FLUJO DE CARGAS

ESTUDIO POR MEDIO DE COMPUTADORES DIGITALES

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero en la especialidad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

CARLOS ANIBAL CARRILLO CALDERON

PATRICIO ERNESTO GUERRERO MELO

JAIME ANTONIO HIDALGO SALAZAR

Quito, Diciembre de 1974

CERTIFICO que la presente Tesis: "Flujo de Cargas: Estudio por medio de Computadores Digitales", ha sido realizada en su totalidad por los señores Carlos Carrillo C., Patricio Guerrero M., y Jaime Hidalgo S.

ING. ALFREDO MENA P.,
Director de Tesis

AGRADECIMIENTO

Al Señor Ingeniero Alfredo Mena P., Director de Tesis, a los Señores Ingenieros Hernán Sanhueza, Ingeniero Juan Saavedra, y en general, a todos y cada una de las personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

D E D I C A D O

A NUESTROS PADRES

Carlos y Patricio

A MIS PADRES, MI ESPOSA Y MI HIJA

Jaime

S U M A R I O

En este trabajo se ha desarrollado un programa para el cálculo de flujo de cargas utilizando la IBM-1130. Se incluye información sobre la manera de representar los elementos de un sistema de potencia, el desarrollo del modelo matemático empleado, una descripción del programa con explicaciones adicionales para su utilización, y un ejemplo ilustrativo.

INDICE GENERAL

CAPITULO I

GENERALIDADES :

		Página
1.1	Introducción	1
1.2	El problema del flujo de cargas en el País	3
1.3	Visión histórica del desarrollo de los estudios de flujo de cargas	5
1.4	Métodos numéricos usualmente empleados en los estudios de flujo de cargas	10
1.4.1	Método iterativo de Gauss	10
1.4.2	Método iterativo de Gauss-Seidel	12
1.4.3	Método iterativo de Newton-Raphson	13

CAPITULO II

REPRESENTACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGAS:

2.1	Introducción	16
2.2	Representación de generadores	17
2.3	Representación de transformadores	18
2.3.1	Transformadores de dos devanados trabajando en su relación nominal	18
2.3.2	Transformadores de dos devanados con taps	20

Página

2.3.3 Representación de transformadores de tres devanados 28

2.3.4 Representación de transformadores de desplazamiento de ángulo 32

2.3.5 Representación de autotransformadores 35

2.4 Representación de líneas de transmisión 37

2.4.1 Líneas de longitud corta 38

2.4.2 Líneas de longitud media 39

2.4.3 Líneas de longitud larga 41

2.4.4 Acoplamiento mutuo entre líneas de transmisión 43

2.5 Representación de cargas 47

2.6 Representación de condensadores y reactores 48

CAPITULO III

MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGAS:

3.1 Consideraciones generales 50

3.2 Formación de la matriz admitancia de barra 51

3.3 Ecuaciones generales 54

Página

3.4 Barras: oscilante, de voltaje controlado y de carga 57

3.5 Cálculo de voltajes de barra utilizando el método de Gauss-Seidel 60

3.5.1 Sistema sin barra de voltaje controlado 60

3.5.2 Sistema con barra de voltaje controlado 64

3.6 Cálculo del flujo de cargas 68

CAPITULO IV

PROGRAMA DE FLUJO DE CARGAS :

4.1 Introducción 71

4.2 Programa principal 71

4.3 Subrutinas 72

4.3.1 Subrutina ZLIN 73

4.3.2 Subrutina TRANS 74

4.3.3 Subrutina ORDEN 76

4.3.4 Subrutina MATRZ 76

4.3.5 Subrutina VOLTS 81

4.3.6 Subrutina FLOWL 81

4.3.7 Subrutina VOLAN 82

Página

4.4 Datos de entrada 82

4.4.1 Datos generales 82

4.4.2 Datos de los elementos en valores reales 83

4.4.3 Datos de los elementos en valores p.u. 84

4.4.4 Datos de barras 85

4.5 Resultados de salida 86

4.6 Diagramas de bloques 87

C A P I T U L O V

APLICACION DEL PROGRAMA A UN SISTEMA :

5.1 Ejemplo de flujo de cargas 99

5.1.1 Características del sistema 99

5.1.2 Ejemplo de cálculo de las admitancias equivalentes de transformadores de dos devanados 102

5.2 Comentarios sobre el criterio de convergencia 107

5.3 Factores de aceleración 110

Página

C A P I T U L O VI

CONCLUSIONES : 115

APENDICE A

Ejemplo del almacenamiento y recuperación de elementos de la matriz admitancia de barra 117

APENDICE B

Formatos de entrada, capacidad del programa e indicadores 123

APENDICE C

Listado del programa y resultados del ejemplo del capítulo V 131

REFERENCIAS 147

INDICE DE FIGURAS

Página

Fig.

2.1	Representación de generadores	17
2.2	Circuito equivalente de transformadores	19
2.3	Representación de transformadores de dos devanados en su relación nominal	20
2.4	Efecto del cambio de taps sobre los voltajes base de un sistema	21
2.5	Representación del cambio de taps mediante un autotransformador ideal	22
2.6	Transformador con cambio de taps en el primario	23
2.7	Representación del efecto de los taps en el lado primario	23
2.8	Transformador con cambio de taps en el secundario	24
2.9	Representación del efecto de los taps en el lado secundario	24
2.10	Transformador con cambio de taps en el primario y secundario	25
2.11	Representación del efecto de los taps en el primario y secundario	25
2.12	Representación π del transformador con cambio de taps en el primario y secundario	27

Página

Fig.

2.13	Representación del transformador de tres devanados	30
2.14	Representación del transformador de tres devanados, con taps en el terciario	31
2.15	Transformador de desplazamiento de ángulo	33
2.16	Representación π del transformador de desplazamiento de ángulo.	34
2.17	Representación del circuito de un autotransformador	36
2.18	Parámetros distribuídos de una línea de transmisión	37
2.19	Representación de líneas de longitud corta	39
2.20	Representación T de una línea de longitud media	40
2.21	Representación π de una línea de longitud media	40
2.22	Representación de una línea de longitud larga	42
2.23	Representación π general de las líneas de transmisión	42
2.24	Ejemplo de disposición simétrica de líneas paralelas	44
2.25	Representación de acoplamiento mutuo entre líneas paralelas con disposición simétrica	47

Página

2.26	Representación de cargas	48
2.27	Representación de reactores y condensadores.	49
3.1	Ejemplo de un sistema de potencia para la formación de la matriz Y_b	52
3.2	Flujo de cargas a través de un elemento	55
3.3	Tipos de barras en un sistema de potencia	60
4.1	Esquema del almacenamiento de la matriz Y_b en forma vectorial	77
4.2	Almacenamiento de los elementos de una fila k de la matriz Y_b	78
4.3	Requerimientos de memoria en función del número de barras	80
4.4	Programa principal, diagrama de bloques	89
4.5	Subrutina ZLIN, diagrama de bloques	90
4.6	Subrutina TRANS, diagrama de bloques	91
4.7	Subrutina ORDEN, diagrama de bloques	92
4.8	Subrutina MATRZ, diagrama de bloques	93
4.9	Subrutina VOLTS, diagrama de bloques	94
4.10	Subrutina FLOWL, diagrama de bloques	97
4.11	Subrutina VOLAN, diagrama de bloques	98
5.1	Sistema tomado como ejemplo para la utilización del programa	100
5.2	Flujo de cargas en el sistema del ejemplo	104

Página

5.3	Número de iteraciones y desajuste en función de $-\log \epsilon$	109
5.4	Convergencia sin aceleración	111
5.5	Convergencia utilizando factores de aceleración	111
5.6	Número de iteraciones en función de α y β iguales, para el sistema del ejemplo	112
5.7	Número de iteraciones en función de α con diferentes valores de β para el sistema del ejemplo	113
A.1	Almacenamiento de la matriz Y_b en forma vectorial	120

INDICE DE CUADROS Y ESQUEMAS

		Página
CUADRO A:	Parámetros para la representación de líneas	43
CUADRO B:	Características de las barras (Sistema tomado como ejemplo)	101
CUADRO C:	Características de las líneas (Sistema tomado como ejemplo)	101
CUADRO D:	Características de transformadores y reactores (Sistema tomado como ejemplo)	102
CUADRO E:	Cálculo de desajuste (Sistema tomado como ejemplo)	106
CUADRO F:	Número de iteraciones y máximo desajuste para diversos valores de ϵ	107
ESQUEMA B.1	Formato y secuencia de entrada de datos, cuando los elementos del sistema están en valores reales	125
ESQUEMA B.2	Cuando los datos de los elementos del sistema están en p.u. en las bases del sistema.	128

CAPITULO I

GENERALIDADES.-

1.1 INTRODUCCION.-

El grado de desarrollo de las fuentes de energía para realizar trabajo es una de las medidas del progreso industrial. El descubrimiento de fuentes de energía en la naturaleza, el transporte de ella en sus variadas formas de un lugar a otro y la conversión de la misma en otra forma más utilizable, son partes esenciales de una economía industrial. La red eléctrica o sistema de potencia es una de las herramientas para la transformación y transporte de la energía.

El sistema de potencia se compone principalmente de centrales generadoras, subestaciones, líneas de transmisión y redes de distribución. Las subestaciones y líneas de transmisión son eslabones que unen las centrales generadoras y los sitios de consumo. La red de distribución une todas las cargas aisladas de una determinada zona a las líneas de transmisión.

El incremento del consumo difícilmente puede estar controlado por las empresas de electricidad, pero a menudo, la facilidad de disponer de energía barata es un estímulo para que el consumo se incremente en aquellas zonas en que esto ocurre. De todos modos, el abastecer la futura demanda requiere de una planificación eficaz, pues el sistema de potencia deberá expandirse y será necesario explotar nuevas fuentes de energía, construir más líneas de transmisión, etc; se hace indispensable, -

entonces, tener en cuenta los tiempos de fabricación de equipos, el transporte e instalación de los mismos, su vida útil, las varias alternativas con sus características técnicas y económicas, la forma de financiamiento, etc. Por estas razones es necesario determinar el programa de obras de generación, transmisión y distribución más ventajoso; esto se logra con la utilización de modelos matemáticos de selección de inversiones.

Las redes eléctricas corrientemente inician su operación como unidades aisladas y se van extendiendo gradualmente para cubrir las necesidades de un país o área cualquiera. La demanda de grandes bloques de potencia y de mayor seguridad hace indispensable la interconexión de sistemas cercanos, con las siguientes ventajas más importantes:

a) El costo por KVA de grandes centrales es menor que el correspondiente a centrales pequeñas;
b) El rendimiento de operación de grandes centrales es más elevado;
c) Resulta más económico emplear centrales de elevado rendimiento las 24 horas del día y transmitir la energía a grandes distancias, que emplear centrales locales de menor eficiencia;
d) Permite absorver cambios repentinos de carga mediante "centrales de pico";
e) El sistema posee una frecuencia común;
f) Se garantiza una mayor continuidad de servicio.

Debido a esto, la interconexión de sistemas se ha incrementado en un grado tal, que en varios países se ha convertido en

rutinario el intercambio de energía entre las redes de diferentes compañías.

La programación del funcionamiento, perfeccionamiento y expansión de los sistemas de potencia, exigen estudios de selección de inversiones, flujo de cargas, estabilidad, cálculos de fallas y del despacho económico de carga. Los computadores digitales son de gran utilidad para resolver estos problemas.

Referencias: 1, 2, 3.

1.2 EL PROBLEMA DE FLUJO DE CARGAS EN EL PAIS .-

El estudio del flujo de cargas es la columna vertebral del diseño de un sistema de potencia. Constituye el medio por el cual se puede conocer de antemano la operación futura de un sistema.

La planeación de un sistema de potencia se refiere a proponer una serie de soluciones y luego a identificar cual es la más conveniente; para esto es indispensable conocer el comportamiento con cada una de las soluciones propuestas, lo cual se logra con el estudio denominado flujo de cargas.

El estudio de flujo de cargas trata de la determinación de la tensión, potencia activa y reactiva, y factor de potencia en los diversos puntos del sistema eléctrico cuando está operando en condiciones normales de funcionamiento y bajo requerimientos establecidos.

Para sistemas medianos y grandes, este cálculo es demasiado largo para hacerlo a mano y más aún, una vez concluído no se podrá tener plena confianza en los resultados por la posibilidad de haber cometido errores en los desarrollos matemáticos. Es necesario, por lo expuesto, realizar los estudios de flujo de cargas mediante la utilización de los analizadores de redes o de los computadores digitales. Sinembargo, la experiencia ha demostrado que los computadores digitales son más económicos para realizar los estudios básicos de los problemas que se presentan al planificar, expandir e interconectar los sistemas eléctricos.

Por otro lado, cabe mencionarse que, el Ecuador actualmente dispone de los fondos necesarios para poder ejecutar el Plan Nacional de Electrificación, que consiste básicamente en formar Sistemas Eléctricos Regionales en áreas geográficamente definidas, que serán administradas por Empresas Eléctricas Regionales, y que luego podrán pasar a formar parte del Sistema Nacional Interconectado.

La formación de los diferentes Sistemas Regionales responde a la necesidad de integrar los pequeños e ineficientes sistemas eléctricos que actualmente están operando a fin de que, robustecidos, puedan disponer de los medios que les permitan atender a los problemas de distribución y comercialización de la energía eléctrica. En una segunda etapa, recibirán energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado para que los recursos hidráulicos e hidrocarburíferos del país sean explotados de una forma óptima, y entonces, los Sistemas Regionales se encargarán de la comercialización en los sitios mismos del consumo.

El estudio que se deberá realizar en cada uno de los Sistemas Regionales es muy grande pues a la presente fecha únicamente se ha realizado el estudio de flujo de cargas, con la utilización del analizador de redes de la Escuela Politécnica Nacional, del Sistema Regional del Norte en las condiciones de funcionamiento actual y con las proyecciones para 1980 y 1990.

En lo que se refiere al Sistema Nacional Interconectado, los estudios realizados han sido llevados a cabo en el exterior por la urgencia y falta de medios adecuados en el país.

Recordando que los estudios de flujo de cargas dan criterios básicos que ayudan a determinar la ubicación y características principales de diseño de nuevas centrales generadoras, subestaciones y líneas, así como posibles modificaciones al sistema existente, se comprenderá el gran campo de acción que puede tener el presente trabajo, y aún más se deduce de todo lo expuesto anteriormente, que es necesario en el país incrementar en grupos de estudio el desarrollo y/o perfeccionamiento de los análisis de sistemas de potencia por los métodos modernos que permiten el uso de los computadores digitales.

Referencias: 1, 2, 4.

1.3 VISION HISTORIA DEL DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS DE FLUJO DE CARGAS.-

Desde 1929 se ha dependido del analizador de redes de C.A. y C.D. para efectuar este trabajo, en los cuales por medio de aproximaciones sucesivas se logran las condiciones preestable

cidas para el sistema y cuando todas han sido satisfechas, se obtiene una solución.

Desde el comienzo de la década de los 50, el desarrollo de los computadores digitales proporcionó un medio eficaz para la solución de los problemas en sistemas de potencia por la gran rapidez con que pueden efectuar operaciones aritméticas.

La literatura que describe métodos de análisis para usarlos en computadores digitales, comienza en 1954. Para 1960, era evidente que el estudio de sistemas eléctricos de potencia se debía realizar en computadores digitales por la rapidez y precisión posibles.

Uno de los pioneros en desarrollar métodos digitales fue L.A. Dunstan. En su artículo "Digital Load Flow Studies" describe un método semiautomático, el cual asume cierta corriente que fluye por las mallas, dada una potencia de entrada. Con estas corrientes se determinan las caídas de voltaje en el sistema de transmisión. Luego se procede a calcular los voltajes de las barras y, con las corrientes que entran a cada una de ellas se calculan sus potencias. Como estas potencias difícilmente serán iguales a las que se utilizaron en primera instancia, es necesario variar las corrientes que las representan y seguir otra vez todo el desarrollo hasta cuando los resultados sean lo más cercanos posibles.

El trabajo realizado por J.B. Ward y H.W. Hale "Digital Computer Solution of Power Flow Problems" es un artículo extremadamente importante en el desarrollo de programas para los

estudios de flujo de cargas. Históricamente, son los primeros en desarrollar un método completamente automático para resolver el problema de flujos, y se lo considera como el punto de partida y de referencia para casi todos los trabajos posteriores.

Los resultados de este método se pueden describir en cuatro puntos principales:

1. Descripción de las conexiones en la red y listado de las impedancias.
2. Solución iterativa de los voltajes de barras los cuales satisfacen condiciones prescritas.
3. Cálculo de parámetros en las barras.
4. Cálculo de los flujos en las líneas.

El proceso iterativo se efectúa hasta cuando la diferencia de los voltajes entre dos iteraciones sucesivas sea la más pequeña posible, aceptándose valores prácticos de tolerancia desde 10^{-3} hasta 10^{-7} según el grado de precisión requerido.

Un trabajo posterior fue el de A.F. Glimm y G.W. Stagg denominado "Automatic Calculation of Load Flows", el cual cubre las mismas áreas que el artículo anterior, sinembargo, resultó ser una versión más sencilla de ese método. El problema se plantea utilizando las ecuaciones de nodo que también se resuelve en forma iterativa. Finalmente, este artículo entra en la descusión de desarrollar métodos para mejorar la velocidad de convergencia a la solución.

Otro artículo aparecido posteriormente, hecho por J. Brown y W. F. Tinney: "Digital solutions for large power networks", presenta métodos de aceleración y discute su efectividad.

Un nuevo método llamado de atenuación o relajamiento fue presentado por R. H. Jordan, en el artículo "Rapidly Convergin Digital Load Flow". Consiste en que una solución encontrada con voltajes estimados producirá una serie de residuos, de los cuales el mayor se reduce a cero mediante ajustes en los valores de las incógnitas. Este procedimiento se repite hasta que de los residuos, el mayor quede dentro de la tolerancia deseada.

H.P.ST. Clair y G.W. Stagg, en el artículo "Experience in computation of load flow studies using high speed computer", describen el desarrollo de un nuevo programa de flujo de cargas, incluyendo aspectos automáticos adicionales para incrementar la velocidad y utilidad de su aplicación a problemas de planeamiento de sistemas.

M.S.Dyrkacz y F.J. Maginnis en "A new automatic program for load flow studies on the IBM 704" describen los aspectos automáticos adicionales siguientes:

1. Selección automática de taps para controlar el voltaje.
2. Control automático de intercambio de potencia entre áreas.

H.W. Hale y R.W. Goodrich, con el artículo "Digital calculation of power flow some new aspects", presentaron una modificación al método de Ward y Hale. Este artículo

parte de la misma ecuación de nodos y considera la posibilidad de disminuir el tiempo de computación reduciendo el número de iteraciones. Sinembargo, cabe mencionar que, reducir el número de iteraciones no implica necesariamente que el tiempo de computación se disminuya.

El estudio desarrollado por W.F. Tinney y C.E. Hart en el artículo "Power flow solution by Newton's method" consiste en plantear las ecuaciones de nodo con la matriz admitancia y expandirlas en series de Taylor. El número de iteraciones requerido para la solución es virtualmente independiente del tamaño y clase de problema.

La mayoría de los métodos expuestos anteriormente se basan en las ecuaciones de nodo utilizando la matriz de admitancias. Existen otros métodos que también utilizan ecuaciones de nodo, pero con la matriz de impedancias: H.E. Brown, G.K. Carter, H. Happ y C.E. Person analizaron uno de ellos en el artículo "Power flow solution by impedance matrix iterative method".

Esta breve sinopsis histórica, sin ser completa, da una idea del interés que se ha puesto en encontrar nuevos y mejores métodos de resolución del problema de flujo de cargas, y es por esto que continuamente se siguen desarrollando procedimientos tendientes al automatismo y optimización cada vez más sofisticado de los programas utilizados.

Referencias: 1, 5, 6.

1.4 METODOS NUMERICOS USUALMENTE EMPLEADOS EN LOS ESTUDIOS DE FLUJO DE CARGAS.-

Debido a que existen varios sistemas de referencia en base a los cuales se pueden plantear las ecuaciones que establecen el modelo matemático de un sistema para el estudio requerido (Flujo de Cargas, Estabilidad, Corto Circuitos, etc), en esta sección se hace la descripción netamente matemática de los métodos con los que actualmente se resuelve el problema de flujo de cargas.

1.4.1 METODO ITERATIVO DE GAUSS .-

Sirve para resolver sistemas de ecuaciones, sean estas lineales o no.

Se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} A_{11} X_1 + A_{12} X_2 + A_{13} X_3 &= b_1 \\ A_{21} X_1 + A_{22} X_2 + A_{23} X_3 &= b_2 \qquad (1.1) \\ A_{31} X_1 + A_{32} X_2 + A_{33} X_3 &= b_3 \end{aligned}$$

Despejando X_1 de la primera ecuación, X_2 de la segunda y X_3 de la tercera, se tiene:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{A_{11}} (b_1 - A_{12} X_2 - A_{13} X_3) \\ X_2 &= \frac{1}{A_{22}} (b_2 - A_{21} X_1 - A_{23} X_3) \qquad (1.2) \\ X_3 &= \frac{1}{A_{33}} (b_3 - A_{31} X_1 - A_{32} X_2) \end{aligned}$$

Si $X_1^{(o)}$, $X_2^{(o)}$ y $X_3^{(o)}$ son los valores asumidos como solución del sistema de ecuaciones, se está en capacidad de calcular los valores de las incógnitas en la siguiente iteración:

$$X_1^{(1)} = \frac{1}{A_{11}} (b_1 - A_{12} X_2^{(o)} - A_{13} X_3^{(o)})$$

$$X_2^{(1)} = \frac{1}{A_{22}} (b_2 - A_{21} X_1^{(o)} - A_{23} X_3^{(o)}) \qquad (1.3)$$

$$X_3^{(1)} = \frac{1}{A_{33}} (b_3 - A_{31} X_1^{(o)} - A_{32} X_2^{(o)})$$

Estos valores de $X_1^{(1)}$, $X_2^{(1)}$ y $X_3^{(1)}$, se utilizan para calcular en la siguiente iteración $X_1^{(2)}$, $X_2^{(2)}$ y $X_3^{(2)}$.

En forma general, para un sistema de n ecuaciones, se tiene, para la iteración k:

$$X_i^{(k)} = \frac{1}{A_{ii}} (b_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} A_{ij} X_j^{(k-1)}) \qquad (1.4)$$

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

El proceso iterativo se repite hasta que la diferencia entre los valores de las incógnitas en dos iteraciones consecutivas, sea menor o igual a un valor de tolerancia asumido como criterio de convergencia; o sea que:

$$\left| X_i^{(k)} - X_i^{(k-1)} \right| \leq \epsilon \qquad (1.5)$$

Donde ϵ es el valor de la tolerancia.

1.4.2 METODO ITERATIVO DE GAUSS-SEIDEL .-

Consiste en una modificación al método Gauss con el fin de acelerar la convergencia a la solución.

En este método, en una iteración cualquiera, no se calculan todos los valores de las incógnitas para luego utilizarlos en la siguiente, como sucede en el método de Gauss. En este caso, el valor calculado de una incógnita se lo emplea inmediatamente para obtener el valor de las restantes dentro de una iteración.

Para el caso del ejemplo, suponiendo que se ha calculado $X_1^{(1)}$, este valor se utiliza en la expresión de $X_2^{(1)}$, y los dos anteriores, para obtener $X_3^{(1)}$.

La forma general del método de Gauss-Seidel para un sistema de n ecuaciones es:

$$X_i^{(k)} = \frac{1}{A_{ii}}\left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} X_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^{n} A_{ij} X_j^{(k-1)}\right) \quad (1.6)$$

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

La convergencia se comprueba de la misma forma que en el método de Gauss.

