"DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA EL CALCULO DIGITAL DE FLUJO DE POTENCIA UTILIZANDO EL METODO DE NEWTON RAPHSON"

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO, EN LA ESCUELA POLITECNICA NACINAL.

VICENTE E. QUIZANGA AGUIRRE.

QUITO, NOVIEMBRE DE 1975.

CERTIFICO que la presente tesis: "Desarrollo de un programa digital para el cálculo de flujo de potencia utilizando el metodo de Newton Raphson", ha sido realizada por el señor Vicente Quizanga Aguirre.

ING. ALFREDO MENA P.
Director de Tesis.

AGRADECIMIENTO

Al Señor Ingeniero Alfredo Mena P., Director de Tesis, a los señores Ingenieros Hernan Sanhueza y Jaime Hidalgo, un agradecimiento también a todas las personas que conforman el Departamento de Potencia y el Centro de Computación que colaboraron en la realización de este trabajo.

INDICE GENERAL

PAGINA

PAGINA

C A P I T U L O I

INTRODUCCION.-

1.1 OBJETIVO DEL CALCULO DE FLUJO DE POTENCIA DE UN SISTEMA ELECTRICO.-

El cálculo de flujo de potencia en estado normal de operación, es uno de los aspectos más importantes en el diseño de un sistema eléctrico. Consiste basicamente en determinar las tensiones en cada una de las barras del sistema, el flujo de potencia activa y reactiva en cada línea del sistema para condiciones preestablecidas.

Este análisis da criterios básicos y permite programar ampliaciones del sistema (nuevas centrales, líneas o cargas), así como también modificar el sistema existente. Se comprende que este trabajo tiene un gran campo de acción en el país, ya que INECEL está programando la formación de diferentes sistemas regionales e integrar los pequeños sistemas eléctricos al sistema nacional interconectado.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROGRAMA A DESARROLLAR.-

Hasta el año de 1950 el cálculo de flujo de potencia se realizaba casi exclusivamente utilizando el analizador de redes de corriente alterna y en algunos casos el analizador de redes de corriente continua. Durante la década 50-60 y debido al desarrollo de computadoras digitales de gran capacidad de memoria y velocidad de operación, comenzaron a emplearse programas de computación digital para el cálculo de flujo de potencia basados en diversas técnicas de solución. Para este trabajo se ha seleccionado el método de Newton Raphson, y el objetivo es desarrollar bases teóricas en las cuales se fundamentan los principales programas de computación.

Comparaciones con otros métodos son dificultuosas, por la diferencia de computadoras, métodos de programación y problemas de prueba.

C A P I T U L O II

2.1 METODO DE NEWTON RAPHSON APLICADO A LA SOLUCION DE SISTEMAS DE ECUACIONES NO LINEALES.-

Primeramente se revisará el método de Newton Raphson aplicado a la solución de un sistema no lineal de ecuaciones algebraicas.

Sea el siguiente sistema de ecuaciones:

$$
\begin{aligned}
&f_1(X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n) = y_1 \\
&f_2(X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n) = y_2 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.1) \\
&f_n(X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n) = y_n
\end{aligned}
$$

Sean $X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots, X_n^{(o)}$, los valores estimados como solución de las incógnitas $X_1, X_2, \ldots\ldots, X_n$

Supongamos que $\Delta X_1^{(o)}, \Delta X_2^{(o)}, \ldots\ldots, \Delta X_n^{(o)}$ sean las correcciones necesarias para que $X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots, X_n^{(o)}$ sean las soluciones exactas del sistema (2.1); luego podemos escribir:

$$f_1(X_1^{(o)}+\Delta X_1^{(o)},X_2^{(o)}+\Delta X_2^{(o)},\ldots\ldots.X_n^{(o)}+\Delta X_n^{(o)}) = y_1$$

$$f_2(X_1^{(o)}+\Delta X_1^{(o)},X_2^{(o)}+\Delta X_2^{(o)},\ldots\ldots.X_n^{(o)}+\Delta X_n^{(o)}) = y_2$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$f_n(X_1^{(o)}+\Delta X_1^{(o)},X_2^{(o)}+\Delta X_2^{(o)},\ldots\ldots.X_n^{(o)}+\Delta X_n^{(o)}) = y_n$$

Desarrollando la primera ecuación en serie de Taylor para una función de n variables, se tendrá:

$$f_1(X_1^{(o)}+\Delta X_1^{(o)},X_2^{(o)}+\Delta X_2^{(o)},\ldots\ldots.X_n^{(o)}+\Delta X_n^{(o)}) =$$

$$f_1(X_1^{(o)},X_2^{(o)},\ldots.,X_n^{(o)}) + \Delta X_1\frac{\partial f_1}{\partial X_1} +\ldots\ldots+\Delta X_n \frac{\partial f_1}{\partial X_n} +R_1 \qquad (2.2)$$

Donde R_1 es una función de potencias superiores de:

$\Delta X_1^{(o)},\ldots\ldots,\Delta X_n^{(o)}$ y de las derivadas de orden superior de la función f_1. Si los valores de X_i estimados para la solución están cerca de la solución exacta, entonces los ΔX_i serán pequeños y la función R_1 puede despreciarse. Bajo esta suposición y repitiendo el proceso anterior a todas las ecuaciones del sistema (2.2), éste puede escribirse:

$$f_1(X_1^{(o)},X_2^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) + \Delta X_1^{(o)}\frac{\partial f_1}{\partial X_1} + \ldots\ldots + \Delta X_n^{(o)}\frac{\partial f_1}{\partial X_n} = y_1$$

$$f_2(X_1^{(o)},X_2^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) + \Delta X_1^{(o)}\frac{\partial f_2}{\partial X_1} + \ldots\ldots + \Delta X_n^{(o)}\frac{\partial f_2}{\partial X_n} = y_2$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$f_n(X_1^{(o)},X_2^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) + \Delta X_1^{(o)}\frac{\partial f_n}{\partial X_1} + \ldots\ldots + \Delta X_n^{(o)}\frac{\partial f_n}{\partial X_n} = y_n \tag{2.3}$$

Expresando en forma matricial tenemos:

$$\begin{vmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right|_o & \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_n}\right|_o \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_2}\right|_o & \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_n}\right|_o \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_2}\right|_o & \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_n}\right|_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_1^{(o)} \\ \Delta X_2^{(o)} \\ \cdots \\ \Delta X_n^{(o)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_1 - f_1(X_1^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) \\ y_2 - f_2(X_1^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) \\ \cdots \\ y_n - f_n(X_1^{(o)},\ldots\ldots,X_n^{(o)}) \end{vmatrix}$$

En forma abreviada: $J\,\overline{\Delta X} = \overline{Y}$

Donde: J = jacobiano de las funciones f_i $i = 1,2\ldots\ldots,n$

$\overline{\Delta X}$ = vector de corrección (incógnita)

$\overline{Y}$ = vector de residuos.

Puesto que los valores de J y $\overline{Y}$ son conocidos, el sistema puede resolverse para $\overline{\Delta X}$ empleando cualquier método de - solución aplicable a sistemas de ecuaciones lineales. Obtenido ΔX podemos escribir para los nuevos valores de las incógnitas:

$$X_i^{(1)} = X_i^{(o)} + \Delta X_i^{(o)}$$

Después de K iteraciones (K)

$$X_i^{(K+1)} = X_i^{(K)} + \Delta X_i^{(K)}$$

$i = 1, 2, 3, \ldots\ldots\ldots\ldots, n$

El procedimiento se repite hasta que dos valores sucesivos de cada X_i difieren en una tolerancia especificada.

Debe notarse que en cada iteración los valores de J y $\overline{Y}$ deben ser recalculados. En el caso que los valores de $\overline{\Delta X}_i$ cambien lentamente, los valores de J y $\overline{Y}$ pueden ser recalculados cada cierto número de iteraciones.

2.2 METODO DE NEWTON RAPHSON APLICADO AL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS.-

2.2.1 ESPECIFICACION DE BARRAS.-

Todo estudio de flujos de carga en un sistema eléctrico de potencia (SEP), requiere establecer condiciones de operación de cada barra de este sistema:

a) Variables no controlables: P_{Ci}; Q_{Ci} dependen del consumo.

b) Variables de control: P_{Gi}; Q_{Gi}

$i = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, n$

P_{Gi} = afecta a los valores de δ_1, δ_2

Q_{Gi} = afecta a los valores de V_1, V_2

c) Variables de estado: V_1, V_2, δ_1, δ_2

Solución al problema básico:

1. A partir del conocimiento de la demanda del consumo, podemos conocer las variables (a):

   P_{Ci}; Q_{Ci}

2. Se hace una estimación "a priori" de las variables de control:

   P_{Gi}; Q_{Gi}

3. Las variables de estado constituyen las incógnitas.

Sin embargo, no es posible especificar las cuatro variables de control (generación), ya que las pérdidas en el sistema no son conocidas; se pueden especificar sólo dos de ellas, por otra parte podemos elegir $\delta_1 = 0$ además, es deseable mantener un buen control de la tensión en el sistema, por lo tanto, se pueden especificar V_1 o V_2.

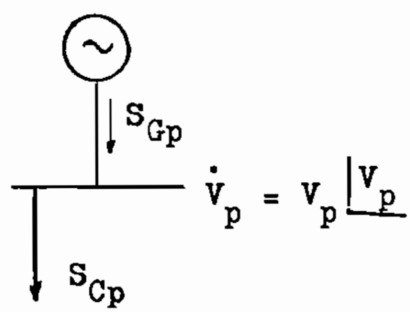
Modelo de representación del SEP:

Teniendo presente el análisis realizado para el problema básico, y con el objeto de generalizar a un sistema multibarras se establece lo siguiente:

Tipos de barras:

En cada barra p del SEP, hay cuatro variables asociadas:

P_p, Q_p, V_p, $\angle V_p$.



$S_p = S_{Gp} - S_{Cp} = P_p + jQ_p$

S_p = potencia neta en la barra p

S_{Gp}= potencia de generación en la barra p

S_{Cp}= potencia requerida por la carga.

1. Barras de carga.- (Barra P, Q)

P_p; Q_p están especificadas

V_p; V_p constituyen las incógnitas.

2. Barras de tensión controlada.- (Barra V, P)

V_p; P_p están especificados

V_p; Q_p constituyen las incógnitas.

3. Barra flotante.- (Barra $\dot{V}$)

V_p; V_p especificadas magnitud y ángulo

P_p; Q_p incógnitas.

En esta barra hay conectado por lo menos un generador, la necesidad de definir esta barra nace del hecho que no es posible fijar de antemano la potencia generada en el sistema, porque no se conocen inicialmente las pérdidas. La barra flotante debe suministrar la diferencia entre la potencia inyectada al sistema por el resto de las barras y la carga total más las pérdidas del SEP.

2.2.2 PLANTEAMIENTO DEL METODO DE NEWTON RAPHSON EN COORDENADAS CARTESIANAS.-

En el sistema de referencia de barras y utilizando la matriz admitancia YB se tiene:

$$\overline{I}_B = Y_B \cdot \overline{E}_B \qquad (2.5)$$

$\overline{I}_B$ = Vector corrientes inyectadas en las barras

$\overline{E}_B$ = Vector de tensiones de barras respecto a tierra.

Y_B = Matriz admitancia de barras.

$$\overline{I}_B = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{S_1}{E_1}\right)^* \\ \left(\frac{S_2}{E_2}\right)^* \\ \cdots\cdots \\ \left(\frac{S_n}{E_n}\right)^* \end{bmatrix} \qquad (2.6)$$

$$\overline{E}_B = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdots\cdots \\ E_n \end{bmatrix} \qquad (2.5)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se tiene:

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{S_1}{E_1}\right)^* \\ \left(\frac{S_2}{E_2}\right)^* \\ \cdots\cdots \\ \left(\frac{S_n}{E_n}\right)^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \cdots\cdots\cdots Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} \cdots\cdots\cdots Y_{2n} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} \cdots\cdots\cdots Y_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdots\cdots \\ E_n \end{vmatrix} \qquad (2.8)$$

Este sistema de ecuaciones algebraicas no lineales es necesario resolver mediante técnicas iterativas.

En una barra p cualquiera del SEP se tiene:

$$I_p = \sum_{q=1}^{N} Y_{pq}\, E_q \qquad (2.9)$$

Y_{pq} = es un elemento de la matriz admitancia de barras.

E_p = voltaje de barras.

I_p = corrientes de barras.

La barra neutra o tierra es tomada como referencia y todos los voltajes se expresan con respecto a ésta. En una red de transmisión las corrientes de barras podrían ser las que vienen del generador o las que fluyen a la carga; si no hubiera generación ni carga en un punto, representado por una barra en las ecuaciones, las corrientes I_p para esta barra debe ser cero. Los voltajes, corrientes y admitancias son números complejos:

$$I_p = a_p + jb_p = I_p e^{j\alpha p} = \sum_{q=1}^{N} e_p G_{pq} - f_q B_{pq} + j \sum_{q=1}^{N} f_q G_{pq} + e_q B_{pq}$$

$$E_p = e_p + jf_p = E_p e^{j\delta p}$$

$$Y_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} = Y_{pq} e^{j\theta_{pq}} \qquad (2.10)$$

Si a E_p se multiplica por la conjugada de la corriente I_p^* se obtiene la siguiente ecuación de potencia:

$$S_p = I_p^* \bar{E}_p$$

$$S_p = P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^{N} Y_{pq}^* \bar{E}_q^* \bar{E}_p$$

$$S_p = P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^{N} Y_{pq} E_q E_p e^{j(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq})} \qquad (2.11)$$

Donde p es el número de la barra.

Reemplazando (2.10) en (2.11) y separando la parte real e imaginaria se tiene:

$$P_p = \sum_{q=1}^{N} e_p (e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) + f_p (f_q G_{pq} + e_q B_{pq}) = e_p a_p + f_p b_p$$

$$(2.12)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^{N} f_p (e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) - e_p (f_q G_{pq} + e_q B_{pq}) = f_p a_p - e_p b_p$$

$p = 1, 2, \ldots\ldots, (n-1) \quad p \neq s \quad s =$ barra flotante.

En forma general:

$$P_p = P_p(e_j, f_j)$$

$$Q_p = Q_p(e_j, f_j) \qquad (2.13)$$

$p, j = 1, 2, 3, \ldots\ldots, (n-1)$

Referencias: 1, 2, 3, 5.

2.2.3 SISTEMA FORMADO POR BARRA FLOTANTE Y BARRAS DE CARGA

El método de Newton Raphson, requiere un conjunto de ecuaciones lineales que se forman por las expresiones de las relaciones entre cambios de potencia activa y reactiva y las componentes de los voltajes de barras.

Repitiendo el proceso del numeral 2.2.1 se tiene:

$$\begin{vmatrix} \left.\dfrac{\partial f_p}{\partial e_j}\right|_o & \left.\dfrac{\partial f_p}{\partial f_j}\right|_o \\ \left.\dfrac{\partial g_p}{\partial e_j}\right|_o & \left.\dfrac{\partial g_p}{\partial f_j}\right|_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta e_p^{(o)} \\ \Delta f_p^{(o)} \end{vmatrix} \qquad \begin{vmatrix} P_p - f(e_p^{(o)}, f_p^{(o)}) \\ Q_p - g(e_p^{(o)}, f_p^{(o)}) \end{vmatrix}$$

(2.14)

$$\left|\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots\cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{array}\right| \left|\begin{array}{c} \Delta e_1 \\ \cdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \hline \Delta f_1 \\ \cdots \\ \Delta f_{n-1} \end{array}\right| = \left|\begin{array}{c} \Delta P_1 \\ \cdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \cdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{array}\right|$$

Los coeficientes de la matriz representan el jacobiano y la n-ésima barra es la flotante; en forma matricial:

$$\left|\begin{array}{c|c} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{array}\right| \left|\begin{array}{c} \Delta e \\ \hline \Delta f \end{array}\right| = \left|\begin{array}{c} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{array}\right| \tag{2.15}$$

Los elementos del jacobiano se calculan de las ecuaciones de potencia (2.12).

$$\begin{aligned} P_p &= e_p(e_pG_{pp} + f_pB_{pp}) + f_p(f_pG_{pp} - e_pB_{pp}) \\ &\quad + \sum_{\substack{q=1 \\ q\neq p}}^{N} (e_p(e_qG_{pq} + f_qB_{pq}) + f_p(f_qG_{pq} - e_qB_{pq})) \end{aligned} \tag{2.16}$$

Derivando, los elementos no diagonales de J_1 son:

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_q} = e_p G_{pq} - f_p B_{pq} \qquad q \neq p$$

Los elementos diagonales de J_1 son:

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = 2e_p G_{pp} + f_p B_{pp} - f_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N} (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \qquad (2.17)$$

A partir de las ecuaciones de corriente en una barra p te nemos:

$$I_p = a_p + jb_p = (G_{pp} + jB_{pp})(e_p + jf_p) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N} (G_{pq} + jB_{pq})(e_q + jf_q)$$

Separando parte real e imaginaria:

$$a_p = e_p G_{pp} - f_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N} (e_q G_{pq} - f_p B_{pq})$$

$$b_p = f_p G_{pp} + e_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N} (f_q G_{pq} + e_q B_{pq}) \qquad (2.18)$$

Reemplazando el valor de a_p en la ecuación (2.17) se tiene:

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = e_p G_{pp} + f_p B_{pp} + a_p$$

Procediendo en igual forma se tiene los elementos de las submatrices restantes:

Elementos de J_2

No diagonales

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_q} = f_p G_{pq} - e_p B_{pq} \quad \text{para} \quad q \neq p$$

Diagonales

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = f_p G_{pp} - e_p B_{pp} + b_p$$

La potencia reactiva de la ecuación (2.12) es:

$$Q_p = f_p(e_p G_{pp} - f_p B_{pp}) - e_p(f_p G_{pp} + e_p B_{pp})$$

$$+ \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N} (f_p(e_p G_{pq} - f_p B_{pq}) - e_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})) \qquad (2.20)$$

Derivando se obtienen los elementos de J_3 y J_4

Elementos de J_3

No diagonales

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_q} = f_p G_{pq} - e_p B_{pq} \quad \text{para} \quad q \neq p$$

Diagonales

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = f_p G_{pp} - e_p B_{pp} - b_p \qquad (2.21)$$

Elementos de J_4

No diagonales

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = -e_p G_{pq} - f_p B_{pq} \quad \text{para} \quad q \neq p$$

Diagonales

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} = -e_p G_{pp} - f_p B_{pp} + a_p \qquad (2.22)$$

2.2.4 SISTEMA FORMADO POR BARRA FLOTANTE, BARRAS DE CARGA Y BARRAS DE TENSION CONTROLADA (BTC).-

A medida que la demanda de potencia crece, es necesario regular el voltaje en algunos puntos del sistema, para obtener óptimos flujos de potencia; y es aquí donde aparece el concepto de barra de tensión controlada, en la cual existe una fuente regulable de potencia reactiva. En este tipo de barra se especifica el módulo de la tensión y la potencia activa. Por esta razón, es necesario introducir algunos cambios en los métodos de cálculo expuestos anteriormente, que son válidos sólo cuando existen barras de carga.

$$P_p = \sum_{q=1}^{N} (e_p(e_q G_{pq} - f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})) \qquad \text{I}$$

$$|E_p|^2 = e_p^2 + f_p^2 \qquad \text{II}$$

$$(2.23)$$

La ecuación II reemplaza a $Q_p = Q_p(e_j, f_j)$

La matriz que relaciona los cambios de potencia y el cuadrado de la magnitud de voltaje en las barras, con los cambios de las componentes real e imaginaria del voltaje:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ J_5 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |E|^2 \end{bmatrix}$$

Los elementos de las submatrices J_1, J_2, J_3 y J_4 son calculados como se indica en 2.2.3.

