I)
3 CONTINUE
IF(H .EQ. 0) GO TO 18
II=1
9 IF(ABS(CRITCV(II)) .LE. EPSI) GO TO 4

18 IF(H .GE. MAXIT) GO TO 5
18 K1=1
13 SUMK2=0.
DO 6 K=1,NTE
IF(NK(K) .EQ. K1) GO TO 7
GO TO 6
7 KK=NK(K)
MM=NM(K)
FIKM=THETA(KK)-THETA(MM)
SUMK2=SUMK2+V(MM)*(-YR(K)*FIKM**2/2+YI(K)*FIKM**3/6)
6 CONTINUE
DO 8 K=1,NTE
IF(NM(K) .EQ. K1) GO TO 11
GO TO 8
11 KK=NM(K)
MM=NK(K)
FIKM=THETA(KK)-THETA(MM)
SUMK2=SUMK2+V(MM)*(-YR(K)*FIKM**2/2+YI(K)*FIKM**3/6)
8 CONTINUE
P2(K1)=V(K1)*SUMK2
IF(K1 .EQ. NTB) GO TO 12
K1=K1+1
GO TO 13
12 H=H+1
DO 25 I=1,NTB
25 THETA(I)=P1(I)+P2(I)
CALL SOLUC(NTB,NF,I2,LNXT,A,THETA,NSEQ)
DO 26 I=1,NTB
26 THETA(I)=THETA(I)-THETA(NTB)
GO TO 10
4 IF(II .EQ. NTB) RETURN
II=II+1
GO TO 9
5 PRINT 24,H
24 FORMAT(7,I10,'NO HAY CONVERGENCIA DE ANGULOS DE VOLTAJE EN',I3,' I
*TERACIONES',7)
RETURN
END

```





SUBROUTINA CONVOL

Subrutina encargada de controlar el flujo lógico que conforma el lazo iterativo para el cálculo de los módulos de los voltajes de barras al producirse la contingencia.

```

SUBROUTINE CONVOL (NTH,NBC,THETA,NKC,NMC,YI,ZC,V,YIS,IB,Q,RCK,C,YR
*,NEC,NTE,NK,NM,NFJC,I2C,LNXT,NSEQ,AUXYS,MAXIT,EPSI,HT,H,NUM)
SUBROUTINA ENCARGADA DE ENCONTRAR LOS MODULOS DE LOS VOLTAJES DE
BARRA DEL SISTEMA, AL PRODUCIRSE LA CONTINGENCIA
DIMENSION THETA(50),YI(50),ZC(50),V(50),DV(50),CRICV1(50),VO(50)
DIMENSION YIS(50),IB(50),Q(50),Q1(50),Q2(50),RCK(50),C(150),YR(50)
DIMENSION NK(50),NM(50),NFJC(50),I2C(150),LNXT(150),NSEQ(40)
DIMENSION NUM(50,10)
INTEGER H,HT
H=0
AUXYS=YIS(NEC)
DCKM=-YI(NEC)
IF (IB(NMC) .EQ. 1) GO TO 20
AUXV=V(NMC)
V(NMC)=0.
ZC(NMC)=0.
20 CZKM=1./DCKM+ZC(NKC)-ZC(NMC)
CIZKM=1./CZKM
YI(NEC)=0.
YIS(NEC)=0.
10 TAC1=CIZKM*(V(NKC)-V(NMC))
DO 3 I=1,NBC
DV(I)=-TAC1*ZC(I)
V(I)=V(I)+DV(I)
IF (H .EQ. 0) GO TO 17
CRICV1(I)=V(I)-VO(I)
17 VO(I)=V(I)
3 CONTINUE
IF (H .EQ. 0) GO TO 18
II=1
9 IF (ABS(CRICV1(II)) .LE. EPSI) GO TO 4
IF (H .GE. MAXIT) GO TO 5
IF (IB(NMC) .EQ. 1) GO TO 18
V(NMC)=AUXV
18 KI=1
13 SUMV=0.
SUMBY=0.
SUMQ2=0.
DO 6 K=1,NTE
IF (NK(K) .EQ. K1) GO TO 7
GO TO 6
7 KK=NK(K)
MM=NM(K)

```

```

FIKM=THETA(KK)-THETA(MM)
SUMBY=SUMBY+YIS(K)
SUMQ2=SUMQ2+V(MM)*(-YR(K))*(FIKM-FIKM**3/6)+YI(K)*FIKM**2/2)
IF (IB(KK) .NE. 1) GO TO 6
IF (IB(MM) .EQ. 1) GO TO 6
SUMV=SUMV+V(MM)*YI(K)
6 CONTINUE
DO 8 K=1,NTE
IF (NM(K) .EQ. K1) GO TO 11
GO TO 8
11 KK=NM(K)
MM=NK(K)
FIKM=THETA(KK)-THETA(MM)
SUMBY=SUMBY+YIS(K)
SUMQ2=SUMQ2+V(MM)*(-YR(K))*(FIKM-FIKM**3/6)+YI(K)*FIKM**2/2)
IF (IB(KK) .NE. 1) GO TO 8
IF (IB(MM) .EQ. 1) GO TO 8
SUMV=SUMV+V(MM)*YI(K)
8 CONTINUE

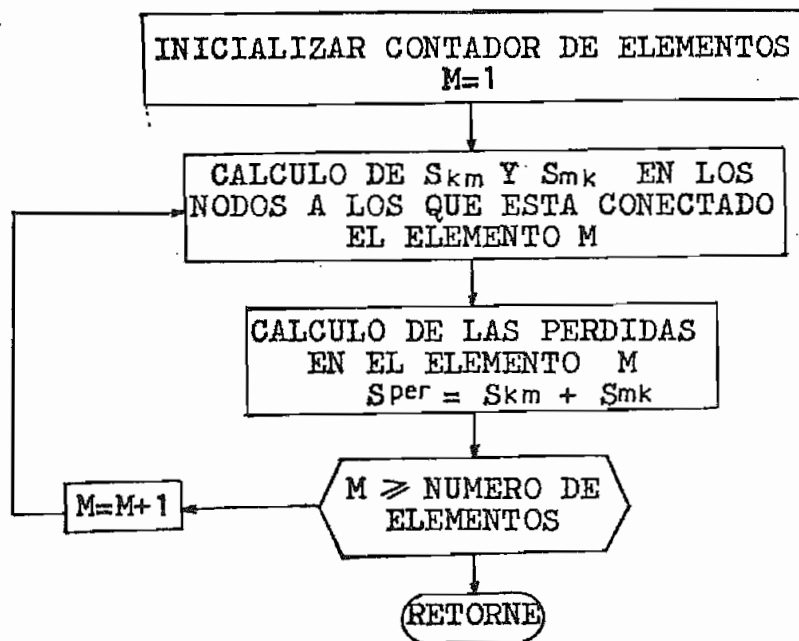
```

46

```

Q1(K1)=Q(K1)/V(K1)+V(K1)*(SUMBY+UCK(K1))+SUMV
Q2(K1)=-SUMQ2
IF(K1.EQ.NBC) GO TO 12
K1=K1+1
GO TO 13
12 H=H+1
DU 25 I=1,NBC
25 V(I)=Q1(I)+Q2(I)
CALL SOLUC(NBC,NFJC,I2C,LNXT,C,V,NSEQ)
IF(IB(NMC).EQ.1) GO TO 10
V(NMC)=0
GO TO 10
4 IF(I1.EQ.NBC) GO TO 15
I1=I1+1
GO TO 9
15 PRINT 19
19 FORMAT(/,T40,'VOLTAJES BAJO CONTINGENCIA',/,T32,'NOMBRE',T40,'N.
* DE',I30,'VMOD(PU)',7X,'ANG(GRAD)',/,T40,'BARRA',/)
NVCR=0
DO 22 I=1,NBC
ANG=THETA(I)*180./3.14159
IF(V(I).GE.0.95.AND.V(I).LE.1.03) GO TO 14
PRINT 1,{NOM(I,L),L=1,10},I,V(I),ANG
1 FORMAT(/,I30,I0A1,T40,I3,T50,F8.4,1X,'*',6X,F6.2,/)
NVCR=NVCR+1
GO TO 22
14 PRINT 23,{NOM(I,L),L=1,10},I,V(I),ANG
23 FORMAT(/,I30,I0A1,T40,I3,T50,F8.4,8X,F6.2,/)
22 CONTINUE
IF(NVCR.GE.1) GO TO 2
GO TO 26
2 PRINT 27,NVCR
27 FORMAT(/,I10,'* --->',I3,'VIOLACION DE LIMITES DE VOLTAJE',/)
26 PRINT 16,HT,H
16 FORMAT(/,T10,'NUMERO DE ITERACIONES REALIZADAS:',/,T10,'ANGULOS
*DE VOLTAJE=',I3,/,T10,'MODULO DE VOLTAJE=',I3,/)
IF(IB(NMC).EQ.1) GO TO 28
V(NMC)=AUXV
28 RETURN
5 PRINT 24,H
24 FORMAT(/,T10,'NO HAY CONVERGENCIA DE MODULOS DE VOLTAJE EN',I3,' I
*TERACIONES',/)
RETURN
END

```



#### SUBROUTINA FLOW

Encargada de encontrar la potencia activa y reactiva que fluyen por los elementos del sistema; así como también las pérdidas de potencia que se presentan en los mismos.

