

ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA
AUTE POR EL METODO DIGITAL
DE CORRECCION DE VOLTAJE

621.31913
R 628
C.4

POR

ADOLFO ROBALINO GONZAGA

UNA TESIS

Presentada al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Previa la obtención del Título de

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

1974

ING. JUAN SAAVEDRA

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

El patrimonio intelectual de la presente Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis, corresponde exclusivamente a su Autor. (Artículo sexto del Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales).

Adolfo Robalino Gonzaga

Guayaquil, Abril de 1974

RESUMEN

Dado un sistema de potencia de corriente alterna trifásica se presenta el programa digital en computación el cual permite obtener una completa solución de estado estable para una condición dada.

Los datos de la red del sistema son procesados en el computador por medio de una matriz de admitancia y estos parámetros son almacenados de tal forma que permite al programa de computadora operar con ellos como los coeficientes de un conjunto simultáneo de ecuaciones no lineales. Este conjunto de ecuaciones son resueltas por medio de el proceso iterativo de corrección de voltaje.

P R E F A C I O

Ultimamente el gran uso de las Computadoras Digitales y el progreso tecnológico han dado incentivos a la investigación de métodos numéricos para resolver el problema de los sistemas de potencias.

El desarrollo de grandes computadoras va en paralelo con el crecimiento de los sistemas de potencia y esto ha hecho posible que los Ingenieros de sistema de potencia utilicen en forma más detallada modelos de sistemas para realizar estudios tales como flujo de carga, corto circuitos y estabilidad. Se espera que el presente trabajo contribuya en algo para tan gran esfuerzo.

El Autor deja constancia de su más sincero agradecimiento al Ingeniero Juan Saavedra, por su valiosa ayuda sin la cual el presente estudio no habría podido realizarse.

El Autor agradece profundamente a sus padres, Sr. César Robalino Collout y Sra. Lilia Gonzaga Córdova, por sus valiosas enseñanzas y consejos que han hecho posible que alcance la meta forjada.

El Autor agradece a su esposa Sra. Ingrid Miranda de Robalino y a su hijo Iván Robalino Miranda, quienes con su constante aliento y esperanza han logrado que yo culmine mis estudios.

El Autor agradece al Centro de Computación y a sus miembros

por su cooperación en la corrida de los programas.

Finalmente, el Autor agradece a los Ingenieros Rómulo Barreno, Sergio Flores y al Señor Guillermo Romero, por la ayuda prestada para el presente estudio.



LISTA DE CONTENIDOS

	Pag.
DECLARACION	ii
RESUMEN	iii
PREFACIO	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
I.- DEFINICION DEL FLUJO DE CARGA	1
II.- REPRESENTACION DEL SISTEMA	7
A.- Generadores	7
B.- Cargas	10
C.- Líneas de transmisión	10
D.- Transformadores de potencia	14
E.- Reactores y condensadores en derivación	22
III.- TECNICA DE SOLUCION	26
A.- La matriz admitancia de barra	28
B.- Método iterativo para la solución de voltaje ...	29
C.- Cálculo de potencia en barra oscilante	36
D.- Cálculo de las pérdidas totales	38
E.- Cálculo de los flujos de potencia	39
IV.- DESCRIPCION DEL PROGRAMA	44
A.- Componentes	45
B.- Programación de Y de barra	62
C.- Programación del proceso iterativo	63
V.- APLICACION AL SISTEMA PAUTE	66

LISTA DE CONTENIDOS (CONTINUACION)

	Pag.
A.- Constantes utilizadas en el programa	66
B.- Características de líneas y transformadores	68
C.- Características de demanda máxima	70
D.- Resultados del caso base	70
VI.- OPTIMIZACION	74
A.- Nuevo sistema aplicado	74
B.- Nuevas características de líneas y transformadores	74
C.- Características de demanda máxima	77
D.- Resultados finales	77
BIBLIOGRAFIA	80
APENDICE A. Notación de Computadora Empleada.....	81
APENDICE B. Listado del Programa de Computadora	85
APENDICE C. Resultados del caso base	95
APENDICE D. Resultados para Proceso de Optimización	113
APENDICE E. Ejemplo del Libro de W. Stevenson	125

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pag.
I - 1 Representación de barras	4
II - 1 Representación del circuito para "n" máquinas	9
II - 2 Circuitos equivalente de líneas	12
II - 3 Circuitos equivalente de líneas paralelas	13
II - 4 Circuitos equivalentes de transformadores	15
II - 5 Representación de transformadores con razón de transformadores fuera de lo nominal	17
II - 6 Circuitos equivalentes de transformadores de dos y tres devanados	21
III - 1 Efecto de factores de aceleración	37
IV - 1 Diagrama de flujo del programa principal	50
IV - 2 Diagrama de flujo para datos de barras	51
IV - 3 Diagrama de flujo para datos de líneas y transformadores	52
IV - 4 Diagrama de flujo para datos de líneas y transformadores (continuación)	53
IV - 5 Diagrama de flujo para hacer simétricas matrices de GPU, BPU, TAPE, BLEPU	54
IV - 6 Diagrama de flujo para calcular admitancias propias y mutuas	55
IV - 7 Diagrama de flujo para proceso iterativo	56
IV - 8 Diagrama de flujo para proceso iterativo (continuación)	57
IV - 9 Diagrama de flujo para proceso iterativo (continuación)	58

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

Figura		Pag.
IV -10	Diagrama de flujo para el cálculo de potencia en barra oscilante	59
IV -11	Diagrama de flujo para el cálculo de potencia en barra oscilante (continuación)	60
IV -12	Diagrama de flujo para cálculo de flujo de potencia	61
V - 1	Diagrama unifilar del sistema Paute - Caso base	67
VI - 1	Diagrama unifilar del sistema Paute - Optimización .	75

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pag.
V - 1 Características de líneas y transformadores para el caso base	69
V - 2 Características de demanda máxima para el caso base	71
VI - 1 Características de líneas y transformadores para la optimización	76
VI - 2 Características de demanda máxima para optimización	78

I. DEFINICION DEL FLUJO DE CARGA

La interconexión de sistemas es de vital importancia por las siguientes razones: 1) permite la posibilidad de instalar unidades de gran capacidad de generación sin necesidad de instalar unidades de reservas; 2) las compañías en sus sistemas de potencia interconectados pueden realizar economías de operación; 3) hace posible que el control automático de operación sea simple y efectivo, razón por la cual cada una de las empresas puede ajustar su sistema de generación de acuerdo a las variaciones de carga que tenga.

Se consideran el problema de operación eléctrica así como el control de generación-transmisión del sistema de potencia. El sistema de generación-transmisión incluye todos los generadores, líneas de transmisión, transformadores y todas las interconexiones con los sistemas exteriores.

Las cargas se asume que están conectadas en las barras de los transformadores, razón por la cual todas las redes más allá de estas barras no son tomadas en cuenta.

Las máquinas impulsoras por si mismas y sus fuentes de energía no son incluidas en el análisis del presente estudio.

En todo sistema de potencia es indispensable evaluar constantemente la performance de corriente y la posibilidad de poder expandir

el mismo. Para que podamos lograr esta meta necesitamos tener a la mano la suficiente información relacionada con los flujos y voltajes existentes en el sistema de potencia. La información aludida anteriormente la podemos obtener únicamente a base de un estudio de flujo de carga del sistema.

Un sistema de potencia trifásico balanceado se encuentra definido por las siguientes variables: 1) En las barras de generación o de carga tendremos que definir la potencia inyectada o extraída; la potencia reactiva inyectada o extraída; el módulo y el ángulo del voltaje; 2) En las ramas de conexión tendremos que definir el flujo de corriente a través de las mismas y el flujo de potencia activa y reactiva en el extremo de las mismas.

Lo dicho anteriormente nos lleva a la conclusión de que el estudio de flujo de carga de un sistema de potencia trifásico balanceado consiste en la determinación de las variables presentes en las barras haciendo uso de las leyes circuítales y tomando como base ciertas condiciones terminales externas exigidas en las mismas, donde están actuando generadores y cargas. Inmediatamente después de calcular las variables en las barras estamos en capacidad de determinar, por medio del uso de las impedancias de ramas, las corrientes a través de ellas y posteriormente el flujo de potencia activa y reactiva en los extremos de las mismas.

Podemos distinguir tres tipos de barras en un sistema de poten

Barra de compensación.- Es una barra de generación que es la primera en responder a cambios de carga. En ella se especifican el módulo y el ángulo del voltaje; el programa deberá calcular las potencias activa y reactiva que compensan las pérdidas en las líneas de transmisión. La representación de esta barra se muestra en la figura (I-1a).

Barra de generación.- Es una barra en la cual se especifican la potencia activa y el módulo del voltaje; también es posible especificar las potencias reactivas máxima y mínima, en cuyo caso si la potencia reactiva calculada es mayor que la máxima o menor que la mínima el programa cambiará la barra de generación a barra de carga fijando luego la potencia reactiva calculada en uno de los límites y determinando el voltaje resultante. La representación de esta barra se muestra en la figura(I-1b).

Barra de carga.- Es una barra en la cual se especifican las potencias activa y reactiva de consumo; el programa deberá calcular el módulo y el ángulo del voltaje. La representación de esta barra se muestra en la figura(I-1c).

Barra de transferencia.- Es una barra en la cual no existe ni generación ni carga. La representación de esta barra se muestra en la figura (I-1d).

La ecuación que describe el rendimiento de la red de un siste

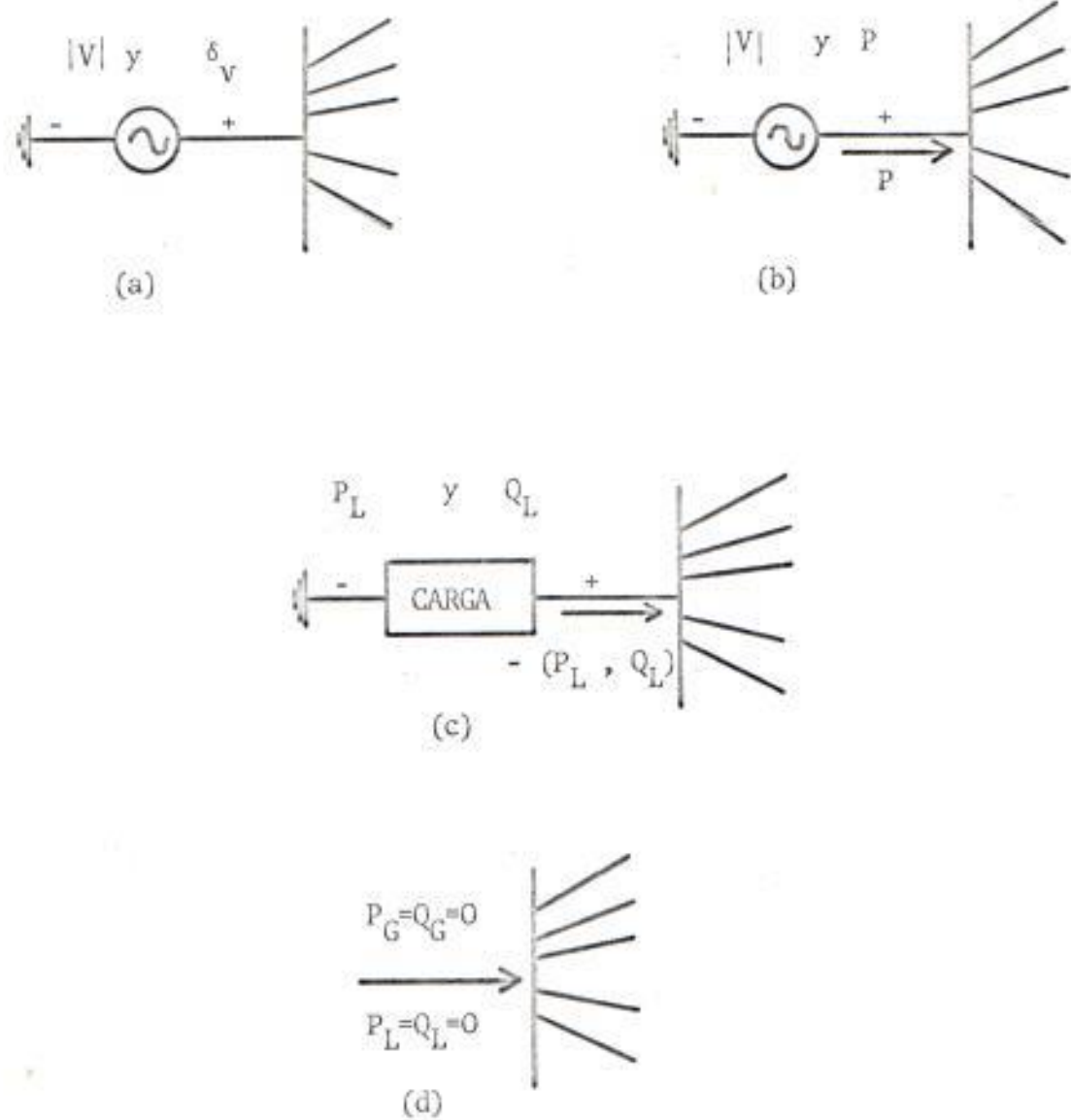


Figura I-1.- Representación de barras

- a) Barra de compensación
- b) Barra de generación
- c) Barra de carga
- d) Barra de transferencia

ma de potencia usando el método nodal y las admitancias es la siguiente:

$$\bar{I} = \bar{Y} \bar{V} \quad (I-1)$$

La admitancia \bar{Y} es la admitancia de barra y es una matriz si métrica formada por las admitancias propias y mutúas; éstas incluirán los efectos de elementos shunt tales como capacitores estáticos y reactores, cargas de líneas y elementos shunt de transformadores e quivalentes cuando en la red está incluida la barra de tierra; si la barra de tierra no es incluida en la red los elementos de la matriz de admitancia \bar{Y} no incluirán los efectos de elementos shunt.

El voltaje de barras se ha designado como V mientras que la co rriente de entrada a las mismas se ha designado como I . La potencia compleja se encuentra íntimamente relacionada con los voltajes y corrientes de las barras por medio de la siguiente ecuación básica:

$$S = P - jQ = IV^* \quad (I-2)$$

En esta ecuación S es la potencia aparente, P la potencia acti va y Q la potencia reactiva en las barras. Podemos observar que la potencia es una función cuadrática del voltaje, lo cual origina la - formación de una serie de ecuaciones cuya solución es posible a base de un proceso iterativo que será definido posteriormente.

Existen muchas formas de resolver los problemas de flujo de - carga de un sistema de potencia; la primera de ellas consite en resol ver el conjunto de ecuaciones formadas sin la ayuda de otro medio que

no sea sino para facilitar cálculos aritméticos. Como se puede observar este método es el más primitivo y por lo tanto implica mayor posibilidad de error y mayor tiempo de trabajo.

La segunda forma consiste en utilizar un analizador de redes de corriente alterna; éste es un método muy eficaz de solución debido a que se pueden cambiar las condiciones del problema con mucha facilidad y por lo mismo sin mayor trabajo se puede resolver el problema varias veces consecutivamente para variar alternativas. Lo negativo de este método de solución se puede ver en los resultados ya que éstos no son de precisión absoluta debido a la participación humana.

Por último el método más eficaz para la resolución de problemas de flujo de carga es el método digital por ser el más preciso, el más rápido y por lo tanto el método que vamos a usar en nuestro estudio.

II. REPRESENTACION DEL SISTEMA

Un sistema de potencia consiste en principio de una fuente de energía (generador), de una carga que consume la energía producida por el generador y de un elemento que une los dos anteriores llamada línea y que sirve para transportar la energía producida.

Debido a la gran demanda de energía eléctrica los sistemas de potencia están constituidos por varios sistemas interconectados y varias cargas conectadas al sistema general; por lo tanto los sistemas de potencia constan generalmente de: generadores, transformadores, líneas de transmisión, elementos concentrados (condensadores reactores y de cargas).

A. Generadores.- Estos estarán representados en forma de potencias generadas; deberá especificarse el módulo y el ángulo del voltaje si se tratara de un generador cualquiera del sistema deberá especificarse la potencia activa generada y el módulo del voltaje que se quiere mantener.

La ecuación característica que indica las potencias suplidas a la red es la siguiente:

$$P - jQ = \overline{IV} \quad (II-1)$$

Como $\overline{I} = \overline{YV}$, entonces:

$$P - jQ = \overline{YV} = \overline{YV} = YV \angle \theta \quad (II-2)$$

$$P - jQ = YV (\cos \theta - j \sin \theta) \quad (II-3)$$

Por lo tanto las potencias activa y reactiva están dadas por

las siguientes ecuaciones:

$$P = VY \cos \theta \quad (\text{II-4})$$

$$Q = VY \sin \theta \quad (\text{II-5})$$

Como la mayoría de los problemas de sistemas de potencia consideran varias máquinas, hay que tomar en cuenta la influencia interna de las máquinas. A continuación se indica en la figura (II-1) la representación esquemática de un sistema de "n" máquinas.