Elementos de J_5

No diagonales

$$\frac{\partial |E_p|^2}{\partial e_q} = 0 \qquad q \neq p$$

Diagonales

$$\frac{\partial |E_p|^2}{\partial e_p} = 2e_p \qquad (2.25)$$

Elementos de J_6

No diagonales

$$\frac{\partial |E_p|^2}{\partial f_q} = 0 \qquad q \neq p$$

Diagonales

$$\frac{\partial |E_p|^2}{\partial f_p} = 2f_p \qquad (2.26)$$

2.3.1 PLANTEAMIENTO DEL METODO DE NEWTON RAPHSON EN COORDENADAS POLARES.-

Las ecuaciones de corrientes, tensiones y admitancias expresadas en forma polar son:

$$I_p = I_p \, e^{j\alpha_p} = |I_p| \underline{/\alpha_p}$$

$$E_p = E_p \, e^{j\delta_p} = |E_p| \underline{/\delta_p}$$

$$Y_{pq} = Y_{pq} e^{j\theta_{pq}} = |Y_{pq}| \underline{/\theta_{pq}} \qquad (2.27)$$

Las ecuaciones de potencias se expresan así:

$$S_p = P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^{N} Y_{pq} \, E_q \, E_p \, e^{j(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq})}$$

$$S_p = P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^{N} |Y_{pq}| \, |E_q| \, |E_p| \underline{/\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}} \qquad (2.28)$$

$$P_p = \sum_{q=1}^{N} |E_p \, E_q \, Y_{pq}| \, \mathrm{Cos}(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq})$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^{N} |E_p \, E_q \, Y_{pq}| \, \mathrm{Sen}(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \qquad (2.29)$$

En forma general P_p y Q_p :

$$P_p = P_p \, (|E_p|, \delta_j)$$

$$Q_p = Q_p \, (|E_p|, \delta_j) \qquad (2.30)$$

Formando las diferenciales totales, las siguientes relaciones lineales se pueden encontrar, para pequeños cambios de variaciones de y E de la ecuación (2.33).

$$P_p = \sum_{q=1}^{N} \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} \Delta\delta_q + \sum_{q=1}^{N} \frac{\partial P_p}{\partial E_q} \Delta E_q = \sum_{q=1}^{N} H_{pq} \Delta\delta_q + \sum_{q=1}^{N} N_{pq} \Delta E_q$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^{N} \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} \Delta\delta_q + \sum_{q=1}^{N} \frac{\partial Q_p}{\partial E_p} \Delta E_q = \sum_{q=1}^{N} J_{pq} \Delta\delta_q + \sum_{q=1}^{N} L_{pq} \Delta E_q \qquad (2.31)$$

En forma matricial se tiene:

$$\left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_p}{\partial \delta_j} & \frac{\partial P_p}{\partial E_j} \\ \hline \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_j} & \frac{\partial Q_p}{\partial E_j} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta\delta_p \\ \hline \Delta E_p \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta P_p \\ \hline \Delta Q_p \end{array}\right]$$

O bien:

$$\left[\begin{array}{c|c} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta\delta_p \\ \hline \Delta E_p \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \Delta P_p \\ \hline \Delta Q_p \end{array}\right] \qquad (2.32)$$

Elementos de J_1:

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = \left|E_p\ E_q\ Y_{pq}\right| \mathrm{Sen}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad q\neq p$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1\\ q\neq p}}^{N} \left|E_p\ E_q\ Y_{pq}\right| \mathrm{Sen}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad (2.33)$$

Elementos de J_2:

$$\frac{\partial P_p}{\partial E_q} = \left|E_p\ Y_{pq}\right| \mathrm{Cos}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad p\neq q$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial E_p} = 2\left|E_p Y_{pp}\right| \mathrm{Cos}\theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1\\ q\neq p}}^{N} E_q Y_{pq}\ \mathrm{Cos}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad (2.34)$$

Elementos de J_3:

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = -\left|E_p\ E_q\ Y_{pq}\right| \mathrm{Cos}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad p\neq q$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1\\ q\neq p}}^{N} \left|E_p\ E_q\ Y_{pq}\right| \mathrm{Cos}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad (2.35)$$

Elementos de J_4:

$$\frac{\partial Q_p}{\partial E_q} = \left|E_p\ Y_{pq}\right| \mathrm{Sen}(\delta_p-\delta_q-\theta_{pq}) \qquad p\neq q$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial E_p} = 2\left|E_p\ Y_{pp}\right| Sen\theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1\\q\neq p}}^{N} \left|E_q\ Y_{pq}\right| Sen(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \qquad (2.36)$$

En otra forma la ecuación (2.31) se expresa:

$$\begin{bmatrix} H_{pq} & N_{pq} \\ J_{pq} & L_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ E_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_p \\ Q_p \end{bmatrix} \qquad (2.37)$$

Los coeficientes H_{pq}, N_{pq}, J_{pq} y L_{pq} se evalúan tomando las derivadas parciales de la potencia real y reactiva:

$$P_p + jQ_p = E_p\ e^{j\delta p} \left[\sum_{q=1}^{N} (E_p e^{-j\delta q})(Y_{pq} e^{-j\theta_{pq}}) \right] \qquad (2.32)$$

Derivando con respecto a un valor de $\delta_q \neq \delta_p$.

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} + j\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = j(E_p\ e^{j\delta p})(E_p\ e^{-j\delta q})\ (Y_{pq}\ e^{-j\theta_{pq}}) \qquad (2.38)$$

Los dos últimos términos representan la corriente dada por la ecuación:

$$a_p + jb_p = (G_{pq} + jB_{pq})(e_p + jf_p) \qquad (2.39)$$

La ecuación (2.38) a pesar de estar planteada en forma polar, se puede escribir en forma rectangular como:

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} + j\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = j(e_p + jf_p)(a_q - jb_q) \qquad (2.40)$$

Separando parte reaal e imaginaria se tiene los siguientes valores para $p \neq q$:

$$H_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = a_q f_p - b_q e_p$$

$$J_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = -(a_q e_p + b_q f_p) \qquad (2.41)$$

Derivando la ecuacióm (2.32) con respecto a un valor de $E_q \neq E_p$ luego multiplicando y dividiendo por E_q se tiene:

$$\frac{\partial P_p}{\partial E_q} + j\frac{\partial Q_p}{\partial E_q} = \frac{1}{E_q}(E_p\, e^{j\delta p})(E_q\, e^{-j\delta q})(Y_{pq}e^{-j\theta_{pq}}) \qquad (2.42)$$

Separando parte real e imaginaria se tiene:

$$N_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial E_q} = \frac{-a_q e_p + b_q f_p}{E_p}$$

$$L_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial E_q} = \frac{-a_q f_p - b_q e_p}{E_p}$$

Para evaluar los coeficientes cuando p=q se usa un método similar, excepto que los términos de las derivadas se obtienen de un sumatorio.

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} + j\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = j(E_p e^{j\delta p})x \left| \sum_{q=1}^{N} (E_q e^{-j\delta q})(Y_{pq}e^{-j\theta_{pq}}) \right|$$

$$-j(E_p e^{j\delta p})(E_q e^{-j\delta q})(Y_{pq}e^{-j\theta_{pq}}) \qquad (2.44)$$

Simplificando;

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} + j\,\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = j(P_p + jQ_p) - jE_p^2\,(G_{pp} - jB_{pp}) \qquad (2.45)$$

Igualando partes real e imaginaria para H_{pp} y J_{pp} tenemos:

$$H_{pp} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = -Q_p - E_p^2\, B_{pp}$$

$$J_{pp} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = P_p - E_p^2\, G_{pp} \qquad (2.46)$$

Las derivadas parciales de la ecuación (2.32), con respecto a E_p son:

$$\frac{\partial P_p}{\partial E_p} + j\frac{\partial Q_p}{\partial E_p} = \frac{1}{E_p}\,(P_p + jQ_p) + E_p(G_{pp} - jB_{pp}) \qquad (2.47)$$

Igualando partes real e imaginaria para N_{pp} y L_{pp}:

$$N_{pp} = \frac{\partial P_p}{\partial E_p} = \frac{P_p}{E_p} + E_p G_{pp}$$

$$L_{pp} = \frac{\partial Q_p}{\partial E_p} = \frac{Q_p}{E_p} - E_p B_{pp} \qquad (2.48)$$

2.3.2 SISTEMA FORMADO POR BARRA FLOTANTE, BARRAS DE CARGA Y BARRAS DE TENSION CONTROLADA.-

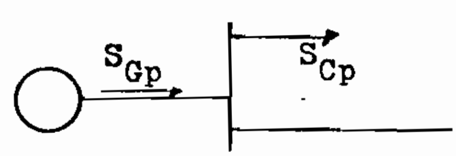
Para coordenadas polares la ecuación es:

$$P_p = P_p\,(|E_j|,\ \delta_j) \qquad p = (m+1),\ (m+2), \ldots (m+NBTC)$$

La incógnita en este caso es $\delta_p = \delta_j$, no se requiere una ecuación para Q_p, ya que conocidas todas las tensiones y sus ángulos de fase, basta aplicar la ecuación (2.29); no se encuentra ΔQ_p por no estar especificada la potencia reactiva.

Después de calcular Q_p^k se debe comprobar que se encuentre dentro de los límites de potencia reactiva de la barra; si es mayor que la máxima potencia especificada, entonces se toma ésta en lugar de Q_p^k; si por el contrario es menor que Q_p mínimo, se asume que ésta es la potencia reactiva de la barra. En estos casos será imposible llegar a una solución con ese voltaje especificado y por lo tanto E_p^k (nuevo) no se puede utilizar para calcular E_p^{k+1}.

Se ha visto que para el cálculo de flujo de potencia en un sistema con barras de voltaje controlado, es necesario tomar en cuenta los límites de potencia reactiva de las fuentes conectadas a la barra. Suponiendo que p es una barra de voltaje controlado:



$$Q_p = (Q_{Gp} - Q_{Cp})$$

$$Q_{p(min)} \leqslant Q_p \leqslant Q_{p(max)} \qquad (2.49)$$

Por otra parte:

$Q_{Gp(max)}$ = límite máximo de generación de potencia reactiva.

$Q_{Gp(min)}$ = Límite mínimo de generación de potencia reactiva.

Por tanto:

$$Q_{p(max)} = Q_{Gp(max)} - Q_{Cp}$$

$$Q_{p(min)} = Q_{Gp(min)} - Q_{Cp}$$

De esta forma quedan definidos los límites de potencia reactiva de una barra de voltaje controlado.

No hay ecuación para la barra flotante, pero su efecto involucra al sistema a través de los términos H_{pp}, J_{pp}, N_{pp} y L_{pp}, de las ecuaciones para las barras que están conectadas a la flotante. Para un sistema de N barras incluyendo la barra flotante, pero excluyendo la de referencia y si "NBTC" de ellas son de tensión controlada; el sistema (2.37) tiene (2N-NBTC-2) ecuaciones lineales simultáneas.

$$
\left[\begin{array}{cc|cc}
\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial |E_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |E_{n-1}|} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial P_m}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_m}{\partial |E_1|} & \frac{\partial P_m}{\partial |E_{n-1}|} \\
\frac{\partial P_{m+1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial |E_1|} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial |E_{n-1}|} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial |E_1|} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial |E_{n-1}|} \\
\hline
\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial |E_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |E_{n-1}|} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial Q_m}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial |E_1|} & \frac{\partial Q_m}{\partial |E_{n-1}|}
\end{array}\right]
\left[\begin{array}{c}
\Delta\delta_1 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta\delta_m \\ \Delta\delta_{m+1} \\ \cdots \\ \Delta\delta_{n-1} \\ \hline \Delta|E_1| \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta|E_m|
\end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{c}
\Delta P_1 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta P_m \\ \Delta P_{m+1} \\ \cdots \\ P_{n-1} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \cdots \\ \cdots \\ \Delta Q_m
\end{array}\right]
\tag{2.50}
$$

Las correcciones son tomadas $\Delta\delta$ y ΔE pero puede ser reemplazado el ΔE por $\Delta E / E$, desde luego $\Delta\delta$ está en radianes y nos queda una nueva "N" y "L" que por comodidad utilizamos la misma nomenclatura.

Referencias: 1, 2, 3, 8, 10,

2.3.3 RESUMEN.-

$$E_p = e_p + jf_p$$

$$Y_{pq} = G_{pq} + jB_{pq}$$

$$I_p = a_p + jb_p$$

$$a_p = \sum_{q=1}^{N} e_p\ G_{pq} - f_q\ B_{pq}$$

$$b_p = \sum_{q=1}^{N} f_q\ G_{pq} + e_q\ B_{pq}$$

$$P_p = e_p\ a_p + f_p\ b_p$$

$$Q_p = f_p\ a_p - e_p\ b_p$$

$$H_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q}$$

$$N_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial E_p} \cdot E_q$$

$$J_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p}$$

$$L_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial E_q} \cdot E_q$$

Para $p \neq q$:

$$H_{pq} = L_{pq} = a_q f_p - b_q e_p$$

$$N_{pq} = -J_{pq} = a_q e_p + b_q f_p \qquad (2.51)$$

Para p=q:

$$H_{pp} = - Q_p - B_{pp} E_p^2$$

$$L_{pp} = Q_p - B_{pp} E_p^2$$

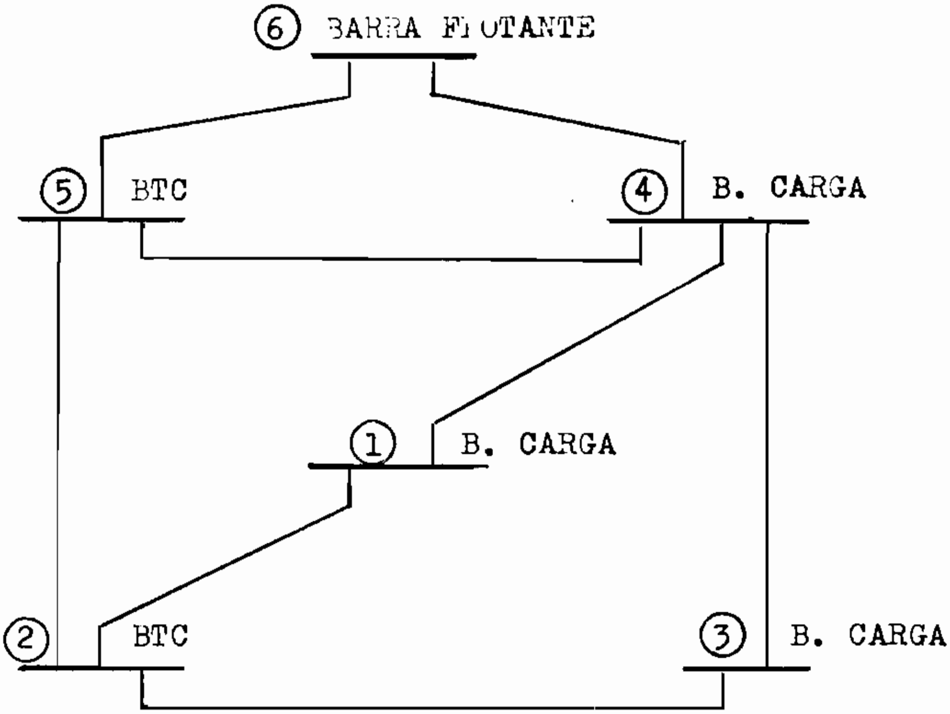
$$N_{pp} = P_p + G_{pp} E_p^2$$

$$J_{pp} = P_p - G_{pp} E_p^2 \qquad (2.52)$$

En la mayoría el sistema (2.50), se ordena de manera dife rente; agrupando los términos correspondientes $\frac{\partial P_p}{\partial \delta_j}$ y $\frac{\partial Q_p}{\partial E_j}$, en forma consecutiva, como sigue:

$$\left[\begin{array}{cc|c|cc|cc|c}
H_{11} & N_{11} & H_{12} & & & H_{14} & N_{14} & \\
J_{11} & L_{11} & J_{11} & & & J_{14} & L_{14} & \\
\hline
H_{21} & N_{21} & H_{22} & H_{23} & N_{23} & & & H_{25} \\
\hline
 & & H_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & \\
 & & J_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & \\
\hline
H_{41} & N_{41} & & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} \\
J_{41} & L_{41} & & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} \\
\hline
 & & H_{52} & & & H_{54} & N_{54} & H_{55}
\end{array}\right]
\left[\begin{array}{c}
\Delta\delta_1 \\ \Delta E_1/E_1 \\ \hline \Delta\delta_2 \\ \hline \Delta\delta_3 \\ \Delta E_3/E_3 \\ \hline \Delta\delta_4 \\ \Delta E_4/E_4 \\ \hline \Delta\delta_5
\end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{c}
\Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \hline \Delta P_2 \\ \hline \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \hline \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \\ \hline \Delta P_5
\end{array}\right]$$

(2.53)



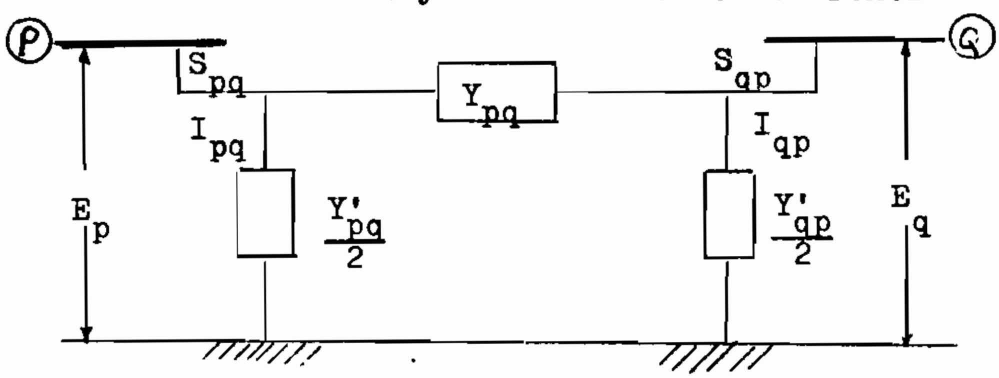
Este es un ejemplo que no será analizado en el programa; el modelo de los elementos diferentes de cero de la matriz jacobiana son de la misma forma que el sistema de la matriz admitancia Y_B; esto se considera como submatrices de dimensión (2x2), (2x1), (1x2) y (1x1) según corresponda; la matriz jacobiana es simétrica en disposición pero asimétrica en valores.

Referencias: 4, 5, 8, 10.

2.3.4 ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA

Para calcular el flujo de potencia en las líneas se necesita conocer previamente los voltajes de barras y esto se hizo en los numerales anteriores.

Consideremos 2 barras p y q cualquiera del SEP, unidas por una línea de transmisión representada por su circuito π nominal y la tierra como referencia.



A partir de la figura se tiene:

$$I_{pq} = (E_p - E_q)\, Y_{pq} + E_p \frac{Y'_{pq}}{2} \qquad (2.54)$$

Por otra parte la potencia que fluye desde p a q esta dada por:

$$S_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = E_p I^*_{pq}$$

O bien:

$$S_{pq} = E_p\left[(E_p^* - E_q^*)\, Y^*_{pq} + E_p^*\, Y^*_{pq}\ /2\right]$$

Luego:

$$S_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = (E_p^2 - E_p E_q^*) Y_{pq} + E_p^2\, Y^*_{pq}/2 \qquad (2.55)$$

Separando parte real e imaginaria de ambos términos:

$$P_{pq} = (E_p^2 - e_p e_q - f_p f_q) G_{pq} + (e_p f_q - e_q f_p) B_{pq}$$

$$Q_{pq} = (e_p f_q - e_q f_p) G_{pq} - (E_p^2 - e_p e_q - f_p f_q) B_{pq} - E_p^2 Y'^{*}_{pq}/2$$

(2.56)

Analogamente la potencia que fluye de q a p es:

$$S_{qp} = (E_q^2 - E_q E_p^*) Y_{qp}^* + E_q^2 Y'^{*}_{qp}/2 \qquad (2.57)$$

La potencia de pérdida en la línea pq es:

$$S_{L(pq)} = S_{pq} + S_{qp}$$

$$P_{(Per)} = P_{pq} + P_{qp}$$

$$Q_{(Per)} = Q_{pq} + Q_{qp} \qquad (2.58)$$

La potencia que debe dar la barra flotante se calcula como la suma de las potencias que fluyen por las líneas conectadas a esa barra más la potencia de carga.

$$P_{Gs} = P_{Cs} + \sum_{q=1}^{N-1} P_{sq}$$

$$Q_{Gs} = Q_{Cs} + \sum_{q=1}^{N-1} Q_{sq}$$

s = barra flotante

Referencias: 3, 10.

2.3.5 SECUENCIA DE SOLUCION.-

La secuencia de cálculo, señalada en los puntos anteriores se muestran en el diagrama de bloques:

1.- a) Especificar la tensión en la barra flotante; las potencias P_p y Q_p en las otras barras y el criterio de convergencia.

b) Determinar la matriz admitancia de barras Y_B

c) Suponer tensiones iniciales $E_p^{(o)}$.

2.- a) Calcular las corrientes de barras $I_p=a_p+jb_p$; empleando los valores estimados de tensiones de barras y los valores correspondientes a una fila de la matriz admitancia.

b) Calcular las variaciones de potencia activa y reactiva.

$$P_p^k = P_p \text{ (especificado) } - P_p^k$$

$$Q_p^k = Q_p \text{ (especificado) } - Q_p^k$$

3.- Criterio de convergencia.

max $P|\Delta P|$

max $Q|\Delta Q|$

a) Si no satisface el criterio de convergencia, en todas las barras, continua al punto cuatro.

b) Caso contrario va al punto siete.

4.- Calcular los elementos de la matriz jacobiana.

5.- Encontrar el vector incógnita de corrección de las tensiones supuestas en las barras o calculadas en la iteración anterior:

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \\ \Delta f \end{bmatrix} = \left[J^k\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \\ \Delta Q \end{bmatrix} \qquad o \qquad \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \\ \Delta E/E \end{bmatrix} = \left[J^k\right]^{-1} \begin{bmatrix} P \\ \\ Q \end{bmatrix} \tag{2.60}$$

6.- Obtener los nuevos valores de tensión en las barras:

$$e_p^{k+1} = e_p^k + \Delta e_p^k \qquad \delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k$$

$$f_p^{k+1} = f_p^k + \Delta f_p^k \qquad E_p^{k+1} = E_p^k + E_p^k \tag{2.61}$$

Con estos valores de tensión, se calculan los nuevos valores de P_p, Q_p, ΔP_p y ΔQ_p.

7.- Una vez que satisface el criterio de convergencia de ΔP_p y ΔQ_p, se procede al cálculo de flujos de potencia S_{pq} y S_{qp}.

CAPITULO III

TECNICAS DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES DERIVADAS DEL METODO DE NEWTON RAPHSON.-

Tanto en su forma polar como en cartesiana el método de Newton Raphson requiere la solución de un conjunto de ecuaciones lineales; estos sistemas pueden ser resueltos por métodos directos que se basan en la factorización de matrices.