SUBROUTINE FLOW(NTE, NK, NM, NKC, NMC, THETA, YR, YI, PKM, V, TK, TM, PMK, PPER  
\*, QKM, YIS, QMK, QPER, SBASE, NE, NOM, NEC)

SUBROUTINA ENCARGADA DE CALCULAR EL FLUJO DE POTENCIA EN LOS ELEMENT

DIMENSION NK(50), NM(50), THETA(50), YR(50), YI(50), PKM(50), V(50)

DIMENSION TK(50), TM(50), PMK(50), PPER(50), QKM(50), YIS(50), QMK(50)

DIMENSION QPER(50), NE(50), NOM(50,10)

NLSC=0

DO 1 M=1, NTE

KK=NK(M)

MM=NM(M)

K=NK(M)

K1=NM(M)

IF (M .EQ. NEC) GO TO 2

FIKM=THETA(KK)-THETA(MM)

A=YR(M)\*COS(FIKM)

B=YI(M)\*SIN(FIKM)

C=YR(M)\*SIN(FIKM)

D=YI(M)\*COS(FIKM)

POT1 = V(KK)\*{V(KK)\*YR(M)\*TK(M)/TM(M)-V(MM)\*{A-B}}

PKM(M)=POT1\*SBASE

POT2 = V(MM)\*{V(MM)\*YR(M)\*TM(M)/TK(M)-V(KK)\*{A+B}}

PMK(M)=POT2\*SBASE

PPER(M)=PKM(M)+PMK(M)

QREA1 = V(KK)\*{V(KK)\*TK(M)/TM(M)\*{YI(M)-YIS(M)}-V(MM)\*{C+D}}

QKM(M)=QREA1\*SBASE

QREA2 = V(MM)\*{V(MM)\*TM(M)/TK(M)\*{YI(M)-YIS(M)}+V(KK)\*{C-D}}

QMK(M)=QREA2\*SBASE

QPER(M)=QKM(M)+QMK(M)

IF (ABS(FIKM) .GT. 0.2353) GO TO 4

PRINT 6, NE(M), (NOM(K,L), L=1,10), (NOM(K1,L), L=1,10), PKM(M), QKM(M), P

\*MK(M), QMK(M), PPER(M), QPER(M)

6 FORMAT(/, T2, I5, 5X, 10A1, 3X, 10A1, T31, 6(F10.3, 5X))

GO TO 1

4 NLSC=NLSC+1

PRINT 5, NE(M), (NOM(K,L), L=1,10), (NOM(K1,L), L=1,10), PKM(M), QKM(M), P

\*MK(M), QMK(M), PPER(M), QPER(M)

5 FORMAT(/, T2, I5, 5X, 10A1, 3X, 10A1, T31, 6(F10.3, 5X), 1X, '\*\*\*')

GO TO 1

2 PRINT 3, NE(M), (NOM(K,L), L=1,10), (NOM(K1,L), L=1,10)

3 FORMAT(/, T2, I5, 5X, 10A1, 3X, 10A1, 15X, 'LINEA RETIRADA')

1 CONTINUE

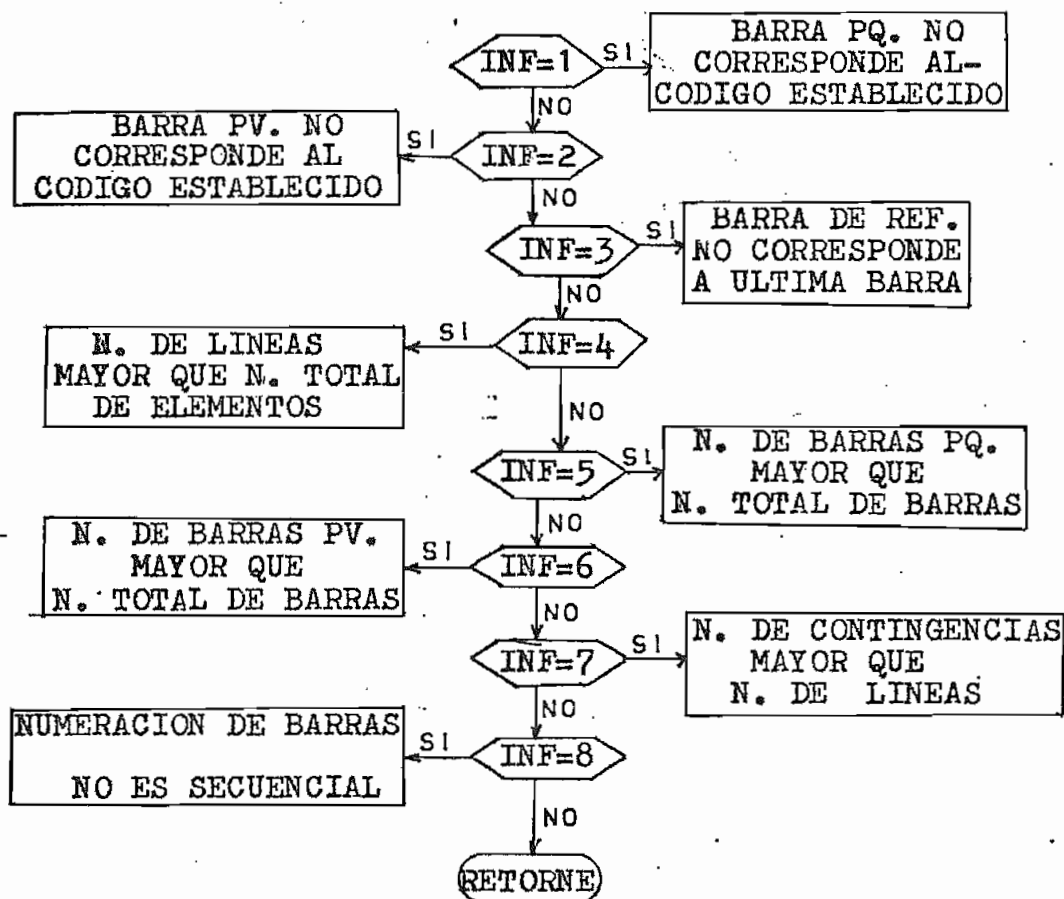
IF (NLSC .LT. 1) RETURN

PRINT 7, NLSC

7 FORMAT(/, T10, '\*\*\* --->', I3, ' ELEMENTOS SOBREPASAN LIMITE DE ESTABI  
\*LIDAD ESTABLECIDA', /)

RETURN

END



**SUBROUTINA ERROR:** Esta subrutina es común para todos los subprogramas y cuando se detecta una situación errónea en alguno de ellos, el control pasa a ésta subrutina que imprime un mensaje apropiado al error detectado.