Entonces la potencia aplicada al sistema por cada una de las máquinas será dada por:

$$\begin{aligned} P_1 - JQ_1 &= \bar{I}_1 \bar{V}_1^* \\ P_2 - JQ_2 &= \bar{I}_2 \bar{V}_2^* \\ \vdots & \\ P_n - JQ_n &= \bar{I}_n \bar{V}_n^* \end{aligned} \quad (\text{II-6})$$

Las corrientes suplidas por cada una de las "n" máquinas son función directa de los voltajes aplicados de tal forma que se tienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= Y_{11} \bar{V}_1 \dots\dots\dots Y_{1n} \bar{V}_n \\ \bar{I}_2 &= Y_{21} \bar{V}_1 \dots\dots\dots Y_{2n} \bar{V}_n \\ \vdots & \\ \bar{I}_n &= Y_{n1} \bar{V}_1 \dots\dots\dots Y_{nn} \bar{V}_n \end{aligned}$$

Si el subíndice está formado por dos números iguales se trata de las admitancias propias; si está formada por dos números distintos se trata de las admitancias mutuas o de transferencias entre las

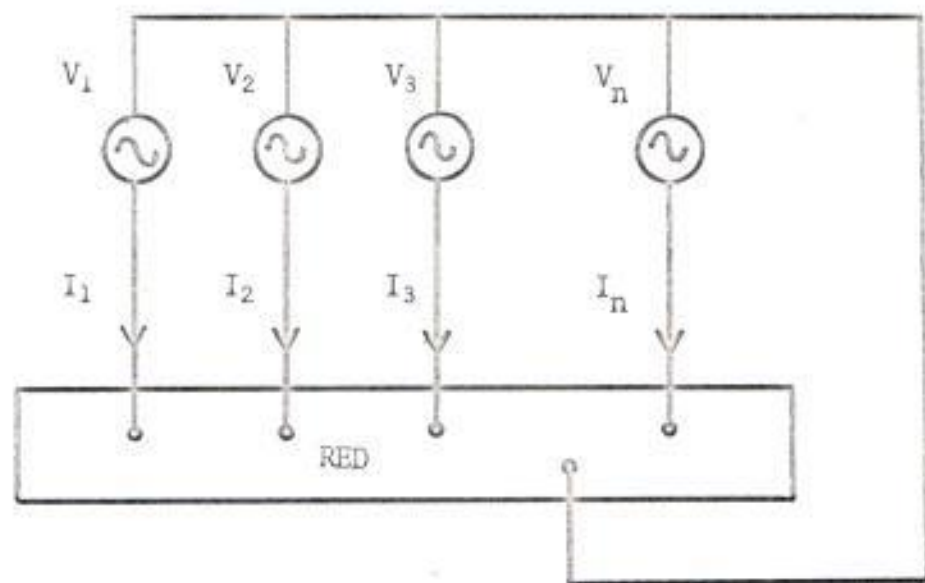


Figura II-1. Representación del circuito para "n" máquinas

máquinas signadas con los números del subíndice.

Si reemplazamos la ecuación (II-7) en la ecuación (II-6) obtenemos:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= JQ_1 = Y_{11} \bar{V}_1 V_1^* \dots \dots \dots Y_{1n} \bar{V}_1 V_1^* \\
 P_2 &= JQ_2 = Y_{21} \bar{V}_2 V_2^* \dots \dots \dots Y_{2n} \bar{V}_2 V_2^* \\
 &\vdots \\
 P_n &= JQ_n = Y_{n1} \bar{V}_n V_n^* \dots \dots \dots Y_{nn} \bar{V}_n V_n^* \quad (\text{II-8})
 \end{aligned}$$

B. Cargas

Estas se consideran en los sistemas de potencia concentradas en algunos puntos, reuniendo en él todas las cargas pequeñas que componen el sistema de distribución y formando parte de éste cada una de las cargas que funcionan a base de electricidad. Por lo tanto las cargas serán representadas en forma de potencias de consumo en las barras respectivas.

C. Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión tienen esencialmente dos propósitos: 1) transportar potencia desde una fuente de generación hasta un sitio de consumo; 2) conectar sistemas de potencia, es decir, transportar energía de un sistema a otro en casos de emergencia o para estabilizar el buen servicio de los sistemas interconectados.

Las líneas de transmisión se pueden representar por medio de una representación de línea corta como se muestra en la figura (II-2a). El efecto de la capacitancia para estas líneas es despreciable razón por la cual no se la considera.

Para líneas de longitud media en circuitos de alto voltaje la capacitancia juega un papel muy importante; el circuito equivalente de éstas se representa por medio del circuito equivalente nominal Π como se muestra en la figura (II-2b). En este circuito equivalente podemos distinguir los siguientes elementos:

- R = Resistencia de secuencia positiva de la línea.
- X = Reactancia inductiva de secuencia positiva de la línea.
- Y' = Admitancia de secuencia positiva debida a la capacitancia shunt de la línea.

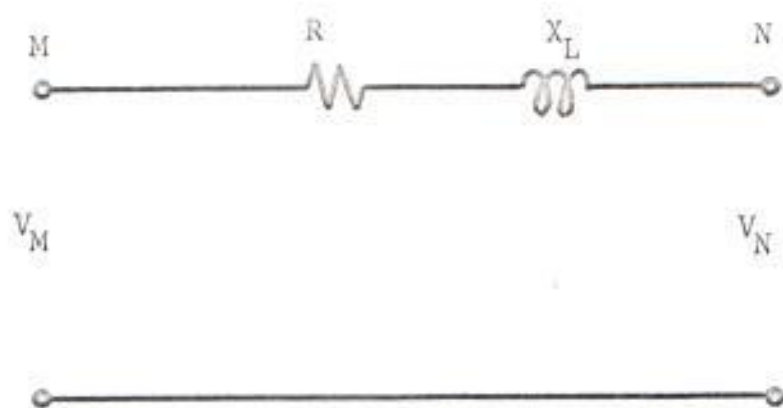
La impedancia serie de las líneas de transmisión es la impedancia total por fase mientras que la admitancia en paralelo colocada a cada lado de la línea es la mitad de la admitancia total Y'. Podemos tener el caso de que existan dos líneas de transmisión en paralelo conectadas a las mismas barras; en este caso tendremos que la resistencia, la reactancia inductiva y la admitancia equivalentes estarían dadas por las siguientes expresiones:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{II- 9})$$

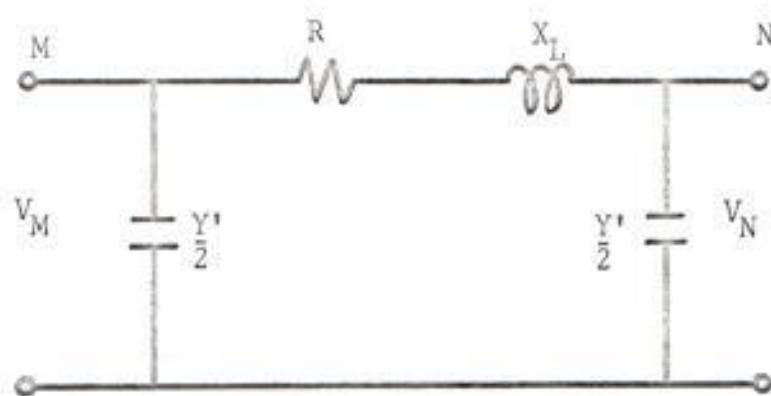
$$X_T = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \quad (\text{II -10})$$

$$\frac{Y'}{2} T = \frac{Y'}{2} 1 + \frac{Y'}{2} 2 \quad (\text{II -11})$$

Entonces los circuitos equivalentes respectivos se muestran en las figuras (II-3a) y (II-3b). Si los elementos de las dos líneas en paralelo fueran iguales, es decir que $R_1 = R_2$, $X_1 = X_2$ y $\frac{Y'}{2} 1 =$



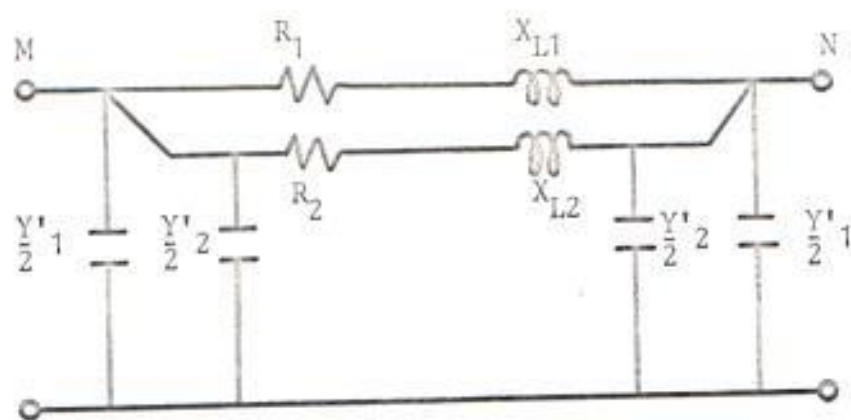
(a)



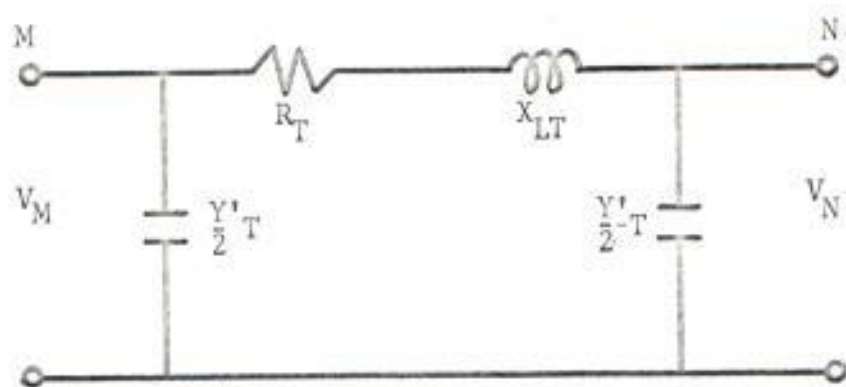
(b)

Figura II-2. Circuito equivalentes de líneas

- a) Representación de líneas cortas
- b) Representación de líneas medias



(a)



(b)

Figura II-3. Circuitos equivalentes de líneas paralelas
 a) Circuito equivalente de dos líneas paralelas
 b) Circuito resultante de dos líneas paralelas

$\frac{Y'}{2}$, entonces la resistencia, reactancia y admitancia equivalentes están dadas por las siguientes expresiones:

$$R_T = \frac{1}{2} R_1 = \frac{1}{2} R_2 \quad (\text{II-12})$$

$$X_T = \frac{1}{2} X_1 = \frac{1}{2} X_2 \quad (\text{II-13})$$

$$\frac{Y'}{2} T = 2 \frac{Y'}{2} 1 = 2 \frac{Y'}{2} 2 \quad (\text{II-14})$$

D. Transformadores de potencia

Los transformadores de potencia son aparatos que se utilizan con el fin de transferir energía de un circuito a otro. En principio está constituido por dos circuitos independientes eléctricamente pero acoplados magnéticamente el uno con el otro.

El diagrama de una línea de un transformador se muestra en la figura (II-4a); la resistencia, la reactancia de dispersión y el recorrido de la corriente de magnetización se muestra en la figura (II-4b). Como la corriente magnetización de un transformador es muy pequeña comparada con la corriente de plena carga, la admitancia en paralelo se puede despreciar tal como se muestra en la figura (II-4c), representación que es usada en la solución de flujo de carga para transformadores con tal nominal. Generalmente la razón de transformación de transformadores es cambiada por medio de un cambiador de tapa; para transformadores con razón de transformación fuera de lo nominal se utiliza el diagrama de una línea de la figura (II-5a). Para representar un transformador con razón de transformación fuera de lo nominal se conecta un autotransformador ideal como se muestra en la figura (II-5b).

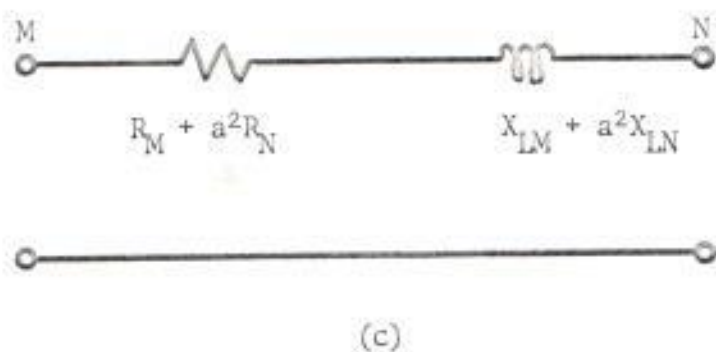
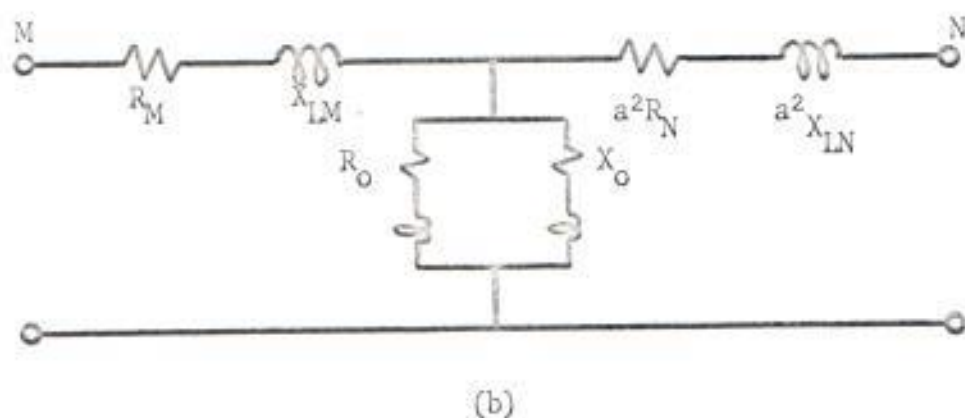
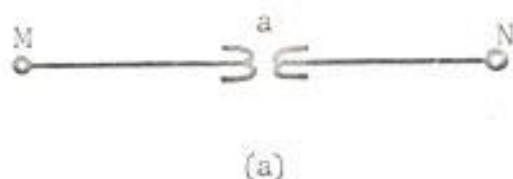


Figura II-4. Circuito equivalente de transformadores

- a) Diagrama de una línea
- b) Circuito equivalente visto desde el primario
- c) Circuito equivalente aplicado

El circuito equivalente utilizado para el estudio es el circuito equivalente que se muestra en la figura (II-5c) y sus parámetros se pueden derivar de la siguiente forma: en la barra M la corriente terminal I_M del transformador es:

$$I_M = i_{tN}/a \quad (\text{II-15})$$

En esta ecuación i_{tN} es la corriente que fluye de t a n y está expresada por la siguiente ecuación:

$$i_{tN} = (V_t - V_N)y_{MN} \quad (\text{II-16})$$

Si reemplazamos la ecuación (II-16) en la ecuación (II-15) obtenemos:

$$I_M = (V_t - V_N)y_{MN}/a \quad (\text{II-17})$$

Como:

$$V_t = V_M/a \quad (\text{II-18})$$

$$I_M = (V_M - aV_N)y_{MN}/a^2 \quad (\text{II-19})$$

De igual forma la corriente terminal I_N en la barra N está dada por la siguiente expresión:

$$I_N = (V_N - V_t)y_{MN} \quad (\text{II-20})$$

Si reemplazamos la ecuación (II-18) en la ecuación (II-20) obtenemos la siguiente expresión:

$$I_N = (aV_N - V_M)y_{MN}/a \quad (\text{II-21})$$

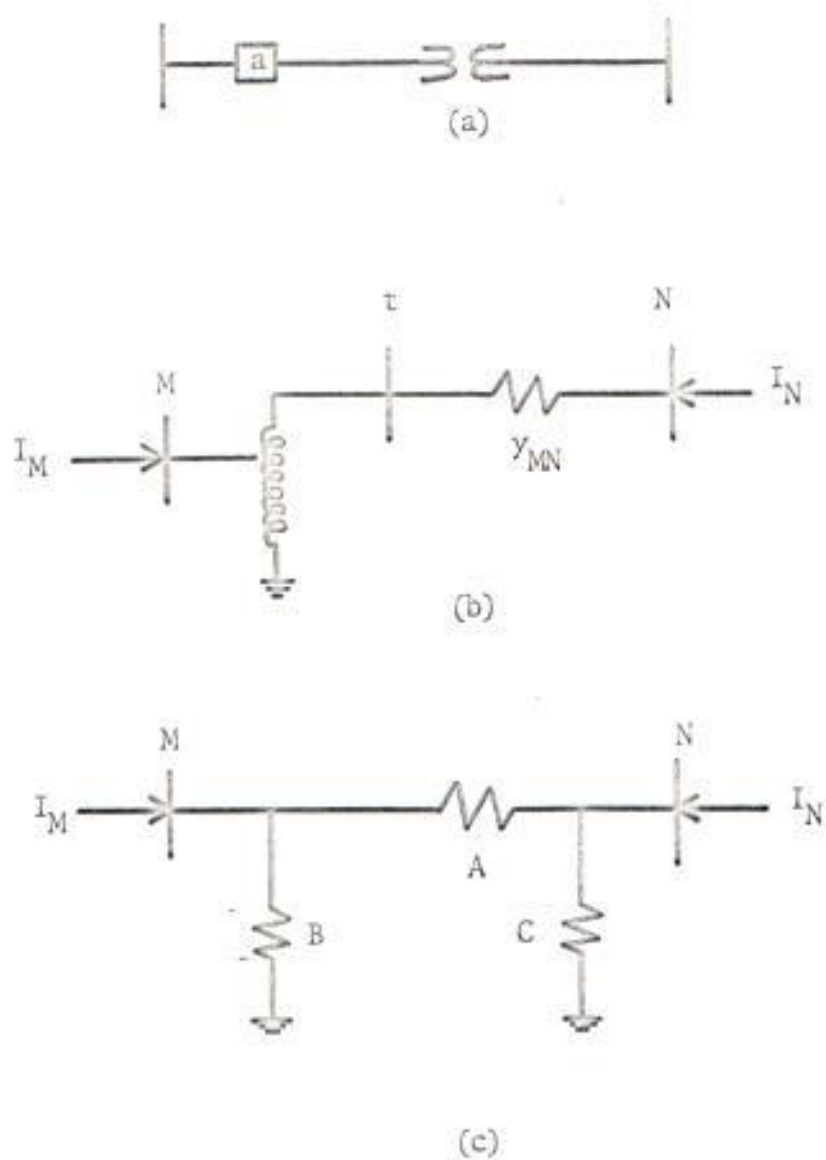


Figura II-5. Representación de transformadores con razón de transformación fuera de lo nominal