1.4.3 METODO ITERATIVO DE NEWTON-RAPHSON.-

Sea un sistema de ecuaciones algébricas no lineales:

$$
\begin{aligned}
f_1 (X_1, X_2, \ldots\ldots\ldots\ldots, X_n) &= b_1 \\
f_2 (X_1, X_2, \ldots\ldots\ldots\ldots, X_n) &= b_2 \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\
f_n (X_1, X_2, \ldots\ldots\ldots\ldots, X_n) &= b_n
\end{aligned}
\qquad (1.7)
$$

Si $X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots\ldots, X_n^{(o)}$ son los valores asumidos como solución del sistema, para que lleguen a ser la solución exacta, se los debe corregir mediante unos ΔX_1, ΔX_2, ... ΔX_n, de manera que la expresión (1.7) quedará como sigue:

$$
\begin{aligned}
f_1 (X_1^{(o)} + \Delta X_1, X_2^{(o)} + \Delta X_2, \ldots X_n^{(o)} + \Delta X_n) &= b_1 \\
f_2 (X_1^{(o)} + \Delta X_1, X_2^{(o)} + \Delta X_2, \ldots X_n^{(o)} + \Delta X_n) &= b_2 \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \qquad (1.8) \\
f_3 (X_1^{(o)} + \Delta X_1 + X_2^{(o)} + \Delta X_2, \ldots X_n^{(o)} + \Delta X_n) &= b_n
\end{aligned}
$$

Las ecuaciones (1.8) pueden expandirse utilizando el teorema de Taylor para una función de dos o más variables. Por ejemplo, el expandir la primera ecuación se obtiene:

$$
\begin{aligned}
f_1(X_1^{(o)} + \Delta X_1, X_2^{(o)} + \Delta X_2, \ldots X_n^{(o)} + \Delta X_n) &= \\
f_1 (X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots, X_n^{(o)}) &+ \\
+ \Delta X_1 \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right|_o + \Delta X_2 \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right|_o + \ldots + \Delta X_n \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_n}\right|_o &+ \emptyset 1
\end{aligned}
$$

Donde Ø 1 es función de las potencias superiores de ΔX_1, $\Delta X_2, \ldots\ldots, \Delta X_n$ y de las derivadas segunda, tercera etc, de f_1. Si los valores estimados de Xi están cercanos a la solución, entonces los ΔX_i serán relativamente pequeños y todos los términos de mayor potencia pueden ser despreciados. El conjunto de ecuaciones lineales que se obtiene, repitiendo el proceso para todas las ecuaciones, es el siguiente:

$$f_1(X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots X_n^{(o)}) + \Delta X_1 \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right|_o + \Delta X_2 \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right|_o + \ldots$$

$$+ \Delta X_n \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_n}\right|_o = b_1$$

$$f_2(X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots, X_n^{(o)}) + \Delta X_1 \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_1}\right|_o + \Delta X_2 \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_2}\right|_o +$$

$$+ \ldots\ldots + \Delta X_n \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_n}\right|_o = b_2$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (1.9)$$

$$f_n(X_1^{(o)}, X_2^{(o)}, \ldots\ldots, X_n^{(o)}) + \Delta X_1 \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_1}\right|_o + \Delta X_2 \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_2}\right|_o +$$

$$+ \ldots\ldots + \Delta X_n \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_n}\right|_o = b_n$$

Escribiendo (1.9) en forma de matrices:

$$\begin{bmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_2}\right|_o & \ldots\ldots & \left.\frac{\partial f_1}{\partial X_n}\right|_o \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_2}\right|_o & \ldots\ldots & \left.\frac{\partial f_2}{\partial X_n}\right|_o \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_1}\right|_o & \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_2}\right|_o & \ldots\ldots & \left.\frac{\partial f_n}{\partial X_n}\right|_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \ldots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 - f_1(X_1^{(o)}, X_2^{(o)} \ldots, X_n^{(o)}) \\ b_2 - f_2(X_1^{(o)}, X_2^{(o)} \ldots, X_n^{(o)}) \\ \ldots\ldots\ldots \\ b_n - f_n(X_1^{(o)}, X_2^{(o)} \ldots, X_n^{(o)}) \end{bmatrix}$$

$$J.\overline{C} = \overline{D} \qquad (1.10)$$

Donde:

J = Jacobiano de las funciones f_i ; $i = 1, 2, \ldots n$

$\overline{C}$ = Vector de corrección

Los elementos de las matrices $\overline{D}$ y J pueden calcularse reemplazando los X_i por los $X_i^{(o)}$ asumidos, entonces, los valores de ΔX_i pueden encontrarse por cualquier método para resolver ecuaciones lineales. Obtenidos los valores de ΔX_i, se pueden hallar los nuevos valores de las incógnitas de la siguiente manera:

$$X_i^{(1)} = X_i^{(o)} + \Delta X_i \; ; \; i = 1, 2, \ldots, n$$

El proceso se repite hasta que dos valores sucesivos para cada X_i difieran en una tolerancia especificada. Hay que anotar que en cada iteración se deben calcular los valores de los elementos de J y de $\overline{D}$, a menos que ΔX_i cambie lentamente, en este caso, J y $\overline{D}$ se pueden calcular cada cierto número de iteraciones.

Referencias: 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

CAPITULO II

REPRESENTACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGAS.-

2.1 INTRODUCCION .-

La representación de los sistemas de potencia mediante los diagramas unifilares, permite incorporar información suficiente para el objetivo que se persigue.

Cuando es necesario realizar estudios del sistema, este diagrama tiene que transformarse en uno de impedancias, en el cual se representa el circuito equivalente del sistema eléctrico referido a un nivel de voltaje. Los cálculos que requiere este trabajo se facilitan cuando se emplean las técnicas en por unidad.

La finalidad del estudio de flujo de cargas permite la representación de los diferentes elementos de un sistema de potencia en las condiciones de un sistema eléctrico en régimen permanente balanceado, o sea, en estado de operación normal.

Se representa en este capítulo a los diferentes elementos del sistema por fase con sus parámetros útiles a este estudio, y al mismo tiempo se incluye la suficiente información teórica a fin de dar una comprensión rápida al problema.

Los elementos que se consideran en este capítulo son: generadores, transformadores, autótransformadores, reactores, condensadores, líneas de transmisión, motores, cargas en ge

neral.

Referencias: 2

2.2 REPRESENTACION DE GENERADORES.-

Debido a que lo que interesa son las condiciones a los terminales de la máquina, un generador se acostumbra a especificarlo en base a su potencia, voltaje de generación y factor de potencia.

Es necesario además tener conocimiento de los valores máximo y mínimo de MVAR permisibles cuando el generador entrega potencia aparente nominal ya que ésta información es necesaria al especificar una barra de voltaje controlado como se verá en el capítulo III.

La representación de los generadores en un sistema de potencia para el estudio de flujo de cargas es de la Fig. 2.1. con las especificaciones que se indican:

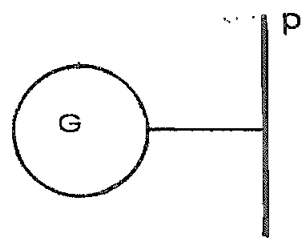


Fig. 2.1. - Representación de Generadores

- Potencia aparente nominal
- Voltaje de Generación
- Factor de Potencia
- Potencia reactiva máxima
- Potencia reactiva mínima

2.3 REPRESENTACION DE TRANSFORMADORES.-

Los transformadores de potencia considerados para el estudio de flujo de cargas pueden ser utilizados como:

a) Transformadores de Generadores.- Se emplean como elementos elevadores de tensión; transforman la tensión del nivel de generación al nivel de transmisión.

b) Transformadores de Transmisión.- Se emplean para transformar la tensión entre diversos niveles de voltaje de transmisión.

c) Transformadores de regulación (o control) .- Se emplean para regular la tensión y en consecuencia el flujo de potencias.

Referencias: 3

2.3.1 TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS TRABAJANDO EN SU RELACION NOMINAL .-

Un diagrama con la representación del circuito equivalente en p.u. de un transformador que está trabajando con sus relaciones nominales, es el de la Fig. 2.2

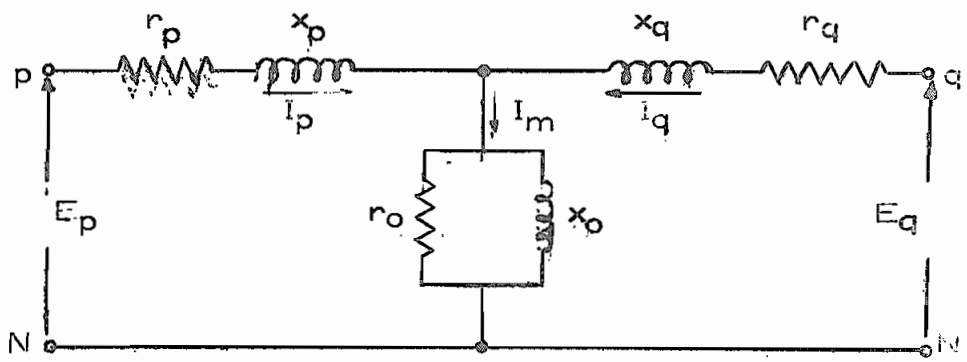


Fig. 2.2 Circuito equivalente de transformadores.

En este circuito :

I_m = corriente de magnetización

I_p = corriente en el primario

I_q = corriente en el secundario

E_p = Voltaje en el bobinado primario

E_q = Voltaje en el bobinado secundario

r_p = resistencia del bobinado primario

x_p = reactancia de dispersión del bobinado primario

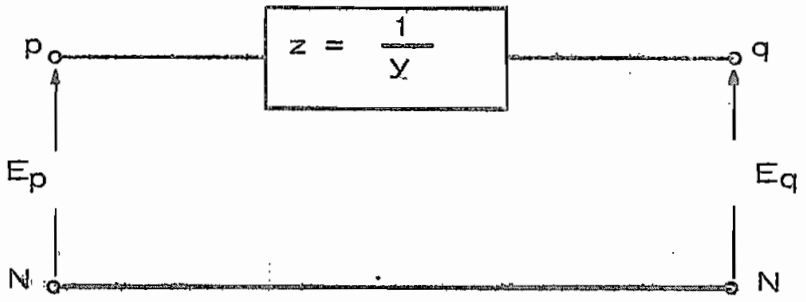
r_q = resistencia del bobinado secundario

x_q = reactancia de dispersión del bobinado secundario

r_o = resistencia representativa de las pérdidas en el núcleo.

x_o = reactancia de magnetización del transformador

Por ser la corriente de magnetización muy pequeña respecto a la corriente de carga, para el presente estudio se puede representar al transformador de potencia, cuando está trabajando en su relación nominal, como se indica en la Fig. 2.3.



$$z = (r_p + r_q) + j(x_p + x_q)$$

Fig. 2.3. Representación de transformadores de dos devanados en su relación nominal.

A la impedancia z se le denomina impedancia de dispersión o de cortocircuito. Esta impedancia es la misma referida a cualquier de los bobinados porque está expresada en p.u.

Referencias: 13, 14

2.3.2 TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS CON TAPS.-

Debido a que las variaciones de carga producen cambios de tensión en el lado del secundario del transformador, muy a menudo se tiene a los transformadores trabajando fuera de su relación nominal. Los "taps" de los transformadores modifican la relación de transformación y, consecuentemente, producen cambio en la tensión; este cambio de tensión se lo puede realizar bajo carga o sin carga, dependiendo de sí el transformador tiene el equipo necesario para hacerlo o no.

La variación de la tensión entre pasos sucesivos de los taps es pequeña, y normalmente del orden del 1.25% de la tensión nominal, con el objeto de no producir grandes perturbaciones en las barras de carga.

La impedancia en p.u. de un transformador no varía al cambiar de tap en cualquiera de sus enrollados siempre que las tensiones bases en los lados de alta y baja tensión estén en la misma relación que los nuevos números de espiras. Esto se ilustra esquemáticamente en las Figs. 2.4 (a, b y c), en las que se indica un transformador con taps en el lado de alta tensión.

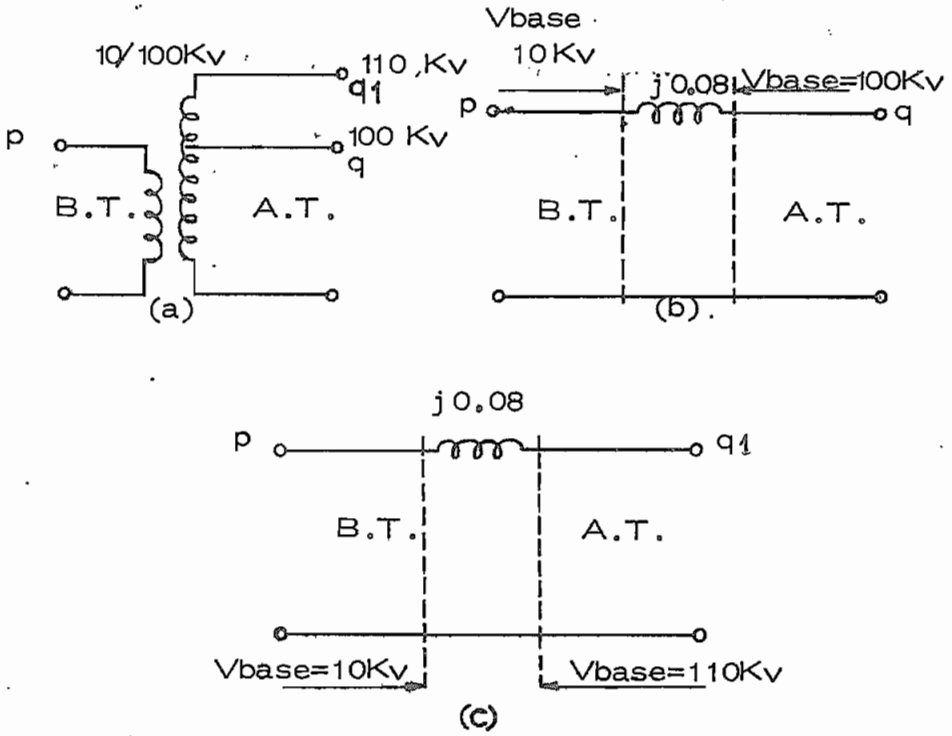


Fig. 2.4 Efecto del cambio de taps sobre los voltajes base de un sistema.

Del análisis de las figuras se desprende que la z p.u. del transformador no varía, pero toda la parte del sistema conectado al lado de alta tensión del transformador debe cambiar de tensión base, lo cual implica recalcular todas las impedancias p.u. que se relacionan con este cambio de voltaje. Para obviar este problema, se introduce un autotransformador ideal, tal como se indica en la Fig. 2.5.

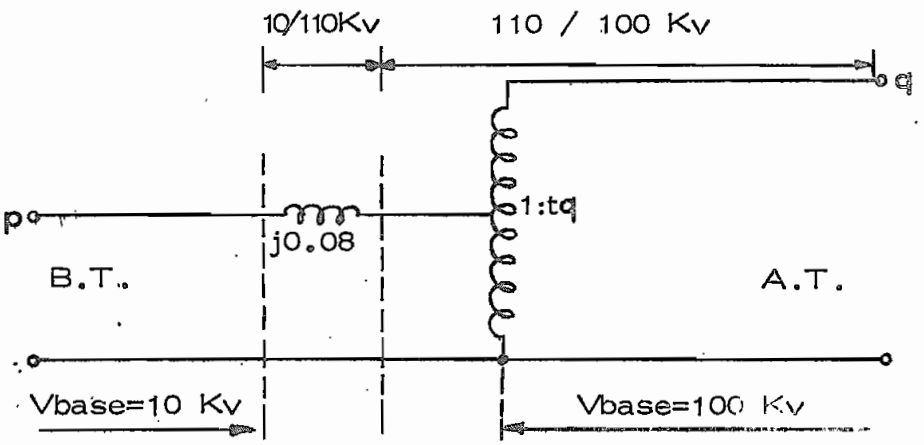


Fig. 2.5 Representación del cambio de taps mediante un autotransformador ideal.

Donde:

t_q = factor que corresponde a la relación dada por el autotransformador ideal.

A continuación se presenta un desarrollo matemático para encontrar el circuito equivalente de un transformador que tiene taps en el primario y en el secundario.

a) <u>Transformador con cambio de taps en el primario:</u>

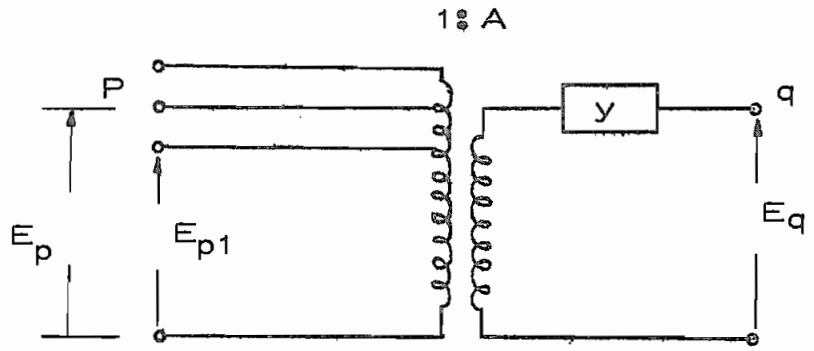


Fig. 2.6 Transformador con cambio de taps en el primario.

A = relación de transformación en general

a_n = relación nominal de transformación = $\frac{E_q}{E_p}$ (2.1)

a = relación no nominal de transformación

$$a = \frac{\text{voltaje en el lado que no tiene cambio de taps}}{\text{voltaje en el lado que tiene cambio de taps}} = \frac{E_q}{E_{p1}} \quad (2.2)$$

$$t_p = \frac{a}{a_n} = \frac{\frac{E_q}{E_{p1}}}{\frac{E_q}{E_p}} = \frac{E_p}{E_{p1}} \quad (2.3)$$

tp = Relación dada por el autotransformador ideal involucrado al lado primario, cuyo efecto puede representarse como:

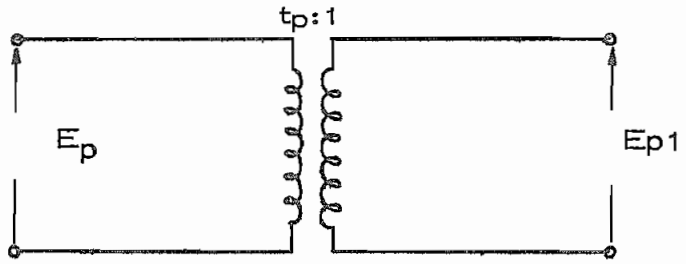


Fig. 2.7 Representación del efecto de los taps en el lado primario.

b) <u>Transformador con cambio de taps en el secundario:</u>

Siguiendo el desarrollo del punto anterior se tiene:

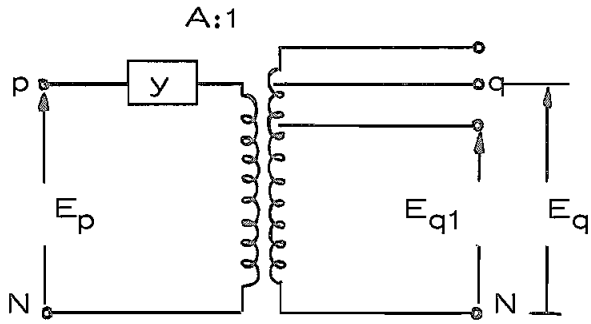


Fig. 2.8 Transformador con cambio de taps en el secundario.

$$a_n = \frac{E_p}{E_q} \qquad (2.4)$$

$$a = \frac{E_p}{E_{q1}} \qquad (2.5)$$

$$t_q = \frac{a}{a_n} = \frac{E_p / E_{q1}}{E_p / E_q} = \frac{E_q}{E_{q1}} \qquad (2.6)$$

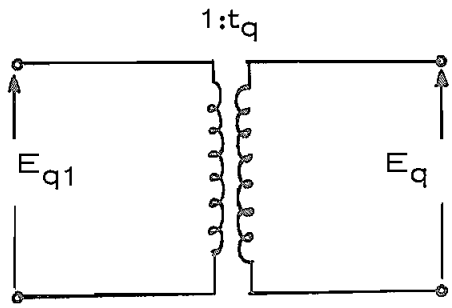


Fig. 2.9 Representación del efecto de los taps en el lado secundario.

c) <u>Transformador con cambio de taps en el primario y secundario:</u>

En forma similar al circuito de la Fig.2.5, para el caso en consideración, el circuito es el siguiente:

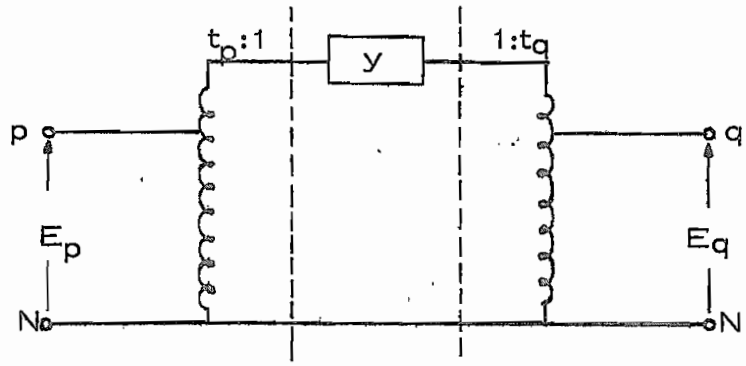


Fig. 2.10 Transformador con cambio de taps en el primario y secundario.

De acuerdo con lo indicado en los puntos anteriores a y b, y a fin de encontrar las relaciones de la tensión y la corriente entre los terminales p y q, el circuito de la Fig. 2.10, puede ser presentado en la forma indicada en la Fig. 2.11, cuyos parámetros se relacionan según las ecuaciones (2.7) a (2.10) :

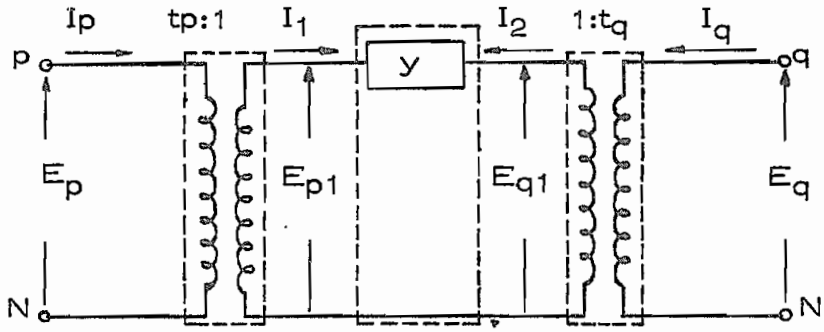


Fig. 2.11 Representación del efecto de los taps en el primario y secundario.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_q \end{bmatrix} \qquad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{p1} \\ E_{q1} \end{bmatrix} \qquad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} E_{p1} \\ E_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.10)$$

Reemplazando las expresiones (2.8), (2.9) y (2.10) en la (2.7) se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{t_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{t_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.11)$$

De donde:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y}{t_p^2} & \frac{-y}{t_p\, t_q} \\ \frac{-y}{t_p\, t_q} & \frac{y}{t_q^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.12)$$

Por otra parte, considerando un circuito π equivalente del transformador se tiene:

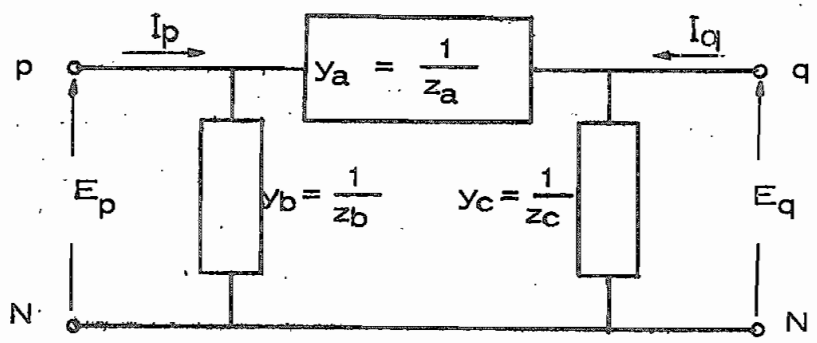


Fig. 2.12 Representación π del transformador con cambio de taps en el primario y secundario.

$$y_a = y_{pq} = y_{qp}$$

$$I_p = E_p\, y_b + (E_p - E_q)\, y_a \qquad (2.13)$$

$$I_q = E_q\, y_c + (E_q - E_p)\, y_a$$

o, en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_b + y_a & -y_a \\ -y_a & y_c + y_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.14)$$

Las relaciones (2.12) y (2.14) deben ser equivalentes, por lo tanto:

$$y_a = \frac{y}{t_p\, t_q}$$

$$y_b = y \left(\frac{1}{t_p^2} - \frac{1}{t_p\, t_q} \right) \qquad (2.15)$$

$$y_c = y \left(\frac{1}{t_q^2} - \frac{1}{t_p\, t_q} \right)$$

Entonces el circuito equivalente de un transformador de dos devanados con taps en el primario y secundario es el de la Fig. 2.12, cuyas admitancias están dadas por las relaciones (2.15). A este circuito se lo denomina delta resonante puesto que la suma de za +zb + zc es igual a cero.

De las expresiones (2.15) se deduce que si t_p es mayor que t_q, zb será negativa, y si t_q es mayor que t_p, zc será negativa. Si en la impedancia del transformador se incluye la resistencia, la impedancia negativa de zb ó zc, según sea el caso, consistirá de una resistencia negativa y de una reactancia capacitiva. El valor de la resistencia negativa en las soluciones analíticas, se trata de forma semejante a los valores positivos.

Si t_p y t_q son iguales a la unidad se tiene que zb y zc son iguales a infinito y el circuito de la Fig. 2.12 se reduce a uno con la impedancia serie z (impedancia de dispersión).

Si el voltaje base y el voltaje nominal del transformador son iguales en uno de los bobinados, t en este bobinado es igual a la unidad. En la mayoría de los casos los voltajes base del sistema de potencia son escogidos de tal manera que t_p o t_q sean la unidad.

Referencias: 3, 9, 14, 15

2.3.3 REPRESENTACION DE TRANSFORMADORES DE TRES DEVANADOS.-

Debido a que se desprecia la corriente de excitación por su

valor pequeño, el circuito equivalente de un transformador de tres devanados será un circuito de tres terminales.

Los arrollamientos primario y secundario de un transformador de dos devanados tienen los mismos KVA nominales, pero los tres arrollamientos de un transformador de tres devanados pueden tener distintos KVA nominales.

Por las pruebas normales de cortocircuito se establecen tres impedancias:

z_{pq} = impedancia de dispersión en p.u., medida en el primario con el secundario en cortocircuito, y el terciario en circuito abierto:

z_{pt} = Impedancia de dispersión en p.u., medida en el primario con el terciario en cortocircuito y el secundario en circuito abierto.

z_{qt} = Impedancia de dispersión en p.u., medida en el secundario con el terciario en cortocircuito y el primario en circuito abierto.

Las expresiones (2.16) que se encuentran a continuación están basadas en que se tienen los mismos KVA base, y los voltajes base considerados son proporcionales al número de espiras de los devanados primario, secundario y terciario; de esta manera la impedancia entre dos bobinados con el tercero en circuito abierto es la misma referida a cualquiera de los dos bobinados.

$$z_{pq} = z_p + z_q$$

$$z_{pt} = z_p + z_t \qquad (2.16)$$

$$z_{qt} = z_q + z_t$$

Resolviendo las ecuaciones (2.16) se obtiene:

$$z_p = \frac{1}{2} \left(z_{pq} + z_{pt} - z_{qt} \right)$$

$$z_q = \frac{1}{2} \left(z_{pq} + z_{qt} - z_{pt} \right) \qquad (2.17)$$

$$z_t = \frac{1}{2} \left(z_{pt} + z_{qt} - z_{pq} \right)$$

La representación del transformador de tres devanados es el de la Fig. 2.13 con los valores de impedancias que se indican en las ecuaciones (2.17).

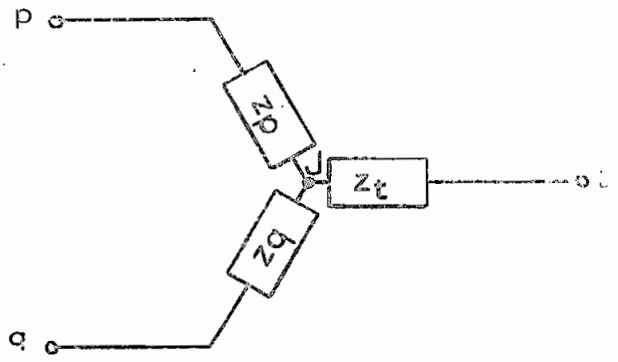


Fig. 2.13 Representación del transformador de tres devanados.