3.1 METODO DE FACTORIZACION L. U.-

Sea la matriz:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots\cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Puede ser factorada en el producto de 2 matrices:

$$A = L.U \qquad (3.1)$$

Donde L es triangular inferior

U es triangular superior

Si todos los menores principales de A son no singulares $|A| \neq 0$.

$$AX = b \tag{3.2}$$

Asumimos que las matrices L y U han sido encontradas:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \ldots\ldots\ldots\ldots 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \ldots\ldots\ldots\ldots 0 \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots \\ L_{n1} & L_{n2} & L_{n3} \ldots\ldots\ldots L_{nn} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & U_{12} & U_{13} \ldots\ldots\ldots U_{1n} & \\ & 1 & U_{23} \ldots\ldots\ldots U_{2n} & \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots & \\ & & 1 & U_{n-1,n} \\ & & & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Tal que A = L.U el sistema (3.1) puede ser:

$$L\,U\,X = b \tag{3.5}$$

Haciendo:

$$U\,X = Z \tag{3.6}$$

$$L\,Z = b \tag{3.7}$$

El sistema equivalente de la última ecuación es:

$$
\begin{array}{ll}
L_{11}Z_1 & = b_1 \\
L_{21}Z_1 + L_{22}Z_2 & = b_2 \\
L_{31}Z_1 + L_{32}Z_2 + L_{33}Z_3 & = b_3 \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \\
L_{n1}Z_1 + L_{n2}Z_2 + L_{n3}Z_3 & = b_n
\end{array}
$$

Sustitución directa.-

La primera de estas ecuaciones resuelve para Z_1, la segun da para Z_2, la tercera para Z_3.....etc.

$$Z_1 = \frac{b_1}{L_{11}}$$

$$Z_2 = \frac{b_2 - L_{21}\,Z_1}{L_{22}}$$

$$Z_3 = \frac{b_3 - L_{31}\,Z_1 - L_{32}\,Z_2}{L_{33}}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$Z_i = \frac{b_i - \sum_{k=1}^{N} L_{ik}\,Z_k}{L_{ii}} \qquad (3.8)$$

Podemos determinar los Z_i a condición de que ninguno de - los elementos diagonales L_{ii} $(i = 1, 2, 3,\ldots\ldots,n)$ sea igual a cero.

El sistema equivalente de la ecuación (3.6) es:

$$
\begin{array}{llllll}
X_1 + U_{12}X_2 + U_{13}X_3 & & + U_{1n}X_n & = Z_1 \\
\phantom{X_1 + U_{12}} X_2 + U_{23}X_3 & & + U_{2n}X_n & = Z_2 \\
\multicolumn{4}{c}{\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots} \\
& & X_{n-1} + U_{n-1,n}X_n & = Z_{n-1} \\
& & X_n & = Z_n
\end{array}
$$

Este sistema se resuelve por sustitución inversa para $X_n, \ldots\ldots, X_2, X_1$, en este orden.

$$X_n = Z_n$$

$$X_{n-1} = Z_{n-1} - U_{n-1,n}X_n$$

$$X_{n-2} = Z_{n-2} - U_{n-1,n}X_n - U_{n-2,n-1}X_n$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$X_i = Z_i - \sum_{k=i+1}^{N} U_{ik}X_k \tag{3.9}$$

Algoritmo de la matriz factorada.-

Si A es una matriz de orden n; los elementos de L y U satisfacen la factorización única, bajo la condición que - los elementos diagonales de U son iguales a 1.

$$L_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{ik}U_{kj} \qquad i \geqslant j$$

$$U_{ij} = \frac{a_{ij} - \sum_{k=1}^{I-1} L_{ik}U_{kj}}{L_{ii}} \qquad i < j \qquad (3.10)$$

Para el intercambio de índices i y j los elementos son calculados en el orden:

$L_{i1}U_{1j}$, L_{i2}, U_{2j}, L_{i3}, U_{3j}, ..., $L_{i,n-1}$, $U_{n-1,j}$, L_{nn}

Para máquinas de computación los esquemas compactos son competitivos con el de la eliminación, si miramos hacia la eficiencia de computación.

3.2 METODO DE REDUCCION A UNA MATRIZ BANDA.-

Una matriz tipo banda es aquella en la cual los elementos de A son ceros, excepto aquellos que están a lo largo de la diagonal principal y de pocas diagonales adyacentes.

Si queremos resolver un sistema $AX = b$ donde A es una matriz tridiagonal:

$$A = \begin{bmatrix} B_1 & C_1 & & \cdots\cdots\cdots & & & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & & \cdots\cdots & & 0 \\ & A_3 & B_3 & C_3 & \cdots\cdots & & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots\cdots & & \cdots & A_{n-1} & B_{n-1} & C_{n-1} \\ 0 & \cdots & & \cdots\cdots & & A_n & B_n \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Al descomponer A en la forma L U nos da dos matrices triangulares de tipo banda.

$$L = \begin{bmatrix} W_1 & & & & & \\ \beta_2 & W_2 & & & & \\ & \beta_3 & W_3 & & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \\ & & & \beta_{n-1} & W_{n-1} & \\ & & & & \beta_n & W_n \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & & & & \\ & 1 & \alpha_2 & & & \\ & & 1 & \alpha_3 & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & & 1 & \alpha_{n-1} \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

El producto L U es:

$$L\,U = \begin{bmatrix} W_1 & \alpha_1 W_1 & & & \\ \beta_2 & \alpha_1\beta_2 + W_2 & \alpha_2 W_2 & & \\ & \beta_3 & \alpha_2\beta_3 + W_3 & \alpha_3 W_3 & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & \beta_n & (\alpha_{n-1}\beta_n + W_n) \end{bmatrix} \qquad (3.14)$$

Igualando los elementos no ceros de L U con los correspondientes de A, se obtienen las siguientes fórmulas:

$$W_1 = B_1 \qquad \alpha_1 = \frac{C_1}{W_1}$$

$$\beta_i = A_i \qquad W_i = B_i - \alpha_{i-1}\beta_i \qquad \alpha_i = \frac{C_i}{W_i} \qquad i = 2, 3, ..n-1$$

$$\beta_n = A_n \qquad W_n = B_n - \alpha_{n-1}\beta_n \qquad (3.15)$$

Con la condición que $W_i \neq 0$. Los elementos se calculan en el siguiente orden: W_1, α_1, W_2, α_2, etc.

Para obtener la solución del sistema tridiagonal:

$$A\,X = L\,U\,X = b$$

$$U\,X = Z$$

$$L\,Z = b \qquad (3.16)$$

Puesto que $\beta_i = A_i$, se resuelve directamente para obtener Z_i:

$$Z_1 = \frac{b_1}{W_1}$$

$$Z_i = \frac{b_i - A_i Z_{i-1}}{W_i} \qquad (3.17)$$

Finalmente podemos encontrar X_i, a partir de $U X = Z$ por sustitución inversa.

$$X_n = Z_n$$

$$X_{n-1} = Z_{n-1} - \alpha_{n-1} X_n$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad (3.18)$$

$$X_{n-k} = Z_{n-k} - \alpha_{n-k} X_{n-k+1} \qquad k = 1, 2, \dots, n-1$$

3.3 METODO DE ELIMINACION DE GAUSS.-

Este método transforma la matriz aumentada $\tilde{A}$, en una matriz triangular superior, más el vector de los residuos modificados, el sistema se resuelve por sustitución inversa.

a) Eliminacion por columnas.-

Sea el sistema:

$$AX = b = a_{1,n+1}$$

$$AX - a_{1,n+1} = 0$$

$$\tilde{A}X = 0$$

Sistema inicial:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & & a_{1n} & a_{1,n+1} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} & a_{2,n+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & & a_{nn} & a_{n,n+1} \end{bmatrix}$$

En el proceso de eliminación:

$$A' = \begin{bmatrix} 1 & a' & & a'_{1n} & a'_{1,n+1} \\ 0 & a'_{22} & & a'_{2n} & a'_{2,n+1} \\ 0 & a'_{n2} & & a'_{nn} & a'_{n,n+1} \end{bmatrix}$$

Después de la eliminación:

$$A'' = \begin{bmatrix} 1 & a'_{12} & & a'_{1n} & a'_{1,n+1} \\ & 1 & & a'_{2n} & a'_{2,n+1} \\ & & & \cdots & \cdots \\ & & & 1 & a^{n}_{n,n+1} \end{bmatrix} \qquad (3.19)$$

Analizando el número de operaciones que se realizan para triangularizar una matriz llena n(n+1) se tiene:

Columna		Divisiones	Sumas-Multiplicaciones
1º		$(n+1)$	$(n+1)\ (n-1)$
2º	+	n	$n\ \ (n-2)$
3º	+	$n-1$	$(n-1)\ (n-3)$
$(n-1)$		3	$(n-(n-1+2))(n-(n-1))$
n		2	$(n-(n+2))(n-n) = 0$
		$\sum_{k=2}^{N+1} K+$	$\sum_{k=2}^{N} (k+1)(k-1)$

(3.20)

b) Eliminación por filas:

$$A'' = \begin{bmatrix} 1 & a'_{12} & & a'_{1n} & a'_{1,n+1} \\ 0 & 1 & & a^2_{2n} & a^2_{2,n+1} \\ 0 & 0 & 1 & a^3_{3n} & a^3_{3,n+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n-1,1} & & & a_{n-1,n} & a_{n-1,n+1} \\ a_{n,1} & & & a_{n,n} & a_{n,n+1} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} 1º \text{ paso} \\ 2º \text{ paso} \\ 3º \text{ paso} \\ \\ \\ \\ \end{array} \tag{3.21}$$

Fila	Divisiones	Sumas - Multiplicaciones
1º	n+1	
2º	n	n+1
3º	n-1	(n+1) + n
4º	n-2	(n+1) + n +(n-1)
.....	.....	.....
n-1	3	(n+1) + n +(n-1).......5. 4
n	2	(n+1) + n +(n-1)..........4. 3
	$\sum_{k=2}^{N+1} k$	(n+1)(n-1) + n (n-2)+(n-1)(n-3)..4x2+3x1
		$\sum_{k=2}^{N} (k+1)\,(k-1)$

El número de operaciones, es igual al eliminar por columnas o filas cuando la matriz es llena.

Número de operaciones para la sustitución inversa.

Fila	Divisiones	Sumas - Multiplicaciones
n-1	1	1
n-2	1	2
....	....	....
1	1	n-1
	(n-1)	$\sum_{k=1}^{N-1} k$

(3.22)

El número total de operaciones es:

$$\sum_{k=2}^{N+1} k + (n-1) + 2\left[\sum_{k=2}^{N} (k+1)\ (k-1) + \sum_{k=1}^{N-1} k\right]$$

Usando fórmulas de álgebra:

$$\sum_{k=1}^{N} k = \frac{(n+1)n}{2} \qquad \sum_{k=1}^{N} k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

Se tiene:

Divisiones $\frac{n^2}{2} + \frac{5}{2} n \ -1$

Multiplicaciones $\frac{1}{3} n^3 + n^2 - \frac{4}{3} n$

Sumas $\frac{1}{3} n^3 + n^2 - \frac{4}{3} n$

Total $\frac{2}{3} n^3 + \frac{5}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \ -1$ (3.23)

Referencias 12, 13.

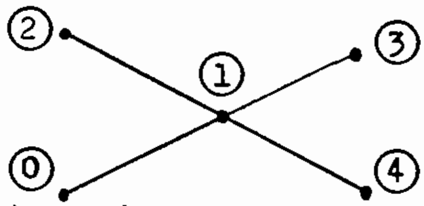
3.4 METODO DE ELIMINACION OPTIMAMENTE ORDENADO.-

La técnica de eliminación optimamente ordenada aprovecha la dispersidad de la matriz jacobiana, para producir el número de operaciones y términos no nulos durante el proceso de triangularización de la matriz. La eliminación optimamente ordenada consiste en 2 etapas: ordenamiento óptimo y eliminación.

a) Ordenamiento óptimo.-

Consiste en numerar las barras de un SEP de tal manera que minimizen el número de operaciones y elementos no nulos durante el proceso de triangularización.

Considerando el siguiente ejemplo:



Referencia

$$Y_B = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \left| \begin{array}{cccc} X & X & X & X \\ X & X & & \\ X & & X & \\ X & & & X \end{array} \right| \end{array} \qquad (3.24)$$

X = Indice del elemento no nulo de la matriz admitancia de barras.

Después de procesar la primera fila:

$$Y_B' = \left| \begin{array}{cccc} 1 & X & X & X \\ & X & X & X \\ & X & X & X \\ & X & X & X \end{array} \right| \qquad (3.25)$$

Al final de la triangularización:

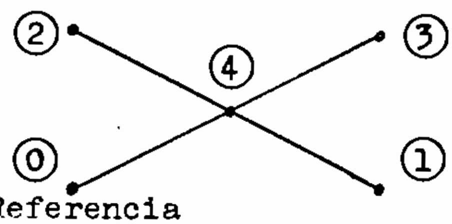
$$
Y''_B = \begin{vmatrix} 1 & X & X & X \\ & 1 & X & X \\ & & 1 & X \\ & & & 1 \end{vmatrix} \qquad (3.26)
$$

El número de operaciones para transformar Y_B a Y''_B es:

Sumas-Multiplicaciones = 21

Divisiones = 10

Si cambiamos el número asignado a la barra 1 por el número cuatro tenemos:



$$
Y_B = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \begin{vmatrix} X & & & X \\ & X & & X \\ & & X & X \\ X & X & X & X \end{vmatrix} \end{array} \qquad (3.27)
$$

Después del proceso de la primera fila (antigua cuarta fila).

$$Y'_B = \begin{vmatrix} 1 & & & X \\ & X & & X \\ & & X & X \\ & X & X & X \end{vmatrix} \qquad (3.28)$$

Al final de la triangularización:

$$Y''_B = \begin{vmatrix} 1 & & & X \\ & 1 & & X \\ & & 1 & X \\ & & & 1 \end{vmatrix} \qquad (3.29)$$

Este ejemplo requiere:

Sumas-Multiplicaciones = 9

Divisiones = 7

Las matrices Y''_B de las ecuaciones (3.26) y (3.29) son equivalentes y pueden ser intercambiadas en la mayoría de aplicaciones. Estos dos ejemplos demuestran como, la secuencia de operaciones o arreglos de filas y columnas influencian en el número de operaciones y de términos diferentes de cero.

Han investigado este problema y tienen conclusiones tentativas para ordenamiento óptimo.

1) Las barras son numeradas partiendo con aquellas que tienen el mínimo de líneas incidentes y se termina con aquellas que tienen el mayor número. Este método no toma en cuenta lo que pasa en las etapas intermedias del proceso de triangularización.

2) Las barras son numeradas de tal modo que a cada paso del proceso de eliminación, la próxima barra a ser eliminada es aquella que tenga el menor número de líneas incidentes.

b) Proceso de eliminación.-

Usualmente para triangularizar una matriz mediante el método de Gauss, se producen ceros siguiendo un orden por columnas, pero es más eficiente producir por filas.

Referencias: 7, 8, 9.

C A P I T U L O IV

4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTACION.-

4.1 IDEAS PRELIMINARES.-

Este capítulo describe la conformación del programa, para el calculo de flujo de potencia; consta de dos subrutinas y siete bloques. se utiliza "SIN" y "COS" unicamente para correcciones de voltajes.

4.2 DESCRIPCION DEL PROGRAMA.-

El diagrama principal de bloques, señala claramente la forma como se ha desarrollado el programa de computación.

A continuación se detallan los valores que dependen de la computadora y del SEP, esto es su nombre en fortran y su significado.

FORTRAN	SIGNIFICADO
ITER	Iteración
LEC	Lectora
IMP	Impresora
NB	Número de barras
NBTC	Número de barras de tensión controlada
NE	Número de líneas o elementos del sistema
EPSI	Criterio de convergencia
NR	Dimension de la matriz jacobiana

En base a las subrutinas ORDEN y MATRZ mencionadas en el apéndice, se describen a continuación las subrutinas desarrolladas en el programa.

SUBRUTINA ORDEN.-

Su funcion es ordenar los elementos en forma ascendente de acuerdo al node P al que están conectados y para los elementos que tienen el mismo nodo P, los ordena en forma ascendente de acuerdo a los nodos Q. Este ordenamiento es fundamental para la formación de Y_B.

Esta subrutina tiene una modificación, cuando se da doble a los elementos del SEP. Si $Y_{pq} \neq Y_{qp}$ el programa se detiene, en caso de que $Y_{pq} = Y_{qp}$ el programa continúa a la subrutina MATRZ.

Los valores correspondientes de admitancia de cada línea y admitancias a tierra se consideran representados por un circuito π nominal.

Entonces se tiene la siguiente correspondencia.

FORTRAN	SIGNIFICADO
NDE	Número asignado al elemento
NP	Nodo P al que está conectado
NQ	Nodo Q al que está conectado

YR	Conductancia p.u	G_{pq}
YI	Susceptancia p.u	Bpq
YR1	Parte real de la admitancia paralela conectada a P	$\frac{Y'_{pq}}{2}$
YI1	Parte imaginaria de la admitancia paralela conectada a P	
YR2	Parte real de la admitancia - paralela conectada a Q	
YI2	Parte imaginaria de la admitancia paralela conectada a Q	

SUBRUTINA MATRZ.-

Su función es almacenar los elementos de la matriz Y_B debido a que muchos elementos de Y_{pq} son iguales a cero, en esta subrutina se ha desarrollado un algoritmo para representar Y_B en forma de un vector, considerando los elementos $Y_{pq} \neq 0$, con lo que se obtiene un ahorro de memoria en la computadora.

Cuando se da doble dato a los elementos del SEP en el diagrama de bloques no hay ninguna modificación pero si en el programa mismo, ya que se utiliza la mitad de las instrucciones para la formación de la matriz admitancia.

De acuerdo a la forma que trabaja la subrutina ORDEN, la posición de los elementos del vector Y_B queda de la si - guiente forma:

	FILA 1	FILA 2	FILA 3	FILA 4	FILA 5
$Y_B=$	$Y_{11}Y_{13}$	$Y_{22}Y_{23}Y_{24}$	$Y_{33}Y_{31}Y_{32}Y_{35}$	$Y_{44}Y_{42}Y_{45}$	$Y_{55}Y_{53}Y_{54}$

La admitancia propia Y_{pp} corresponde a la suma de las ad- mitancias que concurren a cada barra.

$$Y_{pp} = \sum_{q=1}^{N} Y_{pq} + \sum_{q=1}^{N} \frac{Y'_{pq}}{2}$$

La admitancia mutua Y_{pq}, corresponde a la suma de las ad- mitancias comunes a p y q (con signo cambiado).

FORTRAN	SIGNIFICADO
YMR	Parte real de la matriz admitancia Y_B
YMI	Parte imaginaria de la matriz admitancia Y_B
NF	Vector indicador del número de fila
I2	Vector indicador del número de columna
JJ	Principio de fila del vector Y_B
K	Final de la fila del vector.

BLOQUE 1

ASUMIR VOLTAJES DE BARRAS.-

Dentro de las condiciones iniciales entran en esta clasificación los valores supuestos de tensiones de barras (e, f, E y δ), uno de los requisitos del método de Newton Raphson para que los resultados converjan a la solución, es que los valores iniciales sean cercanos. Se especifican también las potencias en los diferentes tipos de barras.

FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
E	Parte real del voltaje p. u	e
F	Parte imaginaria del voltaje p.u	f
TE	Módulo de la tensión p.u	$\lvert E \rvert$
DEL	Angulo del voltaje	
NBI	Número de identificación del tipo de barra.	
	Barra flotante	2
	Barra de carga	1
	Barra de tensión controlada	0
NBS	Número de barras del sistema	
PG	Potencia activa de generación	
QG	Potencia reactiva de generación	
PC	Potencia activa de carga	
QC	Potencia reactiva de carga	
QGMAX	Potencia reactiva máxima de generación	
QGMIN	Potencia reactiva mínima de generación	

BLOQUE 2

CALCULO DE CORRIENTES, POTENCIAS Y DIFERENCIA DE POTENCIAS

En esta parte del programa se calculan las corrientes de barras $I_p = a_p + b_p$ y las potencias P_p y Q_p; para cada barra del sistema exceptuando la barra flotante. Se determina la diferencia entre los valores especificados y calculados de la potencia activa y reactiva. Luego se obtienen los valores absolutos de estas diferencias.

Para barras de tensión controlada, se debe asegurar que la potencia reactiva esté dentro de los límites especificados, en caso de que no cumpla estas condiciones, la BTC se constituye en una nueva barra de carga.

FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
AI	Parte real de corriente de barra	a_p
BI	Parte imaginaria de corriente de barra	b_p
PA	Potencia activa neta	PG + PC
QR	Potencia reactiva neta	QG + QC
P	Potencia activa calculada	$P_p=e_pa_p+f_pb_p$
Q	Potencia reactiva calculada	$Q_p=f_pa_p-e_pb_p$
AP	Diferencia de potencia activa	ΔP^k
AQ	Diferencia de potencia reactiva	ΔQ^k
PP	Valor absoluto de P	$\|\Delta P\|^k$
QQ	Valor absoluto de Q	$\|\Delta Q\|^k$

B L O Q U E 3

PRUEBA DE CONVERGENCIA.-

En este bloque se realiza la comprobación de la convergencia; esto es, determinar si los valores absolutos de P y Q calculados anteriormente están dentro de la tolerancia especificada. Una vez satisfecha esta condición se calcula la potencia en las líneas y en la barra flotante. En caso contrario, se determina el vector de cambio de potencia real y reactiva.

$$BB(I) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

El siguiente paso consiste en determinar los valores de la matriz jacobiana, para luego resolver el sistema de ecuaciones lineales, las mismas que determinan la corrección de los nuevos voltajes de barras.

