

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO

FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO  
- METODO DESACOPLADO RAPIDO -

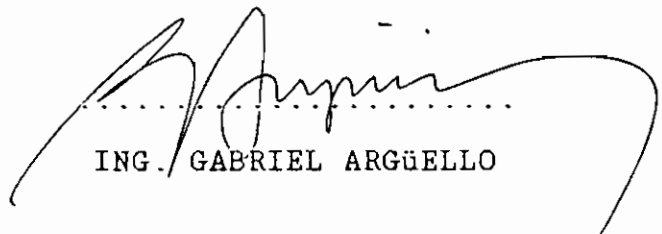
Tesis previa a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico.

VICTOR IVAN GARCIA HUERTAS

1.991

C E R T I F I C A C I O N

Certifico que el presente trabajo ha  
sido desarrollado en su totalidad por  
el Señor Víctor Iván García Huertas.



.....  
ING. GABRIEL ARGÜELLO

D E D I C A T O R I A

A mis Padres y Hermanos.

## A G R A D E C I M I E N T O

Al Señor Ingeniero Gabriel Argüello, por su valiosa colaboración y dirección durante el desarrollo de la Tesis.

A todas las personas que contribuyeron con sus ideas y sugerencias.

## R E S U M E N

El objeto de la presente Tesis es el elaborar un programa interactivo utilizando computadores personales, para calcular el flujo de potencia en forma trifásica. Para resolver el problema se usa el método iterativo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, empleando coordenadas polares.

Se realiza un estudio sobre la modelación de cada uno de los elementos que conforman un Sistema Eléctrico de Potencia en términos de componentes de fase. Se ha modelado el efecto que tienen los Reguladores Automáticos de Voltaje en los generadores y también de las conexiones más comunes en transformadores trifásicos de dos devanados con posiciones de taps.

Se muestran los resultados que se obtienen con el programa para sistemas de potencia en condiciones tanto balanceadas como desbalanceadas.

# I N D I C E

	Página
CAPITULO 1	INTRODUCCION
1.1	Antecedentes..... 1
1.2	Objetivos del cálculo de Flujo de Potencia..... 3
1.3	Alcance del programa desarrollado..... 4
CAPITULO 2	MODELACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA EN FORMA TRIFASICA Y EN COMPONENTES DE FASE A,B,C
2.1	Líneas de Transmisión..... 6
2.1.1	Matrices Impedancia Serie y Admitancia Shunt.... 6
2.1.1.1	Matriz Impedancia Serie..... 6
2.1.1.2	Matriz Impedancia Serie equivalente a tres conductores en Líneas de Transmisión..... 8
2.1.1.3	Matriz Admitancia Shunt..... 11
2.1.1.4	Matriz Admitancia Shunt equivalente a tres conductores en Líneas de Transmisión..... 13
2.1.1.5	Líneas Trifásicas con transposición de conductores..... 15
2.1.1.6	Modelo de Líneas de Transmisión Trifásicas.. 18
2.1.2	Líneas Trifásicas mutuamente acopladas..... 20
2.1.3	Líneas Trifásicas paralelas mutuamente acopladas..... 27

CAPITULO 2	.....Continuación.....	Página
2.1.4	Elementos Shunt y Serie.....	29
2.1.4.1	Elementos Shunt.....	29
2.1.4.2	Elementos Serie.....	31
2.2	Transformadores.....	34
2.2.1	Transformadores Trifásicos de núcleo común.....	34
2.2.2	Bancos de Transformadores Trifásicos.....	43
2.2.3	Transformadores Trifásicos con Taps.....	48
2.3	Generadores Sincrónicos.....	52
CAPITULO 3 MODELACION TRIFASICA DEL SISTEMA DE POTENCIA		
Y METODO DE SOLUCION DEL FLUJO DE POTENCIA		
TRIFASICO DESACOPLADO RAPIDO		
3.1	Matriz Admitancia de Barra del sistema.....	57
3.1.1	División del sistema en Subsistemas.....	57
3.1.2	Seccionalización de un Subsistema.....	58
3.1.3	Formación de la Matriz Admitancia de Barra del sistema.....	64
3.2	Teoría del Flujo de Potencia Trifásico.....	65
3.2.1	Introducción.....	65
3.2.2	Planteamiento del problema del Flujo de Potencia Trifásico.....	66
3.2.2.1	Variables del problema.....	67
3.2.2.2	Ecuaciones que tienen que ser resueltas.....	68

CAPITULO 3	.....Continuación.....	Página
------------	------------------------	--------

3.2.3	Método iterativo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido para resolver el problema del Flujo de Potencia Trifásico.....	75
3.3	Algoritmo de solución.....	87

#### CAPITULO 4 PROGRAMA DIGITAL PARA LA SOLUCION DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO

4.1	Introducción.....	92
4.2	Descripción del Programa y Diagramas de Flujo.....	93
4.2.1	Descripción del Programa.....	93
4.2.2	Diagramas de Flujo.....	95
4.3	Variables del Programa y Arreglos de almacenamiento.....	95
4.3.1	Variables del Programa.....	95
4.3.2	Arreglos de almacenamiento.....	98
4.4	Entrada de datos.....	100
4.5	Salida de resultados.....	101

#### CAPITULO 5 APLICACIONES

5.1	Descripción de los sistemas a resolver.....	104
5.2	Soluciones de los problemas.....	118



## CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.....	155
6.2 Recomendaciones.....	158

ANEXO 1: Cálculo de los elementos de las matrices Impedancia Serie Y Coeficientes de Potencial de Maxwell.

ANEXO 2: Aspectos de detalle de modelación y análisis.

ANEXO 3: Parámetros de la matriz Admitancia de Barra.

ANEXO 4: Matrices Admitancia de Barra en Transformadores.

ANEXO 5: Análisis de los elementos de un Sistema Eléctrico de Potencia por Componentes Simétricas.

ANEXO 6: Coeficientes Subjacobianos.

ANEXO 7: Manual del Programador.

ANEXO 8: Manual de Uso del Programa.

ANEXO 9: Listado del Programa.

BIBLIOGRAFIA.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

#### 1.1 ANTECEDENTES.-

Los flujos de potencia son de gran importancia dentro de los aspectos de análisis de un Sistema Eléctrico de Potencia en estado estable y de allí que han sido tema de muchos trabajos de tesis en la Escuela Politécnica Nacional.

En casi todos ellos, se analiza al sistema en forma balanceada con su equivalente monofásico de secuencia positiva.

Entre esos trabajos, existe uno en particular presentado en 1.988 intitulado "PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJOS DE POTENCIA PARA LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS", en donde se realizó un paquete de programas interactivos que incluyen: el Flujo de Potencia Convencional con sus diferentes métodos de solución, el Flujo de Potencia para Sistemas mal condicionados, Flujo de Potencia Estocástico, Flujo de Potencia Lineal y el Flujo Optimo de Potencia en sus diferentes tipos. Constituye un ejemplo para futuros programas ha desarrollar con la característica interactiva.

Pero, en circunstancias especiales es necesario analizar al sistema eléctrico en forma trifásica, donde es posible considerar desbalances ya sea en carga o en impedancias de Líneas de Transmisión.

Y es así que ya en 1.980 se aporta con un trabajo de Tesis, que contiene el estudio de flujos de potencia en forma trifásica de un sistema eléctrico desbalanceado, en donde se ha desarrollado un programa que utiliza el algoritmo de Gauss-Seidel con la Impedancia de Barra Trifásica en componentes de secuencia; la modelación de los elementos del sistema eléctrico también se la hace en componentes de secuencia.

Ahora, en la presente Tesis, también se estudia a los Flujos de Potencia Trifásicos desbalanceados logrando elaborar un programa interactivo, que usa un algoritmo más eficiente como es el de Newton-Raphson Desacoplado Rápido que necesita de la matriz Admitancia de Barra Trifásica.

La modelación de los elementos del sistema eléctrico, la formulación del problema de flujo de potencia y la solución están en componentes de fase (A, B, C).

## 1.2 OBJETIVOS DEL CALCULO DE FLUJO DE POTENCIA.-

El cálculo del Flujo de Potencia Trifásico permite determinar los voltajes en las fases A, B y C de todas las barras y de los flujos de potencia activa y reactiva en cada elemento del sistema eléctrico de potencia trifásico, bajo condiciones pre-establecidas de carga, generación y configuración del sistema.

A igual que el flujo de potencia monofásico, ayudará en la programación del futuro desarrollo del sistema o en su operación, garantizando un funcionamiento satisfactorio.

Permitirá una observación didáctica de los efectos que tienen los desbalances tanto en las cargas como en las líneas de transmisión, sobre los voltajes y flujos de potencia en diferentes puntos del sistema. La información es más detallada, así por ejemplo, se comprobará el desbalance que existe en los voltajes de fase en una misma barra de un sistema real a excepción de los voltajes internos de los generadores, como ciertamente sucede.

Para el caso de los transformadores trifásicos, se observará la influencia que tienen las conexiones sobre los ángulos de los voltajes en las barras primarias o secundarias.

### 1.3 ALCANCE DEL PROGRAMA DESARROLLADO.-

Es un programa que permite un manejo interactivo, y siguiendo el método iterativo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido calcula los voltajes de todas las barras, luego encuentra los flujos de potencia activa y reactiva por cada fase de los elementos trifásicos que conforman el Sistema Eléctrico de Potencia.

La matriz admitancia de barra trifásica y las submatrices jacobianas son almacenadas siguiendo a una técnica de almacenamiento de matrices dispersas.

El programa tiene varias características nuevas para simular la operación real trifásica de un sistema de potencia y en condiciones desbalanceadas. Por ejemplo, los voltajes internos inducidos de los generadores son balanceados, mientras que los voltajes terminales dependen de las corrientes desbalanceadas que pasan a través de las impedancias internas de las máquinas. Además, se hace la simulación del regulador de voltaje en estado estable.

Permite simular redes combinadas con alimentaciones bifásicas o monofásicas, como se tiene en los sistemas de distribución y es en estas redes donde se vislumbra una importante aplicación de este método.

El programa puede manejar las conexiones más comunes que puede tener un transformador trifásico de dos devanados. También considera las posiciones de tap en los devanados primario y secundario.

Debido al grado de representación usada en los modelos trifásicos, los requerimientos computacionales de tiempo y memoria son más grandes que los correspondientes para el caso de flujos de potencia monofásicos.

## CAPITULO 2

### MODELACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA EN FORMA TRIFASICA Y EN COMPONENTES DE FASE A,B,C

#### 2.1 LINEAS DE TRANSMISION.-

##### 2.1.1 MATRICES IMPEDANCIA SERIE Y ADMITANCIA SHUNT.-

##### 2.1.1.1 MATRIZ IMPEDANCIA SERIE.-

Sea una línea trifásica con configuración asimétrica de conductores como indica la fig. 2.1.1; tiene un conductor de guarda o de apantallamiento "g".

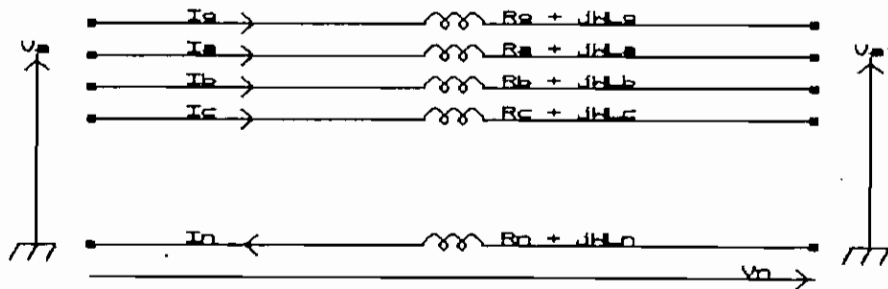


Fig. 2.1.1 Impedancias serie en una línea trifásica.

Se puede escribir la siguiente ecuación para la caída de voltaje en el conductor "a":

$$\Delta V_a = V_a - V_a' = I_a(R_a + jX_{La}) + I_b(jX_{Lab}) + I_c(jX_{Lac}) + I_g(jX_{Lag}) - I_n(jX_{Lan}) + V_n$$

Además, de la fig. 2.1.1 se obtiene que:

$$V_n = I_n(R_n + j\omega L_n) - I_a(j\omega L_{na}) - I_b(j\omega L_{nb}) - I_c(j\omega L_{nc}) - I_g(j\omega L_{ng})$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c + I_g$$

Entonces para la caída de voltaje en el conductor "a" se tiene:

$$\Delta V_a = Z_{aa-n} I_a + Z_{ab-n} I_b + Z_{ac-n} I_c + Z_{ag-n} I_g \quad (2.1.1)$$

de donde:

$$Z_{aa-n} = R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$$

$$Z_{ab-n} = j\omega L_{ab} - j\omega L_{bn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$$

$$Z_{ac-n} = j\omega L_{ac} - j\omega L_{cn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$$

$$Z_{ag-n} = j\omega L_{ag} - j\omega L_{gn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$$

Similares ecuaciones pueden plantearse para las fases b, c y para el conductor de guarda "g", resultando la siguiente ecuación matricial:

$\Delta V_a$	$Z_{aa-n}$	$Z_{ab-n}$	$Z_{ac-n}$	$Z_{ag-n}$	$I_a$	(2.1.2)
$\Delta V_b$	$Z_{ba-n}$	$Z_{bb-n}$	$Z_{bc-n}$	$Z_{bg-n}$	$I_b$	
$\Delta V_c$	$Z_{ca-n}$	$Z_{cb-n}$	$Z_{cc-n}$	$Z_{cg-n}$	$I_c$	
$\Delta V_g$	$Z_{ga-n}$	$Z_{gb-n}$	$Z_{gc-n}$	$Z_{gg-n}$	$I_g$	

La subscripción "n" indica el retorno por tierra.



Cada elemento de la diagonal, por ejemplo,  $Z_{aa-n}$  es la impedancia propia en serie del lazo formado por el conductor de la fase "a" y el retorno por tierra. Mientras que los elementos fuera de la diagonal, por ejemplo,  $Z_{ab-n}$  es la impedancia mutua en serie entre los conductores de las fases "a" y "b" e indica el voltaje inducido longitudinalmente en el conductor de la fase "a" si fluye corriente en el conductor de la fase "b".

La ec. (2.1.2) puede también ser expresada como:

$$[\Delta V] = [Z][I] \quad (2.1.3)$$

donde  $[Z]$  es la Matriz Impedancia Serie de la línea, que se caracteriza por ser compleja y simétrica.

En algunos trabajos de Tesis se indica detalladamente el cálculo de los elementos de la matriz impedancia serie de una Línea de Transmisión, sin embargo en el Anexo 1 se muestra una opción de cálculo que siendo aproximada será de mucha utilidad.

#### 2.1.1.2 MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EQUIVALENTE A TRES CONDUCTORES EN LINEAS DE TRANSMISION.-

Para análisis del sistema en estado estable es muy importante tener una línea equivalente a tres conductores,

es decir, que las fases a, b y c tengan el efecto de los conductores de guarda. Este procedimiento se justifica porque interesa solamente la acción de los conductores de fase en la transmisión de Energía Eléctrica.

La ec. (2.1.2), también se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{abc} \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{abo} & Z_{abog} \\ Z_{gabo} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

Expandiendo la ec. (2.1.4) y considerando que el cable de guarda está a un voltaje de valor cero, se tiene:

$$\Delta V_{abc} = Z_{abc} I_{abc} + Z_{abcg} I_g \quad (2.1.5)$$

$$0 = Z_{gabc} I_{abc} + Z_{gg} I_g \quad (2.1.6)$$

Despejando  $I_g$  de la ec. (2.1.6), se obtiene:

$$I_g = - Z_{gg}^{-1} Z_{gabc} I_{abc} \quad (2.1.7)$$

Y reemplazando la ec. (2.1.7) en la ec. (2.1.5), se tiene:

$$\Delta V_{abc} = [ Z_{abc} - Z_{abcg} Z_{gg}^{-1} Z_{gabc} ] I_{abc}$$

de donde, la matriz impedancia serie equivalente a tres con-

ductores viene dada por:

$$Z'_{abc} = Z_{abc} - Z_{abcg} Z_{gg}^{-1} Z_{gabc} =$$

$Z'_{aa-n}$	$Z'_{ab-n}$	$Z'_{ac-n}$
$Z'_{ba-n}$	$Z'_{bb-n}$	$Z'_{bc-n}$
$Z'_{ca-n}$	$Z'_{cb-n}$	$Z'_{cc-n}$

(2.1.8)

Pero en forma general, esta técnica se extiende a cualquier número de circuitos trifásicos con sus respectivos cables de guarda, así por ejemplo, en una línea de transmisión trifásica de doble circuito, la matriz impedancia serie equivalente a tres conductores será de la siguiente forma:

$$Z'_{serie} =$$

$Z'_{aa-n}$	$Z'_{ab-n}$	$Z'_{ac-n}$	$Z'_{aA-n}$	$Z'_{aB-n}$	$Z'_{aC-n}$
$Z'_{ba-n}$	$Z'_{bb-n}$	$Z'_{bc-n}$	$Z'_{bA-n}$	$Z'_{bB-n}$	$Z'_{bC-n}$
$Z'_{ca-n}$	$Z'_{cb-n}$	$Z'_{cc-n}$	$Z'_{cA-n}$	$Z'_{cB-n}$	$Z'_{cC-n}$
$Z'_{Aa-n}$	$Z'_{Ab-n}$	$Z'_{Ac-n}$	$Z'_{AA-n}$	$Z'_{AB-n}$	$Z'_{AC-n}$
$Z'_{Ba-n}$	$Z'_{Bb-n}$	$Z'_{Bc-n}$	$Z'_{BA-n}$	$Z'_{BB-n}$	$Z'_{BC-n}$
$Z'_{Ca-n}$	$Z'_{Cb-n}$	$Z'_{Cc-n}$	$Z'_{CA-n}$	$Z'_{CB-n}$	$Z'_{CC-n}$

de donde las fases a, b y c son del circuito No. 1, y las fases A, B y C son del circuito No. 2.

2.1.1.3 MATRIZ ADMITANCIA SHUNT.-

En la fig. 2.1.2, los voltajes con respecto a tierra de los cuatro conductores son relacionados con sus respectivas cargas (Q) con la ecuación matricial (2.1.9).

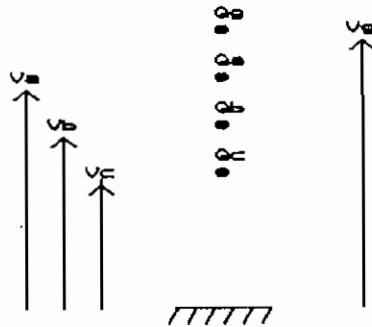


Fig. 2.1.2 Conductores de una Línea de Transmisión.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{ag} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bg} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{cg} \\ P_{ga} & P_{gb} & P_{gc} & P_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

y en forma general es:

$$[ V ] = [ P ] [ Q ]$$

siendo, [ P ] la matriz de Coeficientes de Potencial de Maxwell.

La matriz de coeficientes de Maxwell es real y simétrica, y sus elementos también se calculan a partir de la configuración geométrica de la torre de alta tensión y del radio de los conductores. En el Anexo 1, se encuentran las ecuaciones para su cálculo.

La matriz capacitancia se obtiene por la inversión de la matriz [ P ], es decir:

$$[ C ] = [ P ]^{-1} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline C_{aa} & - C_{ab} & - C_{ac} & - C_{ag} \\ \hline - C_{ba} & C_{bb} & - C_{bc} & - C_{bg} \\ \hline - C_{ca} & - C_{cb} & C_{cc} & - C_{cg} \\ \hline - C_{ga} & - C_{gb} & - C_{gc} & C_{gg} \\ \hline \end{array} \quad (2.1.9.1)$$

Y la matriz admitancia shunt de la línea trifásica es:

$$Y_{shunt} = j \omega [ C ] = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & Y_{ag} \\ \hline Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & Y_{bg} \\ \hline Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & Y_{cg} \\ \hline Y_{ga} & Y_{gb} & Y_{gc} & Y_{gg} \\ \hline \end{array} \quad (2.1.9.2)$$

siendo una matriz compleja y simétrica.

2.1.1.4 MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EQUIVALENTE A TRES CONDUCTORES EN LINEAS DE TRANSMISION.-

Expresando la ecuación matricial (2.1.9) en forma dividida:

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{abc} & P_{abcg} \\ P_{gabc} & P_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{abc} \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.1.10)$$

Expandiendo la ec. (2.1.10) y reconociendo que el voltaje con respecto a tierra del conductor de guarda es cero, entonces:

$$V_{abc} = P_{abc} Q_{abc} + P_{abcg} Q_g \quad (2.1.11)$$

$$0 = P_{gabc} Q_{abc} + P_{gg} Q_g \quad (2.1.12)$$

Despejando  $Q_g$  de la ec. (2.1.12) y reemplazando en la ec. (2.1.11), se obtiene la siguiente relación:

$$V_{abc} = [ P_{abc} - P_{abcg} P_{gg}^{-1} P_{gabc} ] Q_{abc}$$

de donde la matriz de Coeficientes de Potencial de Maxwell equivalente a tres conductores es:

$$P'_{abc} = P_{abc} - P_{abcg} P_{gg}^{-1} P_{gabc}$$

Con la cual, la matriz capacitancia equivalente a tres conductores es:

$$[ C'_{abc} ] = [ P'_{abc} ]^{-1} = \begin{bmatrix} C'_{aa} & -C'_{ab} & -C'_{ac} \\ -C'_{ba} & C'_{bb} & -C'_{bc} \\ -C'_{ca} & -C'_{cb} & C'_{cc} \end{bmatrix}$$

La matriz admitancia shunt equivalente a tres conductores es:

$$Y'_{shunt} = j \omega [ C'_{abc} ] = \begin{bmatrix} Y'_{aa} & Y'_{ab} & Y'_{ac} \\ Y'_{ba} & Y'_{bb} & Y'_{bc} \\ Y'_{ca} & Y'_{cb} & Y'_{cc} \end{bmatrix}$$

(2.1.13)

Este procedimiento se expande a líneas de dos o más de circuitos trifásicos, por ejemplo, la matriz admitancia shunt equivalente a tres conductores de una línea de transmisión trifásica de doble circuito es:

$$Y'_{shunt} = \begin{bmatrix} Y'_{aa} & Y'_{ab} & Y'_{ac} & Y'_{aA} & Y'_{aB} & Y'_{aC} \\ Y'_{ba} & Y'_{bb} & Y'_{bc} & Y'_{bA} & Y'_{bB} & Y'_{bC} \\ Y'_{ca} & Y'_{cb} & Y'_{cc} & Y'_{cA} & Y'_{cB} & Y'_{cC} \\ Y'_{Aa} & Y'_{Ab} & Y'_{Ac} & Y'_{AA} & Y'_{AB} & Y'_{AC} \\ Y'_{Ba} & Y'_{Bb} & Y'_{Bc} & Y'_{BA} & Y'_{BB} & Y'_{BC} \\ Y'_{Ca} & Y'_{Cb} & Y'_{Cc} & Y'_{CA} & Y'_{CB} & Y'_{CC} \end{bmatrix}$$

de donde las fases del circuito No. 1 son a, b y c, mientras que A, B y C son las fases del circuito No. 2.

2.1.1.5 LINEAS TRIFASICAS CON TRANSPOSICION DE CONDUCTORES.-

La transposición de los conductores de las fases, es el intercambio de la posición de los conductores de cada fase en ciertos intervalos a lo largo de la línea.

La transposición se la realiza para reducir al mínimo el desequilibrio electromagnético y electrostático entre las fases y la interferencia inductiva a los circuitos de comunicaciones próximos.[6]

Sea por ejemplo una línea trifásica con transposición de conductores, como muestra la fig. 2.1.3.

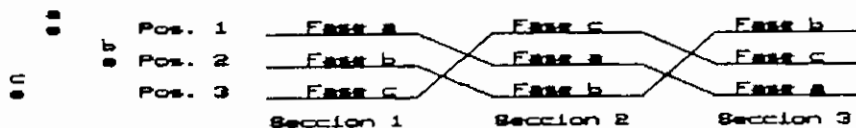


Fig. 2.1.3 Ciclo de transposición de conductores.

Existe para cada sección una posición diferente de



los conductores de cada fase, obligando a tener matrices impedancia serie y admitancia shunt para cada sección, de tal forma que para su formación se debe tomar en cuenta la disposición geométrica de los conductores en cada sección como se indica en la fig. 2.1.4.



Fig. 2.1.4 Disposición geométrica de las fases en secciones de una transposición.

Entonces, las matrices impedancia serie y admitancia shunt tendrán la siguiente forma:

- para la sección 1,

$$Z_{I \text{ serie}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ \hline Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ \hline Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \\ \hline \end{array}$$

$$Y_{I \text{ shunt}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ \hline Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ \hline Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \\ \hline \end{array}$$

- para la sección 2,

$$Z_{II \text{ serie}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_{22} & Z_{23} & Z_{21} \\ \hline Z_{32} & Z_{33} & Z_{31} \\ \hline Z_{12} & Z_{13} & Z_{11} \\ \hline \end{array}$$

$$Y_{II \text{ shunt}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{22} & Y_{23} & Y_{21} \\ \hline Y_{32} & Y_{33} & Y_{31} \\ \hline Y_{12} & Y_{13} & Y_{11} \\ \hline \end{array}$$

- para la sección 3,

$$Z_{III \text{ serie}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_{33} & Z_{31} & Z_{32} \\ \hline Z_{13} & Z_{11} & Z_{12} \\ \hline Z_{23} & Z_{21} & Z_{22} \\ \hline \end{array} \quad Y_{III \text{ shunt}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{33} & Y_{31} & Y_{32} \\ \hline Y_{13} & Y_{11} & Y_{12} \\ \hline Y_{23} & Y_{21} & Y_{22} \\ \hline \end{array}$$

Así mismo puede ocurrir transposición en líneas trifásicas de doble circuito, por ejemplo como aquel que muestra la fig. 2.1.5.

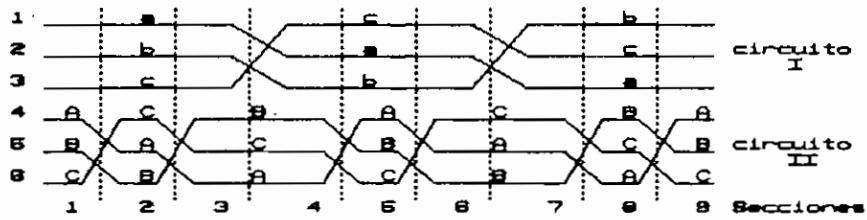


Fig. 2.1.5 Esquema de transposición en línea de doble circuito.

De donde para cada sección existen las matrices impedancia serie y admitancia shunt, por ejemplo, para la sección 3 se tiene:

$$Z_{III \text{ serie}} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{14} & Z_{15} \\ \hline Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{24} & Z_{25} \\ \hline Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{34} & Z_{35} \\ \hline Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{44} & Z_{45} \\ \hline Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{54} & Z_{55} \\ \hline \end{array}$$

Y también:

$$Y_{\text{shunt}} =$$

$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	$Y_{18}$	$Y_{14}$	$Y_{15}$
$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	$Y_{28}$	$Y_{24}$	$Y_{25}$
$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$	$Y_{38}$	$Y_{34}$	$Y_{35}$
$Y_{81}$	$Y_{82}$	$Y_{83}$	$Y_{88}$	$Y_{84}$	$Y_{85}$
$Y_{41}$	$Y_{42}$	$Y_{43}$	$Y_{48}$	$Y_{44}$	$Y_{45}$
$Y_{51}$	$Y_{52}$	$Y_{53}$	$Y_{58}$	$Y_{54}$	$Y_{55}$

2.1.1.6 MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION TRIFASICAS.-

Usando las matrices Impedancia Serie y Admitancia Shunt se representa una línea trifásica mediante un modelo  $\pi$  nominal, como indica la fig. 2.1.6, siendo una ilustración completa de las tres fases.

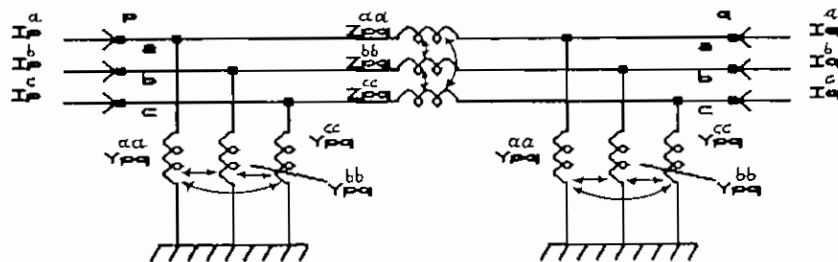


Fig. 2.1.6 Representación de una línea trifásica.

Representando la fig. 2.1.6 por su equivalente matricial, se obtiene:

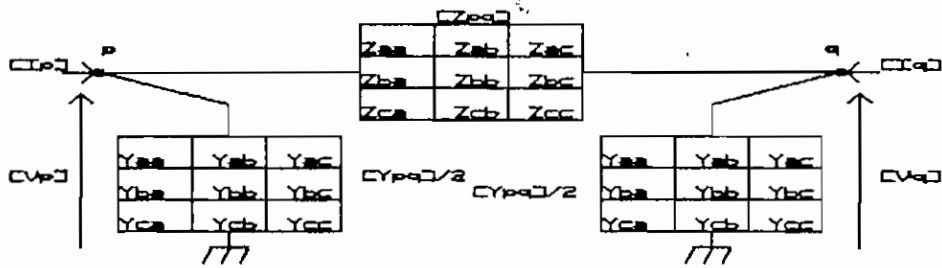


Fig. 2.1.7 Representación matricial de una línea trifásica.

La línea trifásica de la fig. 2.1.6, se la expresa en forma mas concentrada usando Admitancias Compuestas como indica la fig. 2.1.8. (En el Anexo 2 encontrará la definición de Admitancia Compuesta).

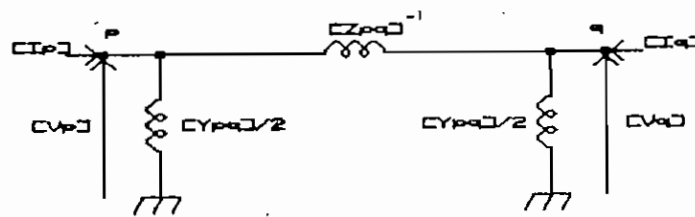


Fig. 2.1.8 Representación en admitancias compuestas de una línea trifásica.

Cada matriz admitancia es del orden 3X3.

Siguiendo con las reglas ( ver Anexo 2 ) para la formación de la matriz admitancia de barra, las corrientes inyectadas nodales de la fig. 2.1.8, son relacionadas con los voltajes nodales por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{pq}]^{-1} + [Y_{pq}]/2 & - [Z_{pq}]^{-1} \\ - [Z_{pq}]^{-1} & [Z_{pq}]^{-1} + [Y_{pq}]/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_q] \end{bmatrix} \quad (2.1.14)$$

Esta es una representación de la matriz admitancia de barra para una línea trifásica, comprendida entre las barras "p" y "q" en términos de cantidades matriciales de orden 3x3.

### 2.1.2 LINEAS TRIFASICAS MUTUAMENTE ACOPLADAS.-

Cuando dos o más líneas de transmisión ocupan el mismo derecho de vía para una longitud determinada, ocurren los acoplamientos electrostáticos y electromagnéticos entre ellas provocados por desbalances tanto por corrientes como por disposición geométrica de los conductores en las torres.

Aunque, los desequilibrios naturales producidos por las propias cargas de las líneas de transmisión, son superiores a aquellas causadas por la asimetría de los conducto-

res en las torres.[6]

Considerando el caso más común, que es el de dos líneas de transmisión trifásicas mutuamente acopladas como se indica en la fig. 2.1.9, como se observa, A y B son las barras de emisión, C y D son las barras de recepción.

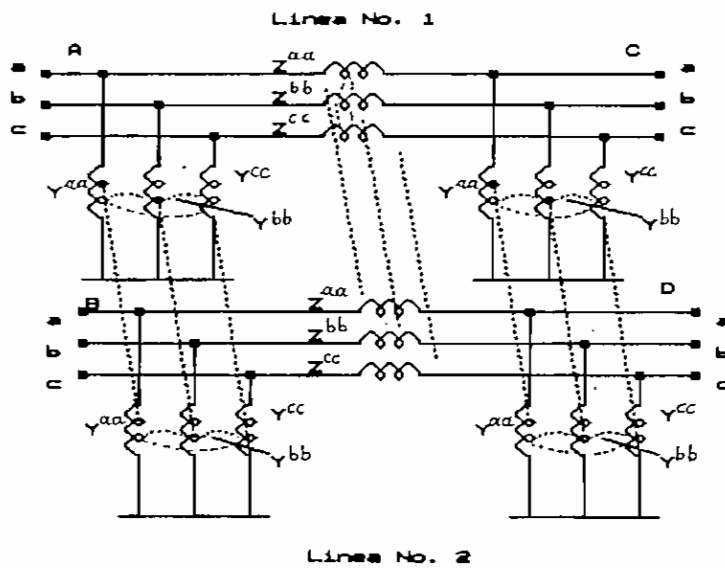


Fig. 2.1.9 Representación trifásica de dos líneas de transmisión mutuamente acopladas.

Usando Admitancias Compuestas, estas líneas trifásicas son representadas en una forma más simple tal como se ilustra en la fig. 2.1.10, donde cada admitancia es una matriz de orden  $3 \times 3$ , y todos los voltajes y corrientes son vectores de orden  $3 \times 1$ .

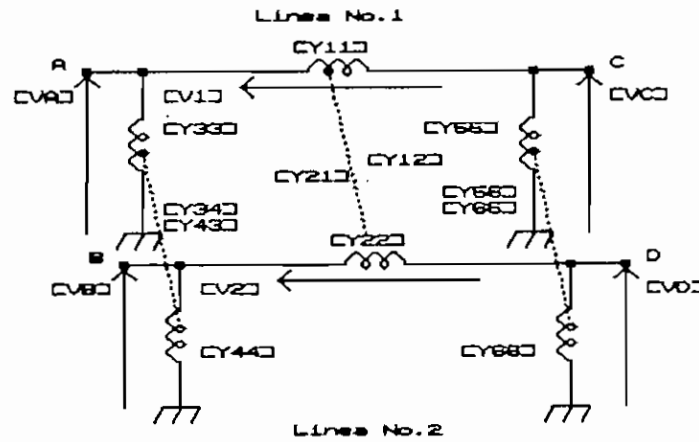


Fig. 2.1.10 Representación en admitancias compuestas de dos líneas de transmisión mutuamente acopladas.

De esta figura, los elementos serie acoplados representan el acoplamiento electromagnético, mientras que los elementos shunt acoplados representan el acoplamiento electrostático o capacitivo.