En este circuito el punto común J es ficticio y no corresponde al neutro del sistema.

En el caso de que no haya carga conectada al terciario, el punto t estará en circuito abierto y la impedancia entre p y q será z_{pq} y el circuito equivalente es igual al de un transformador de dos devanados.

En ocasiones el transformador de tres devanados puede estar trabajando fuera de su relación nominal. Es razonalbe suponer que se escogerá los voltajes base del sistema, en forma que por lo menos dos de ellos corresponden a los voltajes nominales de los bobinados, que vendrán a ser, el primario y el secundario.

Como se considera voltajes nominales y potencia base igual, empleando la notación usada para los transformadores de dos bobinados, se tiene que $t_p = t_q = 1$; en el caso que el voltaje base del tercer bobinado difiere del voltaje nominal del transformador, t_t no será igual a la unidad. Con estos antecedentes, si se utiliza los conceptos del "delta resonante", el circuito equivalente es el de la Fig. 2.14 con las relaciones (2.18) que se indican:

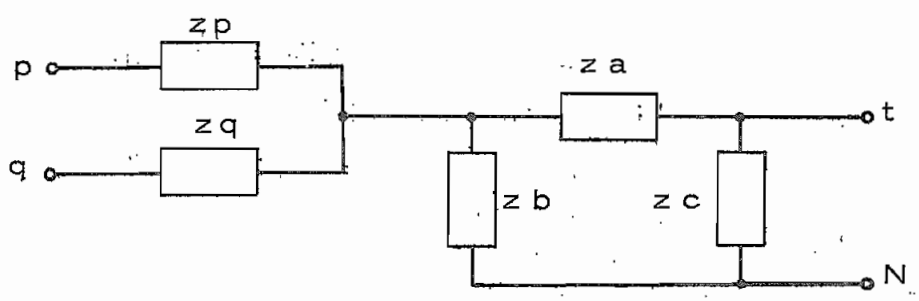


Fig. 2.14 Representación del transformador de tres devanados, con taps en el terciario.

$$z_a = \frac{z_{pt} + z_{qt} - z_{pq} \cdot t_t}{2}$$

$$z_b = \frac{z_{pt} + z_{qt} - t_t \cdot z_{pq}}{2\,(t_t - 1)} \qquad (2.18)$$

$$z_c = \frac{t_t\,(z_{pt} + z_{qt} - t_t \cdot z_{pq})}{2\,(1 - t_t)}$$

$$z_p = \frac{z_{pq} \cdot t_t + z_{pt} - z_{qt}}{2\,t_t}$$

$$z_q = \frac{z_{pq} \cdot t_t + z_{qt} - z_{pt}}{2\,t_t}$$

En las relaciones (2.18) se puede apreciar que si $t_t = 1$, z_b y z_c son infinitas y el circuito equivalente p.u. es el del transformador de tres devanados, basado en los voltajes nominales de los bobinados y con la misma potencia base.

Referencias: 2, 14

2.3.4 REPRESENTACION DE TRANSFORMADORES DE DESPLAZAMIENTO DE ANGULO.-

Un transformador de desplazamiento de ángulo puede ser representado en los estudios de flujo de cargas por su impedancia, o admitancia, conectada en serie con un autotransformador ideal que tiene una relación de transformación compleja como se indica en la Fig. 2.15.

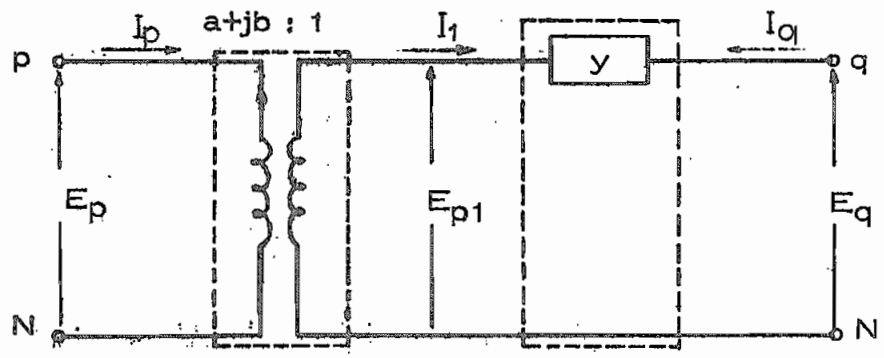


Fig. 2.15 Transformador de desplazamiento de ángulo

En donde:

$$\frac{E_p}{E_{p1}} = a + jb \qquad (2.19)$$

Por no haber pérdidas en un autotransformador ideal:

$$E_p^* \cdot I_p = E_{p1}^* \cdot I_1 \qquad (2.20)$$

$$\frac{I_p}{I_1} = \frac{1}{a - jb} \qquad (2.21)$$

En estas circunstancias:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a - jb} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_q \end{bmatrix} \qquad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{p1} \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.23)$$

$$\begin{Bmatrix} E_{p1} \\ E_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{a+jb} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_p \\ E_q \end{Bmatrix} \qquad (2.24)$$

Reemplazando en (2.22) las ecuaciones (2.23) y (2.24):

$$\begin{Bmatrix} I_p \\ I_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{a-jb} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{1}{a+jb} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_p \\ E_q \end{Bmatrix}$$

Simplificando:

$$\begin{Bmatrix} I_p \\ I_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{y}{a^2+b^2} & \dfrac{-y}{a-jb} \\ \dfrac{-y}{a+jb} & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_p \\ E_q \end{Bmatrix} \qquad (2.25)$$

Por otro lado, al considerar el circuito TT equivalente del transformador se tiene:

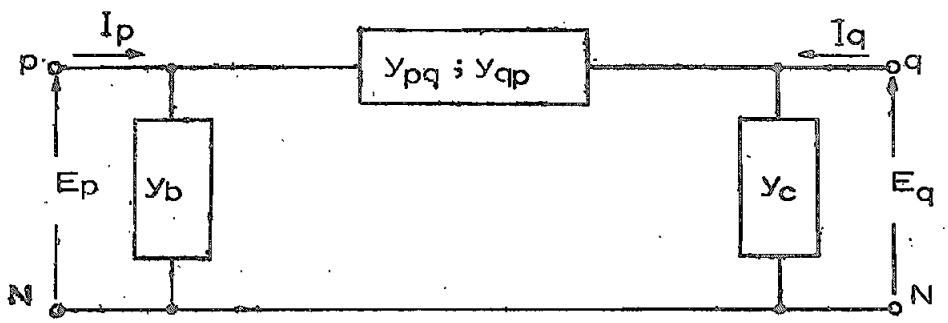


Fig. 2.16 Representación TT del transformador de desplazamiento de ángulo.

$$I_p = E_p\, y_b + (E_p - E_q)\; y_{pq}$$
$$I_q = E_q\, y_c + (E_q - E_p)\; y_{qp} \qquad (2.26)$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_b + y_{pq} & -y_{pq} \\ -y_{qp} & y_c + y_{qp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} \qquad (2.27)$$

Las relaciones (2.25) y (2.27) deben ser equivalentes, por tanto para la Fig. 2.16 se tiene:

$$y_{pq} = \frac{y}{a - jb}$$
$$y_{qp} = \frac{y}{a + jb} \qquad (2.28)$$
$$y_b = \frac{y}{a^2 + b^2} - \frac{y}{a - jb}$$
$$y_c = y - \frac{y}{a + jb}$$

Referencias: 9, 15

2.3.5 REPRESENTACION DE AUTOTRANSFORMADORES.-

Los autotransformadores contienen un bobinado primario y uno secundario sobre un núcleo común, de una manera similar a los transformadores, pero en este caso los dos bobinados están conectados entre sí. En la Fig. 2.17 se indica el circuito de un autotransformador:

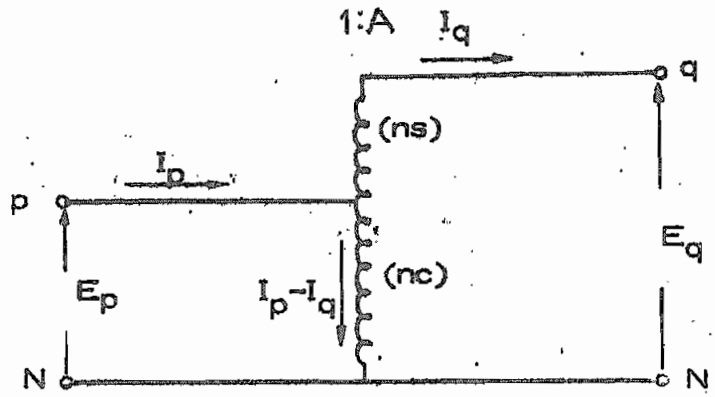


Fig. 2.17 Representación del circuito de un autotransformador.

El bobinado comprendido entre q y p se denomina bobinado serie (n_s); asimismo, el comprendido entre p y N es el bobinado común (n_c); y, el bobinado serie-común (nsc = ns + nc) es el comprendido entre q y N. Debido a que la corriente de magnetización es despreciable, se obtiene:

$$\frac{E_q}{E_p} = \frac{E_p + \frac{ns}{nc} E_p}{E_p} = 1 + \frac{ns}{nc} = A \qquad (2.29)$$

$$I_q \cdot ns = (I_p - I_q) \cdot nc \qquad (2.30)$$

$$\frac{I_p}{I_q} = \frac{ns + nc}{nc} = A \qquad (2.31)$$

Por tanto, a los autotransformadores se los representa en base al circuito equivalente de un transformador, cuya relación de transformación A está dada en las ecuaciones (2.29) ó (2.31) y cuya impedancia de dispersión puede ser obtenido mediante las pruebas usuales de cortocircuito a los terminales p y q.

Referencias: 13, 14

2.4 REPRESENTACION DE LINEAS DE TRANSMISION.-

La clasificación de las líneas de transmisión en base a su longitud (líneas cortas, medias y largas), se debe a las aproximaciones que son admitidas al operar con sus parámetros. En caso de duda sobre el grupo al que pertenece una línea, se deberá siempre considerar el circuito equivalente en el que se hacen un menor número de aproximaciones.

Una línea de transmisión puede ser considerada como un infinito número de impedancias serie y de admitancias paralelo como se indica en la Fig. 2.18 ,pues comunmente se asume que la línea está totalmente transpuesta o que su disposición es equilateral.

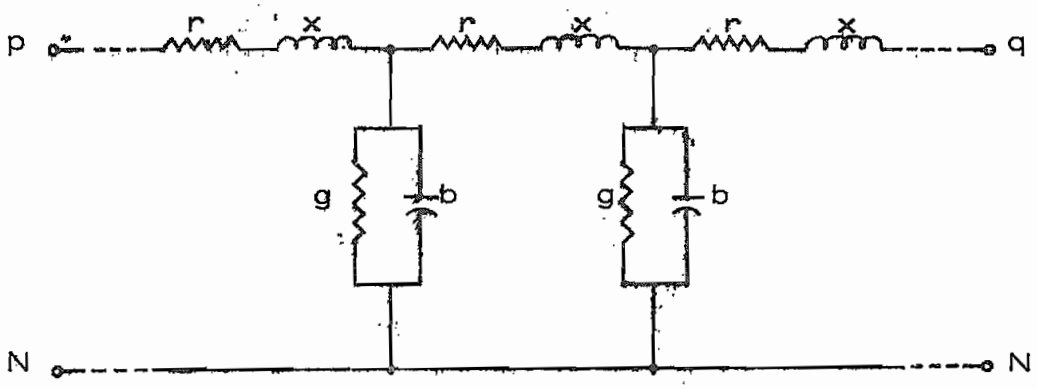


Fig. 2.18 Parámetros distribuídos de una línea de transmisión.

La notación a utilizarse es la siguiente:

r = resistencia serie por unidad de longitud y por fase

x = reactancia serie por unidad de longitud y por fase

z = impedancia serie por unidad de longitud y por fase = $(r + jx)$

g = conductancia en paralelo por unidad de longitud y por fase

b = suceptancia paralelo por unidad de longitud y por fase

y = admitancia paralelo por unidad de longitud y por fase = $(g + jb)$

L = longitud de la línea de kilómetros

Z = z.L = impedancia total en serie, por fase

Y = y.L = admitancia total en paralelo, por fase

Zeq = impedancia en serie por fase del circuito equivalente

Ysh = admitancias en paralelo, por fase, del circuito equivalente.

2.4.1 LINEAS DE LONGITUD CORTA.-

Unos autores catalogan como tales a las líneas de transmisión aéreas a 60 H_z de menos de 80 Km. de longitud; otros, consideran que para todos los tipos de problemas que se presentan en los sistemas de potencia se tiene gran seguridad considerando líneas de transmisión cortas a aquellas de hasta 50 Km., criterio que es el adoptado en el presente estudio. En este tipo de líneas, la admitancia paralelo total es tan pequeña que puede despreciarse.

La representación de una línea corta es la siguiente:

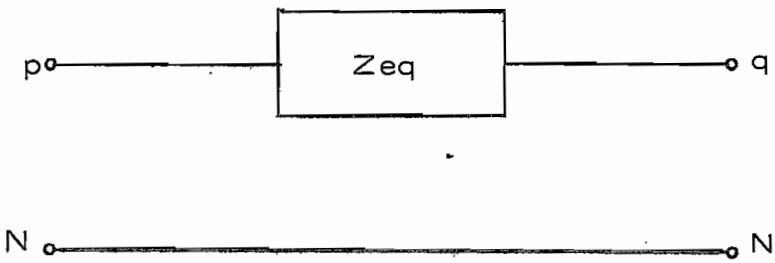


Fig. 2.19 Representación de líneas de longitud corta.

$$Z_{eq} = Z = (r + jx).\ L$$

$$L < 50 \text{ Km.}$$

2.4.2 LINEAS DE LONGITUD MEDIA.-

Se considera como líneas medias a aquellas cuya longitud está comprendida entre las líneas cortas y 160 Km. (Algunos autores consideran que se obtiene una buena exactitud en los cálculos clasificando en este grupo a las líneas de hasta 240 Km.). Debido a que el efecto capacitivo de una línea se vuelve apreciable dentro de este rango de longitudes es necesario incluirlo en su circuito equivalente.

La representación de las líneas medias se la hace a partir de dos apreciaciones:

a) Asumiendo que toda la admitancia está concentrada en el punto medio del circuito que representa a la línea, se tiene el circuito nominal en T:

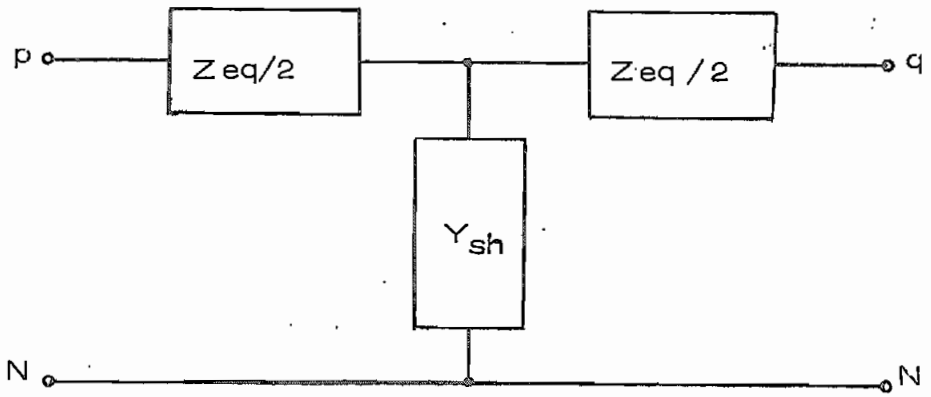


Fig. 2.20 Representación T de una línea de longitud media.

$$Z_{eq} = Z = (r + jx).\ L$$

$$Ysh = Y = y.L$$

$$50 \leq L \leq 160 \text{ Km.}$$

b) Asumiendo que toda la admitancia paralelo está dividida en dos partes iguales, colocadas en los extremos de la líneas, se tiene el circuito en π que es más utilizado que el anterior y cuya representación es la de la Fig. 2.21

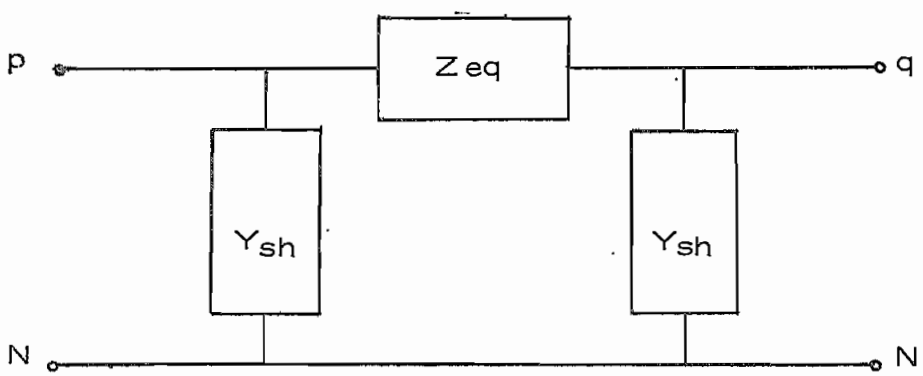


Fig. 2.21 Representación π de una línea de longitud media.

$$Zeq = Z = z.L$$

$$Ysh = \frac{Y}{2} = \frac{y.L}{2}$$

$$50 \leq L < 160 \text{ Km.}$$

Analizando las dos representaciones indicadas se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Los dos circuitos no son equivalentes entre sí como puede demostrarse por la aplicación de las ecuaciones de transformación Y-Δ a cada uno de ellos.
2. A medida que la línea es más corta o cuando se la divide en dos o más secciones y a cada una de éllas se la representa por sus circuitos nominales en T o en π , su equivalencia se acentúa.

2.4.3 LINEAS DE LONGITUD LARGA .-

Pertenecen a este grupo las líneas de transmisión cuya longitud es mayor que la correspondiente a las líneas medias.

La solución exacta y la única que proporciona gran precisión en el cálculo de líneas a 60 H_z de más de 160 Km. es aquella que considera que los parámetros están uniformemente - distribuídos a todo lo largo de ella. De todos modos, se puede encontrar el circuito equivalente de una lína larga y representarla con precisión, en lo que se refiere a los valores a sus extremos para estado estacionario, por medio de un circuito con los parámetros concentrados tal como se indica en la Fig. 2.22.

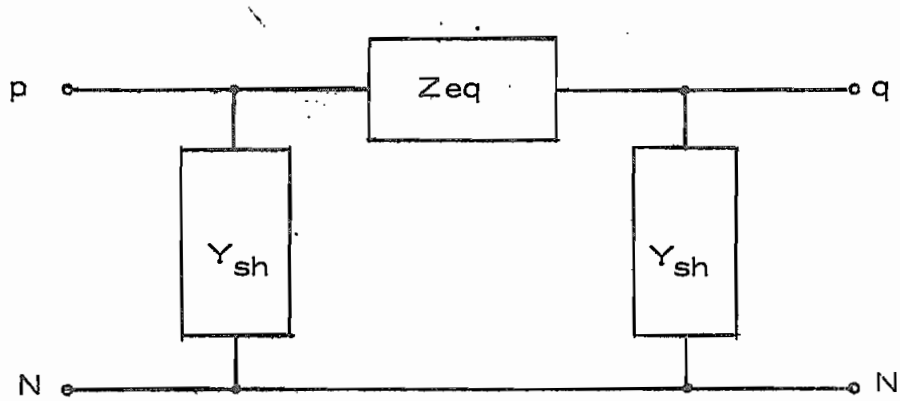


Fig. 2.22 Representación de una línea de longitud larga.

En donde:

$$L \geqslant 160 \text{ Km.}$$

$$Zeq = \sqrt{\frac{z}{y}} \; \text{senh}\left(\sqrt{z.y}\,.L\right)$$

$$Ysh = \sqrt{\frac{y}{z}} \; \text{tgh}\left(\sqrt{z.y}\,.\frac{L}{2}\right) \qquad (2.32)$$

En resumen, la representación de las líneas de transmisión es la que consta en la Fig. 2.23 con los valores que se indican en el Cuadro A.

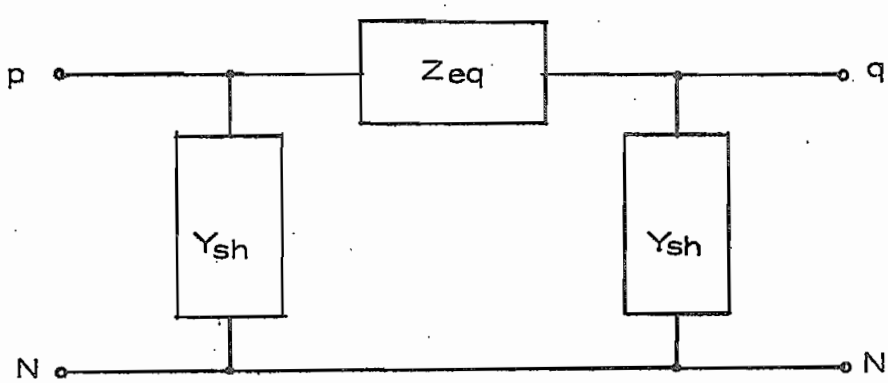


Fig. 2.23 Representación π general de las líneas de transmisión.

CUADRO A

PARAMETROS PARA LA REPRESENTACION DE LINEAS

tipo de línea / Inmitancia	Línea Corta $L < 50$ Km.	Línea Media $50 \leq L < 160$ Km.	Línea Larga $L \geq 160$ Km.
Zeq	$z.\ L$	$z.\ L$	$\sqrt{\frac{z}{y}}\ \text{Sen h}\left(\sqrt{z.y}\ .L\right)$
Ysh	0	$\frac{y.L}{2}$	$\sqrt{\frac{y}{z}}\ \text{tg h}\left(\frac{\sqrt{z.y}}{2}.\ L\right)$

En líneas de transmisión, el valor de la conductancia paralelo depende, en términos generales, de las pérdidas por corona, de la conductancia entre fases y del valor de la corriente de fuga en los aisladores; por su valor muy pequeño sus efectos son despreciables.

2.4.4 ACOPLAMIENTO MUTUO ENTRE LINEAS DE TRANSMISION.

El acoplamiento mutuo entre las líneas de transmisión no permite definir impedancias por fase debido a que la caída de tensión de cada conductor está influenciada por las corrientes en los otros. Sinembargo, para el caso particular de líneas en circuito paralelo, dispuestas con simetría respecto sus ejes horizontal y vertical y de conductores idénticos, es posible definir impedancias por fase como se demuestra a continuación:

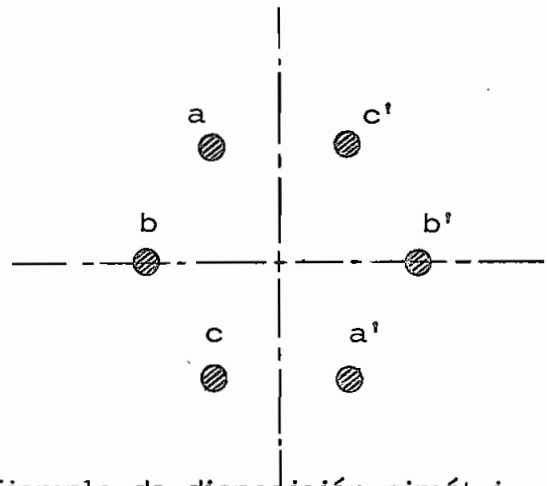


Fig. 2.24 Ejemplo de disposición simétrica de líneas paralelas.

1. En base a los conceptos de la distancia media geométrica (DMG_{eq}) y el radio medio geométrico (RMG_{eq}), y considerando los circuitos trifásicos de la Fig. 2.24, las impedancias equivalentes por fase para cada circuito en Ω/Km / fase son:

$$z_1 = r1 + j\ 0{,}1737 \left(f/60\right) \log_{10} \frac{(Dab.\ Dbc.\ Dca)^{1/3}}{RMG_1} \qquad (2.33)$$

$$z_2 = r2 + j\ 0{,}1737 \left(f/60\right) \log_{10} \frac{(Da'b'.\ Db'c'.\ Dc'a')^{1/3}}{RMG2} \qquad (2.34)$$

Por las condiciones establecidas:

$$z = z_1 = z_2 \qquad (2.35)$$

La impedancia equivalente de los dos circuitos, sin tomar en cuenta el acoplamiento mutuo es la siguiente:

$$zeq_1 = \frac{z}{2} = r/2 + j\left(0{,}1737/2\right)\left(f/60\right) A \qquad (2.36)$$

$$A = \log_{10} \frac{(Dab.Dbc.Dca)^{1/3}}{RMG_{cond.}}$$

2. Por otro lado, si se asume que los conductores de una fase son hilos de un mismo conductor compuesto, aplicando expresiones de DMG_{eq} y del RMG_{eq} se puede incluir el efecto de acoplamiento mutuo entre las dos líneas consideradas y se obtienen las siguientes relaciones de impedancias en Ω/Km / fase:

$$zeq = r/2 + j\ 0{,}1737\left(f/60\right) \log 10 \sqrt[3]{B}$$

$$B = \frac{DAB.\ DBC.\ DCA}{RMG_{eq}A\ .RMG_{eq}B.\ RMG_{eq}C} \qquad (2.37)$$

En donde:

- $DAB = (Dab.\ Dab'.\ Da'b.\ Da'b')^{1/4}$
- $DBC = (Dbc.\ Dbc'.\ Db'c.\ Db'c')^{1/4}$
- $DCA = (Dca.\ Dca'.\ Dc'a.\ Dc'a')^{1/4}$
- $RMG_{eqA} = (RMGa.\ RMGa'.\ Daa'.\ Da'a)^{1/4}$
- $RMG_{eqB} = (RMGb.\ RMGb'.\ Dbb'.\ Db'b)^{1/4}$
- $RMG_{eqC} = (RMGc.\ RMGc'.\ Dcc'.\ Dc'c)^{1/4}$

Por las condiciones del problema:

$Dab = Da'b'$ $\qquad$ $Daa' = Da'a$

$Dbc = Db'c'$ $\qquad$ $Dbb' = Db'b$

$Dca = Dc'a'$ $\qquad$ $Dcc' = Dc'c$

$RMGa = RMGa' = RMGb = RMGb' = RMGc = RMGc' = RMG\ cond.$

Reemplazando en la ecuación (2.37) :

$$zeq = \frac{r}{2} + j\ 0{,}1737\left(\frac{f}{60}\right) \log_{10}(C)$$

$$C = \frac{(Dab^2.\ Dbc^2.\ Dca^2)^{1/12}.\ N^{1/12}}{(RMG\ cond)^{1/2}\ .\ D^{1/12}} \qquad (2.38)$$

$$z_{eq} = \frac{r}{2} + j\ 0{,}1737\left(\frac{f}{60}\right) \cdot \frac{1}{2}\ \log_{10}\ \frac{(Dab \cdot Dbc \cdot Dca)^{1/3}}{RMG\ cond.} +$$

$$+\ j\ 0{,}1737\left(\frac{f}{60}\right) \cdot \mathrm{Log}_{10}\ \frac{N^{1/12}}{D^{1/12}} \qquad (2.39)$$

donde:

- $N = Dab' \cdot Da'b \cdot Dbc' \cdot Db'c \cdot Dca' \cdot Dc'a$
- $D = Daa'^2 \cdot Dbb'^2 \cdot Dcc'^2$

$$z_{eq} = \frac{r}{2} + j\left(0{,}1737/2\right)\left(f/60\right)\ \log_{10}\frac{(Dab \cdot Dbc \cdot Dca)^{1/3}}{RMG\ cond} +$$

$$+\ j\ 0{,}1737\left(\frac{f}{60}\right)\frac{1}{12}\ \log_{10}\ \frac{Dab' \cdot Da'b \cdot Dbc' \cdot Db'c \cdot Dca' \cdot Dc'a}{Daa'^2 \cdot Dbb'^2 \cdot Dcc'^2}$$

(2.40)

Comparando las ecuaciones (2.40) y (2.36), se deduce que el tercer término de la ecuación (2.40) es el que da la variación de la reactancia de la línea por el efecto de acoplamiento mutuo.