B L O Q U E 4

CALCULAR LOS ELEMENTOS DE LA MATRIZ JACOBIANA.-

La obtención de los elementos de la matriz jacobiana se efectúa de acuerdo a las ecuaciones (2.59) y (2.60) en forma simétrica indicadas por W_i $i=1, 2,\ldots,n$; como se esquematiza en la siguiente tabla.

W_1	W_2		W_3	
W_2	W_4	W_5		W_6
	W_5	W_7	$\longrightarrow$	
W_3		$\downarrow$		
	W_6			

Para cada uno de estos términos se deben calcular las componentes real e imaginaria de las corrientes de línea. La ubicación de las BTC en la matriz es indiferente.

FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
	Corrientes de línea	
CC(K2)	Parte real de p-q	c_{pq}
DD(K2)	Parte imaginaria de p-q	d_{pq}
EE(M)	Parte real de q-p	c_{qp}
FF(M)	Parte imaginaria de q-p	d_{qp}
$\lvert A \rvert$	Matriz jacobiana	$\lvert J \rvert$
$\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ij} \\ A_{ji} & A_{jj} \end{bmatrix}$	Submatriz diagonal	$\begin{bmatrix} H_{pp} & N_{pp} \\ J_{pp} & L_{pp} \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} A_{ij} & A_{ij} \\ A_{ij} & A_{ij} \end{bmatrix}$	Submatriz fuera de la diagonal	$\begin{bmatrix} H_{pq} & N_{pq} \\ J_{pq} & L_{pq} \end{bmatrix}$

K1	Identifica el tipo de barra
K2	Indica la columna o fila en que se está operando
K3	Contador del Nº de BTC para formación de submatrices diagonales
K4	Contador del Nº de BTC para formación de submatrices no diagonales

BLOQUE 5

CALCULO DE LA CORRECCION DE VOLTAJES POR EL METODO DE FACTORIZACION DE MATRICES L U.-

En el capítulo anterior se explica, la teoría a seguir para la solución de un sistema de ecuaciones lineales. La primera parte de este bloque factoriza la matriz J utilizando las fórmulas (3.10), luego realiza las sustituciones directa e inversa basadas en las fórmulas (3.8) y (3.9) de esta manera, se obtiene la solución de pequeños cambios de voltaje en ángulo y magnitud $\Delta\delta_p$ y $\Delta E_p/E_p$

FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
A(I,J)	Matriz jacobiana	$\lvert J\rvert$
BL(I,J)	Matriz triangular inferior	$\lvert L\rvert$
U(I,J)	Matriz triangular superior	$\lvert U\rvert$

Z(I)	Vector auxiliar	z_i
X(I)	Vector solución	$\begin{vmatrix} \Delta\delta \\ \Delta E/E \end{vmatrix}$

B L O Q U E 6

CALCULO DE LAS NUEVAS TENSIONES DE BARRAS.-

Los elementos calculados en el paso anterior so sumados a los valores de la iteración actual; con estos se obtienen los nuevos valores de las tensiones de barras que se emplean en la siguiente iteración.

FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
DELD(M)	Variación de ángulo de voltaje	$\Delta\delta$
DEL(M)	Nuevo ángulo de voltaje	$\delta^{k+1} = \delta^{k} + \Delta\delta^{k}$
DELE(M)	Variación del módulo de voltaje	E
TE(M)	Nuevo módulo de voltaje	$E^{k+1} = E^{k} + \Delta E^{k}$
E(M)	Nueva parte real de voltaje	$E \cos\delta$
F(M)	Nueva parte imaginaria de voltaje	$E \sin\delta$

En la última parte de este bloque existe un limitador del número de iteraciones.

BLOQUE 7

CALCULO DE FLUJO DE POTENCIA Y PERDIDAS EN LAS LINEAS.-

Una vez que hay convergencia, se calcula el flujo de potencia y las pérdidas en las líneas, basándose en las fórmulas (2.65) y (2.66) respectivamente. Los flujos que se obtienen son de cada una de las líneas y no entre barras como se podría suponer, y están dados por los siguientes signos:

Positivo (+) salen de la barra

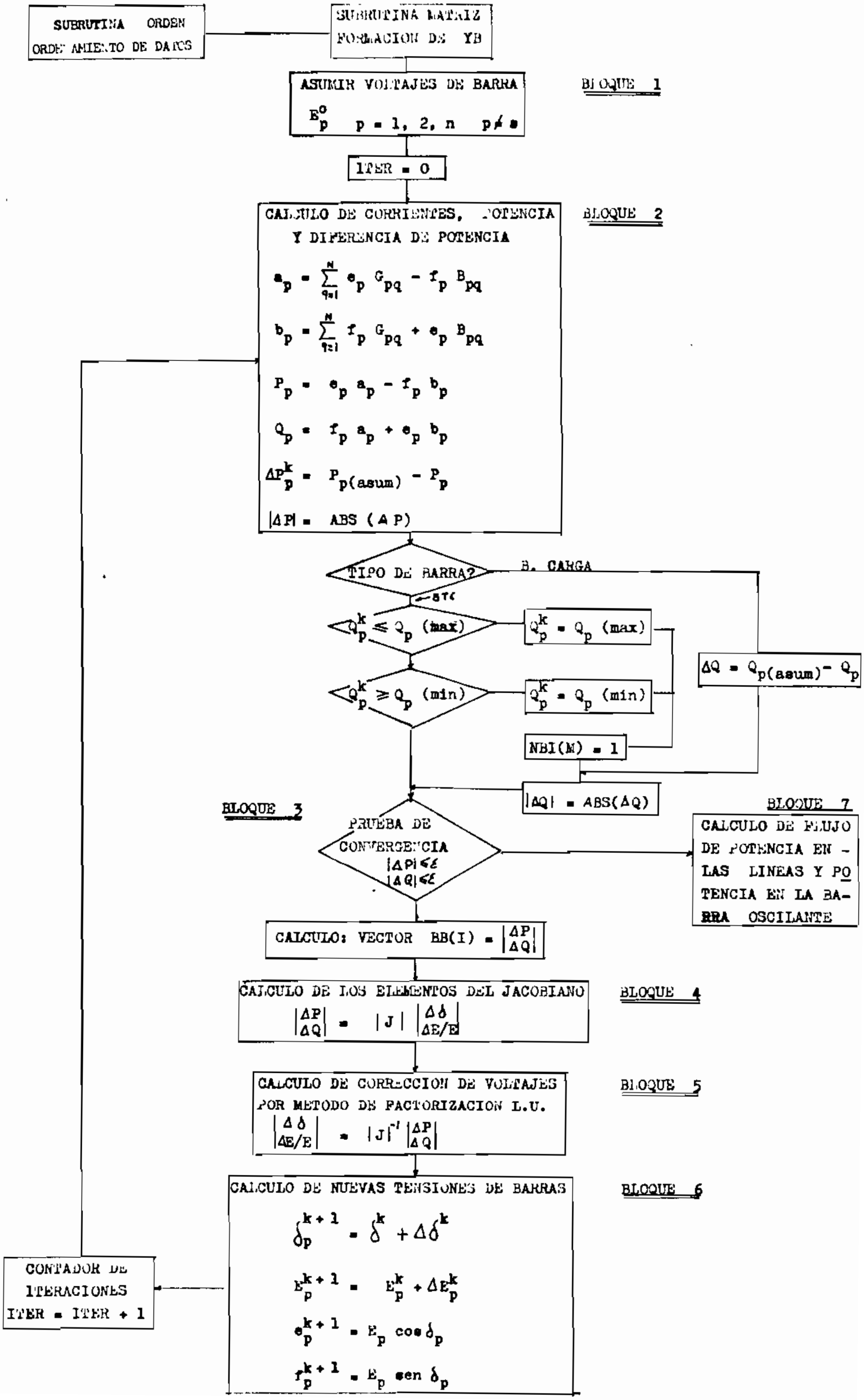
Negativo (-) llegan a la barra

Luego, se calculan las potencias activa y reactiva en la barra flotante.

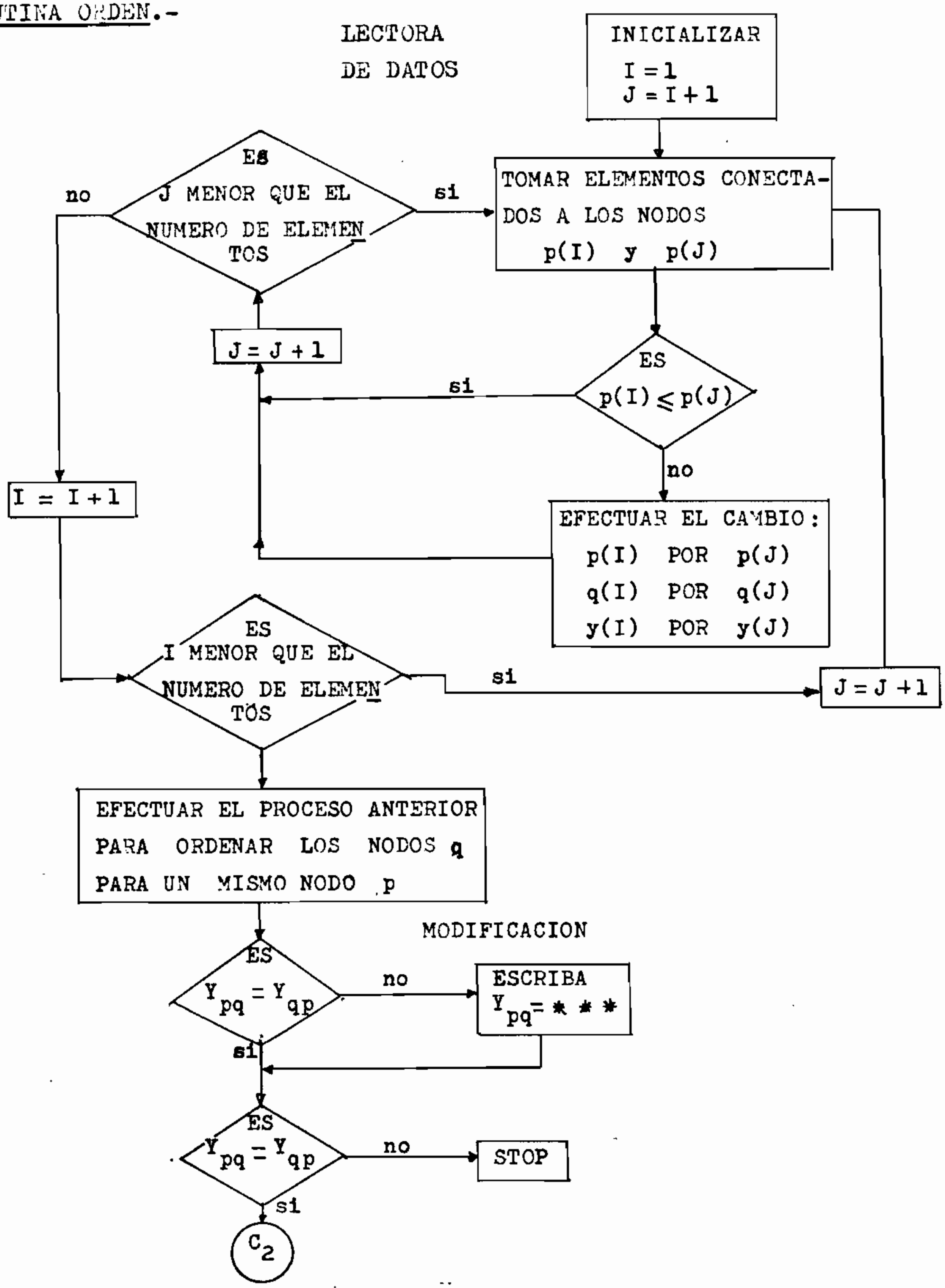
FORTRAN	SIGNIFICADO	FORMULA
	Variables:	
V_1	Auxiliar de voltajes	$E_p^2-e_pe_q-f_pf_q$
V_2	Auxiliar de voltajes	$E_q^2-e_pe_q-f_pf_q$
$V_3=-V_4$	Auxiliar de voltajes	$e_pf_q-e_qf_p$
	Potencias:	
PPQ(M)	Activa de líneas	$P_{pq}=V_1G_{pq}+V_3B_{pq}$
PQP(M)	Activa de líneas	$P_{qp}=V_2G_{qp}+V_4B_{qp}$
PPER(M)	Activa de pérdias	$P_{pérdidas}=P_{pq}+P_{qp}$

QPQ(M)	Reactiva de líneas	$Q_{pq}=V_3G_{pq}-V_1B_{pq}-E_p^2Y'_{pq}/2$
QQP(M)	Reactiva de líneas	$Q_{qp}=V_4G_{qp}-V_2B_{pq}-E_q^2Y'_{qp}/2$
QPER(M)	Reactiva de pérdidas	$Q_{pérdidas}= Q_{pq}+Q_{qp}$
PFLOT	Activa en la barra flotante	P
QFLOT	Reactiva en la barra flotante	Q