Siguiendo la técnica de la Transformación Lineal explicada en el Anexo 2, tenemos que la red primitiva para la red de la fig. 2.1.10, es:

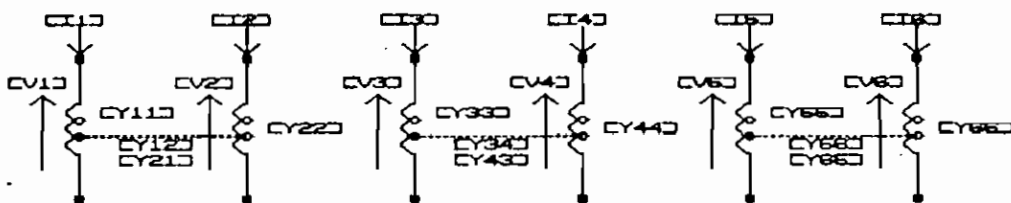


Fig. 2.1.11 Red primitiva.

La matriz admitancia primitiva a partir de la red de la fig. 2.1.11 es:

$$\begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \\ [I_3] \\ [I_4] \\ [I_5] \\ [I_6] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{11}] & [Y_{12}] & & & & & \\ [Y_{21}] & [Y_{22}] & & & & & \\ & & [Y_{33}] & [Y_{34}] & & & \\ & & [Y_{43}] & [Y_{44}] & & & \\ & & & & [Y_{55}] & [Y_{56}] & \\ & & & & [Y_{65}] & [Y_{66}] & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \\ [V_3] \\ [V_4] \\ [V_5] \\ [V_6] \end{bmatrix}$$

[ Y primitiva ]

De las figs. 2.1.10 y 2.1.11 se observa que:

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \\ [V_3] \\ [V_4] \\ [V_5] \\ [V_6] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & -1 & & & \\ & 1 & & -1 & & \\ 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_A] \\ [V_B] \\ [V_C] \\ [V_D] \end{bmatrix}$$

[ I ]

siendo [ I ] la matriz de Incidencia o llamada también Conexión.

Pero de acuerdo con la referencia [16], se tiene que:



$$[Y_{\text{barra}}] = [I]^T [Y_{\text{primitiva}}] [I] \quad (2.1.15)$$

Por lo que:

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline Y_{11} + Y_{33} & Y_{12} + Y_{34} & - Y_{11} & - Y_{12} \\ \hline Y_{21} + Y_{43} & Y_{22} + Y_{44} & - Y_{21} & - Y_{22} \\ \hline - Y_{11} & - Y_{12} & Y_{11} + Y_{55} & Y_{12} + Y_{58} \\ \hline - Y_{21} & - Y_{22} & Y_{21} + Y_{85} & Y_{22} + Y_{88} \\ \hline \end{array}$$

Sin embargo, de acuerdo con el hecho de que el acoplamiento es bilateral se tiene:

$$[Y_{21}] = [Y_{12}]^T ; [Y_{43}] = [Y_{34}]^T ; [Y_{85}] = [Y_{58}]^T$$

Luego, la matriz admitancia de barra para dos líneas trifásicas mutuamente acopladas queda como lo indica la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{|c|} \hline [IA] \\ \hline [IB] \\ \hline [IC] \\ \hline [ID] \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline Y_{11}+Y_{33} & Y_{12}+Y_{34} & - Y_{11} & - Y_{12} \\ \hline Y_{12}^T+Y_{34}^T & Y_{22}+Y_{44} & - Y_{12}^T & - Y_{22} \\ \hline - Y_{11} & - Y_{12} & Y_{11}+Y_{55} & Y_{12}+Y_{58} \\ \hline - Y_{12}^T & - Y_{22} & Y_{12}^T+Y_{58}^T & Y_{22}+Y_{88} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline [VA] \\ \hline [VB] \\ \hline [VC] \\ \hline [VD] \\ \hline \end{array}$$

$$(2.1.16)$$

Por otro lado, si los parámetros acoplados entre lí-

neas de transmisión de la fig. 2.1.10, son agrupados de manera similar a los acoplamientos entre fases en una línea simple, de modo que se consigue una representación matricial, como indica la fig. 2.1.12.

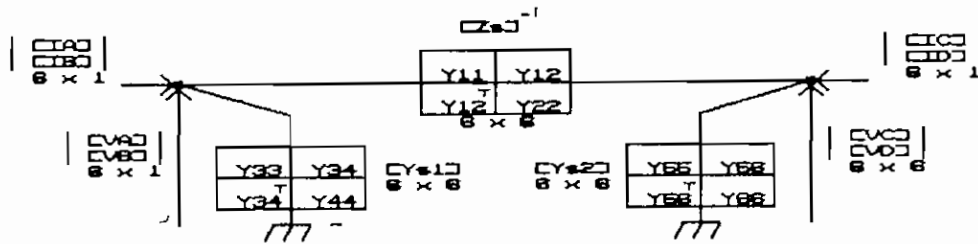


Fig. 2.1.12 Representación matricial de dos líneas de transmisión mutuamente acopladas.

En esta figura se aprecia claramente a las matrices Admitancia Serie y Admitancia Shunt, por lo tanto nos conduce a la idea de tener una red compuesta como la que muestra la fig. 2.1.13.

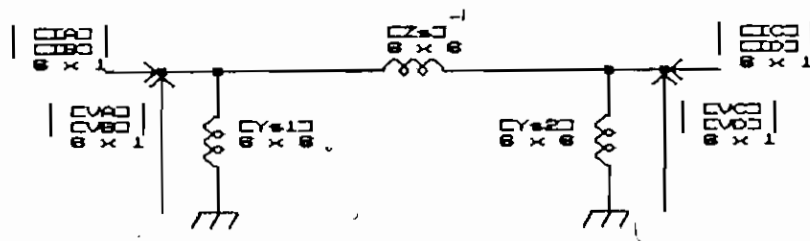


Fig. 2.1.13 Representación en admitancias compuestas de dos líneas de transmisión mutuamente acopladas.

Las matrices admitancia son de orden 6X6, y tomando en cuenta la regla para la formación de la matriz admitancia de barra (como muestra el Anexo 2) se tiene:

$$\begin{bmatrix} [I_A] \\ [I_B] \\ [I_C] \\ [I_D] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{\bullet}]^{-1} + [Y_{\bullet 1}] & - [Z_{\bullet}]^{-1} \\ - [Z_{\bullet}]^{-1} & [Z_{\bullet}]^{-1} + [Y_{\bullet 2}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_A] \\ [V_B] \\ [V_C] \\ [V_D] \end{bmatrix} \quad (2.1.17)$$

En otras palabras, a partir de la ec. (2.1.16), y con la conveniente partición, se obtiene la ec. (2.1.17).

Así, se comprueba la efectividad de trabajar con redes compuestas como sucede con la red de la fig. 2.1.13, en donde la formación de la ec. (2.1.17) se entiende fácilmente.

La matriz admitancia de barra contenida en la ec. (2.1.17), es similar a aquella de la ec. (2.1.14) obtenida para el caso de una línea trifásica, y la diferencia radica en el orden de las matrices impedancia serie y admitancia shunt.

Entonces, el orden de esas matrices depende del núme-

ro de líneas trifásicas mutuamente acopladas tal como indica la tabla 2.1.

Tabla 2.1

NUMERO DE LINEAS TRIFASICAS MUTUAMENTE ACOPLADAS	ORDEN DE LAS MATRICES [Z] serie y [Y] shunt
1	3X3
2	6X6
3	9X9
4	12X12

De manera que disponiendo de la matrices impedancia serie y admitancia shunt, obtendremos la matriz admitancia de barra aplicando la ec. (2.1.17).

2.1.3 LINEAS TRIFASICAS PARALELAS MUTUAMENTE ACOPLADAS.-

Sean dos líneas trifásicas paralelas, esto es, que tienen la misma barra de emisión y la misma barra de recepción como muestra la fig. 2.1.14.

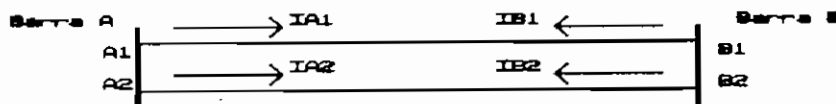


Fig. 2.1.14 Diagrama unifilar de dos líneas de transmisión paralelas.

De acuerdo con la ec. (2.1.16), la matriz admitancia de barra que relaciona las corrientes y voltajes en las barras A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> es:

$$\begin{bmatrix} [IA_1] \\ [IA_2] \\ [IB_1] \\ [IB_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ [YA_1A_2B_1B_2] & & & \\ & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [VA_1] \\ [VA_2] \\ [VB_1] \\ [VB_2] \end{bmatrix} \quad (2.1.18)$$

De la fig. 2.1.14, se observa que:

$$[VA] = [VA_1] = [VA_2]$$

$$[VB] = [VB_1] = [VB_2]$$

También, las corrientes inyectadas en las barras son:

$$[IA] = [IA_1] + [IA_2]$$

$$[IB] = [IB_1] + [IB_2]$$

Tomando estas consideraciones en la ec. (2.1.18), se tiene que:

$$\begin{bmatrix} [IA] \\ [IB] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}+Y_{33}+Y_{12}+Y_{34} & -Y_{11}-Y_{12} \\ +Y_{12}^T+Y_{34}^T+Y_{22}+Y_{44} & -Y_{12}^T-Y_{22} \\ -Y_{11}-Y_{12} & Y_{11}+Y_{55}+Y_{12}+Y_{56} \\ -Y_{12}^T-Y_{22} & +Y_{12}^T+Y_{56}^T+Y_{22}+Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [VA] \\ [VB] \end{bmatrix} \quad (2.1.19)$$

Para efectuar el cálculo de flujos de potencia en forma individual para cada línea se toma la matriz admitancia de barra de la ec. (2.1.18), y la matriz admitancia de barra resultante de la ec. (2.1.19) se usa para formar la matriz admitancia de barra trifásica total del sistema.

El Anexo 5 contiene el estudio en términos de componentes simétricas para líneas de transmisión.

#### 2.1.4 ELEMENTOS SHUNT Y SERIE. -

Algunos de los objetivos que se persiguen en la operación de un sistema de potencia son: calidad y economía en el suministro del servicio de energía eléctrica. En cualquier caso implica la presencia de elementos shunt y serie. Al decir elementos se habla de bancos trifásicos de reactores o condensadores.

##### 2.1.4.1 ELEMENTOS SHUNT. -

Sea un banco trifásico de condensadores como indica la fig. 2.1.15, que está conectado a una barra específica.

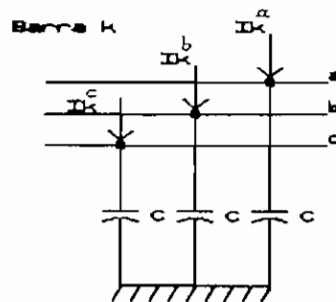


Fig. 2.1.15 Representación trifásica de un banco de condensadores shunt.

siendo  $C$  la capacitancia por fase.

En forma matricial, se tiene:

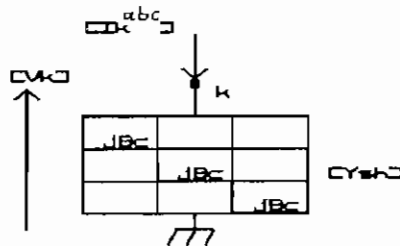


Fig. 2.1.16 Representación matricial de un banco de condensadores shunt.

de donde:

$$B_c = \text{susceptancia capacitiva} = \omega C$$

Como se ve en la fig. 2.1.16, la matriz admitancia es diagonal ya que normalmente no existe acoplamiento entre los componentes de cada fase.

Expresando al banco trifásico en forma más compacta se tiene:

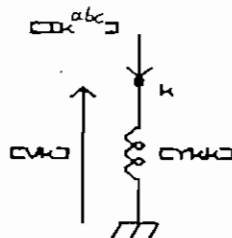


Fig. 2.1.17 Representación en admitancias compuestas de un banco de condensadores shunt.

En forma similar se tiene para un banco trifásico de reactores, en donde su representación matricial es:

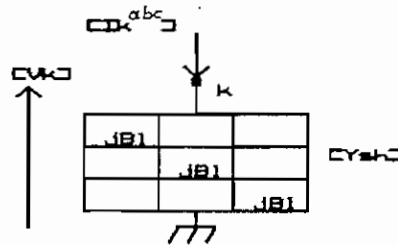


Fig. 2.1.18 Representación matricial de un banco de reactores shunt.

de donde:

$$B_L = \text{susceptancia inductiva} = -1 / \omega L.$$

En resumen, las matrices admitancia que representan los elementos shunt se caracterizan por ser diagonales.

#### 2.1.4.2 ELEMENTOS SERIE.-

En forma general, cualquier elemento conectado directamente entre dos barras puede ser considerado como elemento serie. Pero aquí, se refiere a la situación de los reactores o condensadores serie que se ubican en las líneas de transmisión.



Sea un banco trifásico de condensadores en serie como indica la fig. 2.1.19.

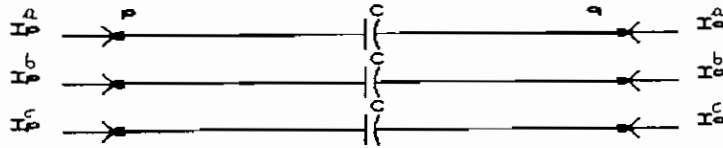


Fig. 2.1.19 Representación trifásica de un banco de condensadores en serie.

Las figs. 2.1.20 y 2.1.21 muestran diferentes maneras de representar un banco trifásico de condensadores.

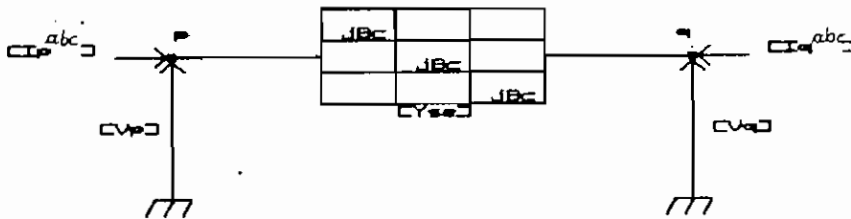


Fig. 2.1.20 Representación matricial de un banco de condensadores en serie.

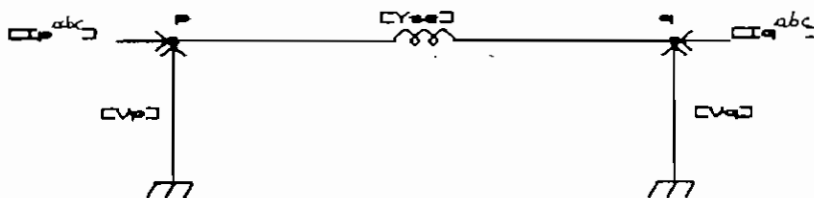


Fig. 2.1.21 Representación en admitancias compuestas de un banco de condensadores en serie.

En forma similar se tiene para un banco trifásico de reactores, por ejemplo, su representación matricial es como ilustra la fig. 2.1.22.

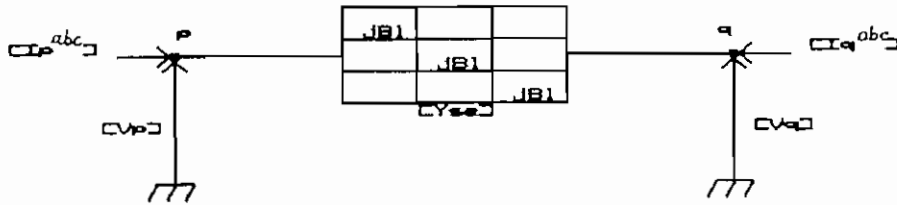


Fig. 2.1.22 Representación matricial de un banco de reactores en serie.

Así como en los elementos shunt, las matrices admitancia de los elementos serie también son diagonales.

En general, la matriz admitancia de barra trifásica para un elemento serie es planteada por simple inspección, quedando de la siguiente manera:

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{bmatrix} [Y_{SE}] & - [Y_{SE}] \\ - [Y_{SE}] & [Y_{SE}] \end{bmatrix}$$

donde  $[Y_{SE}]$  es la matriz admitancia trifásica en componentes de fase del elemento serie.

## 2.2 TRANSFORMADORES.-

En estudios de flujos de potencia para sistemas trifásicos balanceados no se toma en cuenta las posibles conexiones que puede tener el transformador trifásico porque solamente la red de secuencia positiva es usada.

Sin embargo, cuando el sistema es desbalanceado, aunque el transformador trifásico no lo sea, se precisa modelar en sus componentes de fase a,b,c para considerar una representación más precisa en que se toma en cuenta las diferentes conexiones que puede tener e incluso posiciones de taps.

Así, la modelación para todas las conexiones de los transformadores trifásicos de dos devanados en componentes de fase es posible, aunque aquí solo se trate para la conexión Estrella-tierra / Delta, indica el camino ha seguir para las otras conexiones.

### 2.2.1 TRANSFORMADORES TRIFASICOS DE NUCLEO COMUN.-

El circuito de la fig. 2.2.1, muestra un transformador trifásico de dos devanados con un núcleo común de tres brazos, en donde las bobinas 1, 2 y 3 son bobinas primarias, y las bobinas 4, 5 y 6 son secundarias.

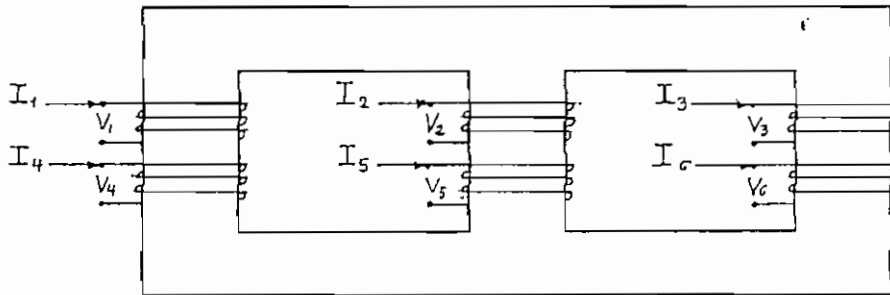
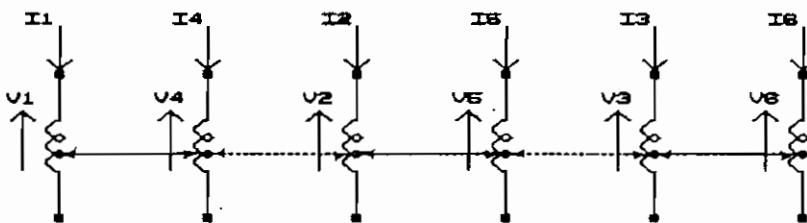


Fig. 2.2.1 Devanados en un transformador trifásico de núcleo común.

Se considera que los flujos magnéticos se distribuyen en forma simétrica entre todos los devanados.

La red primitiva de este circuito magnético acoplado es:



La matriz impedancia primitiva que muestra la relación entre los voltajes y corrientes de rama en esta red primitiva es:

$$\begin{array}{c}
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4 \\
 V_5 \\
 V_6
 \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 z_p & -z_m' & -z_m' & z_m & -z_m'' & -z_m'' \\
 \hline
 -z_m' & z_p & -z_m' & -z_m'' & z_m & -z_m'' \\
 \hline
 -z_m' & -z_m' & z_p & -z_m'' & -z_m'' & z_m \\
 \hline
 z_m & -z_m'' & -z_m'' & z_s & -z_m''' & -z_m''' \\
 \hline
 -z_m'' & z_m & -z_m'' & -z_m''' & z_s & -z_m''' \\
 \hline
 -z_m'' & -z_m'' & z_m & -z_m''' & -z_m''' & z_s \\
 \hline
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 I_1 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4 \\
 I_5 \\
 I_6
 \end{array}$$

[Z<sub>p</sub> primitiva]

La relación inversa da lugar a la formación de la matriz Admitancia Primitiva, que tiene la forma siguiente:

$$\begin{array}{c}
 I_1 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4 \\
 I_5 \\
 I_6
 \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 y_p & y_m' & y_m' & -y_m & y_m'' & y_m'' \\
 \hline
 y_m' & y_p & y_m' & y_m'' & -y_m & y_m'' \\
 \hline
 y_m' & y_m' & y_p & y_m'' & y_m'' & -y_m \\
 \hline
 -y_m & y_m'' & y_m'' & y_s & y_m''' & y_m''' \\
 \hline
 y_m'' & -y_m & y_m'' & y_m''' & y_s & y_m''' \\
 \hline
 y_m'' & y_m'' & -y_m & y_m''' & y_m''' & y_s \\
 \hline
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4 \\
 V_5 \\
 V_6
 \end{array}$$

[Y<sub>p</sub> primitiva]

(2.2.1)

siendo:

- $y_p$  = Admitancia propia de los devanados primarios.
- $y_s$  = Admitancia propia de los devanados secundarios.
- $y_m$  = Admitancia mutua entre devanados primario y secundario en el mismo brazo del núcleo.

- $y_m'$  = Admitancia mutua entre devanados primarios.
- $y_m''$  = Admitancia mutua entre devanados primario y secundario en diferentes brazos del núcleo.
- $y_m'''$  = Admitancia mutua entre devanados secundarios.

El siguiente paso, una vez obtenida la matriz Admitancia Primitiva, es determinar la matriz de Incidencia [ I ] en base a una conexión específica de los devanados primarios y secundarios, para luego encontrar la matriz admitancia de barra, definida por la ec. (2.1.15).

Entonces, sea la conexión Estrella-tierra / Delta como muestra la fig. 2.2.2, en donde se considera la conexión Estrella -tierra como el lado primario y la conexión Delta como el lado secundario.

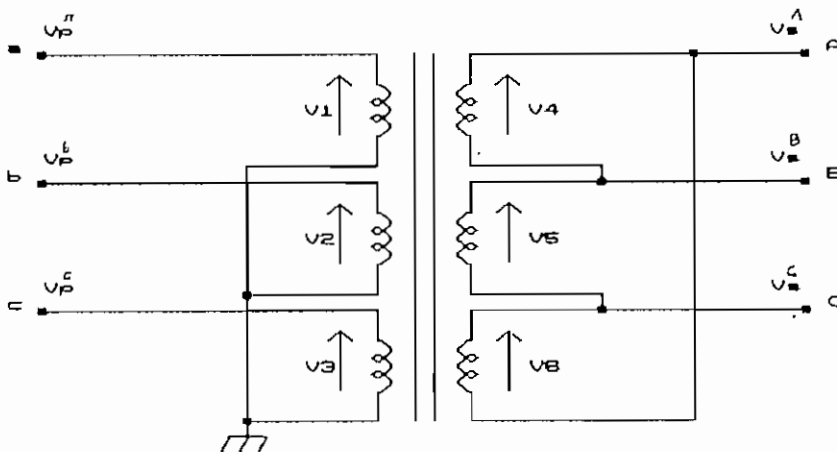


Fig. 2.2.2 Diagrama de la conexión Estrella-tierra / Delta en un Transformador Trifásico.

donde:

$V_i =$  Voltajes de rama ( $i= 1, \dots, 6$ )

$V^{k_p} =$  Voltajes de fase primarios ( $k=a,b,c$ )

$V^{k_s} =$  Voltajes de fase secundarios ( $k=A,B,C$ )

La matriz de Incidencia  $[ I ]$  puede ser escrita por inspección, relacionando los voltajes primitivos de rama con los voltajes de fase, obteniéndose:

$$\begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline V_2 \\ \hline V_3 \\ \hline V_4 \\ \hline V_5 \\ \hline V_6 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & & & & & \\ \hline & 1 & & & & \\ \hline & & 1 & & & \\ \hline & & & 1 & -1 & \\ \hline & & & & 1 & -1 \\ \hline & & & -1 & & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V^{a_p} \\ \hline V^{b_p} \\ \hline V^{c_p} \\ \hline V^{A_s} \\ \hline V^{B_s} \\ \hline V^{C_s} \\ \hline \end{array} \quad [ I ] \quad (2.2.2)$$

La matriz de Incidencia es diferente para otras conexiones.

Cuando se reemplazan las matrices de Incidencia de la ec. (2.2.2) y admitancia primitiva de la ec. (2.2.1) en la ec. (2.1.15), se obtiene la siguiente matriz admitancia de barra:

	a	b	c	A	B	C
a	$y_p$	$y_m'$	$y_m'$	$-(y_m+y_m'')$	$(y_m+y_m'')$	$\emptyset$
b	$y_m'$	$y_p$	$y_m'$	$\emptyset$	$-(y_m+y_m'')$	$(y_m+y_m'')$
c	$y_m'$	$y_m'$	$y_p$	$(y_m+y_m'')$	$\emptyset$	$-(y_m+y_m'')$
A	$-(y_m+y_m'')$	$\emptyset$	$(y_m+y_m'')$	$2(y_s-y_m''')$	$-(y_s-y_m''')$	$-(y_s-y_m''')$
B	$(y_m+y_m'')$	$-(y_m+y_m'')$	$\emptyset$	$-(y_s-y_m''')$	$2(y_s-y_m''')$	$-(y_s-y_m''')$
C	$\emptyset$	$(y_m+y_m'')$	$-(y_m+y_m'')$	$-(y_s-y_m''')$	$-(y_s-y_m''')$	$2(y_s-y_m''')$

[Ybarra]

(2.2.3)

Pero si las admitancias primitivas, voltajes primarios y secundarios son expresados en por unidad (p.u.), el modelo del transformador incluye una relación efectiva de vueltas de  $1/\sqrt{3}$  que modifica la matriz admitancia de barra trifásica de la ec. (2.2.3). (En el Anexo 4 encontrará la justificación de esta relación de vueltas para un banco de transformadores trifásico con la conexión Estrella-tierra/Delta).

Esta relación efectiva de vueltas únicamente se presenta en los transformadores con conexiones Estrella / Delta, como es el caso de la conexión Estrella-tierra / Delta.

Luego, la matriz de la ec. (2.2.3) en cantidades por unidad (p.u.) es:



	a	b	c	A	B	C
a	$y_p$	$y_m'$	$y_m'$	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\emptyset$
b	$y_m'$	$y_p$	$y_m'$	$\emptyset$	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$
c	$y_m'$	$y_m'$	$y_p$	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\emptyset$	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$
A	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\emptyset$	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\frac{2(y_e-y_m'')}{3}$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$
B	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$\emptyset$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$	$\frac{2(y_e-y_m'')}{3}$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$
C	$\emptyset$	$\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$-\frac{(y_m+y_m'')}{f3}$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$	$-\frac{(y_e-y_m'')}{3}$	$\frac{2(y_e-y_m'')}{3}$

[Y<sub>barra</sub>]

(2.2.4)

Al hacer una partición de esta matriz en submatrices de orden 3x3, se tienen submatrices propias para los lados Estrella-tierra y Delta, así como también las mutuas entre esos lados.

Suponiendo que los terminales del lado Estrella-tierra se conectan a la barra "p", y los terminales del lado delta se conectan a la barra "s", entonces las submatrices de orden 3x3, son:

Submatriz propia del lado Estrella-tierra:

$$[Y_{abc_{PP}}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline y_P & y_{m'} & y_{m'} \\ \hline y_{m'} & y_P & y_{m'} \\ \hline y_{m'} & y_{m'} & y_P \\ \hline \end{array} \end{matrix} \quad (2.2.5)$$

Submatriz propia del lado Delta:

$$[Y_{ABC_{\Delta\Delta}}] = \frac{1}{3} \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 2(y_{\Delta} - y_{m''}) & -(y_{\Delta} - y_{m''}) & -(y_{\Delta} - y_{m''}) \\ \hline -(y_{\Delta} - y_{m''}) & 2(y_{\Delta} - y_{m''}) & -(y_{\Delta} - y_{m''}) \\ \hline -(y_{\Delta} - y_{m''}) & -(y_{\Delta} - y_{m''}) & 2(y_{\Delta} - y_{m''}) \\ \hline \end{array} \end{matrix} \quad (2.2.6)$$

Submatriz mutua entre los lados Estrella-tierra y Delta:

$$[Y_{abcABC_{P\Delta}}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline -(y_m + y_{m''}) & (y_m + y_{m''}) & \emptyset \\ \hline \emptyset & -(y_m + y_{m''}) & (y_m + y_{m''}) \\ \hline (y_m + y_{m''}) & \emptyset & -(y_m + y_{m''}) \\ \hline \end{array} \end{matrix} \quad (2.2.7)$$

Por la bilateralidad en el acoplamiento se cumple que:

$$[Y_{ABCabc_{sp}}] = [Y_{abcABC_{ps}}]^T$$

Luego, la matriz de la ec. (2.2.4) constituye el modelo matemático en componentes de fase a,b,c para el transformador trifásico de núcleo común con la conexión en sus devanados Estrella-tierra / Delta.

Expresando la matriz de la ec. (2.2.4) en forma compacta se tiene que la matriz admitancia de barra es:

$$[Y_{barra}] = \begin{bmatrix} Y_{abc_{pp}} & Y_{abcABC_{ps}} \\ Y_{ABCabc_{sp}} & Y_{ABC_{ss}} \end{bmatrix} \quad (2.2.8)$$

Y usando el concepto de Admitancia Compuesta, cualquier transformador trifásico de dos devanados es representado, por una red compuesta como indica la fig. 2.2.3.

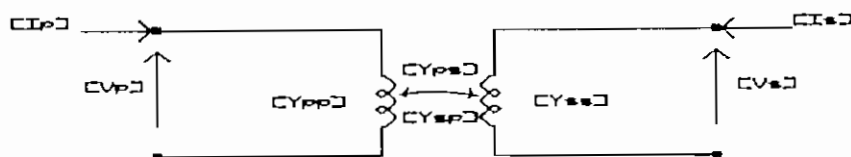


Fig. 2.2.3 Representación en admitancias compuestas de un transformador trifásico.

En el Anexo 5 se hace un análisis en componentes simétricas para el transformador trifásico de núcleo común con la conexión Estrella-tierra / Delta.

#### 2.2.2 BANCOS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.-

Los transformadores trifásicos pueden también estar formados por los denominados "Bancos" de Transformadores Monofásicos, es decir tres transformadores monofásicos que se conectan para formar un grupo trifásico; se los llama también Bancos de Transformadores Trifásicos.

Si los tres transformadores monofásicos son iguales se dice que el Banco de Transformadores Monofásico es balanceado, caso contrario es desbalanceado.

Sea un Banco de Transformadores Trifásico balanceado con conexión en Estrella-tierra / Delta, como indica la fig. 2.2.4. El lado conectado en Estrella-tierra es el primario, mientras que el lado Delta es el secundario.

El procedimiento para formar la matriz admitancia de barra de esta conexión es similar al usado en la sección anterior con la diferencia de que aquí se tiene un banco de tres transformadores monofásicos, en donde ya no se tienen los acoplamientos magnéticos entre bobinas primarias y tam-

bién entre secundarias, y entre bobinas primarias con secundarias en diferentes núcleos, es decir que  $ym'$ ,  $ym''$ ,  $ym'''$  son cero.

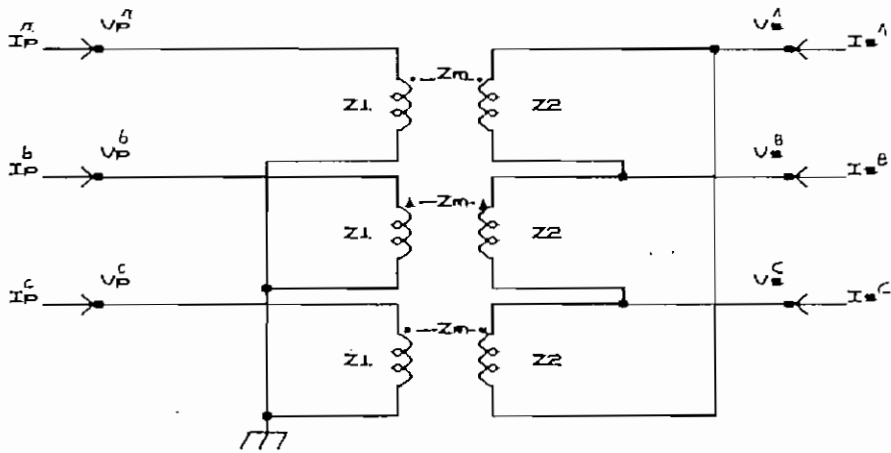


Fig. 2.2.4 Diagrama de la conexión Estrella-tierra / Delta en un banco de transformadores trifásico.

Hechas las respectivas observaciones e ignorando las posiciones de taps, la ec. (2.2.4) queda:

	a	b	c	A	B	C
a	y			$-y/\sqrt{3}$	$y/\sqrt{3}$	
b		y			$-y/\sqrt{3}$	$y/\sqrt{3}$
c			y	$y/3$		$-y/\sqrt{3}$
A	$-y/\sqrt{3}$		$y/\sqrt{3}$	$2y/3$	$-y/3$	$-y/3$
B	$y/\sqrt{3}$	$-y/\sqrt{3}$		$-y/3$	$2y/3$	$-y/3$
C		$y/\sqrt{3}$	$-y/\sqrt{3}$	$-y/3$	$-y/3$	$2y/3$

[Ybarra] =

(2.2.9)

donde "y" es la admitancia de cortocircuito en p.u..

En el Anexo 4, está el desarrollo más ampliado para llegar a la ec. (2.2.9).

El modelo que sugiere la matriz admitancia de la ec. (2.2.9) es representado mediante un circuito equivalente, como indica la fig. 2.2.5.

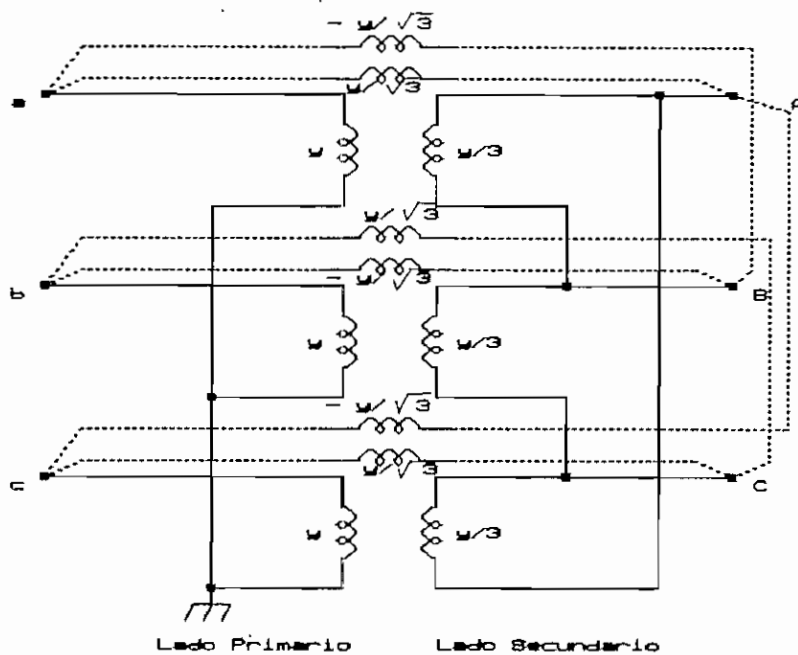


Fig. 2.2.5 Circuito equivalente para un banco de transformadores trifásico con conexión Estrella-tierra / Delta.