Utilizando la expresión (2.36), la (2.40) puede escribirse como:

$$z_{eq} = \frac{1}{2}\ (z + FACT)\quad \Omega/Km/fase \qquad (2.41)$$

Donde:

$$FACT = j0{,}02895\left(\frac{f}{60}\right)\log_{10} D$$

(2.42)

$$D = \frac{Dab' \cdot Da'b \cdot Dbc' \cdot Db'c \cdot Dca' \cdot Dc'a}{Daa'^2 \cdot Dbb'^2 \cdot Dcc'^2}$$

Incluyendo el efecto de acoplamiento mutuo, estas líneas pueden ser representadas con sus impedancias por fase como se indica en la Fig. 2.25 siguiente:

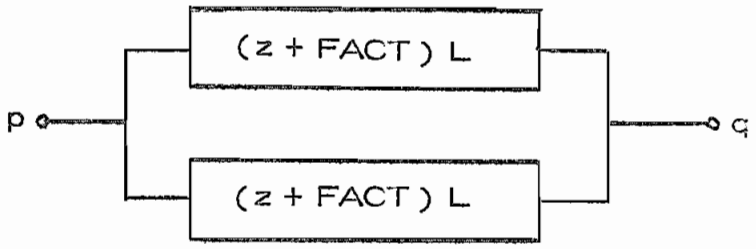


Fig. 2.25 Representación de acoplamiento mutuo entre líneas paralelas con disposición simétrica.

Para el caso general de dos líneas paralelas con conductores iguales con disposición asimétrica, el valor de FACT dado en la ecuación (2.42) puede ser tomado como un valor aproximado.

En general la impedancia mutua entre líneas acopladas magnéticamente, puede ser despreciada porque su valor está comprendido normalmente entre el ± 5% de la impedancia propia del circuito, e inclusive, a menudo se aproxima a cero.

Referencias: 2, 10, 13, 14, 16.

2.5 REPRESENTACION DE CARGAS .-

Las cargas en un sistema de potencia son tratadas como que están concentradas en un punto, por ejemplo en las barras de las principales subestaciones. Cuando se las tiene distribuídas a lo largo de una línea de transmisión se las puede repartir entre sus terminales en proporción inversa a las impedancias de la línea entre los terminales y el punto de la carga.

Para el estudio del flujo de cargas la forma característica de definir una carga es en base a sus potencias activa y reactiva. En este grupo se incluye a los motores, de los cuales interesa únicamente el consumo de energía a sus bornes.

En la Figura 2.26 se representa esquemáticamente a una carga, a la vez que se indica los valores que son necesarios de especificarse.

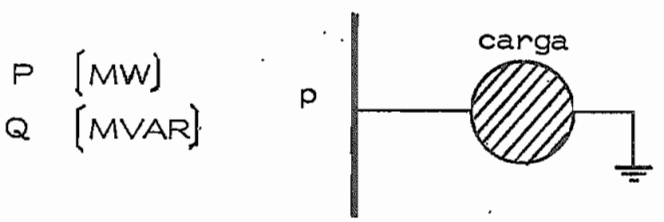


Fig. 2.26 Representación de cargas.

2.6 REPRESENTACION DE CONDENSADORES Y REACTORES.-

Tanto los condensadores como los reactores pueden ser representados como impedancias o admitancias, pero para estos estudios es conveniente que sean especificados como fuentes de potencias reactiva cuando se encuentran conectados en paralelo y como admitancias cuando están conectados en serie. A los condensadores sincrónicos se los trata cómo si fueran condensadores estáticos.

En la Figura 2.27 se ilustra la representación de estos elementos y se asocia las especificaciones que son necesarias.

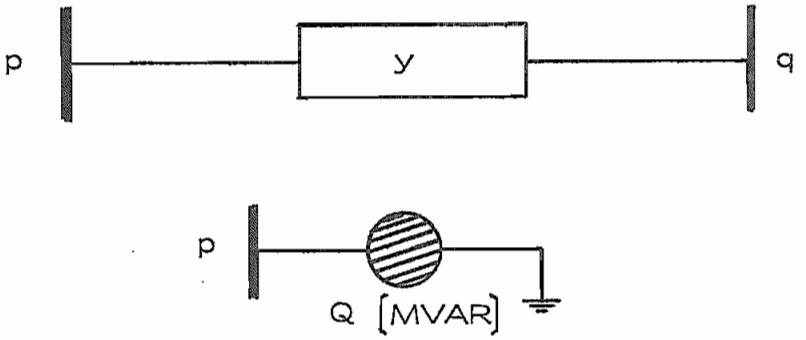


Fig. 2.27 Representación de reactores y condensadores.

CAPITULO III

MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGAS

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES.-

Desde el punto de vista matemático, el estudio de flujo de cargas involucra la solución simultánea de ecuaciones algébricas no lineales, las cuales pueden ser establecidas utilizando parámetros de barras (nodos) o de mallas.

La experiencia ha demostrado que las ecuaciones de barras proveen un método más conveniente de resolución de las ecuaciones en cuanto a facilidad de programación.

El presente trabajo utiliza parámetros de barra para el desarrollo del programa. Utilizando estos parámetros, la ecuación que describe el comportamiento de un sistema de potencia es la siguiente:

$$\overline{Eb} = Zb \cdot \overline{Ib} \qquad (3.1)$$

o utilizando admitancias en lugar de impedancias se tiene:

$$\overline{Ib} = Yb \cdot \overline{Eb} \qquad (3.2)$$

donde:

$\overline{Eb}$ = vector voltaje de barras

Zb = matriz impedancia de barra

Yb = matriz admitancia de barra

$\overline{Ib}$ = vector corrientes inyectadas a las barras.

Tanto las matrices impedancia como admitancia de barra pueden formarse incluyendo tierra, siendo ésta el nodo de referencia con respecto al cual se miden los voltajes de los demás nodos del sistema; en este caso, que es el utilizado en el presente estudio, los elementos de las matrices incluyen los efectos de los elementos en paralelo que existen en el sistema, tales como admitancias a tierra.

Si la barra de tierra no es incluída en la red, las componentes en paralelo son tratadas como fuentes de corriente hacia las barras a las cuales están conectadas y, los elementos de las matrices no incluyen los efectos de estas impedancias o admitancias; entonces, se selecciona uno de los nodos del sistema como nodo de referencia.

Referencias: 9, 10, 17

3.2 FORMACION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA.-

Para su desarrollo se empleará un sistema simple como el de la figura 3.1

Se utilizará la expresión "fuente de potencia" tanto para generadores como para cargas, que se las considera como fuentes negativas. Según esto se tiene tres fuentes de potencia en el sistema de la Fig. 3.1 (a), la una sería $S_{G1} - S_{c1}$; la otra S_{G2} y la tercera S_{c3}.

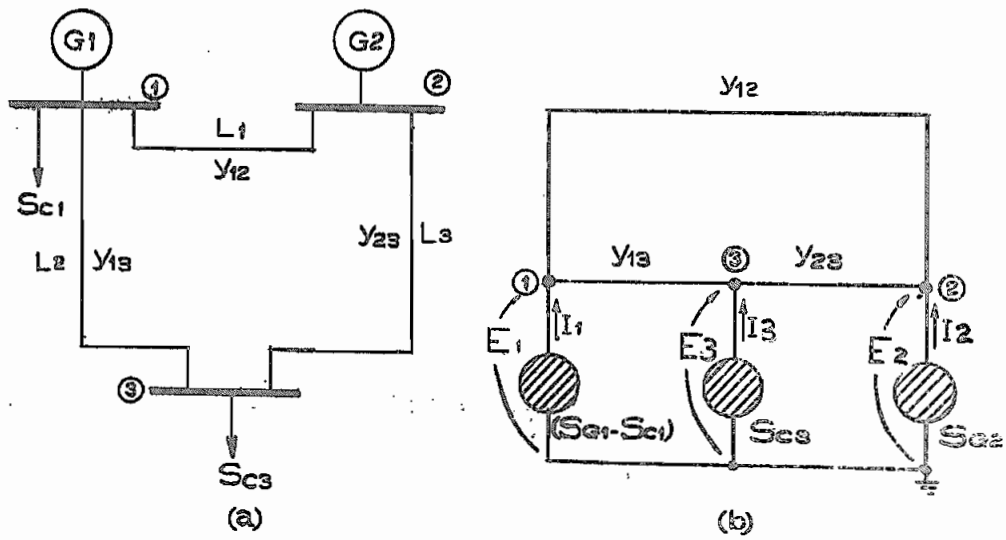


Fig. 3.1 Ejemplo de un sistema de potencia para la formación de la matriz Y_b.

Utilizando la figura 3.1. (b) se puede establecer ecuaciones para las corrientes I_1, I_2 e I_3 de la siguiente forma:

$$
\begin{aligned}
I_1 &= (E_1 - E_3)\, y_{13} + (E_1 - E_2)\, y_{12} \\
I_2 &= (E_2 - E_3)\, y_{23} + (E_2 - E_1)\, y_{12} \\
I_3 &= (E_3 - E_1)\, y_{13} + (E_3 - E_2)\, y_{23}
\end{aligned}
\qquad (3.3)
$$

También se puede decir que:

$$
\begin{aligned}
I_1 &= (y_{13} + y_{12})\, E_1 - y_{12}\, E_2 - y_{13}\, E_3 \\
I_2 &= -y_{12}\, E_1 + (y_{12} + y_{23})\, E_2 - y_{23}\, E_3 \\
I_3 &= -y_{13}\, E_1 - y_{23}\, E_2 + (y_{13} + y_{23})\, E_3
\end{aligned}
\qquad (3.4)
$$

Llamando a:

$$
\begin{aligned}
y_{13} + y_{12} &= Y_{11} \\
y_{12} + y_{23} &= Y_{22} \\
y_{13} + y_{23} &= Y_{33} \\
-y_{12} &= Y_{12} = Y_{21} \\
-y_{13} &= Y_{13} = Y_{31} \\
-y_{23} &= Y_{23} = Y_{32}
\end{aligned}
\qquad (3.5)
$$

Las expresiones de (3.4) se pueden escribir en forma de matrices.

$$
\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \qquad (3.6)
$$

$$
\overline{Ib} = Yb \; \overline{Eb}
$$

Del proceso desarrollado con el fin de hallar Yb para el sistema del ejemplo, se puede ver que para encontrar los elementos que están en la diagonal principal (admitancias propias), basta sumar las admitancias de los elementos conectados a una barra, y los elementos fuera de la diagonal (admitancias mutuas), son los negativos de las admitancias de los elementos conectados entre dos barras.

Para un sistema de n barras se tendrá:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots\cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots\cdots & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots\cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix} \qquad (3.7)$$

Donde:

$$Y_{ii} = \sum_{k=1}^{n} y_{ik}$$

$$Y_{ij} = -y_{ij}$$

La matriz admitancia de barra Y_b contiene muchos elementos fuera de la diagonal principal iguales a cero, de esta manera, se tiene la posibilidad de ahorrar memoria en el computador, almacenando sólo los elementos diferentes de cero. (La descripción del procedimiento para efectuar este tipo de almacenamiento se realiza en el Capítulo IV).

Referencias: 3, 9, 10, 17

3.3 ECUACIONES GENERALES .-

Suponiendo dos barras p y q cualquiera de un sistema de potencia, unidas por una línea de transmisión representada por su circuito π equivalente:

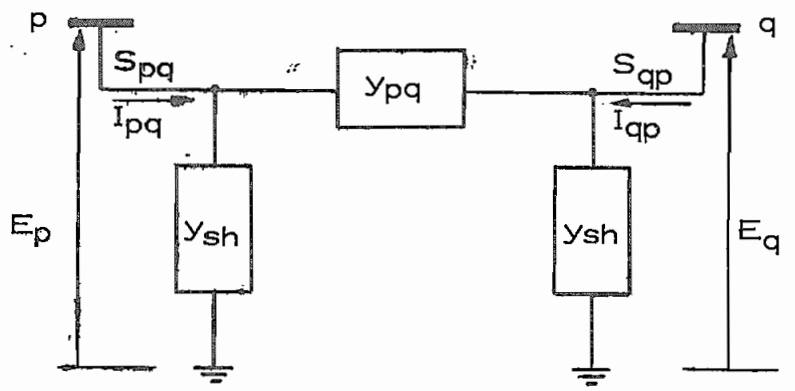


Fig. 3.2 Flujo de cargas a través de un elemento.

A partir de la Figura 3.2 se obtiene:

$$I_{pq} = (E_p - E_q)\, y_{pq} + E_p\, y_{sh} \qquad (3.8)$$

Por otra parte :

$$S_{pq} = P_{pq} + j\, Q_{pq} = E_p\, I_{pq}^* \qquad (3.9)$$

Reemplazando I_{pq}^* a partir de (3.8)

$$S_{pq} = E_p \left[(E_p^* - E_q^*)\, y_{pq}^* + E_p^* y_{sh}^* \right] \qquad (3.10)$$

$$S_{pq} = (E_p E_p^* - E_q^* E_p)\, y_{pq}^* + E_p E_p^* y_{sh}^* \qquad (3.11)$$

La expresión (3.11) da la potencia que fluye desde p hasta q.

De manera similar se puede establecer una expresión para la potencia que fluye de q a p.

$$S_{qp} = (E_q E_q^* - E_q E_p^*)\, y_{pq}^* + E_q E_q^*\, y_{sh}^* \tag{3.12}$$

Las ecuaciones (3.11) y (3.12) indican que, para calcular el flujo de potencia en las líneas se necesita conocer previamente las tensiones de barras.

La corriente inyectada a una barra está dada por:

$$I_p = \frac{S_p^*}{E_p^*} \tag{3.13}$$

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} \tag{3.14}$$

A partir de (3.4) o despejando de (3.7), para una barra p cualquiera, se obtiene:

$$I_p = E_p Y_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^{n} Y_{pq} E_q \tag{3.15}$$

Despejando E_p:

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(I_p - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q \\ p \neq s}}^{n} Y_{pq} E_q\right) \tag{3.16}$$

s = barra oscilante

Reemplazando el valor de I_p a partir de (3.14):

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}}\left(\frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ p\neq q}}^{n} Y_{pq}E_q\right) \qquad (3.17)$$

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

La expresión (3.17) es la que se utilizará para encontrar los voltajes de barras. Por las características del computador disponible, es necesario separar la tensión de cada barra en su parte real y parte imaginaria, el proceso para efectuar esta separación se indica más adelante.

Referencias: 3, 9.

3.4 BARRAS: OSCILANTE, DE VOLTAJE CONTROLADO Y DE CARGA .-

Se observa en (3.17) que en el problema de flujo de cargas se tienen las siguientes variables:

S_p = potencia neta de la barra p, o sea :

$$S_p = S_{Gp} - S_{cp}$$

siendo: S_{Gp} la potencia de generación en esa barra y S_{cp} la potencia requerida por la carga a ella conectada.

E_p y E_q = tensiones de barra

$$E_p = |E_p|\angle\delta_p ; \; E_q = |E_q|\angle\delta_q \qquad (3.18)$$

A las variables mencionadas se las puede clasificar de la siguiente forma:

- S_{cp} variable no controlada ya que depende del consumo.
- S_{Gp} variable de control.

$$S_{Gp} = P_{Gp} + jQ_{Gp}$$

P_{Gp} afecta los valores de δp

Q_{Gp} afecta los valores de $|E_p|$

- $|E|$ y δ como incógnitas

Partiendo del conocimiento de las cargas se puede estimar S_{Gp}, a pesar de que no se puedan establecer todas las variables de control por no tenerse conocimiento de las pérdidas del sistema. Por esto, se puede establecer el valor de S_G para algunas barras; por otra parte se puede elegir un $\delta = 0$ como referencia y, para controlar el voltaje en varios puntos del sistema se puede especificar $|E|$ para esas barras. Esto es lo que ha hecho necesario el definir tres tipos de barras en un sistema de potencia; para cada tipo de barra se especifican dos de las magnitudes asociadas con cada una de ellas (P, Q, $|E|$, δ).

Las barras se han dividido en:

1. BARRA OSCILANTE.-

Se especifica la magnitud del voltaje y ángulo de fase. Esta barra es la que suple la potencia de las cargas que no ha sido suministrada desde otras barras del sistema, además de las pérdidas en la transmisión, que no son conocidas hasta que se encuentra la solución.

2. BARRA DE VOLTAJE CONTROLADO.-

Se especifica la potencia real y la magnitud del voltaje, además de un rango de variación en potencia reactiva. La presencia de estas barras permite regular la tensión en varios puntos del sistema. En estas barras de voltaje controlado debe existir una fuente regulable de potencia reactiva.

3. BARRA DE CARGA.-

Se especifica la potencia real y la potencia reactiva. Es el tipo más común de barra.

La Figura 3.3 muestra esquemáticamente un sistema de potencia con los tres tipos de barras.

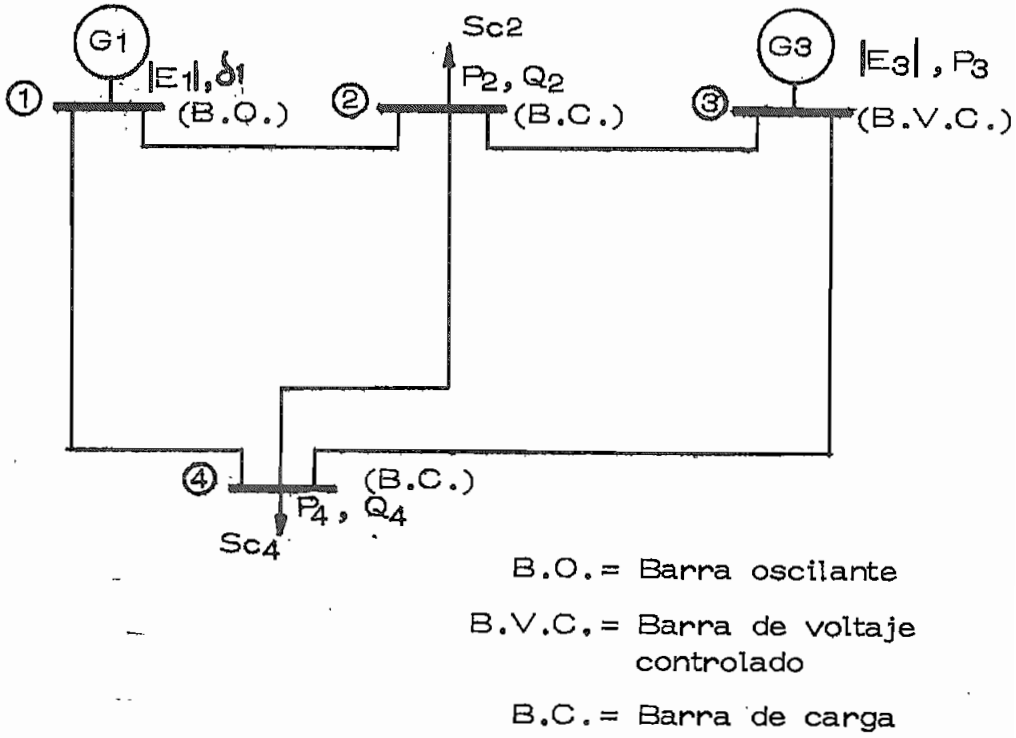


Fig. 3.3 Tipos de barras en un sistema de potencia.
Referencias: 3, 9, 10, 17.

3.5 CALCULO DE VOLTAJES DE BARRA UTILIZANDO EL METODO DE GAUSS-SEIDEL.-

Se había mencionado que el estudio de flujo de cargas trae consigo la resolución de ecuaciones algébricas no lineales (3.17) que representan a un modelo estático. Para resolverlas se utilizan técnicas iterativas, y, para este trabajo, se ha seleccionado el método de Gauss-Seïdel.

3.5.1 SISTEMA SIN BARRA DE VOLTAJE CONTROLADO.-

Para el cálculo de este método iterativo se efectúan los siguientes pasos:

1. Se asume valores de tensión para todas las barras, excepto para la oscilante.

2. Un nuevo grupo de voltajes se obtiene al reemplazar los valores asumidos en la expresión (3.17). Para el método de Gauss-Seidel, durante el proceso iterativo, en la iteración k+1, E_p^{k+1} reemplaza inmediatamente a E_p^{k} y se lo utiliza para la solución de los voltajes de las demás barras, de esta manera se consigue una convergencia más rápida hacia la solución.

3. Luego de cada iteración los voltajes son "acelerados" para lograr en menos iteraciones una convergencia hacia la solución; este procedimiento se lo realiza mediante factores de aceleración. Para cada sistema hay un factor de aceleración ideal que estará dentro de determinado rango fuera del cual no se converge nunca.

En la iteración k se tendrá que:

$$E_p^{k}Acel = E_p^{k} + \alpha(E_p^{k} - E_p^{k-1}) \qquad (3.19)$$

Siendo α el factor de aceleración.

$E_p^{k}Acel$ reemplaza inmediatamente al valor de E_p^{k} calculado con anterioridad y se lo utiliza para la siguiente iteración.

4. El procedimiento se repite hasta que la diferencia de voltaje entre una iteración y la anterior sea menor o igual a un valor tolerancia especificado:

$$\left| E_p^{k+1} - E_p^{k} \right| \leq \epsilon$$

Todo el proceso detallado debe hacerse para la parte real y para la parte imaginaria de los voltajes de barras porque el computador disponible no trabaja con números complejos; por esta razón, se pueden tener dos factores de aceleración, uno para la parte real y otro para la parte imaginaria, y asimismo, dos criterios de convergencia.

Los pasos seguidos para separar la expresión (3.17) en parte real y parte imaginaria son los siguientes:

$$E_p = e_p + jf_p$$

$$Sp = P_p + jQ_p$$

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

$$E_q = e_q + jfq$$

$$D = e_p^2 + fp^2$$

$$CR_p = \frac{P_p\ e_p + Q_p\ f_p}{D}$$

$$CI_p = \frac{P_p\ f_p - Q_p\ e_p}{D}$$

$$SUMR_p = \sum_{\substack{q=1 \\ q\neq p}}^{n} (G_{pq}\ e_q - B_{pq}\ f_q)$$

$$SUMI_p = \sum_{\substack{q=1 \\ q\neq p}}^{n} (B_{pq}\ e_q + G_{pq}\ f_q)$$

$$D1 = G_{pp}^2 + B_{pp}^2$$

$$ep = \frac{(CR_p - SUMR_p)\ G_{pp} + (CI_p - SUMI_p)\ B_{pp}}{D1}$$

$$f_p = \frac{(CI_p - SUMI_p)\ G_{pp} + (SUMR_p - CR_p)\ B_{pp}}{D1}$$

Siendo:

e_p = parte real del voltaje E_p

f_p = parte imaginaria del voltaje E_p

Los pasos descritos para la solución de voltajes de barras son válidos para el caso de que no existan barras de voltaje controlado.

3.5.2 SISTEMA CON BARRA DE VOLTAJE CONTROLADO .-

Dentro del proceso iterativo, descrito en la sección 3.5.1 cuando se encuentra una barra de voltaje controlado, deben hacerse ciertos cálculos y ajustes - con el fin de mantener en esa barra el voltaje especificado.

Partiendo de la expresión (3.13) :

$$S_p^* = E_p^* \, I_p$$

$$S_p = E_p \, I_p^* \qquad (3.20)$$

$$I_p = \sum_{q=1}^{n} Y_{pq} \, E_q \qquad (3.21)$$

$$P_p - jQ_p = E_p^* \sum_{q=1}^{n} Y_{pq} \, E_q \qquad (3.22)$$

Además:

$$E_p = e_p + jf_p \qquad (3.23)$$

$$Y_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} \qquad (3.24)$$

$$E_q = e_q + jf_q \qquad (3.25)$$

Reemplazando las expresiones (3.23), (3.24) y (3.25) en la (3.22) se obtiene:

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^{n} (G_{pq} + jB_{pq}) (e_q + jf_q) \qquad (3.26)$$

Desarrollando:

$$P_p - jQ_p = \sum_{q=1}^{n} \left\{ \left[e_p (G_{pq}\ e_q - B_{pq}\ f_q) + (G_{pq}\ f_q + B_{pq}\ e_q) f_p \right] + \right.$$

$$\left. + j \left[e_p (G_{pq}\ f_q + B_{pq}\ e_p) - f_p (G_{pq}\ e_q - B_{pq}\ f_q) \right] \right\} \qquad (3.27)$$

Separando la parte imaginaria:

$$Q_p = \sum_{q=1}^{n} \left[f_p (G_{pq}\ e_q - B_{pq}\ f_q) - e_p (G_{pq}\ f_q + B_{pq}\ e_q) \right] \qquad (3.28)$$

Sacando del sumatorio los términos correspondientes a la barra p se tiene:

$$Q_p = - B_{pp} (e_p^2 + f_p^2) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{n} \left[f_p (G_{pq}\ e_q - B_{pq}\ f_q) + \right.$$

$$\left. - e_p (G_{pq}\ f_q + B_{pq}\ e_q) \right] \qquad (3.29)$$

Esta es la expresión con la que se calculará la potencia reactiva necesaria para mantener el voltaje especificado en esa barra.