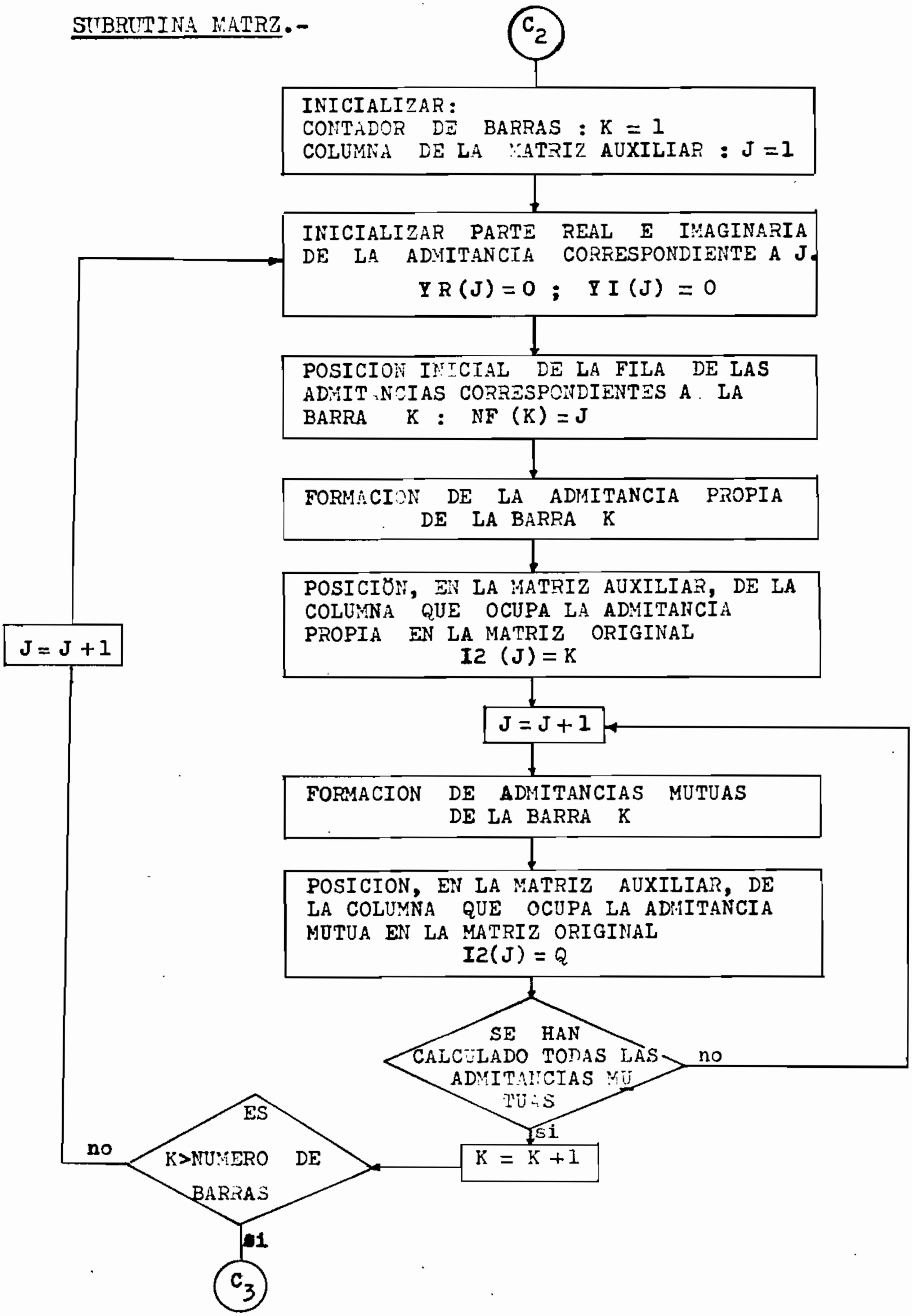
DIAGRAMA PRINCIPAL



SUBRUTINA ORDEN.-

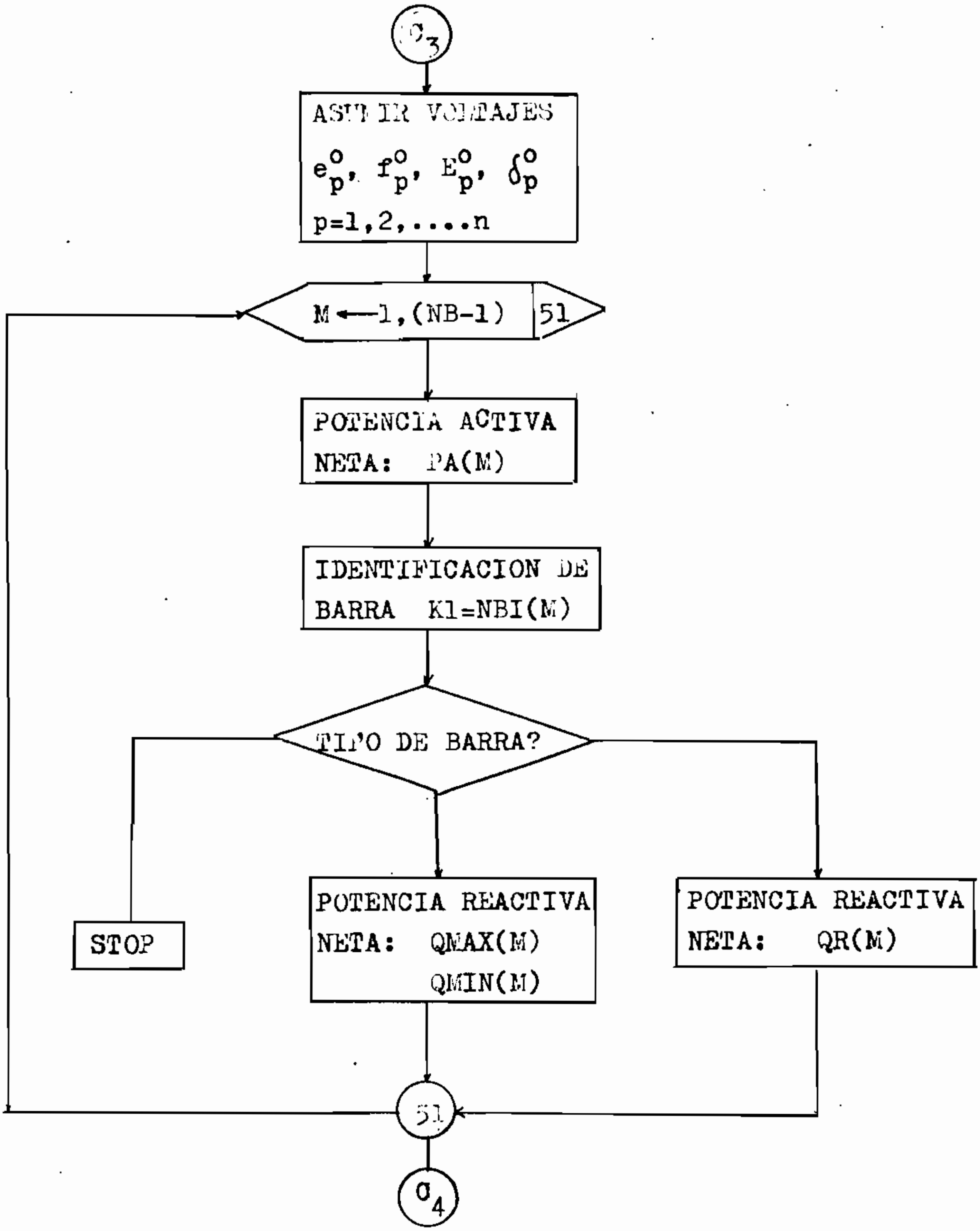


SUBRUTINA MATRZ.-

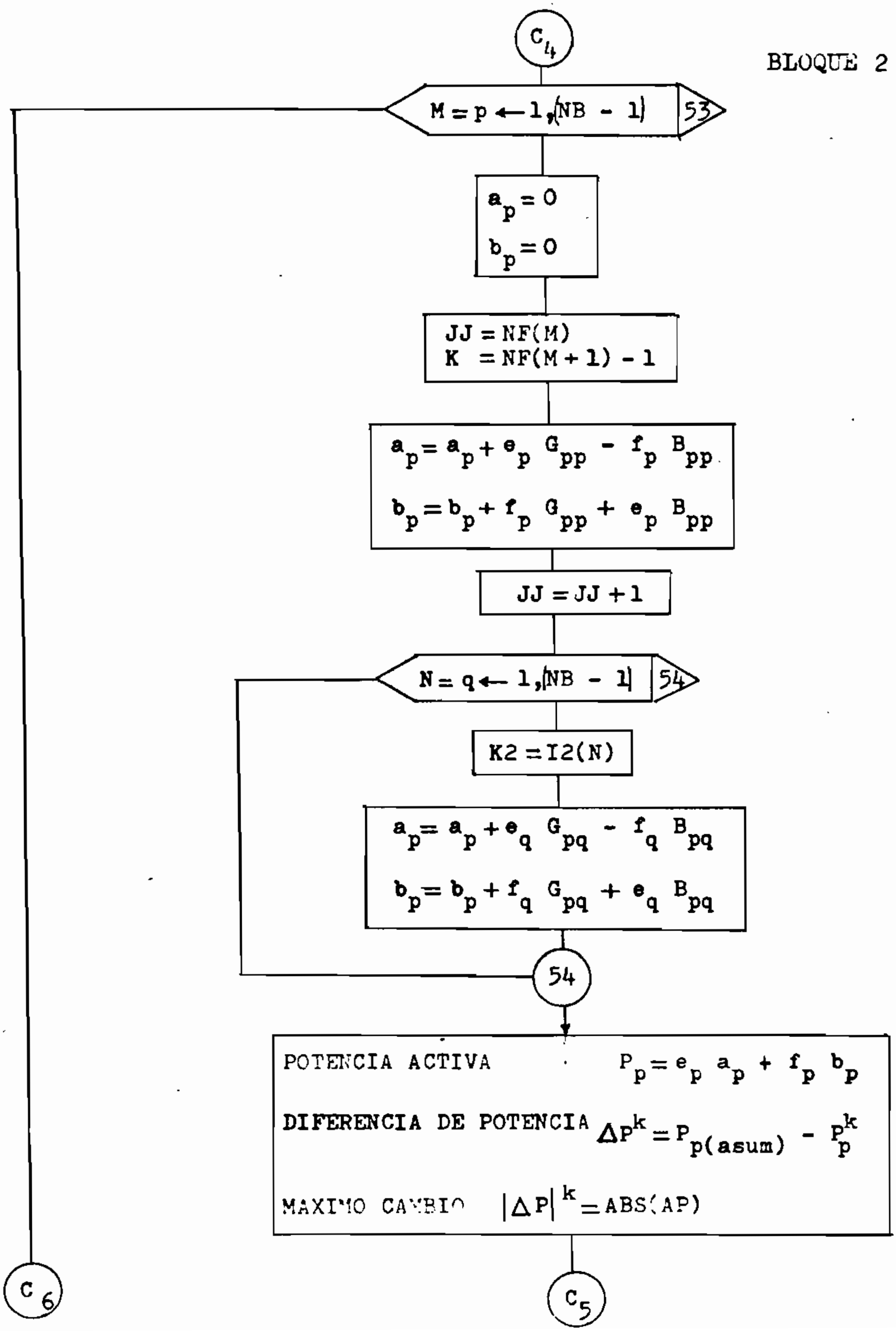


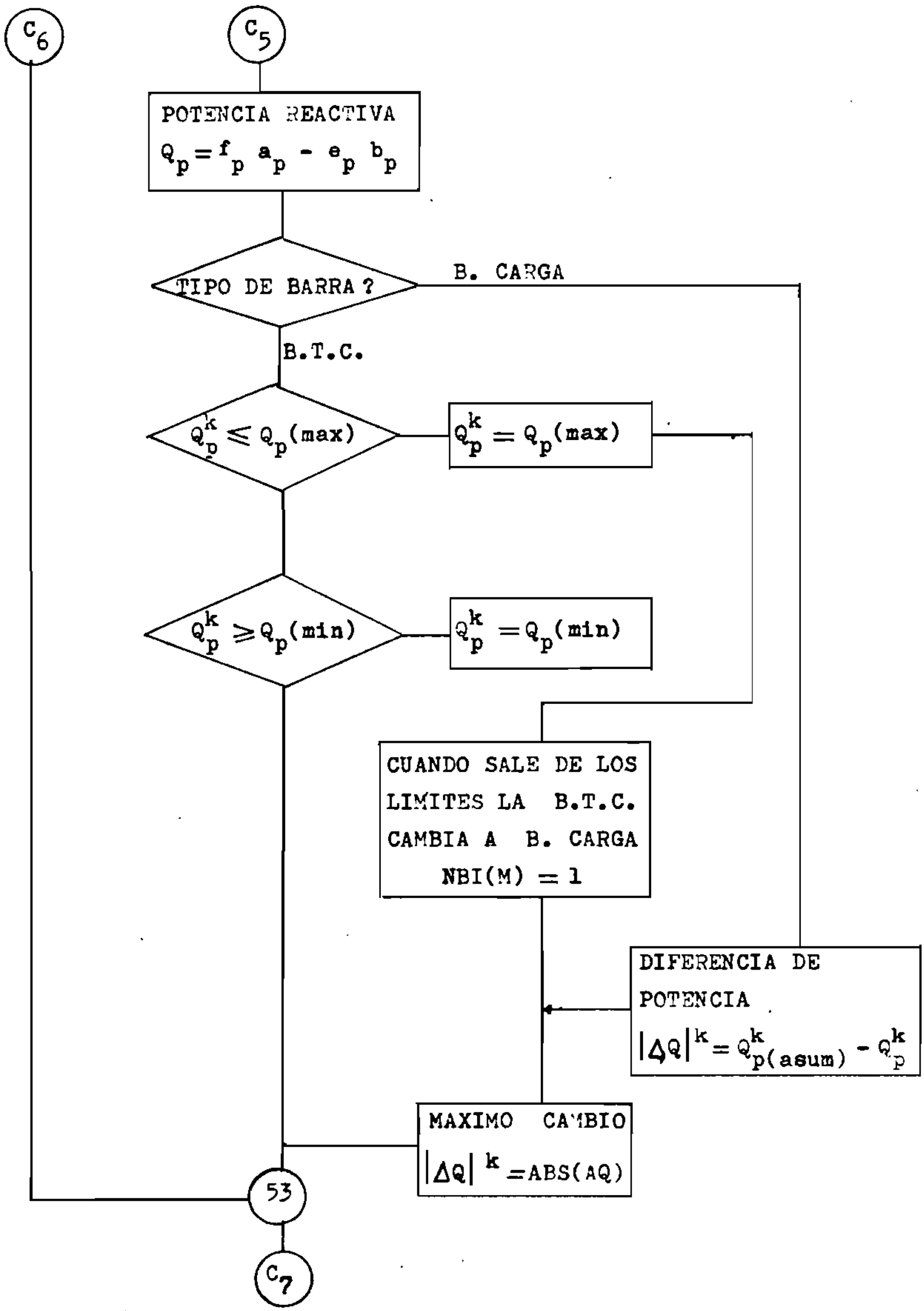
ASUMIR VOLTAJES DE BARRAS

BLOQUE 1



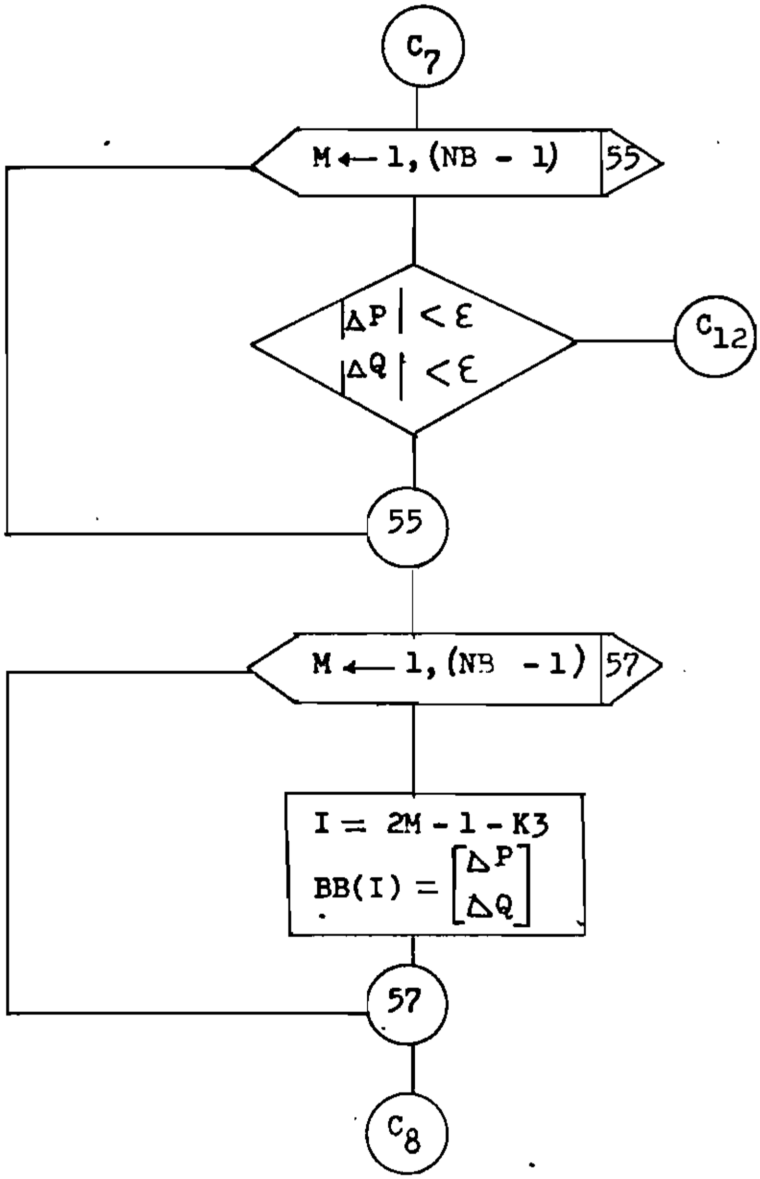
CALCULO DE CORRIENTES, POTENCIAS Y DIFERENCIA DE POTENCIAS -



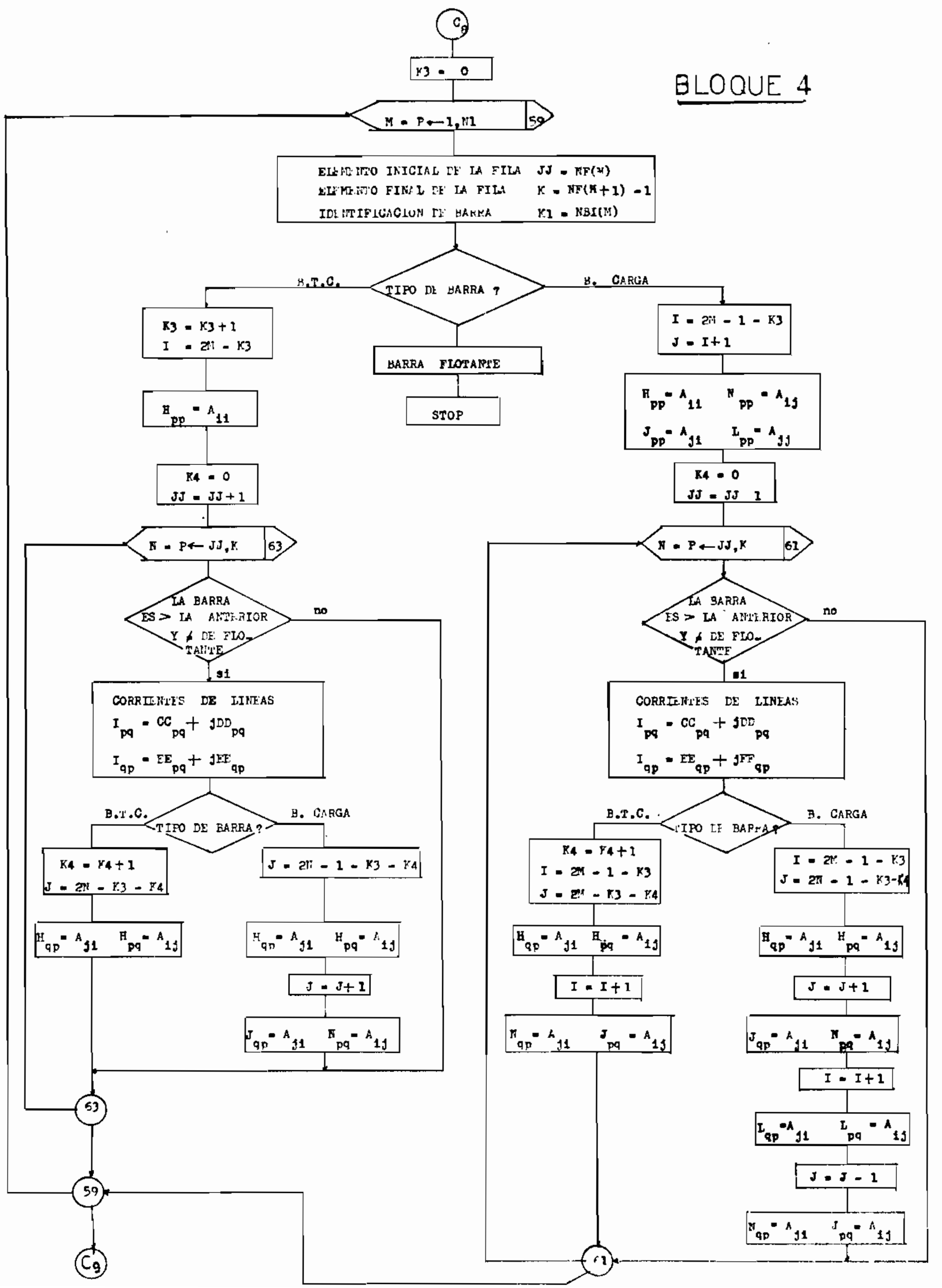


C6
C5
POTENCIA REACTIVA
$Q_p = f_p\ a_p - e_p\ b_p$
TIPO DE BARRA ?
B. CARGA
B.T.C.
$Q_p^k \leq Q_p(\max)$
$Q_p^k = Q_p(\max)$
$Q_p^k \geq Q_p(\min)$
$Q_p^k = Q_p(\min)$
CUANDO SALE DE LOS LIMITES LA B.T.C. CAMBIA A B. CARGA
NBI(M) = 1
DIFERENCIA DE POTENCIA
$|\Delta Q|^k = Q^k_{p(asum)} - Q^k_p$
MAXIMO CAMBIO
$|\Delta Q|^k$ =ABS(AQ)
53
C7