En forma abreviada la ec. (2.2.9), queda:

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{array}{|c|c|} \hline [Y_{PP}] & [Y_{P\bar{S}}] \\ \hline [Y_{\bar{S}P}] & [Y_{\bar{S}\bar{S}}] \\ \hline \end{array}$$

(2.2.9.1)

siendo:

$$[Y_{\bar{S}P}] = [Y_{P\bar{S}}]^T$$

Dependiendo de las conexiones en los devanados primario y secundario, las submatrices  $[Y_{PP}]$ ,  $[Y_{\bar{S}\bar{S}}]$  y  $[Y_{P\bar{S}}]$ , tienen su respectiva estructura.

Se ha comprobado que para las posibles combinaciones de conexiones Estrella-Delta, existen tres submatrices básicas que siempre están presentes, y es por eso que las conexiones trifásicas más comunes son modeladas a partir de esas submatrices que a la final forman la matriz admitancia de barra, como la ec. (2.2.9.1).

La tabla 2.2, contiene las submatrices básicas para las conexiones más comunes en un banco de transformadores monofásicos balanceados y sin considerar la impedancia en los neutros en las conexiones en Estrella-tierra.

Tabla 2.2

CONEXIONES EN EL TRANSFORMADOR		$Y_{pp}$	$Y_{ss}$	$Y_{ps}, Y_{sp}^T$
BARRA p	BARRA s			
ESTRELLA-TIERRA	ESTRELLA-TIERRA	$Y_I$	$Y_I$	$-Y_I$
ESTRELLA-TIERRA	ESTRELLA	$Y_{II}/3$	$Y_{II}/3$	$-Y_{II}/3$
ESTRELLA-TIERRA	DELTA	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
ESTRELLA	ESTRELLA	$Y_{II}/3$	$Y_{II}/3$	$-Y_{II}/3$
ESTRELLA	DELTA	$Y_{II}/3$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
DELTA	DELTA	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$

Donde las submatrices basicas son definidas según las ecs. (2.2.10), (2.2.11) y (2.2.12).

$$Y_I = \begin{bmatrix} y & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & y \end{bmatrix} \quad (2.2.10)$$

$$Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y & -y & -y \\ -y & 2y & -y \\ -y & -y & 2y \end{bmatrix} \quad (2.2.11)$$

$$Y_{III} = \begin{bmatrix} -y & y & 0 \\ 0 & -y & y \\ y & 0 & -y \end{bmatrix} \quad (2.2.12)$$



El Anexo 4 contiene el desarrollo para la conexión Estrella-tierra / Estrella por ser un caso especial en donde la matriz Incidencia produce un nodo extra en el punto neutro del lado Estrella del transformador, pero que al final se llega a tener las submatrices básicas para esta conexión según la tabla 2.2.

2.2.3 TRANSFORMADORES TRIFASICOS CON TAPS.-

Sea un banco de transformadores trifásico desbalanceado con la conexión Estrella-tierra / Delta, como el de la fig. 2.2.6:

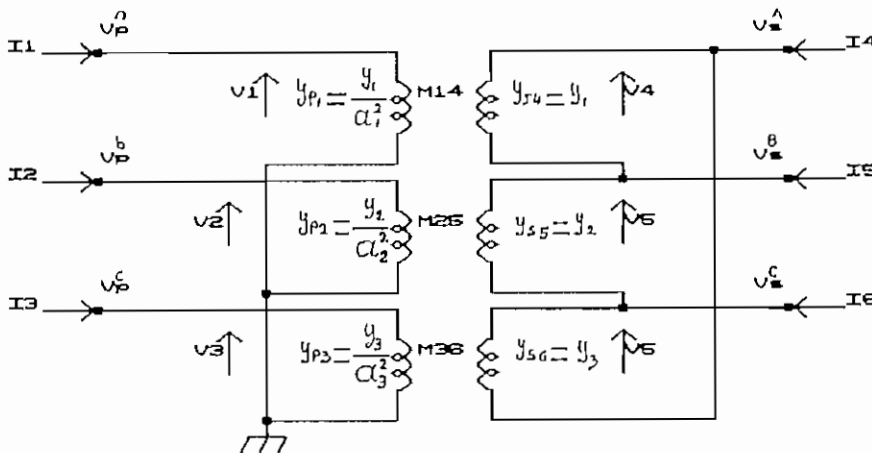


Fig. 2.2.6 Banco de transformadores trifásico desbalanceado con posiciones de taps en los devanados del lado Estrella-tierra.

donde:

$y_1, y_2, y_3$  son las admitancias de cortocircuito para cada uno de los transformadores monofásicos.

$a_1, a_2, a_3$  son posiciones de taps fuera del nominal en los devanados 1, 2 y 3 respectivamente.

La siguiente ecuación contiene la matriz Admitancia Primitiva para la red de la fig. 2.2.6.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{p1} & & & M_{14} & & \\ & y_{p2} & & & M_{25} & \\ & & y_{p3} & & & M_{36} \\ M_{41} & & & y_{e4} & & \\ & M_{52} & & & y_{e5} & \\ & & M_{63} & & & y_{e6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.2.13)$$

[Y<sub>primitiva</sub>]

Pero con el sistema en por unidad (p.u.), los devanados conectados en Delta tienen una posición de tap efectiva de  $f_3$ .

Usando las matrices Incidencia para la conexión Estrella-tierra / Delta (matriz de la ec. (2.2.2)), Admitan-

cia Primitiva de la ec. (2.2.13) en por unidad y aplicando la ec. (2.1.15) se obtiene la siguiente matriz Admitancia de Barra:

	a	b	c	A	B	C
a	$\frac{y_1}{a_1^2}$			$\frac{-y_1}{a_1 f_3}$	$\frac{y_1}{a_1 f_3}$	
b		$\frac{y_2}{a_2^2}$			$\frac{-y_2}{a_2 f_3}$	$\frac{y_2}{a_2 f_3}$
c			$\frac{y_3}{a_3^2}$	$\frac{y_3}{a_3 f_3}$		$\frac{-y_3}{a_3 f_3}$
A	$\frac{-y_1}{a_1 f_3}$		$\frac{y_3}{a_3 f_3}$	$\frac{y_1 + y_3}{3}$	$\frac{-y_1}{3}$	$\frac{-y_3}{3}$
B	$\frac{y_1}{a_1 f_3}$	$\frac{-y_2}{a_2 f_3}$		$\frac{-y_1}{3}$	$\frac{y_2 + y_3}{3}$	$\frac{-y_2}{3}$
C		$\frac{y_2}{a_2 f_3}$	$\frac{-y_3}{a_3 f_3}$	$\frac{-y_3}{3}$	$\frac{-y_2}{3}$	$\frac{y_2 + y_3}{3}$

[Y<sub>barra</sub>]

(2.2.14)

Considerando ahora un banco de transformadores monofásicos balanceado, se cumple que:

$$y_1 = y_2 = y_3 = y$$

Y si las posiciones de taps fuera del nominal en los

devanados 1, 2 y 3 son iguales, tal que  $a_1 = a_2 = a_3 = a$ , entonces la ec.(2.2.14) queda:

	a	b	c	A	B	C
a	$y/a^2$			$-y/(af3)$	$y/(af3)$	
b		$y/a^2$			$-y/(af3)$	$y/(af3)$
c			$y/a^2$	$y/(af3)$		$-y/(af3)$
A	$-y/(af3)$		$y/(af3)$	$2y/3$	$-y/3$	$-y/3$
B	$y/(af3)$	$-y/(af3)$		$-y/3$	$2y/3$	$-y/3$
C		$y/(af3)$	$-y/(af3)$	$-y/3$	$-y/3$	$2y/3$

[Y<sub>barra</sub>]

(2.2.15)

Comparando la matriz admitancia de barra de la ec. (2.2.15) con aquella de la ec. (2.2.9), se observa que las matrices son iguales si la posición de tap  $a$  es la nominal, o sea  $a = 1.0$ .

Entonces, las posiciones de taps fuera del nominal alteran el valor de los elementos de las submatrices admitancia propia y mutua de la tabla 2.2.

Y es así que para un banco de transformadores trifásico balanceado en donde se considera que las posiciones de taps fuera del nominal son iguales en los tres transformadores monofásicos, las modificaciones que se hacen en las

submatrices son:

- a) la submatriz admitancia propia del lado primario se dividen para  $(\alpha)^2$
- b) la submatriz admitancia propia del lado secundario se dividen para  $(\beta)^2$
- c) las submatrices admitancia mutuas se dividen para  $(\alpha.\beta)$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son las posiciones de taps en el lado primario y secundario respectivamente, para un transformador monofásico que forma parte del banco de transformadores trifásico balanceado. Cuando se tiene un devanado conectado en Delta, la posición de tap en ese lado es de  $\sqrt{3}$ .

### 2.3 GENERADORES SINCRONICOS.-

Un Generador Sincrónico en términos de componentes de fase es descrito por medio de la matriz  $Z_g$ , como indica la ec. (2.3.1).

$$Z_g = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ \hline Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ \hline Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \\ \hline \end{array} \quad (2.3.1)$$

siendo:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$$

$$Z_{ac} = Z_{ba} = Z_{cb}$$

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$$

es decir, la matriz  $Z_g$  es asimétrica.

La fig. 2.3.1, muestra la representación gráfica de la ec. (2.3.1).

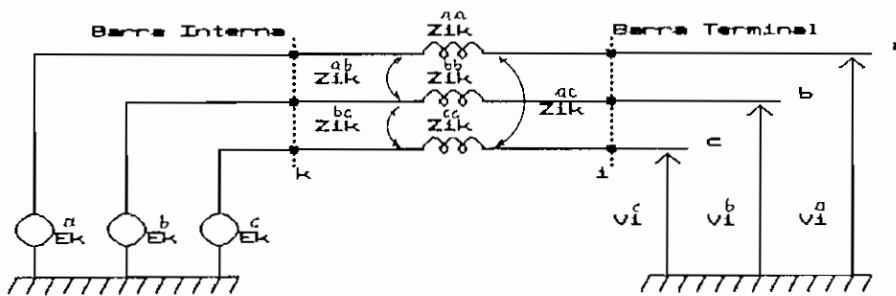


Fig. 2.3.1 Representación gráfica del modelo de un Generador Síncrono en componentes de fase.

La excitación de la máquina actúa simétricamente en las tres fases, y de ahí que los voltajes en la barra interna o de excitación forman un conjunto trifásico balanceado, es decir:

$$|E_k^a| = |E_k^b| = |E_k^c| \quad (2.3.2)$$

$$\theta^{a_k} = \theta^{b_k} + 120^\circ = \theta^{c_k} - 120^\circ \quad (2.3.3)$$

de donde:

$|E^{a_k}|$  ,  $\theta^{a_k}$  = módulo y ángulo del voltaje de excitación en la fase "a".

$|E^{b_k}|$  ,  $\theta^{b_k}$  = módulo y ángulo del voltaje de excitación en la fase "b".

$|E^{c_k}|$  ,  $\theta^{c_k}$  = módulo y ángulo del voltaje de excitación en la fase "c".

Para el estudio de flujos de potencia trifásicos se precisa modelar apropiadamente al Regulador de Voltaje de los generadores, de tal manera que permita ver su influencia en la operación de la máquina bajo condiciones desbalanceadas.

El modelo matemático del Regulador de Voltaje en general debe comprobar los voltajes terminales de la máquina y luego controlar a los voltajes de excitación de acuerdo a alguna función predeterminada para tener los voltajes terminales iguales a los especificados.

En la fig. 2.3.2, se representa al regulador de vol-

taje en el modelo del Generador Sincrónico en forma de admitancia compuesta.

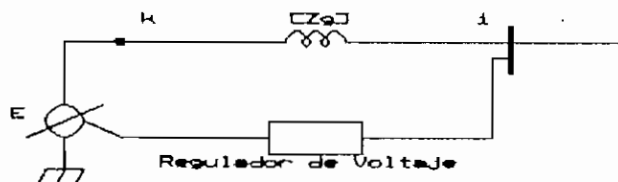


Fig. 2.3.2 Representación en admitancia compuesta del Generador Sincrónico con el Regulador de Voltaje.

Como se observa, el Regulador de Voltaje examina el módulo de los voltajes terminales, y dependiendo de los resultados se controla a la corriente de excitación.

La ecuación que representa al Regulador de Voltaje, está en función de los voltajes terminales en las fases a, b y c, es decir:

$$V_{reg j} = f( V^{a_k} , V^{b_k} , V^{c_k} )$$

siendo k la barra terminal del generador j.

La matriz admitancia serie del generador esta dada por la inversión de la matriz de la ec. (2.3.1), es decir:



$$[Y_g] = [Z_g]^{-1}$$

La matriz admitancia de barra, que relaciona las corrientes inyectadas a las barras del generador con sus voltajes, es:

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{array}{|c|c|} \hline [Y_g] & -[Y_g] \\ \hline -[Y_g] & [Y_g] \\ \hline \end{array} \quad (2.3.4)$$

En el Anexo 5 encontrará el análisis en componentes simétricas para el Generador Sincrónico.

## CAPITULO 3

### MODELACION TRIFASICA DEL SISTEMA DE POTENCIA Y METODO DE SOLUCION DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO DESACOPLADO RAPIDO

#### 3.1 MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA DEL SISTEMA.-

##### 3.1.1 DIVISION DEL SISTEMA EN SUBSISTEMAS.-

Se define como *Subsistema* a la unidad, en la que cualquier parte del sistema eléctrico puede ser dividido, tal que las ramas constituidas por ésta no tengan ningún acoplamiento con las unidades del resto del sistema.

Entonces, para organización de los datos del sistema de potencia que va a ser sometido a un estudio de flujos de potencia trifásico, se lo divide en subsistemas más convenientes y que sean consistentes con la definición.

El subsistema más conveniente es un simple elemento de red, como: un generador sincrónico, una línea de transmisión trifásica, un transformador trifásico.

Para la etapa del ingreso de datos, se lo hace conservando cada subsistema y considerándolo como una unidad completa, ya que el cálculo de flujos trifásicos se realiza para cada uno de ellos.

La formación de la matriz admitancia de barra trifásica de un subsistema es posible, siendo inicialmente almacenada para posteriormente combinarla con el resto de matrices admitancia de barra de los otros subsistemas, y así formar la matriz admitancia de barra trifásica del sistema.

### 3.1.2 SECCIONALIZACION DE UN SUBSISTEMA.-

Se considera que el Subsistema constituye una línea de transmisión trifásica, entonces la seccionalización de la línea es la división de la línea de transmisión en secciones.

Esta división se la hace en los siguientes casos:

- \* Transposición de conductores en la línea.
- \* Cambio en el tipo de torres de soporte de los conductores.
- \* Variación de la permitividad del suelo.
- \* Mejora en la representación de la línea (serie de dos o mas redes equivalentes  $\pi$ ).
- \* Elementos serie en la línea.

Por conveniencia en el ingreso de datos, también se consideran a los elementos shunt como una de las secciones de la línea de transmisión.

La fig. 3.1.1 muestra una línea de transmisión dividida en secciones.

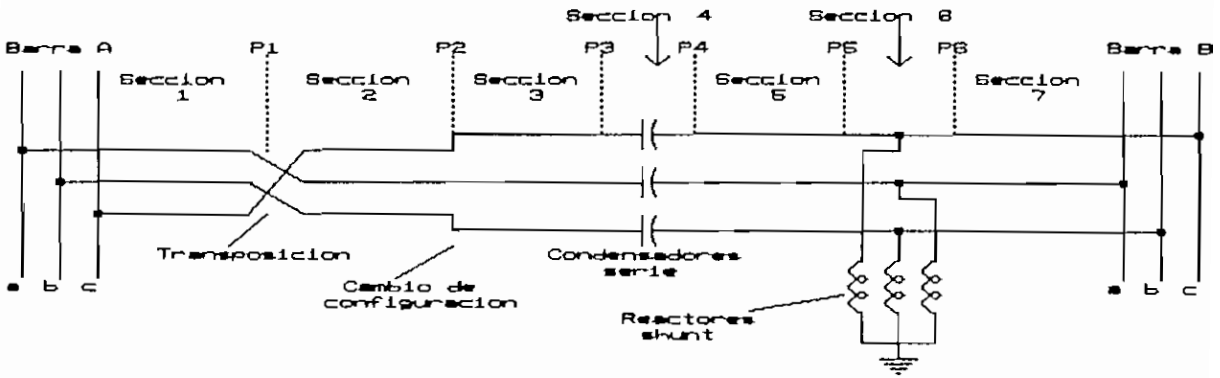


Fig. 3.1.1 Línea de Transmisión dividida en secciones.

La línea comprendida entre las barras A y B constituye un subsistema que está dividido en secciones.

Para encontrar la matriz Admitancia de Barra de cualquier línea de transmisión dividida o no en secciones, se recurre a los *Parámetros ABCD* o llamados también *Parámetros de Transmisión*, que según la teoría usual de redes de cuadripolos, sirven para relacionar el voltaje y la corriente en el un par de terminales con el voltaje y la corriente del otro.

Haciendo una extensión a redes de multi-cuadripolos como la que se indica en la fig. 3.1.2, se tiene la ec.

(3.1.1) que contiene la matriz de dichos parámetros.

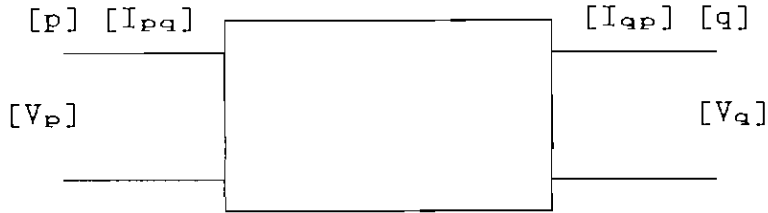


Fig. 3.1.2 Red de multi-cuadripolos.

$$\begin{bmatrix} [V_p] \\ [I_{pq}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_q] \\ [I_{qp}] \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

[T]

donde [T] es la matriz de Transmisión que contiene las submatrices [A], [B], [C], [D] que se definen de la siguiente manera:

$$[A] = [V_p][V_q]^{-1} \quad \text{si } [I_{qp}] = [\emptyset] \quad (3.1.1.1)$$

$$[B] = [V_p][I_{qp}]^{-1} \quad \text{si } [V_q] = [\emptyset] \quad (3.1.1.2)$$

$$[C] = [I_{pq}][V_q]^{-1} \quad \text{si } [I_{qp}] = [\emptyset] \quad (3.1.1.3)$$

$$[D] = [I_{pq}][I_{qp}]^{-1} \quad \text{si } [V_q] = [\emptyset] \quad (3.1.1.4)$$

Usando las ecs.(3.1.1.1) a (3.1.1.4) se obtienen las submatrices [A], [B], [C] y [D] para líneas de transmisión, elementos serie y shunt, resultando las siguientes matrices

de transmisión [T]:

- líneas de transmisión,

$$[T] = \begin{array}{|c|c|} \hline [u] + [Z][Y]/2 & -[Z] \\ \hline [Y]\{[u] + [Z][Y]/4\} & -\{[u] + [Y][Z]/2\} \\ \hline \end{array}$$

(3.1.2)

donde: [Z] = Matriz Impedancia Serie de la línea.  
 [Y] = Matriz Admitancia Shunt de la línea.  
 [u] = Matriz unidad.

- elementos shunt,

$$[T] = \begin{array}{|c|c|} \hline [u] & [\emptyset] \\ \hline [Y_{SH}] & -[u] \\ \hline \end{array}$$

(3.1.3)

donde: [Y<sub>SH</sub>] = Matriz Admitancia Shunt.  
 [u] = Matriz unidad.  
 [∅] = Matriz nula.

- elementos serie,

$$[T] = \begin{array}{|c|c|} \hline [u] & -[Y_{SE}]^{-1} \\ \hline [\emptyset] & -[u] \\ \hline \end{array}$$

(3.1.4)

donde: [Y<sub>SE</sub>] = Matriz Admitancia Serie.  
 [u] = Matriz unidad.  
 [∅] = Matriz nula.

Pero a su vez, la matriz de admitancias de barra o de admitancias de cortocircuito se expresa en función de las submatrices [A], [B], [C] y [D], tal como se muestra en la ec. (3.1.5) y cuya justificación se indica en el Anexo 3.

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{array}{c} [p] \\ [q] \end{array} \begin{array}{|c|c|} \hline [D][B]^{-1} & [C] - [D][B]^{-1}[A] \\ \hline [B]^{-1} & -[B]^{-1}[A] \\ \hline \end{array} \quad (3.1.5)$$

De ahí que, por ejemplo, para formar la matriz Admitancia de Barra trifásica de la red de la fig. 3.1.1, se debe encontrar la matriz [T] para las siete secciones así: en las secciones de líneas 1, 2, 3, 5 y 7 se aplica la ec. (3.1.2), en la sección de condensadores en serie se aplica la ec. (3.1.4) y en la sección de los reactores shunt se aplica la ec. (3.1.3).

Pero para poder aplicar la ec. (3.1.5) se debe encontrar la matriz [T] resultante, que se la obtiene mediante el producto de las matrices de transmisión [T] de cada una de las secciones observando el respectivo orden.

Si el subsistema es una línea de transmisión trifásica que no tiene secciones, los parámetros de la matriz [T] según la ec. (3.1.2), son utilizados directamente para apli-

car la ec. (3.1.5) y obtener la matriz admitancia de barra de ese subsistema.

Entonces es un método paralelo al indicado en el Capítulo 2, que también permite encontrar la matriz admitancia de barra.

Según la ec.(3.1.2) el orden de las submatrices [A], [B], [C] y [D] dependen del número de elementos trifásicos mutuamente acoplados, ya que como indica la tabla 2.1 el orden de las matrices  $[Z_{\text{e}}]$  y  $[Y_{\text{sh}}]$  dependen de ese número. La tabla 3.1 indica el orden de las submatrices de transmisión para diferente número de líneas mutuamente acopladas.

Tabla 3.1

Número de líneas trifásicas mutuamente acopladas.	Orden de las submatrices [A],[B],[C],[D].
1	3x3
2	6x6
3	9x9
4	12x12

Igual comportamiento se tiene para los elementos serie y shunt.

Todas la secciones que son parte de una línea seccionalizada, deben contener el mismo número de elementos trifá-



sicos mutuamente acoplados, para que las matrices  $[T]$  de cada sección tengan la misma dimensión y así asegurar la multiplicación de esas matrices y obtener la matriz  $[T]$  resultante.

### 3.1.3 FORMACION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA DEL SISTEMA.-

La matriz admitancia de barra trifásica en los subsistemas que son líneas de transmisión seccionalizadas o no, se usa la ec. (3.1.5); en los transformadores trifásicos se sigue la tabla 2.2 y para los generadores se utiliza la ec.(2.3.4).

Un subsistema, como se indicó en la Sección 3.1.1, puede tener barras comunes con otros subsistemas, pero no puede tener acoplamientos con las ramas de otros subsistemas.

Por eso, las matrices admitancia de barra de todos los subsistemas, pueden ser combinadas para formar la matriz Admitancia de barra trifásica para todo el sistema, de la siguiente manera:

- a) La matriz admitancia propia de cualquier barra, es la suma de todas las matrices admitancia propias en esa

barra.

- b) La matriz admitancia mutua entre dos barras cualquiera, es la suma de las matrices admitancia mutuas de todos los subsistemas que contengan esas dos barras.

### 3.2 TEORIA DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO.-

#### 3.2.1 INTRODUCCION.-

El flujo de potencia trifásico, tiene como objetivo encontrar el estado del sistema de potencia bajo condiciones específicas de generación, carga y configuración del sistema.

En anteriores trabajos se realiza el estudio de flujos de potencia asumiendo que los sistemas trifásicos son balanceados y con cargas trifásicas también balanceadas, es decir, el estudio es sobre el modelo monofásico de secuencia positiva.

Sin embargo, se necesita hacer el estudio de flujos de potencia mediante un análisis trifásico, para observar más detalladamente esos flujos a través de los elementos que conforman el sistema trifásico bajo condiciones desbalanceadas.

A igual que en el flujo de potencia monofásico, se presentan tres tipos de barras: la barra de Voltaje Controlado, las de Carga y la Oscilante.

### 3.2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFÁSICO.

Sea un Sistema Eléctrico que tiene "n" barras, donde:

$$n = nb + ng$$

siendo:

nb = número de barras del sistema (es decir, todas las barras de carga más todas las barras terminal de los generadores).

ng = número de generadores sincrónicos.

Para mayor énfasis se usan los siguientes sub-índices:

reg → hace referencia al Regulador de Voltaje.

int → hace referencia a la barra interna de los generadores sincrónicos.

gen → hace referencia a un Generador Sincrónico.

Se usan los super-índices "p" y "m" para identificar las fases a,b,c.

El super-índice "esp" indica que es una cantidad especificada.

### 3.2.2.1 VARIABLES DEL PROBLEMA.-

Las siguientes variables, forman un conjunto mínimo y suficiente para definir al sistema trifásico, bajo la operación en estado estable:

- a) La magnitud del voltaje en la barra interna del Generador Oscilante, es decir:

$$V_{int j} \quad \text{donde:} \quad j = nb + ng$$

Aquí, el ángulo  $\theta_{int j}$  es tomado como referencia.

El Generador Oscilante es aquel Generador Síncronico que tiene como barra terminal a la Oscilante.

- b) La magnitud y el ángulo del voltaje de la barra interna de los otros generadores, es decir:

$$V_{int j} \quad \text{y} \quad \theta_{int j}$$

donde:  $j = nb + 1, \dots, nb + ng - 1$

- c) Las magnitudes y ángulos de los tres voltajes de fase para cada barra terminal de los generadores, y para cada barra de carga del sistema, es decir:

$$V_{P_i} \text{ y } \theta_{P_i}$$

donde:  $i = 1, \dots, nb$

$p = a, b, c$

Como se observa en los literales a) y b), solamente dos variables son asociadas con cada barra interna de los generadores, porque los voltajes en la barra interna son voltajes trifásicos y balanceados, por eso se toma una magnitud y un ángulo que bien pueden ser de la fase "a" para cada barra interna, evitando tener voltajes y ángulos redundantes como variables. Sin embargo, se las tiene presentes para cuando se calcula las potencias activas y reactivas.

#### 3.2.2.2 ECUACIONES QUE TIENEN QUE SER RESUELTAS. -

Las ecuaciones que permiten hallar a ese conjunto de variables, son desarrolladas a partir de las condiciones de operación especificadas, es decir:

- a) Las potencias activa y reactiva de carga para cada fase y para cada barra de carga del sistema.

- b) La especificación del Regulador de Voltaje para cada máquina sincrónica.
- c) La generación total de potencia activa para cada máquina sincrónica, a excepción del Generador Oscilante.

El comportamiento del sistema trifásico está descrito por la siguiente ecuación:

$$[I] = [Y][E] \tag{3.2.1}$$

siendo [Y] la matriz Admitancia de Barra Trifásica del sistema, cuya obtención se indicó en la Sección 3.1.3.

La ec. (3.2.1), en forma desarrollada y para el sistema de "n" barras, en donde se incluyen las barras internas de los generadores, se tiene:

I <sub>a1</sub>	Y <sub>aa11</sub> Y <sub>ab11</sub> Y <sub>ac11</sub>	Y <sub>aa12</sub> Y <sub>ab12</sub> Y <sub>ac12</sub>	. Y <sub>aa1n</sub> Y <sub>ab1n</sub> Y <sub>ac1n</sub>	E <sub>a1</sub>
I <sub>b1</sub>	Y <sub>ba11</sub> Y <sub>bb11</sub> Y <sub>bc11</sub>	Y <sub>ba12</sub> Y <sub>bb12</sub> Y <sub>bc12</sub>	. Y <sub>ba1n</sub> Y <sub>bb1n</sub> Y <sub>bc1n</sub>	E <sub>b1</sub>
I <sub>c1</sub>	Y <sub>ca11</sub> Y <sub>cb11</sub> Y <sub>cc11</sub>	Y <sub>ca12</sub> Y <sub>cb12</sub> Y <sub>cc12</sub>	. Y <sub>ca1n</sub> Y <sub>cb1n</sub> Y <sub>cc1n</sub>	E <sub>c1</sub>
I <sub>a2</sub>	Y <sub>aa21</sub> Y <sub>ab21</sub> Y <sub>ac21</sub>	Y <sub>aa22</sub> Y <sub>ab22</sub> Y <sub>ac22</sub>	. Y <sub>aa2n</sub> Y <sub>ab2n</sub> Y <sub>ac2n</sub>	E <sub>a2</sub>
I <sub>b2</sub>	Y <sub>ba21</sub> Y <sub>bb21</sub> Y <sub>bc21</sub>	Y <sub>ba22</sub> Y <sub>bb22</sub> Y <sub>bc22</sub>	. Y <sub>ba2n</sub> Y <sub>bb2n</sub> Y <sub>bc2n</sub>	E <sub>b2</sub>
I <sub>c2</sub>	Y <sub>ca21</sub> Y <sub>cb21</sub> Y <sub>cc21</sub>	Y <sub>ca22</sub> Y <sub>cb22</sub> Y <sub>cc22</sub>	. Y <sub>ca2n</sub> Y <sub>cb2n</sub> Y <sub>cc2n</sub>	E <sub>c2</sub>
I <sub>an</sub>	Y <sub>aan1</sub> Y <sub>abn1</sub> Y <sub>acn1</sub>	Y <sub>aan2</sub> Y <sub>abn2</sub> Y <sub>acn2</sub>	. Y <sub>aan</sub> Y <sub>abn</sub> Y <sub>acn</sub>	E <sub>an</sub>
I <sub>bn</sub>	Y <sub>ban1</sub> Y <sub>bbn1</sub> Y <sub>bcn1</sub>	Y <sub>ban2</sub> Y <sub>bbn2</sub> Y <sub>bcn2</sub>	. Y <sub>ban</sub> Y <sub>bbn</sub> Y <sub>bcn</sub>	E <sub>bn</sub>
I <sub>cn</sub>	Y <sub>can1</sub> Y <sub>cbn1</sub> Y <sub>ccn1</sub>	Y <sub>can2</sub> Y <sub>cbn2</sub> Y <sub>ccn2</sub>	. Y <sub>can</sub> Y <sub>cbn</sub> Y <sub>ccn</sub>	E <sub>cn</sub>

$$\tag{3.2.1.1}$$

Es un sistema de ecuaciones lineal de dimensión  $3n$ , de donde, por ejemplo, para la barra No. 1 se tienen las siguientes ecuaciones para las corrientes inyectadas:

en la fase a:

$$I^{a_1} = \sum_k \sum_m Y^{am_{1k}} E^{mk} \quad (3.2.2)$$

en la fase b:

$$I^{b_1} = \sum_k \sum_m Y^{bm_{1k}} E^{mk} \quad (3.2.3)$$

en la fase c:

$$I^{c_1} = \sum_k \sum_m Y^{cm_{1k}} E^{mk} \quad (3.2.4)$$

siendo:

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, n \\ m &= a, b, c \end{aligned}$$

En forma general, si nos referimos a una fase "p" de la barra "i", se obtiene:

$$\begin{aligned} I^{p_1} &= \sum_k \sum_m Y^{pm_{1k}} E^{mk} & (3.2.5) \\ i, k &= 1, \dots, n \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

La conjugada de esta ecuación es:

$$(I^{p_1})^* = \sum_k \sum_m (Y^{pm_{1k}})^* (E^{mk})^* \quad (3.2.6)$$

Por otro lado, relacionando potencias inyectadas con corrientes inyectadas para la fase "p" de la barra "i", se

tiene que:

$$S_{P_1} = P_{P_1} + jQ_{P_1} = E_{P_1} (I_{P_1})^* \quad (3.2.7)$$

Reemplazando la ec. (3.2.6) en la ec. (3.2.7), se obtiene la siguiente ecuación:

$$S_{P_1} = P_{P_1} + jQ_{P_1} = E_{P_1} \sum_k \sum_m (Y_{Pm_1k})^* (E_{m_k})^* \quad (3.2.8)$$

Además, el voltaje para la fase "p" de la barra "i", en la forma trigonométrica es:

$$E_{P_1} = V_{P_1} (\cos \theta_{P_1} + j \sin \theta_{P_1}) \quad (3.2.9)$$

Así mismo, para la conjugada del voltaje en la fase "m" de la barra "k", se tiene:

$$(E_{m_k})^* = V_{m_k} (\cos \theta_{m_k} - j \sin \theta_{m_k}) \quad (3.2.10)$$

La conjugada de la admitancia mutua entre las fases "p" y "m" de las barras "i" y "k" respectivamente, en forma rectangular es:

$$(Y_{Pm_1k})^* = G_{Pm_1k} - j B_{Pm_1k} \quad (3.2.11)$$

Entonces, reemplazando las ecs. (3.2.9), (3.2.10) y



(3.2.11) en la ec. (3.2.8), se llega a la siguiente ecuación:

$$S_{P_1} = V_{P_1} (\cos \theta_{P_1} + j \sin \theta_{P_1}) \sum_k \sum_m (G^{P_1 m_k} - j B^{P_1 m_k}) V_{m_k} (\cos \theta_{m_k} - j \sin \theta_{m_k})$$

Al separar las partes real e imaginaria de esta expresión, nos conduce a las siguientes ecuaciones no lineales:

$$P_{P_1} = V_{P_1} \sum_k \sum_m V_{m_k} ((G^{P_1 m_k} \cos(\theta_{P_1} - \theta_{m_k}) + B^{P_1 m_k} \sin(\theta_{P_1} - \theta_{m_k})) \quad (3.2.12)$$

$$Q_{P_1} = V_{P_1} \sum_k \sum_m V_{m_k} ((G^{P_1 m_k} \sin(\theta_{P_1} - \theta_{m_k}) - B^{P_1 m_k} \cos(\theta_{P_1} - \theta_{m_k})) \quad (3.2.13)$$

$$\text{con:} \quad \begin{aligned} k &= 1, \dots, n \\ i &= 1, \dots, nb \\ m, p &= a, b, c \end{aligned}$$

de donde:

$P_{P_1}$  = Potencia activa especificada en la fase "p" de la barra de carga "i".

$Q_{P_1}$  = Potencia reactiva especificada en la fase "p" de la barra de carga "i".

Además se conocen los términos  $G^{P_1 m_k}$  y  $B^{P_1 m_k}$  que son elementos de la matriz admitancia de barra trifásica del sistema, así como también los ángulos de los voltajes de la

barra interna del Generador Oscilante.

Por otro lado, la función matemática de los Reguladores de Voltaje según la referencia [4] es:

$$V_{reg\ j} = V^{a_k} \quad (3.2.14)$$

con:  $j = 1, \dots, ng$   
 $k =$  barra terminal del generador  $j$

siendo:

$V_{reg\ j} =$  Voltaje especificado para la barra terminal del generador  $j$ .

$V^{a_k} =$  Voltaje en la fase "a" de la barra terminal del generador  $j$ .

En base a la ec. (3.2.12), se escribe la potencia total activa generada por la máquina sincrónica  $j$ , exceptuando al generador oscilante, tal como muestra la ec. (3.2.15).

$$(P_{gen})_j = \sum_p V_{int\ j} \sum_k \sum_m V^{m_k} (G^{pm\ j\ k} \cos(\theta_{p\ j} - \theta^{m_k}) + B^{pm\ j\ k} \sin(\theta_{p\ j} - \theta^{m_k})) \quad (3.2.15)$$

con:  $j = 1, \dots, ng-1$   
 $k = 1, \dots, n$   
 $p, m = a, b, c$

de donde:

$(P_{gen})_j =$  Potencia total activa generada que se especifica para la máquina sincrónica  $j$ .