III.3. VARIABLES DEL PROGRAMA

III.3.1 VARIABLES DIMENSIONADAS

- A Almacenamiento de la matriz A en forma de vector
- AUXP Almacenamiento temporal de los efectos en P1 al retirarse la línea conectada entre los nodos k,m
- BCK Suceptancia del capacitor o reactor shunt conectado al nodo k
- C Almacenamiento de la matriz C en forma de vector
- CE Almacenamiento temporal del vector A y C
- CRITCV Variación del ángulo de voltaje entre dos iteraciones sucesivas
- CRTCVI Variación del módulo de voltaje entre dos iteraciones sucesivas
- DTHETA Almacenamiento temporal de la variación del ángulo de voltaje al ser retirada la línea
- DV Almacenamiento temporal de la variación del módulo de voltaje al ser retirada la línea
- IB Tipo de barra del sistema
- I2 Posición de la fila de la matriz A
- I2C Posición de la fila de la matriz C
- ITAG Posición de la fila de la matriz A,C
- LCOL Almacena la posición del primer elemento diferente de cero de cada columna de una matriz
- LNXT Contiene la localización del próximo elemento diferente de cero en CE en orden ascendente

MA	Vector correspondiente al retiro de la línea, dimensión NTB
MC	Vector correspondiente al retiro de la línea, dimensión NBC
NAMES	Nombre del sistema a ser analizado ( Alfanumérico)
NOMBRE	Nombre de la barra del sistema ( Alfanumérico )
NBS	Número asignado a una barra del sistema
NE	Número asignado a: líneas, transformadores, reactores o condensadores serie
NF	Almacena la posición del primer elemento diferente de cero de cada columna de la matriz A
NFJC	Almacena la posición del primer elemento diferente de cero de cada columna de la matriz C
NK	Barra k de partida
NM	Barra m receptora
NOZE	Número de elementos diferentes de cero existentes en cada columna de las matrices A,C
NSEQ	Inicialmente contiene las variables enteras 1 a NTB en secuencia ascendente
P	Potencia activa neta inyectada en las barras
P1	Vector de potencia activa usado en el cálculo de los ángulos de voltaje al producirse el retiro de la línea
P2	Vector de potencia activa usado en el cálculo de los ángulos de voltaje al producirse el retiro de la línea



PKM	Potencia activa que fluye por el elemento desde k hacia m
PMK	Potencia activa que fluye por el elemento desde m hacia k
PPER	Pérdidas de potencia activa en el elemento
Q	Potencia reactiva neta inyectadas en las barras
Q1	Vector de potencia reactiva usado en el cálculo de módulos de voltaje al producirse el retiro de la línea
Q2	Vector de potencia reactiva usado en el cálculo de módulos de voltaje al producirse el retiro de la línea
QKM	Potencia reactiva que fluye por el elemento desde k hacia m
QMK	Potencia reactiva que fluye por el elemento desde m hacia k
QPER	Pérdidas de potencia reactiva en el elemento
THETA	Angulos de voltaje; corresponde además al ángulo de la iteración H
THETAO	Almacenamiento temporal del ángulo de voltaje de la iteración H-1
TK	Relación de taps del transformador en el nodo k
TM	Relación de taps del transformador en el nodo m
V	Módulo de voltaje de barra; corresponde además al módulo de voltaje de la iteración H
VO	Almacenamiento temporal del módulo de voltaje de la iteración H-1

VP	Almacenamiento temporal del vector independiente y solución del sistema de ecuaciones
YI	Almacenamiento de la parte imaginaria de la admitancia serie
YIS	Almacenamiento de los elementos shunts
YR	Almacenamiento de la parte real de la admitancia serie
ZA	Vector usado para el cálculo de ángulos de voltaje al producirse el retiro de la línea
ZC	Vector usado para el cálculo de módulos de voltaje al producirse el retiro de la línea

### III.3.2. VARIABLES NO DIMENSIONADAS

AUXI	Parte imaginaria de la admitancia serie de la línea a retirarse
AUXIYR	Parte real de la admitancia serie de la línea a ser retirada
AUXIYS	Elemento shunt de la línea a ser retirada
DAKM	Factor que produce el retiro de elementos de la matriz A
DCKM	Factor que produce el retiro de elementos de la matriz C
EPSI	Criterio de convergencia
FIKM	Diferencia de ángulos de voltaje entre dos barras adyacentes
GKK	Parte real de la admitancia propia del nodo k
H	Contador de número de iteraciones

INF	Indice usado para identificar un error en la entrada de datos
LF	Primera posición vacante en los arreglos CE, ITAG, LNXT
MAXIT	Número máximo de iteraciones
MIN	Número mínimo de ceros en una columna de las matrices A, C
NBC	Número de barras de carga (P.Q)
NBVC	Número de barras de voltaje controlado (P.V)
NEC	Número del elemento a ser retirado
NKC	Barra k del elemento a ser retirado
NL	Número total de líneas
NLS	Número de elementos que violan criterio establecido
NMC	Barra m del elemento a ser retirado
NTB	Número total de barras
NTE	Número total de elementos (L/T, transformadores, reactores o condensadores serie)
NVCR	Número de barras que violan criterio establecido en la magnitud de voltaje
PG	Potencia activa de generación
PC	Potencia activa de carga
QG	Potencia reactiva de generación
QC	Potencia reactiva de carga
R	Resistencia de la línea, transformador, serie

SBASE Potência base

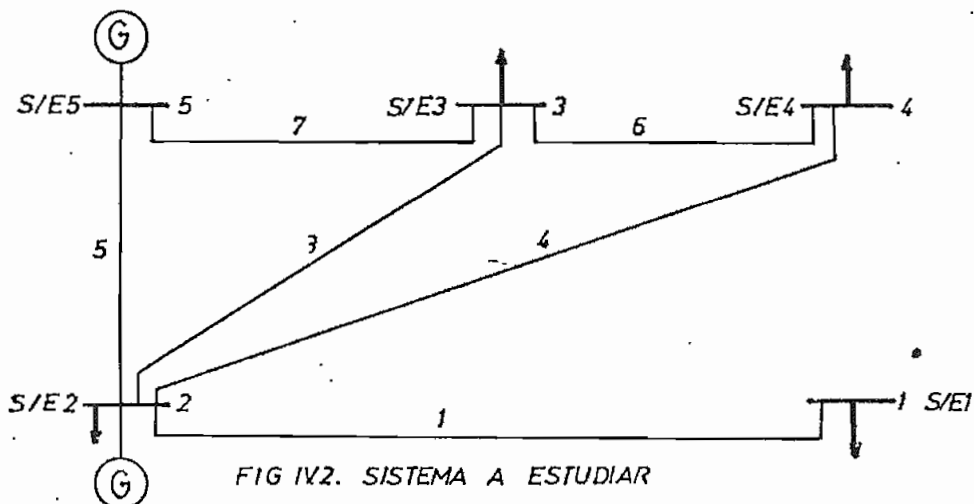
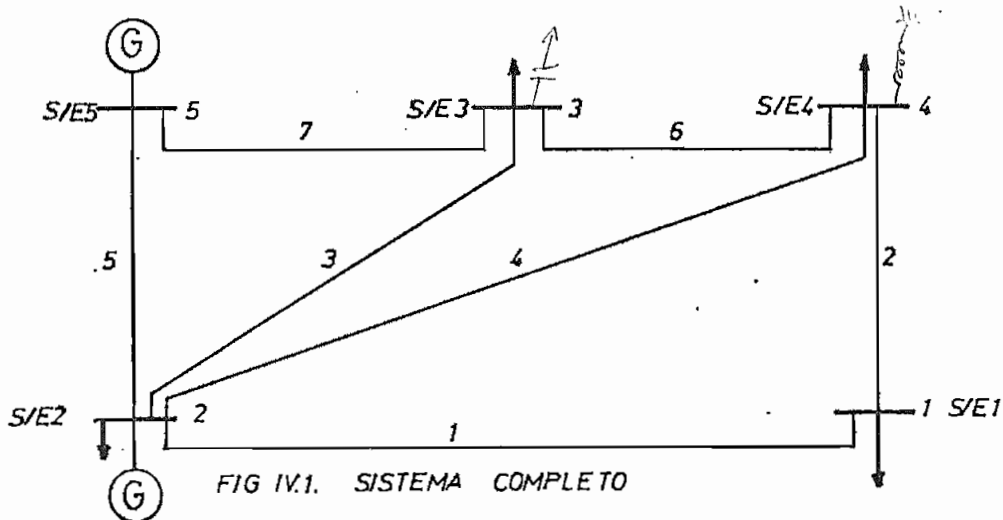
X Reactancia de la línea, transformador, reactor o condensador serie.

C A P I T U L O   I V

APLICACIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IV.1. DESCRIPCION DE EJEMPLOS

Como ejemplo de aplicación, se analizará el sistema descrito en la referencia (10) , el mismo que se muestra en la FIG IV.1 ; de éste sistema se simulará una contingencia así como muestra la FIG IV.2.



## DATOS DEL SISTEMA COMPLETO

## DATOS GENERALES.

N. Total de barras	=	5
N. Total de elementos	=	7
N. De barras de carga	=	4
N. De barras de voltaje contr.	=	0
Máximo número de iteraciones	=	20
Criterio de convergencia	=	0.001
N. De líneas	=	7
Potencia base	=	100.(MVA)

## DATOS DE ELEMENTOS

N. DEL ELEM.	NODO K	NODO M	IMPEDANCIA SERIE		ADMITANCIA $SH/2$
			R(PU)	X(PU)	B/2(PU)
1	1	2	0.04	0.12	0.015
2	1	4	0.08	0.24	0.025
3	2	3	0.06	0.18	0.02
4	2	4	0.06	0.18	0.02
5	2	5	0.02	0.06	0.03
6	3	4	0.01	0.03	0.01
7	3	5	0.08	0.24	0.025

CARACTERISTICAS DE BARRAS

N. DE BARRA	NOMBRE BARRA	TIPO DE BARRA	VMOD(PU)	ANG(GRD)	POTENCIA DE GENERACION		POTENCIA DE CARGA	
					MW	MVAR	MW	MVAR
1	S/E1	PQ.	1.018	-6.2	0.	0.	60.	10.
2	S/E2	PQ.	1.048	-2.8	40.	30.	20.	10.
3	S/E3	PQ.	1.025	-5.	0.	0.	45.	15.
4	S/E4	PQ.	1.024	-5.3	0.	0.	40.	5.
5	S/E5	REFER.	1.06	0.	129.6	-8.6	0.	0.

DATOS DE LA LINEA A SER RETIRADA

NEC	NKC	NMG	R(PU)	X(PU)
2	1	4	0.08	0.24

\* \* La entrada de datos se detalla en la hoja de codificación N.IV.1

\* Criterios establecidos para el ejemplo:

$$0.95 \leq V_k \leq 1.04$$

$$\text{Límite de estabilidad } \psi_{km} \leq 25^\circ$$





## IV.2 SOLUCION DEL PROBLEMA

Para una mejor comprensión, la solución se presenta en el diagrama unifilar, tanto para los resultados obtenidos haciendo uso del programa para flujos de carga a través del método de Newton Raphson (9) (existente en la Escuela) como se indica en la FIG IV.3; así como los obtenidos a través del programa digital realizado como se indica en la FIG IV.4

A manera de complemento, se presentan tablas comparativas de los resultados y sus respectivas variaciones.