PRUEVA DE CONVERGENCIA .- BLOQUE 3

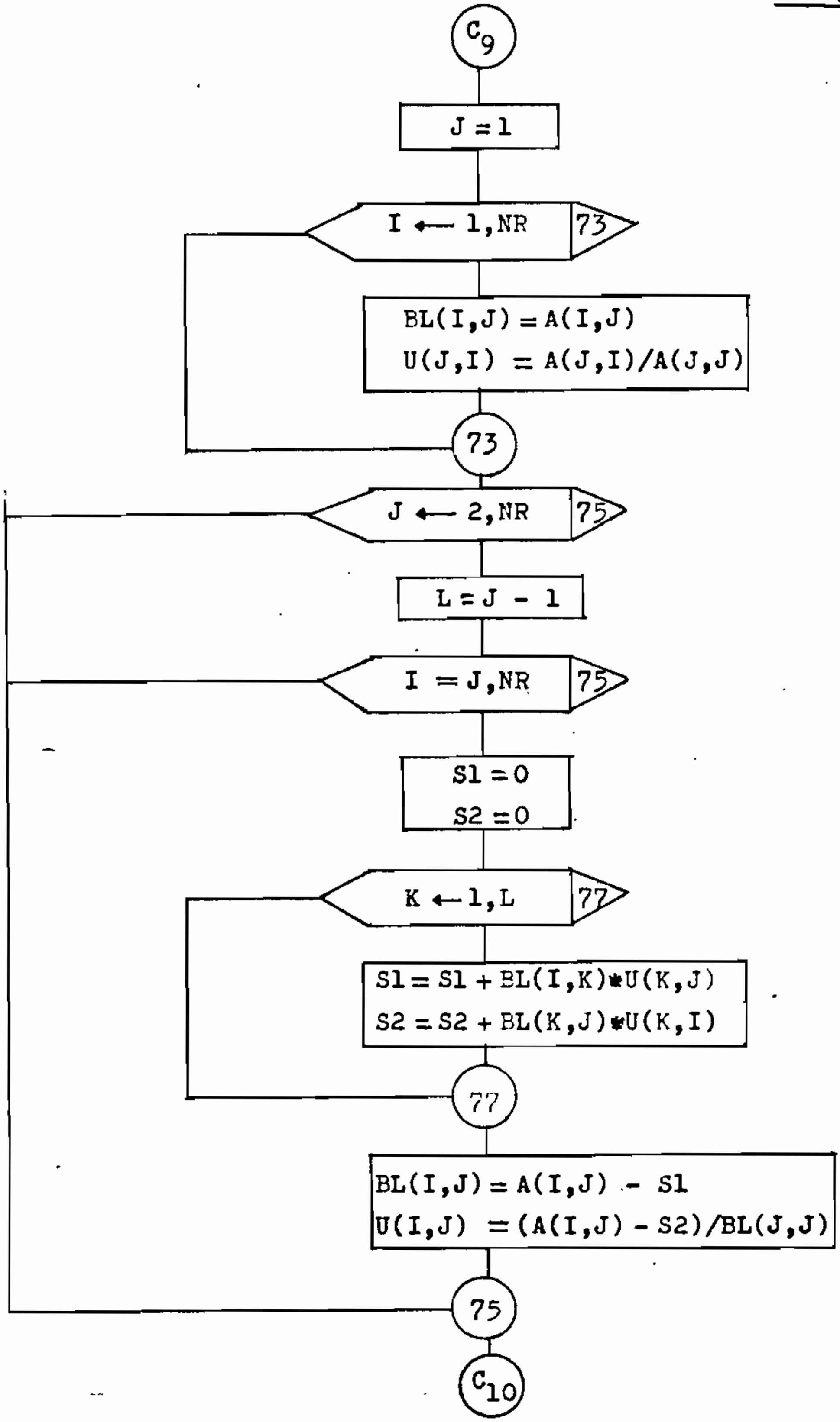


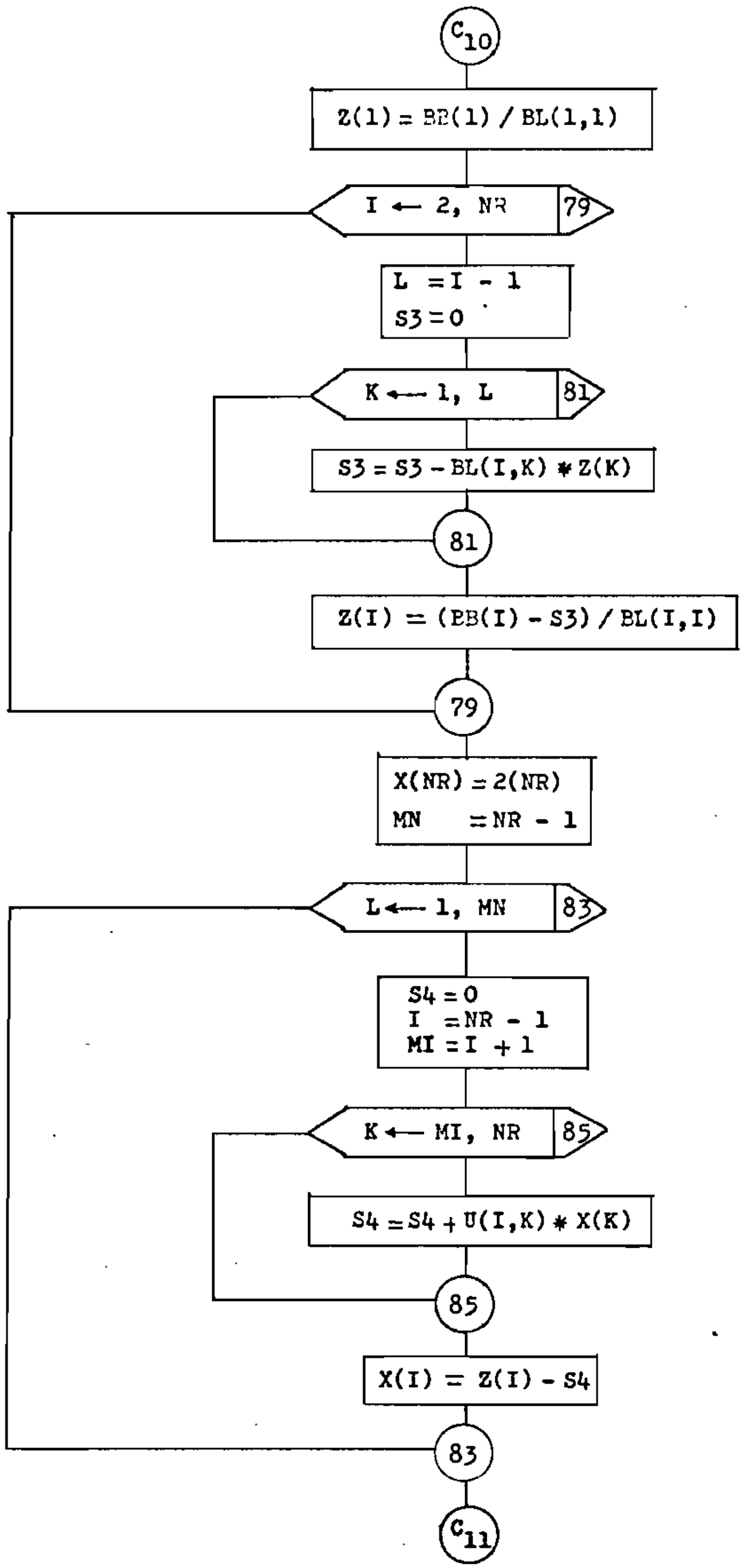
CALCULAR LOS ELEMENTOS DEL JACOBIANO



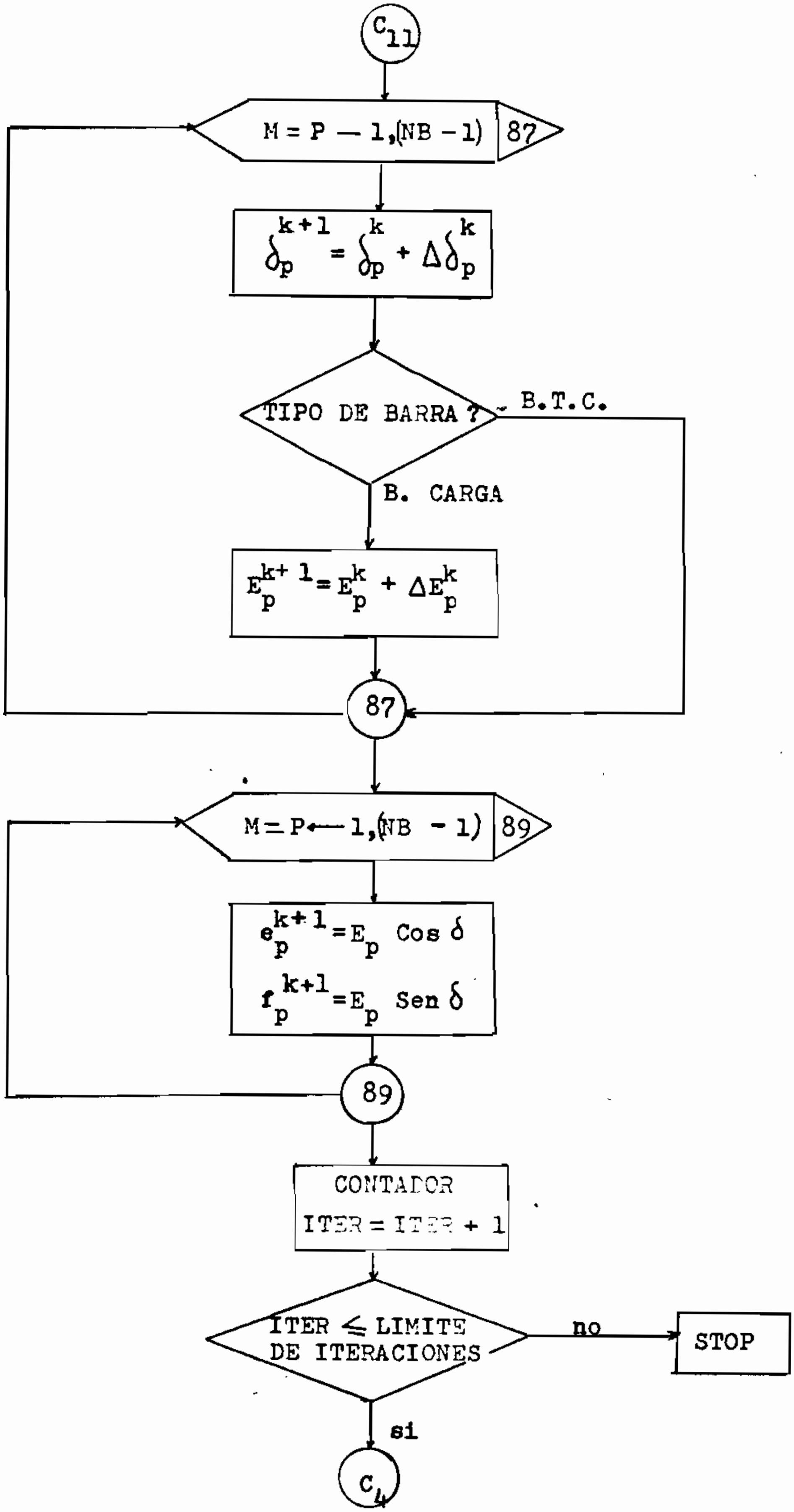
CALCULO DE CORRECCION DE VOLTAJES POR EL METODO DE FACTORIZACION DE MATRICES BL. U.

BLOQUE 5

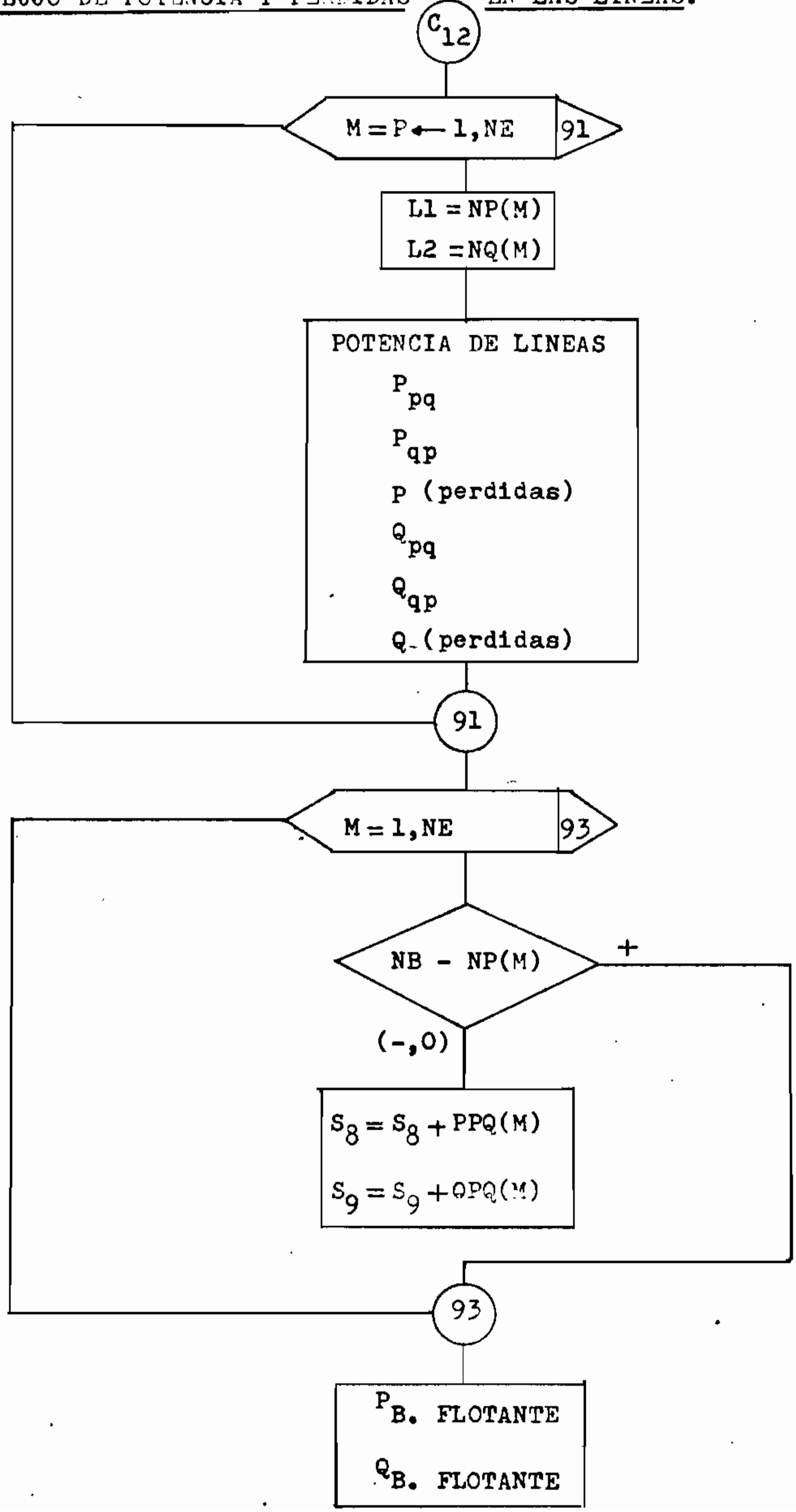



C10
Z(1) = BB(1) / BL(1,1)
I ← 2, NR
79
L = I - 1
S3 = 0
K ← 1, L
81
S3 = S3 - BL(I,K) * Z(K)
81
Z(I) = (BB(I) - S3) / BL(I,I)
79
X(NR) = Z(NR)
MN = NR - 1
L ← 1, MN
83
S4 = 0
I = NR - 1
MI = I + 1
K ← MI, NR
85
S4 = S4 + U(I,K) * X(K)
85
X(I) = Z(I) - S4
83
C11

CALCULO DE LAS NUEVAS TENSIONES DE BARRAS.- BLOQUE 6



FLUJO DE POTENCIA Y PERDIDAS EN LAS LINEAS.- BLOQUE 7

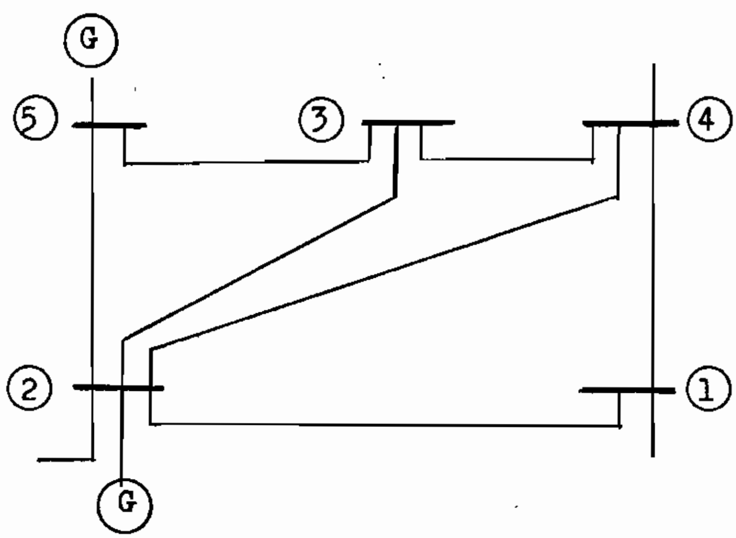


4.3 APLICACION DEL PROGRAMA A UN SISTEMA.-

Para verificar el funcionamiento de este programa se resolvió un ploblema propuesto en el capítulo octavo del libro de referencia 1.

Caracteristicas del sistema.-

Formado por barra flotante y barras de carga.



El sistema tiene cinco barras y siete líneas, el numero asignado a la barra flotante es cinco y el de identificación es dos. En este problema a pesar de que la barra N°2 esta conectada a un generador, se ha supuesto que ésta, entrega una potencia fija, de esta manera, no se considera como una BTC sino como de carga.

DATOS DEL SISTEMA

TABLA 1

NB	NBTC	NE	EPSI
5	0	14	0.001

DATOS DE LINEAS

TABLA 2

NDE	NP	PQ	YR	YI	YR1	YI1	YR2	YI2
1	5	3	1,25	-3,75	-	0,025	-	-
2	3	2	1,67	-5,00	-	0,02	-	-
3	5	2	5,00	-15,00	-	0,03	-	-
4	2	5	5,00	-15,00	-	0,03	-	-
5	4	3	10,00	-30,00	-	0,01	-	-
6	2	4	1,67	-5,00	-	0,02	-	-
7	4	2	1,67	-5,00	-	0,02	-	-
8	2	3	1,67	-5,00	-	0,02	-	-
9	4	1	1,25	-3,75	-	0,025	-	-
10	2	1	2,5	-7,50	-	0,015	-	-
11	3	5	1,25	-3,75	-	0,025	-	-
12	1	4	1,25	-3,75	-	0,025	-	-
13	3	4	10,00	-30,00	-	0,01	-	-
14	1	2	2,5	-7,50	-	0,015	-	-

DATOS DE BARRAS DE CARGA Y BTC

TABLA 3

NBI	NBS	PG	QG	PC	QC	QGMAX	QGMIN
1	1	0	0	-0,6	-0,1	0	0
1	2	0,4	0,3	-0,2	-0,1	0	0
1	3	0	0	-0,45	-0,15	0	0
1	4	0	0	-0,4	-0,05	0	0
0	...	....	0	.....	.....	...	...

Para barras de carga QGMAX = 0, QGMIN = 0

barras de tensión controlada QG = 0

DATOS DE BARRA FLOTANTE

TABLA 4

NBI	NBS	e	f	PC	QC	|E|
2	5	1,06	0	0	0	1,06

DATOS INICIALES DE TENSION

TABLA 5

NBS	e	f	|E|	δ
1	1,0	0	1,0	0
2	1,0	0	1,0	0
3	1,0	0	1,0	0
4	1,0	0	1,0	0

Los datos de NBS en esta tabla son solamente de referencia.

En las tablas se indican los datos de entrada del programa.

TABLA 1

Indican los datos del sistema: número de barras (NB), número de barras de tensión controlada (NBTC), número de líneas o elementos (NE) y selección del criterio de convergencia (EPSI = $\mathcal{E}$), éste último debe realizarse tomando en consideración dos factores: exactitud requerida y tiempo total de computación necesarios para llegar a la solución.

TABLA 2

Se da doble número de datos de cada línea así: $Y_{pq}=Y_{qp}$ y por esta razón NE = 14, las admitancias de líneas están dadas por YR y YI y las de carga por YR1; YI1 conectadas al nodo P y YR2; YI2 conectadas al nodo Q.

TABLA 3

En ésta se especifican las potencias en las barras de carga y de tensión controlada en un sólo formato, en realidad QGMAX y QGMIN no intervienen en las barras de carga ni QG en las BTC; pero son necesarios para el programa.

TABLA 4

En ésta se dan los datos de la barra flotante.

TABLA 5

Se indican las tensiones iniciales así: e, f, E y δ, cabe señalar que no es necesario indicar el tipo de barra ni el número de la barra del sistema.

La forma y secuencia de entrada de datos se da a continuación.

NOMBRE DEL PROGRAMA ____

Programador: ____ Fecha: ____ Hoja No ____ de ____

1.- DATOS GENERALES

NB	NBTC	NE	EPSI

2. DATOS DE LINEAS (UNA TARJETA POR LINEA)

NDE	NP	NQ	YR	YI	YR1	YI1	YR2	YI2

3 DATOS DE BARRAS DE CARGA Y B.T.C. EN PU (UNA TARJETA POR BARRA)

NBI	NBS	PG	QG	PC	QC	QGMAX	QGMIN

4 DATOS DE BARRA FLOTANTE

NBI	NBS	e	f	PC	QC	E

5 DATOS INICIALES DE TENSION (UNA TARJETA POR DOS BARRAS)

e	f	E	δ	e	f	E	δ
BARRA M				BARRA M + 1			

SALIDA DE RESULTADOS

La primera parte de la escritura constituyen los datos de entrada:

	INSTRUCCION	
1.	20	Datos generales
2.	30	Datos de líneas
3.	122	Datos de potencias de barras
4.	124	Datos de barra flotante

La salida de resultados comprende:

5.	62	Ordenamiento de los datos de líneas (Subrutina ORDEN)
6.	60	Matriz YB (Subrutina MATRZ)
7.	150	Corrientes y potencias de barras
8.	160	Diferencias de potencias
9.	170	Resultados de voltajes
10.	220	Flujos de potencias y pérdidas
11.	230	Potencias en la barra flotante
12.	240	Número de iteraciones

Otras salidas con mensajes:

13.	40	Error en los datos de líneas (Subrutina ORDEN)
14.	180	Barra flotante mal identificada
15.	270	No hay convergencia.

COMPARACION DE RESULTADOS.-

TENSIONES FINALES DE BARRAS.- $(e_p + jf_p)$

BARRA	LIBRO	PROGRAMA
1	1,01228 - j0,10909	1,01217 - j0,10913
2	1,04629 - j0,05128	1,04626 - j0,05130
3	1,02043 - j0,08922	1,02036 - j0,08924
4	1,01930 - j0,09508	1,01922 - j0,09511

La máxima diferencia que existe es: 0,00011.

FLUJOS DE POTENCIA.- $(P_{pq} + jQ_{pq})$

LINEAS		LIBRO (MW - MVAR)		PROGRAMA (MW - MVAR)	
1	2	-53,7	- j7,2	-53,737	- j7,142
1	4	-6,3	- j2,8	-6,311	- j2,824
2	1	54,8	+ j7,4	54,863	+ j7,320
2	3	24,7	+ j3,5	24,713	+ j3,533
2	4	27,9	+ j3,0	27,959	+ j2,943
2	5	-87,4	+ j6,2	-87,440	+ j6,285
3	2	-24,3	- j6,8	-24,361	- j6,770
3	4	18,9	- j5,1	18,895	- j5,216
3	5	-39,5	- j3,0	-39,534	- j2,980
4	1	6,3	- j2,3	6,342	- j2,295
4	2	-27,5	- j5,9	-27,516	- j5,909
4	3	-18,9	+ j3,2	-18,858	+ j3,230
5	2	88,8	- j8,6	88,850	- j8,718
5	3	40,7	+ j1,1	40,726	+ j1,124