- Diagrama de una línea
- Circuito equivalente
- Circuito equivalente

Las corrientes terminales para el circuito equivalente son:

$$I_M = (V_M - V_N) A + V_M B \quad (\text{II-22})$$

$$I_N = (V_N - V_M) A + V_N C \quad (\text{II-23})$$

Si hacemos $V_M=0$ y $V_N = 1$ en la ecuación (II-19) obtenemos la siguiente expresión:

$$I_M = y_{MN}/a \quad (\text{II-24})$$

Si hacemos $V_M=0$ y $V_N = 1$ en la ecuación (II-22) ésta se transforma en:

$$I_M = -A \quad (\text{II-25})$$

Por lo tanto si igualamos las ecuaciones (II-24) y (II-25) el parámetro A estará dado por la siguiente expresión:

$$A = y_{MN}/a \quad (\text{II-26})$$

De igual manera sustituyendo $V_M=0$ y $V_N = 1$ en las ecuaciones (II-21) y (II-23) obtenemos que:

$$I_N = y_{MN} \quad (\text{II-27})$$

$$I_N = A + C \quad (\text{II-28})$$

Entonces si igualamos las ecuaciones (II-27) y (II-28) vamos a obtener el parámetro C en función del parámetro A

$$y_{MN} = A + C$$

$$C = y_{MN} - A \quad (\text{II-29})$$

Si reemplazamos en la ecuación anterior la ecuación (II-26) obtenemos la expresión para el parámetro C:

$$C = y_{MN} - y_{MN}/a$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{a}\right) y_{MN} \quad (\text{II-30})$$

Ahora si igualamos las ecuaciones (II-19) y (II-22) y reemplazamos el valor del parámetro A obtenemos el parámetro B:

$$\begin{aligned}
 (V_M - aV_N)y_{MN}/a^2 &= (V_M - V_N)y_{MN}/a + V_M B \\
 B &= y_{MN}/a^2 - y_{MN}/a \\
 B &= \left(\frac{1}{a} - 1\right)y_{MN}/a \quad (II-31)
 \end{aligned}$$

Por lo tanto el circuito equivalente expresado en función de la razón de transformación y de la admitancia se muestra en la figura (II-6a). Cuando la razón de transformación del transformador la rerepresentamos en la barra M cuando está conectado de M a N, la admitancia propia de la barra M está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 Y_{MM} &= Y_{M1} + y_{MN}/a + y_{MN} + \left(\frac{1}{a} - 1\right)y_{MN}/a \\
 Y_{MM} &= Y_{M1} + Y_{M2} + \dots + y_{MN}/a^2 + y_{MN} \quad (II-32)
 \end{aligned}$$

La admitancia propia de la barra N está dada por la siguiente expresión:

$$Y_{NN} = Y_{N1} + Y_{NM} + Y_{NN} \quad (II-33)$$

Ahora bien la admitancia mutua de la barra M a la N está dada por la expresión:

$$Y_{MN} = -y_{MN}/a \quad (II-34)$$

La admitancia mutua de la barra N a la M está dada por la siguiente expresión:

$$Y_{NM} = -y_{NM}/a \quad (II-35)$$

Para un transformador de tres devanados es necesario representarlo como un grupo de transformadores de dos devanados; el circuito equivalente se muestra en la figura (II-6b). En este circuito equivalente se distinguen los siguientes elementos:



- Z_p Impedancia del devanado primario
 Z_s Impedancia del devanado secundario
 Z_t Impedancia del devanado terciario

Estas impedancias pueden ser obtenidas si se conocen las impedancias medidas desde los circuitos primario, secundario y terciario. Entonces las impedancias referidas anteriormente tienen las siguientes expresiones:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s \quad (\text{II-36})$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t \quad (\text{II-37})$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t \quad (\text{II-38})$$

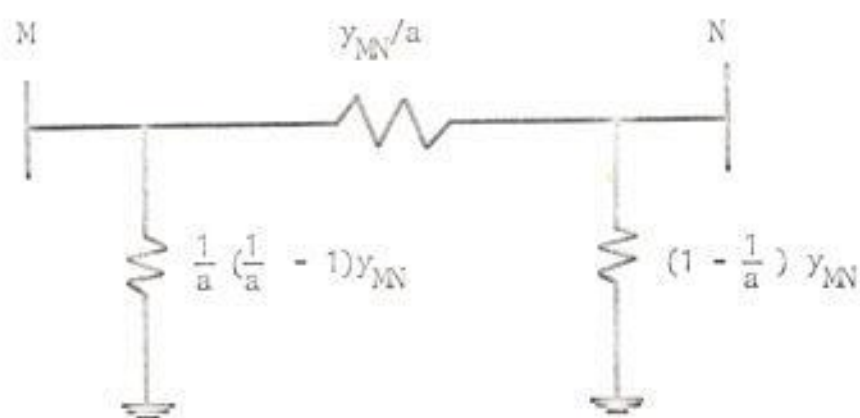
- Z_{ps} Impedancia medida en el primario con el secundario en cortocircuito y el terciario abierto
 Z_{pt} Impedancia medida en el primario con el terciario en cortocircuito y el secundario abierto
 Z_{st} Impedancia medida en el secundario con el terciario en cortocircuito y el primario abierto

Entonces resolviendo el sistema de ecuaciones presentado anteriormente se obtienen las siguientes expresiones:

$$Z_p = 1/2 (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \quad (\text{II-39})$$

$$Z_s = 1/2 (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \quad (\text{II-40})$$

$$Z_t = 1/2 (Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \quad (\text{II-41})$$



(a)

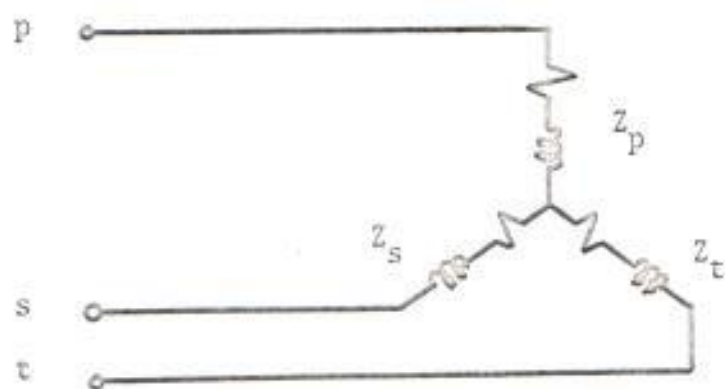


Figura II-6. Circuito equivalentes de transformadores de dos y tres devanados

- a) Circuito equivalente de transformadores con parámetros calculados
- b) Circuito equivalente de transformador de tres devanados

E. Reactores y condensadores en derivación

Los reactores se instalan normalmente en los sistemas de potencia con el fin de limitar la magnitud de las corrientes de cortocircuito y de reducir las perturbaciones de la tensión en el resto del sistema. Si los reactores están conectados en serie su función es la de ser limitadores de corriente, para reducir las corrientes de cortocircuito y las perturbaciones de la tensión; si los reactores están conectados en paralelo tienen como finalidad la de neutralizar el efecto de las corrientes de carga o corrientes capacitivas.

Los condensadores en derivación se los instala con el fin de mejorar el factor de potencia y de aumentar la tensión en el sistema.

Los datos de entrada al programa asumen un diagrama de una línea del sistema y la representación de impedancias y tapa en por unidad. El diagrama de una línea indica una fase típica del sistema trifásico balanceado. Puesto que las cantidades físicas como resistencias, voltios, corrientes, etc. varían de valores pequeños a grandes es conveniente representar estas cantidades como fracciones de cantidades bases de tal forma que cualquier cantidad en por unidad será igual al valor real dividido para el valor base:

$$V_{pu.} = \frac{V_{real}}{V_{base}} \quad (II-42)$$

Es conveniente en el sistema de potencia elegir una base trifá

sica de voltamperios para el sistema total y un voltaje base para cada nivel de voltaje en el sistema; las demás cantidades se derivan de las anteriores. Por lo tanto:

$$MVA_f = 1/3 MVA_t \quad (II-43)$$

$$V_{B-1n} = 1/3 V_{B-11} \quad (II-44)$$

$$I_{Base} = 1/3 KVA_{t-base} / V_{base-11} \quad (II-45)$$

$$Z_{base} = V_{base-1n} / I_{base} \quad (II-46)$$

$$Z_{base} = (V_{base-11})^2 / KVA_{t-base} \quad (II-47)$$

Si el voltaje base está en KV y los voltamperios trifásicos en MVA, entonces:

$$Z_{base} = (KV_{base})^2 / MVA_{base} \quad (II-48)$$

A menudo es necesario convertir un conjunto de impedancias en por unidad de una base a otra base; esto se consigue de la siguiente forma: si reemplazamos la ecuación (II-48) en la ecuación (II-42) se obtiene la expresión:

$$Z_{p.u.} = \frac{(Z_{real}) MVA_{base}}{(KV_{base})^2} \quad (II-49)$$

Esta ecuación nos demuestra que la impedancia en por unidad es directamente proporcional a los MVA_{base} e inversamente proporcional al cuadrado de la tensión base. Por lo tanto, para cambiar una impedancia en por unidad de una base a otra se aplicará la siguiente ecuación:

$$Z_{2p.u.} = Z_{1p.u.} \frac{(KV_{base 1})^2 MVA_{base 2}}{(KV_{base 2})^2 MVA_{base 1}} \quad (II-50)$$

Los valores de resistencia y reactancia de líneas de transmisión vienen dadas en tablas en función del tipo de conductor, del calibre del conductor, del espaciamiento entre conductores y de la frecuencia de operación y temperatura. Supongamos una línea de 636.000 C.M ACSR de 30 millas de longitud de 26 hilos; viendo las tablas A.2 y A.4 del libro de William D. Stevenson obtenemos las siguientes características; resistencia en ohmios por milla, reactancia inductiva en ohmios por milla a 1 pie de separación y el factor de separación de la reactancia inductiva en ohmios por milla todas éstas a 60 ciclos. Entonces:

$$R = 0.1618\Omega/\text{milla}$$

$$X = 0.412\Omega/\text{milla}$$

$$FX = 0.3015\Omega/\text{milla}$$

Entonces la impedancia de la línea Z será:

$$Z = R + j XL$$

$$XL = X + FX = 0.412 + 0.3015$$

$$XL = 0.7135\Omega/\text{milla}$$

$$Z = 0.1618 + j 0.7135\Omega/\text{milla}$$

$$Z = 30(0.1618 + j 0.7135)\Omega$$

$$Z = 4.854 + j 21.405 \Omega$$

Esta impedancia en por unidad sobre una base de 115KV y 100 MVA estará dada por:

$$Z_{p.u.} = \frac{(4.854 + j 21.405) 100}{115^2}$$

$$Z_{p.u.} = 0.0367 + j 0.1619$$

El efecto de la capacitancia distribuída también se puede obtener utilizando las tablas A.2 y A.5 del libro de William D. Stevenson, para lo cual se obtienen la resistencia conocida ya, la reactancia capacitiva en ohmios por milla a 1 pie de separación y el factor de separación de la reactancia capacitiva, todas éstas a 60 ciclos. Entonces:

$$X_C = 0.0946 \text{ } \Omega/\text{milla}$$

$$FX_C = 0.0737 \text{ } \Omega/\text{milla}$$

$$XC = C_C + FX_C$$

$$XC = 0.0946 + 0.0737$$

$$XC = 0.1683 \text{ } \Omega/\text{milla}$$

$$XC = 30 (0.1683) \text{ } \Omega$$

$$XC = 5.04 \text{ } \Omega$$

$$XC_{p.u.} = \frac{5.04 \times 100}{115^2}$$

$$XC_{p.u.} = 0.038$$

III. TECNICA DE SOLUCION

El método a seguir para la solución del estudio de flujo de carga que nos ocupa es el método digital por Corrección de Voltaje. Esta solución digital para el estudio de flujo de carga abarca una serie de pasos que serán a continuación definidos.

a) Descripción de las conexiones de la red y de las impedancias respectivas. Con el diagrama unifilar del sistema reducido a la base seleccionada procedemos a identificar cada una de las barras para lo cual designamos a la barra oscilante como la barra número 1 y las demás barras se numeran en orden ascendente hasta completar el total de barras del sistema; al mismo tiempo las ramas o líneas que dan identificadas.

La razón de transformación a de los transformadores puede ser mayor o menor que la unidad. En nuestro estudio la razón a a 1 se orientará con el terminal 1 conectado a la rama representativa de la impedancia de dispersión del transformador asociado.

Entonces a continuación se hace una tabulación de las impedancias asociadas con el sistema en por unidad. Cada impedancia de un transformador se especifica sobre el voltaje base que está asociado con la barra opuesta a la que está conectada la razón de transformación a.

b) Procedemos ahora a tabular las condiciones terminales en las barras. En las columnas de P y Q ubicaremos las potencias de generación y carga tanto activa como reactivas; luego procedemos a calcular las potencias netas en las barras para lo cual aplicamos las siguientes fórmulas:

$$P_K = P_G - P_C \quad (\text{III-1})$$

$$Q_K = Q_G - Q_C \quad (\text{III-2})$$

P_K	Potencia activa neta
Q_K	Potencia reactiva neta
P_G	Potencia activa generada
P_C	Potencia activa de consumo
Q_G	Potencia reactiva generada
Q_C	Potencia reactiva de consumo

Como la potencia reactiva generada Q_G por un generador originalmente se desconoce el programa deberá calcularla durante el proceso iterativo para poder realizar el cálculo de los voltajes.

Ahora procedemos a calcular los componentes de las admitancias de líneas utilizando las fórmulas que a continuación deducimos:

$$Z = R + j X$$

$$Y = \frac{1}{R + j X}$$

$$Y = \frac{R - j X}{R^2 + X^2}$$

Como: $Y = G + j B$

Entonces: $G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (\text{III-3})$

$$B = - \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (\text{III-4})$$

A. La matriz admitancia de barra

La matriz admitancia de barra es una matriz cuadrada simétrica que está formada por elementos de la diagonal y fuera de la diagonal los elementos de la diagonal corresponden a las admitancias propias y los elementos fuera de la diagonal corresponden a las admitancias mütuas.

La admitancia propia de cualquier barra K, llamada $Y_{KK} = G_{KK} + j B_{KK}$ está constituida por la suma de todas las admitancias de líneas que concurren a dicha barra. En cambio la admitancia mütua de la línea comprendida entre la barra K y la M, llamada $Y_{KM} = G_{KM} + j B_{KM}$, es la negativa de la suma de las admitancias de líneas que están conectadas entre las barras K y M.

La presencia de un transformador en serie con una línea influye en la admitancia propia de la barra a la cual el transformador está conectado y en la admitancia mütua que está asociada con la línea en cuestión. Supongamos que tenemos una línea de admitancia $y_{12} = g_{12} + j b_{12}$ conectada entre las barras 1 y 2; si nos referimos a la figura (II-6a) tendremos que:

$$\begin{aligned} G_{22} &= g_{12}/a + (1 - \frac{1}{a}) g_{12} \\ G_{22} &= g_{12} \\ B_{22} &= b_{12}/a + (1 - \frac{1}{a}) b_{12} \end{aligned}$$

$$B_{22} = b_{12}$$

Por lo tanto la admitancia propia de la barra 2 es:

$$Y_{22} = G_{22} + jB_{22} = g_{12} + jb_{12}$$

Ahora la admitancia propia de la barra 1 es:

$$G_{11} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) g_{12} + g_{12}/a$$

$$G_{11} = g_{12}/a^2$$

$$B_{11} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) b_{12} + b_{12}/a$$

$$B_{11} = b_{12}/a^2$$

Por lo tanto la admitancia propia será:

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} = \frac{1}{a^2} (g_{12} + j b_{12})$$

B. Método iterativo para la solución de voltaje

El procedimiento iterativo por corrección de voltaje como un conjunto de voltaje terminales asumidos para hacerlos converger a un conjunto corregido de voltajes los cuales satisfarán las potencias terminales de entrada prescritas.

La ecuación básica utilizada por el método iterativo presente para $n = 1$ hasta el número total de barras N , es la siguiente:

$$V_K = \frac{P_K - jQ_K}{Y_{KK} V_K^*} - \sum Y_{Kn} V_n \quad K \neq n \quad (\text{III-5})$$

$$V_K = \frac{P_K - jQ_K - V_K^* \sum Y_{Kn} V_n}{Y_{KK} V_K^*} \quad (\text{III-6})$$

Entonces el proceso iterativo parte desde la barra 2 con un conjunto de voltaje asumidos $V = e + j f$, excepto en las barras de generación y la oscilante. Los voltajes asumidos es necesario que no estén muy alejados de las soluciones porque esto puede dar lugar a que no haya convergencia. La magnitud del voltaje y el ángulo de la barra oscilante así como la magnitud del voltaje en la barra de generación son conocidos y por lo tanto utilizados en el procedimiento.