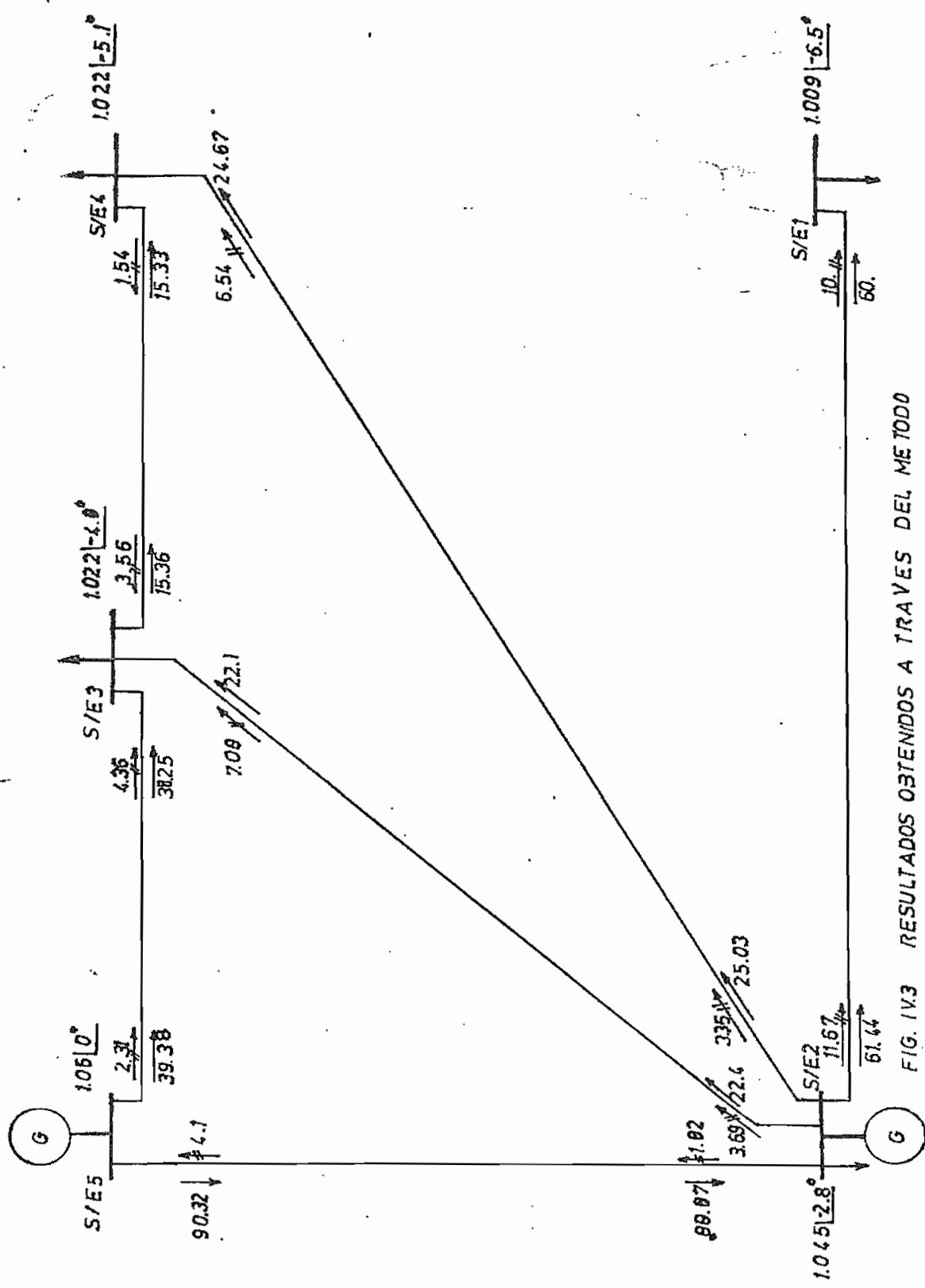


FIG. IV.3 RESULTADOS OBTENIDOS A TRAVES DEL METODO  
 NEWTON RAPHSON

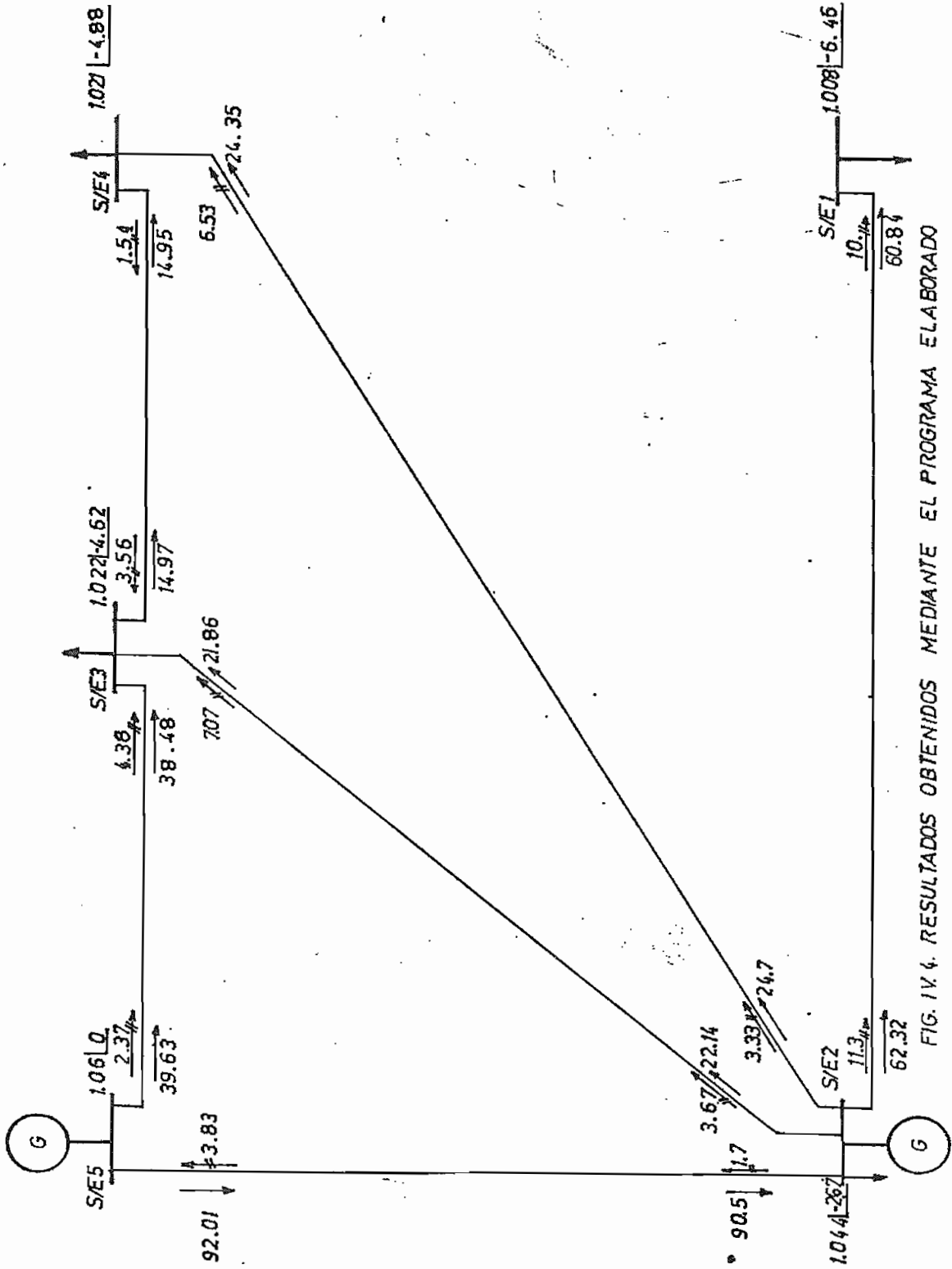


FIG. IV. 4. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROGRAMA ELABORADO

→ POTENCIA ACTIVA (MW)  
 ↗ POTENCIA REACTIVA (MVAR)

TABLAS COMPARATIVAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS DOS METODOS ANTERIORMENTE MENCIONADOS.