Los resultados del libro, con una cifra decimal, no permiten encontrar la maxima diferencia.

```
      DIMENSION NP(80),NQ(80),YR(80),YI(80),YR1(80),YI1(80),YR2(80),
     1YI2(80),NF(41),YMR(99),YMI(99),I2(99),E(25),F(25),TE(25),
     2DEL(25),PG(25),PC(25),PA(25),P(25),QG(25),QC(25),QR(25),
     3Q(25),QGMAX(25),QMAX(25),QGMIN(25),QMIN(25),AP(25),AQ(25),
     4PP(25),QQ(25),AI(25),BI(25),NBI(25),NBS(25),CC(25),DD(25),
     5EE(25),FF(25),DELD(25),DFLE(25),A(48,48),BL(48,48),Z(48),
     6U(48,48),X(48),PPQ(80),PQP(80),PPER(80),QPQ(80),QQP(80),
     7QPER(80),BB(48)
      DATA A/2304*0./,U/2304*0./,BL/2304*0./
C
C     ------ DATOS GENERALES ------
C            ***************
C
      LEC=1
      IMP=3
      READ(LEC,10) NB,NBTC,NE,EPSI
   10 FORMAT(3I5,F10.0)
      WRITE(IMP,40) NB,NBTC,NE,EPSI
   40 FORMAT ('0',10X,'DATOS GENERALES'//,8X,'NB',6X,'NBTC',8X,
     *'NE',6X,'EPSI'//(3I10,F12.5))
      ITER=0
      N1=NB-1
      NN=2*N1
      READ(LEC,20) ((NDE,NP(NDE),NQ(NDE),YR(NDE),YI(NDE),YR1(NDE),
     2YI1(NDE),YR2(NDE),YI2(NDE)),NDE=1,NE)
   20 FORMAT(3I5,6F10.0)
      WRITE (IMP,30)((J,NP(J),NQ(J),YR(J),YI(J),YR1(J),YI1(J),YR2(J),
     *YI2(J)),J=1,NE)
   30 FORMAT('0',15X,'ADMITANCIA PRIMITIVA',10X,'ADMITANCIA A',
     *2X,'TIERRA'///,2X,'ELEM',2X,'NP',2X,'NQ',5X,'YR',8X,
     2'YI',7X,'YR P',6X,'YI P',6X,'YR Q',6X,'YI Q'//(3I5,6F10.5))
      WRITE(IMP,122)
  122 FORMAT('0'T20,'DATOS DE POTENCIA DE BARRAS'//,3X,'NBI',2X,
     1'NBS',2X,'PG',8X,'QG',8X,'PC',8X,'QC',8X,'QGMAX',5X,
     2'QGMIN'//)
      READ (LEC,130)((NBI(J),NBS(J),PG(J),QG(J),PC(J),QC(J)
     *,QGMAX(J),QGMIN(J)),J=1,N1)
  130 FORMAT(2I5,6F10.5)
      WRITE(IMP,130)((NBI(J),NBS(J),PG(J),QG(J),PC(J),QC(J)
     *,QGMAX(J),QGMIN(J)),J=1,N1)
      WRITE (IMP,124)
  124 FORMAT('0'T20,'DATOS DE LA BARRA FLOTANTE'//,3X,'NBI',2X,
     2'NBS',2X,'E(NB)',5X,'F(NB)',5X,'PC',8X,'QC',7X,'TE'//)
      READ (LEC,110) NBI(NB),NBS(NB),E(NB),F(NB),PC(NB),QC(NB)
     *,TE(NB)
  110 FORMAT(2I5,5F10.5)
      WRITE(IMP,110) NBI(NB),NBS(NB),E(NB),F(NB),PC(NB),QC(NB)
     *,TE(NB)
      CALL ORDEN(NE,NP,NQ,YR,YI,YR1,YI1,YR2,YI2)
      CALL MATRZ(NE,NP,NQ,YR,YI,YR1,YI1,YR2,YI2,NF,YMR,YMI,
     *I2,NB,NTC)
C
C
C
C          ASUMIR VOLTAJES  DE BARRAS
C          **************************
C
      READ (LEC,120)(E(I),F(I),TE(I),DEL(I),I=1,N1)
  120 FORMAT(8F10.0)
      DO 51 M=1,N1
      PA(M)=PG(M)+PC(M)
      K1=NBI(M)
      IF(1-K1)310,320,330
  310 WRITE(IMP,180)
  180 FORMAT ('0'T20,'BARRA FLOTANTE MAL IDENTIFICADA')
      CALL EXIT
  320 QR(M)=QG(M)+QC(M)
      GO TO 51
  330 QMAX(M)=QGMAX(M)+QC(M)
      QMIN(M)=QGMIN(M)+QC(M)
   51 CONTINUE
C
C          CALCULO DE CORRIENTES DE BARRAS,  POTENCIA
C               Y DIFERENCIA DE POTENCIA
C          ******************************************
C
  305 DO 53 M=1,N1
      AI(M)=0.
      BI(M)=0.
      JJ=NF(M)
```

```
            K=NF(M+1)-1
            AI(M)=AI(M)+E(M)*YMR(JJ)-F(M)*YMI(JJ)
            BI(M)=BI(M)+F(M)*YMR(JJ)+E(M)*YMI(JJ)
            JJ=JJ+1
            DO 54 N=JJ,K
            K2=I2(N)
            AI(M)=AI(M)+E(K2)*YMR(N)-F(K2)*YMI(N)
       54   BI(M)=BI(M)+F(K2)*YMR(N)+E(K2)*YMI(N)
            P(M)=E(M)*AI(M)+F(M)*BI(M)
            AP(M)=PA(M)-P(M)
            PP(M)=ABS(AP(M))
            Q(M)=F(M)*AI(M)-E(M)*BI(M)
            K1=NBI(M)
            IF(1-K1)310,340,350
      340   AQ(M)=QR(M)-Q(M)
            GO TO 400
      350   IF(Q(M)-QMAX(M))360,360,370
      360   IF(Q(M)-QMIN(M))380,53,53
      370   AQ(M)=Q(M)-QMAX(M)
            Q(M)=QMAX(M)
            GO TO 390
      380   AQ(M)=Q(M)-QMIN(M)
            Q(M)=QMIN(M)
      390   NBI(M)=1
      400   QQ(M)=ABS(AQ(M))
       53   CONTINUE
C
C
C
C                PRUEBA DE CONVERGENCIA
C               ***************************
C
            DO 55 M=1,N1
            IF(PP(M)-EPSI)410,410,420
      410   K1=NBI(M)
            IF(1-K1)310,430,55
      430   IF(QQ(M)-EPSI)55,55,420
       55   CONTINUE
            GO TO 600
      420   K3=0
            DO 57 M=1,N1
            K1=NBI(M)
            IF(1-K1)310,440,450
      440   I=2*M-1-K3
            BB(I)=AP(M)
            I=I+1
            BB(I)=AQ(M)
            GO TO 57
      450   K3=K3+1
            I=2*M-K3
            BB(I)=AP(M)
       57   CONTINUE
C
C                CALCULO DE ELEMENTOS DE LA MATRIZ JACOBIANA
C                *******************************************
C
            K3=0
            DO 59 M=1,N1
            JJ=NF(M)
            K=NF(M+1)-1
            K1=NBI(M)
            IF(1-K1)310,460,500
      460   I=2*M-1-K3
            J=I+1
            A(I,I)=-Q(M)-YMI(JJ)*TE(M)**2
            A(I,J)=P(M)+YMR(JJ)*TE(M)**2
            A(J,I)=P(M)-YMR(JJ)*TE(M)**2
            A(J,J)=Q(M)-YMI(JJ)*TE(M)**2
C
C
C
            K4=0
            JJ=JJ+1
            DO61 N=JJ,K
            K2=I2(N)
            IF(K2-M) 61,61,465
      465   IF(K2-NB) 470,61,61
      470   CC(K2)=E(K2)*YMR(N)-F(K2)*YMI(N)
            DD(K2)=F(K2)*YMR(N)+E(K2)*YMI(N)
            EE(M)=E(M)*YMR(N)-F(M)*YMI(N)
```

```
              FF(M)=F(M)*YMR(N)+E(M)*YMI(N)
              K1=NB(K2)
              IF(1-K1)310,480,490
        480   I=2*M-1-K3
              J=2*K2-K3-K4-1
              A(I,J)=CC(K2)*F(M)-DD(K2)*E(M)
              A(J,I)=EE(M)*F(K2)-FF(M)*E(K2)
              J=J+1
              A(I,J)=CC(K2)*E(M)+DD(K2)*F(M)
              A(J,I)=-EE(M)*E(K2)-FF(M)*F(K2)
              I=I+1
              A(I,J)=CC(K2)*F(M)-DD(K2)*E(M)
              A(J,I)=EE(M)*F(K2)-FF(M)*E(K2)
              J=J-1
              A(I,J)=-CC(K2)*E(M)-DD(K2)*F(M)
              A(J,I)=EE(M)*E(K2)+FF(M)*F(K2)
              GO TO 61
        490   K4=K4+1
              I=2*M-1-K3
              J=2*K2-K3-K4
              A(I,J)=CC(K2)*F(M)-DD(K2)*E(M)
              A(J,I)=EE(M)*F(K2)-FF(M)*E(K2)
              I=I+1
              A(I,J)=-CC(K2)*E(M)-DD(K2)*F(M)
              A(J,I)=EE(M)*E(K2)+FF(M)*E(K2)
         61   CONTINUE
              GO TO 59
        500   K3=K3+1
              I=2*M-K3
              A(I,I)=-Q(M)-YMI(JJ)*TE(M)**2
              K4=0
              JJ=JJ+1
              DO 63 N=JJ,K
              K2=I2(N)
              IF(K2-M) 63,63,505
        505   IF(K2-NB) 510,63,63
        510   CC(K2)=E(K2)*YMR(N)-F(K2)*YMI(N)
              DD(K2)=F(K2)*YMR(N)+E(K2)*YMI(N)
              EE(M)=E(M)*YMR(N)-F(M)*YMI(N)
              FF(M)=F(M)*YMR(N)+E(M)*YMI(N)
              K1=NB(K2)
              IF(1-K1)310,520,530
        520   J=2*N-1-K3-K4
              A(I,J)=CC(K2)*F(M)-DD(K2)*E(M)
              A(J,I)=EE(M)*F(K2)-FF(M)*E(K2)
              J=J+1
              A(I,J)=CC(K2)*E(M)+DD(K2)*F(M)
              A(J,I)=-EE(M)*E(K2)-FF(M)*F(K2)
              GO TO 63
        530   K4=K4+1
              J=2*K2-K3-K4
              A(I,J)=CC(K2)*F(M)-DD(K2)*E(M)
              A(J,I)=EE(M)*F(K2)-FF(M)*E(K2)
         63   CONTINUE
         59   CONTINUE
C
C
C
C                 CALCULO DE LA CORRECCION DE  DE VOLTAJES POR EL
C                 METODO DE FACTORIZACION DE MATRICES L.U.
C             ************************************************
C
              NR=NN-K3
              J=1
              DO 73 I=1,NR
              BL(I,J)=A(I,J)
         73   U(J,I)=A(J,I)/A(J,J)
              DO 75 J=2,NR
              L=J-1
              DO 75 I=J,NR
              S1=0.
              S2=0.
              DO 77 K=1,L
              S1=S1+BL(I,K)*U(K,J)
         77   S2=S2+BL(J,K)*U(K,I)
              BL(I,J)=A(I,J)-S1
         75   U(J,I)=(A(J,I)-S2)/BL(J,J)
              Z(1)=BB(1)/BL(1,1)
              DO 79 I=2,NR
              L=I-1
```

```
            S3=0.
            DO 81 K=1,L
       81   S3=S3+BL(I,K)*Z(K)
       79   Z(I)=(BB(I)-S3)/BL(I,I)
            X(NR)=Z(NR)
            MN=NR-1
            DO 83 L=1,MN
            S4=0.
            I=NR-L
            MI=I+1
            DO 85 K=MI,NR
       85   S4=S4+U(I,K)*X(K)
       83   X(I)=Z(I)-S4
            K3=0
      C
      C
      C
      C          CORRECCION DE VOLTAJES
      C          **********************
      C
            DO 87 M=1,N1
            I=2*M-K3-1
            DELD(M)=X(I)
            DEL(M)=DEL(M)+DELD(M)
            K1=NBI(M)
            IF(1-K1) 310,550,560
      550   I=I+1
            DELE(M)=X(I)*TE(M)
            TE(M)=TE(M)+DELE(M)
            GO TO 87
      560   K3=K3+1
       87   CONTINUE
            DO 89 M=1,N1
            E(M)=TE(M)*COS(DEL(M))
            F(M)=TE(M)*SIN(DEL(M))
       89   CONTINUE
            ITER=ITER+1
            IF(ITER-8) 305,570,570
      600   WRITE (IMP,140) ((A(I,J),J=1,NN),I=1,NN)
      140   FORMAT ('1'T40, 'MATRIZ  JACOBIANA'//('0'8F10.5))
            WRITE(IMP,150)((M,AI(M),BI(M),P(M),Q(M)),M=1,N1)
      150   FORMAT('0'T20,'COEFIENTES DE BARRAS',15X,'POTENCIA'//,
           *5X,'NB',5X,'AI(P) REAL',4X,'BI(P) IMAGINARIA',10X,'P',
           *12X,'Q'//('0'I7,4F16.5))
            WRITE (IMP,160)((M,AP(M),AQ(M)),M=1,N1)
      160   FORMAT('0'T20,'DIFERENCIA DE POTENCIAS'//,9X,'NB',6X,
           *'AP(P)',10X,'AQ(P)'//('0'(7,2F16.5))
            WRITE(IMP,170)((M,E(M),F(M),TE(M),DEL(M)),M=1,N1)
      170   FORMAT('1'T20,'RESULTADOS DE VOLTAJE'//,6X,'NB',11X,'E(P)'
           * ,12X,'F(P)',11X,'TE(P)',10X,'DEL(P)'//('0'I7,4F16.5))
      C
      C
      C
      C        FLUJO DE POTENCIA Y PERDIDA EN LAS LINEAS
      C        *****************************************
      C
            WRITE(IMP,210)
      210   FORMAT('0'T20,' FLUJO DE POTENCIA Y PERDIDAS'//
           *('0',5X,'NP',3X,'NQ',5X,' P(PQ)',7X,'P PER',15X,'Q(PQ)',5X,
           *5X,'Q PER'))
            DO 91 M=1,NE
            L1=NP(M)
            L2=NQ(M)
            V1=TE(L1)**2-E(L1)*E(L2)-F(L1)*F(L2)
            V2=TE(L2)**2-E(L1)*E(L2)-F(L1)*F(L2)
            V3=E(L1)*F(L2)-E(L2)*F(L1)
            V4=-V3
            PPQ(M)=V1*YR(M)+V3*YI(M)
            PQP(M)=V2*YR(M)+V4*YI(M)
            PPER(M)=PPQ(M)+PQP(M)
            QPQ(M)=V3*YR(M)-V1*YI(M)-(TE(L1)**2)*YI1(M)
            QQP(M)=V4*YR(M)-V2*YI(M)-(TE(L2)**2)*YI2(M)
            QPER(M)=QPQ(M)+QQP(M)
            WRITE(IMP,220)NP(M),NQ(M), PPQ(M),PPER(M),QPQ(M),QPER(M)
      220   FORMAT('0'2I6,2F13.5,7X,2F13.5)
       91   CONTINUE
      C       CALCULO DE POTENCIA EN LA BARRA FLOTANTE
            S8=0.
            S9=0.
            DO 93 M=1,NE
```

```
DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8          MAINPGM          DATE   24/11/75      TIME    18.03.5
              IF(NB-NP(M)) 580,580,93
        580   S8=S8+PPO(M)
              S9=S9+QPO(M)
         93   CONTINUE
              QFLOT=S9+QC(NB)
              PFLOT=S8+PC(NB)
              WRITE(IMP,230) PFLOT,QFLOT
        230   FORMAT('0'T10,'POTENCIA EN LA BARRA FLOTANTE'//,10X,
             1'P=',F10.5,5X,'Q=',F10.5//)
              WRITE(IMP,240) ITER
        240   FORMAT('0'T10,'NUMERO DE ITERACIONES  =',2X,I3)
              GO TO 575
        570   WRITE (IMP,270)
        270   FORMAT('0'T10,'NO HAY CONVERGENCIA')
        575   CALL EXIT
              END
DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8          MAINPGM          DATE   24/11/75      TIME    18.03.5
```

SCALAP MAP

YMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
FC	25C	IMP	260	NB	264	NBTC	268
PS1	270	ITER	274	N1	278	NN	27C
	284	NTC	288	I	28C	M	290
J	298	K	29C	N	2A0	K2	2A4
4	2AC	NR	2B0	L	2B4	S1	2B8
3	2C0	MN	2C4	S4	2C8	MI	2CC
2	2D4	V1	2D8	V2	2DC	V3	2E0
8	2E8	S9	2EC	QFLOT	2F0	PFLOT	2F4

ARRAY MAP

YMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
IP	2F8	NQ	438	YR	578	YI	6B8
'II	938	YR2	A78	YI2	BB8	NF	CF8
'MI	F28	I2	10B4	E	1240	F	12A4
EL	136C	PG	1300	PC	1434	PA	1498
G	1560	QC	15C4	QR	1628	Q	168C
MAX	1754	QGMIN	17B8	QMIN	181C	AP	1880
P	1948	QQ	19AC	AI	1A10	BI	1A74
BS	1B3C	CC	1BA0	DD	1C04	EE	1C68
FLD	1D30	DELE	1D94	A	1DF8	BL	41F8
J	66B8	X	8AB8	PPQ	8B78	POP	8CB8
PO	8F38	QOP	9078	QPER	91B8	BB	92F8

SUBPROGRAMS CALLED

YMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
RCOM#	93B8	ORDEN	93BC	MATRZ	93C0	EXIT	93C4
IN	93CC						

FORMAT STATEMENT MAP

YMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
10	9440	40	9449	20	948B	30	9496
130	957E	124	9589	110	95E2	120	95ED
140	961C	150	9643	160	96AF	170	96F8
220	97B1	230	97C6	240	9802	270	9827

```
DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8            MAINPGM             DATE   24/11/75      TIME    18.

 008384     250       93                   0083A0     251                          008388
 0083C4     253                            0083EC     255                          008408
 00840E     258      570                   008428     260        575               00843A

  TOTAL MEMORY REQUIREMENTS 008448 BYTES

  HIGHEST SEVERITY LEVEL OF ERRORS FOR THIS MODULE WAS 0


DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8            ORDEN               DATE   24/11/75      TIME    19.

                   SUBROUTINE ORDEN(NE,NP,NO,YR,YI,YR1,YI1,YR2,YI2)
                   DIMENSION NP(80),NO(80),YR(80),YI(80),YR1(80),YI1(80),YR2(80),
                  1YI2(80)
                   IMP=3
                   N=NE-1
         C         ORDENAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE ACUERDO AL NODO P AL QUE ESTAN
         C         CONECTADOS
                   DO 23 I=1,N
                   J=I+1
                   DO 23 M=J,NE
                   IF(NP(I)-NP(M))23,23,22
              22   KA=NP(I)
                   LA=NO(I)
                   AA=YR(I)
                   BA=YI(I)
                   CA=YR1(I)
                   DA=YI1(I)
                   EA=YR2(I)
                   FA=YI2(I)
                   NP(I)=NP(M)
                   NO(I)=NO(M)
                   YR(I)=YR(M)
                   YI(I)=YI(M)
                   YR1(I)=YR1(M)
                   YI1(I)=YI1(M)
                   YR2(I)=YR2(M)
                   YI2(I)=YI2(M)
                   NP(M)=KA
                   NO(M)=LA
                   YR(M)=AA
                   YI(M)=BA
                   YR1(M)=CA
                   YI1(M)=DA
                   YR2(M)=EA
                   YI2(M)=FA
              23   CONTINUE
         C     ORDENAMIENTO  DE  ELEMENTOS SEGUN EL NODO  Q
                   DO 27 I=1,N
                   J=I+1
                   DO 27 M=J,NE
                   IF(NP(I)-NP(M))27,24,27
              24   IF(NO(I)-NO(M))27,27,26
              26   LA=NO(I)
                   AA=YR(I)
                   BA=YI(I)
                   CA=YR1(I)
                   DA=YI1(I)
                   EA=YR2(I)
                   FA=YI2(I)
                   NO(I)=NO(M)
                   YR(I)=YR(M)
                   YI(I)=YI(M)
                   YR1(I)=YR1(M)
                   YI1(I)=YI1(M)
                   YR2(I)=YR2(M)
                   YI2(I)=YI2(M)
                   NO(M)=LA
                   YR(M)=AA
                   YI(M)=BA
                   YR1(M)=CA
                   YI1(M)=DA
                   YR2(M)=EA
                   YI2(M)=FA
              27   CONTINUE
         C
         C
```

```
              C
0061                   DO 45 M=1,NE
0062                   DO 45 N2=1,NE
0063                   IF(NP(M)-NQ(N2))    45,28,45
0064              28   IF(NP(N2)-NQ(M))    45,32,45
0065              32   IF(YR(M)-YR(N2))    34,36,34
0066              34   YR(N2)=1.E10
0067              36   IF(YI(M)-YI(N2))    38,42,38
0068              38   YI(N2)=1.E10
0069              42   IF(YR1(M)-YR1(N2)) 44,46,44
0070              44   YR1(N2)=1.E10
0071              46   IF(YI1(M)-YI1(N2)) 48,52,48
0072              48   YI1(N2)=1.E10
0073              52   IF(YR2(M)-YR2(N2)) 54,56,54
```

DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8 ORDEN DATE 24/11/75 TIME 19.01.2

```
0074              54   YR2(N2)=1.E10
0075              56   IF(YI2(M)-YI2(N2)) 58,45,58
0076              58   YI2(N2)=1.E10
0077              45   CONTINUE
0078                   WRITE(IMP,62)
0079              62   FORMAT('1'T20,'ORDENAMIENTO DE DATOS PARA FORMACION DE YB'/)
0080                   WRITE (IMP,30)((J,NP(J),NQ(J),YR(J),YI(J),YR1(J),YI1(J),YR2(J),
                      *YI2(J)),J=1,NE)
0081              30   FORMAT('0',15X,'ADMITANCIA PRIMITIVA',10X,'ADMITANCIA A',
                      *2X,'TIERRA'///,2X,'ELEM',2X,'NP',2X,'NQ',5X,'YR',8X,
                      2'YI',7X,'YR P',6X,'YI P',6X,'YR Q',6X,'YI Q'//I3I5,6F10.5))
0082                   DO 47 M=1,NE
0083                   ERROR=1.E10
0084                   IF(ERROR-YR(M))   78,78,66
0085              66   IF(ERROR-YI(M))   78,78,68
0086              68   IF(ERROR-YR1(M)) 78,78,72
0087              72   IF(ERROR-YI1(M)) 78,78,74
0088              74   IF(ERROR-YR2(M)) 78,78,76
0089              76   IF(ERROR-YI2(M)) 78,78,47
0090              47   CONTINUE
0091                   GO TO 82
0092              78   WRITE(IMP,40)
0093              40   FORMAT('0'T10,'ERROR EN LOS DATOS DE LINEAS=***** '/)
0094              82   RETURN
0095                   END
```

DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8 ORDEN DATE 24/11/75 TIME 19.01.2

SCALAR MAP

SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
IMP	188	N	18C	NE	190	I	194
M	19C	KA	1A0	LA	1A4	AA	1A8
CA	1B0	DA	1B4	EA	1B8	FA	1BC
ERROR	1C4						

ARRAY MAP

SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
NP	1C8	NQ	1CC	YR	1D0	YI	1D4
YI1	1DC	YR2	1E0	YI2	1E4		

SUBPROGRAMS CALLED

SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
IBCOM#	1E8						

FORMAT STATEMENT MAP

SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION	SYMBOL	LOCATION
62	1EC	30	220	40	2A8		

DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8   MATRZ   DATE 24/11/75   TIME 19.02.24

```
      SUBROUTINE MATRZ(NE,NP,NQ,YR,YI,YR1,YI1,YR2,YI2,NF,YMR,
     *YMI,I2,NB,NTC)
      DIMENSION NP(80),NQ(80),YR(80),YI(80),YR1(80),YI1(80),YR2(80),
     1YI2(80),NF(41),YMR(99),YMI(99),I2(99)
      IMP=3
      J=1
      K=1
    1 YMR(J)=0.
      YMI(J)=0.
      NF(K)=J
C     FORMACION DE LA ADMITANCIA PROPIA DE CADA BARRA
      DO 3 M=1,NE
      IF(NP(M)-K)3,2,3
    2 YMR(J)=YMR(J)+YR(M)+YR1(M)
      YMI(J)=YMI(J)+YI(M)+YI1(M)
    3 CONTINUE
      I2(J)=K
      N=0
C     FORMACION DE LAS ADMITANCIAS MUTUAS DE CADA BARRA
      DO 9 M=1,NE
      IF(NP(M)-K)9,6,9
    6 IF(NQ(M)-N)9,8,7
    7 N=NQ(M)
      J=J+1
      YMR(J)=0.
      YMI(J)=0.
    8 YMR(J)=YMR(J)-YR(M)
      YMI(J)=YMI(J)-YI(M)
      I2(J)=N
    9 CONTINUE
      K=K+1
      IF(K-NB)14,14,15
   14 J=J+1
      GO TO 1
   15 NTC=J
      NF(NB+1)=NTC+1
      WRITE (IMP,60)
   60 FORMAT('1',20X,'MATRIZ ADMITANCIA DE BARRAS  Y-BARRA'//
     *(6X,'FILA ',4X,'DIRECCION',2X,'COLUMNA',8X,'YMR',13X,'YMI'/))
      DO 80 M=1,NB
      WRITE (IMP,70) M,NF(M)
   70 FORMAT(1H,2X,I5,5X,I5)
      K=NF(M)
      J=NF(M+1)-1
      DO 80 I=K,J
   80 WRITE(IMP,90) I2(I),YMR(I),YMI(I)
   90 FORMAT(1H,22X,I5,2(7X,F10.5))
      RETURN
      END
```