Aunque, el sumatorio para "k" es sobre todas las barras del sistema, los términos  $G_{jk}$  y  $B_{jk}$  son diferentes de cero solamente cuando "k" es la barra terminal del generador  $j$ .

De la ec. (3.2.15), la potencia activa especificada para el generador es la potencia total activa en la barra interna, mientras que en la realidad la potencia especificada es la dejada en la barra terminal.

En consecuencia, el sistema de ecs.(3.2.12),(3.2.13), (3.2.14) y (3.2.15) necesitan ser resueltos para encontrar los voltajes en módulo y ángulo en todas las barras del sistema que posteriormente se utilizan en el cálculo de los flujos de potencia, quedando resuelto el problema del Flujo de Potencia Trifásico.

3.2.3 METODO ITERATIVO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO RAPIDO PARA RESOLVER EL PROBLEMA DEL FLUJO DE POTENCIA TRI-FASICO.-

El método de Newton-Raphson es un algoritmo iterativo, que permite resolver un conjunto de ecuaciones simultáneas no lineales con igual número de incógnitas.

Este método tiene como base la expansión en series de Taylor alrededor del punto de solución del problema, logrando linealizar al conjunto de ecuaciones no lineales.

Aplicando este método a los sistemas de ecuaciones (3.2.12), (3.2.13), (3.2.14) y (3.2.15), se consigue que la solución de ese sistema de ecuaciones involucre la solución iterativa de la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P \\ \hline \Delta P_{gen} \\ \hline \Delta Q \\ \hline \Delta V_{res} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline A & E & I & M \\ \hline B & F & J & N \\ \hline C & G & K & P \\ \hline D & H & L & R \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta \theta_{int} \\ \hline \Delta V/V \\ \hline \Delta V_{int}/V_{int} \\ \hline \end{array} \quad (3.2.16)$$

de donde la matriz del lado derecho es la matriz Jacobiana de las derivadas parciales de primer orden, y el vector del lado derecho forman las variables incógnitas, que en cada

iteración se aproximan a la solución.

Una característica inherente de un Sistema Eléctrico de Potencia operando en estado estable, es la fuerte dependencia que existe entre la potencia activa y los ángulos de los voltajes de barra y entre la potencia reactiva y la magnitud de voltajes de barra, mientras que es muy débil la dependencia entre la potencia activa y la magnitud de voltajes de barra y entre la potencia reactiva y los ángulos de los voltajes de barra. Esto se conoce como el principio de *desacoplamiento*. [3]

Entonces, de la ec. (3.2.16) se tiene que:

$$\begin{aligned} [I] &= [M] = [J] = [N] = [\emptyset] \\ [C] &= [G] = [\emptyset] \end{aligned}$$

Además, la especificación del Regulador de Voltaje está en términos de la magnitud de voltaje de la barra terminal, por lo que la derivada parcial con respecto al ángulo  $\theta$  es cero, igualmente con respecto al ángulo  $\theta_{int}$ . Luego:

$$[D] = [H] = [\emptyset]$$

En consecuencia, la ec.(3.2.16) puede ser escrita en forma desacoplada, de la siguiente forma:

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P_{P_i} \\ \hline \Delta P_{gen_j} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline A & E \\ \hline B & F \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta^{m_k} \\ \hline \Delta \theta_{int1} \\ \hline \end{array} \quad (3.2.17)$$

con:  $i, k = 1, \dots, nb$   
 $j, l = 1, \dots, ng-1$  (excluye al generador oscilante).  
 $p, m = a, b, c$

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta Q_{P_i} \\ \hline \Delta V_{reg_j} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline K & P \\ \hline L & R \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta V^{m_k}/V^{m_k} \\ \hline \Delta V_{int1}/V_{int1} \\ \hline \end{array} \quad (3.2.18)$$

con:  $i, k = 1, \dots, nb$   
 $j, l = 1, \dots, ng$  (incluye al generador oscilante).  
 $p, m = a, b, c$

En el Anexo 6 se hace el respectivo desarrollo para encontrar los coeficientes de las ecs. (3.2.17) y (3.2.18).

Los coeficientes de la ecuación matricial (3.2.17) son:

$$* [A^{pmik}] = V^{mk} [\delta P_{P_i} / \delta \theta^{mk}]$$

$$A^{pmik} = V_{P_i} V^{mk} (G^{pmik} \sin(\theta_{P_i} - \theta^{mk}) - B^{pmik} \cos(\theta_{P_i} - \theta^{mk}))$$

con:  $i, k = 1, \dots, nb$   $i \neq k$   
 $p, m = a, b, c$   $p \neq m$

$$A^{pp_{11}} = - B^{pp_{11}}(V_{p_1})^2 - Q_{p_1}$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} i = 1, \dots, nb \\ p = a, b, c \end{array}$$

$$* [E_{p_{11}}] = [\delta P_{p_1} / \delta \theta_{1nt1}]$$

$$E_{p_{11}} = V_{p_1} \sum_m V_{1nt1} [G^{pm_{11}} \text{SIN}(\theta_{p_1} - \theta^{m_1}) - B^{pm_{11}} \text{COS}(\theta_{p_1} - \theta^{m_1})]$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} i = 1, \dots, nb \\ l = nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m = a, b, c \end{array}$$

$$* [B^{mj_k}] = [\delta P_{genj} / \delta \theta^{m_k}]$$

$$B^{mj_k} = \sum_p V_{1ntj} V^{m_k} [G^{pm_{jk}} \text{SIN}(\theta_{p_j} - \theta^{m_k}) - B^{pm_{jk}} \text{COS}(\theta_{p_j} - \theta^{m_k})]$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} j = nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ k = 1, \dots, nb \\ p, m = a, b, c \end{array}$$

$$* [F_{j1}] = [\delta P_{genj} / \delta \theta_{1nt1}]$$

$$F_{j1} = 0$$

$$\text{con: } j, l = nb+1, \dots, nb+ng-1 \quad j \neq l$$

$$F_{11} = \sum_p [-(V_{1nt1})^2 - Q_{gen1}]$$

$$+ \sum_m \sum_p (V_{1nt1})^2 [G^{pm_{11}} \text{SIN}(\theta_{p_1} - \theta^{m_1}) - B^{pm_{11}} \text{COS}(\theta_{p_1} - \theta^{m_1})]$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} l = nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m = a, b, c \end{array}$$

Los coeficientes de la ecuación matricial (3.2.18) son:

$$* [K^{pm}_{1k}] = V^{mk} [\delta Q_{P1} / \delta V^{mk}]$$

$$K^{pm}_{1k} = V^{mk} V_{P1} [G^{pm}_{1k} \text{SIN}(\theta_{P1} - \theta^{mk}) - B^{pm}_{1k} \text{COS}(\theta_{P1} - \theta^{mk})]$$

$$\text{con: } \begin{array}{ll} i, k = 1, \dots, nb & k \neq i \\ p, m = a, b, c & p \neq m \end{array}$$

$$K^{pp}_{11} = -(V_{P1})^2 B^{pp}_{11} + Q_{P1}$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} i = 1, \dots, nb \\ p = a, b, c \end{array}$$

$$* [P^{pl}_{11}] = V_{int1} [\delta Q_{P1} / \delta V_{int1}]$$

$$P^{pl}_{11} = V_{int1} V_{P1} \sum_m [G^{pm}_{11} \text{SIN}(\theta_{P1} - \theta^{m1}) - B^{pm}_{11} \text{COS}(\theta_{P1} - \theta^{m1})]$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} i = 1, \dots, nb \\ l = nb+1, \dots, nb+ng \\ p, m = a, b, c \end{array}$$

$$* [L^{mj}_{k}] = V^{mk} [\delta V_{regj} / \delta V^{mk}]$$

$$L^{mj}_{k} = V^{mk} L^{mj}_{k'}$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} k \text{ barra terminal del generador } j. \\ j = nb+1, \dots, nb+ng \\ m = a, b, c \end{array}$$

$$L^{mj}_{k} = \emptyset$$

$$\text{con: } \begin{array}{l} k \text{ no es barra terminal del generador } j. \\ j = nb+1, \dots, nb+ng \\ m = a, b, c \end{array}$$



$$* [R_{j1}] = V_{int1} [\delta V_{regj} / \delta V_{int1}]$$

$$R_{j1} = 0$$

$$\text{con: } j, l = nb+1, \dots, nb+ng$$

#### APROXIMACIONES JACOBIANAS. -

El algoritmo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido tiene como base el uso de matrices jacobianas constantes.

Este objetivo se lo consigue, realizando ciertas aproximaciones que simplifican enormemente las operaciones y por lo tanto tiempo de computación.

Estas aproximaciones son las siguientes:

- a) Para todas las fases "p" de todas las barras "i", se tiene:

$$Q_{P1} \ll B_{PP11} (V_{P1})^2$$

- b) Para dos barras "i" y "k" conectadas a la misma fase "p", se tiene que:

$$\begin{array}{l} \vdots \\ \text{COS } (\theta_{P1} - \theta_{Pk}) \approx 1 \\ \vdots \end{array}$$

y por lo tanto se obtendrá que,

$$G_{pp_{1k}} \text{ SIN}(\theta_{p_1} - \theta_{p_k}) \ll B_{pp_{1k}}$$

- c) El desbalance que se puede presentar entre los ángulos de las tres fases para cualquier barra "i" es pequeño, por lo tanto la siguiente aproximación aplicada a un sistema trifásico es:

$$(\theta_{p_1} - \theta_{m_1}) \approx \pm 120^\circ \quad p \neq m$$

- d) Considerando las aproximaciones de los literales b) y c), se puede establecer que la diferencia entre ángulos de diferentes fases de barras conectadas, es aproximadamente  $120^\circ$ , es decir:

$$(\theta_{p_1} - \theta_{m_k}) \approx \pm 120^\circ \quad p \neq m$$

y consecuentemente se tendrá que,

$$\text{COS} (\theta_{p_1} - \theta_{m_k}) \approx - 0.5$$

$$\text{SIN} (\theta_{p_1} - \theta_{m_k}) \approx \pm 0.866$$

Aplicando estas aproximaciones en los elementos de las submatrices jacobianas y luego reemplazando en las ecuaciones matriciales (3.2.17) y (3.2.18), se obtienen las

siguientes ecuaciones matriciales:

$$\begin{array}{c} \Delta P_{P1} \\ \Delta P_{gen j} \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline (V_{P1} M^{pm}_{1k} V^{mk}) & (\sum_m V_{P1} M^{pm}_{11} V_{int1}) \\ \hline (\sum_p V_{intj} M^{pm}_{jk} V^{mk}) & (\sum_m \sum_p V_{intj} M^{pm}_{j1} V_{int1}) \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \Delta \theta^{mk} \\ \Delta \theta_{int1} \end{array} \tag{3.2.19}$$

$$\begin{aligned} i, k &= 1, \dots, nb \\ j, l &= nb + 1, \dots, nb + ng - 1 \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

$$\begin{array}{c} \Delta Q_{P1} \\ \Delta V_{regj} \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline (V_{P1} M^{pm}_{1k} V^{mk}) & (\sum_m V_{P1} M^{pm}_{11} V_{int1}) \\ \hline V^{mk} [L^{mj}_k]' & [\emptyset] \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} V^{mk}/V^{mk} \\ V_{int1}/V_{int1} \end{array} \tag{3.2.20}$$

$$\begin{aligned} i, k &= 1, \dots, nb \\ j, l &= nb + 1, \dots, nb + ng \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

donde :

$$M^{pm}_{1k} = G^{pm}_{1k} \text{ SIN } \theta^{pm}_{1k} - B^{pm}_{1k} \text{ COS } \theta^{pm}_{1k}$$

siendo:

$$\theta^{pm}_{1k} = \theta_{P1} - \theta^{mk}$$

$M^{pm}_{1k}$  es un término constante y sus valores son dados al reemplazar las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \theta^{pp}_{11} &= 0^\circ \\ \theta^{pp}_{1k} &= 0^\circ \\ \theta^{pm}_{1k} &= \pm 120^\circ \quad p \neq m \end{aligned}$$

Los valores de  $G^{pm_{1k}}$  y  $B^{pm_{1k}}$ , son obtenidos de la matriz Admitancia de barra trifásica del sistema.

Por otro lado, la submatriz  $[L^{mj_k}]'$  de la ecuación matricial (3.2.20), es constante tal como se indica en el Anexo 6.

Ahora, para conseguir que los subjacobianos de las ecs.(3.2.19) y (3.2.20) sean constantes, se hace las siguientes modificaciones:

- a) Las funciones del lado izquierdo son redefinidas como:  $[\Delta P_{P_1}/V_{P_1}]$ ,  $[\Delta P_{genj}/V_{intj}]$  y  $[\Delta Q_{P_1}/V_{P_1}]$ .
- b) Luego, el subjacobiano de la ec. (3.2.19) queda todavía con términos de  $V$  para los cuales se dice que aproximadamente son de valor 1.0 p.u.
- c) Mientras que los términos de  $V$  del subjacobiano de la ec. (3.2.20) se cancelan con los del vector del lado derecho.

Por lo tanto las ecs. (3.2.19), (3.2.20) quedan de la siguiente forma:

⋮  
⋮  
⋮  
⋮

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P_{P_1}/V_{P_1} \\ \hline \Delta P_{genj}/V_{intj} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline [M^{pmik}] & [\sum_m M^{pmi1}] \\ \hline [\sum_p M^{pmjk}] & [\sum_p \sum_m M^{pmj1}] \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta^{mk} \\ \hline \Delta \theta_{int1} \\ \hline \end{array} \quad (3.2.21)$$

$$\begin{aligned}
 i, k &= 1, \dots, nb \\
 j, l &= (nb+1), \dots, (nb+ng-1) \\
 p, m &= a, b, c
 \end{aligned}$$

de donde:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{P_1} &= (P_{P_1})^{ESP} - P_{P_1} \\
 \Delta P_{genj} &= (P_{genj})^{ESP} - P_{genj}
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta Q_{P_1}/V_{P_1} \\ \hline \Delta V_{regj} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline [M^{pmik}] & [\sum_m M^{pmi1}] \\ \hline [L^{mjkl}] & [\emptyset] \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta V^{mk} \\ \hline \Delta V_{int1} \\ \hline \end{array} \quad (3.2.22)$$

$$\begin{aligned}
 i, k &= 1, \dots, nb \\
 j, l &= (nb+1), \dots, (nb+ng) \\
 p, m &= a, b, c
 \end{aligned}$$

de donde:

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_{P_1} &= (Q_{P_1})^{ESP} - Q_{P_1} \\
 \Delta V_{regj} &= (V_{regj})^{ESP} - V_{a_k}
 \end{aligned}$$

Si a los subjacobianos de las ecuaciones matriciales (3.2.21) y (3.2.22), se los llama [B'] y [B''] respectivamente, entonces esas ecuaciones quedan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{P1}/V_{P1} \\ \Delta P_{genj}/V_{intj} \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta^{mk} \\ \Delta \theta_{int1} \end{bmatrix} \quad (3.2.23)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{P1}/V_{P1} \\ \Delta V_{regj} \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta V^{mk} \\ \Delta V_{int1} \end{bmatrix} \quad (3.2.24)$$

Donde las matrices subjacobianas  $[B']$  y  $[B'']$ , han sido aproximadas a matrices constantes.

La matriz  $[B']$  es una matriz real y cuadrada de orden  $3(nb)+ng-1$ , mientras que la matriz  $[B'']$ , también es real y cuadrada pero de orden  $3(nb)+ng$ .

Se plantea que para aumentar la convergencia en la potencia activa, la matriz subjacobiana  $[B']$  debe ser modificada de tal manera que no debe incluir a aquellos términos que afecten al flujo de reactivos (MVAR), es decir las matrices capacitancia shunt de las líneas de transmisión y los elementos shunt.[4]

Por otro lado, el circuito equivalente del modelo del transformador trifásico conectado en Estrella-tierra / Delta ilustrado en la fig.2.2.5, muestra como valores grandes de

admitancias shunt son realmente introducidos (para una reactancia de cortocircuito del 5% se tienen admitancias shunt del 20 p.u.), pero cuando son excluidos de  $[B']$ , los resultados divergen.[4][5]

Sin embargo, en el presente trabajo se utiliza las matrices  $[B']$  y  $[B'']$  definidas en las ecs. (3.2.21) y (3.2.22) respectivamente.

#### CALCULO DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO.-

Luego de terminado el proceso iterativo y se ha encontrado los valores de los voltajes en las fases a,b,c de las barras, se puede calcular el flujo de potencia trifásico en base a la matriz admitancia de barra de cada subsistema inicialmente obtenida (así, para una línea trifásica de doble circuito la  $Y_{barra}$  es según la ec. (2.1.18) y no de la ec. (2.1.19)).

Las potencias activa y reactiva inyectadas en la fase "p" de la barra "i" se calculan con las ecs. (3.2.12) y (3.2.13) respectivamente.

Las potencias trifásicas activas generadas se obtienen aplicando la ec. (3.2.15) y para las reactivas con la ec. (A6.8) del Anexo 6.

Las potencias activa (P) y reactiva (Q) de pérdidas se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$P = \sum_i \sum_p P_{pi}$$

$$Q = \sum_i \sum_p Q_{pi}$$

$$\text{con: } \begin{aligned} i &= 1, \dots, n \\ p &= a, b, c \end{aligned}$$

### 3.3 ALGORITMO DE SOLUCION. -

El algoritmo que resuelve el problema del Flujo de Potencia Trifásico es el siguiente:

- a) Lectura de datos previamente almacenados y formación de las matrices admitancia de barra trifásicas para cada subsistema. Estas matrices son almacenadas temporalmente para el cálculo de flujos.
- b) Formar la matriz admitancia de barra trifásica del sistema.
- c) Formar las submatrices jacobianas [B'] y [B''], según aquellas de las ecs.(3.2.21) y (3.2.22).
- d) Bifactorización del las submatrices jacobianas [B']



y [B"] respectivamente.

e) Asumir valores iniciales:

- Módulo de los voltajes de fase de todas las barras, a excepción de las barras terminales e internas de los generadores.

- Módulo de los voltajes de fase de las barras terminales iguales a los especificados por los reguladores de voltaje. Para las barras internas se asume el mismo valor de su respectiva barra terminal.

- Los ángulos de los voltajes de fase de todas las barras del sistema, incluyendo las terminales y las internas de los generadores. Para las fases a, b, c se asume:  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  y  $+120^\circ$ , respectivamente.

f) Los valores de los indicadores de convergencia KP y KQ son iguales a 1.

g) Calcular:  $[\Delta P/V]$  ,  $[\Delta P_{gen}/V_{int}]$ .

siendo:

$$\Delta P = P_{ESP} - P_{CALCULADO}$$

$$\Delta P_{gen} = P_{ESP_{gen}} - P_{CALCULADO_{gen}}$$

Donde los valores de  $P$  y  $P_{gen}$  calculados se los obtiene con las ecs.(3.2.12) y (3.2.15).

h) Probar convergencia:

$$|\Delta P| \leq \epsilon$$

$$|\Delta P_{gen}| \leq \epsilon$$

i) Si se produce la convergencia poner al indicador KP el valor de cero, e ir a p).

j) Resolver la ec.(3.2.23) y encontrar los nuevos valores de:  $[\theta]$  y  $[\theta_{int}]$ .

Asignar al indicador KQ el valor de 1.

k) Calcular:  $[\Delta Q/V]$ ,  $[\Delta V_{reg}]$ .

siendo:

$$\Delta Q = Q_{ESP} - Q_{CALCULADO}$$

$$\Delta V_{reg} = V_{ESP_{reg}} - V_{CALCULADO}$$

Donde el valor de  $Q$  calculado se lo obtiene de la ec.(3.2.13) y  $V$  es el voltaje terminal en la fase "a".

:

.

:

l) Comprobar convergencia:

$$|\Delta Q| \leq \epsilon$$

$$|\Delta V_{reg}| \leq \epsilon$$

- m) Si se produce la convergencia asignar al indicador KQ el valor de cero, e ir a q). Caso contrario continuar con el siguiente paso.
- n) Resolver la ec.(3.2.24), y encontrar los nuevos valores de: [V], [V<sub>int</sub>].

Asignar al indicador KP el valor de 1.

- o) Regresar a g).
- p) Si KQ es igual a cero, ir al paso r), caso contrario ir al k).
- q) Si KP es igual a cero, ir a r), caso contrario ir al paso g).
- r) Salida del proceso iterativo. Los últimos valores de: [V], [V<sub>int</sub>], [θ] y [θ<sub>int</sub>] son la solución.
- s)  $\vdots$   
 Calcular los flujos de potencia en los subsistemas  
 $\vdots$   
 $\vdots$

de la red, en base a sus respectivas matrices admittancia de barra, almacenadas en el paso a).

La fig. 3.1.2, muestra el diagrama de bloques del proceso iterativo.

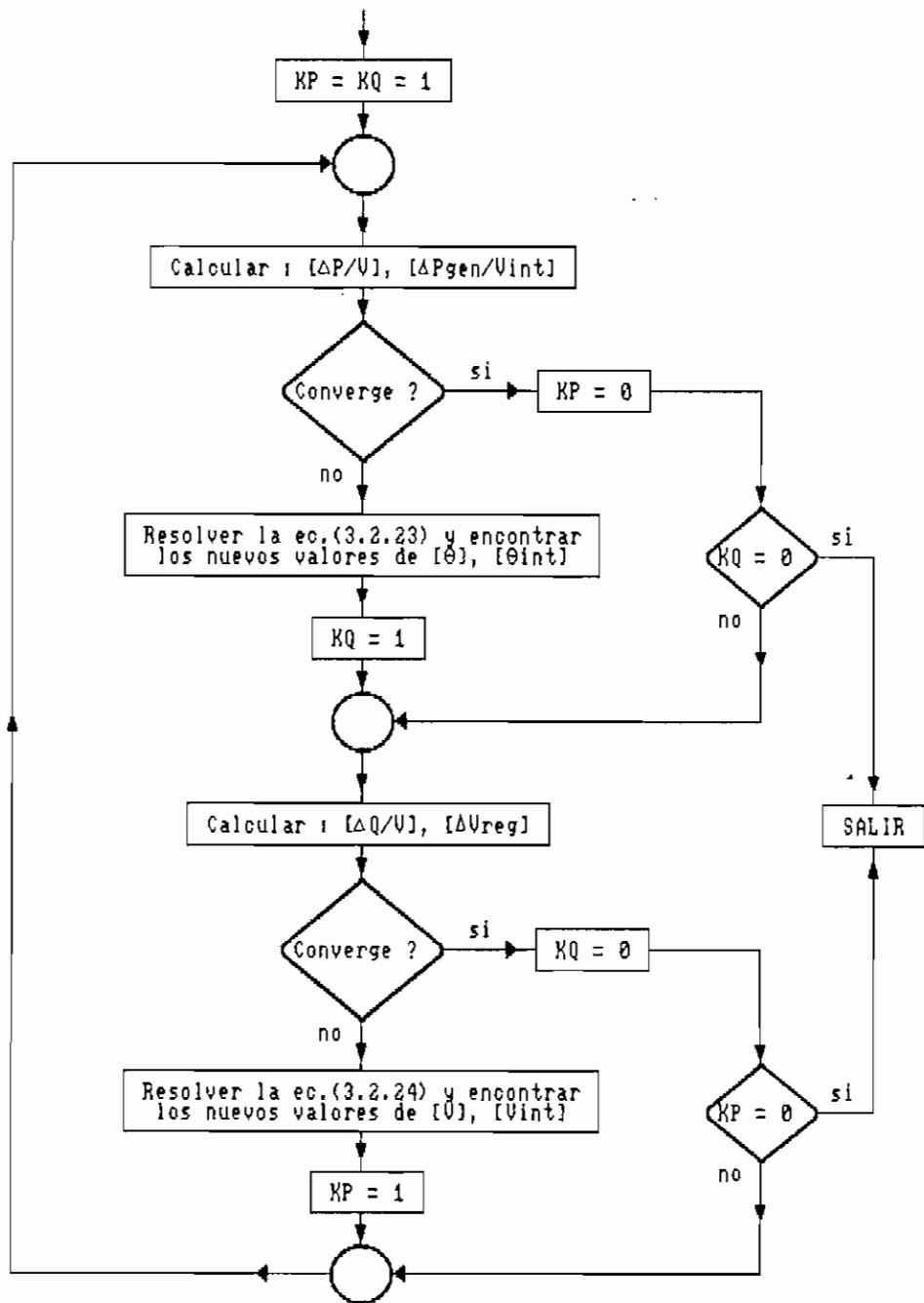


Fig. 3.1.2 Diagrama de bloques del proceso iterativo en el cálculo de Flujos de Potencia Trifásico.[4]

## CAPITULO 4

### PROGRAMA DIGITAL PARA LA SOLUCION DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO

#### 4.1 INTRODUCCION.-

En este Capítulo, se indica la configuración del programa, su alcance, diagramas de bloques; así como también la entrada de datos y salida de resultados.

El lenguaje de programación usado es el *QuickBasic* en su versión 4.5, escogido por su versatilidad en el manejo de información y la facilidad en la elaboración de pantallas de identificación, menús, etc.

El *QuickBasic*, por si solo es una herramienta potente de programación profesional ya que contiene las mejores características de los lenguajes *BASIC*, *FORTTRAN* Y *PASCAL*, y básicamente es un entorno de programación con editor y compilador incorporado que reúne las características esenciales del intérprete *BASICA* y la velocidad de un compilador.[1]

:

:

:

:

|

## 4.2 DESCRIPCION DEL PROGRAMA Y DIAGRAMAS DE FLUJO. -

### 4.2.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA. -

Se ha desarrollado tres programas que son complementarios entre si, para formar un paquete de Software con característica interactiva y orientado a usarse en los computadores personales.

Un programa llamado "*CALCULO del FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO*", se caracteriza por leer datos ubicados en 6 archivos, realizar los respectivos cálculos y los resultados los almacena en otros 3 archivos.

Este programa está complementado por otro llamado "*GESTION de DATOS y RESULTADOS*" que permite el ingreso de datos, consulta de datos y resultados, impresión de datos y resultados y la modificación de datos existentes.

Los dos programas tanto de Gestión de Datos y Resultados como el de Cálculo del Flujo de Potencia Trifásico son controlados por otro programa llamado "*FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO*".

ALCANCE DEL PROGRAMA "CALCULO DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO".-

El programa se ha diseñado para resolver problemas de flujos trifásicos usando el algoritmo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, en sistemas que tengan hasta 4 líneas trifásicas mutuamente acopladas. El criterio de convergencia es de 0.01 MVA y con un máximo número de iteraciones de 100.

Dependiendo del número máximo de líneas mutuamente acopladas, y del número de elementos de interconexión como generadores, transformadores y secciones de líneas de transmisión, el programa define su alcance, por ejemplo:

- con un máximo de 4 líneas acopladas el programa se limita a resolver un sistema de aproximadamente 15 barras con 22 elementos de interconexión.

- con 3 líneas acopladas se limita a 30 barras con 40 elementos.

- con 2 líneas acopladas se limita a 50 barras y 70 elementos.

- y si no existe acoplamiento entre líneas llega a 99 barras con 140 elementos aproximadamente.

Para determinar estos limitantes se usó un computador personal XT con 640 Kbytes de memoria RAM.

El programa usa 24 subrutinas, de las cuales las más importantes se muestran en el Anexo 7.

#### 4.2.2 DIAGRAMAS DE FLUJO.-

De la fig. 4.1 a la fig. 4.3 se presentan los diagramas de bloques del programa "Cálculo del Flujo de Potencia Trifásico".

En el Anexo 7 encontrará los respectivos diagramas de flujo de dicho programa, así como también de las subrutinas YBARRA, FLUJOS.

#### 4.3 VARIABLES DEL PROGRAMA Y ARREGLOS DE ALMACENAMIENTO.-

##### 4.3.1 VARIABLES DEL PROGRAMA.-

Las variables utilizadas en el programa son divididas en dos grupos: externas e internas.

Las variables externas corresponden a aquellas variables de entrada/salida, mientras que las variables internas son usadas en los procesos intrínsecos del programa.

El Anexo 7, contiene el listado de estas variables.



PROGRAMA CALCULO DEL FLUJO DE POTENCIA TRIFÁSICO  
DIAGRAMA DE BLOQUES

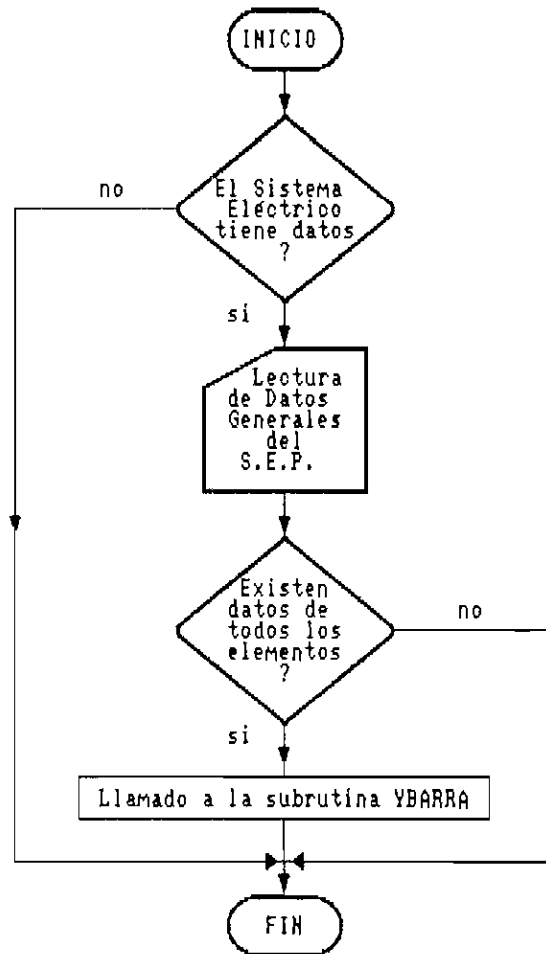


Fig. 4.1

SUBROUTINA YBARRA  
DIAGRAMA DE BLOQUES

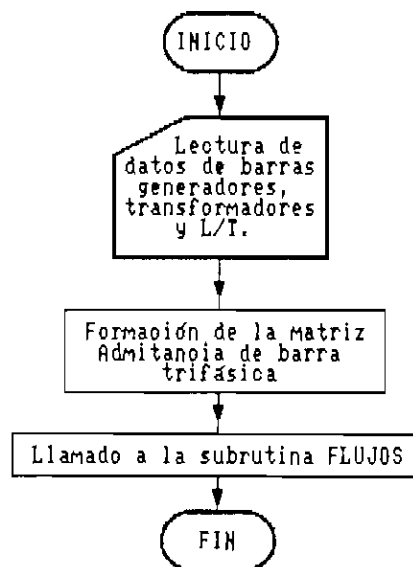


Fig. 4.2

**SUBROUTINA FLUJOS  
DIAGRAMA DE BLOQUES**

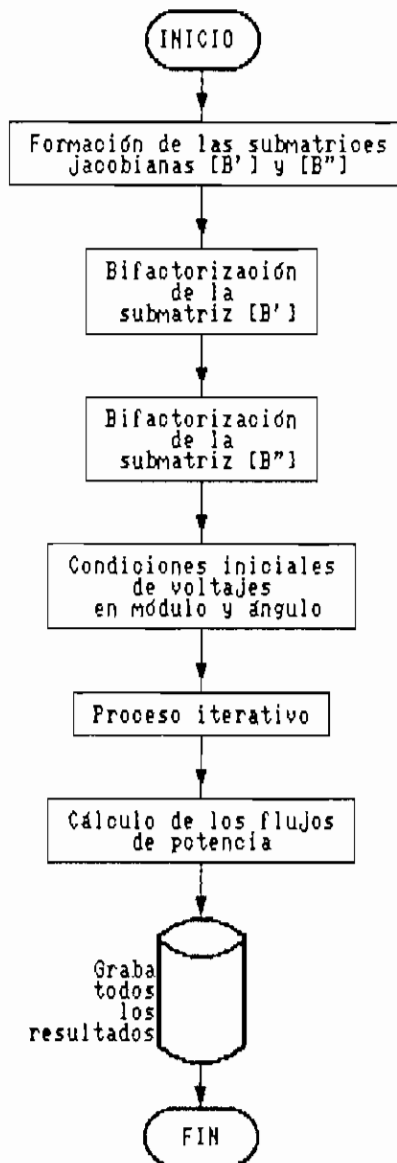


Fig. 4.3

#### 4.3.2 ARREGLOS DE ALMACENAMIENTO.-

En el desarrollo del programa, se han establecido arreglos de almacenamiento por más de una dimensión que permitieron una fácil programación.

Entonces, con el propósito de identificar a los diferentes sub-índices, se analiza los arreglos más importantes, como son:

#### VOLTAJES EN LAS BARRAS.-

Para almacenar los módulos y ángulos de los voltajes por fase y por barra, se ha organizado arreglos de dos dimensiones como son:

$$V(i, j) = \text{módulo} \quad \text{y} \quad TE(i, j) = \text{ángulo}$$

de donde:

$i$  = representa al número de barra.

$j$  = indica la fase de la barra "i", cuyos valores pueden ser 1,2 ó 3 para las fases A,B ó C respectivamente.

MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA.-

Para la matriz admitancia de barra trifásica del sistema se ha usado arreglos de tres dimensiones tanto para la matriz conductancia como para la matriz susceptancia, así:

$$G(j, i_1, i_2) \quad B(j, i_1, i_2)$$

de donde:

$j$  = número correspondiente al almacenamiento de matrices dispersas.

$i_1, i_2$  = números que identifican a los elementos propios y mutuos entre las fases A,B y C. Estos son 1, 2 ó 3 para las fases A,B ó C respectivamente.

Entonces, según la técnica de almacenamiento de matrices dispersas, la matriz admitancia de barra del sistema trifásico se almacena tomando en cuenta bloques matriciales de 3x3, que son diferentes de la matriz nula.

En el cálculo de los flujos trifásicos se emplean a las matrices admitancia de barra individuales para cada subsistema. Por tanto, para mantener esa información se adoptan arreglos de cuatro dimensiones, y son:

GGpp(i, j, i1, i2)	BBpp(i, j, i1, i2)
GGpq(i, j, i1, i2)	BBpq(i, j, i1, i2)
GGqp(i, j, i1, i2)	BBqp(i, j, i1, i2)
GGqq(i, j, i1, i2)	BBqq(i, j, i1, i2)

de donde:

i = identifica al número del subsistema.

j = número del bloque matricial de 3x3.

i1, i2 = números que identifican a los elementos propios y mutuos entre las fases A,B y C. Estos son 1, 2 ó 3.

#### 4.4 ENTRADA DE DATOS.-

La entrada de datos se realiza de una manera fácil, ya que el programa guía al usuario mediante mensajes que aparecen oportunamente en la pantalla.

El menú respectivo contiene las siguientes opciones: Datos Generales, Datos de Barras, Datos de Generadores, Datos de Transformadores, Datos de Líneas de Transmisión.