Los voltajes asumidos junto con las admitancias mutuas de las barras se utilizan para calcular la corriente de entrada a las mismas por aplicación del sumatorio $\sum Y_{Kn} V_n$ para $K \neq n$ de la ecuación (III-6).

$$\begin{aligned} \sum Y_{Kn} V_n &= (G_{Kn} + jB_{Kn}) (e_n + jf_n) \\ \sum Y_{Kn} V_n &= G_{Kn} e_n + jf_n G_{Kn} + jB_{Kn} e_n - B_{Kn} f_n \\ \sum Y_{Kn} V_n &= (G_{Kn} e_n - B_{Kn} f_n) + j (G_{Kn} f_n + B_{Kn} e_n) \end{aligned} \quad \text{(III-7)}$$

Si hacemos que:

$$I_r = (G_{Kn} e_n - B_{Kn} f_n) \quad \text{(III-8)}$$

$$I_i = (G_{Kn} f_n + B_{Kn} e_n) \quad \text{(III-9)}$$

$$\sum Y_{Kn} V_n = I_r + j I_i \quad \text{(III-10)}$$

Antes de continuar con el proceso se calcula la potencia reactiva si se tratara de una barra de generación. El procedimiento para este cálculo se basa en la siguiente fórmula:



$$Q_K = -\text{Im} \left[(Y_{KK} V_K + \sum Y_{Kn} V_n) V_K^* \right] \quad K \neq n \quad (\text{III-11})$$

$$Y_{KK} V_K = (G_{KK} + jB_{KK}) (e_K + jf_K)$$

$$Y_{KK} V_K = G_{KK} e_K + jB_{KK} e_K + jG_{KK} f_K - B_{KK} f_K$$

$$Y_{KK} V_K = (G_{KK} e_K - B_{KK} f_K) + j (G_{KK} f_K + B_{KK} e_K) \quad (\text{III-12})$$

Por lo tanto la potencia reactiva en proceso está expresada - por la siguiente expresión:

$$Q_K = -\text{Im} \left\{ \left[(G_{KK} e_K - B_{KK} f_K) + I_r \right] + j \left[(G_{KK} f_K + B_{KK} e_K) + I_i \right] V_K^* \right\}$$

Si hacemos que:

$$I_{Kr} = (G_{KK} e_K - B_{KK} f_K) + I_r \quad (\text{III-13})$$

$$I_{Ki} = (G_{KK} f_K + B_{KK} e_K) + I_i \quad (\text{III-14})$$

$$Q_K = -\text{Im} \left[(I_{Kr} + jI_{Ki}) V_K^* \right] \quad (\text{III-15})$$

$$Q_K = -\text{Im} \left[(I_{Kr} + jI_{Ki}) (e_K - jf_K) \right]$$

$$Q_K = -\text{Im} \left[(I_{Kr} e_K + jI_{Ki} e_K - jI_{Kr} f_K + I_{Ki} f_K) \right]$$

$$Q_K = -\text{Im} \left[(I_{Kr} e_K + I_{Ki} f_K) + j (I_{Ki} e_K - I_{Kr} f_K) \right] \quad (\text{III-16})$$

$$Q_K = - (I_{Ki} e_K - I_{Kr} f_K)$$

$$Q_K = (I_{Kr} f_K - I_{Ki} e_K) \quad (\text{III-17})$$

Calculados los reactivos en barras de generación continuamos - con el proceso iterativo y calculamos de la ecuación (III-6) el término $V_K^* \sum Y_{Kn} V_n$ que corresponde a la entrada de potencia.

$$V_K^* \sum Y_{Kn} V_n = (e_K - jf_K) (I_r + jI_i) \quad (\text{III-18})$$

$$V_K^* \sum Y_{Kn} V_n = I_r e_K - j I_r f_K + j I_i e_K + I_i f_K$$

$$V_K^* \sum Y_{Kn} V_n = (I_r e_K + I_i f_K) + j(I_i e_K - I_r f_K)$$

Si hacemos que:

$$P_{in} = (I_r e_K + I_i f_K) \quad (\text{III-19})$$

$$Q_{in} = (I_i e_K - I_r f_K) \quad (\text{III-20})$$

$$V_K^* \sum Y_{Kn} V_n = P_{in} + j Q_{in} \quad (\text{III-21})$$

De esta forma la ecuación (III-6) se transforma y se convierte en:

$$V_K = \frac{P_K - jQ_K - P_{in} - jQ_{in}}{Y_{KK} V_K^*}$$

$$V_K = \frac{(P_K - P_{in}) + j(-Q_K - Q_{in})}{Y_{KK} V_K^*} \quad (\text{III-22})$$

Si hacemos que:

$$P_R = P_K - P_{in}$$

$$Q_R = -Q_K - Q_{in}$$

$$Y_{KK} V_K^* = (G_{KK} + jB_{KK}) (e_K - jf_K)$$

$$Y_{KK} V_K^* = G_{KK} e_K - jG_{KK} f_K + jB_{KK} e_K + B_{KK} f_K$$

$$Y_{KK} V_K^* = (G_{KK} e_K + B_{KK} f_{KK}) + j(B_{KK} e_K - G_{KK} f_K) \quad (\text{III-23})$$

Si hacemos que:

$$I_{br} = (G_{KK} e_K + B_{KK} f_K) \quad (\text{III-24})$$

$$I_{bi} = (B_{KK} e_K - G_{KK} f_K) \quad (\text{III-25})$$

Por lo tanto:

$$Y_{KK} V_K^* = I_{br} + jI_{bi} \quad (\text{III-26})$$

Entonces el voltaje para cualquier barra del sistema está dado por la siguiente expresión:

$$V_K = \frac{P_R + jQ_R}{I_{br} + jI_{bi}} \quad (\text{III-27})$$

$$V_K = \frac{(P_R + jQ_R) (I_{br} - jI_{bi})}{I_{br}^2 + I_{bi}^2}$$

$$V_K = \frac{(P_R I_{br} + Q_R I_{bi}) + j(Q_R I_{br} - P_R I_{bi})}{I_{br}^2 + I_{bi}^2} \quad (\text{III-28})$$

Por lo tanto las componentes del voltaje corregido en las barras están dadas por las siguientes expresiones:

$$V_{Kr} = \frac{P_R I_{br} + Q_R I_{bi}}{I_{br}^2 + I_{bi}^2} \quad (\text{III-29})$$

$$V_{Ki} = \frac{Q_R I_{br} - P_R I_{bi}}{I_{br}^2 + I_{bi}^2} \quad (\text{III-30})$$

Inmediatamente después de haber obtenido las componentes de los voltajes de barras se las compara con el índice de precisión fijado con anterioridad; si el voltaje es menor que el índice se ha llegado a la convergencia; si es mayor la razón de convergencia podemos aumentarla aplicando un factor de aceleración a la solución aproximada de cada iteración, de la siguiente forma: sean p y v los factores de aceleración respectivos para las componentes real e imaginaria de los voltajes. Entonces los voltajes acelerados serán:

$$V_{Kr}(\text{acelerado}) = e_K + p(V_{Kr} - e_K) \quad (\text{III-31})$$

$$V_{Ki}(\text{acelerado}) = f_K + v(V_{Ki} - f_K) \quad (\text{III-32})$$

Obtenidos los voltajes corregidos, acelerados o no, se procede si se trata de barras de carga o de transferencia a calcular la magnitud y el ángulo de los voltajes en dichas barras de la siguiente forma:

$$V_K = \sqrt{(V_{Kr}^2 + V_{Ki}^2)} \quad (\text{III-33})$$

$$\angle V_K = \text{Tg}^{-1}(V_{Ki}/V_{Kr}) \quad (\text{III-34})$$

Pero si se tratara de una barra de generación es indispensable mantener constante el voltaje especificado para lo cual primero calculamos la magnitud del voltaje corregido; luego dividimos la magnitud del voltaje especificado para la magnitud del voltaje corregido y este cociente lo multiplicamos por la componente respectiva del voltaje corregido para obtener las componentes de la tensión corregida del valor especificado. Por lo tanto tenemos:

$$V_K = \sqrt{(V_{Kr}^2 + V_{Ki}^2)}$$

$$V_R = \frac{|V_S|}{|V_K|} (V_{Kr}) \quad (\text{III-35})$$

$$V_I = \frac{|V_S|}{|V_K|} (V_{Ki}) \quad (\text{III-36})$$

$$V_K = \sqrt{V_R^2 + V_I^2}$$

$$\angle V_K = \text{Tg}^{-1}(V_I/V_R)$$

Entonces obtenidos la magnitud y el ángulo del voltaje en la barra 2, éste se utiliza con los demás voltajes asumidos para iniciar el cálculo del voltaje en la siguiente barra en igual forma. El proceso continúa hasta completar el primer grupo de iteraciones.

El proceso se repite una y otra vez en tantos grupos de iteraciones hasta tener las soluciones óptimas de los voltajes. Obtenidas éstas se utilizan para poder computar la información completa acerca de las condiciones terminales y el cálculo del flujo de corriente y de potencia a través de las líneas que componen el sistema de potencia.

Como podemos ver el método de corrección de voltaje usado para la solución del proceso iterativo puede ser acelerado, es decir, puede llegar a la misma precisión en un menor número de iteraciones

si las correcciones hechas son incrementadas multiplicando por un factor mayor que la unidad.

La figura (III-1) muestra el efecto de la aceleración ploteando el número de iteraciones necesarias para llegar a una solución con una misma precisión contra el factor de aceleración usado para multiplicar la parte imaginaria del voltaje corregido. La familia de curvas mostrada se da para el factor de aceleración usado con la parte real del fasor del voltaje corregido. Se puede notar que un factor de 1.4 para la parte real y 1.5 para la parte imaginaria dan lugar a una solución más rápida; además es interesante notar que a medida que se usen factores mayores se obtendrá una solución más lenta y por último si se usan factores del orden de 2,0 el sistema no convergerá a ninguna solución.

c.- Cálculo de potencia en barra oscilante

Obtenida la solución de los voltajes procedemos a calcular las potencias activa y reactiva que genera la barra oscilante para lo cual aplicamos la fórmula de potencia básica, desde $n=1$ hasta el número total de barras N :

$$P_K - jQ_K = IV_K^* \quad (\text{III-37})$$

$$P_K - jQ_K = V_K^* \sum Y_{Kn} V_n \quad (\text{III-38})$$

$$P_K - jQ_K = V_K^* \sum (G_{Kn} + jB_{Kn}) (e_n + jf_n)$$

$$\sum Y_{Kn} V_n = (G_{Kn} e_n - B_{Kn} f_n) + j(G_{Kn} f_n + B_{Kn} e_n) \quad (\text{III-39})$$

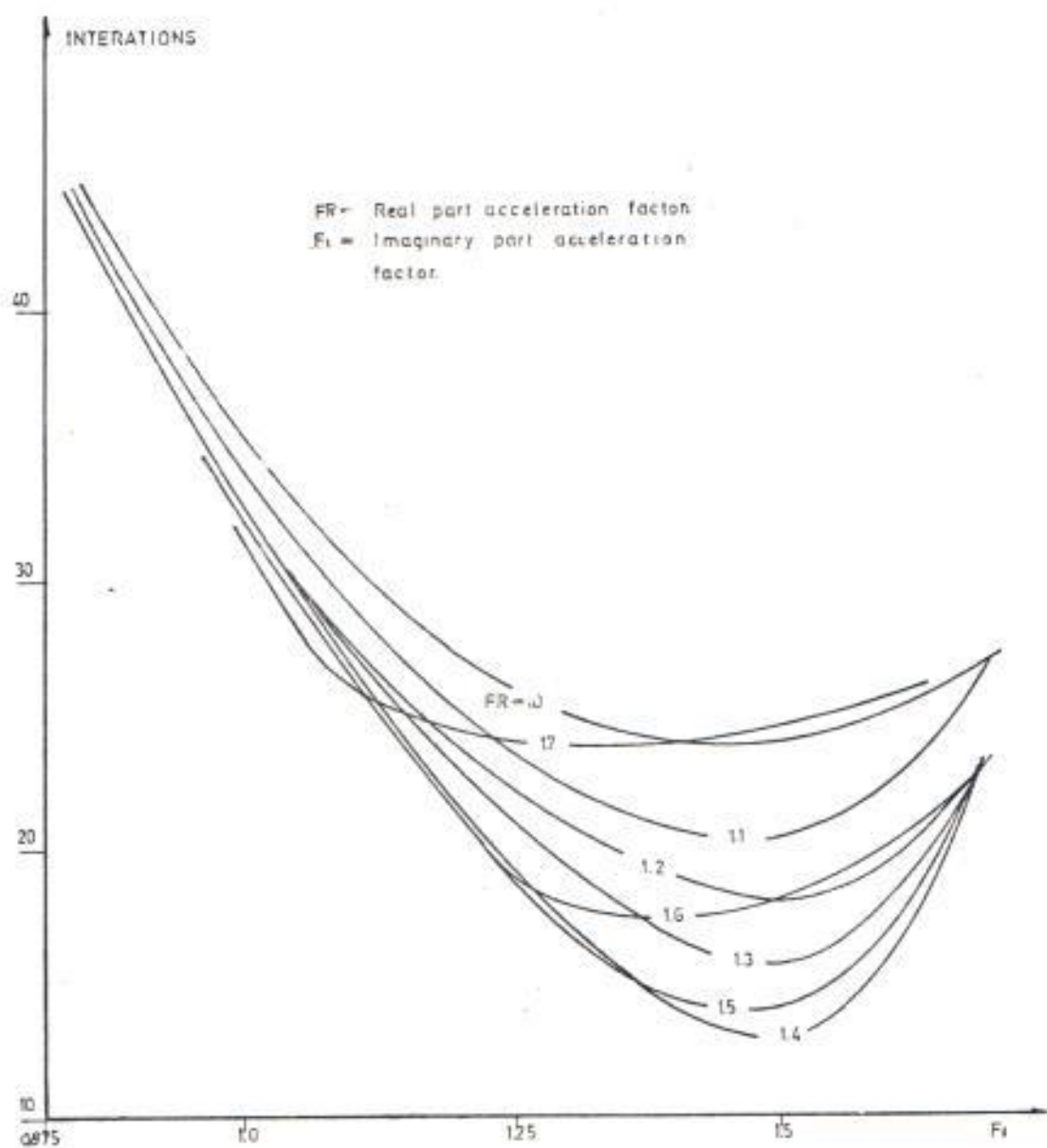


Figura III-1. Efecto de factores de aceleración.

Si hacemos que:

$$\begin{aligned} B_{sire} &= (G_{Kn} e_n - B_{Kn} f_n) \\ B_{siim} &= (G_{Kn} f_n + B_{Kn} e_n) \\ \sum Y_{Kn} V_n &= B_{sire} + j B_{siim} \end{aligned} \quad (III-40)$$

Entonces la potencia quedará expresada por:

$$P_K - jQ_K = V_K^* (B_{sire} + j B_{siim}) \quad (III-41)$$

$$P_K - jQ_K = (e_K - j f_K) (B_{sire} + j B_{siim})$$

$$P_K - jQ_K = B_{sire} e_K + j e_K B_{siim} - j f_K B_{sire} + f_K B_{siim}$$

$$P_K - jQ_K = (e_K B_{sire} + f_K B_{siim}) - j (f_K B_{sire} - e_K B_{siim})$$

Entonces las potencias activa y reactiva generadas por la barra oscilante para suplir las pérdidas en el sistema estarán dadas por las siguientes ecuaciones:

$$P_K = (e_K B_{sire} + f_K B_{siim}) \quad (III-42)$$

$$Q_K = (f_K B_{sire} - e_K B_{siim}) \quad (III-43)$$

D. Cálculo de las pérdidas totales

El cálculo de las pérdidas en un sistema de potencia puede llevarse a cabo de tres formas diferentes. La primera de ellas utiliza la ecuación de los flujos de líneas. Conocidos éstos podemos calcular las pérdidas por medio de la diferencia entre los flujos que fluyen, digamos, de M a N y los que fluyen de N a M.

La segunda forma de calcular las pérdidas consiste en hacer uso de la generación y carga totales del sistema. En primer lugar se calcula la generación total que es igual a la suma de la potencia generada por la barra de generación; entonces podemos decir que:

$$TWGE = WBOSC + WBGEN \quad (III-44)$$

$$TVAGE = VABOSC + VABGEN \quad (III-45)$$

A continuación se calcula la carga total de consumo en el sistema y que es igual a la suma de cada una de las cargas que presentan las barras del sistema. Por lo tanto podemos decir que:

$$TWCO = \sum WCO \quad (III-46)$$

$$TVACO = \sum VACO \quad (III-47)$$

Entonces ahora estamos en capacidad de calcular las pérdidas del sistema aplicando las siguientes fórmulas:

$$WLOS = TWGE - TWCO \quad (III-48)$$

$$VALOS = TVAGE - TVACO \quad (III-49)$$

Es importante mencionar que las pérdidas calculadas no representan las pérdidas reales del sistema debido a que las calculadas incluyen además las pérdidas debidas a las cargas de las líneas y las pérdidas debidas a los desajustes del sistema de potencia, las cuales se conocen con el nombre de MISMATCH.

E. Cálculo de los flujos de potencia

El flujo de potencia a través de las ramas que componen un sis

tema de potencia se obtiene utilizando la solución de los voltajes de barras. Asumiendo que las ramas del sistema son simples podemos decir que el cálculo del voltaje de rama M-N, siendo ésta una línea de transmisión, está dado por la siguiente ecuación:

$$V_{MN} = V_M - V_N \quad (\text{III-50})$$

Si descomponemos en componentes:

$$V_{MN} = (e_M + jf_M) - (e_N + jf_N)$$

$$V_{MN} = e_M + jf_M - e_N - jf_N$$

$$V_{MN} = (e_M - e_N) + j (f_M - f_N)$$

Si hacemos:

$$V_{R_{MN}} = (e_M - e_N) \quad (\text{III-51})$$

$$V_{I_{MN}} = (f_M - f_N) \quad (\text{III-52})$$

$$V_{MN} = V_{R_{MN}} + j V_{I_{MN}} \quad (\text{III-53})$$

Si la rama M-N tiene en serie un transformador de potencia el cálculo del voltaje de rama tiene dos alternativas:

- 1.- La razón de transformación a está en el terminal M; para este caso la ecuación aplicable al cálculo del voltaje de rama es - la siguiente:

$$V_{MN} = \frac{1}{a} V_M - V_N \quad (\text{III-54})$$

$$V_{MN} = \frac{1}{a} (e_M + jf_M) - (e_N + jf_N)$$

$$V_{MN} = \frac{1}{a} e_M + j \frac{1}{a} f_M - e_N - jf_N$$

$$V_{MN} = \left(\frac{1}{a} e_M - e_N \right) + j \left(\frac{1}{a} f_M - f_N \right)$$

Si hacemos:

$$V_{MN}^R = \left(\frac{1}{a} e_M - e_N \right) \quad (\text{III-55})$$

$$V_{MN}^I = \left(\frac{1}{a} f_M - f_N \right) \quad (\text{III-56})$$

$$V_{MN} = V_{MN}^R + j V_{MN}^I \quad (\text{III-57})$$

2.- La razón de transformación a está en el terminal N; para este caso la ecuación para el cálculo del voltaje de rama es la siguiente:

$$V_{MN} = aV_M - V_N \quad (\text{III-58})$$

$$V_{MN} = a(e_M + jf_M) - (e_N + jf_N)$$

$$V_{MN} = ae_M + jaf_M - e_N - jf_N$$

$$V_{MN} = (ae_M - e_N) + j(af_M - f_N)$$

Si hacemos:

$$V_{MN}^R = (ae_M - e_N) \quad (\text{III-59})$$

$$V_{MN}^I = (af_M - f_N) \quad (\text{III-60})$$

$$V_{MN} = V_{MN}^R + j V_{MN}^I \quad (\text{III-61})$$

Entonces el flujo de potencia tanto activa como reactiva a través de las ramas que componen un sistema de potencia está dado por la siguiente ecuación básica:

$$P_{MN} - jQ_{MN} = V_M^* (V_{MN} y_{MN}^a + V_M \frac{y'_{MN}}{2}) \quad (\text{III-62})$$

En esta ecuación se distinguen las siguientes variables:

P_{MN} Flujo de potencia activa originada en la barra M y dirigida hacia la barra N.