Durante todo el proceso iterativo siempre se debe tratar de que se mantenga la relación:

$$\sqrt{e_p^2 + f_p^2} = \left| E_p \right| \text{(espec.)} \qquad (3.30)$$

Suponiendo que en la iteración k, e_p^k y f_p^k deban ser ajustados para que cumplan la relación (3.30), el ángulo de fase en esta iteración será:

$$\delta_p^k = \text{arc tg} \frac{f_p^k}{e_p^k} \qquad (3.31)$$

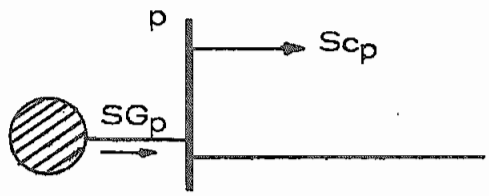
Asumiendo que los ángulos de los voltajes especificado y calculado en esa iteración son iguales, entonces, los voltajes e_p^k y f_p^k pueden ser recalculados de tal forma que:

$$e_{p\,(nuevo)}^k = |E_p|_{(espec.)} \cos \delta_p^k \qquad (3.32)$$

$$f_{p(nuevo)}^k = |E_p|_{(espec.)} \operatorname{sen} \delta_p^k \qquad (3.33)$$

Reemplazando estos nuevos valores de e_p^k y f_p^k en la expresión (3.29) se calcula Q_p^k ; este valor junto con $e_{p\,(nuevo)}^k$ y $f_{p(nuevo)}^k$ se lo utiliza para calcular E_p^{k+1}. Luego 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 cargas 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:



$$Q_p = (Q_{Gp} - Q_{cp}) \qquad (3.34)$$

Pero

$$Q_{p\,(min)} \leq Q_p \leq Q_{p\,(max)} \qquad (3.35)$$

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:

$$Q_{p\,(max)} = Q_{Gp\,(max)} - Q_{cp} \qquad (3.36)$$

$$Q_{p\,(min)} = Q_{Gp\,(min)} - Q_{cp} \qquad (3.37)$$

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

Referencias: 3, 9, 17.

3.6 CALCULO DEL FLUJO DE CARGAS.-

Luego de que el proceso iterativo ha concluído y se ha encontrado la solución para los voltajes de barras, el flujo de cargas por cada línea puede ser calculado, y además, la potencia de la barra oscilante.

A partir de la Fig. 3.3 y de las expresiones (3.11) y (3.12) se tiene:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* \; (E_p - E_q) \; y_{pq} + E_p^* \; E_p \; y_{sh} \qquad (3.38)$$

que es la expresión para la potencia que fluje desde la barra p hacia la q, a través de la admitancia y_{pq}.

De manera similar:

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* \; (E_q - E_p) \; y_{pq} + E_q^* \; E_q \; y_{sh} \qquad (3.39)$$

que da la potencia que fluye desde q hasta p.

Las pérdidas en la línea que une las barras p y q vendrá dada por la suma algébrica de (3.38) y (3.39). Para la programación se han separado las expresiones mencionadas en sus partes reales e imaginarias.

Para la potencia que va de p a q se tiene:

$$A = e_p - e_q$$

$$T = f_p - f_q$$

$$C = e_p^2 + f_p^2$$

$$D = A\, e_p + T\, f_p$$

$$F = T e_p - A f_p$$

$$U = D G_{pq} - F B_{pq} + C\, G_{sh}$$

$$H = D\, B_{pq} + F\, G_{pq} + C\, B_{sh}$$

Donde:

G_{pq} = parte real de y_{pq}

B_{pq} = parte imaginaria de y_{pq}

G_{sh} = parte real de y_{sh}

B_{sh} = parte imaginaria de y_{sh}

Entonces:

$$P_{pq} = U \tag{3.40}$$

$$Q_{pq} = -H \tag{3.41}$$

En forma similar, para la potencia que fluye de q a p se tiene:

$$A_1 = -A$$

$$B_1 = -T$$

$$C_1 = e_q^2 + f_q^2$$

$$D_1 = A_1\ e_q + B_1\ f_q$$

$$F_1 = B_1\ e_q - A_1\ f_q$$

$$G_1 = D_1\ G_{pq} - F_1\ B_{pq} + C_1\ G_{sh}$$

$$H_1 = D_1\ B_{pq} + F_1\ G_{pq} + C_1\ B_{sh}$$

$$P_{qp} = G_1 \tag{3.42}$$

$$Q_{qp} = -H_1 \tag{3.43}$$

La potencia perdida en las líneas será:

$$P_{pérd.} = P_{pq} + P_{qp}$$

$$Q_{pérd.} = Q_{pq} + Q_{qp}$$

La potencia que debe dar la barra oscilante se calcula como la suma de las potencias que fluyen por las líneas conectadas a esa barra más la potencia de la carga que podría estar a ella conectada.

$$P_{G1} = P_{c1} + \sum_{q=2}^{n} P_{1q} \tag{3.44}$$

$$Q_{G1} = Q_{c1} + \sum_{q=2}^{n} Q_{1q}$$

Referencias: 3, 9.

CAPITULO IV

PROGRAMA DE FLUJO DE CARGAS.-

4.1 INTRODUCCION .-

En este Capítulo se va a dar una descripción de cómo está conformado el programa para el cálculo de flujo de cargas. Este programa escrito en lenguaje FORTRAN IV, trata de ser lo más generalizado, de ahí que reune en sí algunas alternativas; consta de un programa principal y de varias subrutinas en donde se realizan los cálculos fundamentales.

4.2 PROGRAMA PRINCIPAL.-

El programa principal involucra:

a) Lectura de datos

b) Llamada a las subrutinas

c) Cálculo de algunos coeficientes

d) Escritura de resultados

El programa principal permite estudiar sistemas de potencia que tienen los datos de sus elementos en valores que pueden o no estar en las bases del sistema. En el primer caso se les denominará como datos en "valores reales" y en el segundo, como en "valores p.u.".

La potencia base se especifica en MVA, y las potencias activas y reactivas, dadas en MW y MVAR, se las transfor-

ma a valores en p.u. y se calcula la potencia neta en cada barra.

En la Fig. 4.4 se indica el diagrama de bloques del programa principal.

4.3 SUBRUTINAS .-

Las subrutinas que se han previsto para el desarrollo del presente estudio son las siguientes:

1. ZLIN : Subrutina para el cálculo de las admitancias - p.u. de las líneas.
2. TRANS: Subrutina para el cálculo de las admitancias p.u. de transformadores y reactores o condensadores en serie.
3. ORDEN: Subrutina para el ordenamiento de las admitancias p.u. de los elementos para la formación de Y_b.
4. MATRZ: Subrutina para formar Y_b.
5. VOLTS: Subrutina para el cálculo de la tensión en las barras de carga y para el cálculo de potencia reactiva y ángulos de voltaje en las barras de voltaje controlado.
6. FLOWL: Subrutina para el cálculo de flujo de cargas y pérdidas en los elementos del sistema, y la potencia en la barra oscilante.

7. VOLAN: Subrutina para el cálculo del módulo y ángulo de los voltajes en todas las barras del sistema.

A continuación se hace una descripción de cada una de ellas.

4.3.1 SUBRUTINA ZLIN .-

Es aquella que sirve para transformar los datos reales por unidad de longitud, de las impedancias de las líneas de transmisión, a valores totales en p.u. en las bases del sistema. Básicamente esto se hace de la siguiente manera:

a) En el programa principal se lee una tarjeta de datos por vez, es decir que se lee una tarjeta con los datos de una línea como son por ejemplo nodos a los que está conectada, longitud, resistencia y reactancia por unidad de longitud, voltaje base, etc.. Ninguna de estas variables, a excepción de los nodos a los que está conectada la línea, son subindicadas; esto se hace con el objeto de ahorrar memoria, ya que en el caso de que se hubieran leído los datos en bloque, cada variable tendría que ir subindicada y habría que declarar un arreglo para cada una de ellas.

b) Se llama a la subrutina ZLIN con el fin de cal-

cular los valores totales y transformarlos a admitancias en p.u. La secuencia de pasos está indicada en la Fig. 4.5.

Una vez hecho este proceso, se pasa a leer la siguiente tarjeta de datos y se repite el ciclo indicado anteriormente hasta que se hayan considerado todas las líneas.

4.3.2 SUBRUTINA TRANS .-

Esta subrutina sirve para calcular las admitancias de los transformadores y reactores o condensadores serie en p.u. en las bases del sistema, ya que es práctica común especificar la impedancia, de los elementos mencionados, en porcentaje referido a su potencia y voltaje nominales.

Haciendo referencia a los circuitos equivalentes de transformadores (figs. 2.12 y 2.14), de condensadores y reactores serie (Fig. 2.27) ; en esta subrutina se incluyen los siguientes casos:

a) Si el elemento considerado es un transformador de dos devanados, los valores de t_p o t_q dados en (2.3) y (2.6) , o ambos, son

diferentes de la unidad cuando el transformador está trabajando fuera de su relación nominal;

b) Si se trata de un condensador o reactor serie, los valores de t_p y t_q son iguales a uno; y,

c) Si es un transformador de tres devanados se asume que existen dos transformadores trabajando en su relación nominal conectados a un nodo común, y un tercer transformador, con terminales entre el nodo común y un nuevo nodo en el cual se considera que operan los taps cuando t_q es diferente de la unidad. Las impedancias que se utilizan son las dadas en (2.18).

Asimismo como en el caso de la subrutina ZLIN, se leen los datos de un elemento, se pasa a calcular los valores de las admitancias para luego leer la siguiente tarjeta de datos. Lo expuesto anteriormente se esquematiza en la Fig. 4.6.

La misión de estas dos subrutinas explicadas es obtener las admitancias del circuito equivalente de los elementos considerados.

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 cómo realizarlo está indicado en la Fig. 4.7 y consiste en comparaciones primero de los nodos p y luego de los nodos q.

4.3.4 SUBRUTINA MATRZ .-

Su función 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 únicamente 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:

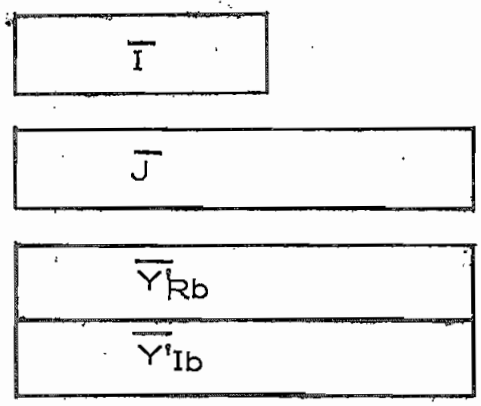


Fig. 4.1 Esquema del almacenamiento de la matriz Y_b en forma vectorial.

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.

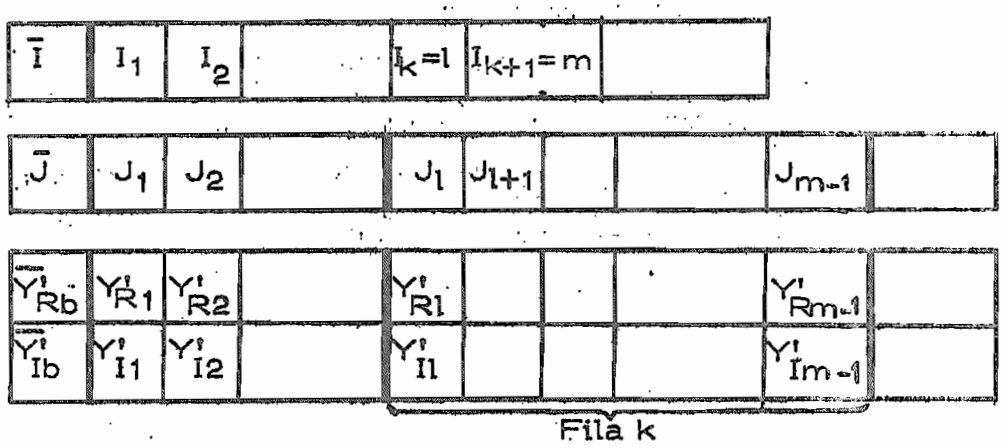


Fig. 4.2 Almacenamiento de los elementos de una fila k de la matriz Y_b.

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 $\overline{Y_b}'$ 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.

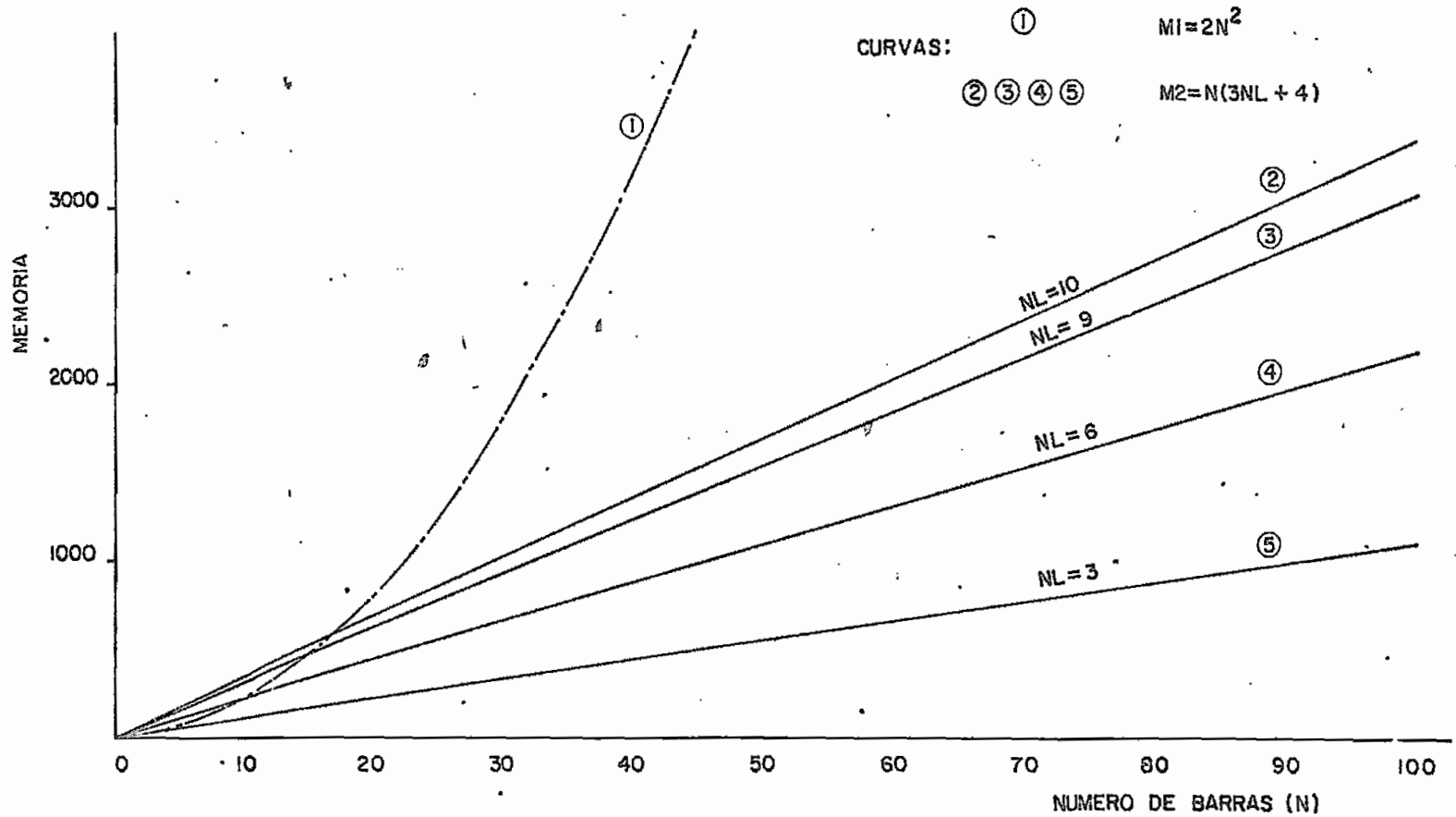


Fig. 4.3 REQUERIMIENTOS DE MEMORIA EN FUNCION DEL NUMERO DE BARRAS

Con el fin de que haya mejor comprensión del procedimiento utilizado para almacenar y recuperar los elementos de la matriz Yb, en el apéndice A se ha desarrollado un ejemplo explicativo.

4.3.5 SUBRUTINA VOLTS .-

Es la que se emplea para el cálculo de los voltajes en las barras, mediante el método iterativo de Gauss Seidel descrito en el capítulo III. La secuencia de operaciones de esta subrutina se esquematiza en la Fig. 4.9.

Por facilidad de programación se han numerado las barras de voltaje controlado consecutivamente de dos en adelante. La barra numerada como uno, siempre va a ser la oscilante.

4.3.6 SUBRUTINA FLOWL .-

Una vez conseguida la convergencia de los voltajes, se está en capacidad de obtener el flujo de cargas en las líneas, lo cual se ha desarrollado en esta subrutina, indicada en la Fig. 4.10.

Hay que anotar que dentro de FLOWL están contenidas dos partes adicionales: la primera que calcula las pérdidas en las líneas, y la segunda que calcula la potencia, tanto activa como reactiva, de generación en la barra oscilante.

Los flujos de potencia están dados por los siguientes signos:

positivo (+) salen de la barra y

negativo (-) llegan a la barra.

Los flujos de cargas que se obtienen son en cada una de las líneas y no entre barras como se podría suponer.

4.3.7 SUBRUTINA VOLAN .-

Es una subrutina que se la ha incluído con el objeto de obtener el módulo de los voltajes y su ángulo. Es un complemento a la subrutina VOLTS y se la muestra en la Fig. 4.11.

Referencias: 9, 17, 18, 19, 20, 21.

4.4 DATOS DE ENTRADA .-

4.4.1 DATOS GENERALES .-

- Nombre del sistema
- Número total de elementos NE
- Número de barras NB
- Número de líneas NL
- Número de transformadores y reactores o condensadores serie NT

- Número de barras de voltaje controlado NBVC
- Potencia base SBASE
- Factor de aceleración para la parte real del voltaje ALPHA
- Factor de aceleración para la parte imaginaria del voltaje. BETA
- Número total de iteraciones NTIT
- Criterio de convergencia EPS

Indicadores:

- Alternativa para el estudio de un sistema que está o no en p.u. NPU
- Alternativas para el cálculo de voltajes y flujos de cargas o sólo de voltajes I1
- Continuación para el estudio de un nuevo sistema IND

4.4.2 DATOS DE LOS ELEMENTOS EN VALORES REALES .-

a) Líneas

- Número asignado al elemento NDE
- Nodo p al que está conectado NP
- Nodo q al que está conectado NQ
- Longitud en kilómetros L
- Resistencia por unidad de longitud R
- Reactancia por unidad de longitud X

- Tensión base VKV
- Factor de acoplamiento mutuo en líneas de doble circuito por unidad de longitud FACT
- Suceptancia paralelo por unidad de longitud B

b) Transformadores y reactores o condensadores serie.

- Número asignado al elemento NDE
- Nodo p al que está conectado NP
- Nodo q al que está conectado NQ
- Indicador para un transformador de tres devanados NTTD
- Resistencia p.u. en sus propias bases ZR
- Reactancia p.u. en sus propias bases ZI
- Potencia base propia STR
- Voltaje base propio VKV
- Voltaje base del sistema VKVN
- Taps en el nodo p TP
- Taps en el nodo q TQ

4.4.3 DATOS DE LOS ELEMENTOS EN VALORES P.U..-

- Número asignado al elemento NDE
- Nodo p al que está conectado NP
- Nodo q al que está conectado NQ
- Resistencia p.u. ZR
- Reactancia p.u. ZI

- Parte real de la admitancia paralelo conectada a p — YR1
- Parte imaginaria de la admitancia paralelo conectada a p — YI1
- Parte real de la admitancia paralelo conectada a q — YR2
- Parte imaginaria de la admitancia paralelo conectada a q — YI2

4.4.4 DATOS DE BARRAS .-

a) Barra oscilante

- Parte real del voltaje en p.u. — ER1
- Parte imaginaria del voltaje en p.u. — EI1
- Potencia activa de la carga — PC1
- Potencia reactiva de la carga — QC1

b) Barra de voltaje controlado

- Módulo del voltaje en p.u. — EMOD
- Potencia activa de generación — PG
- Potencia reactiva máxima de generac. — QGMAX
- Potencia reactiva mínima de generac. — QGMIN
- Potencia activa de la carga — PC
- Potencia reactiva de la carga — QC

c) Barras de carga

- Potencia activa de generación — PG

- Potencia reactiva de generación QG
- Potencia activa de la carga PC
- Potencia reactiva de la carga QC

Nota: La forma y secuencia de entrada de los datos del sistema se encuentra en el apéndice B.

4.5 RESULTADOS DE SALIDA .-

La salida del programa comprende esencialmente los resultados de voltajes en las barras y los flujos de cargas en las líneas; además, se ha previsto la escritura de partes importantes de solución como son las admitancias equivalentes de los elementos y la matriz Y_b.

Se puede resumir la salida de resultados en los siguientes puntos:

a) Cuando los datos de los elementos del sistema están en valores reales;

1. Admitancias en p.u. de líneas, transformadores y reactores o condensadores serie.

2. Ordenamiento de los resultados del punto 1.

3. Matriz Y_b'

4. Tensión en la barra oscilante

5. Tensión en las barras de voltaje controlado y po

tencias netas en p.u.

6. Tensión en las barras de carga y potencias netas en p.u.

7. Flujo de potencia en las líneas

8. Potencia de generación en la barra oscilante

9. Voltaje en p.u. y ángulo de fase en grados, de todas las barras.

b) Cuando los datos de los elementos están en p.u. en las bases del sistema:

1. Escritura de datos

2. Admitancias equivalentes; y, los puntos desde 2 hasta 9 anteriores.

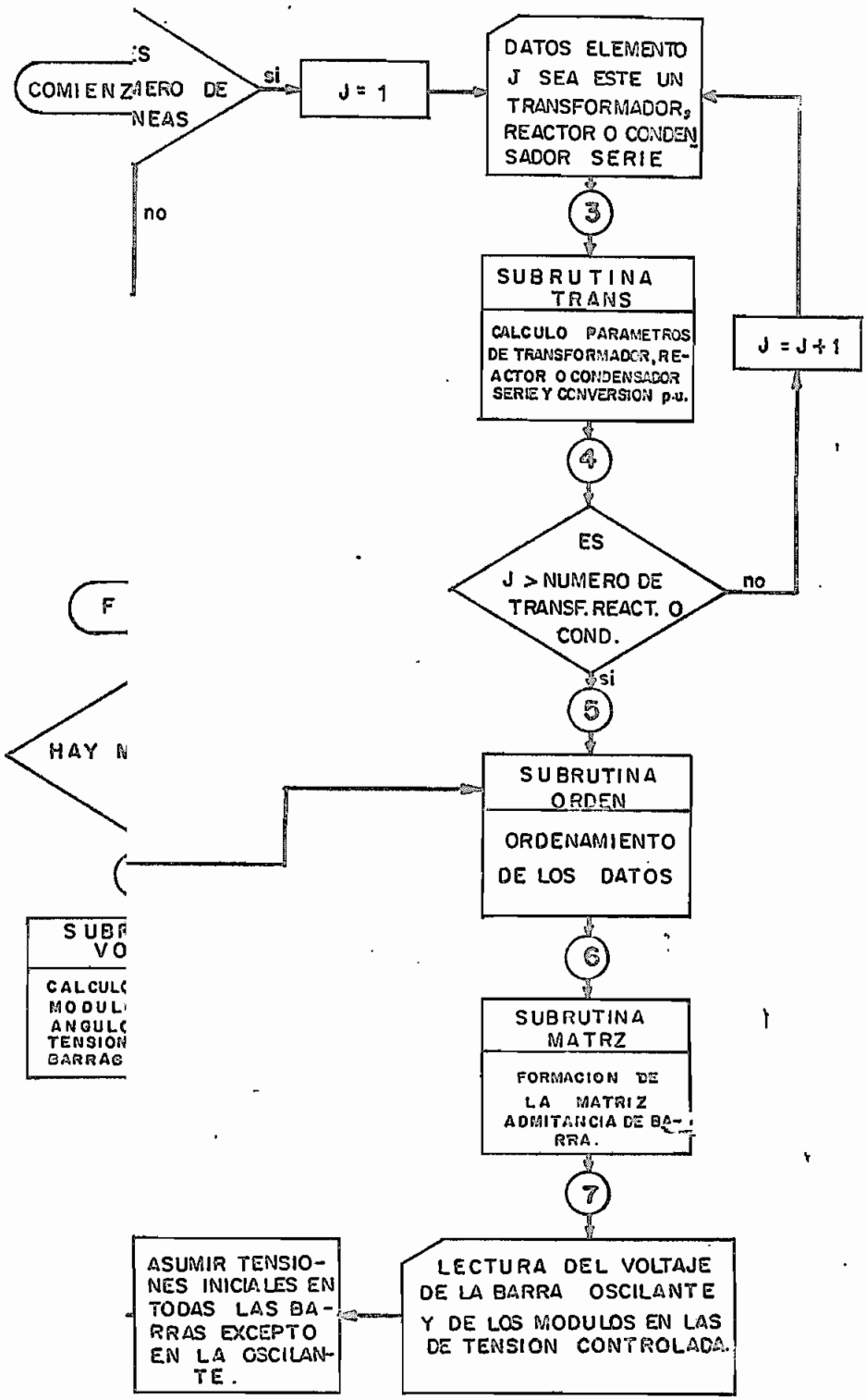
Cabe mencionar que también junto con el nombre del sistema, se indica si los datos de los elementos están como en los casos a ó b, así como en cuantas iteraciones se converge, o si no hay convergencia. No se tiene la escritura del record de convergencia de los voltajes.