18.06.31.TOTAL COMPILATION TIME,00.02.36

DATOS GENERALES

NB	NBTC	NE	EPSI
5	0	14	0.00100

ADMITANCIA PRIMITIVA ADMITANCIA A TIERRA

ELEM	NP	NQ	YR	YI	YR P	YI P	YR Q	YI Q
1	5	3	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
2	3	2	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
3	5	2	5.00000	-15.00000	0.0	0.03000	0.0	0.0
4	2	5	5.00000	-15.00000	0.0	0.03000	0.0	0.0
5	4	3	10.00000	-30.00000	0.0	0.01000	0.0	0.0
6	2	4	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
7	4	2	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
8	2	3	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
9	4	1	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
10	2	1	2.50000	-7.50000	0.0	0.01500	0.0	0.0
11	3	5	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
12	1	4	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
13	3	4	10.00000	-30.00000	0.0	0.01000	0.0	0.0
14	1	2	2.50000	-7.50000	0.0	0.01500	0.0	0.0

DATOS DE POTENCIA DE BARRAS

NBI	NBS	PG	QG	PC	QC	QGMAX	QGMIN
1	1	0.0	0.0	-0.60000	-0.10000	0.0	0.0
1	2	0.40000	0.30000	-0.20000	-0.10000	0.0	0.0
1	3	0.0	0.0	-0.45000	-0.15000	0.0	0.0
1	4	0.0	0.0	-0.40000	-0.05000	0.0	0.0

DATOS DE LA BARRA FLOTANTE

NBI	NBS	E(NB)	F(NB)	PC	QC	TE
2	5	1.06000	0.0	0.0	0.0	1.06000

ORDENAMIENTO DE DATOS PARA FORMACION DE YB

ADMITANCIA PRIMITIVA / ADMITANCIA A TIERRA

LEM	NP	NQ	YR	YI	YR P	YI P	YR Q	YI Q
1	1	2	2.50000	-7.50000	0.0	0.01500	0.0	0.0
2	1	4	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
3	2	1	2.50000	-7.50000	0.0	0.01500	0.0	0.0
4	2	3	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
5	2	4	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
6	2	5	5.00000	-15.00000	0.0	0.03000	0.0	0.0
7	3	2	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
8	3	4	10.00000	-30.00000	0.0	0.01000	0.0	0.0
9	3	5	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
10	4	1	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0
11	4	2	1.67000	-5.00000	0.0	0.02000	0.0	0.0
12	4	3	10.00000	-30.00000	0.0	0.01000	0.0	0.0
13	5	2	5.00000	-15.00000	0.0	0.03000	0.0	0.0
14	5	3	1.25000	-3.75000	0.0	0.02500	0.0	0.0

MATRIZ ADMITANCIA DE BARRAS Y-BARRA

FILA	DIRECCION	COLUMNA	YMR	YMI
1	1			
		1	3.75000	-11.21000
		2	-2.50000	7.50000
		4	-1.25000	3.75000
2	4			
		2	10.84000	-32.41498
		1	-2.50000	7.50000
		3	-1.67000	5.00000
		4	-1.67000	5.00000
		5	-5.00000	15.00000
3	9			
		3	12.92000	-38.69498
		2	-1.67000	5.00000
		4	-10.00000	30.00000
		5	-1.25000	3.75000
4	13			
		4	12.92000	-38.69498
		1	-1.25000	3.75000
		2	-1.67000	5.00000
		3	-10.00000	30.00000
5	17			
		5	6.25000	-18.69498
		2	-5.00000	15.00000
		3	-1.25000	3.75000

MATRIZ JACOBIANA

1.88867	3.31318	-7.93936	-3.20560	0.0	0.0	-3.94930	-1.38428
4.58989	11.73623	3.20560	-7.93936	0.0	0.0	1.38428	-3.94930
8.27485	-2.19913	35.77538	12.33798	-5.51169	-1.59669	-5.51938	-1.56169
2.19913	-8.27485	-11.79462	36.38861	1.59669	-5.51169	1.56169	-5.51938
0.0	0.0	-5.36493	-2.03609	41.31329	13.29422	-31.98863	-10.44174
0.0	0.0	2.03609	-5.36493	-14.21284	41.06944	10.44174	-31.98863
3.99001	-1.26215	-5.35004	-2.06870	-31.85594	-10.83981	41.19606	13.31489
1.26215	-3.99001	2.06870	-5.35004	10.83981	-31.85594	-14.17066	41.12227

CORRIENTES DE BARRAS POTENCIA

NB	AI(P) REAL	BI(P) IMAGINARIA	P	Q
1	-0.57595	-0.16055	-0.60048	-0.09965
2	0.18223	-0.20081	0.20096	0.20075
3	-0.42494	-0.18395	-0.45001	-0.14977
4	-0.38487	0.08479	-0.40033	-0.04982

DIFERENCIA DE POTENCIAS

NB	AP(P)	AQ(P)
1	0.00048	-0.00035
2	-0.00096	-0.00075
3	0.00001	-0.00023
4	0.00033	-0.00018

RESULTADOS DE VOLTAJE

NB	E(P)	F(P)	TE(P)	DEL(P)
1	1.01217	-0.10913	1.01803	-0.10740
2	1.04626	-0.05130	1.04752	-0.04899
3	1.02036	-0.08924	1.02425	-0.08724
4	1.01922	-0.09511	1.02365	-0.09304

FLUJO DE POTENCIA Y PERDIDAS

NP	NQ	P(PQ)	P PER	Q(PQ)	Q PER
1	2	-0.53737	0.01126	-0.07142	0.01825
1	4	-0.06311	0.00031	-0.02824	-0.02498
2	1	0.54863	0.01126	0.07320	0.01733
2	3	0.24713	0.00353	0.03533	-0.01139
2	4	0.27959	0.00443	0.02943	-0.00869
2	5	-0.87440	0.01410	0.06285	0.00938
3	2	-0.24361	0.00353	-0.06770	-0.01043
3	4	0.18895	0.00037	-0.05216	-0.00938
3	5	-0.39534	0.01192	-0.02980	0.00954
4	1	0.06342	0.00031	-0.02295	-0.02527
4	2	-0.27516	0.00443	-0.05909	-0.00771
4	3	-0.18858	0.00037	0.03230	-0.00937
5	2	0.88850	0.01410	-0.08718	0.00859
5	3	0.40726	0.01192	0.01124	0.00767

POTENCIA EN LA BARRA FLOTANTE

P= 1.29575 Q= -0.07594

NUMERO DE ITERACIONES = 2

C A P I T U L O   V

CONCLUSIONES.-

El presente trabajo contiene bases teóricas que serviran para futuros estudios de flujo de potencia tales como: eliminación óptimamente ordenada, estudios de sensibilidad, cambio automático de taps de transformadores y defasadores de ángulo.

La descripción y aplicación del programa realizado para el cálculo de flujo de potencia no trata de ser óptimo, pero cumple con los objetivos propuestos; el control de los límites de potencia reactiva en las BTC se realiza en cada iteración.

Los requerimientos de memoria para grandes sistemas pueden ser prohibitivos ya que se necesita almacenar la matriz jacobiana y muchos arreglos, pero se solucionaría con técnicas especiales de programación.

Al hacer uso de coordenadas polares para BTC se necesita una sóla ecuación, en lugar de dos, reduciéndose el número total de ecuaciones lineales.

El problema de aplicación requiere para su solución 10 iteraciones por el método de Gauss Seidel y unicamente dos utilizando el método de Newton Raphson planteado en coordenadas cartesianas o polares.

APENDICE ORDEN - MATRZ

En este trabajo se utiliza, con autorización, las subrutinas ORDEN y MATRZ desarrolladas por los Ingenieros Carlos Carrillo, Jaime Hidalgo y Patricio Guerrero en la tesis "Flujo de cargas, estudio por medio de computadoras digitales".

4.3.3 SUBRUTINA ORDEN.-

Los resultados obtenidos en las subrutinas anteriores los ordena en forma ascendente de acuerdo al nodo p al que están conectados, y para elementos que tienen el mismo nodo p, los ordena en forma ascendente de acuerdo a los nodos q. Este ordenamiento es fundamental para poder formar la matriz Y_b. La manera de como realizarlo está indicado en la fig. 4.7 y consiste en comprobaciones primero de los nodos p y luego de los nodos q.

4.3.4 SUBRUTINA MATRZ.-

Su funcion es almacenar los elementos de la matriz Y_b. dada en (3.7). Debido a que muchos de los elementos Y_{ij} son iguales a cero, en esta subrutina se ha desarrollado un algoritmo para representar Y_b en forma de un vector, considerando unicamente los elementos $Y_{ij} \neq 0$, con lo cual se obtiene un considerable ahorro de memoria en el computador. Para llevar a efecto lo propuesto se requieren dos vectores adicionales y la matriz Y_b queda almacenada como Y'_b en la siguiente forma.

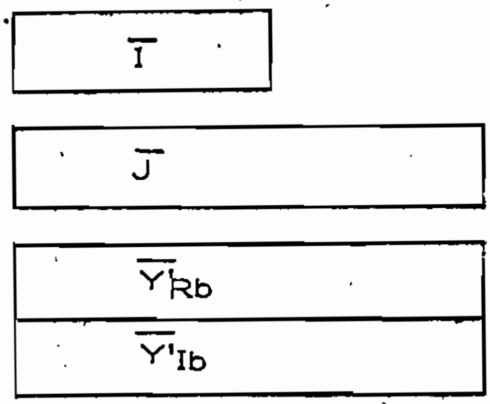


Fig. 4.1 Esquema del almacenamiento de la matriz Y_b en forma vectorial.

Donde:

a) El vector $\overline{I}$ indica el número de la posición de inicio de una fila de la matriz Y_b dentro de las columnas de $\overline{Y_b'}$; por lo tanto su dimensión será igual al número de filas de Y_b.

b) El vector $\overline{J}$ representa la columna que ocupa un elemento dentro de Y_b.

c) El vector $\overline{YR'_b}$ contiene la parte real de las admitancias de Y_b.

d) El vector $\overline{YI'}_b$ contiene la parte imaginaria de las admitancias de Y_b.

La dimensión de los vectores $\overline{J}$, $\overline{YR'}_b$, $\overline{YI'}_b$ es igual al número total de elementos diferentes de cero de Y_b.

$\overline{I}$	I_1	I_2		$I_k=l$	$I_{k+1}=m$	

$\overline{J}$	J_1	J_2		J_l	J_{l+1}			J_{m-1}	

$\overline{Y'}_{Rb}$	Y'_{R1}	Y'_{R2}		Y'_{Rl}				Y'_{Rm-1}	
$\overline{Y'}_{Ib}$	Y'_{I1}	Y'_{I2}		Y'_{Il}				Y'_{Im-1}	

Fila k

Fig. 4.2 Almacenamiento de los elementos de una fila k de la matriz Y_b.

Según la Fig. 4.2 :

1. Para una fila k en $\overline{I}$ estará su posición de inicio, que será $I_k = l$; para la fila k+1, será $I_{k+1} = m$. Entonces, la fila k estará comprendida entre l y m−1.

2. Para los elementos diferentes de cero de la fila k, la columna a la que pertenecen en Y_b estarán indicadas en el vector $\overline{J}$ como: J_l , J_{l+1} .... J_{m-1}.

3. De manera similar, esos elementos estarán almacenados en $\overline{YR'_b}$ como YR'_l , YR'_{l+1} ...... YR'_{m-1} ; y, en $\overline{YI'_b}$ como: YI'_l , YI'_{l+1} ..... YI'_{m-1}.

De todo lo expuesto, el ahorro de memoria en el computador se demuestra en forma general de la siguiente manera:

a) Almacenando Y_b compleja:

$$M_1 = 2\ N^2 \qquad (4.1)$$

- N = número de barras = número de filas
- M1 = espacios de memoria

b) Almacenando $\overline{\overline{Y_b'}}$ compleja:

$$I = N$$

$$J = N\ (NL + 1) \qquad (4.2)$$

$$YR' = YI' = N\ (\ NL + 1)$$

$$M_2 = N\ (3\ NL + 4) \qquad (4.3)$$

- NL = promedio del número de los elementos mutuos por fila
- M_2 = espacios de memoria

Debido a que en Y_b existen muchos $Y_{ij} = 0$, N es mayor que NL y consecuentemente $M_1 > M_2$, como se ilustra en la Fig. 4.3.

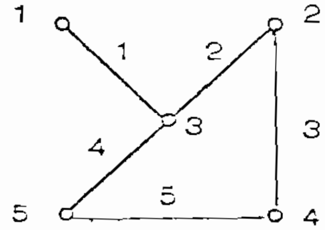
APENDICE A

EJEMPLO DEL ALMACENAMIENTO Y RECUPERACION DE ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA .-

Supongamos el siguiente sistema compuesto de 5 barras y 5 elementos:

Elemento	Barras		Admitancia
	p	q	
1	1	3	y_1
2	2	3	y_2
3	2	4	y_3
4	3	5	y_4
5	4	5	y_5

De acuerdo a la expresión (3.7) la matriz Y_b es:



$$Y_D = $$

I \ J	1	2	3	4	5
1	Y_{11}	0	Y_{13}	0	0
2	0	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	0
3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	0	Y_{35}
4	0	Y_{42}	0	Y_{44}	Y_{45}
5	0	0	Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}

(A.1)

El almacenamiento en forma de vectores de los elementos diferentes de cero de la expresión (A.1) se realiza de la siguiente manera:

$$\overline{Y_{D1}} = \left[\underbrace{Y_{11}\ Y_{13}}_{\text{Fila 1}} \mid \underbrace{Y_{22}\ Y_{23}\ Y_{24}}_{\text{Fila 2}} \mid \underbrace{Y_{31}\ Y_{32}\ Y_{33}\ Y_{35}}_{\text{Fila 3}} \mid \underbrace{Y_{42}\ Y_{44}\ Y_{45}}_{\text{Fila 4}} \mid \underbrace{Y_{53}\ Y_{54}\ Y_{55}}_{\text{Fila 5}}\right] \quad (A.2)$$

De acuerdo a la forma en que trabaja la subrutina ORDEN, la posición de los elementos de (A.2) queda en la siguiente forma:

$$\overline{Y_{D2}} = \left[\underbrace{Y_{11}\ Y_{13}}_{\text{Fila 1}} \mid \underbrace{Y_{22}\ Y_{23}\ Y_{24}}_{\text{Fila 2}} \mid \underbrace{Y_{33}\ Y_{35}\ Y_{31}\ Y_{32}}_{\text{Fila 3}} \mid \underbrace{Y_{44}\ Y_{45}\ Y_{42}}_{\text{Fila 4}} \mid \underbrace{Y_{55}\ Y_{53}\ Y_{54}}_{\text{Fila 5}}\right] \quad (A.3)$$

Para mejor comprensión se ha conservado el doble subíndice de cada elemento, pero en realidad éstos quedan definidos con un solo subíndice como se indica en (A.4)

$$\begin{array}{c} \leftarrow \text{Fila 1} \rightarrow | \leftarrow \text{Fila 2} \rightarrow | \leftarrow \text{Fila 3} \rightarrow | \leftarrow \text{Fila 4} \rightarrow | \leftarrow \text{Fila 5} \rightarrow \\ \overline{Y_{b3}} = \left[Y'_1 \; Y'_2 \;\middle|\; Y'_3 \; Y'_4 \; Y'_5 \;\middle|\; Y'_6 \; Y'_7 \; Y'_8 \; Y'_9 \;\middle|\; Y'_{10} \; Y'_{11} \; Y'_{12} \;\middle|\; Y'_{13} \; Y'_{14} \; Y'_{15} \right] \end{array} \tag{A.4}$$

Para encontrar la correspondencia entre los elementos de (A.1) y (A.4) es necesario crear los vectores adicionales $\overline{I}$ y $\overline{J}$, con los cuales se identifica la fila y la columna respectiva a la que pertenece cada unò de los elementos de $\overline{Y}_{b3}$.

El vector "dirección de filas" $\overline{I}$, para el ejemplo, será de 5 elementos, es decir, uno por cada fila de la matriz Y_b :

$$\overline{I} = \left[I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad I_4 \quad I_5 \right] \tag{A.5}$$

Los términos de $\overline{I}$ indican la posición que ocupa el primer elemento de cada fila. En este caso, $\overline{I}$ estará conformado de la siguiente manera:

$$\overline{I} = \left[1 \quad 3 \quad 6 \quad 10 \quad 13 \right] \tag{A.6}$$

El vector $\bar{J}$ identifica la columna a la que pertenece cada elemento de $\bar{Y}_{b3}$ y esta dado por:

$$\bar{J} = \left[J_1 \; J_2 \; J_3 \; J_4 \; J_5 \; J_6 \; J_7 \; J_8 \; J_9 \; J_{10} \; J_{11} \; J_{12} \; J_{13} \; J_{14} \; J_{15} \right]$$

(A.7)

Sus valores respectivos son:

$$\bar{J} = \left[1 \quad 3 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 3 \quad 5 \quad 1 \quad 2 \quad 4 \quad 5 \quad 2 \quad 5 \quad 3 \quad 4 \right] \quad (A.8$$

(A.8)

En resumen, la matriz Y_b separada en parte real e imaginaria quedará almacenada de la siguiente forma:

$\bar{I}$	$I_1=1$	$I_2=3$	$I_3=6$	$I_4=10$	$I_5=13$

$\bar{J}$	$J_1=1$	$J_2=3$	$J_3=2$	$J_4=3$	$J_5=4$	$J_6=3$	$J_7=5$	$J_8=1$	$J_9=2$	$J_{10}=4$	$J_{11}=5$	$J_{12}=2$	$J_{13}=5$	$J_{14}=3$	$J_{15}=4$

$\bar{Y}_{b3r}$	Y'_{r1}	Y'_{r2}	Y'_{r3}	Y'_{r4}	Y'_{r5}	Y'_{r6}	Y'_{r7}	Y'_{r8}	Y'_{r9}	Y'_{r10}	Y'_{r11}	Y'_{r12}	Y'_{r13}	Y'_{r14}	Y'_{r15}
$\bar{Y}_{b3i}$	Y'_{i1}	Y'_{i2}	Y'_{i3}	Y'_{i4}	Y'_{i5}	Y'_{i6}	Y'_{i7}	Y'_{i8}	Y'_{i9}	Y'_{i10}	Y'_{i11}	Y'_{i12}	Y'_{i13}	Y'_{i14}	Y'_{i15}

Fig. A.1 Almacenamiento de la matriz Y_b en forma vectorial.

La recuperación de los elementos está indicada a continuación.

PROCEDIMIENTO GENERAL Y EJEMPLO PARA RECUPERAR EL ELEMENTO Y45

a) Se encuentran los límites de una fila k cualquiera

- Límites de la fila 4

1. Posición del inicio de la fila k estará dado en $\bar{I}$ como

   $I_k = l$

- Inicio de la fila 4 : $I_4 = l = 10$

2. El inicio de la fila k+1 está dado en $\bar{I}$ como

   $I_{k+1} = m$

- Inicio de la fila 5: $I_5 = m = 13$

3. El final de la fila k se calcula como

   $I_{k+1} - 1 = m-1$

- Final de la fila 4: $I_5 - 1 = m-1 = 12$

4. Los límites de la fila k son l y m-1

- Los límites de la fila 4 son 10 y 12

b) Identificación en $\bar{J}$ de la columna a que pertenece el elemento buscado, que está entre J (l) y J (m-1), y será J (n)

- Entre los elementos J_{10}, J_{11} y J_{12} se busca el que tiene como valor 5, que es la columna a la que pertenece el elemento.

  $J_{11} = 5$

REFERENCIAS

1. G. W. Stagg, A. M. El-Abiad, "COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEM ANALYSIS" Editorial Mc Graw-Hill 1968

2. H. Sanhueza H. "ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA" Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador 1974.

3. G. Carrillo, P. Guerrero, J. Hidalgo, "FLUJO DE CARGAS: ESTUDIO POR MEDIO DE COMPUTADORAS DIGITALES" Quito, Diciembre 1974.

4. IEEE Transactions of Power Apparatus and Sistems: L. B. Ward, H. W. Hale "DIGITAL COMPUTER SOLUTION OF POWER - FLOW PROBLEMS" Paginas 398-404 June 1956

5. James E. Van Ness "ITERATION METHODS FOR DIGITAL - LOAD FLOW STUDIES" Pag. 583-588 August 1959.

6. James E. Van Ness, John H. Griffin "ELIMINATION METHODS FOR LOAD-FLOW STUDIES" Pag.299-304 June 1961

7. Nobuo Sato, W. F Tinney, "TECHNIQUES FOR EXPLOITING THE SPARSITY OF THE NETWORK ADMITTANCE MATRIX" Pag. 944-950 December 1963.

8. William F. Tinney, "POWER FLOW SOLUTION BY NEWTON'S METHOD" Pag. 1449-1460 November 1967.

9. William F. Tinney, John Walker "DIRECT SOLUTIONS OF SPARSE NETWORK ECUATIONS BY OPTIMALLY ORDERED TRIAN GULAR FATORIZATION" Pag. 1801-1809 November 1967.

10. H. Sanhueza H."DESARROLLO DE UN PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO DE FLUJOS DE POTENCIAS UTILIZANDO EL METODO DE NEWTON RAPHSON" Escuela Politécnica Nacional Quito Ecuador 1974.

11. Francisco Contreras, "FLUJO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON RAPHSON" Universidad Técnica de Chile.

12. S. D. Conte, "ELEMENTARY NUMERICAL ANALYSIS" Pag. 176-187.

13. D. D. McCracken, W. S. Dorn, "METODOS NUMERICOS Y PROGRAMACION FORTRAN", Editorial Limusa- Wiley, S. A., - Mexico 1972.

14. J. A. Nieto Ramires, "METODOS NUMERICOS EN COMPUTADORAS DIGITALES" Editorial Limusa S. A., Mexico 1972.