Q_{MN} Flujo de potencia reactiva originada en la barra M y dirigida hacia la barra N.

V_M Voltaje en la barra M.

V_{MN} Voltaje de rama M-N.

y_{MN} Admitancia de rama M-N.

$\frac{y'_{MN}}{2}$ Susceptancia capacitiva positiva debida a la carga de la línea y es la mitad de la total.

a Razón de transformación de transformadores.

La ecuación básica mencionada anteriormente para su aplicación al programa necesita ser descompuesta en sus componentes. Así:

$$P_{MN} - jQ_{MN} = V_M^* \left[a(VR_{MN} + jVI_{MN}) (G_{MN} + jB_{MN}) + (e_M + jf_M) j\frac{B'_{MN}}{2} \right]$$

$$P_{MN} - jQ_{MN} = V_M^* (aVR_{MN}G_{MN} + jaVR_{MN}B_{MN} + jaVI_{MN}G_{MN} - aVI_{MN}B_{MN} + j\frac{e_M B'_{MN}}{2} - \frac{f_M B'_{MN}}{2})$$

$$P_{MN} - jQ_{MN} = V_M^* \left[(aV_{MN} G_{MN} - aV_{MN} B_{MN} - f_M \frac{B'_{MN}}{2}) + \right. \\ \left. + j(aV_{MN} B_{MN} + aV_{MN} G_{MN} + e_M \frac{B'_{MN}}{2}) \right]$$

Los paréntesis en la ecuación anterior representan las corrientes de ramas y podemos reemplazarlas por:

$$IR_{MN} = (aV_{MN} G_{MN} - aV_{MN} B_{MN} - f_M \frac{B'_{MN}}{2}) \quad (\text{III-63})$$

$$II_{MN} = (aV_{MN} B_{MN} + aV_{MN} G_{MN} + e_M \frac{B'_{MN}}{2}) \quad (\text{III-64})$$

Por lo tanto la ecuación de flujo de potencia es:

$$P_{MN} - jQ_{MN} = V_M^* (IR_{MN} + jII_{MN}) \quad (\text{III-65})$$

$$P_{MN} - jQ_{MN} = (e_M - jf_M) (IR_{MN} + jII_{MN})$$

$$P_{MN} - jQ_{MN} = IR_{MN} e_M + jII_{MN} e_M - jIR_{MN} f_M + II_{MN} f_M$$

$$P_{MN} - jQ_{MN} = [(IR_{MN} e_M + II_{MN} f_M) - j (IR_{MN} f_M - II_{MN} e_M)]$$

De esta ecuación se obtiene finalmente que los flujos de potencia activa y reactiva están dados por las ecuaciones siguientes:

$$P_{MN} = (IR_{MN} e_M + II_{MN} f_M) \quad (\text{III-66})$$

$$Q_{MN} = (IR_{MN} f_M - II_{MN} e_M) \quad (\text{III-67})$$



IV. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa de flujo de carga del sistema de potencia (SUR) lo llamaremos FLP y está preparado para su aplicación al sistema IBM 1130 que tiene la siguiente conformación:

Una unidad central de procesamiento IBM 1131 que tiene una memoria con capacidad para 8.192 palabras y una unidad de disco.

Una lectora / perforadora de tarjetas IBM 1442.

Una impresora IBM 1132.

El programa de flujo de carga funciona bajo la supervisión del sistema monitor 1130; la conversión de datos, operaciones de entrada y salida, etc. son ejecutadas por el programa haciendo uso de las siguientes subrutinas propias de la máquina:

FSQRT	FMPY	FSUBX	FAXI	SRED	SIOFX
FSIN	FADD	FCOS	PRNTZ	SWRT	SIOF
FATAN	FLD	SCOMP	FLDX	FSTO	FDIUX
FABR	SNR	FSTOX	CARDZ	SFIO	SIOI
FSUB	FDIV	SUBSC	FADDX	FMPYX	

La programación es llevada a cabo mediante el uso del Lenguaje FORTRAN IV.

El programa ha sido diseñado para producir los resultados de cálculos realizados para un sistema eléctrico bajo carga, los cuales específicamente incluyen flujos de potencia activa y reactiva a través de las líneas de transmisión, niveles de voltaje en las barras

del sistema y las potencias respectivas.

A.- Componentes

El programa FLP está dividido en las siguientes componentes:

Un programa de entrada el cual acepta los datos para uso óptimo en programas posteriores.

Un programa de solución, solución iterativa, de las ecuaciones básicas de performance.

Un programa de salida que genera los resultados.

El programa de entrada está constituido por tres sub-programas que aceptan los datos de entrada y hacen cálculos menores.

El programa solución está constituido por tres sub-programas que analizan la solución del problema y obtienen las respuestas para los voltajes, potencias, flujos de potencia y pérdidas.

El programa de salida es un sub-programa cuya función es la de escribir todas las soluciones obtenidas en los sub-programas anteriores.

Alcance del programa.- El programa de flujo de carga utilizado en este estudio tiene o está en capacidad de aceptar sistemas de potencia que tengan como máximo 30 barras y líneas de transmisión.

Organización del Programa.- El programa de flujo de carga de este estudio comprende el programa principal y siete sub-rutinas encargadas del proceso. El programa principal inicia con la lectura de títulos y datos generales; a continuación vienen las sub-rutinas BAREN, LINE 1, LINE 2, YBAR, SOLVO, CORR 1, CORR 2, . El orden de realización del programa es como sigue:

En primer lugar se leen títulos y datos generales del sistema; entonces el programa principal llama a la primera subrutina que es BAREN, es decir transfiere el control a ésta para que se procese; una vez que se procesa la sub-rutina mencionada transfiere el control al programa principal el cual continúa el proceso para llamar a la siguiente sub-rutina que es LINE 1. El proceso se repite en igual forma hasta que todas las sub-rutinas se hayan satisfecho y el control se haya transferido al programa principal el cual continúa con el programa para la escritura de las series de iteraciones y del número de iteraciones que emplea el programa en estudio.

A continuación detallaremos cada una de las sub-rutinas del programa que será llamado FLP

FLP 1 .

Es una pequeña parte del programa principal en la cual se leen títulos y datos generales del sistema tales como: número de barras, número de líneas, factores de aceleración, tolerancias, número de iteraciones y grupo de iteraciones.

FLP 2

En esta sub-rutina en primer lugar se leen los datos de barras como son: número de la barra, magnitud del voltaje en la barra, ángulo del voltaje en la barra, potencias activa y reactiva de generación y de carga. A continuación se calcula las componentes reales e imaginarias de los voltajes asumidos en las barras; se calcula también las potencias netas en las barras.

FLP 3

En este sub-programa en primer lugar se leen títulos; luego se obtienen o se definen archivos para las componentes de las admitancias de líneas, para los taps de los transformadores y para la admitancia que representan las cargas de las líneas y se los hace igual a cero excepto el tap que se inicializa igual a uno; luego se leen los datos de líneas y transformadores y se los escribe. A continuación se calcula las componentes de las admitancias de líneas; luego se escriben en el archivo correspondientes los valores calculados de las componentes de las admitancias de líneas, el tap de los transformadores y las admitancias debidas a la carga de las líneas.

En conclusión hemos grabado las matrices de las admitancias de líneas, y las matrices de los taps de los transformadores y de las admitancias debidas a las cargas de las líneas.

FLP 4

En este sub-programa se procede a hacer la simetría de las matrices de las componentes de las admitancias de líneas, de los taps de los transformadores y de las admitancias debidas a las cargas de las líneas.

FLP 5

En este sub-programa se leen de los archivos correspondientes los valores de las componentes de las admitancias de líneas, del tipo de los transformadores y del line
Entonces se calculan las admitancias mutuas y propias de las barras las cuales quedan almacenadas en la memoria del computador.

FLP 6

En este sub-programa llamado SOLVO se calculan en un proceso iterativo los voltajes óptimos en cada una de las barras que componen el sistema; estos voltajes son reajustados cuando no convergen y este proceso de reajuste continúa hasta obtener los mejores voltajes.

FLP 7

En este sub-programa llamado CORR 1 se calcula en primer lugar las potencias activa y reactiva de la barra Oscilante y a continuación se escriben éstos valores calculados junto con los voltajes de las barras; finalmente se calculan las pérdidas totales del sistema

FLP 8

En este sub-programa llamado CORR 2 se leen de los archivos correspondientes los valores de las componentes de las admitancias de líneas, de los taps de los transformadores y de las admitancias debidas a las cargas de líneas. Luego se calculan los voltajes de líneas, las corrientes fluyendo en las líneas y el flujo de potencia activa y reactiva a través de las mismas; todos estos valores son escritos.

Los diagramas de flujo del programa princiapl y de las sub-routinas se muestran en las figuras (IV-1) a (IV-12).

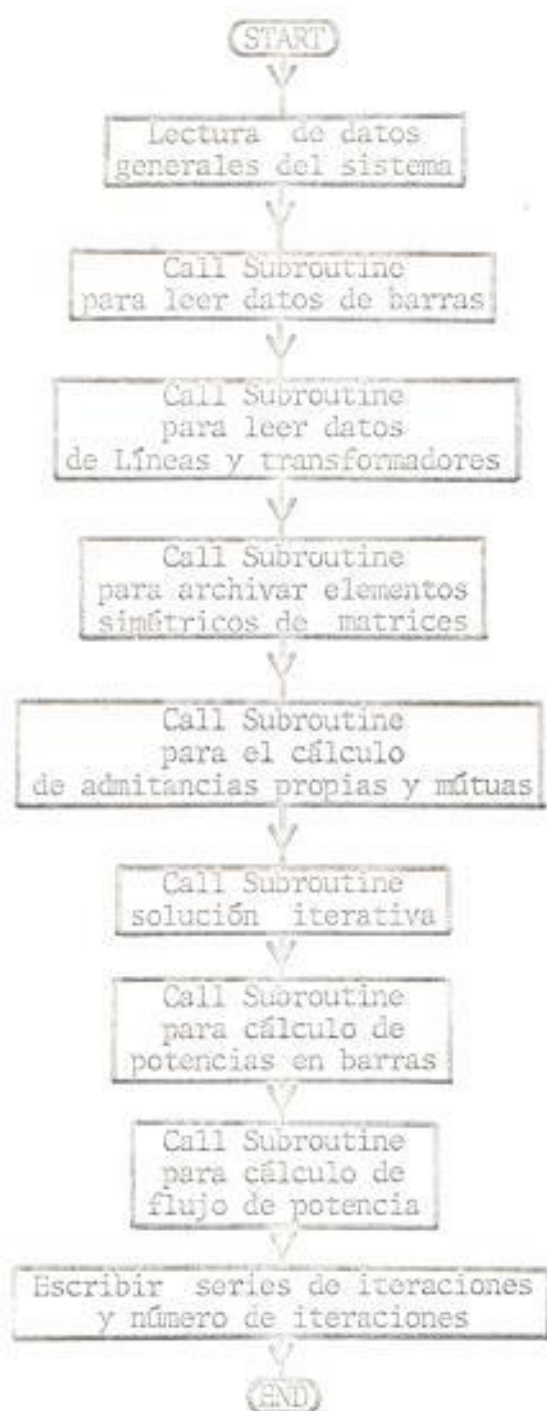


Figura IV-1. Diagrama de flujo del programa principal

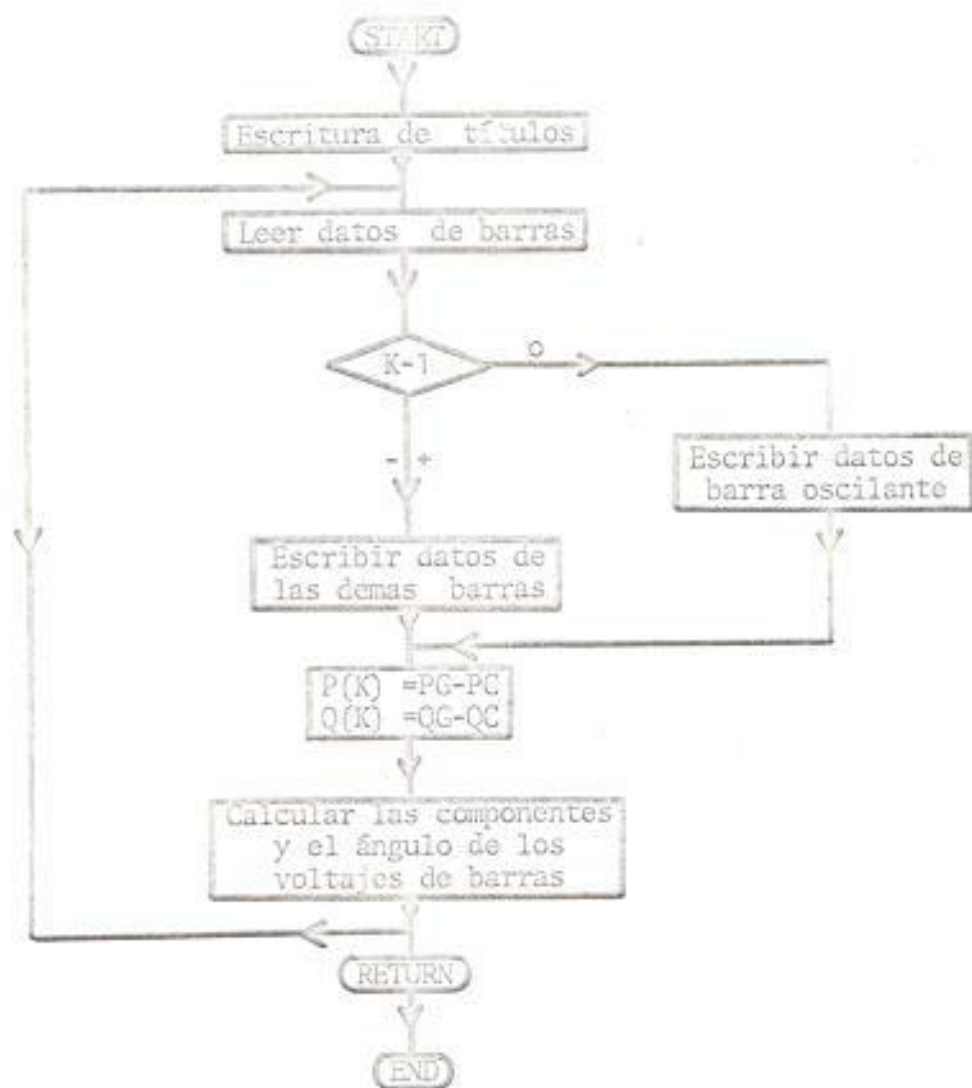


Figura IV-2. Diagrama de flujo para leer datos de barras.

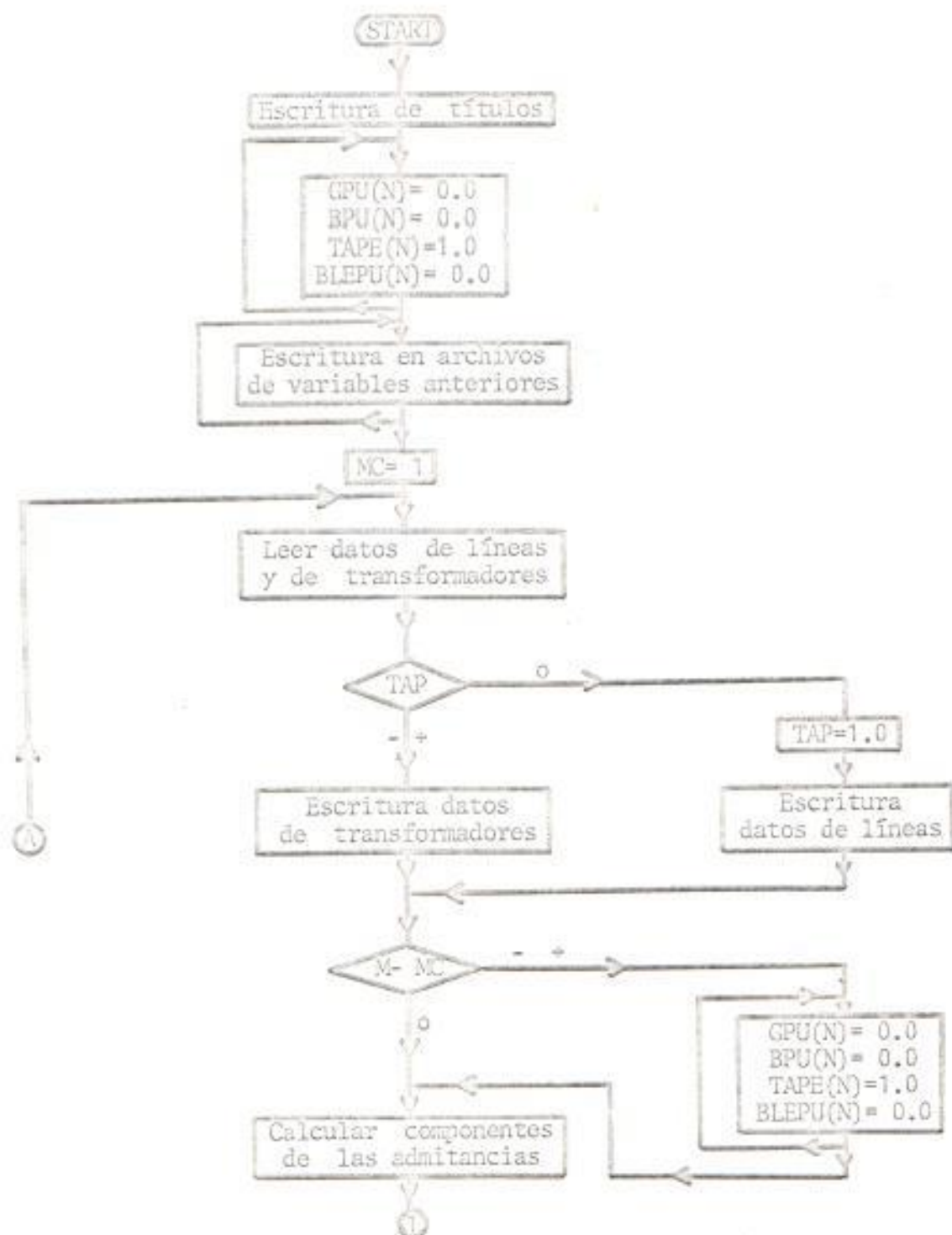


Figura IV-3. Diagrama de flujo para datos de líneas y transformadores.