4.6 DIAGRAMAS DE BLOQUES .-

Los diagramas de bloques mostrados desde la Fig. 4.4.

hasta la Fig. 4.11, son la base para el desarrollo del programa, y no se indican detalladamente todos los pasos seguidos.

El listado del programa que se ha desarrollado en el presente estudio consta en el apéndice C.


:S
COMIENZ
ERO DE
NEAS
si
no
J = 1
DATOS ELEMENTO J SEA ESTE UN TRANSFORMADOR, REACTOR O CONDENSADOR SERIE
3
SUBRUTINA TRANS
CALCULO PARAMETROS DE TRANSFORMADOR, REACTOR O CONDENSADOR SERIE Y CONVERSION p.u.
J = J + 1
4
ES J > NUMERO DE TRANSF. REACT. O COND.
no
si
F
HAY N
5
SUBRUTINA ORDEN
ORDENAMIENTO DE LOS DATOS
SUBR
VO
CALCULO
MODUL
ANGULO
TENSION
BARRAS
6
SUBRUTINA MATRZ
FORMACION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA.
7
ASUMIR TENSIONES INICIALES EN TODAS LAS BARRAS EXCEPTO EN LA OSCILANTE.
LECTURA DEL VOLTAJE DE LA BARRA OSCILANTE Y DE LOS MODULOS EN LAS DE TENSION CONTROLADA.

SUBRUTINA ZLIN

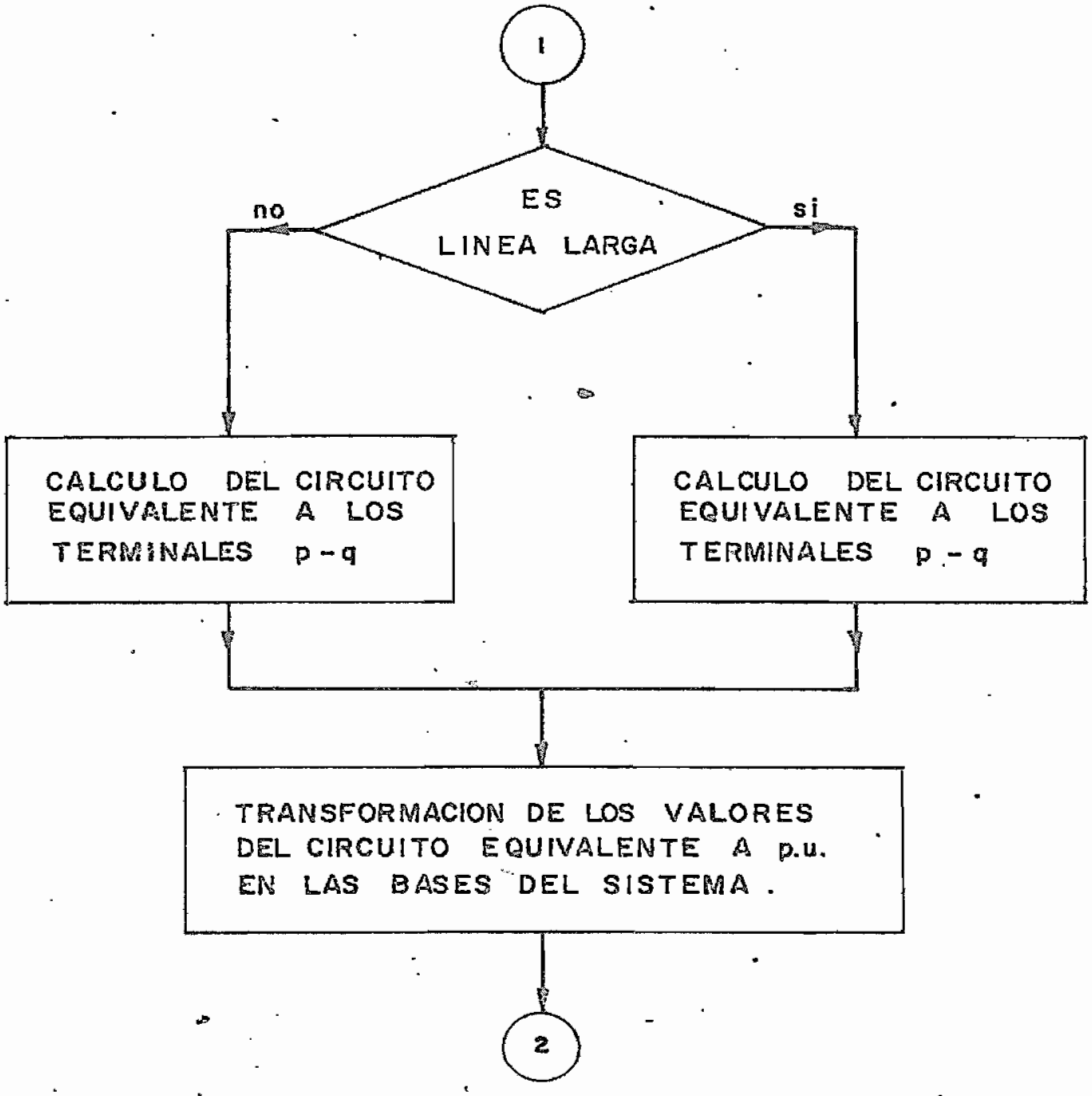


Fig. 4.5

SUBRUTINA TRANS.

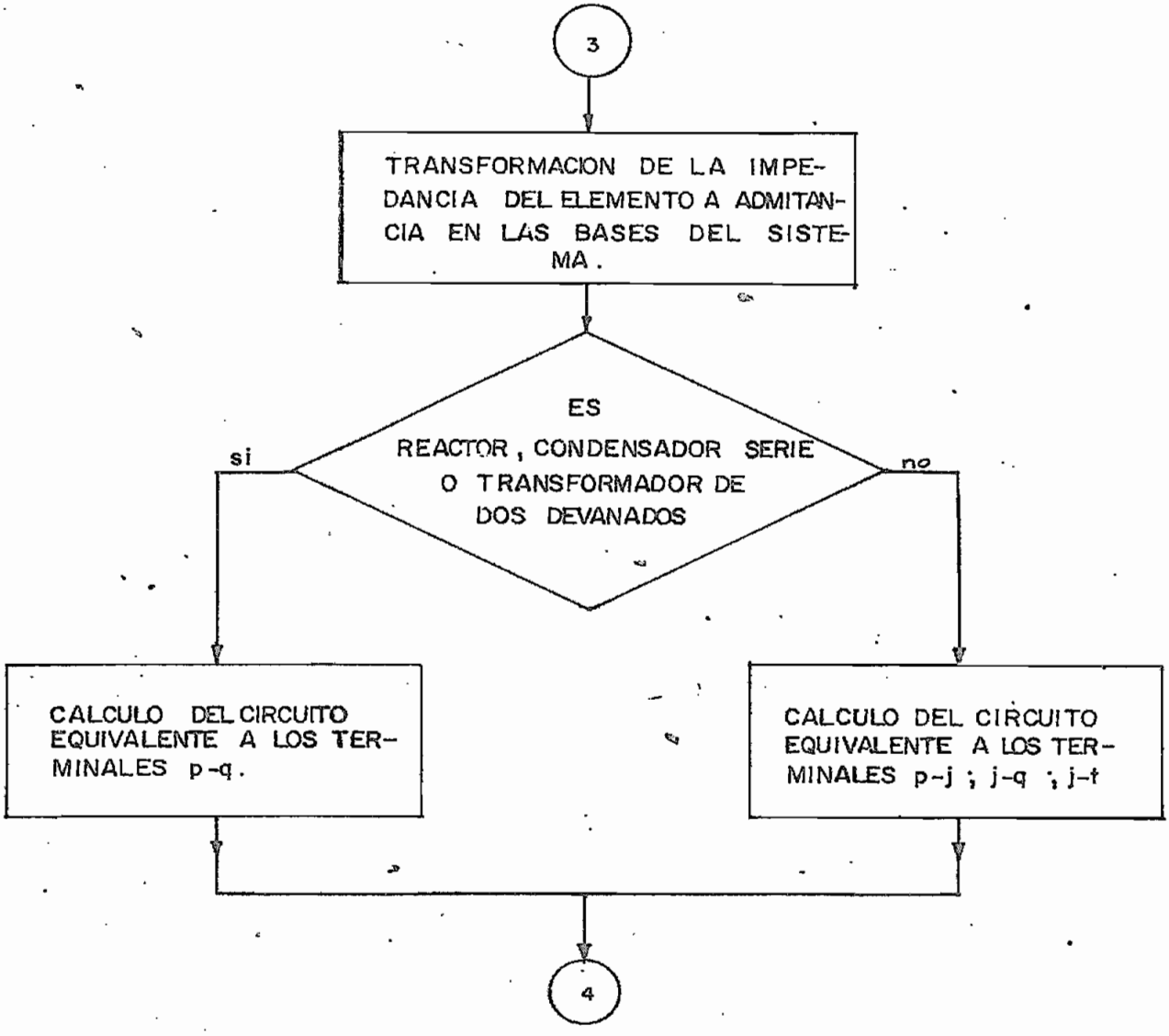


Fig. 4.6

SUBRUTINA ORDEN

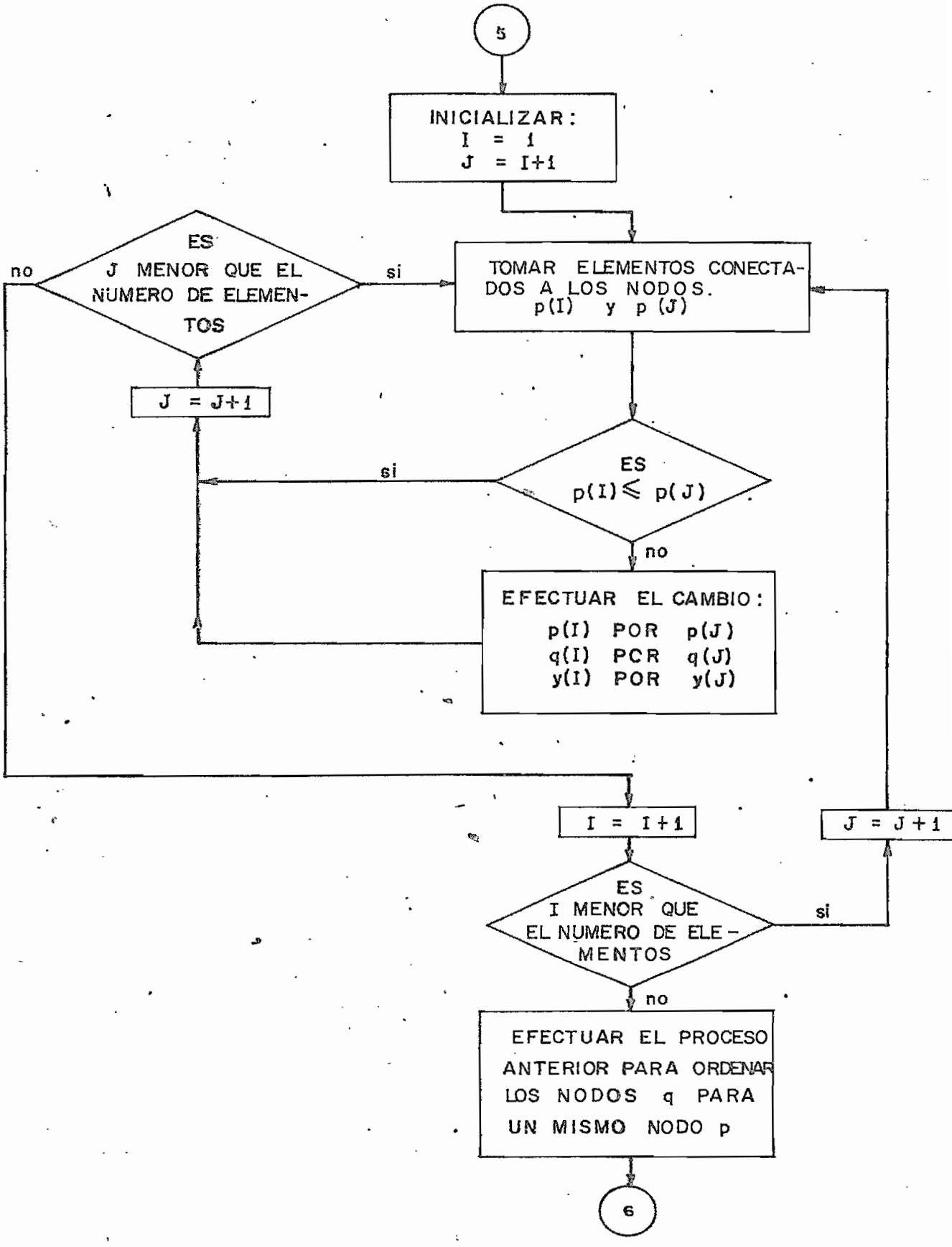


Fig. 4.7

SUBRUTINA MATRZ

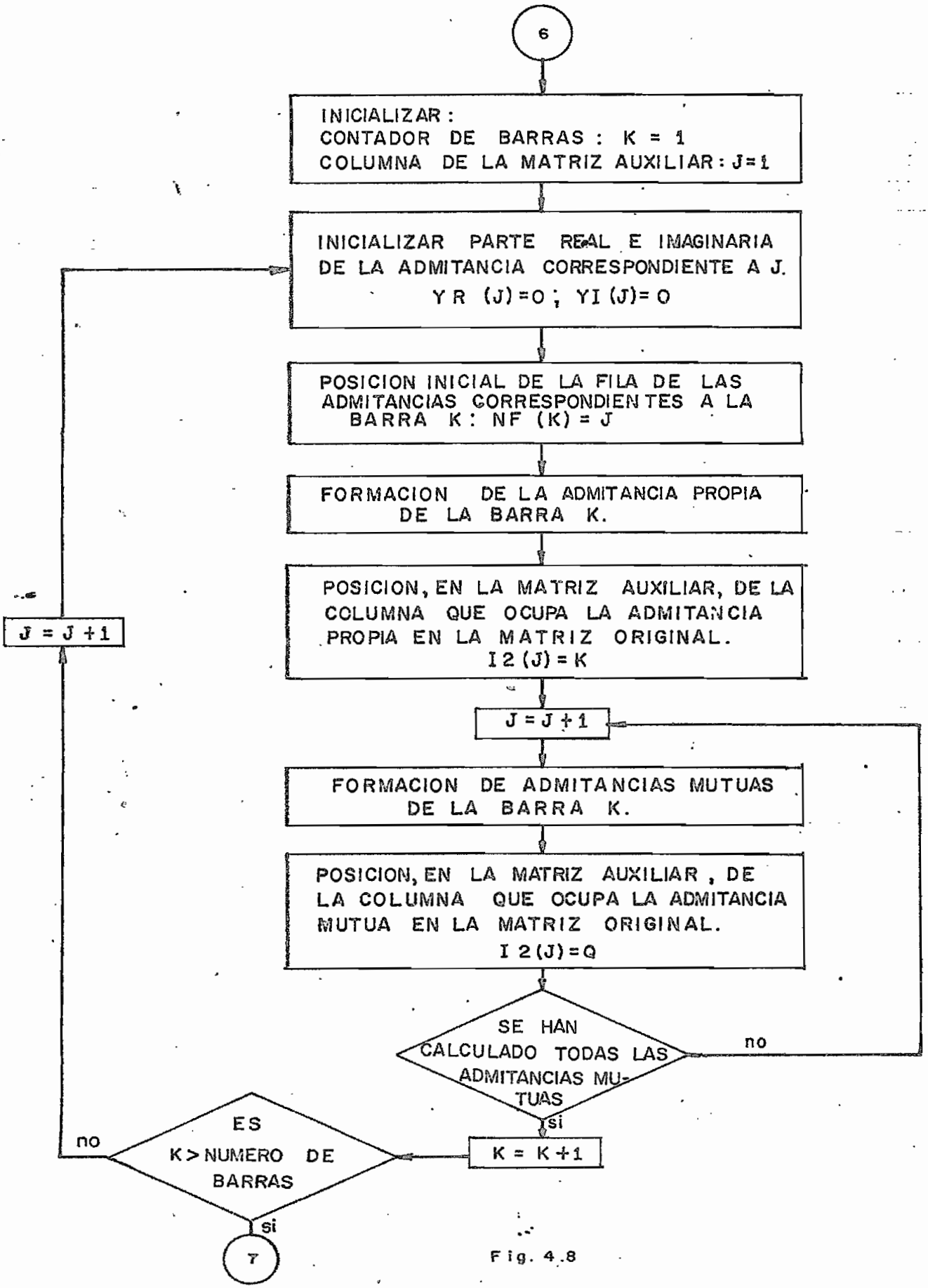


Fig. 4.8

SUBRUTINA VOLTS

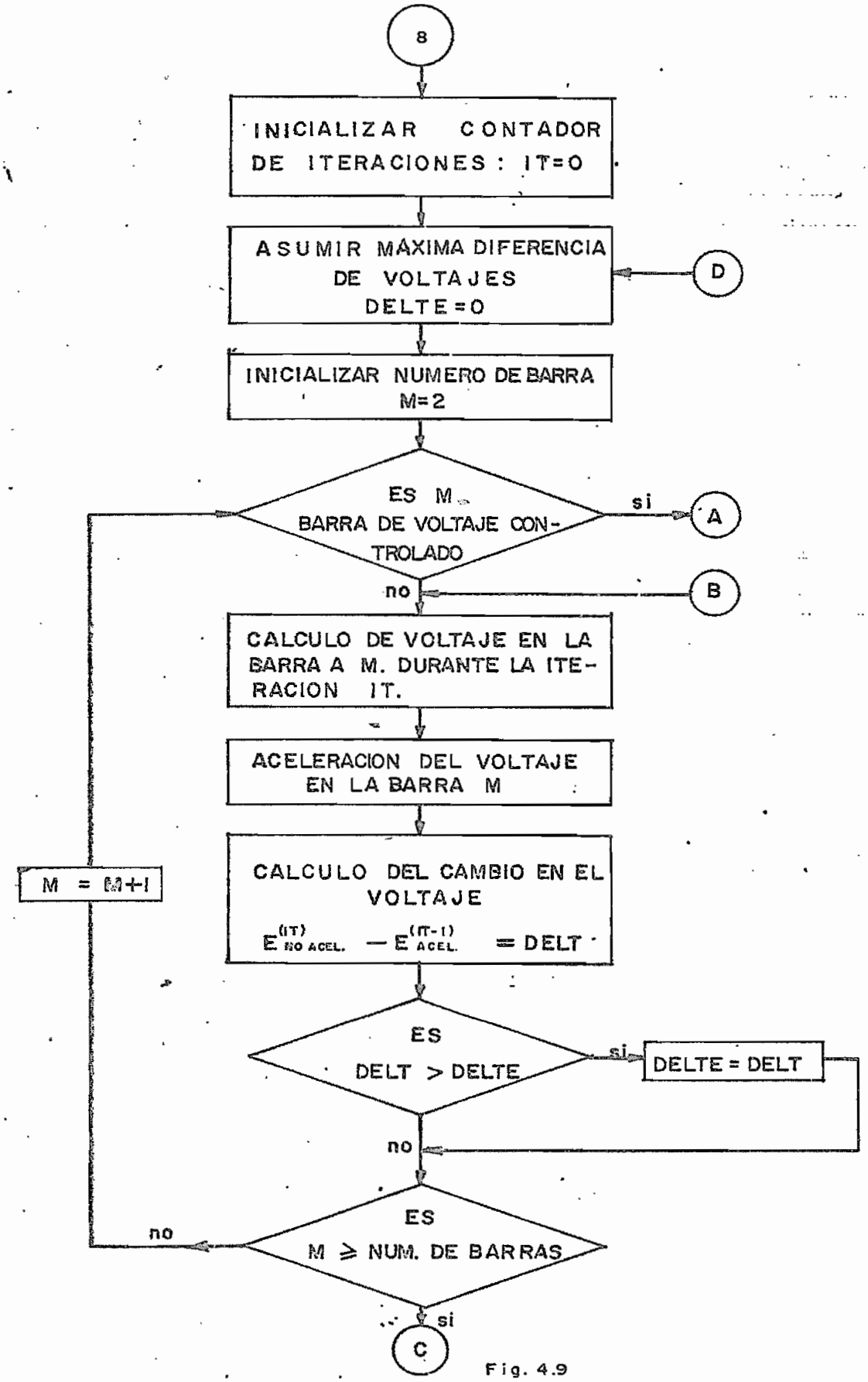


Fig. 4.9

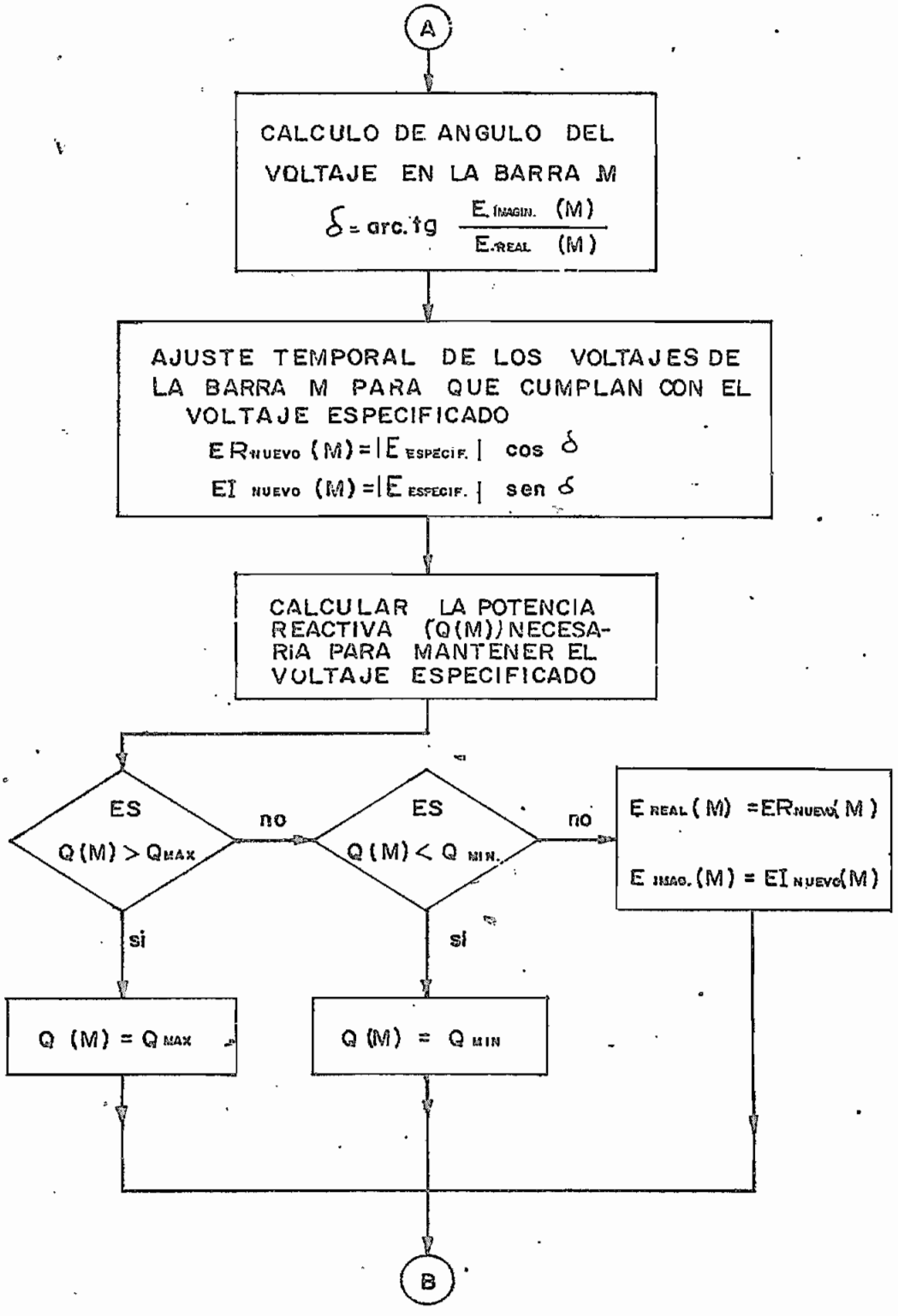

A
CALCULO DE ANGULO DEL VOLTAJE EN LA BARRA M
δ = arc.tg E.IMAGIN. (M) / E.REAL (M)
AJUSTE TEMPORAL DE LOS VOLTAJES DE LA BARRA M PARA QUE CUMPLAN CON EL VOLTAJE ESPECIFICADO
ER NUEVO (M) = |E ESPECIF.| cos δ
EI NUEVO (M) = |E ESPECIF.| sen δ
CALCULAR LA POTENCIA REACTIVA (Q(M)) NECESARIA PARA MANTENER EL VOLTAJE ESPECIFICADO
ES Q(M) > QMAX
no
ES Q(M) < Q MIN.
no
E REAL (M) = ER NUEVO (M)
E IMAG. (M) = EI NUEVO (M)
si
si
Q (M) = Q MAX
Q (M) = Q MIN
B

Fig. 4.9 (cont.)