Los nombres de los datos que se necesitan ingresar en las diferentes opciones, se detallan en el Anexo 8.

#### 4.5 SALIDA DE RESULTADOS.-

Una vez realizada la ejecución de cálculo, se puede ver los resultados tanto en pantalla como impresos en papel, dependiendo de la opción seleccionada en el programa.

#### RESULTADOS EN PANTALLA.-

Los resultados en barras (A, B, C), indican las siguientes salidas por barra:

- Número de barra.
- Nombre de barra.
- Módulos de los voltajes en las fases A, B y C, en p.u.
- Angulos de los voltajes en las fases A, B y C, en grados.

Para el caso de los flujos se tiene que para cada elemento y línea de transmisión aparece:

- Número de barra de envío.
- Número de barra de recepción.
- Potencias activas y reactivas en las fases A, B y C en la barra de envío, en MW y MVAR respectivamente.
- Potencias activas y reactivas en las fases A, B y C en la barra de recepción, en MW y MVAR respectivamente.

RESULTADOS IMPRESOS EN PAPEL.-

En la impresión de los resultados en barras aparece:

- Número de la barra.
- Nombre de la barra.
- Módulos de voltajes de las fases A, B y C, en p.u.
- Angulos de voltajes de las fases A, B y C, en grados.
- Potencia activa trifásica generada en MW.
- Potencia reactiva trifásica generada en MVAR.

En la impresión de los resultados de flujos de potencia trifásicos, se notan:

- Número de la barra de envío.
- Número de la barra de recepción.
- Potencias activas en cada fase A, B y C de la barra de envío, en MW.
- Potencias reactivas en cada fase A, B y C de la barra de recepción, en MVAR.
- Generación total de potencia activa (MW) y reactiva (MVAR).
- Carga total de potencia activa (MW) y reactiva (MVAR).
- Pérdidas de potencia activa (MW) y reactiva (MVAR) en el sistema.
- Número de iteraciones en que se produjo la convergen-

cia, tanto para la potencia activa como para la reactiva.

En todas las impresiones que se obtenga, siempre constarán los títulos de los correspondientes reportes, y existiendo siempre un encabezado principal que contiene:

- Nombre de la institución.
- Nombre de la facultad.
- Area a la que pertenece el presente trabajo.
- El tema de esta tesis.
- Identificación de realización y dirección.
- Nombre del Sistema Eléctrico.
- Fecha y hora de impresión.



## CAPITULO 5

### APLICACIONES

#### 5.1 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS A RESOLVER.-

El programa se lo ha utilizado para resolver problemas de flujos de potencia trifásicos de dos sistemas eléctricos, en los cuales se ha considerado diferentes situaciones de desbalance.

#### SISTEMA ELECTRICO No. 1.-

Este sistema ha sido tomado de la referencia [4]. La fig. 5.1, indica el diagrama unifilar. Sus características son:

- Tiene una seccionalización de línea, de la cual una sección contiene cuatro líneas de transmisión trifásicas mutuamente acopladas; la otra sección contiene dos conjuntos de dos líneas trifásicas cada uno.
- Existen dos transformadores con la conexión Estrella-tierra / Delta con los neutros de la conexión Estrella sólidamente puestos a tierra.
- La barra de nombre ROX Ø11 es la Oscilante.

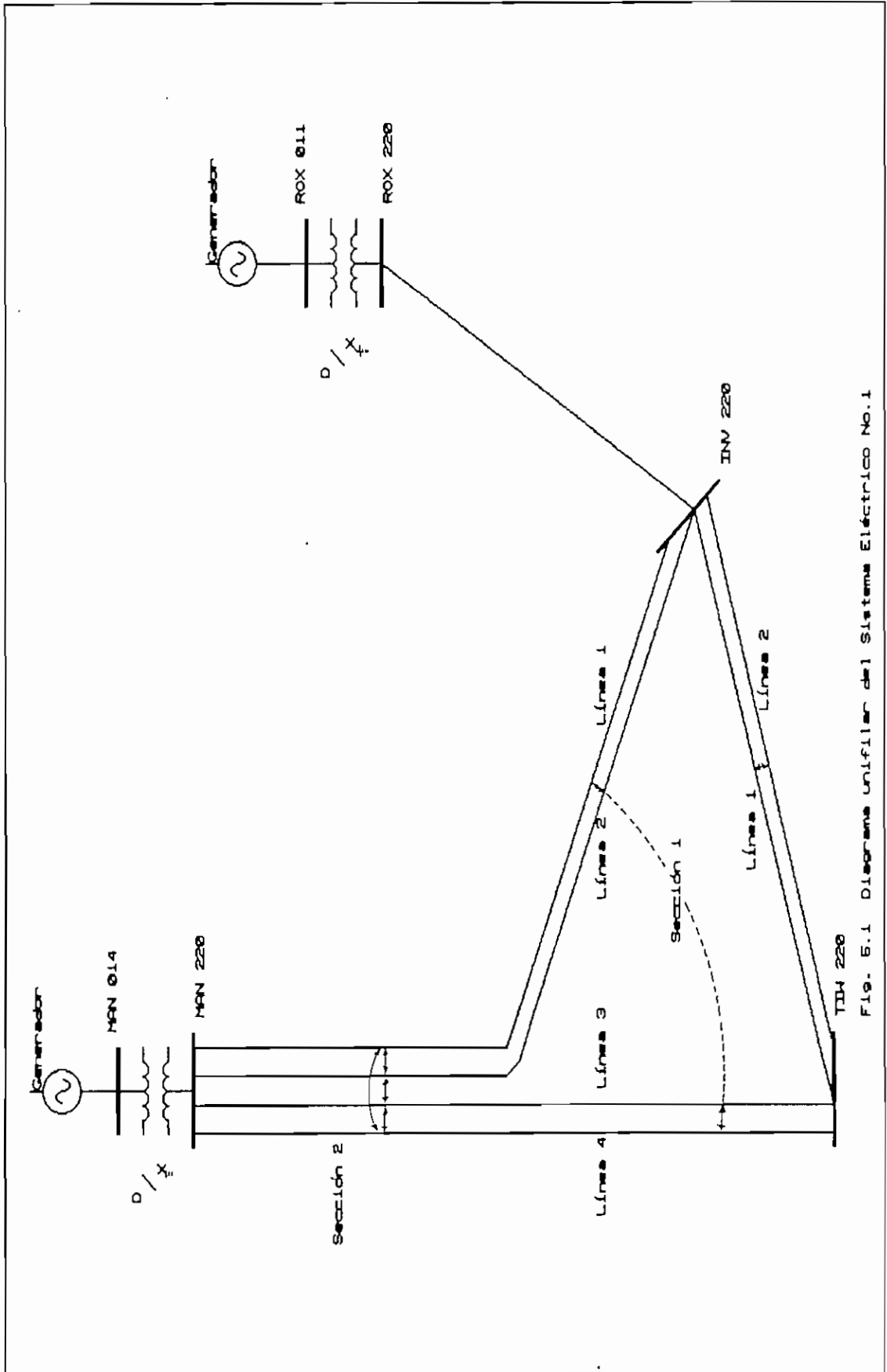


Fig. 6.1 Diagrama unifilar del Sistema Eléctrico No.1

La fig. 5.2, muestra al sistema eléctrico bajo la representación de admitancias compuestas, donde se ha reemplazado las líneas de transmisión, generadores y transformadores por sus respectivos modelos.

La fig. 5.3, ilustra gráficamente al sistema eléctrico en términos de bloques matriciales de orden  $3 \times 3$ ,  $6 \times 6$  y  $12 \times 12$  que representan a los elementos del sistema. Esas cantidades matriciales provienen de los datos ingresados.

Para organización de los datos, se ha dividido al sistema en siete subsistemas, tal como ilustra la fig. 5.3.1.

Los subsistema 1 y 2 representan a dos generadores sincrónicos. Los datos consisten en las tres impedancias de secuencia, la especificación del regulador de voltaje y la generación total de potencia activa. Este último dato no se da en el generador oscilante.

Los subsistemas 3 y 4, representan a dos transformadores, cuyos datos consisten en: la impedancia de cortocircuito, el tipo de conexiones y posiciones de taps.

Los subsistemas 5, 6 y 7, representan a secciones de líneas de transmisión y se dispone como datos las matrices impedancia serie y admitancia shunt.

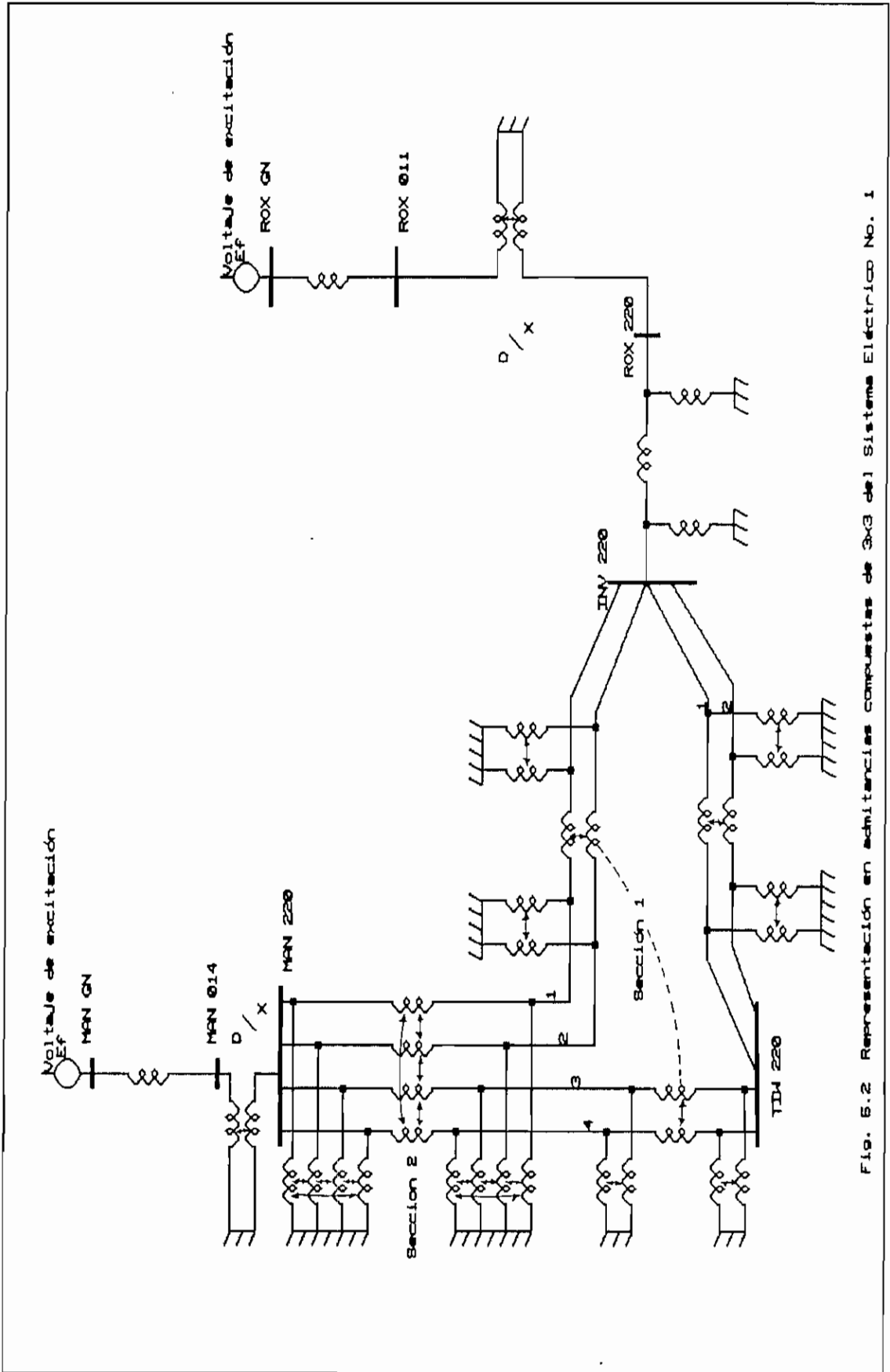
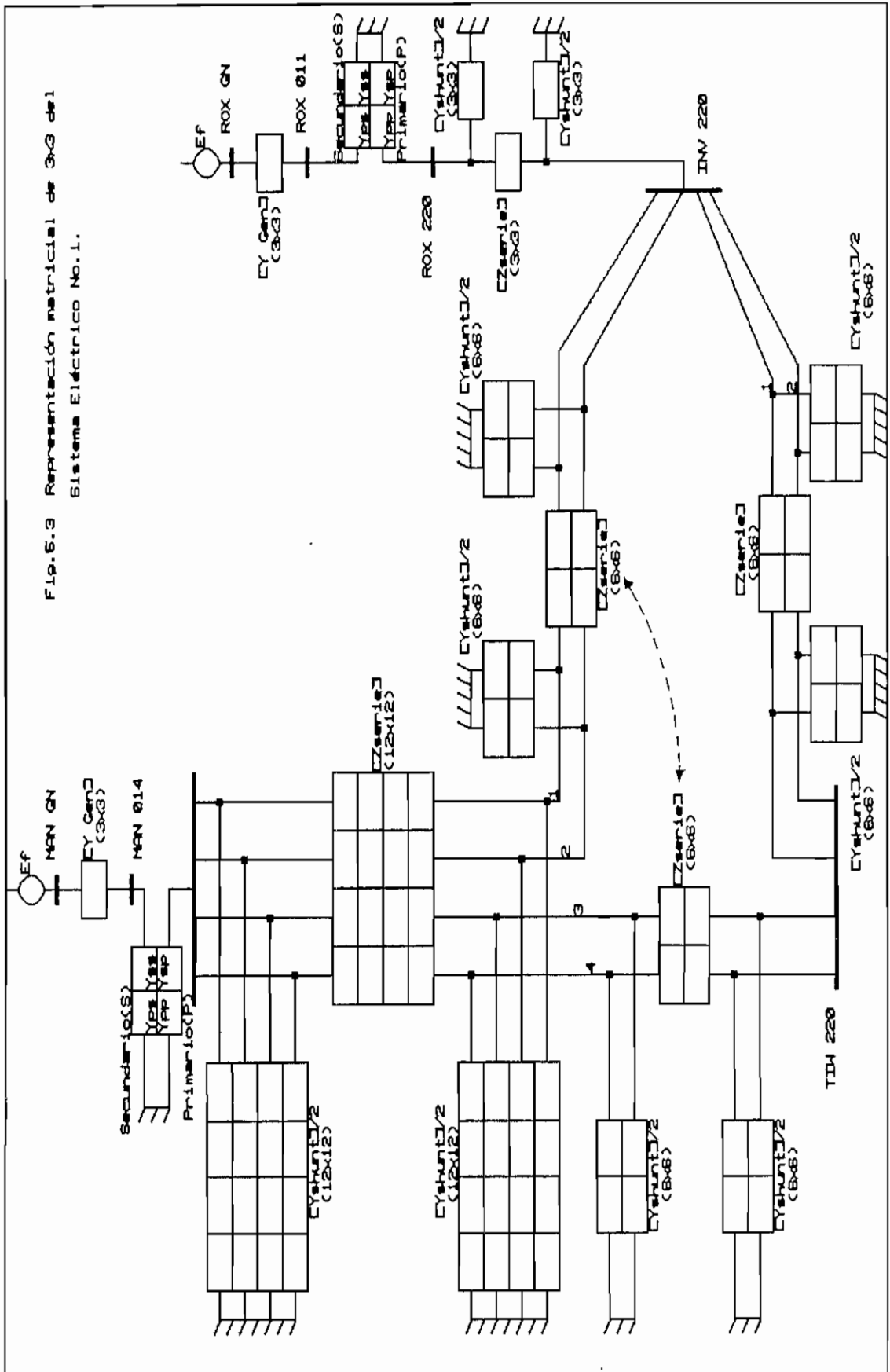
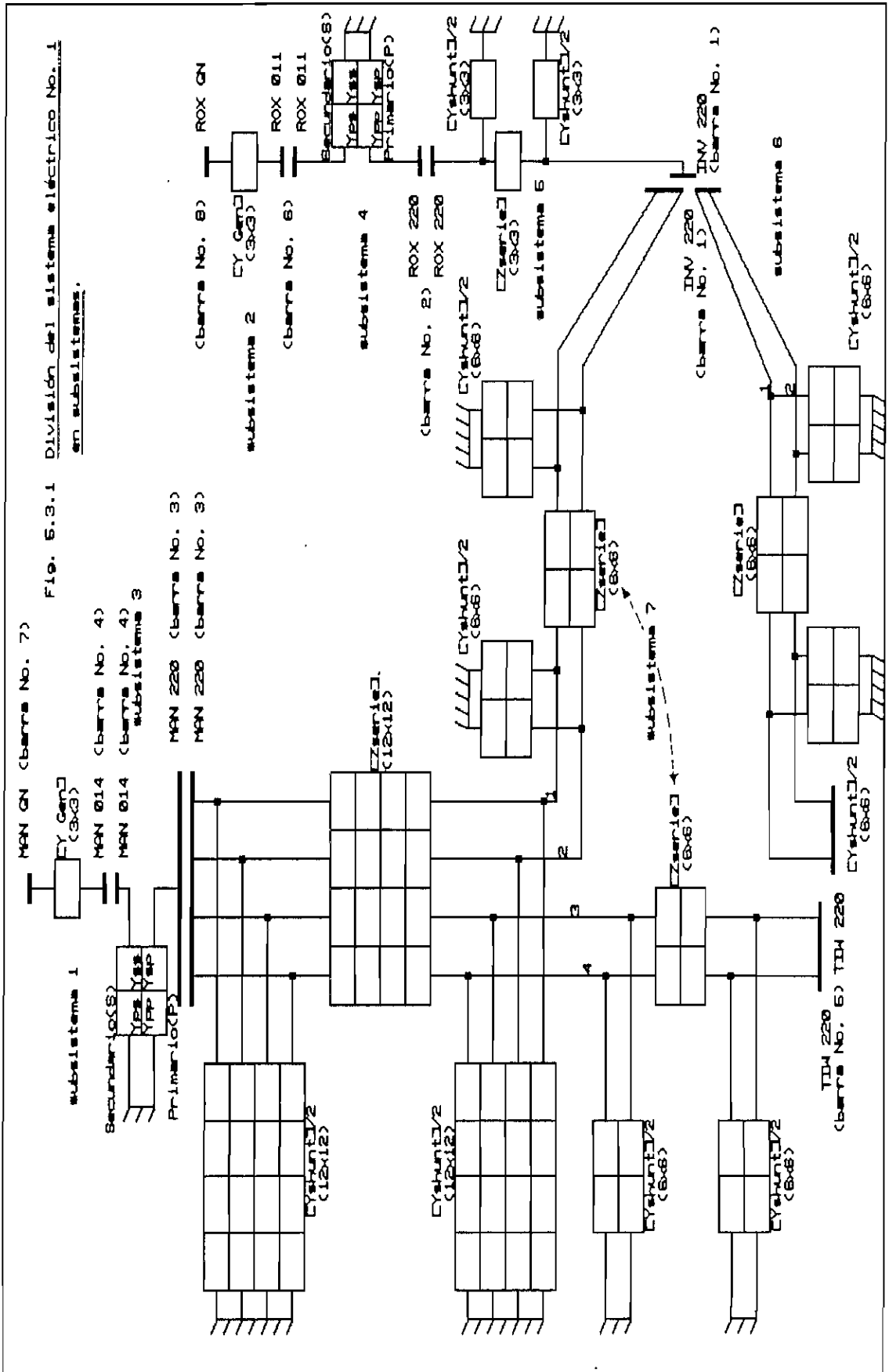


Fig. 5.2 Representación en admitancias compuestas de 3x3 del Sistema Eléctrico No. 1

Fig. 5.3 Representación matricial de 3x3 del Sistema Eléctrico No.1.





El subsistema 5, consiste de una línea trifásica donde la matrices impedancia serie y admitancia shunt son de dimensión 3x3, mientras que el subsistema 6, consiste de un par de líneas trifásicas paralelas mutuamente acopladas por lo que las matrices impedancia serie y admitancia shunt son de dimensión de 6x6.

En el subsistema 7, existen líneas mutuamente acopladas y divididas en dos secciones.

Las secciones 1 y 2, consisten de cuatro líneas trifásicas mutuamente acopladas y el orden de las matrices impedancia serie y admitancia shunt es de 12x12.

Se probará el programa para los siguientes casos:

I .- Sistema balanceado con carga balanceada y sin acoplamientos entre líneas paralelas. Los transformadores tienen conexiones Estrella-tierra / Estrella-tierra. Y considerando :

- a) la exclusión efectiva de los generadores, al conseguir poner las impedancias de secuencia a un valor bajo. (Este es el equivalente trifásico del conocido flujo de carga monofásico o de secuencia positiva).

- b) con el modelo completo de los generadores.
- II .- Para el caso I, pero con acoplamientos mutuos balanceados para todas las líneas trifásicas paralelas.
- III.- Para el caso II, pero con carga desbalanceada.
- IV .- Para el caso II, pero únicamente desbalanceando la capacitancia de las líneas.
- V .- Para el caso II, pero únicamente desbalanceando las matrices impedancia serie.
- VI .- Desbalanceando las matrices impedancia serie y admittancia shunt.
- VII.- Para el caso VI, pero con carga desbalanceada.
- VIII.- Para el caso VII, pero con transformadores en Estrella-tierra / Delta.
- IX .- Para el caso VIII, pero con gran desbalance de potencia activa en carga en la barra INV220.
- X .- Para el caso VIII, pero con gran desbalance de potencia reactiva en carga en la barra INV220.



SISTEMA ELECTRICO No. 2.-

Corresponde a una parte del Sistema Eléctrico Quito. La fig. 5.4 muestra el respectivo diagrama unifilar. Sus características son:

- Contiene un transformador con conexión Delta / Delta y cinco transformadores con conexiones Estrella-tierra / delta.
- No tiene líneas seccionalizadas. Existe una línea a 138 KV, y otras a 46 KV y a 6,3 KV.
- Todas las líneas trifásicas son balanceadas.
- La barra de número 18 es la Oscilante.

La fig. 5.5 muestra una representación de los elementos del sistema en admitancias compuestas.

La fig. 5.6 indica la representación en bloques matriciales de 3 x 3.

Para organización de los datos, se ha dividido al sistema en 18 subsistemas, como muestra la fig. 5.6.1.

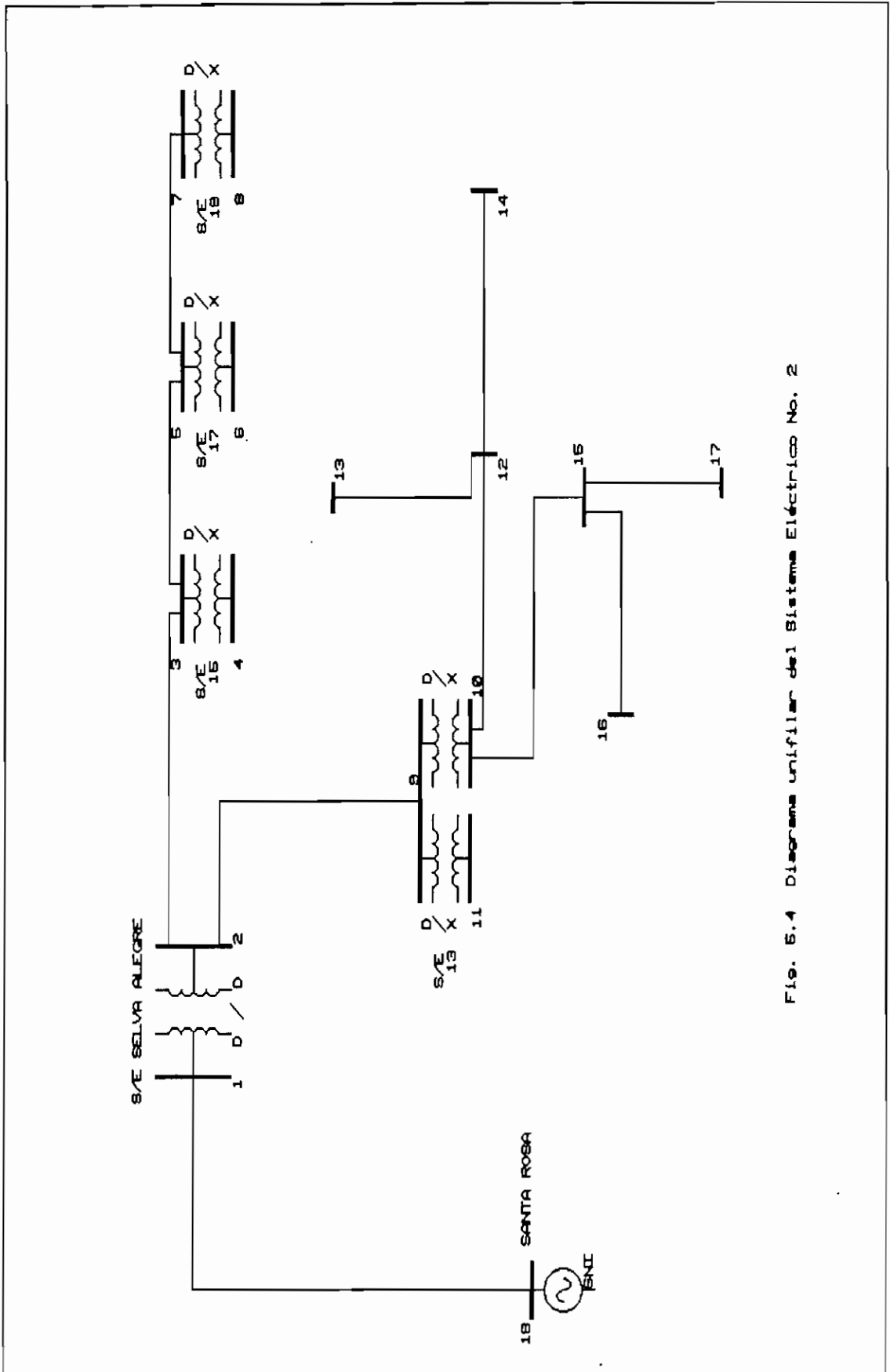


Fig. 5.4 Diagrama unifilar del Sistema Eléctrico No. 2

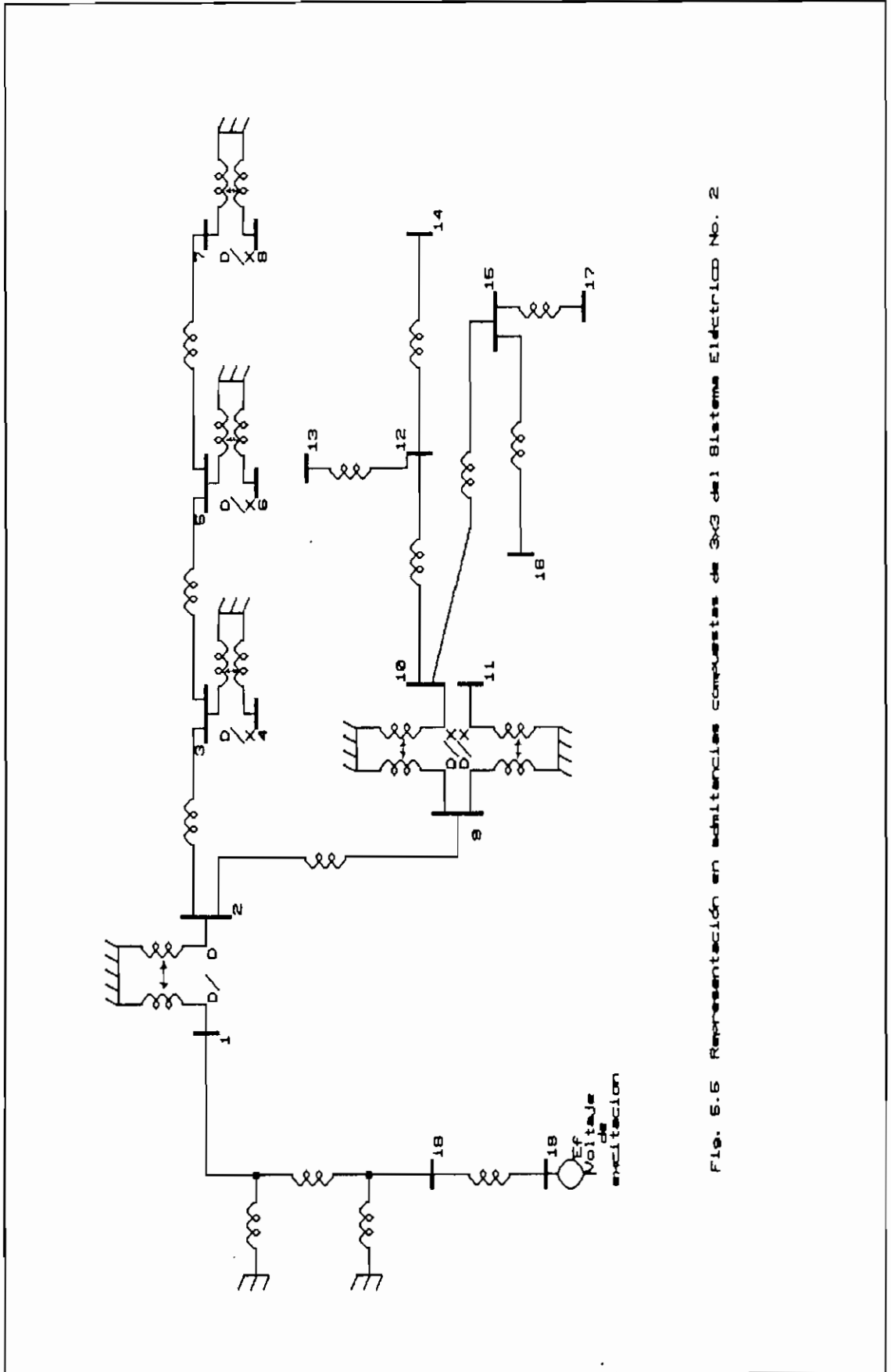


Fig. 5.6 Representación en admitancias compuestas de 3x3 del Sistema Eléctrico No. 2

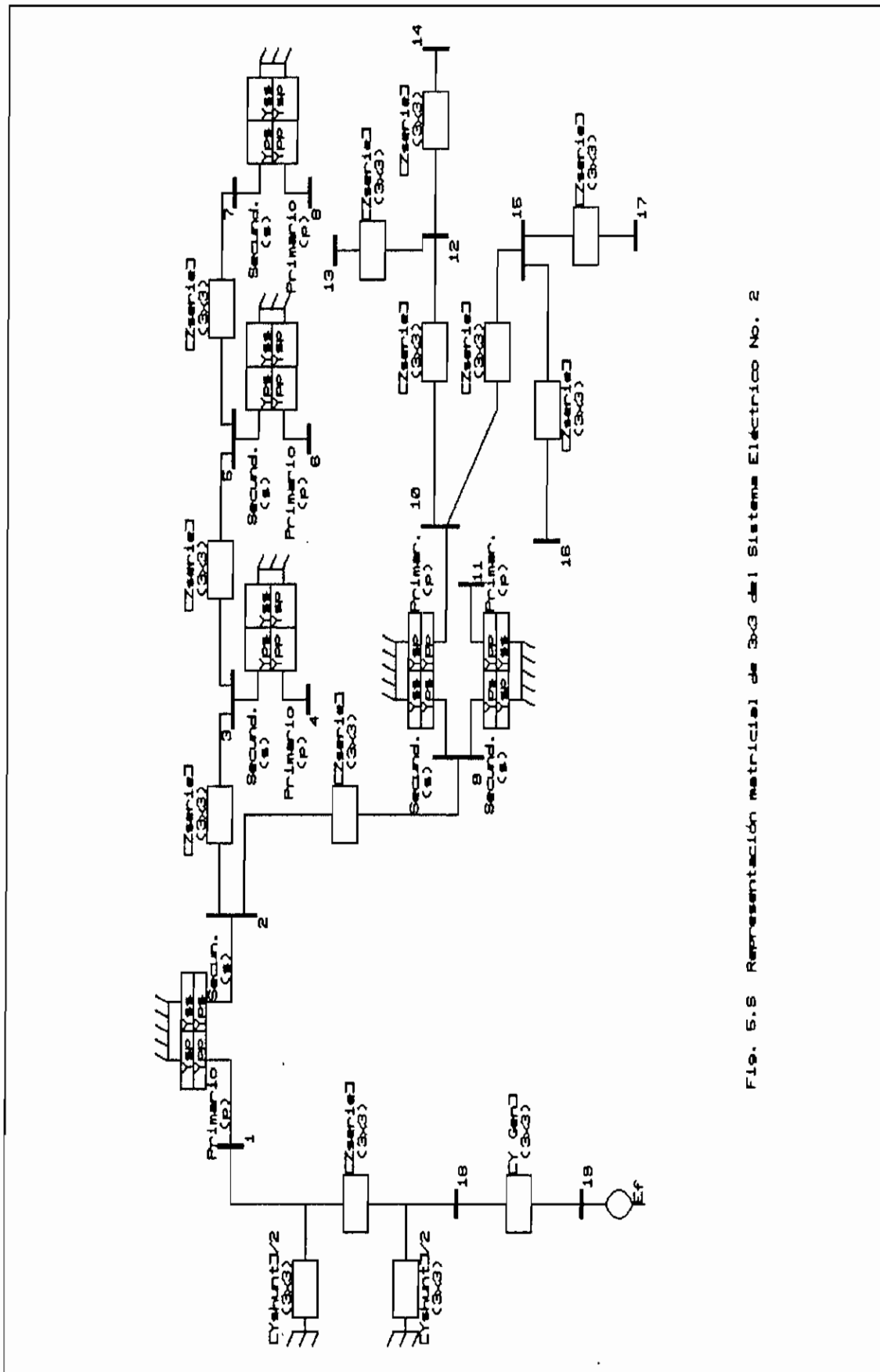


Fig. 5.5 Representación matricial de 3x3 del Sistema Eléctrico No. 2

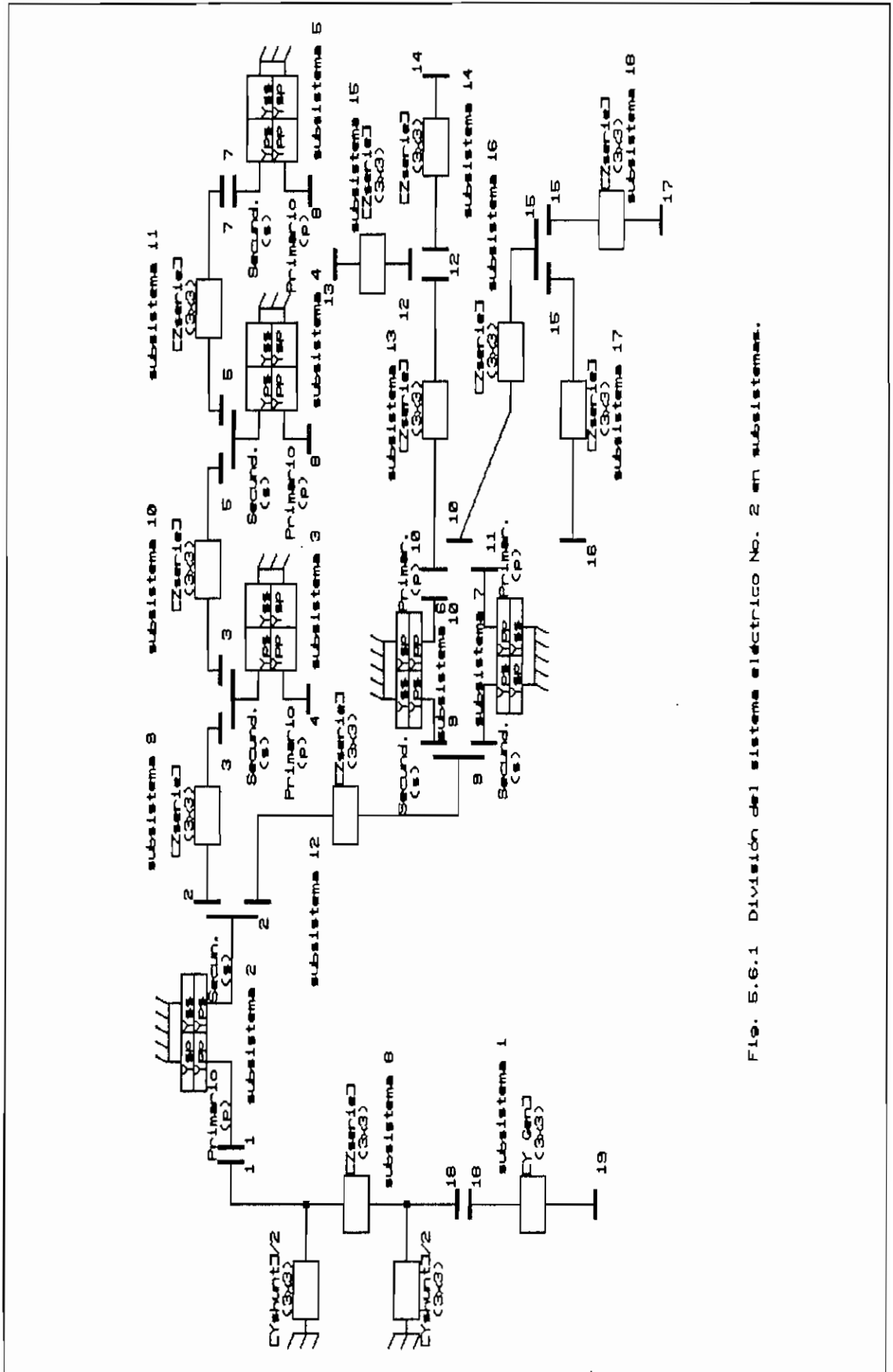


Fig. 5.6.1 División del sistema eléctrico No. 2 en subsistemas.