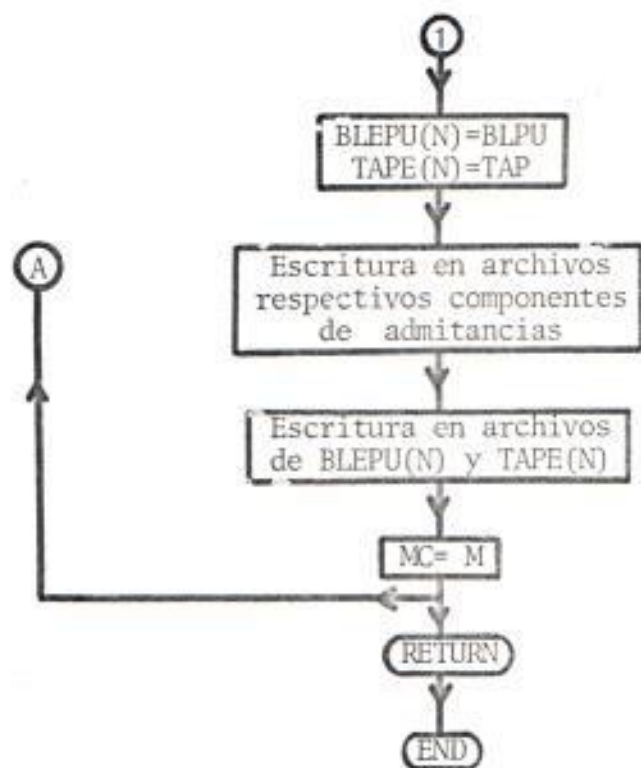


Figura IV-4. Diagrama de flujo para datos de líneas y transformadores (continuación).

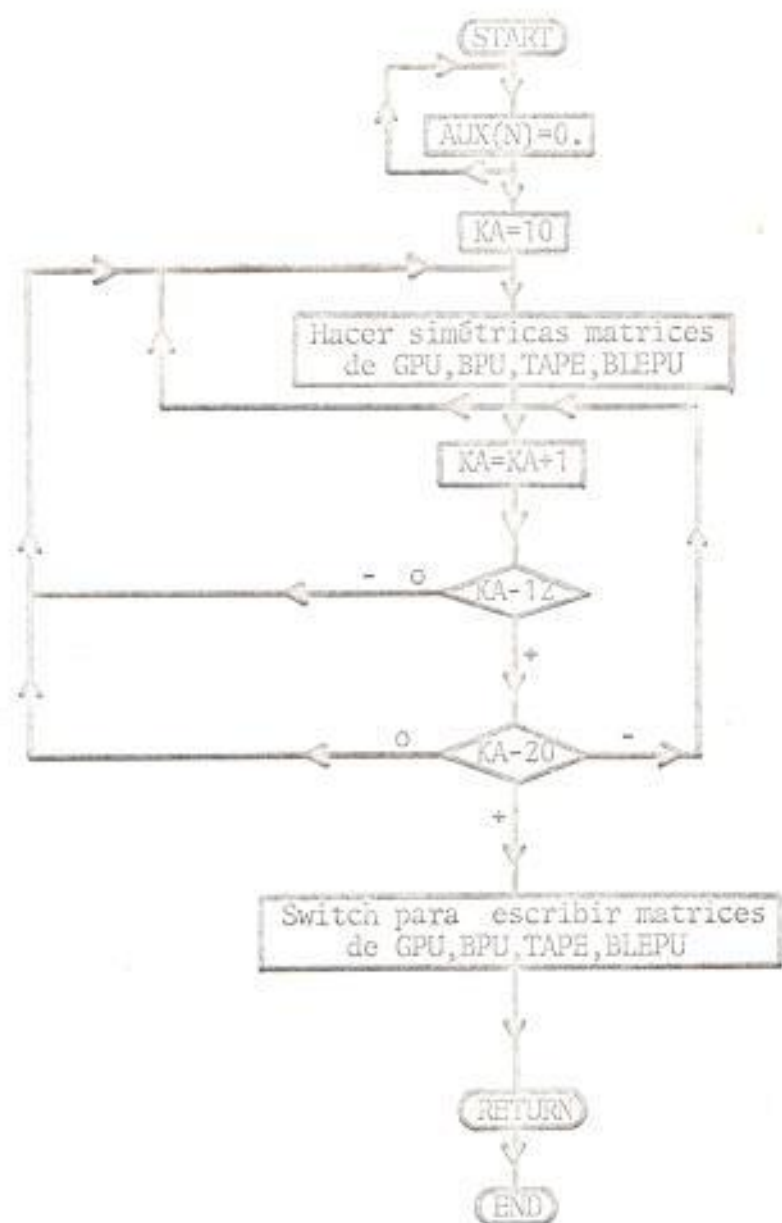


Figura IV-5. Diagrama de flujo para hacer simétricas las matrices de GPU, BPU, TAPE, BLEPU.

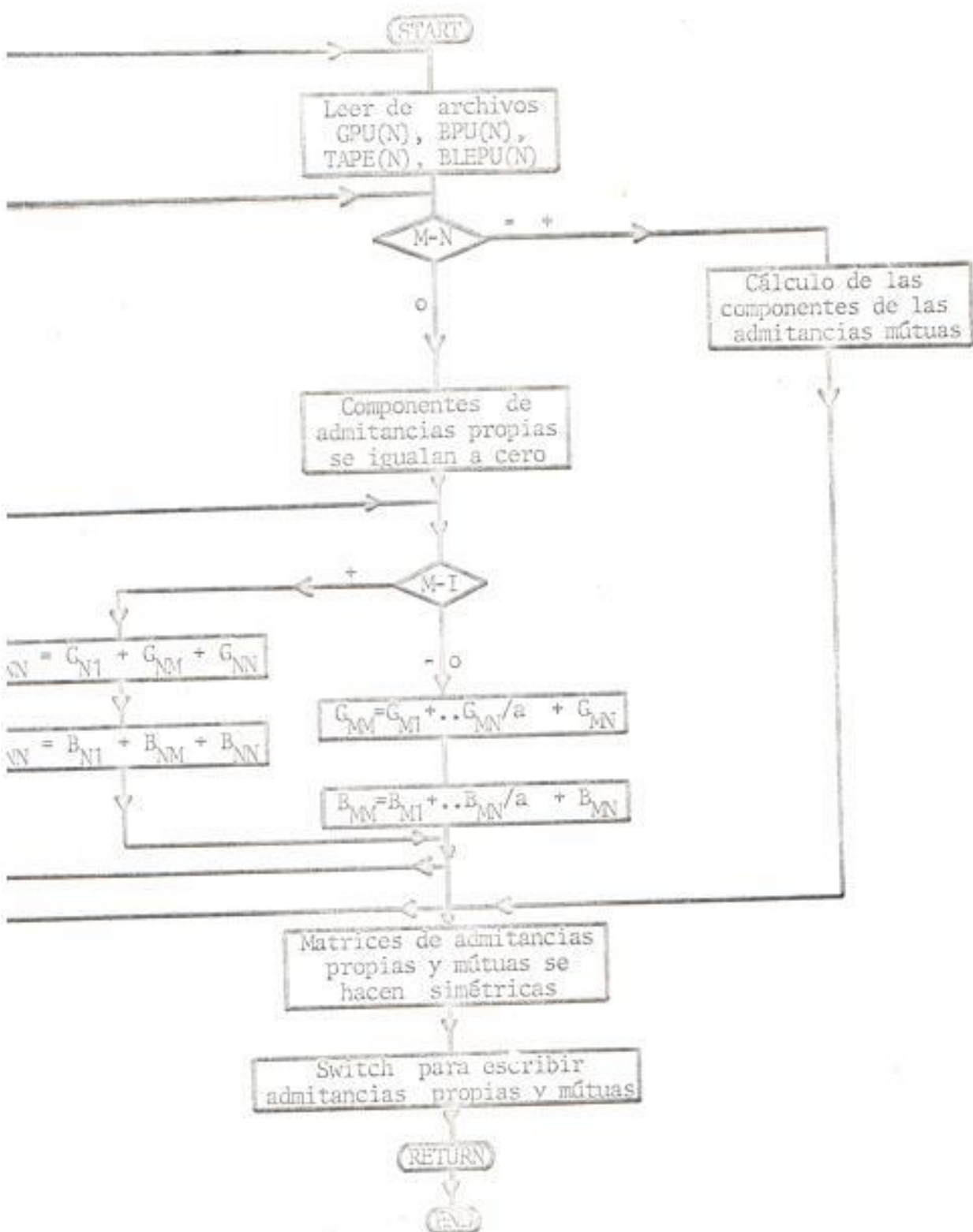


Figura IV-6. Diagrama de flujo para calcular admitancias propias y mutuas.

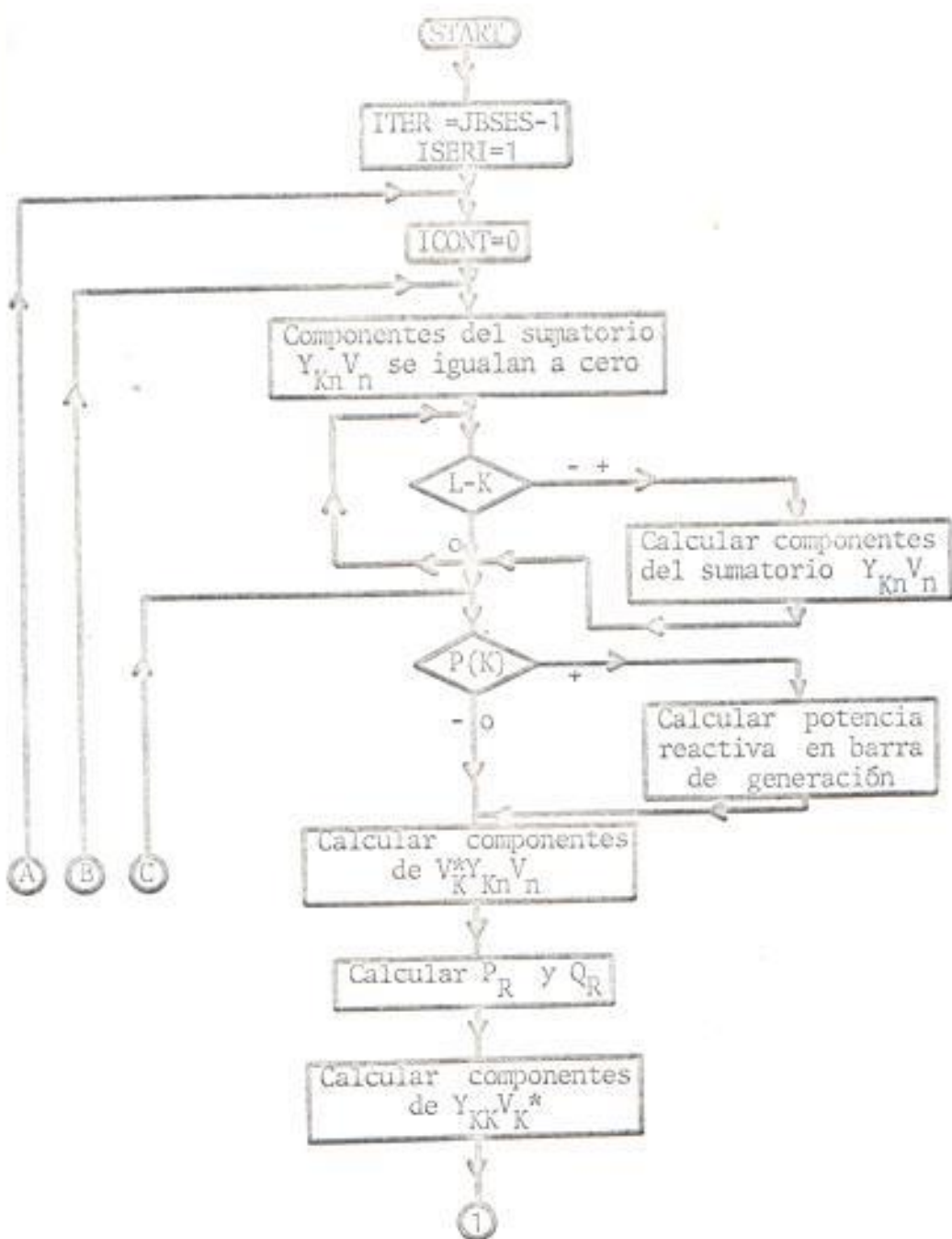


Figura IV-7. Diagrama de flujo para proceso iterativo.

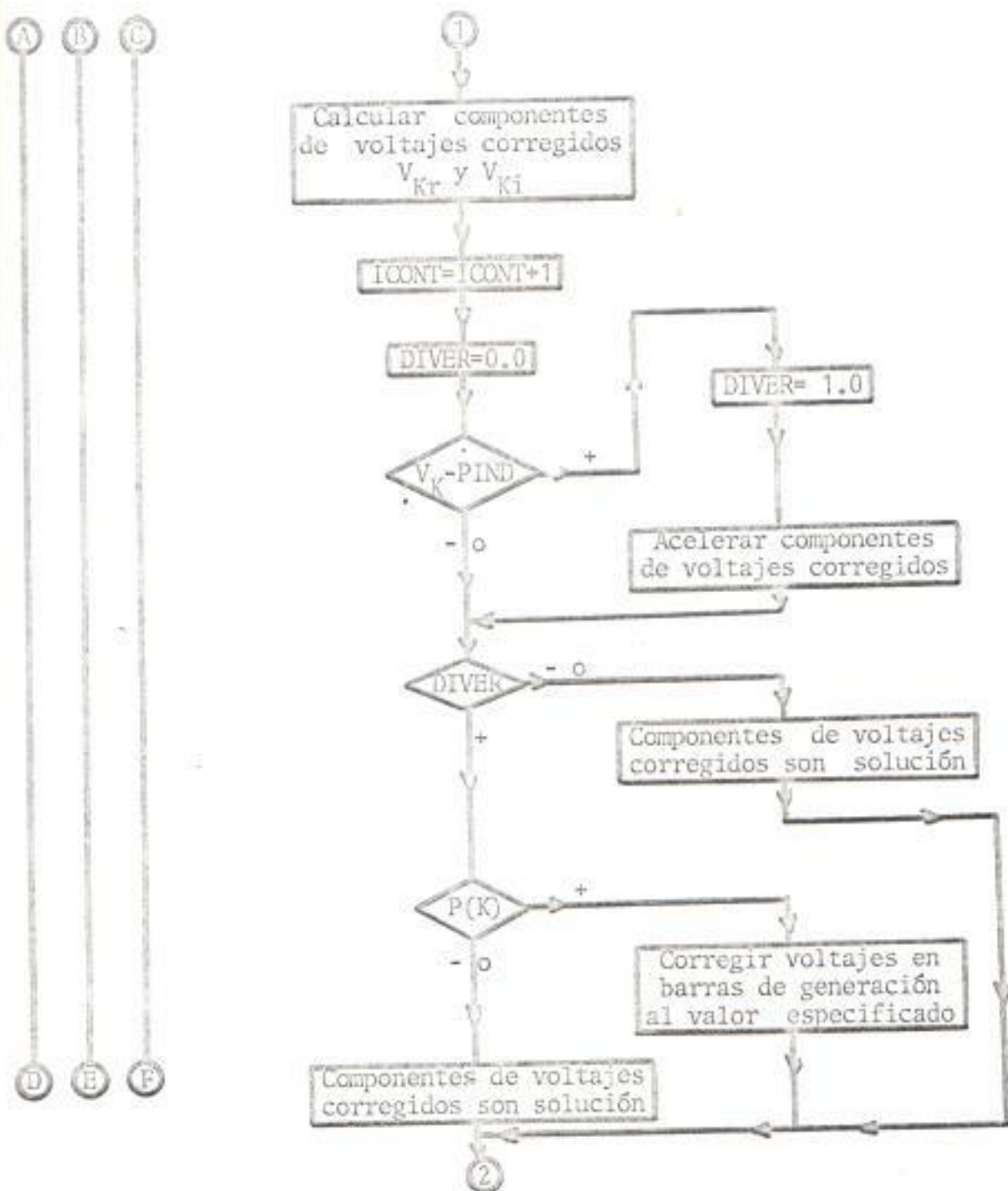


Figura IV-8. Diagrama de flujo para proceso iterativo (continuación).