TABLA A: COMPARACION DE LOS VOLTAJES DE BARRA

BARRA	NEWTON RAPHSON		SIMULACION		$\Delta V$	$\Delta \theta$
	VMOD(PU)	ANG( GRD)	VMOD(PU)	ANG		
S/E1	1.009	-6.5	1.008	-6.46	0.001	0.04
S/E2	1.045	-2.8	1.044	-2.66	0.001	0.14
S/E3	1.022	-4.8	1.022	-4.67	0.0	0.13
S/E4	1.022	-5.1	1.021	-4.88	0.001	0.22
S/E5	1.06	0.0	1.06	0.0	0.0	0.0

TABLA B: COMPARACION DE LAS POTENCIAS QUE FLUYEN POR LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.

N. DEL ELEM.	NODO K	NODO M	NEWTON RAPHSON		SIMULACION		$\Delta P$	$\Delta Q$
			PKM MW	QKM MVAR	FMK MW	QM MVAR		
1	S/E1	S/E2	-60.	-10.	-60.84	-10.	0.84	0.
	S/E2	S/E1	61.44	11.17	62.32	11.3		
3	S/E2	S/E3	22.4	3.69	22.14	3.67	0.26	0.02
	S/E3	S/E2	-22.1	-7.08	-21.86	-7.07		
4	S/E2	S/E4	25.03	3.35	24.7	3.33	0.33	0.02
	S/E4	S/E2	-24.67	-6.54	-24.35	-6.53		
5	S/E2	S/E5	-88.87	1.82	-90.5	1.7	1.63	0.12
	S/E5	S/E2	90.32	-4.1	92.01	-3.83		
6	S/E3	S/E4	15.36	-3.56	14.97	-3.56	0.39	0.0
	S/E4	S/E3	-15.33	1.54	-14.95	1.54		
7	S/E3	S/E5	-38.25	-4.36	-38.48	-4.38	0.23	0.02
	S/E5	S/E3	39.38	2.31	39.62	2.37		

\*\*\* SISTEMA STAGG EL ABIAD\*\*\*

DATOS GENERALES  
\*\*\*\*\*

N.º TOTAL DE BARRAS = 5  
 N.º TOTAL DE ELEMENTOS = 7  
 N.º DE BARRAS DE CARGA = 4  
 N.º DE BARRAS DE VULT. CONTROLADO = 0  
 MAXIMO NUMERJ DE ITERACIONES = 20  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA = 0.001  
 N.º DE LINEAS = 7  
 POTENCIA BASE (MVA) = 100.

DATOS DE ELEMENTOS

N.º DEL ELEM. NODO K NODO M IMPEDANCIA SERIE ADMITANCIA SHUNT/2 TK TM  
 H(PU) X(PU) B/2(PU)

3	2	3	0.0600	0.1800	0.0200
5	2	5	0.0200	0.0600	0.0300
2	1	4	0.0800	0.2400	0.0250
1	1	2	0.0400	0.1200	0.0150
4	2	4	0.0400	0.1800	0.0200
7	3	5	0.0800	0.2400	0.0250
6	3	4	0.0100	0.0300	0.0100

DATOS DE BARRA  
-----

N.º DE BARRA	NOMBRE	TIPU DE BARRA	VMOD(PU)	ANG(GRAD)	POTENCIA DE GENERACION MW	POTENCIA DE GENERACION MVAR	POTENCIA DE CARGA MW	POTENCIA DE CARGA MVAR
1	S/E1	PQ.	1.0180	-6.20	0.0000	0.0000	60.0000	10.0000
2	S/E2	PQ.	1.0480	-2.80	40.0000	30.0000	20.0000	10.0000
3	S/E3	PQ.	1.0250	-5.00	0.0000	0.0000	45.0000	15.0000
4	S/L4	PQ.	1.0240	-5.30	0.0000	0.0000	40.0000	5.0000
5	S/L5	REFER	1.0600	0.00	129.6000	-8.6000	0.0000	0.0000

-----  
 DATOS DE LINEA A SER RETIRADA  
 -----

NEC	NKC	NMC	R(PU)	X(PU)
2	1	4	0.0800	0.2400

=====

VOLTAJES BAJO CONTINGENCIA

NOMBRE BARRA	N. DE BARRA	VMOD(PU)	ANG(GRAD)
S/E1	1	1.0077	-6.46
S/E2	2	1.0442 *	-2.67
S/E3	3	1.0220	-4.62
S/E4	4	1.0213	-4.88

\* ----> VIOLACION DE LIMITE DE VOLTAJE

NUMERO DE ITERACIONES REALIZADAS:

ANGULOS DE VOLTAJE= 1

MODULO DE VOLTAJE= 2

POTENCIA EN LAS LINEAS

ELEMENTO	NODU K	NODU M	M# EN K	M# EN M	MVAR EN K	MVAR EN M	MW PERD	MVAR PERD
1	S/E1	S/E2	-60.838	62.325	-10.002	11.303	1.487	1.301
2	S/E1	S/E4	22.144	-21.855	3.666	-7.070	0.289	-3.404
3	S/E2	S/E3	24.706	-24.353	3.325	-6.534	0.353	-3.209
4	S/E2	S/E5	-90.505	92.013	1.705	-3.825	1.507	-2.120
5	S/E3	S/E4	14.970	-14.948	-3.554	1.535	0.022	-2.019
6	S/E3	S/E5	-38.482	39.619	-4.376	2.365	1.137	-2.010

STATEMENTS EXECUTED= 5033

### IV.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al terminar el presente trabajo, se puede mencionar las siguientes conclusiones:

El algoritmo "Flujo de Potencia Lineal e Iterativo" (F.P.L.I.) en simulación de contingencias en estado-estable, cumple con los requerimientos de velocidad de ejecución y aproximación de cálculo. El método desarrollado no requiere excesiva memoria en el computador y es rápido en su convergencia.

La aproximación de la solución y el número mínimo de iteraciones para llegar a la misma, hace factible la aplicación de lo propuesto en el presente trabajo.

Si el elemento a ser retirado está conectado entre dos nodos PV. (voltaje controlado), la solución de la magnitud de voltaje no es requerida, por lo que el tiempo de ejecución se reduce en forma considerable.

Debido a que la matriz admitancia de barra es simétrica y porosa, el método presenta la ventaja más importante de minimizar los requerimientos de memoria y obtención de valores de cada iteración en forma rápida

haciendo uso de la triangulización de la matriz y método de solución directa, lo cual ha sido aplicado en el programa

Si no hay convergencia en el Flujo de Carga, la causa principal es insuficiencia de potencia reactiva, lo que no permite obtener voltajes con valores adecuados. El programa se podría complementar para que en estos casos involucre a subrutinas de ubicación de capacitores en barras, de tal manera de obtener convergencia e información de la necesidad de compensación en el sistema.

Aprovechando las facilidades que brindan los computadores digitales para realizar operaciones matemáticas y lógicas con gran rapidez, se ha previsto que el trabajo que debe efectuar el usuario para la utilización del programa sea pequeño, limitandose éste a la recopilación de datos y al cálculo de pocas constantes.

Obviamente en la elaboración del programa se ha encontrado ciertos tópicos que resultará interesante abordarlos como complemento del presente trabajo; por lo que, a manera de recomendación se sugiere:



Implementación de una subrutina que detecte previamente al flujo de carga sin el elemento a ser retirado si el sistema es único.

Acoplar programa de optimización de ubicación de capacitores.

Debido a que el programa contempla salida sólo de líneas de transmisión, en adelante el programa puede implementarse con la salida de transformadores, salida de generadores, e introducir el programa como una subrutina dentro de un programa de Flujo de Carga.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA

## A N E X O 1

### ALGORITMO DE LA BI-FACTORIZACION

#### I.- INTRODUCCION.-

Uno de los mejores métodos de solución directa para grandes sistemas de ecuaciones lineales, es el método de descomposición triangular. En éste método los coeficientes de la matriz son separados en el producto de matrices triangulares superior e inferior.

#### II.- ALGORITMO.-

Sea un sistema lineal de N ecuaciones, -  
las cuales pueden ser expresadas en notación matricial así;

$$Ax=b. \quad (1)$$

donde:

A matriz no singular  
x vector dependiente  
b vector independiente

El sistema puede ser resuelto por inversión de la matriz A:

$$x = A^{-1}b \quad (2)$$

Desde el punto de vista de requerimientos de memoria en la computadora, no resulta un método eficiente obtener la solución por inversión de la matriz A.