El Sistema Nacional Interconectado entrega energía al sistema a través de la barra 18, y es representado por un generador que al mismo tiempo es el subsistema 1. Se dispone de las impedancias de secuencia equivalentes, y de la especificación del voltaje en la barra terminal.

Los subsistemas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son transformadores trifásicos que tienen como datos las impedancias de cortocircuito y los tipos de conexiones.

El subsistema 8, consiste de una línea trifásica a 138 KV.

Los subsistemas 9, 10, 11 y 12, consisten de líneas trifásicas a 46 KV.

Se ha considerado que de la barra 10 salen únicamente dos alimentadores primarios, cuyos tramos son los subsistemas 13, 14 y 15 para un alimentador, y el 16, 17 y 18 para otro alimentador. Son líneas trifásicas a 6.3 KV.

Las matrices impedancia serie y admitancia shunt para todas las líneas, se obtienen a partir de las impedancias de secuencia como sucede en este caso y cuyos datos normalmente se disponen en la práctica.

El programa es utilizado para resolver los siguientes casos:

- I.- Sistema balanceado con carga balanceada.
- II.- Sistema balanceado con carga desbalanceada.
- III.- Sistema desbalanceado con carga desbalanceada con:
  - los subsistemas 13 y 16 son monofásicos.
  - los subsistemas 14 y 17 son bifásicos.

## 5.2 SOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS. -

A continuación se muestran los datos y resultados que imprime el programa, para el caso VIII del Sistema Eléctrico No. 1, y el caso III del Sistema Eléctrico No. 2, como ejemplos representativos.

Además se encuentran impresos los datos y resultados para el Sistema Eléctrico No. 1 en condiciones balanceadas, y al que se ha aumentado una barra de carga.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGÜELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMAZ

FECHA:02-19-1991 HORA:00:02:59

## DATOS GENERALES

NOMBRE DEL SISTEMA:	SISTEMAZ
DESCRIPCION DEL SISTEMA:	CASO.VIII
NUMERO DE LA BARRA OSCILANTE:	6
NUMERO DE BARRAS DEL SISTEMA:	6
NUMERO DE SUBSISTEMAS:	7
NUMERO DE SECCIONES (L/T):	4
NUMERO MAXIMO DE LINEAS ACOPLADAS:	4
NUMERO DE GENERADORES:	2
NUMERO DE TRANSFORMADORES:	2
POTENCIA BASE (MVA):	33.3

## DATOS DE BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
		P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)
1	INV220	50	15	45	14	48.3	16.6
2	ROX220	48	20	47	12	51.3	28.3
3	MAN220	0	0	0	0	0	0
4	MAN014	0	0	0	0	0	0
5	TIW220	150	80	157	78	173	72
6	ROX011	0	0	0	0	0	0
7	MANGN	0	0	0	0	0	0
8	ROXGN	0	0	0	0	0	0

## DATOS DE GENERADORES

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		IMPEDANCIAS						POTENCIA TRIFASICA (p.u.)	REGULADOR DE VOLTAJE V fase A (p.u.)
	INTERNA	TERMINAL	SECUENCIA CERO		SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA NEGATIVA			
			R0 (p.u.)	X0 (p.u.)	R1 (p.u.)	X1 (p.u.)	R2 (p.u.)	X2 (p.u.)		
01	7	4	0.0	0.080	0.0	0.010	0.0	0.021	15.015	1.045
02	8	6	0.0	0.150	0.0	0.010	0.0	0.091	SLACK	1.050



SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		CONEXION		POSICION TAP		IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO	
	PRIMARIA	SECUNDARIA	PRIMARIO	SECUNDARIO	PRIMARIO	SECUNDARIO	Rcc (p.u.)	Xcc (p.u.)
03	3	4	X	D	1.045	1.732	.0006	.0164
04	2	6	X	D	1.022	1.732	.0020	.0380

DATOS DE LINEAS DE TRANSMISION

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
05001	1	2

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.006	.045 j				
	FASE b	.002	.015 j	.006	.050 j		
	FASE c	.001	.017 j	.002	.017 j	.007	.047 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.35 j		
	FASE b	-.06 j	.352 j	
	FASE c	-.04 j	-.06 j	.34 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
06002	1	5
	1	5

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0023	.0147 j				
	FASE b	.0015	.007 j	.0022	.0147 j		
	FASE c	.0014	.0073 j	.0015	.0069 j	.0022	.0147 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0009	.0062 j	.0008	.0061 j	.0008	.0058 j
	FASE b	.0008	.0061 j	.0007	.0059 j	.0007	.0056 j
	FASE c	.0008	.0058 j	.0007	.0056 j	.0006	.0054 j

LINEA 2

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0023	.0147 j				
	FASE b	.0014	.009 j	.0026	.015 j		
	FASE c	.0012	.009 j	.001	.009 j	.0021	.013 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.045 j		
	FASE b	-.000 j	.040 j	
	FASE c	-.009 j	-.011 j	.035 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	-.007 j	-.003 j	-.003 j
	FASE b	-.003 j	-.005 j	-.002 j
	FASE c	-.002 j	-.002 j	-.004 j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.044 j		
	FASE b	-.01 j	.040 j	
	FASE c	-.01 j	-.011 j	.036 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
07204	3	9
	3	9
	3	9
	3	9

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0117	.0816 j				
	FASE b	.006	.0240 j	.0113	.0810 j		
	FASE c	.0053	.0165 j	.006	.024 j	.0120	.0821 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0023	.0188 j	.003	.0188 j	.0015	.0188 j
	FASE b	.0019	.0165 j	.0032	.0210 j	.0030	.0210 j
	FASE c	.0015	.0188 j	.0030	.0210 j	.0032	.0210 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0117	.0816 j				
	FASE b	.0060	.0240 j	.0113	.0810 j		
	FASE c	.0053	.0165 j	.0060	.0240 j	.0120	.0821 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 3	FASE a	.0011	.0090 j	.0009	.0075 j	.0008	.0083 j
	FASE b	.0009	.0075 j	.0011	.0090 j	.0009	.0075 j
	FASE c	.0008	.0083 j	.0009	.0075 j	.0011	.0090 j

		LINEA 2					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 3	FASE a	.0008	.0075 j	.0006	.0053 j	.0007	.0053 j
	FASE b	.0006	.0053 j	.0008	.0075 j	.0006	.0053 j
	FASE c	.0007	.0053 j	.0006	.0053 j	.0008	.0075 j

		LINEA 3					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 3	FASE a	.010	.0678 j				
	FASE b	.0045	.030 j	.0105	.060 j		
	FASE c	.0038	.0225 j	.0045	.030 j	.0098	.0638 j

		LINEA 1					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 4	FASE a	.0007	.0068 j	.0006	.0075 j	.0006	.0068 j
	FASE b	.0006	.0075 j	.0005	.006 j	.0005	.006 j
	FASE c	.0006	.0068 j	.0005	.006 j	.0005	.006 j

		LINEA 2					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 4	FASE a	.0006	.0045 j	.0005	.003 j	.0004	.0023 j
	FASE b	.0005	.0030 j	.0006	.0045 j	.0005	.0030 j
	FASE c	.0004	.0023 j	.0005	.0030 j	.0006	.0045 j

		LINEA 3					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 4	FASE a	.0023	.0188 j	.0015	.015 j	.0015	.0075 j
	FASE b	.0015	.015 j	.0023	.0188 j	.0015	.015 j
	FASE c	.0015	.0075 j	.0015	.015 j	.0023	.0188 j

		LINEA 4					
		FASE a	FASE b	FASE c			
LINEA 4	FASE a	.010	.0678 j				
	FASE b	.0045	.03 j	.0105	.060 j		
	FASE c	.0038	.0225 j	.0045	.030 j	.0098	.0638 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.2225 j		
	FASE b	-.0450j	.2243 j	
	FASE c	-.0375j	-.0450j	.2250 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	-.03 j	-.0225j	-.0263j
	FASE b	-.0338j	-.0263j	-.0240j
	FASE c	-.03 j	-.0240j	-.0210j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.2225 j		
	FASE b	-.0450j	.2243 j	
	FASE c	-.0375j	-.0450j	.2250 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	-.0150j	-.0165j	-.0135j
	FASE b	-.0165j	-.0135j	-.0113j
	FASE c	-.0135j	-.0113j	-.0135j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	-.0135j	-.009 j	-.0068j
	FASE b	-.009 j	-.009 j	-.0075j
	FASE c	-.0068j	-.0075j	-.0105j

		LINEA 3		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	.1927 j		
	FASE b	-.0375j	.1950 j	
	FASE c	-.0338j	-.0315j	.1883 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	-.0113j	-.0068j	-.0068j
	FASE b	-.0068j	-.0060j	-.0068j
	FASE c	-.0068j	-.0060j	-.0060j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	-.0075j	-.0068j	-.0060j
	FASE b	-.0068j	-.0060j	-.0053j
	FASE c	-.0060j	-.0053j	-.0045j

		LINEA 3		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	-.0323j	-.03 j	-.0240j
	FASE b	-.0240j	-.0285j	-.0210j
	FASE c	-.0210j	-.0240j	-.0188j

		LINEA 4		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	.1927 j		
	FASE b	-.0375j	.1950 j	
	FASE c	-.0338j	-.0315j	.1883 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
	07104	9
	9	1
	9	5
	9	5

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1			
		FASE a	FASE b	FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0039	.0272 j		
	FASE b	.0020	.008 j	.0038	.0270 j
	FASE c	.0018	.0080 j	.002	.0080 j

		LINEA 1				
		FASE a	FASE b	FASE c		
LINEA 2	FASE a	.0008	.0063 j	.0010	.0063 j	.0005 .0063 j
	FASE b	.0006	.0055 j	.0011	.007 j	.0018 .007 j
	FASE c	.0005	.0063 j	.001	.007 j	.0011 .0070 j

LINEA 2

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0039	.0272 j				
	FASE b	.002	.0088 j	.0038	.027 j		
	FASE c	.0018	.008 j	.002	.008 j	.0040	.0274 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 3	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 3	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	00	0 j	0	0 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 3	FASE a	.0033	.0226 j				
	FASE b	.0015	.018 j	.0035	.02 j		
	FASE c	.0013	.0075 j	.0015	.01 j	.0033	.0213 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 4	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 4	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 4	FASE a	.0008	.0063 j	.0005	.0050 j	.0005	.0025 j
	FASE b	.0005	.0050 j	.0008	.0063 j	.0005	.0050 j
	FASE c	.0005	.0025 j	.0005	.0050 j	.0008	.0063 j

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 4	FASE a	.0033	.0226 j				
	FASE b	.0015	.01 j	.0035	.02 j		
	FASE c	.0013	.0075 j	.0015	.01 j	.0033	.0213 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0742 j					
	FASE b	-.015 j	.0748 j				
	FASE c	-.0125j	-.0150j	.0750 j			

		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	-.01 j	-.0075j	-.0088j			
	FASE b	-.0113j	-.0088j	-.008 j			
	FASE c	-.01 j	-.008 j	-.007 j			

LINEA 2

		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.0742 j		
	FASE b	-.015 j	.0748 j	
	FASE c	-.0125j	-.015 j	.0750 j

LINEA 1				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

LINEA 2				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

LINEA 3				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 3	FASE a	.0642 j		
	FASE b	-.0125j	.065 j	
	FASE c	-.0113j	-.0105j	.0620 j

LINEA 1				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

LINEA 2				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

LINEA 3				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	-.0100j	-.01 j	-.000 j
	FASE b	-.000 j	-.0095j	-.007 j
	FASE c	-.007 j	-.000 j	-.0063j

LINEA 4				
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 4	FASE a	.0642 j		
	FASE b	-.0125j	.065 j	
	FASE c	-.0113j	-.0105j	.0620 j

---

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLOADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMAZ

FECHA:02-19-1991

HORA:00:10:25

RESULTADOS EN BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C		GENERACION TOTAL	
		VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	MW	MVAR
1	INV220	1.0179	21.394	1.0528	-98.092	1.0347	139.44	0	0
2	ROX220	1.0317	23.319	1.0731	-96.127	1.0448	141.77	0	0
3	MAN220	1.0694	25.429	1.0828	-95.11	1.0644	144.40	0	0
4	MAN014	1.045	-7.709	1.0547	-120.53	1.0526	118.92	0	0
5	TIW220	1.0123	21.215	1.047	-98.380	1.0337	139.14	0	0
6	ROX011	1.05	-1.79	1.0652	-120.55	1.0773	118.13	0	0
7	MANGN	1.0669	1.783	1.0669	-118.21	1.0669	121.78	499.99	183.60
8	ROX6N	1.0739	0	1.0739	-120	1.0739	119.99	279.70	100.18

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLOADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMAZ

FECHA:02-19-1991

HORA:00:11:00

RESULTADOS DE FLUJOS

NUMERO DE BARRA DE ENVIO	NUMERO DE BARRA DE RECEPCION		POTENCIA EN BARRA DE ENVIO		POTENCIA EN BARRA DE RECEPCION		
			(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	
7	4	a	164.162	70.8449	a	-163.654	-62.3318
		b	159.590	54.2473	b	-159.802	-47.1904
		c	176.246	58.5946	c	-176.543	-49.0491

8	6	a	95.8957	41.6887	a	-94.989	-37.814
		b	87.8727	35.5282	b	-86.7068	-34.4021
		c	96.8186	38.9675	c	-98.8911	-27.8833
3	4	a	-157.485	-41.755	a	163.648	62.3333
		b	-166.518	-38.5412	b	159.797	47.1954
		c	-174.557	-45.2211	c	176.537	49.8434
2	6	a	-92.6363	-26.6008	a	94.9884	37.8128
		b	-87.2154	-17.1885	b	86.7065	34.4023
		c	-98.361	-25.8081	c	98.89	27.8832
1	2	a	-45.1087	-18.9037	a	44.6361	6.6011
		b	-39.844	-19.8748	b	40.2156	5.1876
		c	-46.1415	-9.6685	c	47.861	-2.4916
1	5	a	24.8189	28.3011	a	-23.9515	-21.7861
		b	28.2289	19.874	b	-28.2758	-28.5883
		c	24.5641	8.4838	c	-24.5687	-9.8988
1	5	a	35.1587	26.4516	a	-35.8488	-27.9809
		b	27.7487	17.1951	b	-27.6826	-18.7164
		c	44.4496	11.6723	c	-44.4419	-13.8156
3	1	a	32.4169	12.7697	a	-32.6449	-22.2742
		b	27.8576	5.8038	b	-27.4952	-16.7987
		c	36.8754	3.3485	c	-36.4289	-13.1948
3	1	a	31.5818	11.3651	a	-31.415	-28.5781
		b	26.4833	2.2447	b	-25.6365	-14.4874
		c	35.8863	3.8912	c	-34.7419	-13.8925
3	5	a	45.7978	9.8676	a	-44.6786	-15.3588
		b	55.1829	18.8222	b	-53.3884	-18.6967
		c	58.7326	18.5894	c	-51.4995	-24.8863
3	5	a	47.6852	8.5582	a	-46.3377	-14.9566
		b	57.871	12.4671	b	-55.6615	-19.993
		c	51.9372	19.3967	c	-52.4987	-24.9973

GENERACION TOTAL..... 779.78 MW      291.87 MVAR  
 CARGA TOTAL ..... 769.6 MW      335.9 MVAR  
 PERDIDAS EN EL SISTEMA.. 10.15 MW      -44.82 MVAR

CONVERGE EN: { 14 ITERACIONES PARA P.  
 13 ITERACIONES PARA Q.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGÜELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: EEQSA

FECHA:02-19-1991

HORA:00:16:20

DATOS GENERALES

NOMBRE DEL SISTEMA:	EEQSA
DESCRIPCION DEL SISTEMA:	.
NUMERO DE LA BARRA OSCILANTE:	18
NUMERO DE BARRAS DEL SISTEMA:	18
NUMERO DE SUBSISTEMAS:	18
NUMERO DE SECCIONES (L/T):	11
NUMERO MAXIMO DE LINEAS ACOPLADAS:	1
NUMERO DE GENERADORES:	1
NUMERO DE TRANSFORMADORES:	6
POTENCIA BASE (MVA):	100.

DATOS DE BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
		P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)
1	325	0	0	0	0	0	0
2	285	0	0	0	0	0	0
3	262	0	0	0	0	0	0
4	244	5.8	.5	7.5	.4	2.5	.12
5	267	0	0	0	0	0	0
6	246	2.8	1.1	3.05	1.08	1.2	0.8
7	269	0	0	0	0	0	0
8	248	5.2	2.2	10.5	3.8	1.	0.
9	263	0	0	0	0	0	0
10	238	.2661	.0814	.115	.01	.2661	.0814
11	230	1.1	.2	1.5	.5	2.	1.0
12	A/P-12	.0	.0	.0	.0	.0	.0
13	A/P-13	0.0	0.0	.15	.09	0.0	0.0
14	APB4	.22	.07	0.0	0.0	.11	.02
15	APA15	.0	.0	.0	.0	.0	.0
16	APA4	.5	.2	0.0	0.0	0.0	0.0
17	APA10	0.0	0.0	.56	.2	.42	.30
18	552	0	0	0	0	0	0
19	BARRA1	0	0	0	0	0	0

DATOS DE GENERADORES

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		IMPEDANCIAS						POTENCIA TRIFASICA	REGULADOR DE VOLTAJE V fase A
	INTERNA	TERMINAL	SECUENCIA CERO		SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA NEGATIVA		(p.u.)	(p.u)
			R0 (p.u.)	X0 (p.u.)	R1 (p.u.)	X1 (p.u.)	R2 (p.u.)	X2 (p.u.)		
01	19	18	.0021	.0533	.0076	.01	.0076	.1200	SLACK	1.016

DATOS DE TRANSFORMADORES

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		CONEXION		POSICION TAP		IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO	
	PRIMARIA	SECUNDARIA	PRIMARIO	SECUNDARIO	PRIMARIO	SECUNDARIO	Rcc (p.u.)	Xcc (p.u.)
02	1	2	D	D	1.732	1.732	0.0	.14
03	4	3	X	D	1.0	1.732	0.0	.6745
04	6	5	X	D	1.0	1.732	0.0	.6492
05	8	7	X	D	1.0	1.732	0.0	.7505
06	10	9	X	D	1.0	1.732	0.0	1.2983
07	11	9	X	D	1.0	1.732	0.0	1.2983

DATOS DE LINEAS DE TRANSMISION

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
00001	18	1

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.023	.1048 j				
	FASE b	.0114	.0420 j	.023	.1048 j		
	FASE c	.0114	.0420 j	.0114	.0420 j	.023	.1048 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.005 j		
	FASE b	0 j	.005 j	
	FASE c	0 j	0 j	.005 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
09001	2	3

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.02906	.1242 j				
	FASE b	.01116	.0539 j	.02906	.1242 j		
	FASE c	.01116	.0539 j	.01116	.0539 j	.02906	.1242 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
10001	3	5

---

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.03306	.09313j				
	FASE b	.00886	.04683j	.03306	.09313j		
	FASE c	.00886	.04683j	.00886	.04683j	.03306	.09313j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
11001	5	7

---

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0745	.1454 j				
	FASE b	.0301	.0599 j	.0745	.1454 j		
	FASE c	.0301	.0599 j	.0301	.0599 j	.0745	.1454 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

			LINEA 1				
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
12001	2	9

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.01793	.0737 j				
	FASE b	.01053	.0401 j	.01793	.0737 j		
	FASE c	.01053	.0401 j	.01053	.0401 j	.01793	.0737 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
13001	10	12

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	1.3848	5.4522j				
	FASE b	.2082	2.8622j	1.3848	5.4522j		
	FASE c	.2082	2.8622j	.2082	2.8622j	1.3848	5.4522j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
14001	12	14

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.6617	1.7224j				
	FASE b	.0	.0 j	.6617	1.7224j		

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
15001	12	13

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.5568	1.0304j				
	FASE b	.0	.0 j	.5568	1.0304j		
	FASE c	.0	.0 j	.0	.0 j	.5568	1.0304j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
16001	10	15

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	1.3848	5.4522j				
	FASE b	.2082	2.8622j	1.3848	5.4522j		
	FASE c	.2082	2.8622j	.2082	2.8622j	1.3848	5.4522j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.5568	1.0304j				
	FASE b	.0	.0 j	.5568	1.0304j		
	FASE c	.0	.0 j	.0	.0 j	.5568	1.0304j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
18001	15	17

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.739	1.5981j				
	FASE b	.0	.0 j	.739	1.5981j		
	FASE c	.0	.0 j	.0990	.8952 j	.739	1.5981j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	0	j				
	FASE b	0	j	0	j		
	FASE c	0	j	0	j	0	j

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLOADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGÜELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: EEDSA

FECHA:02-19-1991 HORA:00:28:02

RESULTADOS EN BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C		GENERACION TOTAL	
		VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	MW	MVAR
1	325	1.0136	-.291	1.0062	-121.10	.9974	119.66	0	0
2	285	1.0071	-1.134	1.0001	-123.03	.987	118.68	0	0
3	262	1.0051	-1.54	.9944	-123.75	.9786	118.31	0	0
4	244	1.0066	24.901	.9719	-96.05	.9902	147.04	0	0
5	267	1.0033	-1.607	.9901	-124.02	.9730	118.24	0	0
6	246	1.001	25.903	.963	-94.392	.9829	148.31	0	0
7	269	1.0015	-1.87	.9845	-124.41	.9671	118.17	0	0
8	240	.988	24.339	.9284	-90.407	.9846	140.28	0	0
9	263	1.0065	-1.171	.9997	-123.08	.9865	118.63	0	0
10	230	1.0078	27.042	.9802	-93.093	.9901	148.46	0	0
11	230	1.0099	26.966	.9776	-93.611	.982	147.54	0	0
12	A/P-12	1.0019	26.737	.9772	-93.325	.9886	148.39	0	0
13	A/P-13	1.0019	26.737	.9754	-93.387	.9886	148.39	0	0
14	APB4	1.0003	26.564	.9772	-93.325	.9863	148.40	0	0
15	APA15	.9943	26.336	.9704	-93.09	.9767	148.19	0	0
16	APA4	.9894	26.101	.9704	-93.09	.9767	148.19	0	0
17	APA10	.9943	26.336	.9611	-94.085	.9741	147.93	0	0
18	552	1.016	.131	1.0115	-120.41	1.0054	120.08	0	0
19	BARRAI	1.0127	0	1.0127	-120	1.0127	119.99	47.199	16.276

**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: EEQSA

FECHA:02-19-1991 HORA:00:29:12

RESULTADOS DE FLUJOS

NUMERO DE BARRA DE ENVIO	NUMERO DE BARRA DE RECEPCION		POTENCIA EN BARRA DE ENVIO		POTENCIA EN BARRA DE RECEPCION		
			(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	
19	18	a	12.5347	1.3738	a	-12.5722	-1.4074
		b	20.8405	4.6809	b	-20.8485	-4.5262
		c	13.8238	10.222	c	-13.7101	-10.1682
1	2	a	12.5544	1.8337	a	-12.5001	-1.6384
		b	20.7976	4.7652	b	-20.8177	-4.0373
		c	13.6761	10.4951	c	-13.7102	-10.1514
4	3	a	-5.8	-0.5	a	4.3455	-0.4286
		b	-7.5	-0.4	b	6.7121	0.1103
		c	-2.5	-0.12	c	4.7424	2.0098
6	5	a	-2.8	-1.1	a	2.1077	0.5756
		b	-3.05	-1.08	b	2.9597	1.007
		c	-1.2	-0.8	c	1.9826	1.5433
8	7	a	-5.2	-2.2	a	3.0084	0.1034
		b	-10.5	-3.8	b	8.6998	1.9158
		c	-1	0	c	4.1918	5.3192
10	9	a	-0.9931	-0.3658	a	0.8879	0.3606
		b	-0.8327	-0.315	b	0.9062	0.3806
		c	-0.8006	-0.4105	c	0.8323	0.3859
11	9	a	-1.1	-0.2	a	1.3166	0.9234
		b	-1.5	-0.5	b	1.4038	0.2342
		c	-2	-1	c	1.8796	0.6596
18	1	a	12.5725	1.4154	a	-12.5544	-1.8334
		b	20.8495	4.5338	b	-20.7976	-4.7652
		c	13.7103	10.176	c	-13.6762	-10.4953



2	3	a	18.2954	.353	a	-18.2767	-.2795
		b	18.5073	3.4206	b	-18.4439	-3.1719
		c	18.9977	9.1833	c	-18.9604	-8.9564
3	5	a	5.9313	.7078	a	-5.9226	-.6916
		b	11.7317	3.0617	b	-11.6958	-2.9929
		c	6.2179	6.9467	c	-6.1961	-6.9046
5	7	a	3.8149	.1159	a	-3.8084	-.1034
		b	8.7362	1.9857	b	-8.6998	-1.9158
		c	4.2135	5.3611	c	-4.1918	-5.3193
2	9	a	2.205	1.2858	a	-2.2044	-1.204
		b	2.3102	.6165	b	-2.3098	-.6153
		c	2.7123	1.8481	c	-2.7119	-1.8454
10	12	a	.2211	.0724	a	-.2201	-.0708
		b	.1503	.0912	b	-.1502	-.0903
		c	.1104	.0282	c	-.1103	-.02
12	14	a	.2201	.0708	a	-.22	-.07
		b	0	0	b	0	0
		c	.1103	.02	c	-.11	-.02
12	13	a	0	0	a	0	0
		b	.1502	.0903	b	-.15	-.09
		c	0	0	c	0	0
10	15	a	.5059	.2121	a	-.5016	-.2031
		b	.5675	.2138	b	-.5647	-.2038
		c	.424	.3088	c	-.4197	-.3027
15	16	a	.5017	.2031	a	-.5	-.2
		b	0	0	b	0	0
		c	0	0	c	0	0
15	17	a	0	0	a	0	0
		b	.5647	.2039	b	-.56	-.2
		c	.4197	.3027	c	-.42	-.3

GENERACION TOTAL..... 47.199 MW      16.276 MVAR  
 CARGA TOTAL ..... 46.7572 MW      12.752 MVAR  
 PERDIDAS EN EL SISTEMA.. .4432 MW      3.546 MVAR

CONVERGE EN: [ 17 ITERACIONES PARA P.  
 [ 16 ITERACIONES PARA G.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: MONOFASI

FECHA:02-19-1991

HORA:08:12:08

DATOS GENERALES

NOMBRE DEL SISTEMA:	MONOFASI
DESCRIPCION DEL SISTEMA:	EQUIVALENTE.MONOFASICO
NUMERO DE LA BARRA OSCILANTE:	7
NUMERO DE BARRAS DEL SISTEMA:	7
NUMERO DE SUBSISTEMAS:	10
NUMERO DE SECCIONES (L/T):	6
NUMERO MAXIMO DE LINEAS ACOPLADAS:	2
NUMERO DE GENERADORES:	2
NUMERO DE TRANSFORMADORES:	2
POTENCIA BASE (MVA):	33.3

DATOS DE BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C	
		P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)	P-carga (MW)	Q-carga (MVAR)
1	INV220	50	15	50	15	50	15
2	ROX220	48	20	48	20	48	20
3	MAN220	0	0	0	0	0	0
4	MAN014	0	0	0	0	0	0
5	TIW220	150	80	150	80	150	80
6	XXXXXX	0	0	0	0	0	0
7	ROX011	0	0	0	0	0	0
8	MANGN	0	0	0	0	0	0
9	ROXGN	0	0	0	0	0	0

DATOS DE GENERADORES

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		IMPEDANCIAS						POTENCIA TRIFASICA (p.u.)	REGULADOR DE VOLTAJE V fase A (p.u.)
	INTERNA	TERMINAL	SECUENCIA CERCA		SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA NEGATIVA			
			R0 (p.u.)	X0 (p.u.)	R1 (p.u.)	X1 (p.u.)	R2 (p.u.)	X2 (p.u.)		
01	8	4	0	.001	0	.001	0	.001	15	1.045
02	9	7	0	.001	0	.001	0	.001	OSCILA	1.050

DATOS DE TRANSFORMADORES

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS		CONEXION		POSICION TAP		IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO	
	PRIMARIA	SECUNDARIA	PRIMARIO	SECUNDARIO	PRIMARIO	SECUNDARIO	Rcc (p.u.)	Xcc (p.u.)
03	3	4	X	X	1.000	1.000	.0006	.0164
04	2	7	X	X	1.000	1.000	.0020	.038

DATOS DE LINEAS DE TRANSMISION

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
05001	1	2

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.006	.045 j				
	FASE b	.002	.015 j	.006	.045 j		
	FASE c	.002	.015 j	.002	.015 j	.006	.045 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.35 j		
	FASE b	-.06 j	.35 j	
	FASE c	-.06 j	-.06 j	.35 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
06002	1	5
	1	5

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0023	.0147 j				
	FASE b	.0012	.008 j	.0023	.0147 j		
	FASE c	.0012	.008 j	.0012	.008 j	.0023	.0147 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		LINEA 2				
		FASE a	FASE b	FASE c		
LINEA 2	FASE a	.0023	.0147 j			
	FASE b	.0014	.009 j	.0023	.0147 j	
	FASE c	.0014	.009 j	.0014	.009 j	.0023 .0147 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.045 j		
	FASE b	-.008 j	.045 j	
	FASE c	-.008 j	-.008 j	.045 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.044 j		
	FASE b	-.01 j	.044 j	
	FASE c	-.01 j	-.01 j	.044 j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
07002	3	6
	3	6

---

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1				
		FASE a	FASE b	FASE c		
LINEA 1	FASE a	.0117	.0816 j			
	FASE b	.006	.0240 j	.0117	.0816 j	
	FASE c	.006	.0240 j	.006	.0240 j	.0117 .0816 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.0117	.0816 j	
	FASE b	.0060	.0240 j	.0117 .0816 j
	FASE c	.0060	.0240 j	.0060 .0240 j .0117 .0816 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.2225 j		
	FASE b	-.0450j	.2225 j	
	FASE c	-.0450j	-.0450j	.2225 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	0	j	0	j	0	j
	FASE b	0	j	0	j	0	j
	FASE c	0	j	0	j	0	j

		LINEA 2					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.2225 j					
	FASE b	-.0450j		.2225 j			
	FASE c	-.0450j		-.0450j		.2225 j	

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVID	RECEPCION
00002	3	6
	3	6

---

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.010	.0678 j				
	FASE b	.0045	.030 j	.010	.0678 j		
	FASE c	.0045	.030 j	.0045	.030 j	.010	.0678 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		LINEA 2					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.010	.0678 j				
	FASE b	.0045	.030 j	.010	.0678 j		
	FASE c	.0045	.030 j	.0045	.030 j	.010	.0678 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.1927 j		
	FASE b	-.0375j	.1927 j	
	FASE c	-.0375j	-.0375j	.1927 j

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	0 j	0 j	0 j
	FASE b	0 j	0 j	0 j
	FASE c	0 j	0 j	0 j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.1927 j		
	FASE b	-.0375j	.1927 j	
	FASE c	-.0375j	-.0375j	.1927 j

---

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
09002	6	1
	6	1

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 1	FASE a	.0038	.0272 j				
	FASE b	.0020	.008 j	.0038	.0272 j		
	FASE c	.0020	.008 j	.0020	.008 j	.0038	.0272 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE b	0	0 j	0	0 j	0	0 j
	FASE c	0	0 j	0	0 j	0	0 j

		LINEA 2					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	.0039	.0272 j				
	FASE b	.002	.008 j	.0039	.0272 j		
	FASE c	.002	.008 j	.002	.008 j	.0039	.0272 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 1	FASE a	.0742 j		
	FASE b	-.015 j	.0742 j	
	FASE c	-.015 j	-.015 j	.0742 j

		LINEA 1					
		FASE a		FASE b		FASE c	
LINEA 2	FASE a	0	j	0	j	0	j
	FASE b	0	j	0	j	0	j
	FASE c	0	j	0	j	0	j

		LINEA 2		
		FASE a	FASE b	FASE c
LINEA 2	FASE a	.0742 j		
	FASE b	-.015 j	.0742 j	
	FASE c	-.015 j	-.015 j	.0742 j

SUBSISTEMA	NUMEROS DE BARRAS	
	ENVIO	RECEPCION
10002	6	5
	6	5

ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE EN P.U.(triangular inferior)

		LINEA 1		
		FASE a	FASE b	FASE c

LINEA 1 FASE a .0033 .0226 j  
 FASE b .0015 .010 j .0033 .0226 j  
 FASE c .0015 .010 j .0015 .010 j .0033 .0226 j

LINEA 1  
 FASE a FASE b FASE c  
 LINEA 2 FASE a 0 0 j 0 0 j 0 0 j  
 FASE b 0 0 j 0 0 j 0 0 j  
 FASE c 0 0 j 0 0 j 0 0 j

LINEA 2  
 FASE a FASE b FASE c  
 LINEA 2 FASE a .0033 .0226 j  
 FASE b .0015 .01 j .0033 .0226 j  
 FASE c .0015 .01 j .0015 .01 j .0033 .0226 j

ELEMENTOS DE LA MATRIZ ADMITANCIA SHUNT EN P.U.(triangular inferior)

LINEA 1  
 FASE a FASE b FASE c  
 LINEA 1 FASE a .0642 j  
 FASE b -.0125j .0642 j  
 FASE c -.0125j -.0125j .0642 j

LINEA 1  
 FASE a FASE b FASE c  
 LINEA 2 FASE a 0 j 0 j 0 j  
 FASE b 0 j 0 j 0 j  
 FASE c 0 j 0 j 0 j

LINEA 2  
 FASE a FASE b FASE c  
 LINEA 2 FASE a .06421j  
 FASE b -.0125j .06421j  
 FASE c -.0125j -.0125j .06421j

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 Quito-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
 TESIS DE GRADO

TEMA :  
 FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGÜELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: MONOFASI

FECHA:02-19-1991 HORA:08:18:36

RESULTADOS EN BARRAS

No	NOMBRE DE BARRA	FASE A		FASE B		FASE C		GENERACION TOTAL	
		VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	VOLT (p.u.)	ANG (GRADOS)	MW	MVAR
1	INV220	.9879	-6.989	.9879	-126.98	.9879	113.01	0	0

2	ROX220	1.0069	-5.237	1.0069	-125.23	1.0069	114.76	0	0
3	MAN220	1.0202	-2.998	1.0202	-122.99	1.0202	117.00	0	0
4	MAN014	1.045	1.362	1.045	-118.63	1.045	121.36	0	0
5	TIW220	.9842	-7.192	.9842	-127.19	.9842	112.00	0	0
6	XXXXXX	.9957	-6.071	.9957	-126.07	.9957	113.92	0	0
7	ROX011	1.05	-1.132	1.05	-120.13	1.05	119.86	0	0
8	MAN6N	1.0465	1.624	1.0465	-118.37	1.0465	121.62	499.50	160.59
9	ROX6N	1.0511	0	1.0511	-120	1.0511	119.99	253.47	117.46

**ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**  
QUITO-Ecuador

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
AREA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA  
TESIS DE GRADO

TEMA :  
FLUJO DE POTENCIA TRIFASICO - METODO DESACOPLADO RAPIDO.