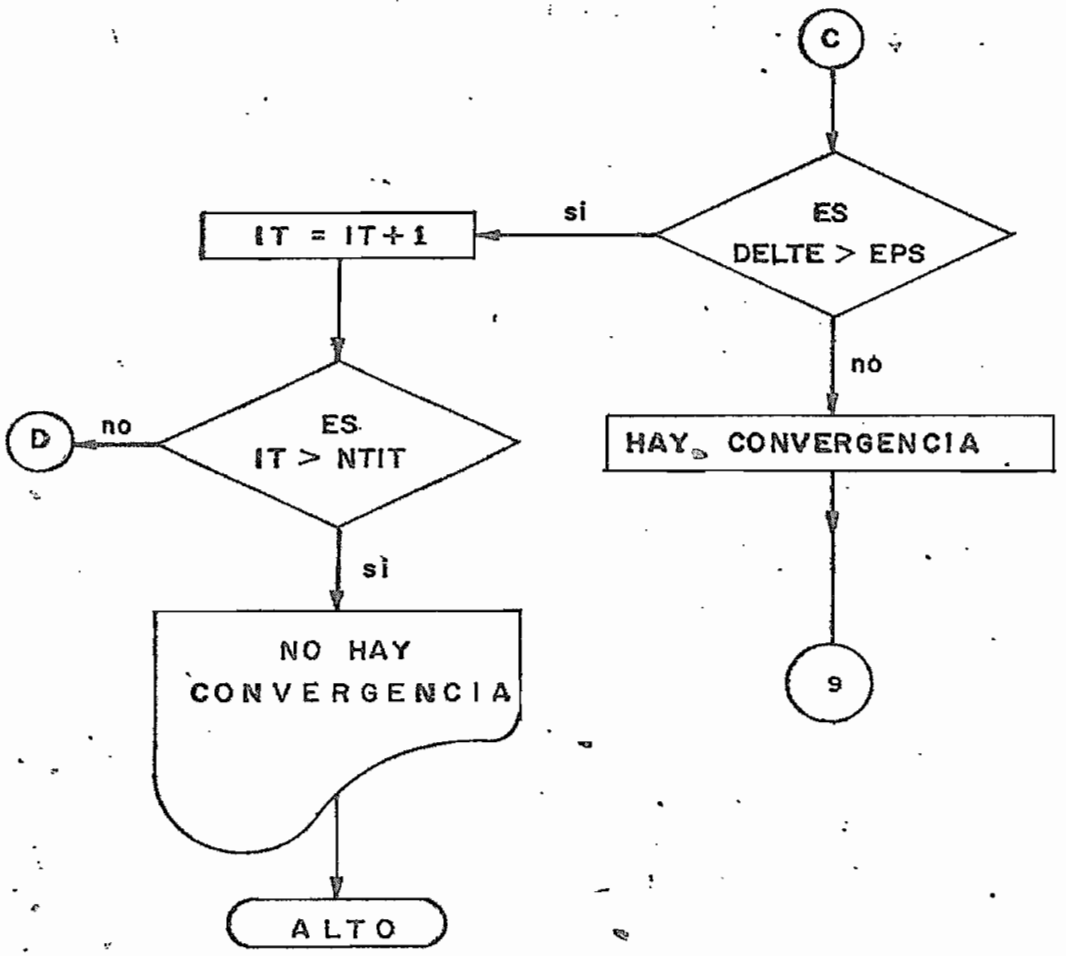

C
ES
DELTE > EPS
si
IT = IT+1
no
HAY CONVERGENCIA
9
ES
IT > NTIT
no
D
sì
NO HAY
CONVERGENCIA
ALTO

Fig. 4.9 (cont.)

SUBRUTINA FLOWL

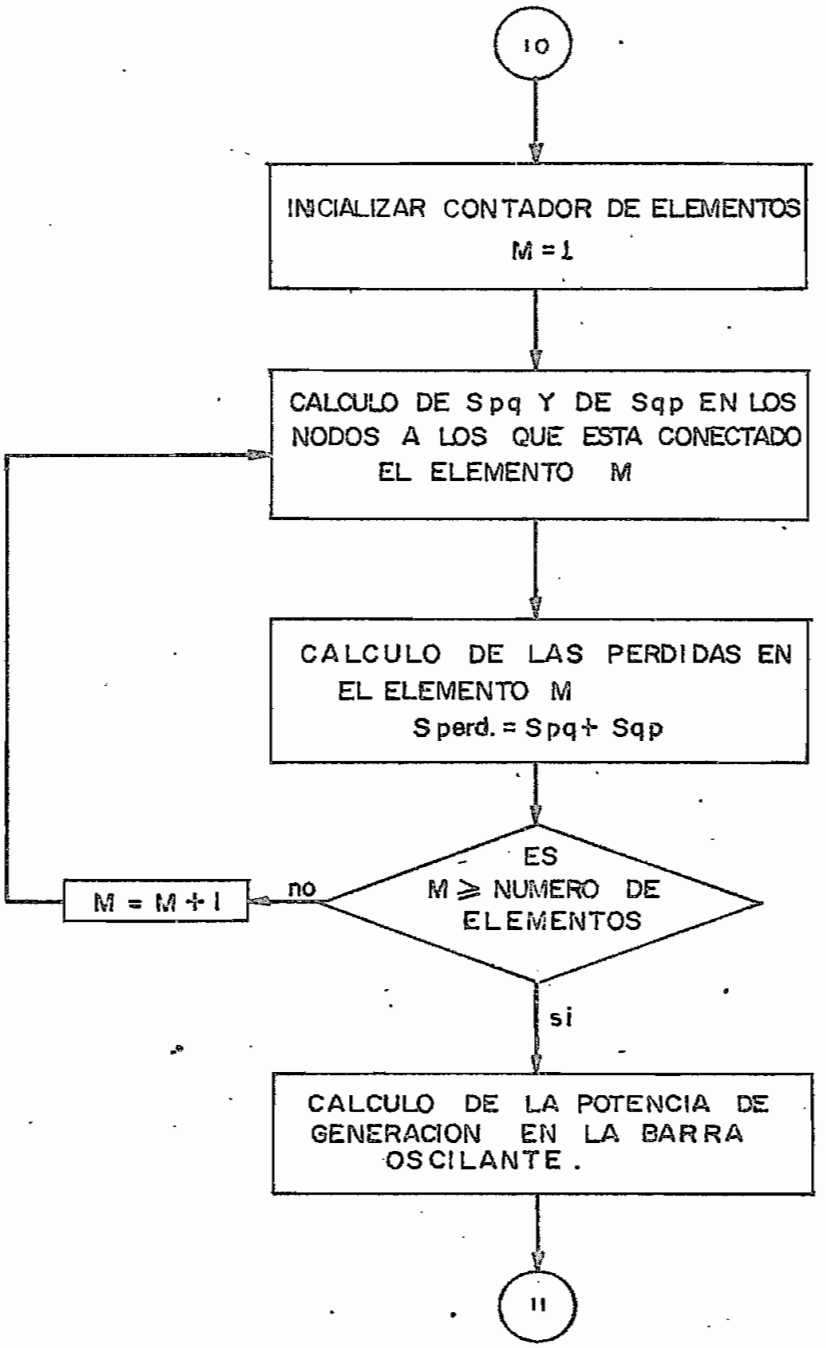


Fig. 4.10

SUBRUTINA VOLAN

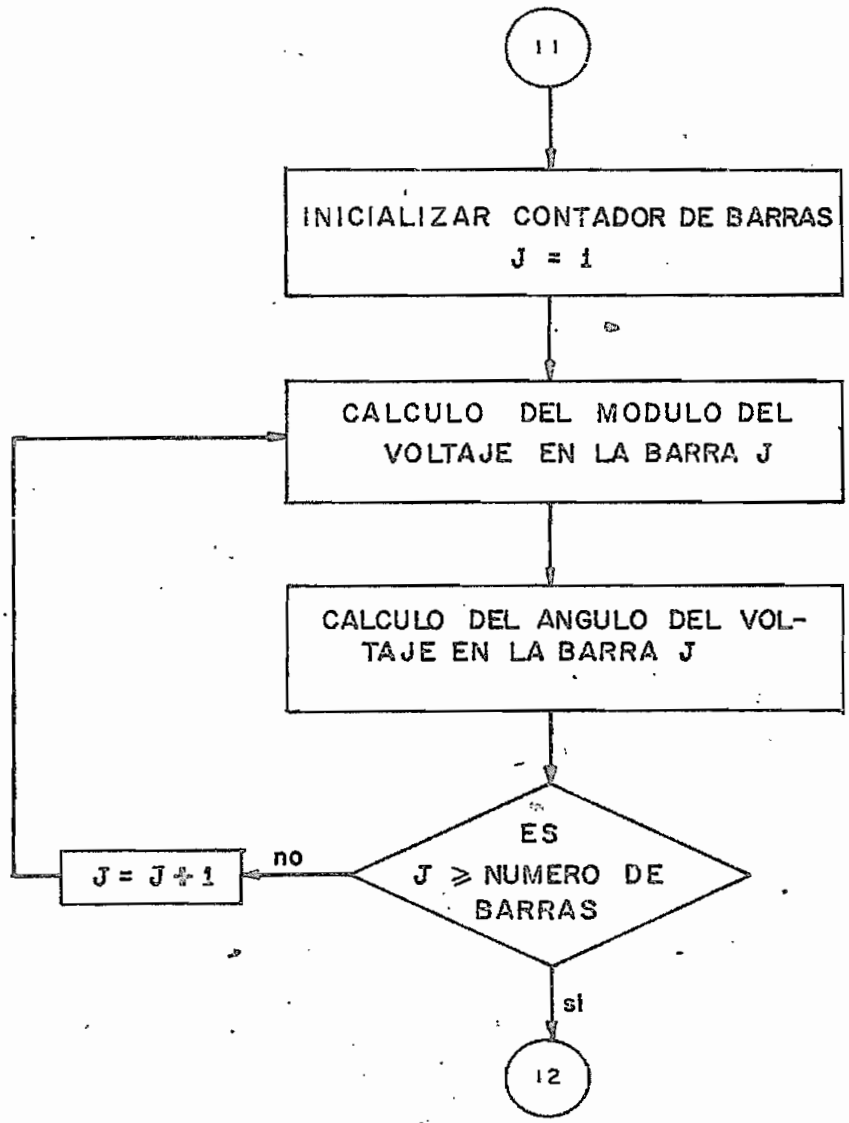


Fig. 4.11

CAPITULO V

APLICACION DEL PROGRAMA A UN SISTEMA.-

5.1 EJEMPLO DE FLUJO DE CARGAS .-

En esta sección se describe la aplicación del programa - realizado para el cálculo de flujo de cargas; no se tratará de obtener un flujo óptimo ni se mencionan métodos que ayudan a mejorarlo.

El sistema de potencia empleado para efectuar el ejemplo es el de la Fig. 5.1 que ha sido tomado del manual de utilización del analizador de redes de C.A. de la Escuela Politécnica Nacional.

5.1.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA .-

El sistema tiene en total 12 barras, 4 principales y 8 auxiliares creadas con el fin de facilitar la programación; 7 líneas, 6 transformadores y 2 reactores. Las características de las barras principales, así como la de los elementos, se encuentran en los cuadros B, C y D siguientes:

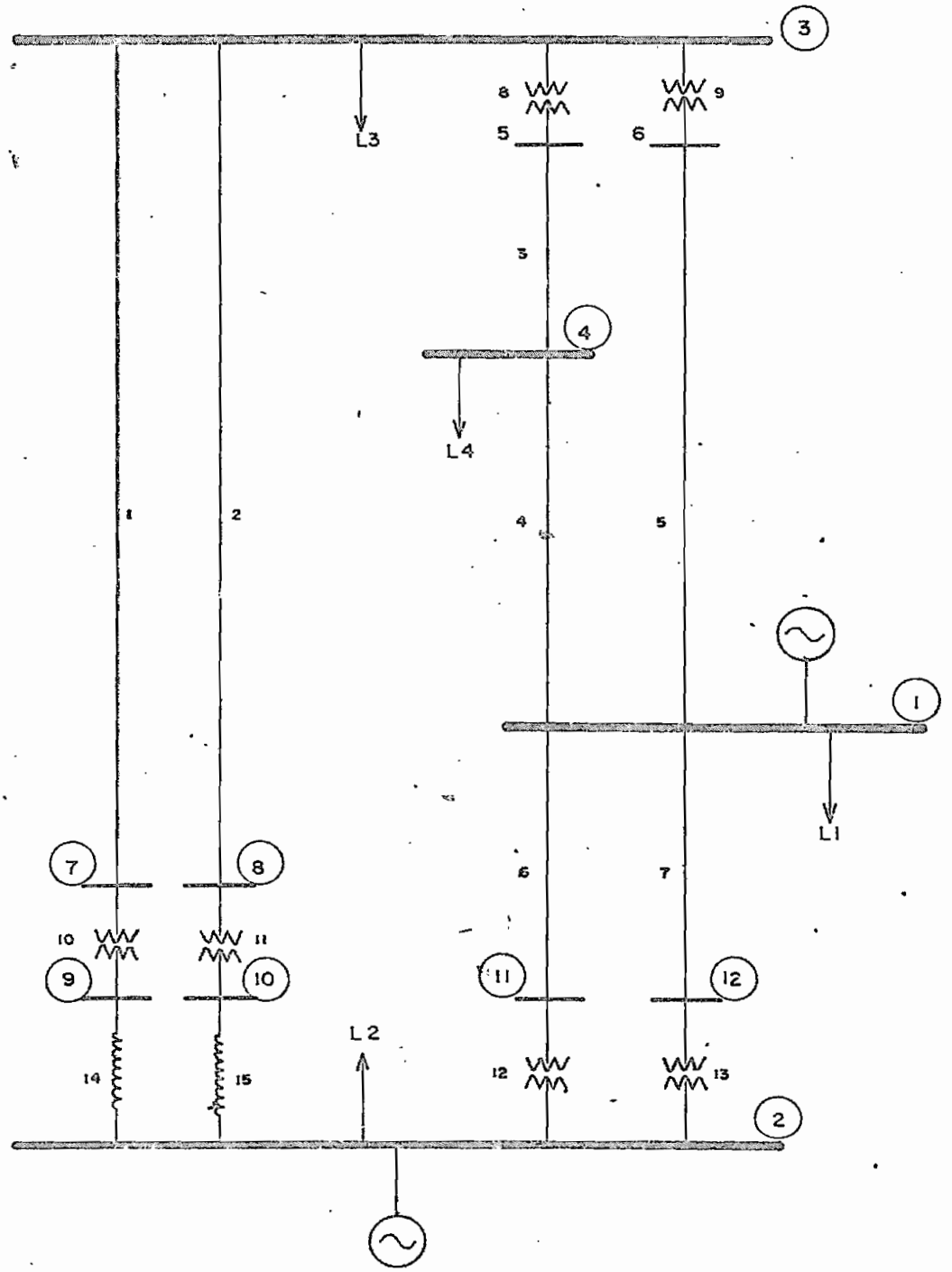


Fig. 5.1 SISTEMA TOMADO COMO EJEMPLO PARA LA UTILIZACION DEL PROGRAMA

CUADRO B

CARACTERISTICAS DE LAS BARRAS

Barra Nº	CARGAS		GENERACION		Especific. de Voltaje	Tipo de Barra
	Pot.Act. MW	Pot.Reac. MVAR	Pot.Act. MW	Pot.Re MVAR		
1	7.1	9.45			$E_1=1.0\angle 0°$	Oscil.
2	6.5	4.86	11.5	*	$\lvert E_2\rvert=1.0$	Vo. Co.
3	18.0	8.74				Carga
4	1.61	1.64				Carga

* $Q_G MAX$ = 11.25 MVAR; $Q_G MIN$ = 0 MVAR

CUADRO C

CARACTERISTICAS DE LAS LINEAS

Elemt. Nº	Nodo p	Nodo q	r Ω/milla	x Ω/milla	Longitud Km.
1	3	7	0.257	0.6484	3.96
2	3	8	0.257	0.6484	3.96
3	4	5	0.257	0.6484	1.88
4	1	4	0.257	0.6484	1.25
5	1	6	0.257	0.6484	3.13
6	1	11	0.257	0.6484	0.82
7	1	12	0.257	0.6484	0.82

CUADRO D

CARACTERISTICAS DE TRANSFORMADORES Y REACTORES

Elemt. Nº	Nodo p	Nodo q	Pot. MVA	tp	tq	Volt. Nomin. Kv	Voltajes trabajo Kv	X %
8	3	5	9.0	0.91	0.926	33/11	36.3/11.88	5.3
9	3	6	9.0	0.91	0.926	33/11	36.3/11.88	5.3
10	7	9	6.0	0.952	0.959	33/2.3	34.65/2.4	5.5
11	8	10	6.0	0.952	0.959	33/2.3	34.65/2.4	5.5
12	2	11	3.0	1.0	1.0	11/2.3	11/2.3	6.2
13	2	12	3.0	1.0	1.0	11/2.3	11/2.3	6.2
14	2	9	6.0	1.0	1.0			5.0
15	2	10	6.0	1.0	1.0			5.0

Los reactores (elementos 14 y 15) están incluídos en el cuadro D debido a que su admitancia se la calcula utilizando la subrutina de los transformadores.

5.1.2 EJEMPLO DE CALCULO DE LAS ADMITANCIAS EQUIVALENTES DE TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS.-

El elemento tomado para el ejemplo es el número 9 que tiene las siguientes características:

S = 9.0 MVA

X = 5.3% en 33/11 KV

Tensión de Trabajo = 36.3/11.88 KV

S_{base} del sistema = 20 MVA

V_{base} del sistema del lado de alta tensión = 33 KV

De acuerdo con las expresiones (2.3) y (2.6):

$$t_p = \frac{33}{36.3} = 0.91$$

$$t_q = \frac{11}{11.88} = 0.92$$

Los cálculos realizados por la subrutina TRANS son los siguientes:

$$X_{pu} = 5.3 \times \frac{20}{9} \times \frac{1}{100} = 0.11778$$

$$ya = \frac{y}{t_p\ t_q} = - \frac{1}{0.11778 \times 0.91 \times 0.92} = -10.07$$

$$yb = y\left(\frac{1}{t_p^2} - \frac{1}{t_p\ t_q}\right) = - \frac{1}{0.11778}\ (1.2075 - 1.187)$$

$$= - 0.175$$

$$yc = y\left(\frac{1}{t_q^2} - \frac{1}{t_p t_q}\right) = - \frac{1}{0.11778}\ (1.166\dot{7} - 1.187)$$

$$= 0.172$$

Los valores de las admitancias equivalentes de todos los elementos, la matriz Y_b y los resultados del flujo de cargas se encuentran en el apéndice C.

En la Fig. 5.2 se indica el flujo de cargas obtenido para $\alpha = 1.6$, $\beta = 1.6$ y $\epsilon = 10^{-4}$

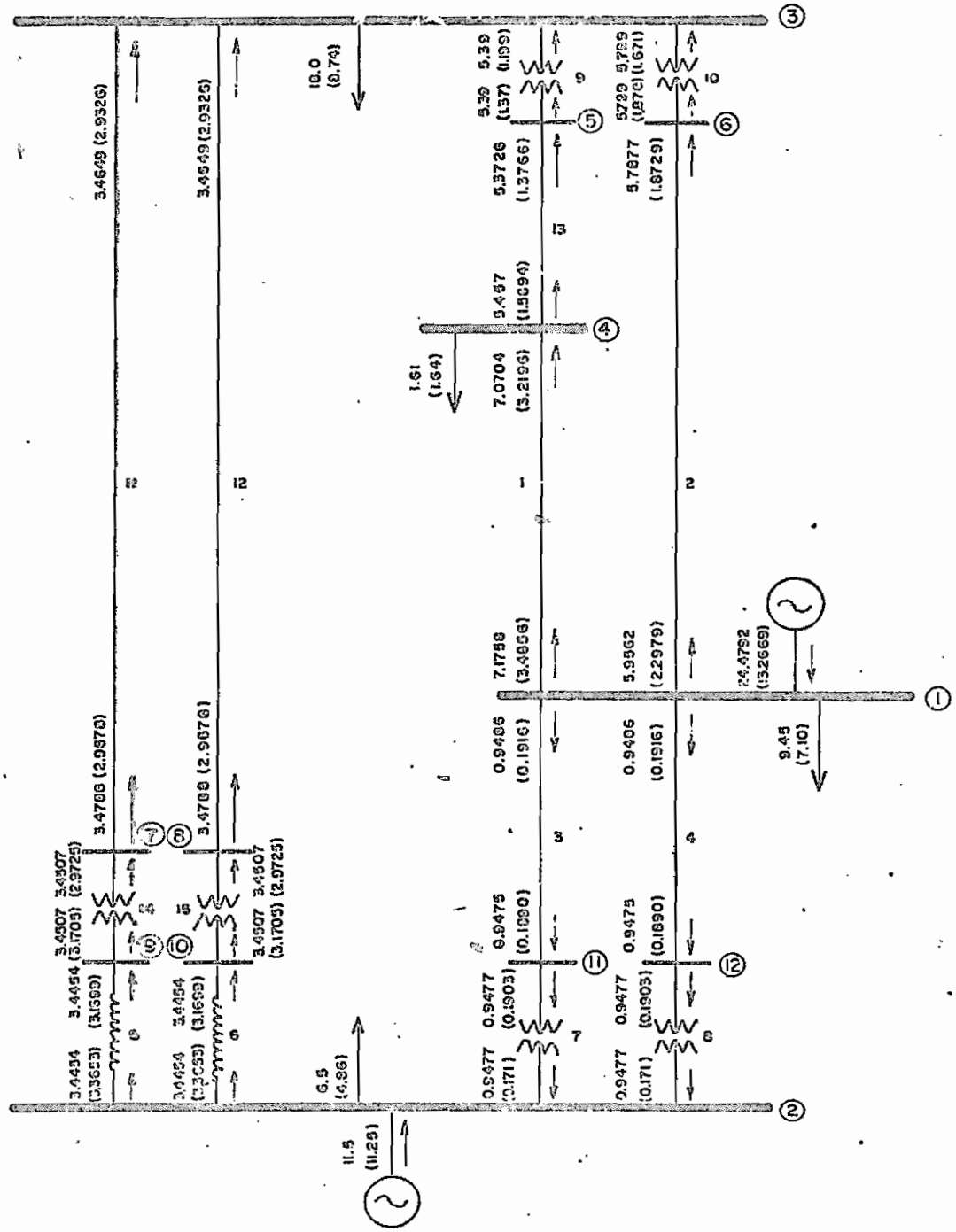
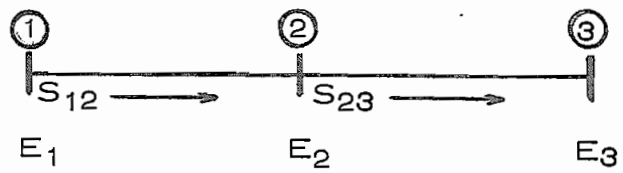


Fig. 5.2 FLUJO DE CARGAS EN EL SISTEMA DEL EJEMPLO

NOTA: Los valores entre paréntesis corresponden a potencias reactivas

Se puede observar en la Fig. 5.2 que los elementos del sistema están enumerados en forma diferente respecto a la numeración original (Fig. 5.1); esto se debe al ordenamiento previo que realiza la subrutina ORDEN que es indispensable para la formación de la matriz Y_b'.

Por otra parte, existen diferencias entre la potencia que "entra" a una barra y la que "sale" de ella; esta diferencia se denomina DESAJUSTE, el cual se produce por la forma de calcular la potencia que fluye entre dos barras (expresiones 3.38 y 3.39). Tomando como ejemplo 3 barras de un sistema de potencia:



De acuerdo con (3.38):

$$S_{12}^* = P_{12} - jQ_{12} = E_1^* (E_1 - E_2) y_{12}$$

$$S_{23}^* = P_{23} - jQ_{23} = E_2^* (E_2 - E_3) y_{23}$$

Para que S_{12}^*, S_{23}^* sean iguales, las tensiones de las barras deberían haber llegado a su valor verdadero luego del proceso iterativo, pero como esto no es posible realizarlo dentro de un rango práctico de número de iteraciones y de un criterio de convergencia razonable, se produ

ce la diferencia entre las potencias que "entran" y que "salen" de una barra. Para el sistema del ejemplo, el "desajuste" se esquematiza en el siguiente cuadro:

CUADRO E

CALCULO DE DESAJUSTE

Barr Nº	P Entra MW	Q Entra MVAR	P Sale MW	Q Sale MVAR	P Diferenc. MW	Q Diferenc. MVAR
1	24.4792	13.2669	24.4792	13.2667	0.00	0.0002
2	13.3954	11.592	13.3908	11.5900	0.0046	0.0014
3	18.118	8.7354	18.0	8.74	0.118	0.0046
4	7.0704	3.2196	7.067	3.2294	0.0034	0.0098
5	5.3726	1.3766	5.3896	1.3726	0.017	0.004
6	5.7877	1.8729	5.7994	1.8781	0.0117	0.0052
7	3.4507	2.9725	3.4788	2.9678	0.0281	0.0047
8	3.4507	2.9725	3.4788	2.9678	0.0281	0.0047
9	3.4454	3.1699	3.4507	3.1705	0.0053	0.0006
10	3.4454	3.1699	3.4507	3.1705	0.0053	0.0006
11	0.9475	0.1890	0.9477	0.1903	0.0002	0.0013
12	0.9475	0.1890	0.9477	0.1903	0.0002	0.0013
				TOTAL	0.2219	0.0384

Máximo desajuste en MW = 0.118

Máximo desajuste en MVAR = 0.0098

Referencias: 2, 5, 22, 23.

5.2 COMENTARIOS SOBRE EL CRITERIO DE CONVERGENCIA.-

La selección de un criterio de convergencia conveniente se lo debe realizar tomando en consideración dos factores: la exactitud requerida en los resultados y el tiempo total que se necesita para llegar a una solución. En el cuadro F se indican, para diversos valores de ϵ, el máximo desajuste de la potencia activa y reactiva tomadas como porcentaje de la potencia base, y el número total de iteraciones obtenidos con el sistema descrito en la sección 5.1

CUADRO F

NUMERO DE ITERACIONES Y MAXIMO DESAJUSTE PARA DIVERSOS VALORES DE ϵ

ϵ	MAXIMO DESAJUSTE		NUMERO de ITERACIONES
	ΔP %	ΔQ %	
10^{-2}	56.70	8.54	3
10^{-3}	2.77	0.9	7
10^{-4}	0.59	0.049	12
10^{-5}	0.0065	0.021	17
10^{-6}	0.0005	0.003	22
10^{-7}	-	-	No converge con 51 iteraciones

El desajuste tomado como porcentaje de la potencia base del sistema puede utilizarse como criterio de convergencia, aceptándose como razonables valores que van hasta el 2%.