El método de la Bi-Factorización se basa en la siguiente ecuación:

$$L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} A R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} = I \quad (3)$$

donde:

- L Elementos de la matriz triangular inferior
- R Elementos de la matriz triangular superior
- I Matriz unidad

La ecuación (3), por intercambio de términos puede ser escrita así:

$$A^{-1} = R^{(1)} R^{(2)} \dots R^{(n-1)} R^{(n)} L^{(n)} L^{(n-1)} \dots L^{(2)} L^{(1)} \quad (4)$$

La ecuación (4) indica que la inversa de A, contiene una familia de productos.

Seguindo un orden para determinar los factores de las matrices L y R, la siguiente secuencia es introducida en la ecuación (3).

$$A^{(0)} = A$$

$$A^{(1)} = L^{(1)} A^{(0)} R^{(1)}$$

$$A^{(2)} = L^{(2)} A^{(1)} R^{(2)}$$

$$A^{(j)} = L^{(j)} A^{(j-1)} R^{(j)}$$

$$A^{(n)} = L^{(n)} A^{(n-1)} R^{(n)} = I$$

La siguiente regla general es usada para el cálculo de  $A^{(j)}$ ,  $L^{(j)}$  y  $R^{(j)}$  a partir de los elementos de A

Reducción de la matriz  $A^{(j)}$

$$a_{jj}^{(j)} = 1 \quad a_{jj}^{(j)} = 0 \quad a_{jj}^{(j)} = 0$$

$$a_{ik}^{(j)} = a_{ik}^{(j-1)} - \frac{a_{ij}^{(j-1)} a_{jk}^{(j-1)}}{a_{jj}^{(j-1)}}$$

donde

j es el indice pivote (directriz),

i, k = (j+1) ..... N





### III.- ARREGLOS Y ALMACENAMIENTOS.-

Los elementos de la matriz diferentes de cero, son almacenados en forma de columna en el arreglo CE. Los índices que representa la fila de los elementos en CE son almacenados en la tabla ITAG. Les acompaña una tabla LNXT conteniendo la localización del próximo elemento diferente de cero en CE en orden ascendente. La presencia del número cero (0) en LNXT, indica el fin del término de una columna.

La posición inicial de salida de la columna CE son almacenados en la tabla LCOL. La tabla NOZE, contiene el número de elementos diferentes de cero de cada columna.

Como puede ser visto desde el ejemplo, las posiciones no usadas en los arreglos CE y LNXT, estos también deben ser ocupados por valores iniciales.

Las posiciones vacantes del arreglo CE y la posición anterior de la tabla LNXT deben ser ocupadas de ceros. La otra posición vacante de LNXT debe ser numerada en forma consecutiva.

A parte de esto, el orden de la matriz (número de filas y columnas) es almacenada en N, y la primera localización vacante en los arreglos CE, ITAG, LNXT deben ser almacenadas en LF. (en el ejemplo dado, N=6; LF=21).

El algoritmo en que se basa dicha subrutina puede ser determinada en tres partes:

- 1.- Simulación y ordenamiento ( Subrutina SIMORD)
- 2.- Reducción (Subrutina REDUC)
- 3.- Solución Directa (Subrutina SOLUC)

#### 1.- SIMULACION Y ORDENAMIENTO.-

Los procesos de ordenamiento óptimo requiere de una tabla adicional NSEQ. Esta tabla inicialmente debe contener las variables enteras 1 a N en forma ascendente. Un diagrama de flujo y su respectivo listado se indica en la FIG 1.1

La simulación de cada etapa de reducción puede ser subdividida en dos partes:

- a.- SELECCIONAR COLUMNA PIVOTE.- La columna con el menor número de elementos diferentes de cero es seleccionada como columna pivote. Si más de una columna tiene éste criterio,



la columna numerada en la primera localización de la tabla NSEQ es seleccionada.

b.- MODIFICACION EN LA DIRECCION DE LOS INDICES.- Todos los indices de las columnas son comparados término por término con los de la columna pivote y ellos acompañando su información son alterados como sigue:

Si la columna procesada contiene el índice pivote, el término de la matriz es cancelado.

Si algún índice de la fila de la columna pivote no es contenido en la columna en consideración, este índice es aumentado al índice de la fila en la tabla ITAG (ocupar un término). Los términos ocupados son almacenados no solamente en las posiciones vacantes del final de las tablas CE, ITAG, LNXT, sino también en la posición conveniente durante el proceso de simulación. La próxima posición vacante es siempre almacenada en la variable LF.

Cada vez que un término es cancelado o aumentado, la respectiva dirección de información de los arreglos LNXT y LCOL deben ser alterados en forma apropiada.

Además, el contador de términos diferentes de

cero debe ser actualizado.

Después de los procesos de simulación y ordenamiento, los arreglos LCOL, NOZE, ITAG, LNXT ya no contienen la información original en la estructura de los coeficientes de la matriz, pero contienen en lugar de ello la estructura de los factores de la matriz.

## 2.- REDUCCION.-

La función del subprograma Reducción (REDUC) es actuar sobre los resultados del subprograma (SIMORD) de modo de tener un almacenamiento mínimo.

La reducción de los coeficientes actuales de la matriz son guiados por los elementos que contiene la tabla NSEQ.

En cada almacenamiento del proceso de reducción, solamente los términos de la matriz correspondiente a los índices de la fila de la columna pivote son recalculados. Porque el propósito es de que las columnas restantes sean comparadas término por término con la columna pivote, en una manera similar a lo realizado en el proceso de Simulación y Ordenamiento. Un diagrama de flujo y su respectivo listado se indica en la FIG 1.2.

Al iniciar cada etapa de reducción, los términos de la columna pivote son temporalmente almacenados en las posiciones vacantes del arreglo CE. Esto permite una normalización de la columna pivote.

### 3.- SOLUCION DIRECTA.-

El vector independiente debe ser inicialmente almacenado en V, para luego del cálculo obtener en este mismo vector la solución requerida. Un diagrama de flujo con su respectivo listado se indica en la FIG. 1.3

El número total de operaciones aritméticas (Sumas y multiplicaciones) para el proceso de solución directa en el método de la Bi-Factorización es semejante si se realizara usando el método de descomposición triangular.

Una ventaja importante del método de la Bi-Factorización es realizado en el proceso de programación, porque la estructura simétrica de los coeficientes de la matriz pueden ser completamente explotados.

## EJEMPLO

ALMACENAMIENTO DE LOS ARREGLOS DE UNA MATRIZ 6x6

$$A = \begin{array}{c|cccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & x & x & & x & & \\ 2 & x & x & x & & x & \\ 3 & & x & x & & & x \\ 4 & x & & & x & x & \\ 5 & & x & & x & x & x \\ 6 & & & x & & x & x \end{array}$$

	LCOL	NOZE
1	1	3
2	4	4
3	8	3
4	11	3
5	14	4
6	18	3
7	-	-
8	-	-

	ITAG	LXT	CE
1	1	2	A11
2	2	3	A21
3	4	0	A41
4	1	5	A12
5	2	6	A22
6	3	7	A32
7	5	0	A52
8	2	9	A23
9	3	10	A33
10	6	0	A63
11	1	12	A14
12	4	13	A44
13	5	0	A54
14	2	15	A25
15	4	16	A45
16	5	17	A55
17	6	0	A65
18	3	19	A36
19	5	20	A56
20	6	0	A66
21	-	22	0
22	-	23	0
23	-	24	0
24	-	0	0



SUBROUTINE SIMORD(N,LF,LCOL,NOZE,ITAG,LNXT,CE,NSEQ)  
DIMENSION NSEQ(40),NOZE(40),LCOL(40),ITAG(150),LNXT(150),CE(150)

81

```
NI=N-1
DO 38 J=1,NI
K=NSEQ(J)
MIN=NOZE(K)
M=J
JS=J+1
DO 10 I=JS,N
K=NSEQ(I)
IF(NOZE(K) .GE. MIN) GO TO 10
MIN=NOZE(K)
M=I
10 CONTINUE
KP=NSEQ(M)
NSEQ(M)=NSEQ(J)
NSEQ(J)=KP
LK=LCOL(KP)
25 K=ITAG(LK)
IF(K-KP) 1,2,1
1 LA=0
```

```
LI=LCOL(KP)
IP=ITAG(LI)
L=LCOL(K)
I=ITAG(L)
8 IF(I-IP) 3,4,5
3 LA=L
L=LNXT(L)
IF(L) 6,6,7
6 I=N+1
GO TO 8
7 I=ITAG(L)
GO TO 8
4 IF(I-KP) 9,11,9
9 LA=L
L=LNXT(L)
GO TO 12
11 LN=LNXT(L)
IF(LA) 13,13,14
13 LCOL(K)=LN
GO TO 15
14 LNXT(LA)=LN
15 LNXT(L)=LF
LF=L
CE(L)=0.