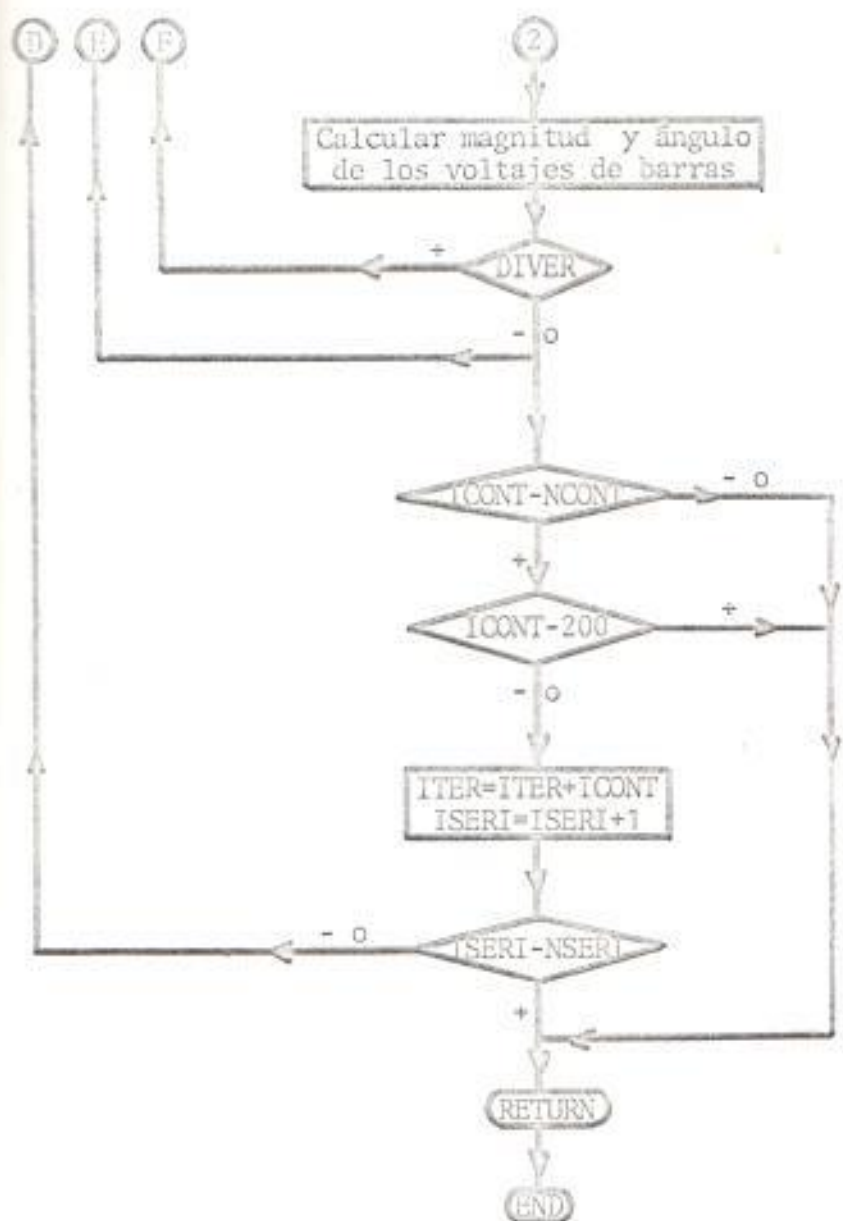


Figura IV-9. Diagrama de flujo para proceso iterativo (continuación).

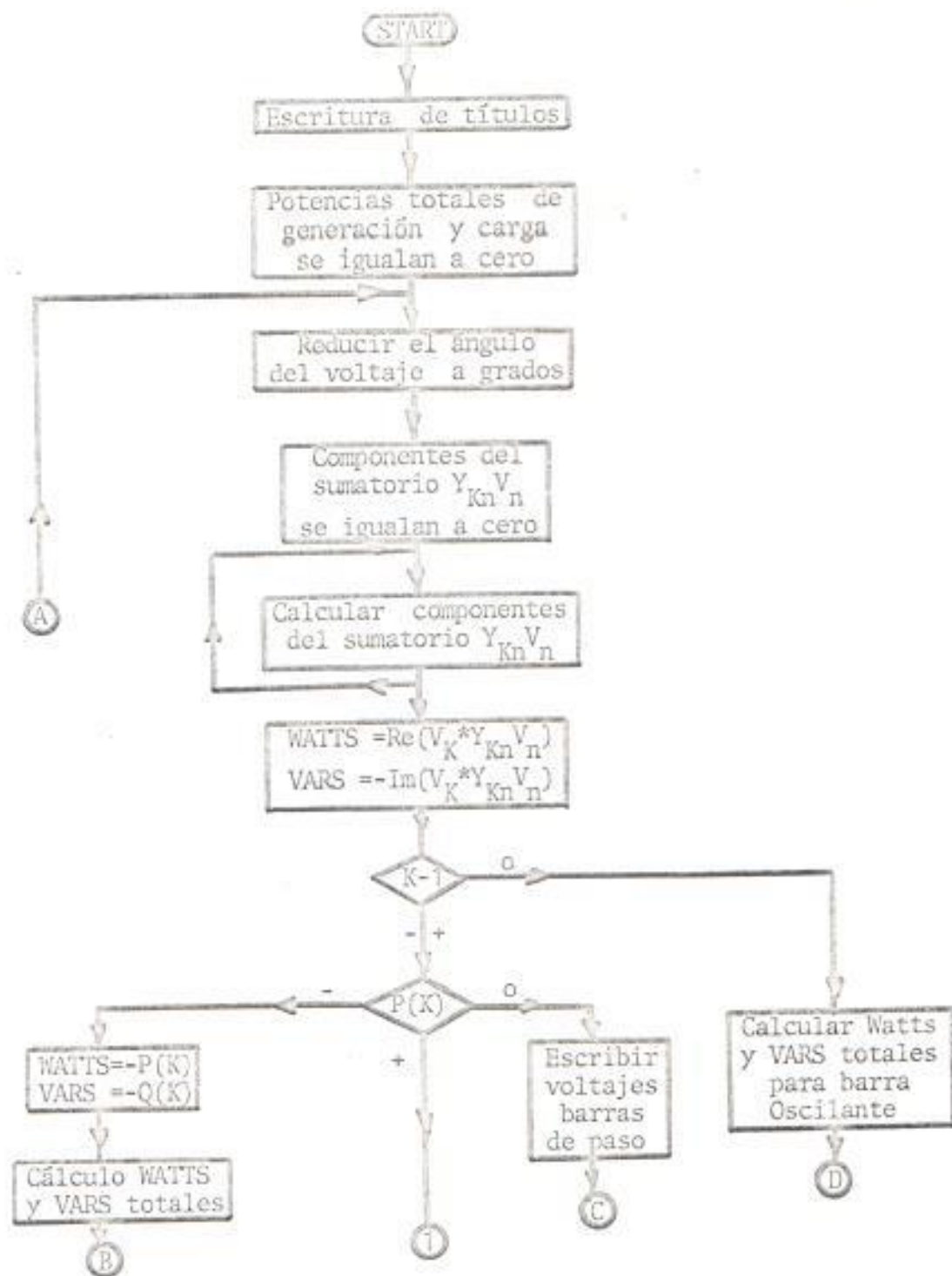


Figura IV-10. Diagrama de flujo para el cálculo de potencia en la barra oscilante y pérdidas.

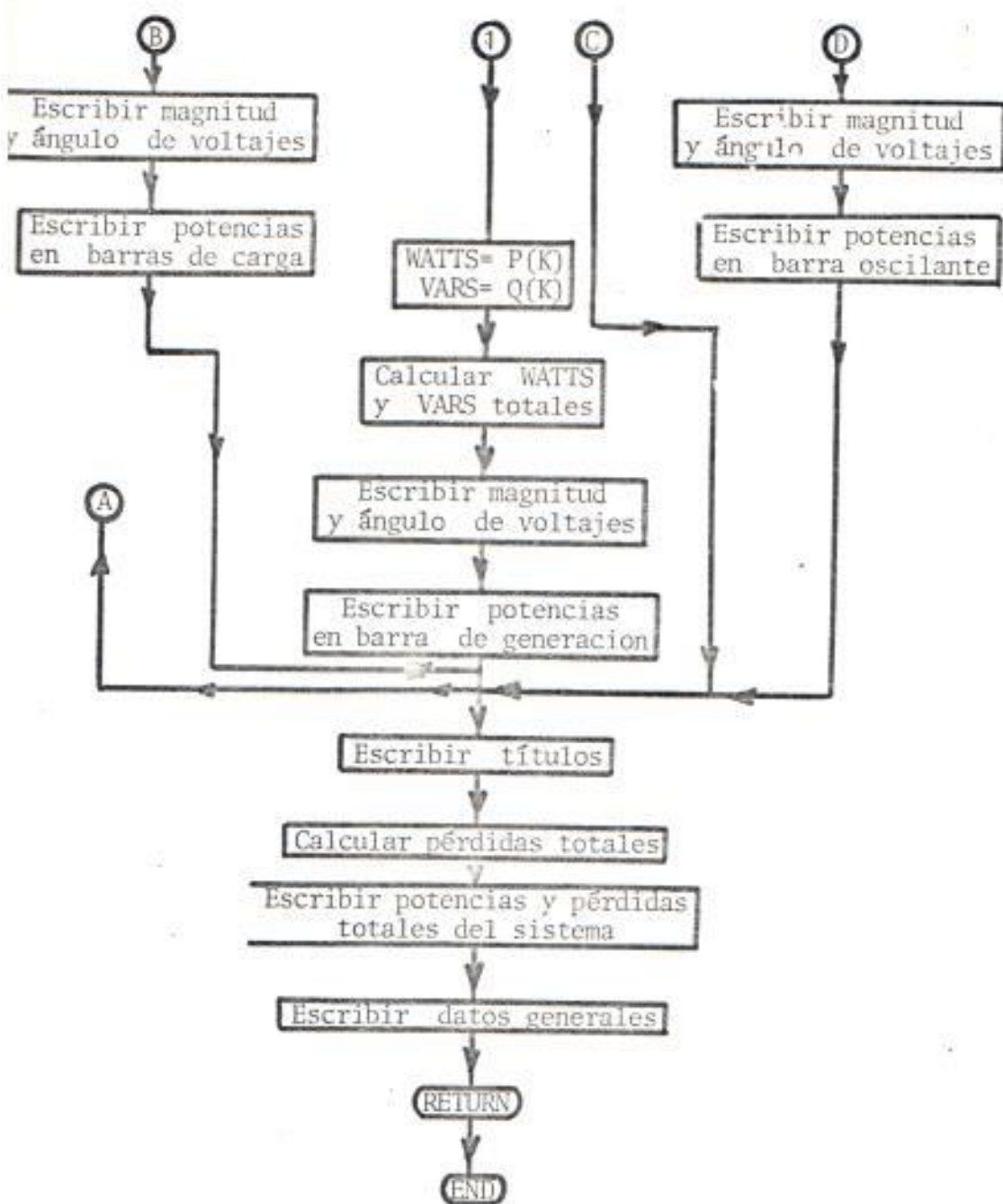


Figura IV-11. Diagrama de flujo para calcular potencias en barra oscilante y pérdidas (continuación).

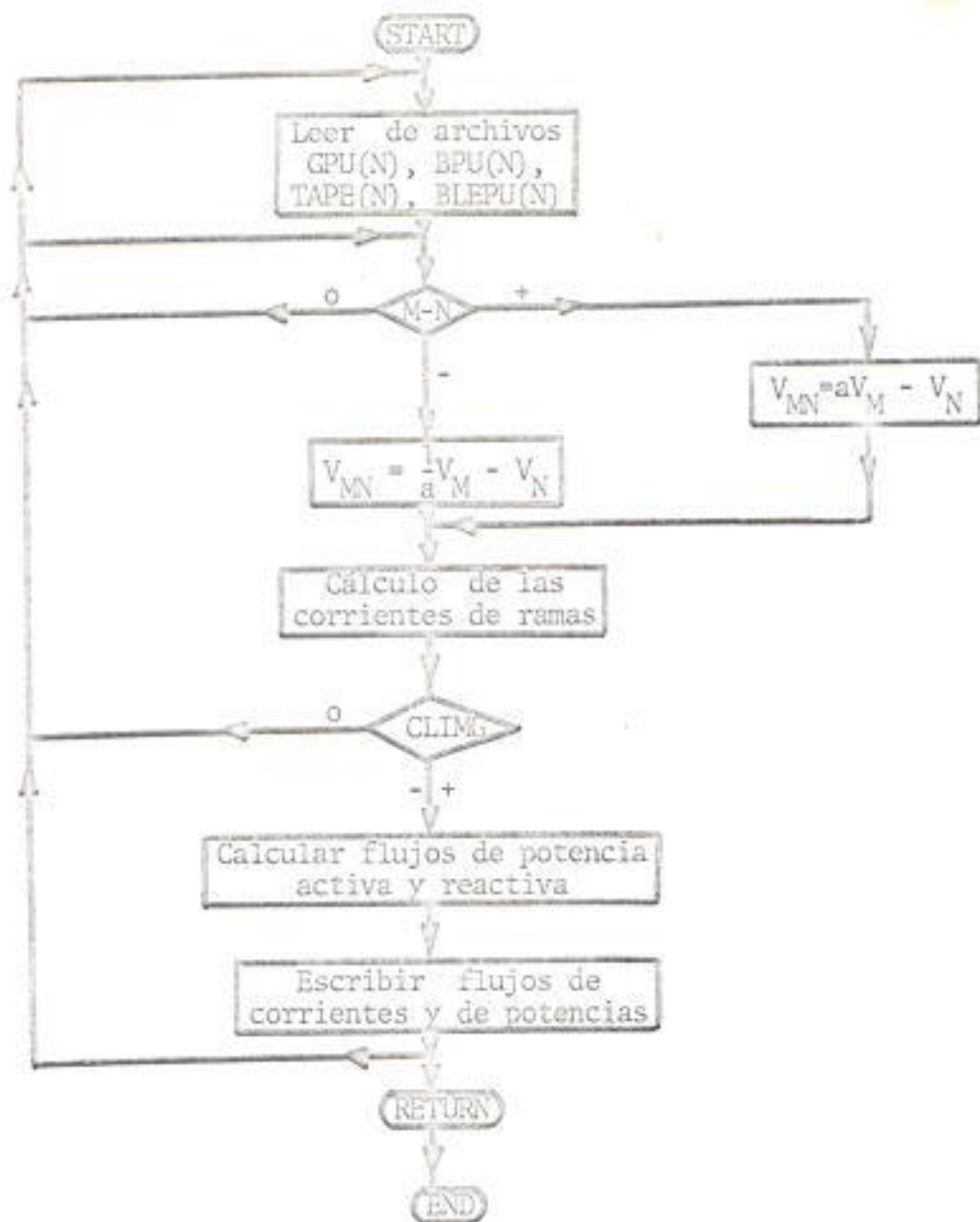


Figura IV-12. Diagrama de flujo para calcular flujos de potencia.

B. Programación de Y de barra.

Y de barra es una matriz cuadrada de orden M , donde M es el número total de barras que componen el sistema de potencia. Si despreciamos los efectos de acoplamientos mutuos entre líneas de transmisión, Y de barra se puede obtener aplicando lo indicado en el capítulo III.

Debido a que en nuestro estudio se trabaja con componentes real e imaginaria, para representar Y de barra como una matriz cuadrada en el computador, se requieren de dos matrices lo cual da lugar a que se necesite una gran cantidad de memoria del computador que hace que el sistema de potencia que se quiera estudiar sea de tamaño reducido. Entonces por esta razón se desarrolla un algoritmo que reduce la Y de barra a una matriz columna que contenga solo los términos de la diagonal y los términos no cero fuera de la diagonal, con lo cual se consigue que el almacenaje requerido se reduzca de M^2 a $M+2$ (LINES), siendo LINES el número total de líneas y transformadores. El uso de este algoritmo necesita que los datos tengan un orden ya definido.

En el caso nuestro no usamos el algoritmo mencionado anteriormente sino que utilizamos 2 matrices de $M \times M$ para las componentes de Y barra. Estas matrices se almacenan en la memoria del computador incluyendo los términos no cero fuera de la diagonal y los términos cero.

El diagrama de flujo que describe la secuencia de pasos para el cálculo de Y de barra se muestra en la figura (IV-5).

C. Programación del proceso iterativo

La ecuación de voltaje descrita en el capítulo III-4 la resolvemos por el método de corrección de voltaje. En este método el nuevo calculado para cierta barra reemplaza al que tenía anteriormente y es usado con los voltajes de las otras barras para el cálculo del voltaje en una nueva barra.

Este proceso se repite para todas las barras excepto para la barra oscilante, hasta que la diferencia entre el, nuevo valor calculado y el valor anterior sea menor o igual que un factor de tolerancia fijado, lo cual se traduce en lo siguiente:

$$\Delta V = \epsilon$$

V Diferencia de voltaje

ϵ Factor de tolerancia

Cuando la barra tratada es de generación el procedimiento tiene una desviación para calcular los reactivos en dicha barra. Entonces el procedimiento de computadora sigue su curso.

La secuencia de pasos del proceso iterativo se muestra en las figuras (IV-7), (IV-8) y (IV-9).

El método aplicado para la solución iterativa tiene sus ventajas y desventajas.

- 1.- La convergencia de los voltajes es rápida.
- 2.- Y de barra es una matriz aplicable al estudio.
- 3.- El proceso iterativo no requiere mucha memoria.
- 4.- El número de iteraciones aumenta al aumentar las barras del sistema.

Como ya se mencionó en el capítulo III-B, la razón de convergencia se puede alterar por aplicación de factores de aceleración o desaceleración para las componentes de los voltajes de barras al término de cada iteración. Si la diferencia entre el valor corregido y el anterior cambia en una dirección los voltajes acelerados serán:

$$e_K^{t+1} \text{ (acelerado)} = e_K^t + p(e_K^{t+1} - e_K^t)$$

$$f_K^{t+1} \text{ (acelerado)} = f_K^t + v(f_K^{t+1} - f_K^t)$$

Si esta diferencia oscila los voltajes desacelerados serán:

$$e_K^{t+1} \text{ (desacelerado)} = e_K^t + \alpha(e_K^{t+1} - e_K^t)$$

$$f_K^{t+1} \text{ (desacelerado)} = f_K^t + \beta(f_K^{t+1} - f_K^t)$$

p Factor de aceleración real.

- v Factor de aceleración imaginario.
- α Factor de desaceleración real.
- β Factor de desaceleración imaginario.

También como ya se mencionó en el capítulo III-B el problema al aplicar estos factores es de que no se conocen sus valores óptimos. Por esta razón cada sistema tendrá sus factores adecuados y los podemos obtener como ya se vió en la figura (III-1).

V. APLICACION AL SISTEMA PAUTE

De acuerdo con los planes del Instituto Ecuatoriano de Electricidad la interconexión del sistema eléctrico nacional será llevada a cabo a partir del año 1,979. En base a esta aseveración consideramos que el año 1,979 es un año crítico para el sistema Paute razón por la cual todas las fuentes de generación que existan hasta fines del año en referencia tendrán que estar entregando su máxima capacidad para poder satisfacer la demanda. Por lo tanto para 1,979 tendremos que determinar con absoluta claridad si las características eléctricas de las líneas de transmisión y de los transformadores cuya construcción e instalación está prevista para la etapa comprendida de 1,973 hasta 1,977, son adecuadas para operar dentro del sistema eléctrico previsto para ese año y luego dentro del sistema nacional interconectado.