En la Fig. 5.3 se muestra el máximo desajuste en porcentaje de la potencia base y el número de iteraciones en función de $-\log \epsilon$ por facilidad de presentación.

Como se puede apreciar en la Fig. 5.3 ó por los valores del cuadro F el desajuste generalmente aceptado se encuentra aproximadamente a partir de $\epsilon = 10^{-3}$ y la mayor precisión se obtiene con $\epsilon = 10^{-6}$. Sinembargo, el número de iteraciones crece en forma aproximadamente lineal en este intervalo a medida que el criterio de convergencia disminuye. Los libros que tratan sobre flujo de cargas usualmente recomiendan valores de ϵ que van desde 10^{-3} hasta 10^{-7}.

Para escoger un ϵ ó un porcentaje de desajuste como criterios de convergencia se debe partir básicamente de la exactitud de los datos del sistema y del objetivo del estudio.

Referencias 1, 9.

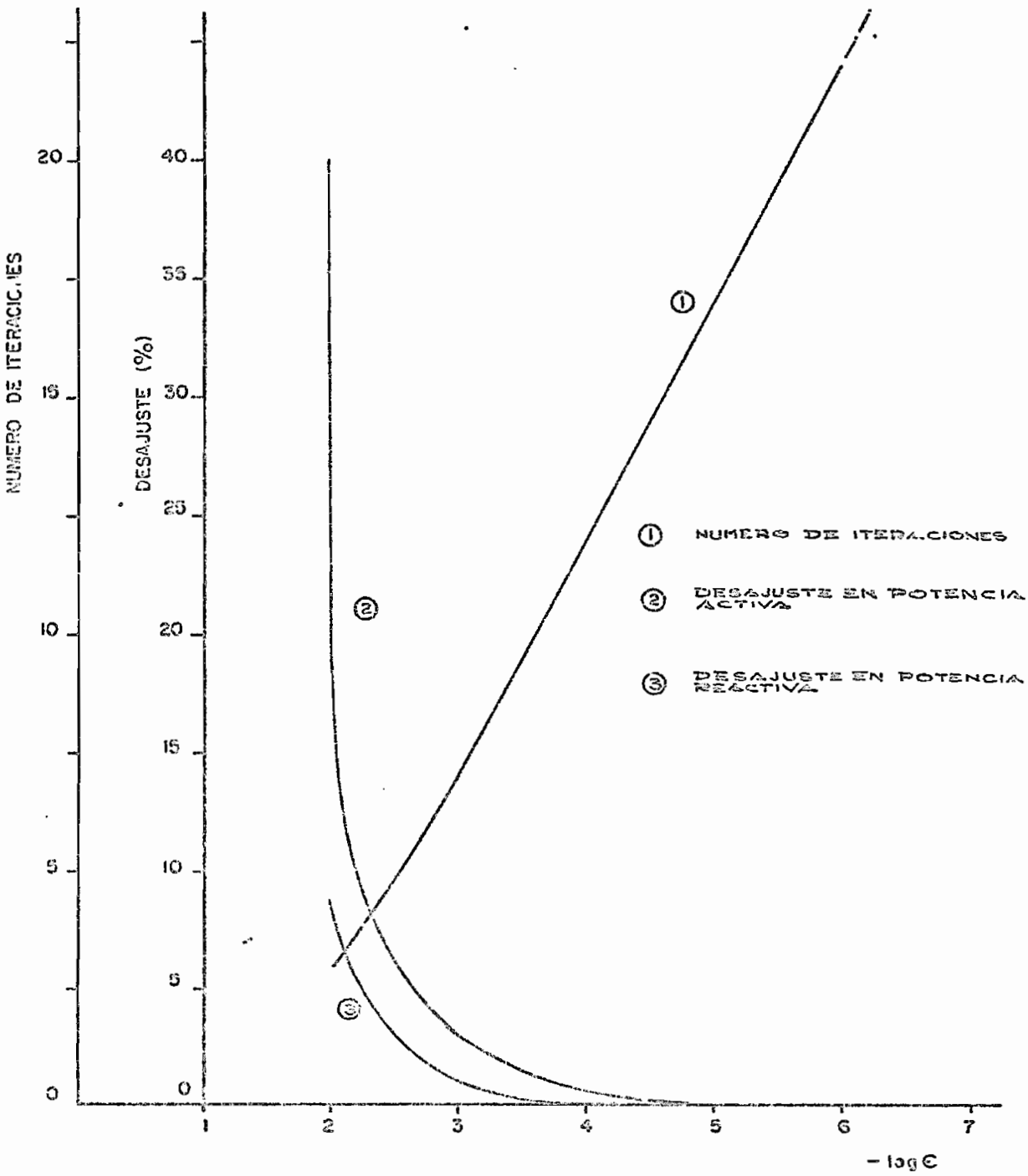


Fig. 5.3 NUMERO DE ITERACIONES Y DESAJUSTE EN FUNCION DE $-\log \in$

5.3 FACTORES DE ACELERACION .-

Al realizar el cálculo de los voltajes mediante el método iterativo de Gauss-Seidel, cuando el sistema de ecuaciones es convergente, cada uno de los valores está más próximo a la solución que su anterior aunque esté lejos de la respuesta correcta; resulta entonces ventajoso efectuar correciones en cada iteración a los valores para lograr que se aproximen más rápidamente al resultado, lo cual se logra utilizando los denominados factores de aceleración cuya función se la demuestra a continuación:

a) Cuando los valores en cada iteración no se los acelera: Fig. 5.4 ;

b) Cuando se los acelera: Fig. 5.5.

Se observa, que por ejemplo X_2 de la Fig. 5.5. está más cerca de la solución que X_2 de la Fig. 5.4.

Generalizando la utilización de los factores de aceleración se tienen las siguientes relaciones:

- Cuando se acelera:

$$X_{n+1} = X_n + \alpha \Delta X_n \qquad (5.1.)$$

- Cuando no se acelera:

$$X_{n+1} = X_n + \Delta X_n \qquad (5.2)$$

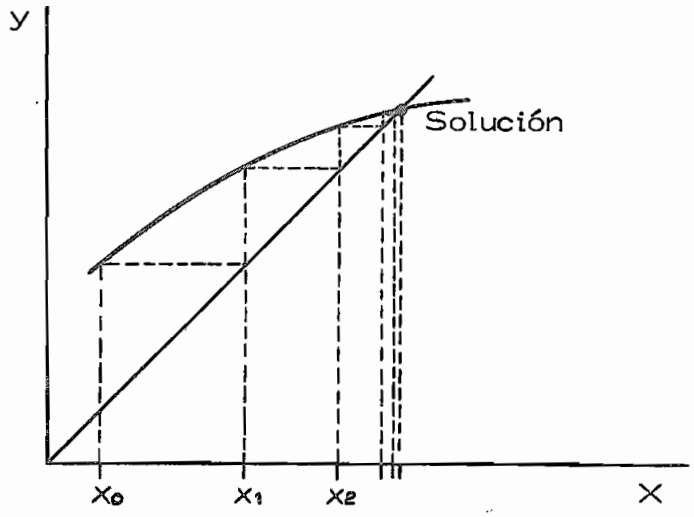


Fig. 5.4 Convergencia sin aceleración

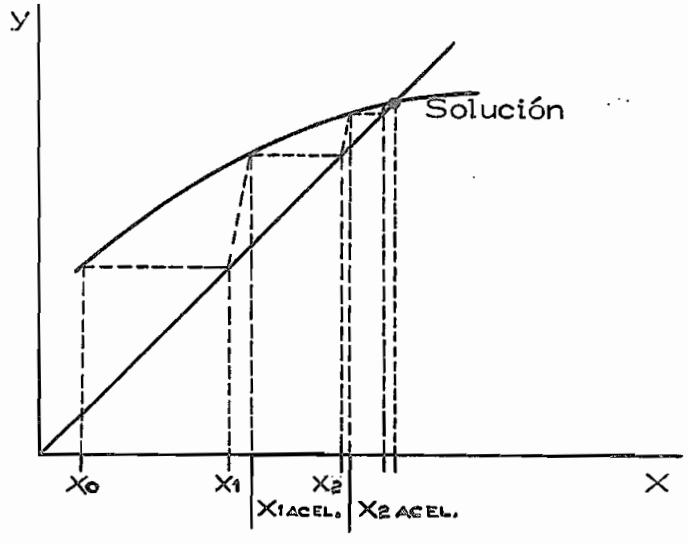


Fig. 5.5 Convergencia utilizando factores de aceleración.

Donde α es el factor de aceleración.

Como se menciona en el capítulo III, para el cálculo de voltaje de barras, se puede tener dos factores de aceleración, α para la parte real y β para la parte imaginaria.

Para el ejemplo de la sección 5.1 se han realizado los siguientes estudios:

1. Utilizando valores iguales para α y β :

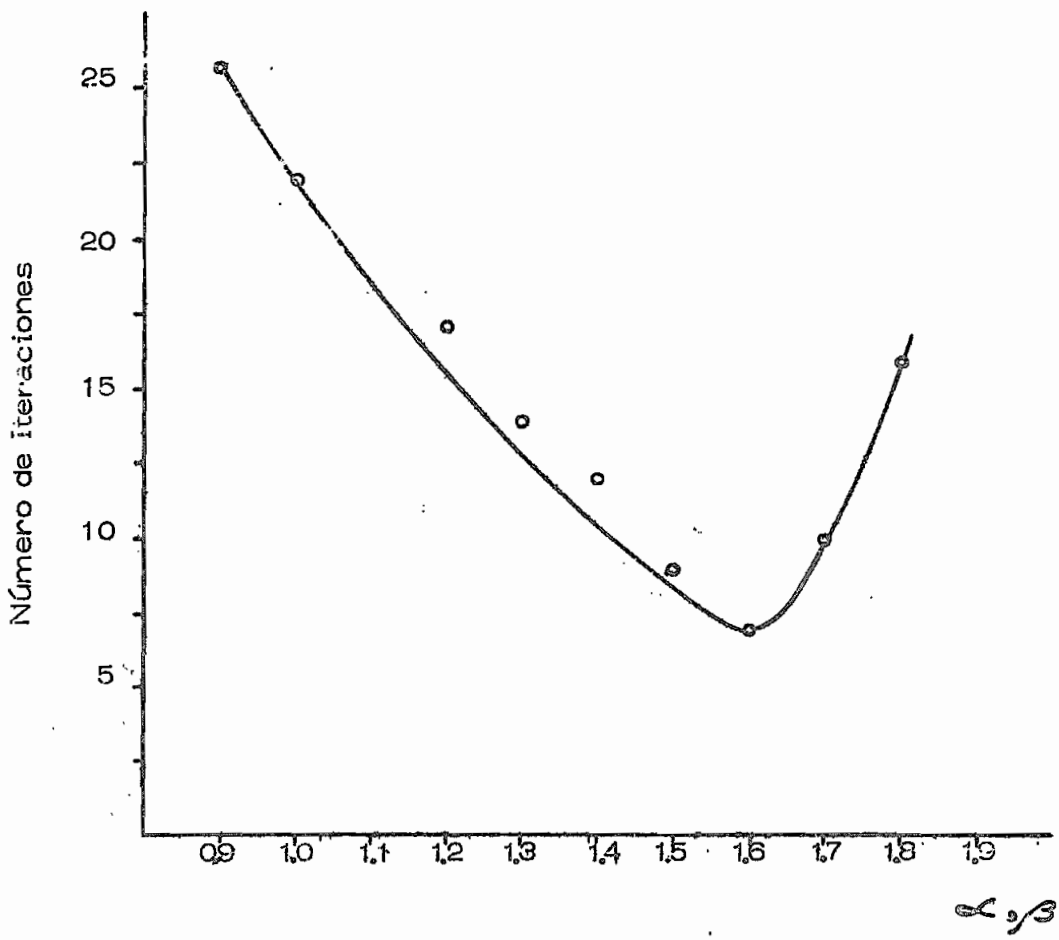


Fig. 5.6. Número de iteraciones en función de α y β iguales para el sistema del ejemplo.

En la Fig. 5.6, se observa que el factor de aceleración óptimo es 1.6 que no necesariamente será el mejor para otro sistema. Por estudios realizados en diferentes sistemas de potencia, se ha llegado a establecer como rango adecuado para factores de aceleración el comprendido entre 1.4 y 1.6.

Por otra parte, cabe mencionar que un factor igual a 1 implica aceleración nula, así como uno que sea menor que la unidad, implica desaceleración.

2. Utilizando valores de α diferentes de β:

- El estudio se lo ha realizado considerando el rango de variación indicado en el punto 1.

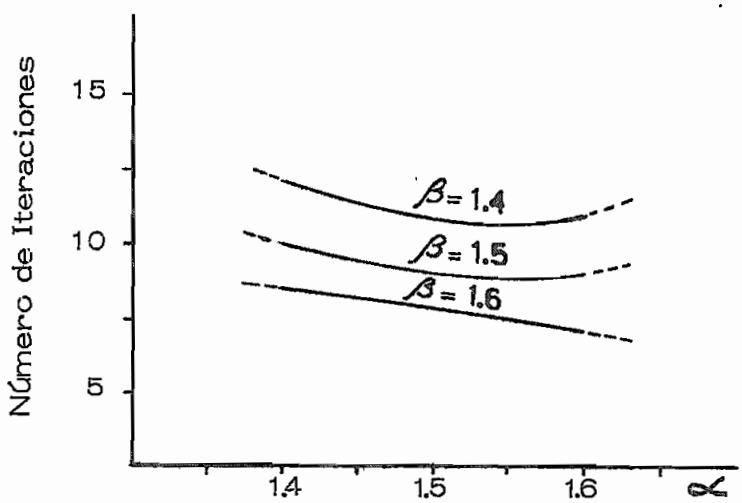


Fig. 5.7 Número de iteraciones en función de α con diferentes valores de β para el sistema del ejemplo.

En las curvas se observa que para un mismo valor de α se obtiene una convergencia más rápida cuando β es mayor.
Por ejemplo, para

$\alpha = 1.4$ y $\beta = 1.6$ se converge en 9 iteraciones, mientras que para

$\alpha = 1.4$ y $\beta = 1.5$ se realiza en 10.

Referencias: 7, 8, 9.

CAPITULO VI.

CONCLUSIONES:

El programa ha sido desarrollado en la forma más general posible con el fin de objetivizar los pasos que deben seguirse para el estudio de Flujo de Cargas. El trabajo contiene explicaciones adicionales que permiten la mejor comprensión del problema, por lo que puede convertirse en un instrumento didáctico para la enseñanza de esta parte del estudio de Sistemas de Potencia. Asimismo se ha logrado tener gran flexibilidad en cuanto a aceptar modificaciones en su estructura con el fin de ampliarlo, optimizarlo, e inclusive poder utilizar otro modelo matemático.

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

Con los estudios ampliatorios realizados en el sistema que se ha tomado como ejemplo, se ha comprobado los rangos generalmente recomendados en los libros y artículos que tratan del problema de Flujo de Cargas, para α, β y ϵ.

El programa satisface los objetivos para los cuales ha sido desarrollado y constituye una base sólida para futuras investiga-

ciones, las cuales contribuyen a tener dentro de nuestro medio un profundo conocimiento del problema. Como sugerencia se podría indicar estudios sobre el cambio automático de taps, la inclusión de transformadores de desplazamiento de ángulo, intercambio de potencia entre áreas, control de una barra remota, modificaciones al sistema.

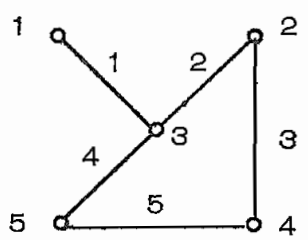
A P E N D I C E A

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:



$Y_b =$

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:

$$\overline{Y_{b1}} = \left[\overbrace{Y_{11}\ Y_{13}}^{\text{Fila 1}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{22}\ Y_{23}\ Y_{24}}^{\text{Fila 2}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{31}\ Y_{32}\ Y_{33}\ Y_{35}}^{\text{Fila 3}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{42}\ Y_{44}\ Y_{45}}^{\text{Fila 4}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{53}\ Y_{54}\ Y_{55}}^{\text{Fila 5}}\right]$$

(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:

$$\overline{Y_{b2}} = \left[\overbrace{Y_{11}\ Y_{13}}^{\text{Fila1}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{22}\ Y_{23}\ Y_{24}}^{\text{Fila 2}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{33}\ Y_{35}\ Y_{31}\ Y_{32}}^{\text{Fila 3}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{44}\ Y_{45}\ Y_{42}}^{\text{Fila 4}} \,\middle|\, \overbrace{Y_{55}\ Y_{53}\ Y_{54}}^{\text{Fila 5}}\right]$$

(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)

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

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 uno 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 :

$$\overline{I} = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 \end{bmatrix} \qquad (A.5)$$

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:

$$\overline{I} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & 10 & 13 \end{bmatrix} \qquad (A.6)$$

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

$$\bar{J} = [J_1\ J_2\ J_3\ J_4\ J_5\ J_6\ J_7\ J_8\ J_9\ J_{10}\ J_{11}\ J_{12}\ J_{13}\ J_{14}\ J_{15}] \qquad (A.7)$$

Sus valores respectivos son:

$$\bar{J} = [1\ 3\ 2\ 3\ 4\ 3\ 5\ 1\ 2\ 4\ 5\ 2\ 5\ 3\ 4] \qquad (A.8)$$

(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.

$J_{11} = 5$

c) El elemento buscado estará almacenado como $Y'(n)$, que en forma compleja será:

$$Y'r\ (n) + j\ Y'i\ (n)$$

- El elemento Y45 estará almacenado como Y'_{11}:

$$Y'r\ (11) + j\ Y'i\ (11)$$

A P E N D I C E B

FORMATOS DE ENTRADA, CAPACIDAD DEL PROGRAMA E INDICADORES

En el presente apéndice se esquematizan los formatos y la secuencia de entrada de los datos. Las variables se indican por las siglas especificadas en el capítulo IV y además la capacidad del programa para el computador disponible y los valores que toman los indicadores para los diferentes casos previstos.

B.1 Formatos y secuencia de entrada de datos, cuando los elementos del sistema están en valores reales (ver esquema B-1).

B.2 Cuando los datos de los elementos del sistema están en p.u. en las bases del sistema (ver esquema B.2).

B.3 CAPACIDAD DEL PROGRAMA .-

- NUMERO DE BARRAS: NB = 100
- NUMERO DE ELEMENTOS: Número de líneas + Número de transform. + Número de reactores o condensadores serie NE = 100
- NÚMERO DE BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO NBVC=25

INDICADORES.-

Indicador	Valores	Descripción
NPU	0	Elementos que no están en las bases del sistema (Caso B.1)
	1	Elementos que están en las bases del sistema (Caso B.2)
NTTD	0	Para transformadores de 2 devanados
	1	Para transformadores de 3 devanados
I1	0	Caso en el que no se deseen flujos de cargas en los elementos
	1	Caso en el que se deseen flujo de cargas en los elementos
IND	0	Se desea realizar otro estudio de flujo de cargas
	1	Para el último caso (o ejemplo) que se realiza.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa FLUJO de CARGAS : Esquema B1	Instrucciones de Perforación	Símbolo			Página 1 de 3
Programador Fecha		Perforación			

C Comentario

No. De Proposic. — Continuación

PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

```
1.- DATOS GENERALES

   NOMBRE DEL SISTEMA      VALORES REALES : Una tarjeta

   NE    NL    NT    NB    NBVC  NPU   SBASE : Una tarjeta

   NTIT  I1    IND   ALPHA       BETA        EPS : Una tarjeta

2.- DATOS DE LINEAS : Una tarjeta por línea

   NDEI  NP    NQ    L           R           X           VKV         FACT        B
```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa	Esquema B1 (continuación)	Instrucciones de Perforación	Símbolo						Página 2 de 3
Programador	Fecha		Perforación						

C Comentario — No. De Proposic. — Continuación — PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

3.- DATOS DE TRANSFORMADORES : Una tarjeta por transformador

NDE	NP	NQ	NTTD	ZR	ZI	STR	VKV	TP	TQ	VKVN

4.- DATOS DE LA BARRA OSCILANTE : Una tarjeta

ER1	EI1	PC1	QC1

5.- DATOS DE POTENCIA EN BARRAS DE CARGA : Dos barras por tarjeta

PG	PC	QG	QC	PG	PC	QG	QC

← BARRA M → ← BARRA M+1 →

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa	Esquema B1 (continuación)	Instrucciones de Perforación	Símbolo						Página 3 de 3
Programador	Fecha		Perforación						

C Comentario — No. De Proposic. — Continuación — PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

```
6 .- DATOS DE POTENCIA EN BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO : Dos barras por tarjeta

   PG        PC        QGMAX     QGMIN     QC        PG        PC        QGMAX     QGMIN     QC

<------------------ BARRA M ------------------><------------------ BARRA M+1 ------------------>

7 .- MODULO DEL VOLTAJE EN BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO : 16 barras por tarjeta

 EMOD
```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa FLUJO DE CARGAS : Esquema B2	Instrucciones de Perforación	Símbolo	Página 1 de 3
Programador Fecha		Perforación	

C Comentario — No. De Proposic. — Continuación — PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

```
1.- DATOS GENERALES

  NOMBRE DEL SISTEMA      VALORES P.U.  : Una tarjeta

  NE    NL    NT    NB    NBVC  NPU   SBASE : Una tarjeta

  NTIT  I1    IND   ALPHA       BETA        EPS : Una tarjeta

2.- DATOS DE LOS ELEMENTOS : Una tarjeta por elemento

  NDE   NP    NQ    ZR          ZI          YR1         YI1         YR2         YI2
```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa Esquema B2 (continuación)	Instrucciones de Perforación	Símbolo	Página 2 de 3
Programador Fecha		Perforación	

C Comentario

No. De Proposic. — Continuación

PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

```
3.- DATOS DE LA BARRA OSCILANTE : Una tarjeta

  ER1       EI1       PC1       QC1

4.- DATOS DE POTENCIA EN BARRAS DE CARGA : Dos barras por tarjeta

  PG        PC        QG        QC        PG        PC        QG        QC

<------------ BARRA M ------------><------------ BARRA M+1 ------------>
```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

HOJA DE CODIFICACION FORTRAN

Programa	Esquema B 2 (continuación)	Instrucciones de Perforación	Símbolo						Página 3 de 3
Programador	Fecha		Perforación						

C Comentario — No. De Proposic. — Continuación — PROPOSICION FORTRAN — Secuencia de Identificación

```
5.- DATOS DE POTENCIA EN BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO : Dos barras por tarjeta

  PG        PC        QGMAX     QGMIN     QC        PG        PC        QGMAX     QGMIN     QC

            BARRA M                                           BARRA M+1

6.- MODULO DEL VOLTAJE EN BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO : 16 barras por tarjeta

EMOD
```

A P E N D I C E C

LISTADO DEL PROGRAMA Y RESULTADOS DEL EJEMPLO DEL CAPITULO V

REFERENCIAS

1. F.J. Jaimes, A.M. Sasson, "METODOS DIGITALES PARA EFECTUAR ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA", Congreso Panamericano de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México 1965.

2. W.D. Stevenson Jr., "ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", Mc Graw-Hill Book Company Inc., segunda edición, 1962.

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

4. División de Planificación, "REVISION DEL PLAN QUINQUENAL DE ELECTRIFICACION 1973-1977", (Tomo I), INECEL, Quito - Ecuador, Diciembre 1973.

5. J.V. Saavedra, "PRACTICAL APPLICATION OF DIGITAL COMPUTER TO DISTRIBUTION SYSTEMS", University of Missouri - Rolla, 1971.

6. E. Harper, "INTRODUCCION AL ANALISIS DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", Editorial Limusa-Wiley S.A., México 1972.

7. A. Ralston, "INTRODUCCION AL ANALISIS NUMERICO", Editorial Limusa-Wiley S.A. México 1970.

8. D.D. Mc Cracken, W.S. Dorn, "METODOS NUMERICOS Y PROGRAMACION FORTRAN", Editorial Limusa-Wiley S.A. México, cuarta reimpresión, 1971.

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

10. J.R. Nevenswander, "MODERN POWER SYSTEMS", International Text Book Company. U.S.A. 1971.

11. J.A. Nieto Ramírez, "METODOS NUMERICOS EN COMPUTADORAS DIGITALES", Editorial Limusa-Wiley, S.A., México 1969.

12. P.V. Freile, "ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA Y ESTABILIDAD MEDIANTE SISTEMAS DIGITALES", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 1972.

13. Westinghouse Electric Corp., "ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK", East Pittsburgh, Pennsylvania, cuarta edición, séptima impresión, 1950.

14. E. Clarke, "CIRCUIT ANALYSIS OF A.C. POWER SYSTEMS" (Tomo 1 y 2), John Wiley & Sons, Inc., séptima impresión 1961.

15. H. Sanhueza H, "ALGUNOS ASPECTOS RELATIVOS A LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS Y TRIFASICOS CONECTADOS EN ESTRELLA-DELTA", Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 1974.

16. H. Sanhueza H.,"CALCULO MATRICIAL DE PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA", Escuela Politécnica Nacional, Quito- Ecuador, 1974.

17. O.I. Elgerd, "ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY", Mc Graw-Hill Book Company, New York, primera edición 1971.

18. E.C. Ogbuobiri, "DYNAMIC STORAGE AND RETRIEVAL IN SPARSITY PROGRAMMING", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, volume PAS-89, number 1, January 1970.

19. N. Sato, W.F. Tinney, " TECHNIQUES FOR EXPLOITING THE SPARSITY OF THE NETWORK ADMITTANCE MATRIX", IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, volume PAS-82, December 1963.

20. R.K. Louden, G. Ledin Jr., "PROGRAMACION DEL IBM-1130", Editorial Prentice / Hall Internacional, 1973.

21. D.L. Dimitry, T.H. Mott Jr., "INTRODUCCION A LA PROGRAMACION MEDIANTE FORTRAN IV", Nueva Editorial Interamericana S.A. de C.V., primera edición, México 1972.

22. Westinghouse Electric Corp., "ALTERNATING CURRENT NETWORK CALCULATOR MANUAL", East Pittsburgh, Pa. U.S.A., 1955.

23. General Electric Company, "NOTES FOR POWER FLOW/ STABILITY WORSHOP", Schenectady, New York, 1974.