NOZE(K)=NOZE(K)-1
L=LN
12 IF(L) 16,16,17
16 I=N+1
GO TO 18
17 I=ITAG(L)
GO TO 18
5 IF(LF) 33,33,19
19 LN=LF
IF(LA) 20,20,21
20 LCOL(K)=LN
GO TO 22
21 LNXT(LA)=LN
22 LF=LNXT(LN)
LNXT(LN)=L
ITAG(LN)=IP
NOZE(K)=NOZE(K)+1
LA=LN
18 LI=LNXT(LI)
IF(LI) 2,2,24
2 LK=LNXT(LK)
IF(LK .LE. 0) GO TO 38
GO TO 25
24 IP=ITAG(LI)
GO TO 8
38 CONTINUE
RETURN
33 PRINT 100
100 FORMAT(//,10X,'FALTA CAMPO',/)
RETURN
END
```



SUBROUTINE REDUC(N,LCOL,NOZE,ITAG,LNXT,CE,NSEQ,LF)  
DIMENSION LCOL(40),NOZE(40),ITAG(150),LNXT(150),CE(150),NSEQ(40)

83

```
DO 24 J=1,N
KP=NSEQ(J)
LK=LCOL(KP)
LP=LF
1 IF(LP .LE. 0) GO TO 100
K=ITAG(LK)
IF(K-KP) 2,3,2
2 CE(LP)=CE(LK)
GO TO 4
3 D=1./CE(LK)
CE(LK)=D
4 LK=LNXT(LK)
IF(LK .LE. 0) GO TO 5
LP=LNXT(LP)
GO TO 1
5 LK=LCOL(KP)
6 K=ITAG(LK)
IF(K-KP) 7,8,7
7 CE=D*CE(LK) combinar SF por este momento
CE(LK)=-CF
LP=LF
LI=LCOL(KP)
IP=ITAG(LI)
L=LCOL(K)

9 I=ITAG(L)
IF(I-IP) 10,11,12
10 L=LNXT(L)
IF(L) 8,8,13
13 I=ITAG(L)
GO TO 9
8 LK=LNXT(LK)
IF(LK) 24,24,6
11 CE(L)=CE(L)-CF*CE(LP) ✓
L=LNXT(L)
IF(L) 8,8,14
14 I=ITAG(L)
12 LI=LNXT(LI)
IF(LI) 8,8,15
15 LP=ITAG(LI)
LP=LNXT(LP)
GO TO 9
24 CONTINUE
RETURN
100 PRINT 25
25 FORMAT(/,10X,'FALTA CAMPO',/)
RETURN
END
```



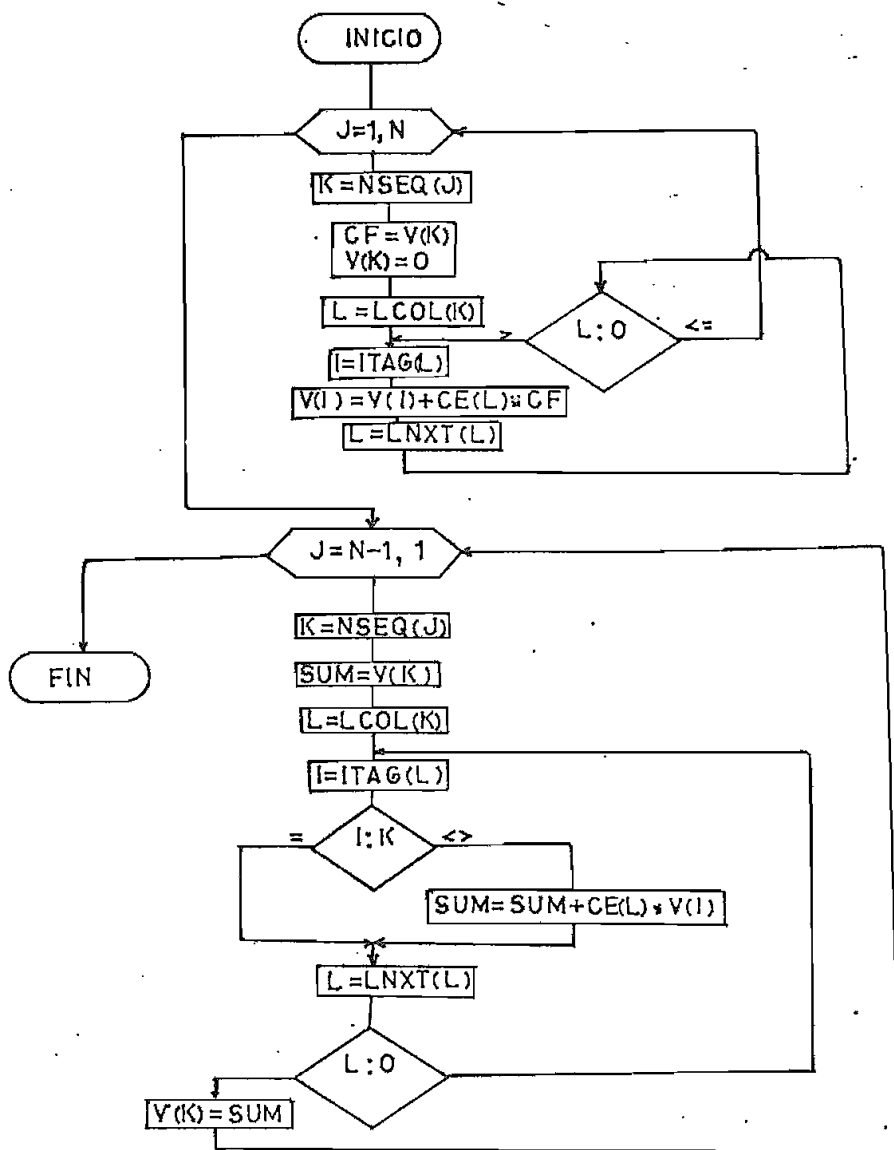


FIG 1.3 DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINA SOLUC

```

SUBROUTINE SOLUC(N,LCOL,ITAG,LNXT,CE,VP,NSEQ)
DIMENSION LCOL(40),NQE(40),ITAG(150),LNXT(150),CE(150),VP(50),NSE
*Q(40)
DO 11 J=1,N
K=NSEQ(J)
CF=VP(K)
VP(K)=J.
L=LCOL(K)
1 I=ITAG(L)
VP(I)=VP(I)+CE(L)*CF
L=LNXT(L)
IF(L.LE.0) GO TO 11
GO TO 1
11 CONTINUE
NI=N-1
DO 15 NN=1,NI
J=N-NN
K=NSEQ(J)
SUM=VP(K)
L=LCOL(K)
2 I=ITAG(L)
IF(I-K) 3,4,3
3 SUM=SUM+CE(L)*VP(I)
4 L=LNXT(L)
IF(L.GT.0) GO TO 2
VP(K)=SUM
15 CONTINUE
RETURN
END

```

123456  
\$ENTRY

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
DEPARTAMENTO DE POTENCIA

## A N E X O 2

### MANUAL DE USO DEL PROGRAMA: SIMULACION DE CONTINGENCIAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

#### I.- ALGORITMO DE SOLUCION

El algoritmo de solución del programa de Simulación de Contingencias en SEP, se basa en el método denominado " Flujo de Potencia Lineal e Iterativo" (FPLI)

El proceso de cálculo se resume en lo siguiente:

- 1.- Lectura de datos obtenidos a partir de un caso base de flujo de carga
- 2.- Se ordenan los datos y variables de modo que concuerden con el orden en el cual son tomadas las barras dentro del proceso iterativo y garantizar además que todas las subrutinas tengan la información correcta.
- 3.- Se escriben todos los datos del sistema referentes al caso base de flujo de carga.
- 4.- Se calcula los ángulos de voltajes de barra al produ -

cirse la contingencia.

5.- Se calcula los módulos de voltaje de barra bajo contingencia.

6.- Se calcula el flujo de potencia en los elementos en estas condiciones.

7.- Se imprimen los resultados.

## II.- DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa consta de un programa principal y de once subrutinas, las mismas que se describen a continuación.

PROGRAMA PRINCIPAL : Lee las tarjetas, nombre del sistema a ser analizado, impedancia serie y admitancia de derivación de las líneas, impedancia de cortocircuito y taps de transformadores, potencia activa y reactiva de generación y carga en las barras del sistema, voltajes de barra obtenidos a través del caso base de flujo de carga. Llama en forma secuencial a las subrutinas, y, cuando se detecta un error en los datos de entrada, transfiere el control a la subrutina ERROR.