Realizado por: VICTOR IVAN GARCIA H.

Dirigido por: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

SISTEMA ELECTRICO: MONOFASI

FECHA:02-19-1991

HDRA:08:19:32

RESULTADOS DE FLUJOS

NUMERO DE BARRA DE ENVIO	NUMERO DE BARRA DE RECEPCION		POTENCIA EN BARRA DE ENVIO		POTENCIA EN BARRA DE RECEPCION		
			(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	
8	4	a	166.500	53.5304	a	-166.500	-52.6942
		b	166.504	53.5304	b	-166.504	-52.6942
		c	166.504	53.5304	c	-166.504	-52.6942
9	7	a	84.4912	39.1537	a	-84.4912	-38.917
		b	84.4924	39.1537	b	-84.4924	-38.917
		c	84.4924	39.1537	c	-84.4924	-38.917
3	4	a	-165.997	-38.9307	a	166.500	52.6933
		b	-165.997	-38.9371	b	166.500	52.6919
		c	-165.995	-38.9413	c	166.490	52.6959
2	7	a	-84.0131	-29.9656	a	84.4845	38.9214
		b	-84.0132	-29.965	b	84.4845	38.9207
		c	-84.0124	-29.9660	c	84.4837	38.9225
1	2	a	-35.8201	-22.1501	a	36.0075	9.973
		b	-35.8202	-22.1501	b	36.0076	9.973
		c	-35.8194	-22.1514	c	36.0069	9.9744
1	5	a	19.573	14.0694	a	-19.5526	-15.6606
		b	19.573	14.0689	b	-19.5523	-15.6602
		c	19.573	14.0685	c	-19.5524	-15.6596
1	5	a	22.9215	16.8306	a	-22.8986	-18.4323
		b	22.9212	16.8303	b	-22.898	-18.4319
		c	22.9215	16.8296	c	-22.898	-18.4315



3	6	a	32.684	7.4439	a	-32.4844	-14.4781
		b	32.684	7.4438	b	-32.4844	-14.478
		c	32.6837	7.4445	c	-32.484	-14.4787
3	6	a	32.684	7.4439	a	-32.4844	-14.4781
		b	32.684	7.4438	b	-32.4844	-14.478
		c	32.6837	7.4445	c	-32.484	-14.4787
3	6	a	50.3128	12.026	a	-49.8704	-16.7753
		b	50.313	12.0257	b	-49.8707	-16.7752
		c	50.3125	12.0266	c	-49.87	-16.776
3	6	a	50.3128	12.026	a	-49.8704	-16.7753
		b	50.313	12.0257	b	-49.8707	-16.7752
		c	50.3125	12.0266	c	-49.87	-16.776
6	1	a	28.3695	9.5639	a	-28.319	-11.9472
		b	28.3695	9.5644	b	-28.319	-11.9474
		c	28.3692	9.5646	c	-28.3186	-11.9478
6	1	a	28.4119	9.412	a	-28.3588	-11.7958
		b	28.4119	9.4125	b	-28.3586	-11.7961
		c	28.4116	9.4126	c	-28.3583	-11.7964
6	5	a	53.9627	21.7656	a	-53.775	-22.9548
		b	53.9627	21.766	b	-53.775	-22.9552
		c	53.9621	21.7661	c	-53.7744	-22.9556
6	5	a	53.9626	21.7652	a	-53.775	-22.955
		b	53.9627	21.7657	b	-53.775	-22.9553
		c	53.962	21.7659	c	-53.7744	-22.9557

---

GENERACION TOTAL..... 752.98 MW      278.05 MVAR  
 CARGA TOTAL ..... 744 MW      345 MVAR  
 PERDIDAS EN EL SISTEMA.. 8.906 MW      -66.89 MVAR

CONVERGE EN: [ 5 ITERACIONES PARA P.  
                   4 ITERACIONES PARA Q.

SISTEMA ELECTRICO No. 1.-

La tabla 5.1, muestra un resumen de las iteraciones que necesitó el programa para llegar a la convergencia en los diez casos antes señalados y el tiempo total empleado desde la lectura de datos hasta la terminación del cálculo de los flujos, usando un computador personal ACER 1030 con velocidad en CPU de 9.6 MHz.

*Tabla 5.1 Número de iteraciones en la convergencia para las pruebas del Sistema Eléctrico No.1. Criterio de convergencia 0.01 MVA.*

CASO No.	P	Q	TIEMPO TOTAL APROX. EN PROCESO DE CALCULO(min)
I.a	5	4	5,52
I.b	6	5	5,57
II	6	5	5,57
III	18	18	8,08
IV	9	9	6,54
V	16	16	7,52
VI	16	16	7,52
VII	15	15	7,44
VIII	14	13	7,32
IX	15	15	7,44
X	20	20	8,26

Del tiempo total, aproximadamente 3,49 minutos corresponden a la lectura y proceso de datos.

De la tabla 5.1, claramente se observa, que al producirse un desbalance se deteriora la convergencia, especial-

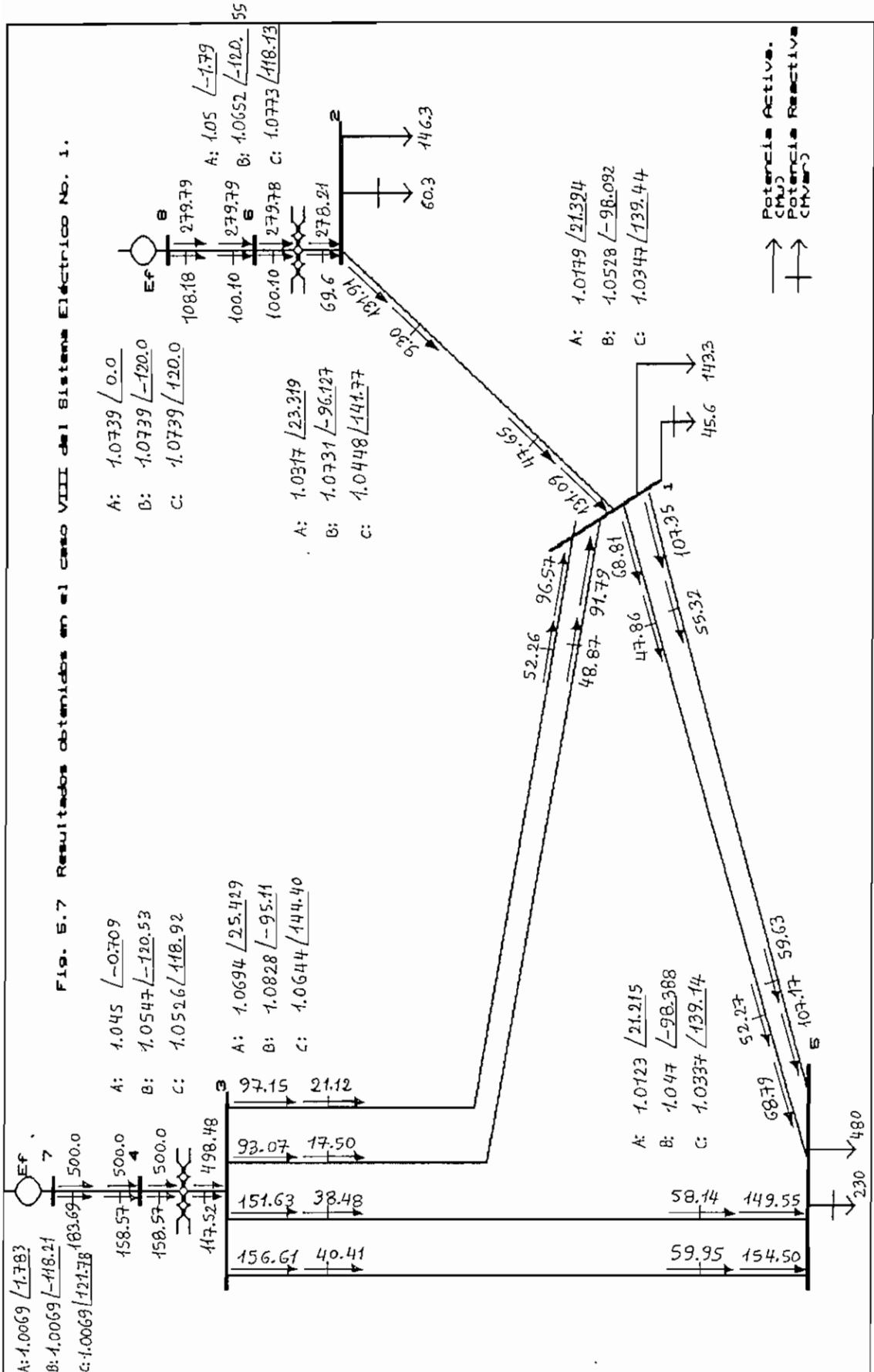
mente en aquellos casos de desequilibrio en cargas.

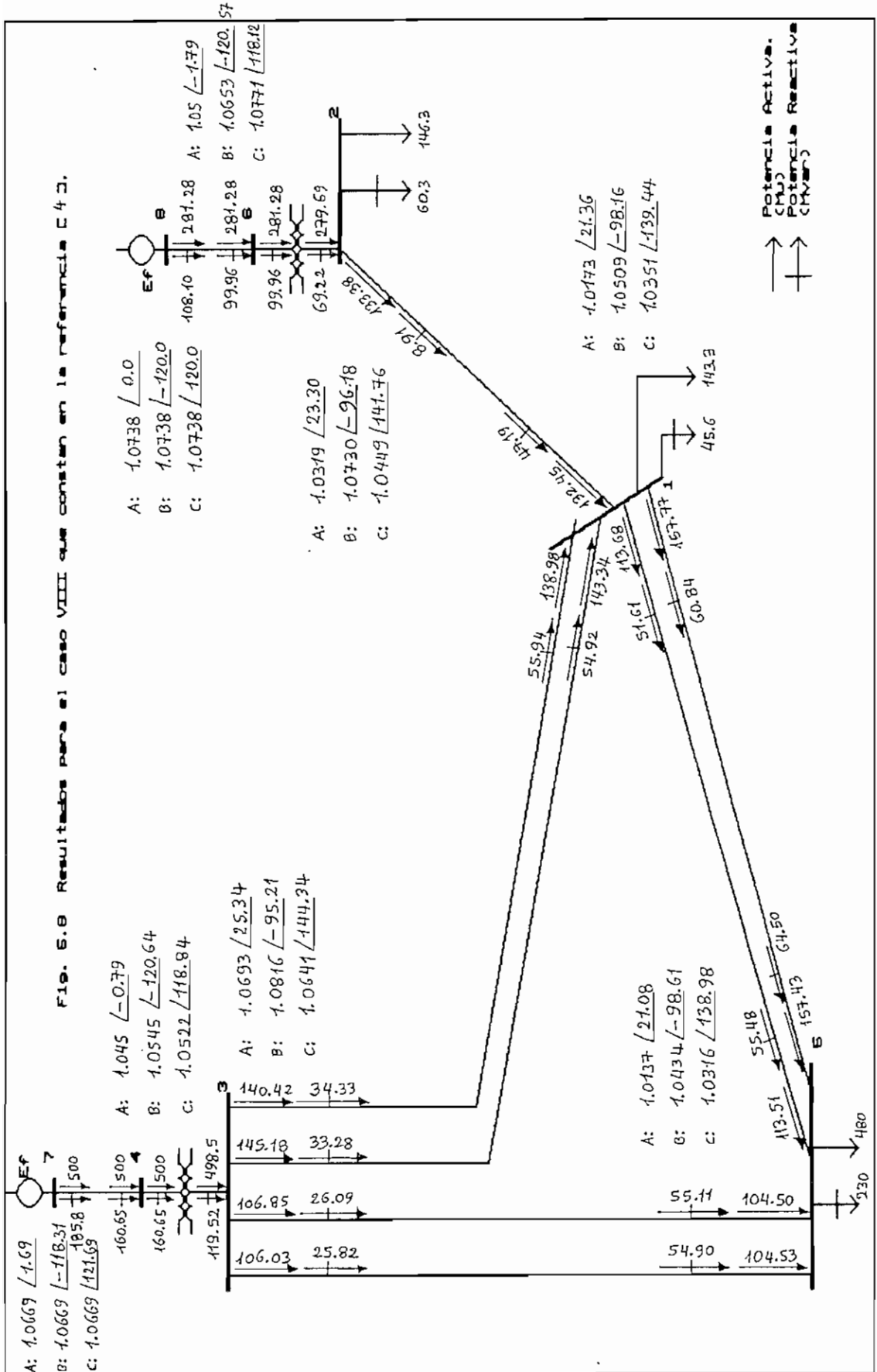
En los casos completamente balanceados, como son el I y II, se tiene que los voltajes de cada fase para una misma barra son iguales en magnitud y defasados  $120^\circ$ , y el flujo de potencia se reparte en igual forma para cada fase.

Si al sistema balanceado se introducen cargas desbalanceadas (caso III), los voltajes de cada fase para una misma barra son diferentes en magnitud y ya no existe igual defasaje de  $120^\circ$  entre esas fases; los voltajes internos de los generadores permanecen balanceados, como ocurre en la realidad. A pesar de tener líneas trifásicas balanceadas, los flujos de potencia no se reparten en igual forma para cada fase.

Se obtiene el mismo comportamiento si el sistema es desbalanceado y con cargas balanceadas (casos IV al VI), más aún si existen cargas desbalanceadas como son los casos VII al X.

En el diagrama unifilar de la fig. 5.7, se representan los resultados obtenidos por el programa para el caso VIII (págs. 126 y 127), mientras que en la fig. 5.8 se indican los resultados que se encuentran en la referencia [4] para el mismo caso.





Los resultados representados en las figs. 5.7 y 5.8 son similares excepto en los flujos de potencia entre las barras 1, 3 y 5, que es en donde existe una notable diferencia.

La barra 5 presenta una gran carga de potencia activa y reactiva, por lo que para su abastecimiento, según la referencia [4], la potencia fluye por el camino de mayor impedancia (línea de doble circuito 3-1 y línea de doble circuito 1-5), mientras que según el programa lo hace por el camino de menor impedancia (línea de doble circuito 3-1), que es razonable en circuitos eléctricos, ya que la corriente va por el camino de menor impedancia.

Por otro lado, si el sistema eléctrico es balanceado los resultados obtenidos por el programa de "*Flujo de Potencia Trifásico*", deben ser iguales a aquellos obtenidos por un programa de flujo de potencia monofásico.

Para comprobar esto, se usó los programas tanto de "*Flujo de Potencia Trifásico*" como el de "*Cálculo de Flujos de Carga Mediante el Método Formal de Newton-Raphson*" ([13]) aplicados a este sistema pero completamente balanceado.

En los diagramas unifilares de las figs. 5.9 y 5.10, se representan los resultados obtenidos con los programas

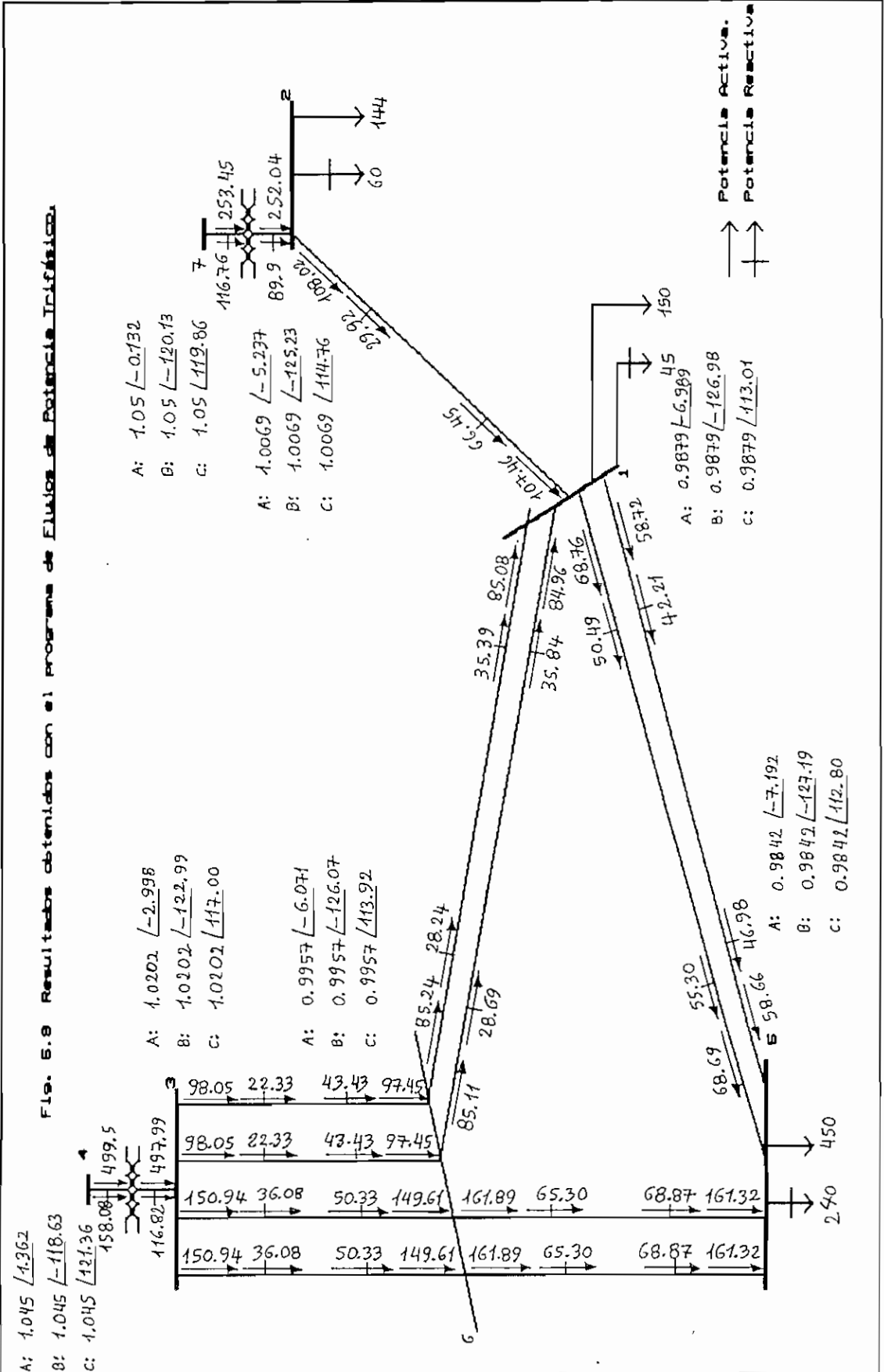
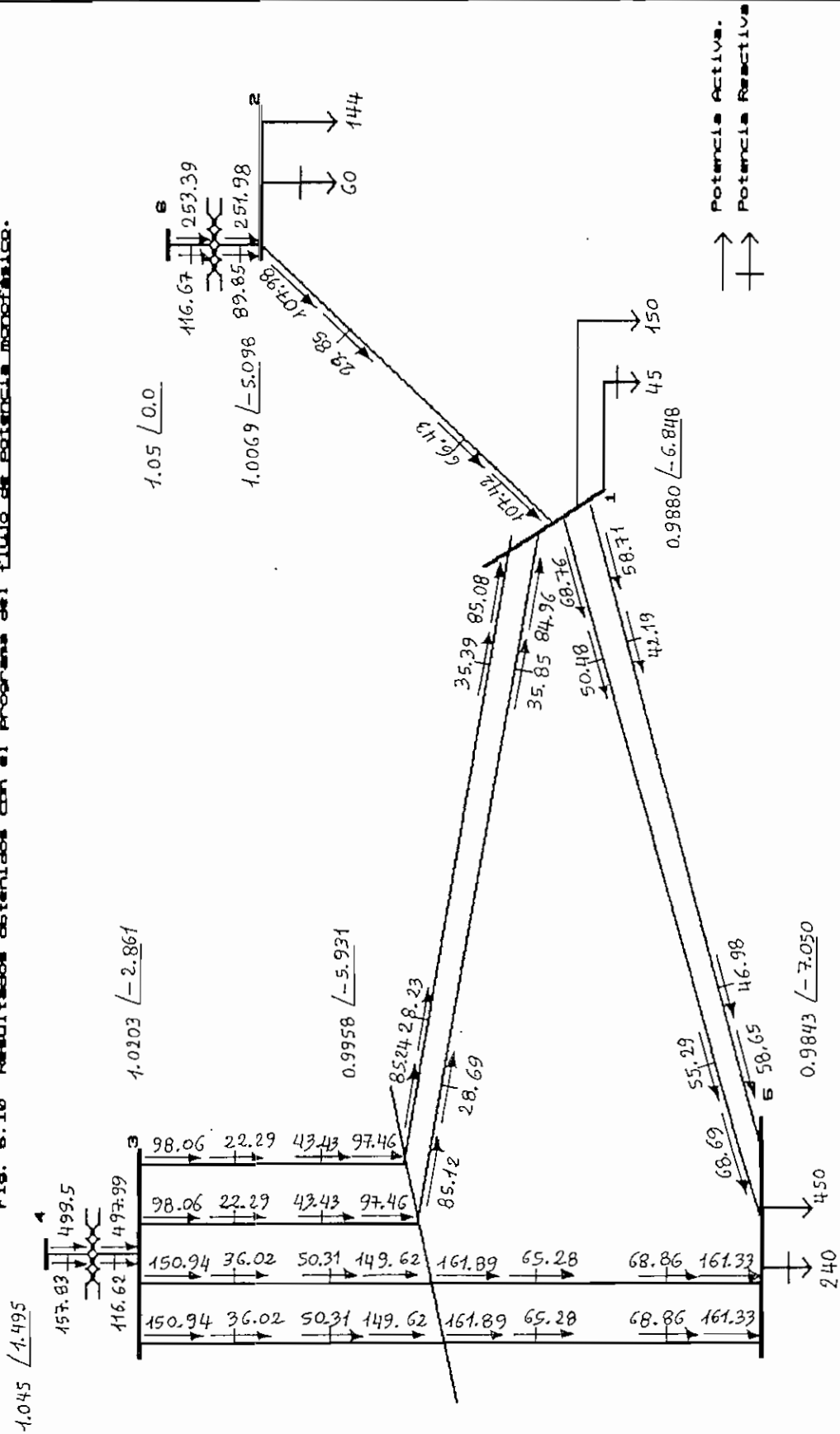


Fig. 6.10 Resultados obtenidos con el programa de flujo de potencia manómatico.





trifásico y monofásico respectivamente. Se observa que los resultados efectivamente son similares.

En consecuencia, los resultados que se obtienen con el programa "*Flujo de Potencia Trifásico*" son satisfactorios y confiables.

#### SISTEMA ELECTRICO No. 2.-

La Tabla 5.2, indica el número de iteraciones para los tres casos con el respectivo tiempo empleado desde la lectura de datos hasta la terminación del cálculo de los flujos usando un computador *ACER 1030* con una velocidad de CPU de 9,6 MHz.

*Tabla 5.2 Número de iteraciones en la convergencia para las pruebas del Sistema Eléctrico No.2. Criterio de convergencia 0.01 MVA.*

CASO No.	P	Q	TIEMPO TOTAL APROX. EN PROCESO DE CALCULO(min)
I	17	17	10,27
II	17	16	10,17
III	17	16	10,08

Del tiempo total, apenas aproximadamente 27 segundos corresponden a la lectura y proceso de datos.

Sin importar si el sistema es balanceado o desbalanceado, el número de iteraciones empleado es aproximadamente el mismo.

En el diagrama unifilar de la fig 5.11, se encuentran representados los resultados para el caso III, que se encuentran en las páginas 134 a 136.

Además, en los dos sistemas se ha podido notar las siguientes características:

- Los voltajes internos de los generadores son iguales en módulo e igualmente defasados en  $120^\circ$  en los casos desbalanceados y balanceados.
- Existe un defasaje de aproximadamente  $30^\circ$  entre terminales primarios y secundarios de los transformadores que tienen conexión Estrella-tierra/Delta.
- En los casos desbalanceados, existe una aparente ganancia de potencia activa en algunas fases, producidas por los términos de acoplamiento mutuo entre las fases.

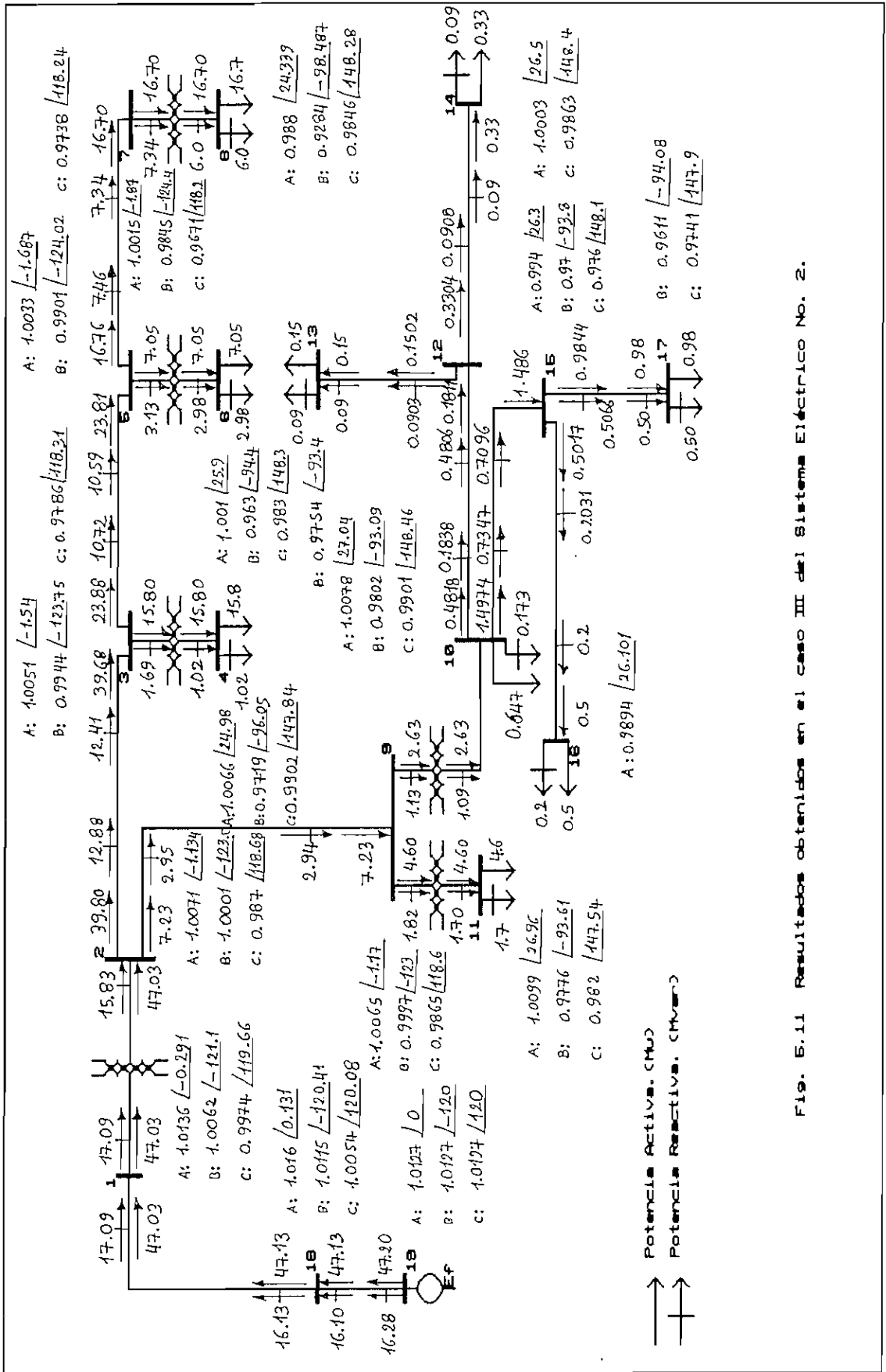


Fig. E.11 Resultados obtenidos en el caso III del Sistema Eléctrico No. 2.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES.-

- Los elementos del Sistema Eléctrico de Potencia han sido modelados en componentes de fase, debido a que con la modelación en componentes simétricas no se obtienen beneficios, ya que las matrices impedancia serie y admitancia shunt en componentes de fase de líneas trifásicas desbalanceadas no son diagonalizadas por la transformación a componentes simétricas.

Además, en componentes de fase los transformadores trifásicos son modelados en forma más precisa ya que se considera la conexión y las posiciones de taps.

- El concepto de Admitancia Compuesta, constituye una herramienta importante para representar en forma más simple a aquella red con acoplamientos mutuos.

Igualmente la utilización de las submatrices [A], [B], [C], [D], que son una extensión de los Parámetros de Transmisión o Parámetros ABCD, facilitan la formación de la matriz admitancia de barra de una Línea de Transmisión dividida en secciones.

- El planteamiento del problema del Flujo de Potencia Trifásico, se caracteriza por la inclusión efectiva del modelo del Generador Síncrono con su respectivo Regulador de Voltaje, particular que no tiene su similar monofásico.

Sin embargo, el modelo de las ecuaciones matriciales de Potencia Activa y Reactiva son similares a aquellas usadas en el flujo de potencia monofásico.

- Se ha desarrollado un programa interactivo que permite simular la operación real trifásica de un Sistema Eléctrico de Potencia, y que da fe del cumplimiento de los objetivos perseguidos en este trabajo.

- Se ha probado al programa con sistemas eléctricos de potencia, cuyos resultados son satisfactorios y confiables. Estos demuestran la gran similitud con la realidad tanto para los casos balanceados como para los desbalanceados.

Se obtienen los voltajes en las fases A, B y C de todas las barras y de los flujos de potencia activa y reactiva por cada elemento del sistema, permitiendo una observación didáctica sobre el comportamiento del sistema bajo condiciones tanto balanceadas como des-

balanceadas. Además se aprecia el efecto que tienen las conexiones de los transformadores sobre los ángulos de los voltajes en sus barras terminales.

- El algoritmo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido que utiliza el programa, ha demostrado ser un algoritmo eficiente, puesto que permite una convergencia rápida y confiable en Sistemas Eléctricos de Potencia.
  
- El número de iteraciones para llegar a la convergencia depende de si el sistema es balanceado o desbalanceado. En los casos desbalanceados, existe un mayor número de iteraciones con respecto a los balanceados. De los resultados se desprende que ese número es independiente del tipo de desbalance, pero si de su severidad, por ejemplo, cuando tenemos grandes desbalances de carga.

De igual manera, según los resultados un sistema trifásico simétrico operando con carga balanceada, es exactamente igual a un sistema de secuencia positiva, por lo que para su estudio de flujos puede ser usado un programa de flujo de potencia monofásico o trifásico.

- Los desbalances ya sea en carga o en impedancias de las Líneas de Transmisión, exigen una modelación trifásica por medio de la cual se obtiene un conocimiento más detallado de como está operando el sistema eléctrico bajo esas condiciones.
  
- El programa está preparado para crear un total de nueve archivos por cada sistema eléctrico. Los nombres de esos archivos dependen del nombre del sistema, por lo que existe la posibilidad de tener una colección de sistemas sin perder información en ninguno de ellos.

## 6.2 RECOMENDACIONES.-

- Por sus características, el programa interactivo desarrollado se aconseja emplearlo en el laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia para las labores de enseñanza.

Por el método empleado, su uso es ideal para Sistemas Eléctricos de Potencia, en el que se puede estudiar la influencia de:

- . Líneas de Transmisión desbalanceadas.
- . Cargas del sistema desbalanceadas.

- . Conexiones en los Transformadores Trifásicos.
  - . Acoplamiento mutuo entre Líneas de Transmisión.
- 
- Antes del ingreso de datos, se debe realizar un trabajo previo de preparación de los datos, con el respectivo diagrama unifilar en el que se deben señalar los números y nombres de las barras, y definir los subsistemas.
  - Constituiría un gran adelanto la simulación del cambio automático de taps en los transformadores y la consideración del limitante de Potencia Reactiva trifásica que tienen los generadores, para que el programa pueda ser de utilidad en los estudios pos-operacionales.
- También, considerar la modificación de la submatriz [B'] omitiendo aquellos elementos de red que predominantemente afectan el flujo de potencia reactiva para aumentar el grado de convergencia en potencia activa.
- Además se recomienda realizar la modelación del método de Newton-Raphson completo, para que sea convenientemente utilizado en Sistemas de Distribución.



## **ANEXO 1**

***CALCULO DE LOS ELEMENTOS DE LAS  
MATRICES IMPEDANCIA SERIE Y  
COEFICIENTES DE POTENCIAL  
DE MAXWELL***

Los elementos tanto de la matriz impedancia serie como la de coeficientes de potencial de Maxwell son calculados a partir de las características de los conductores y de la configuración geométrica de la torre de alta tensión.