El estudio de flujo de carga del sistema Paute analiza la forma como se comporta el sistema eléctrico bajo condiciones de carga máxima que se han previsto para fines del año 1,979.

A. Constantes utilizadas en el programa

En primer lugar vamos a elegir a la barra de PAUTE a 13.8 kv como la barra oscilante; las demás barras quedan numeradas como se muestra en la figura (V-1) que representa el diagrama unifilar del sistema.

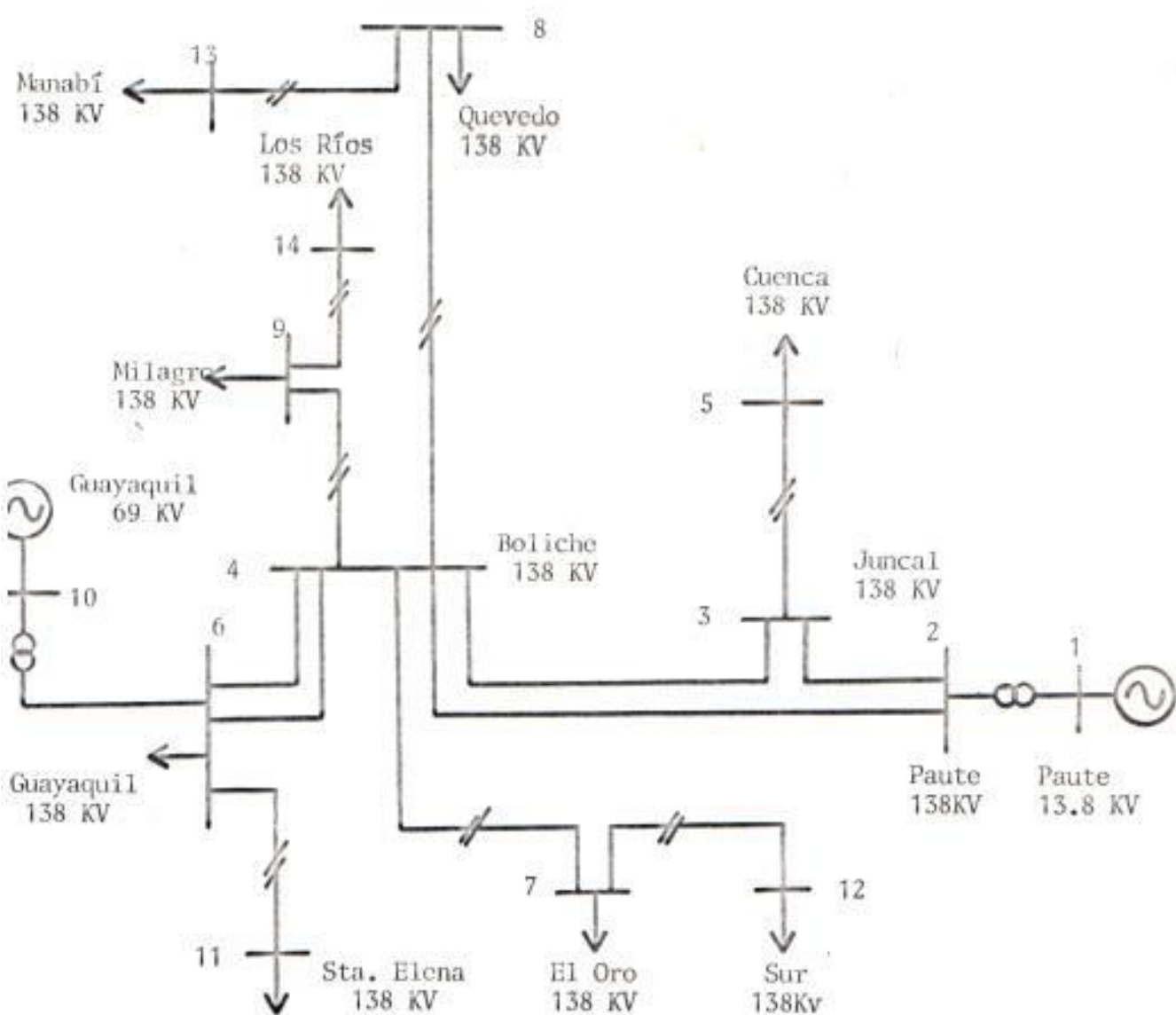


Figura V-1. Diagrama unifilar del sistema Paute - caso base.

El sistema PAUTE está conformado inicialmente por un total de 14 barras de las cuales 2 son barras de generación y el resto son - barras de carga y de transferencia. De las dos barras de generación la una está ubicada en Guayaquil a 69 Kv y la otra en Paute a 13.8 Kv que ha sido seleccionada como barra oscilante.

Según datos de Inecel se espera que la generación en la barra de Guayaquil a 69 Kv será para el año 1,979 de 234.00 Mw.

El sistema Paute tiene inicialmente 14 líneas de transmisión que incluyen 2 subestaciones o transformadores de potencia.

El factor de aceleración tanto para la parte real como para la parte imaginaria se ha seleccionado en los valores 1.4 y 1.5 en razón a que este valor es un promedio aceptable. El índice de precisión, es decir la tolerancia tanto real como imaginaria así mismo - se ha seleccionado inicialmente como 0.001.

B. Características eléctricas de líneas de transmisión y transformadores de potencia.

Las líneas de transmisión y transformadores del sistema se - muestran con sus características en la tabla (V-1) y los valores dados están por unidad.

BARRA	BARRA	IMPEDECENCIA		ADMITANCIA		TAP
		R	X	G	B'	
1	2		0.0521			1.0
2	3	0.0083	0.1281	0.056		
2	4	0.0189	0.3020	0.133		
3	4	0.0166	0.1751	0.0777		
3	5	0.0166	0.0784	0.077		
4	6	0.0015	0.0311	0.049		
4	7	0.0240	0.1630	0.155		
4	8	0.0137	0.1392	0.237		
4	9	0.0028	0.0131	0.013		
6	10		0.037			1.0
6	11	0.0304	0.1437	0.142		
7	12	0.0289	0.2028	0.187		
8	13	0.0117	0.0119	0.203		
9	14	0.0083	0.0392	0.039		

Tabla V-1. Características de líneas y transformadores para el caso base.



C. Características de demanda máxima

Las características de la demanda eléctrica en cada una de las barras del sistema para fines de 1.979 se han tomado de los estudios de proyección de la demanda, realizados por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación y que están presentes en el informe preliminar N° 12 para el período comprendido desde 1.971 hasta el año 2.000 esta demanda eléctrica se concreta al consumo de potencia activa y reactiva en las barras en Mw y Mvar y se muestra en la tabla (V-2).

Cuando necesitamos estos valores tendremos que expresarlos en por unidad sobre la base que es 100 MVA para lo cual dividiremos cada valor para 100. Por ejemplo: para el consumo en el Centro Sur en por unidad:

$$P_{p.u} = \frac{10}{100} = 0.1$$

$$Q_{p.u} = \frac{7}{100} = 0.07$$

Entonces contando ya con la potencia de generación disponible, con la demanda máxima y con las características de las líneas de transmisión estamos en capacidad de realizar el cálculo del flujo de carga del sistema, para lo cual tomamos como referencia el diagrama unifilar de sistema que lo mostramos en la figura (V-1).

D. Resultados del caso base

Los resultados del caso base comprenden 18 páginas que contie-

BARRA	NOMBRE	POTENCIA	
		MW	MVAR
1	PAUTE13.8KV	0.	0.
2	PAUTE138KV	0.	0.
3	JUNCAL138KV	0.	0.
4	BOLICHE138KV	0.	0.
5	CUENCA138KV	10.	7.
6	GUAYAQUIL138KV	234.	135.
7	EL ORO138KV	18.	9.
8	QUEVEDO138KV	7.5	3.
9	MILAGRO138KV	27.8	19.5
10	GUAYAQUIL69KV	0.	0.
11	STA.ELENA138KV	8.	4.
12	SUR138KV	4.5	1.5
13	MANABI138KV	22.	10.7
14	LOS RIOS138KV	6.5	3.

Tabla V-2. Características de demanda máxima

para el caso base.

nen la entrada y salida de tres corridas consecutivas dependientes cuyo procedimiento se explica a continuación. Con los voltajes asumidos en las barras cercanos a la solución se lleva a cabo la primera corrida utilizando inicialmente una tolerancia de 0.001. De ésta se obtiene una solución de voltajes de barras que es utilizada como entrada de voltajes de barras para iniciar la segunda corrida con una mayor exactitud, para lo cual se usa una tolerancia de 0.0001. De ésta se obtiene una segunda solución de voltajes de barras que enseguida se utiliza como entrada de voltajes de barras para la tercera corrida, la cual una vez llevada a cabo produce la tercera solución de voltajes de barras.

Como se puede observar el proceso puede continuar hasta obtener la solución óptima para los voltajes de barras, lo cual es posible siempre y cuando los voltajes asumidos de entrada estén muy cerca de la solución, ya que el programa lo necesita para operar satisfactoriamente.

Cada salida del caso base comprende 6 páginas:

Datos de entrada en las barras.

Datos de líneas y transformadores.

Solución de voltajes de barras y de potencias de generación y carga.

Pérdidas del sistema y factores utilizados en el programa.

Flujo de corrientes y de potencias a través de las líneas.
Grupos de iteraciones y número de iteraciones realizadas para la totalidad de barras.

Entonces todas las entradas y salidas del programa de computadora para el caso base, mencionadas anteriormente, se muestran en el apéndice C.

VI. OPTIMIZACION

En el presente estudio el proceso de optimización del sistema de potencia Paute consiste en analizar otra alternativa de su configuración para el año 1.979. Según los planes del Instituto Ecuatoriano de Electrificación ésta alternativa tendría al sistema operando a 230 Kv.

A. El nuevo sistema aplicado se muestra con su diagrama unifilar en la figura (VI-1). Se puede observar que el nuevo sistema está conformado por un total de 15 barras y 14 líneas de conexión.

Hay dos barras de generación en el sistema: la una es Paute a 13,8 Kv escogida como la barra oscilante y la otra es Guayaquil 69 Kv cuya generación se estima sea de 91 Kv.

De las líneas de conexión diez son líneas de transmisión y cinco son transformadores de potencia de los cuales uno trabaja con tap de 1.0 y el resto trabaja con tap diferente de 1.0.

B. Nuevas características de líneas y transformadores.

Estas nuevas características se muestran en la tabla (VI-1) con todos los valores en por unidad.

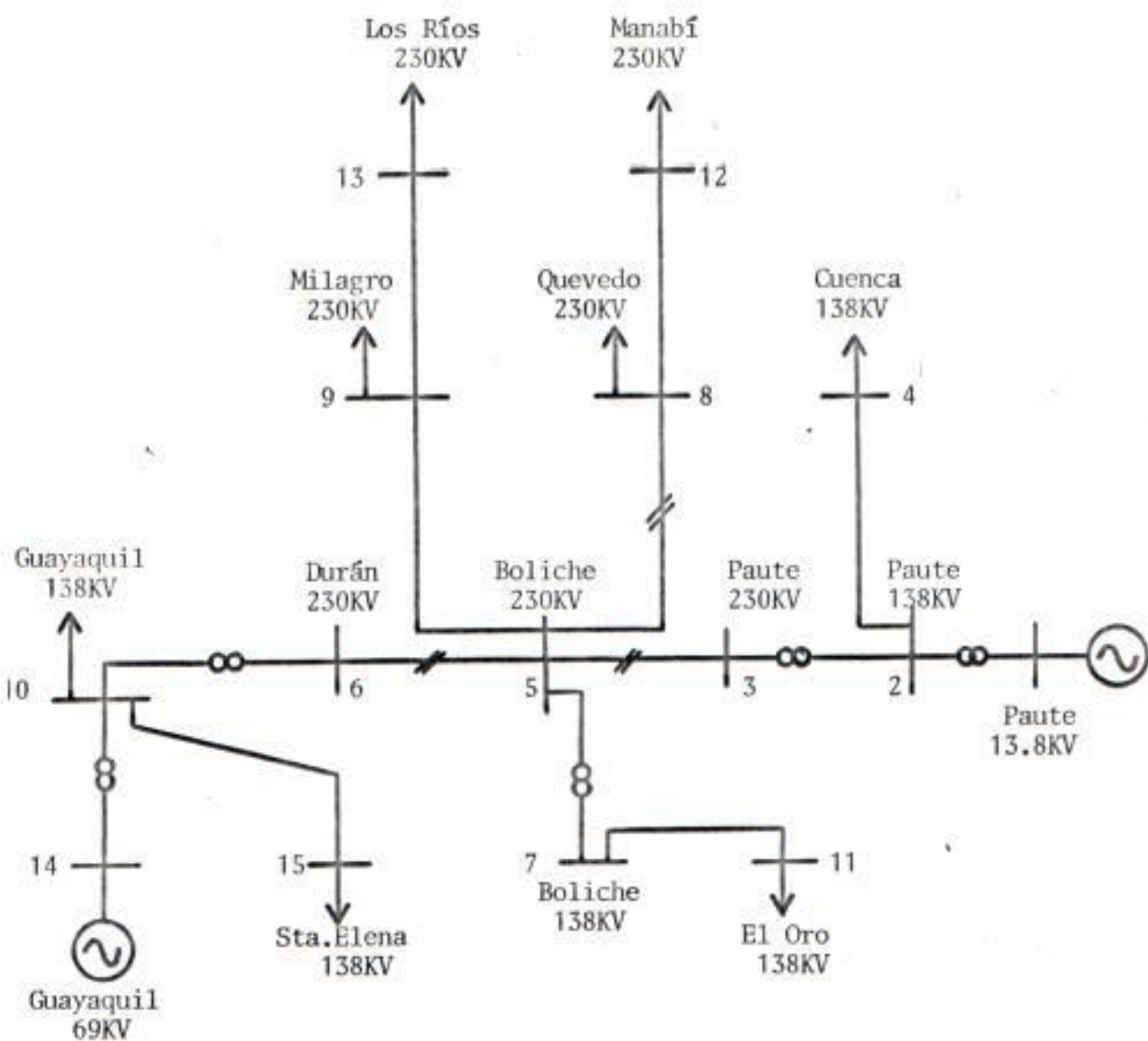


Figura VI-1. Diagrama unifilar del sistema
Paute - Optimización.

BARRA	BARRA	IMPEDANCIA		ADMITANCIA		TAP
		R	X	B'	B''	
1	2		0.0333			0.99
2	3		0.0102			0.97
2	4	0.049	0.1729	0.046		
3	5	0.0086	0.0686	0.574		
5	6	0.0016	0.0132	0.11		
5	7		0.0205			1.01
5	8	0.0077	0.0616	0.516		
5	9	0.007	0.0247	0.007		
6	10		0.0102			1.02
7	11	0.0875	0.3088	0.083		
8	12	0.084	0.2964	0.079		
9	13	0.021	0.0741	0.02		
10	14		0.0167			1.0
10	15	0.077	0.2717	0.073		

Tabla VI-1. Características de líneas y transformadores para proceso de optimización.

C. Características de demanda máxima

Estas se muestran en la tabla (VI-2) y difieren de las del caso base por la numeración diferente de las barras.

Para el proceso de optimización se utilizan los mismos factores de aceleración para las componentes de los voltajes y los factores de tolerancias respectivos se han fijado para este caso en 0.0001 con el fin de obtener una mayor exactitud en la solución de los voltajes de barras.

D. Resultados finales

Los resultados para el proceso de optimización consisten de 12 páginas que contienen la entrada y salida de dos corridas consecutivas dependientes cuyo proceso es como sigue. La primera corrida se inicia con voltajes asumidos en las barras muy cercanos a la solución y entonces se obtiene la primera solución de voltajes de barras la cual se utiliza enseguida como entrada de voltajes de barras asumidos para la segunda corrida; se procesa ésta y se obtiene la solución de voltajes de barras. El proceso podría continuar si se quiere hasta obtener la solución más óptima para los voltajes de barras.

Cada salida de este proceso comprende 6 páginas que contienen lo siguiente:

Datos de entrada en las barras.

BARRA	NOMBRE	POTENCIA	
		MW	MVAR
1	PAUTE13.8KV	0.	0.
2	PAUTE138KV	0.	0.
3	PAUTE230KV	0.	0.
4	CUENCA138KV	22.	10.
5	BOLICHE230KV	0.	0.
6	DURAN230KV	0.	0.
7	BOLICHE138KV	0.	0.
8	QUEVEDO230KV	8.	4.
9	MILAGRO230KV	24.	12.
10	GUAYAQUIL138KV	227.	110.
11	EL ORO138KV	8.	4.
12	MANABI230KV	22.	10.
13	LOS RIOS230KV	4.	2.
14	GUAYAQUIL69KV	0.	0.
15	STA.ELENA138KV	2.	1.

Tabla VI-2. Características de demanda máxima para la optimización.

Datos de líneas y transformadores

Solución de voltajes de barras y de potencias de generación y carga.

Pérdida del sistema y factores utilizados en el programa.

Flujo de corrientes y de potencias a través de las líneas de conexión.

Grupos de iteraciones y número de iteraciones realizadas en todas las barras.

De igual forma que en el caso base, todas las entradas y salidas del programa de computadora, para el proceso de optimización se muestran en apéndice D.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J.B. Ward y H.W. Hale "Solución de problemas de flujo de potencia en forma digital por el uso de computadoras", 1.956, pag. 398.
- (2) A.F. Glimm y G.W. Stagg "Cálculo automático de flujo de carga" 1.957, pag. 817.
- (3) H.W. Hale y R.W. Goodrich "Nuevos aspectos de la computación digital del flujo de potencia", 1.959, pag. 919.
- (4) J.E. Van Ness "Métodos iterativos para estudios digitales de flujo de carga", 1.959, pag. 583.
- (5) J.E. Van Ness "Convergencia de iteración para estudios de flujo de carga", 1.959, pag. 1.590.
- (6) W.J. Stevenson. Análisis de elementos de sistemas de potencia, 1.962, McGraw Hill.
- (7) B.M. Weedy. Sistemas eléctricos de potencia, John Wiley and Sons, 1.967.
- (8) G.W. Stagg y A.H. El Abiad. Métodos de computadora en análisis de sistemas de potencia, McGraw Hill, 1.968.