SUBROUTINA ORDEN : Encargada de ordenar los nodos del sistema en forma ascendente de acuerdo al nodo NK al

que están conectados; y para elementos que tienen el mismo nodo NK, los ordena en forma ascendente de acuerdo a los nodos NM. Este ordenamiento es fundamental para poder formar y almacenar las matrices A y C

SUBROUTINA MATRZ : Subrutina encargada de formar la matriz A y C , y almacenar sus valores en forma de vectores; además realiza el cálculo del vector P' ; empleando las siguientes ecuaciones:

$$\text{matriz A: } a_{kk} = V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m B_{km} \quad a_{km} = -V_k V_m B_{km}$$

$$\text{matriz C: } c_{kk} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n t_{km} B_{km} \quad c_{km} = -B_{km} \text{ para } m \neq k$$

$$\text{vector P : } P'_k = P_k - V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m G_{km}$$

SUBROUTINA PCONT : Retira los efectos de P'\_k y P'\_m de [P] que produce el retiro de la línea que se encuentra conectada entre los nodos k,m; además, se encarga de formar el vector MA correspondiente

$$MA_i \begin{cases} 0 & i \neq k,m \\ 1 & i = k \\ -1 & i = m \end{cases}$$

SUBROUTINA ENCERO : Almacena información requerida por subrutinas SIMORD, REDUC y SOLUC.

SUBROUTINA CONTHE : Subrutina encargada de controlar el flujo lógico que conforma el lazo iterativo para el cálculo de los ángulos de los voltajes de barra bajo contingencia.

SUBROUTINA CONVOL : Encargada de controlar el flujo lógico que conforma el lazo iterativo para el cálculo de los módulos de voltajes de barra bajo contingencia.

SUBROUTINA FLOW : Subrutina encargada de encontrar la potencia activa y reactiva que fluyen por los elementos del sistema, así como también las pérdidas de potencia que se presenta en los mismos.  
Los flujos de potencia están dadas por los siguientes signos:  
positivo (+) salen de la barra  
negativo (-) llegan a la barra.

SUBROUTINA ERROR : Esta subrutina es común para todos los subprogramas y cuando se detecta una situación errónea en alguno de ellos, el control pasa a ésta subrutina que imprime un mensaje apropiado al error detectado.

### III.- VARIABLES DEL PROGRAMA

#### III.1 VARIABLES DE ENTRADA Y FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA.

BCK	Suceptancia del capacitor o reactor shunt conectado al nodo k (capacitor con signo positivo, reactor con signo negativo)
EPSI	Criterio de convergencia
IB	Tipo de barra del sistema: 1 para barra PQ ( carga ) 2 para barra PV ( Voltaje controlado ) 3 para barra de referencia .
MAXIT	Número máximo de iteraciones
NAMES	Nombre del sistema a ser analizado (Alfanumérico)
NBC	Número de barras de Carga
NBS	Número asignado a una barra del sistema.-La numeración de las barras será de la siguiente manera: Primero enumerar las barras PQ en forma consecutiva empezando con el número 1, a continuación las barras PV. y <u>finalmente</u> la barra de referencia.
NBVC	Número de barras de voltaje controlado
NE	Número asignado a: líneas, transformadores, reactores o condensadores serie.
NEC	Número del elemento a ser retirado
NK	Barra k de partida
NKC	Barra k del elemento a ser retirado
NL	Número de líneas del sistema (inicial)
NM	Barra m receptora

NMC	Barra m del elemento a ser retirado
NOMBRE	Nombre de la barra del sistema (Alfanumérico)
NTB	Número total de barras
NLR	Número de estudios requeridos (menor o igual a NL)
NTE	Número total de elementos
PC	Potencia activa de carga en las barras en MW
PG	Potencia activa de generación en las barras en MW
QC	Potencia reactiva de carga en las barras en MVAR
QG	Potencia reactiva de generación en las barras en MVAR
R	Resistencia en pu. de los elementos
SBASE	Potencia base (MVA)
THETA	Angulos de voltaje de barras obtenidos del caso base de flujo de carga (en grados)
TK	Relación de taps del transformador en el nodo k: Si el elemento no es un transformador, dejar su campo en blanco.
TM	Relación de taps del transformador en el nodo m: Si el elemento no es un transformador, dejar su campo en blanco.
V	Módulo de voltaje de barra en pu. obtenidos del caso base de flujo de carga.
YIS	Parte inaginaria en pu. de los elementos shunt de la línea; si es transformador, reactor o condensador serie, dejar su campo en blanco
X	Reactancia pu. de la línea, transformador, reactor o condensador serie.



### III.2 VARIABLES DE SALIDA

NAMES	Nombre del sistema a ser analizado
NOMBRE	Nombre de la barra del sistema
NE	Número asignado al elemento
PKM	Potencia activa que fluye por el elemento desde k hacia m (MW)
PMK	Potencia activa que fluye por el elemento desde m hacia k (MW)
PPER	Pérdida de potencia activa en el elemento (MW)
QKM	Potencia reactiva que fluye por el elemento desde k hacia m (MVAR)
QMK	Potencia reactiva que fluye por el elemento desde m hacia k (MVAR)
QPER	Pérdida de potencia reactiva en el elemento (MVAR)
THETA	Angulos de voltaje de barra bajo contingencia (en grados)
V	Módulo de voltaje de barra bajo contingencia (en pu.)

### IV. ENTRADA DE DATOS

La forma de ingresar el grupo de tarjetas se detallan en la hoja de codificación N:1

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE POTENCIA  
PROGRAMADO POR E. PATRICIO GARZON A

ESPECIFICACION N: 1

UNA SIMULACION DE CONTINGENCIAS EN S.E.P.

PAGINA

FECHA OCTUBRE - 1981

NOMBRE DEL SISTEMA: UNA TARJETA

NTE NBC NEVC MAXIT EPSI NL SBASE: UNA TARJETA

DATOS DE CAPACITORES O REACTORES EN PARALELO (BCK) DIEZ BARRAS POR TARJETA

NK NM R X DATOS DE ELEMENTOS: UNA TARJETA POR ELEMENTO...  
YIS TK TM

NOBRE IB V THETA PG QG QC

MERO DE ESTUDIOS REQUERIDOS: UNA TARJETA

DATOS DE LINEA A SER RETIRADA: UNA TARJETA POR ESTUDIO REQUERIDO

NKC NMC R X

4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93

## V. SALIDA DE RESULTADOS

El programa tiene como salida los voltajes de barras, el flujo de potencia activa y reactiva así como las pérdidas de potencia en los elementos.

La presencia de un asterisco (\*) resalta cuales y cuantos elementos violan criterios previamente establecidos. Se sugiere los siguientes criterios

$$0.95 \leq V \leq 1.05$$

$$\psi_{km} < 25^\circ$$

Los resultados se escriben en forma trifásica, los valores de voltaje están en pu., mientras los de potencia están en valores reales.

Se tiene como salida adicional, el nombre del sistema, las características y datos del sistema y número de iteraciones realizadas tanto para el ángulo de voltaje como para el módulo de voltaje de barras bajo contingencia.

## VI RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

El programa desarrollado tiene las siguientes restricciones:

- 1.- El programa fue diseñado para:
  - 50 barras
  - 50 elementos ( Líneas, transformadores, reactores

o condensadores serie)

- Para sistemas radiales el programa no opera.

\* ADVERTENCIA.- Se debe tener cuidado que el elemento que se va a retirar no divida al sistema en dos sistemas aislados.

## B I B L I O G R A F I A

- 1 STAGG and EL-ABIAD, "Automatic evaluation of power system performance. Effects of line and transformer outages", Trans. AIEE. PA & S, vol. 64, February/1963
- 2 LIMMER H.C., "Techniques and applications of security calculations applied to dispatching", PSCC Proc. Rome, Italy, 1969
- 3 BROWN H.E. "Contingencies evaluated by a Z-matrix method", IEEE. Trans. PA & S, vol. 88, April/1969 P, 409
- 4 PETERSON N.M., TINNEY W.F., and BREE Jr. D.W., "Iterative linear ac. power flow solution for fast - approximate outage studies", IEEE. Trans. PA & S, vol. 91, September-October/1972, p. 2048
- 5 GUERRERO, MELO, HIDALGO, "Flujo de carga. Estudio por medio de computadoras". Tesis de grado. Escuela - Politécnica Nacional. Quito-Ecuador. 1974
- 6 TINNEY W.F. and WALKER J.W., "Direct solution of sparse network equations by optimally ordered - triangular factorization", Proc. IEEE. vol. 55, pp. 1801-1809, November/1967
- 7 "Large sparse set of linear equations", edited by Reid Academic Press, 1971
- 8 BROWN H.E. "Solution of large networks by matrix methods", Itajubá, Minas Gerais, Brazil, September /1974

- 9 QUIZANGA AGUIRRE VICENTE E., "Desarrollo de un programa para el cálculo digital de flujo de potencia utilizando el método de Newton Raphson". Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador. 1975
- 10 STAGG and EL-ABIAD, "Computer Methods in Power Systems", Mc Graw Hill Book Company, New York, 1968.