Para ello se usan las fórmulas de Carson, que son lo suficientemente exactas para estudios en sistemas de potencia. La unidad de longitud será el kilómetro [Km], unidad muy usada en nuestro medio.

#### ELEMENTOS DE LA MATRIZ IMPEDANCIA SERIE.-

Se considera que:

- a) La tierra tiene una conductividad uniforme y está representada por un plano horizontal con extensión infinita a la cual los conductores son paralelos.
- b) La distancia entre conductores es mucho mas grande que el radio de los conductores.

La impedancia propia, está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_{11} = (R_{11} + \Delta R_{11}) + j(2W \cdot 10^{-4} \ln(2h_1/RMG_1) + \Delta X_{11}) \quad (\Omega/\text{km})$$

y la impedancia mutua con:

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \Delta R_{ik} + j(2W \cdot 10^{-4} \ln(D_{ik}/d_{ik}) + \Delta X_{ik}) \quad (\Omega/\text{km})$$

de donde:

- $R_{ii}$  = resistencia ac del conductor i. [ $\Omega/\text{km}$ ].
- $h_i$  = altura promedio sobre el nivel del suelo del conductor i. [m]
- $D_{ik}$  = distancia entre el conductor i y la imagen del conductor k. [m]
- $d_{ik}$  = distancia entre los conductores i y k. [m]
- $\text{RMG}_i$  = radio medio geométrico del conductor i. [m]
- $W$  =  $2 \pi f$  ; f = frecuencia [Hz]
- $\Delta R, \Delta X$  = términos de corrección de Carson por los efectos de los retornos por tierra.

La fig. A1.1 muestra los parámetros que intervienen en las fórmulas de Carson, y en forma general para los conductores i y k.

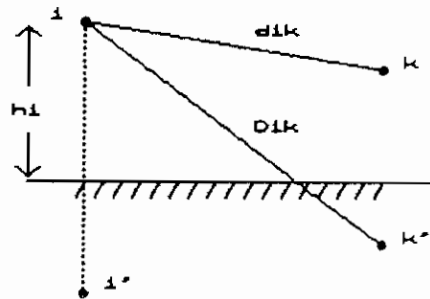


Fig. A1.1 Sección transversal de conductores con su imagen.

Considerando el perfil de un conductor entre torres de alta tensión como una parábola, la altura promedio sobre el nivel del suelo del conductor, de acuerdo con la fig. A1.2, es:

$$h = \text{altura en la mitad del vano} + 1/3 (\text{flecha})$$

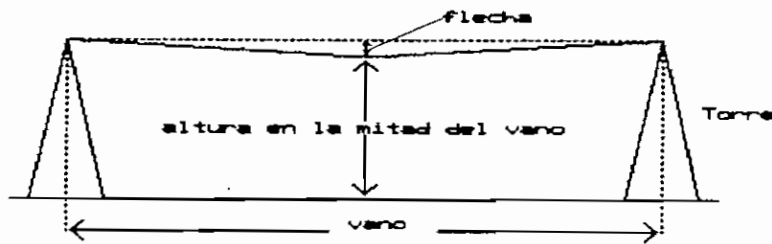


Fig. A1.2 Perfil de un conductor entre torres.

Los términos  $\Delta R$  y  $\Delta X$  son calculados por las siguientes ecuaciones:

$$\Delta R_{11} = \Delta R_{1k} \approx W \cdot \pi \cdot 10^{-4} / 2 \quad [\Omega/\text{km}]$$

$$\Delta X_{11} \approx 2 \cdot W \cdot 10^{-4} [0.6159315 - \text{Ln}(2h_1 \cdot k(f/\Gamma)^{1/2})] \quad [\Omega/\text{km}]$$

$$\Delta X_{1k} \approx 2 \cdot W \cdot 10^{-4} [0.6159315 - \text{Ln}(D_{1k} \cdot k(f/\Gamma)^{1/2})] \quad [\Omega/\text{km}]$$

siendo:

$$k = 4 \cdot \pi \cdot \sqrt{5} \cdot 10^{-4}$$

$$\Gamma = \text{resistividad del terreno.} [\Omega \cdot \text{m}]$$

Si la línea de transmisión tiene conductores en haces, el cálculo de los elementos de la matriz impedancia serie debe considerar el Radio Medio Geométrico Equivalente que está dado por la siguiente ecuación:

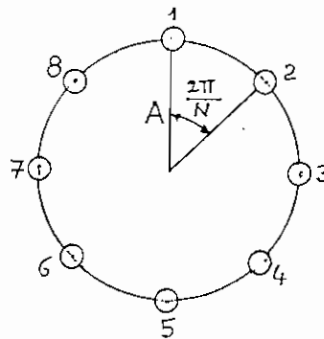
$$RMG_{eq} = ( N \cdot RMG \cdot A^{N-1} )^{1/N}$$

de donde:

RMG = radio medio geométrico de un conductor que pertenece al haz.

A = radio del haz (de acuerdo con la fig. A1.3)

N = número de conductores que forman el haz ( $N \geq 2$ )



*Fig. A1.3 Haz simétrico de 8 conductores.*

Aquí se considera que:

- a) el haz de conductores es simétrico,
- b) la distribución de corriente en los conductores individuales del haz, es igual.

ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES DE POTENCIAL DE  
MAXWELL.-

Los elementos de la diagonal están dados por la siguiente ecuación:

$$P_{11} = (1/(2.\pi.\epsilon_0)) \text{Ln}(2h_1/r_1) \quad [\text{km/F}]$$

Los elementos fuera de la diagonal son:

$$P_{1k} = P_{k1} = (1/(2.\pi.\epsilon_0)) \text{Ln}(D_{1k}/d_{1k}) \quad [\text{km/F}]$$

donde:

$r_1$  = radio del conductor  $i$ . [m]

$h_1$  = altura promedio sobre el nivel del suelo del conductor  $i$  (fig. A1.2). [m]

$D_{1k}$  = distancia entre el conductor  $i$  y la imagen del conductor  $k$  (fig. A1.1). [m]

$d_{1k}$  = distancia entre el conductor  $i$  y el conductor  $k$ . [m]

$\epsilon_0$  = permitividad del espacio libre ( $8.849 \times 10^{-12}$  [F/m])

En la presencia de conductores en haz, se debe referir al radio equivalente que de acuerdo a la fig. A1.3 es:

$$r_{eq} = (N.r.A^{N-1})^{1/N} \quad [\text{m}]$$

## **ANEXO 2**

*ASPECTOS DE DETALLE DE  
MODELACION  
Y  
ANALISIS*

TECNICA DE LA TRANSFORMACION LINEAL.-

La Técnica de la Transformación Lineal es usada para facilitar la formación de la matriz admitancia de barra de cualquier red en una manera sistemática. Sea la red de la fig. A2.1.

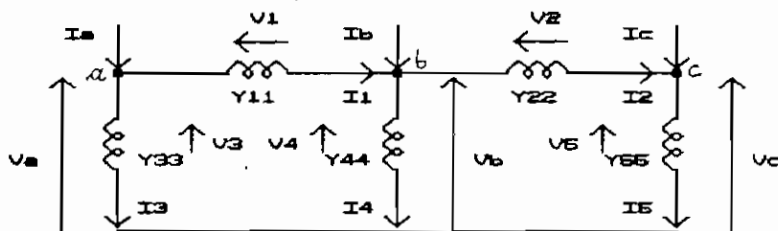


Fig. A2.1

Cinco pasos son los necesarios para formar la matriz admitancia de barra de esta red por transformación lineal:

- 1.- Se asigna nombres a los nodos de la red original. En la fig. A2.1 son a, b, c.
- 2.- En cualquier orden se numera las admitancias de ramas. Como en este caso  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$ ,  $Y_{33}$ ,  $Y_{44}$ ,  $Y_{55}$ .
- 3.- Se forma la matriz admitancia de la red primitiva.

La red primitiva, indicada en la fig. A2.2, es dibujada por inspección a partir de la red original. Esta con-



siste en poner las ramas de la red original en forma desconectada, y si existieran acoplamientos mutuos entre ellas se representan esos acoplamientos con su respectiva admitancia.

Cada rama tendrá una corriente igual a la corriente de rama original, siendo la corriente inyectada al correspondiente nodo de la red primitiva. Los voltajes a través de las ramas de la red primitiva son iguales a los de las mismas ramas en la red original.

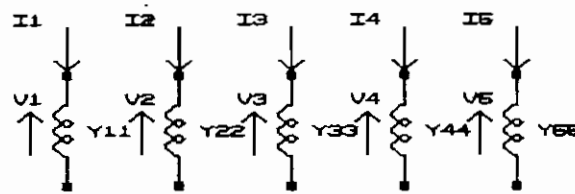


Fig. A2.2 Red primitiva.

La matriz admitancia de la red primitiva, relaciona a las corrientes inyectadas a los nodos con los voltajes de esos nodos en la red primitiva. Así:

I <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>					V <sub>1</sub>
I <sub>2</sub>		Y <sub>22</sub>				V <sub>2</sub>
I <sub>3</sub>			Y <sub>33</sub>			V <sub>3</sub>
I <sub>4</sub>				Y <sub>44</sub>		V <sub>4</sub>
I <sub>5</sub>					Y <sub>55</sub>	V <sub>5</sub>

[ Y<sub>p</sub>primitiva ]

Los términos fuera de la diagonal están presentes siempre y cuando exista acoplamiento entre las ramas.

4.- Se forma la matriz de Incidencia o Conexión [I].

Esta matriz relaciona los voltajes nodales de la red original con los voltajes nodales de la red primitiva. Por inspección de la fig. A2.1 se tiene:

$$\begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline V_2 \\ \hline V_3 \\ \hline V_4 \\ \hline V_5 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|ccc|} \hline 1 & -1 & \\ \hline & 1 & -1 \\ \hline 1 & & \\ \hline & 1 & \\ \hline & & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_a \\ \hline V_b \\ \hline V_c \\ \hline \end{array}$$

[I]

5.- Se forma la matriz admitancia de barra de la red [Y<sub>abc</sub>].

Esta matriz relaciona las corrientes y voltajes nodales de la red original, así:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_a \\ \hline I_b \\ \hline I_c \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline Y_{abc} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_a \\ \hline V_b \\ \hline V_c \\ \hline \end{array}$$

donde:

$$\begin{array}{cccc}
 [Y_{abc}] & = & [I]^T & [Y_{\text{primitiva}}] & [I] & \text{(A2.1)} \\
 3 \times 3 & & 3 \times 5 & 5 \times 5 & 5 \times 3 & 
 \end{array}$$

### CONCEPTO DE ADMITANCIA COMPUESTA.-

Las Admitancias Compuestas tienen como propósito el de permitir una representación más simplificada de una red, puesto que se basan en el uso de cantidades matriciales para representar las admitancias de esa red.

Las leyes y ecuaciones que siempre se plantean en una red ordinaria son todas válidas para redes con admitancias compuestas o lo que se llaman también redes compuestas.

Los elementos de las redes compuestas son simplemente dibujados como bobinas donde cada una tiene un valor matricial.

Para ilustrar consideremos, por ejemplo, seis bobinas simples mutuamente acopladas, siendo la red primitiva de la fig. A2.3.

La matriz admitancia primitiva que relaciona las corrientes inyectadas a los nodos con los voltajes de rama está en la ec. (A2.2).

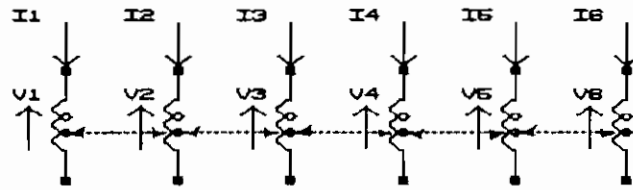


Fig. A2.3 Red primitiva de bobinas mutuamente acopladas.

I <sub>1</sub>	=	y <sub>11</sub>	y <sub>12</sub>	y <sub>13</sub>	y <sub>14</sub>	y <sub>15</sub>	y <sub>16</sub>	V <sub>1</sub>	(A2.2)
I <sub>2</sub>		y <sub>21</sub>	y <sub>22</sub>	y <sub>23</sub>	y <sub>24</sub>	y <sub>25</sub>	y <sub>26</sub>	V <sub>2</sub>	
I <sub>3</sub>		y <sub>31</sub>	y <sub>32</sub>	y <sub>33</sub>	y <sub>34</sub>	y <sub>35</sub>	y <sub>36</sub>	V <sub>3</sub>	
I <sub>4</sub>		y <sub>41</sub>	y <sub>42</sub>	y <sub>43</sub>	y <sub>44</sub>	y <sub>45</sub>	y <sub>46</sub>	V <sub>4</sub>	
I <sub>5</sub>		y <sub>51</sub>	y <sub>52</sub>	y <sub>53</sub>	y <sub>54</sub>	y <sub>55</sub>	y <sub>56</sub>	V <sub>5</sub>	
I <sub>6</sub>		y <sub>61</sub>	y <sub>62</sub>	y <sub>63</sub>	y <sub>64</sub>	y <sub>65</sub>	y <sub>66</sub>	V <sub>6</sub>	

Dividiendo esta ecuación en matrices de orden 3x3 y en vectores de orden 3x1, resulta:

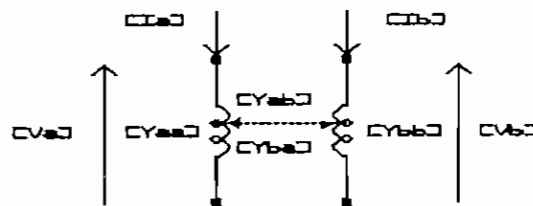
$$\begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{aa}] & [Y_{ab}] \\ [Y_{ba}] & [Y_{bb}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_a] \\ [V_b] \end{bmatrix} \tag{A2.3}$$

de donde:

$$[I_a] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad [I_b] = \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad [V_a] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad [V_b] = \begin{bmatrix} V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [Y_{aa}] &= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} & [Y_{bb}] &= \begin{bmatrix} Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \\
 [Y_{ab}] &= \begin{bmatrix} Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \end{bmatrix} & [Y_{ba}] &= \begin{bmatrix} Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Gráficamente se representa esta división como una agrupación de las seis bobinas dentro de dos bobinas "a" y "b" que se llaman bobinas compuestas, en donde cada bobina compuesta tiene tres bobinas simples. Esto se indica en la siguiente figura:



Como se observa, se representan hasta las matrices admitancia mutuas, donde se puede tener:

$$[Y_{ba}] = [Y_{ab}]^T$$

si y solamente si  $y_{ik} = y_{ki}$  para  $i = 1$  hasta 3 y  $k = 4$  hasta 6; esto es, si y solamente si, los acoplamientos entre los dos grupos de bobinas son bilaterales.

En ese caso la ec. (A2.3) puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{aa}] & [Y_{ab}] \\ [Y_{ab}]^T & [Y_{bb}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_a] \\ [V_b] \end{bmatrix}$$

Entonces, la matriz admitancia de barra de cualquier red compuesta (donde existen admitancias compuestas) es formada por el método usual de la transformación lineal, en donde los elementos de la matriz de incidencia son ahora matrices de orden  $n \times n$ , siendo  $n$  la dimensión de las admitancias compuestas.

Si la matriz de incidencia de cualquier red es dividida en matrices idénticas de igual dimensión mayor que uno, se puede presentar la ventaja de usar admitancias compuestas.

Por ejemplo, se considera las figs. A2.4 y A2.5, que representan una sección de una línea simple. La matriz admitancia de barra puede ser obtenida usando admitancias simples y compuestas. Aquí se lo hace por las dos opciones para observar la ventaja en el uso de admitancias compuestas.

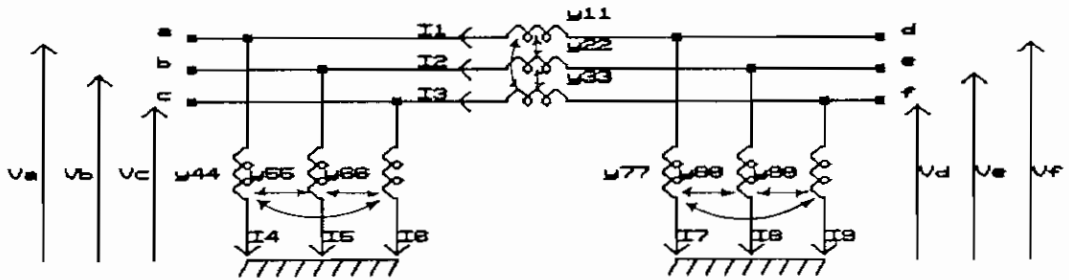


Fig. A2.4 Sección de línea trifásica representada por admitancias simples.

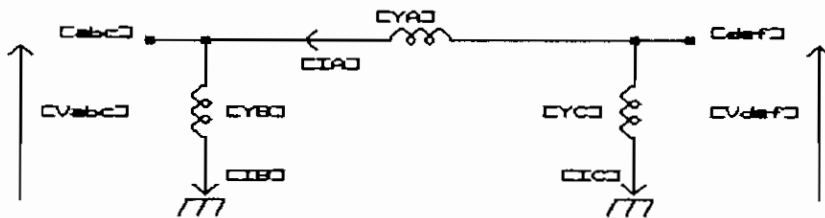


Fig. A2.5 Sección de línea trifásica representada por admitancias compuestas.

La red primitiva para la fig. A2.4 es:

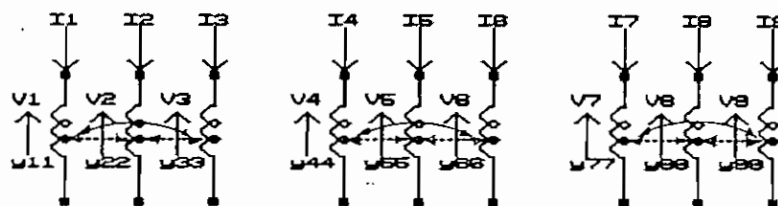


Fig. A2.4.1

La red primitiva para la fig. A2.5 es:

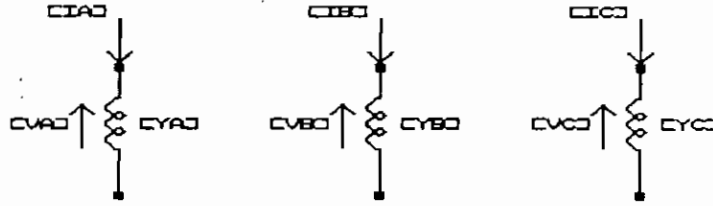


Fig. A2.5.1

La matriz admitancia primitiva que se tiene a partir de la fig. A2.4.1 es:

$$[Y_{\text{primitiva}}] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{44} & y_{45} & y_{46} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{54} & y_{55} & y_{56} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{64} & y_{65} & y_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{77} & y_{78} & y_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{87} & y_{88} & y_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{97} & y_{98} & y_{99} \end{bmatrix}$$

Mientras que la matriz admitancia primitiva que resulta partiendo de la fig. A2.5.1 es:

$$[Y_{\text{primitiva}}] = \begin{bmatrix} [Y_A] & & \\ & [Y_B] & \\ & & [Y_C] \end{bmatrix}$$



La matriz de incidencia para la red de la fig. A2.4 es indicada por la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline V_2 \\ \hline V_3 \\ \hline V_4 \\ \hline V_5 \\ \hline V_6 \\ \hline V_7 \\ \hline V_8 \\ \hline V_9 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline -1 & & & 1 & \\ \hline & -1 & & & 1 \\ \hline & & -1 & & & 1 \\ \hline 1 & & & & & \\ \hline & 1 & & & & \\ \hline & & 1 & & & \\ \hline & & & 1 & & \\ \hline & & & & 1 & \\ \hline & & & & & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_a \\ \hline V_b \\ \hline V_c \\ \hline V_d \\ \hline V_e \\ \hline V_f \\ \hline \end{array}$$

Así mismo, la matriz de incidencia para la red de la fig. A2.5, se obtiene usando una apropiada partición en la ecuación matricial anterior, o siguiendo la fig. A2.5 y su respectiva red primitiva, así:

$$\begin{array}{|c|} \hline [V_A] \\ \hline [V_B] \\ \hline [V_C] \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline -[u] & [u] \\ \hline [u] & \\ \hline & [u] \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline [V_{abc}] \\ \hline [V_{def}] \\ \hline \end{array}$$

siendo:  $[u]$  = la Matriz Unidad o Identidad de orden 3x3

Pero según la ec.(A2.1) la matriz admitancia de barra queda de la siguiente forma:

$$[Y_{\text{BARRA}}] = \begin{array}{|c|c|} \hline [Y_A] + [Y_B] & -[Y_A] \\ \hline -[Y_A] & [Y_A] + [Y_C] \\ \hline \end{array}$$

### REGLAS PARA LA FORMACION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA.-

Para los casos especiales en que las redes no tienen acoplamientos mutuos, se usa las siguientes reglas para formar por inspección la matriz admitancia de barra:

- a) La admitancia propia de cualquier barra, es la suma de las admitancias conectadas a esa barra, es decir:

$$y_{11} = \sum y_{1j}$$

- b) La admitancia mutua entre dos barras, es el negativo de la suma de las admitancias que están conectadas entre esas dos barras, es decir:

$$y_{ij} = - \sum y_{ij} \quad i \neq j$$

- c) Cualquier término fuera de la diagonal es cero siempre cuando no exista conexión entre las dos barras correspondientes.

## **ANEXO 3**

*PARAMETROS DE LA MATRIZ  
ADMITANCIA DE BARRA*

Sea la red de "n" pares de terminales, como la indicada en la fig. A3.1.

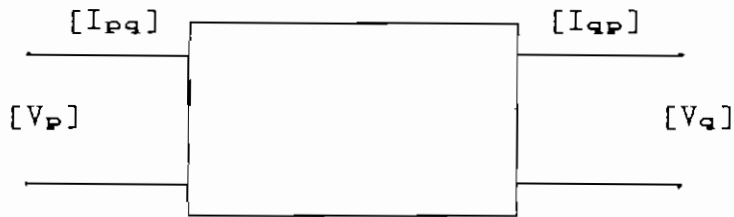


Fig. A3.1

La matriz admitancia de barra relaciona  $[I_{pa}]$  e  $[I_{ap}]$  con  $[V_p]$  y  $[V_a]$ , según la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} [I_{pa}] \\ [I_{ap}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{pp}] & [Y_{pa}] \\ [Y_{ap}] & [Y_{aa}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_a] \end{bmatrix} \quad (A3.1)$$

[Y]

donde la interpretación de los parámetros de la matriz [Y] es:

$$[Y_{pp}] = [I_{pa}][V_p]^{-1} \quad \text{si } [V_a] = [\emptyset] \quad (A3.2)$$

$$[Y_{pa}] = [I_{pa}][V_a]^{-1} \quad \text{si } [V_p] = [\emptyset] \quad (A3.3)$$

$$[Y_{ap}] = [I_{ap}][V_p]^{-1} \quad \text{si } [V_a] = [\emptyset] \quad (A3.4)$$

$$[Y_{aa}] = [I_{ap}][V_a]^{-1} \quad \text{si } [V_p] = [\emptyset] \quad (A3.5)$$

Por otro lado, escribiendo la ec.(3.1.1) en forma desarrollada se tiene:

$$[V_p] = [A][V_q] + [B][I_{qp}] \quad (A3.6)$$

$$[I_{pq}] = [C][V_q] + [D][I_{qp}] \quad (A3.7)$$

Reemplazando  $[V_q] = [\emptyset]$  en las ecs.(A3.6) y (A3.7) se obtiene:

$$[V_p] = [B][I_{qp}] \quad (A3.8)$$

$$[I_{pq}] = [D][I_{qp}] \quad (A3.9)$$

Con las ecs.(A3.8) y (A3.9) se consigue tener la siguiente ecuación:

$$[I_{pq}][V_p]^{-1} = [D][B]^{-1}$$

Teniendo en cuenta la ec.(A3.2) se obtiene:

$$[Y_{pp}] = [D][B]^{-1}$$

Ahora si  $[V_p] = [\emptyset]$ , las ecs.(A3.6) y (A3.7) quedan:

$$[\emptyset] = [A][V_q] + [B][I_{qp}] \quad (A3.10)$$

$$[I_{pq}] = [C][V_q] + [D][I_{qp}] \quad (A3.11)$$

Y a partir de las cuales se llega a:

$$[I_{pq}][V_q]^{-1} = [C] - [D][B]^{-1}[A]$$

Considerando la ec.(A3.3) se tiene:

$$[Y_{pq}] = [C] - [D][B]^{-1}[A]$$

Nuevamente si  $[V_q] = [\emptyset]$ , la ec.(A3.6) queda:

$$[V_p] = [B][I_{qp}]$$

de donde:

$$[I_{qp}][V_p]^{-1} = [B]^{-1}$$

Teniendo en cuenta la ec.(A3.3) se tiene:

$$[Y_{qp}] = [B]^{-1}$$

Con  $[V_p] = [\emptyset]$ , la ec.(A3.6) resulta:

$$[\emptyset] = [A][V_q] + [B][I_{qp}]$$

de donde:

$$[I_{qp}][V_q]^{-1} = - [B]^{-1}[A]$$

Así mismo considerando la ec.(A3.4) se tiene:

$$[Y_{aa}] = - [B]^{-1}[A]$$

## **ANEXO 4**

*MATRICES ADMITANCIA DE BARRA  
EN TRANSFORMADORES*



TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.-

Sea un transformador monofásico, como el de la fig. A4.1.

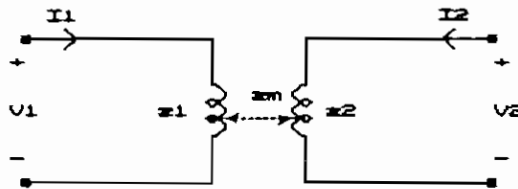


Fig. A4.1

La matriz impedancia primitiva o matriz de impedancias de circuito abierto está dada en:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & -z_m \\ -z_m & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

La relación inversa es igual a:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_1 z_2 - z_m^2} \begin{bmatrix} z_2 & -z_m \\ -z_m & z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Es la relación que contiene la matriz de admitancias de cortocircuito.

Luego si  $v_2=0$  (cortocircuito), entonces:

$$y_{cc} = y_{11} = \frac{I_1}{V_1} = \frac{z_2}{z_1 z_2 - z_m^2} \quad (\text{A4.1})$$

BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS CON CONEXION ESTRELLA-TIERRA/DELTA.-

Sean tres transformadores monofásicos idénticos conectados en Estrella - tierra / Delta, como ilustra la fig. A4.2.

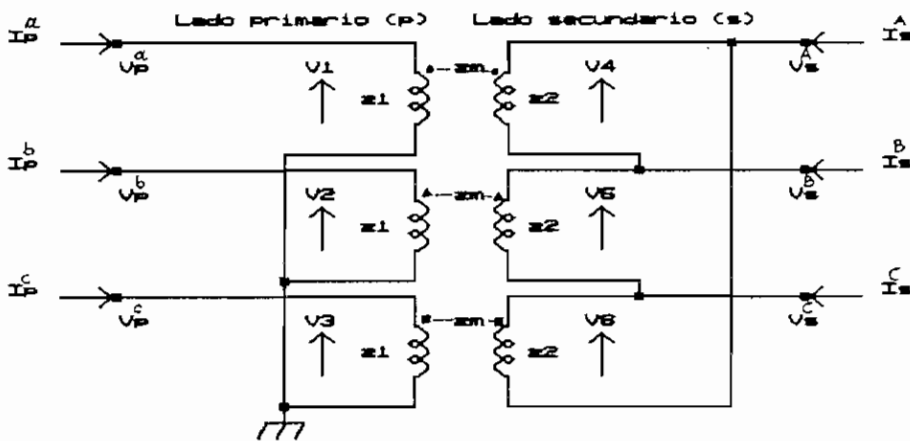


Fig. A4.2 Banco de transformadores monofásicos con conexión Estrella-tierra/Delta.

La matriz impedancia primitiva que relaciona los voltajes con las corrientes de rama es:

$V_1$	$Z_1$			$Z_m$			$I^a_P$
$V_2$		$Z_1$			$Z_m$		$I^b_P$
$V_3$			$Z_1$			$Z_m$	$I^c_P$
$V_4$	$Z_m$			$Z_2$			$I^a_B$
$V_5$		$Z_m$			$Z_2$		$I^b_B$
$V_6$			$Z_m$			$Z_2$	$I^c_B$

La relación inversa es:

$I^a_P$	$= \frac{1}{Z_1 Z_2 - Z_m^2}$	$Z_2$			$-Z_m$			$V_1$	
$I^b_P$			$Z_2$			$-Z_m$		$V_2$	
$I^c_P$				$Z_2$			$-Z_m$		$V_3$
$I^a_B$			$-Z_m$			$Z_1$			$V_4$
$I^b_B$				$-Z_m$			$Z_1$		$V_5$
$I^c_B$					$-Z_m$			$Z_1$	$V_6$

(A4.1.1)

Por otro lado, los voltajes de rama son relacionados con los voltajes de nodo por la matriz de Incidencia [I], así:

$$\begin{array}{c}
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4 \\
 V_5 \\
 V_6
 \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 1 & & & & & \\
 \hline
 & 1 & & & & \\
 \hline
 & & 1 & & & \\
 \hline
 & & & 1 & -1 & \\
 \hline
 & & & & 1 & -1 \\
 \hline
 & & & -1 & & 1 \\
 \hline
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 V^a_P \\
 V^b_P \\
 V^c_P \\
 V^a_B \\
 V^b_B \\
 V^c_B
 \end{array}$$

[I]

Realizando las operaciones que se señalan en la ec. (2.1.15) con la matriz de la ec.(A4.1.1) y la [I] se obtiene que:

$$[Y_{\text{barra}}] = \frac{1}{z_1 z_2 - z_m^2}$$

	a	b	c	A	B	C	
	$z_2$			$-z_m$	$z_m$		a
		$z_2$			$-z_m$	$z_m$	b
			$z_2$	$z_m$		$-z_m$	c
	$-z_m$		$z_m$	$2z_1$	$-z_1$	$-z_1$	A
	$z_m$	$-z_m$		$-z_1$	$2z_1$	$-z_1$	B
		$z_m$	$-z_m$	$-z_1$	$-z_1$	$2z_1$	C

A4.2

siendo:

$$z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (A4.3)$$

$$z_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (A4.4)$$

$$z_m = j\omega L_m \quad (A4.5)$$

Pero las inductancias pueden ser expresadas de la siguiente manera:[8]

$$L_m = (n_2/n_1)(1 - \alpha) L_1 \quad (A4.6)$$

$$L_m = (n_1/n_2)(1 - \beta) L_2 \quad (A4.7)$$

de donde:

$n_1$  = número de vueltas en devanado primario.

$n_2$  = número de vueltas en devanado secundario.

$\alpha$  = fracción del flujo disperso con el secundario abierto.

$\beta$  = fracción del flujo disperso con el primario abierto.

Sin embargo para un transformador de potencia se asume que  $\alpha \ll 1$ ,  $\beta \ll 1$ ,  $R_1 \ll \omega L_1$ ,  $R_2 \ll \omega L_2$ . Por lo tanto las ecs.(A4.3),(A4.4),(A4.6) y (A4.7) quedan:

$$z_1 \approx j\omega L_1 \quad (A4.8)$$

$$z_2 \approx j\omega L_2 \quad (A4.9)$$

$$L_m \approx (n_2/n_1) L_1 \quad (A4.10)$$

$$L_m \approx (n_1/n_2) L_2 \quad (A4.11)$$

Igualando las ecs.(A4.10) y (A4.11) se tiene:

$$L_1 \approx (n_1/n_2)^2 L_2 \quad (A4.12)$$

Considerando las ecs.(A4.5),(A4.8) y (A4.9), las-  
ecs. (A4.11) y (A4.12) se pueden escribir de la siguiente  
manera:

$$z_m \approx (n_1/n_2) z_2 \quad (A4.13)$$

$$z_1 \approx (n_1/n_2) z_2 \quad (A4.14)$$

Multiplicando ambos lados de las ecs.(A4.13) y (A4-  
.14) por  $1/(z_1 z_2 - z_m^2)$ , y teniendo en cuenta la ec. (A4.1),  
se llega a obtener lo siguiente:

$$\frac{z_m}{z_1 z_2 - z_m^2} \approx \frac{n_1}{n_2} y_{cc} \quad (A4.15)$$

$$\frac{z_1}{z_1 z_2 - z_m^2} \approx \left[ \frac{n_1}{n_2} \right]^2 y_{cc} \quad (A4.16)$$

Reemplazando las ecs.(A4.1), (A4.15) y (A4.16) en la  
ecuación matricial (A4.2) y considerando que  $y_{cc} = y$ , se  
tiene la siguiente matriz admitancia de barra:

$y$			$-\frac{n_1}{n_2} y$	$\frac{n_1}{n_2} y$	
	$y$			$-\frac{n_1}{n_2} y$	$-\frac{n_1}{n_2} y$
		$y$	$\frac{n_1}{n_2} y$		$-\frac{n_1}{n_2} y$
$-\frac{n_1}{n_2} y$		$\frac{n_1}{n_2} y$	$2 \left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$
$\frac{n_1}{n_2} y$	$-\frac{n_1}{n_2} y$		$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$2 \left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$
	$\frac{n_1}{n_2} y$	$-\frac{n_1}{n_2} y$	$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$-\left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$	$2 \left  \frac{n_1}{n_2} \right ^2 y$

[Ybarra]

Pero si los voltajes línea - línea en ambos lados del transformador están en por unidad (p.u.), entonces la relación efectiva de vueltas  $n_1/n_2$  en esta conexión y en las conexiones Estrella/Delta, es:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Por eso la matriz admitancia de barra se reduce a:

$$[Y_{\text{barra}}] = \begin{bmatrix} y & & & \frac{1}{\sqrt{3}} y & \frac{1}{\sqrt{3}} y & \\ & y & & & -\frac{1}{\sqrt{3}} y & \frac{1}{\sqrt{3}} y \\ & & y & \frac{1}{\sqrt{3}} y & & -\frac{1}{\sqrt{3}} y \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} y & & \frac{1}{\sqrt{3}} y & \frac{2}{3} y & \frac{1}{3} y & \frac{1}{3} y \\ \frac{1}{\sqrt{3}} y & -\frac{1}{\sqrt{3}} y & & -\frac{1}{3} y & \frac{2}{3} y & -\frac{1}{3} y \\ & \frac{1}{\sqrt{3}} y & -\frac{1}{\sqrt{3}} y & -\frac{1}{3} y & -\frac{1}{3} y & \frac{2}{3} y \end{bmatrix}$$

Un similar procedimiento se sigue para obtener las matrices admitancia de barra para otras conexiones de transformadores trifásicas incluyendo transformadores desbalanceados, impedancias en los neutros de las conexiones estrella, o devanados conectados en delta abierta.

BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS CON CONEXION ESTRELLA-TIERRA/ESTRELLA.-

Sean tres transformadores monofásicos idénticos conectados en Estrella-tierra/Estrella, tal como muestra la fig. A4.3.



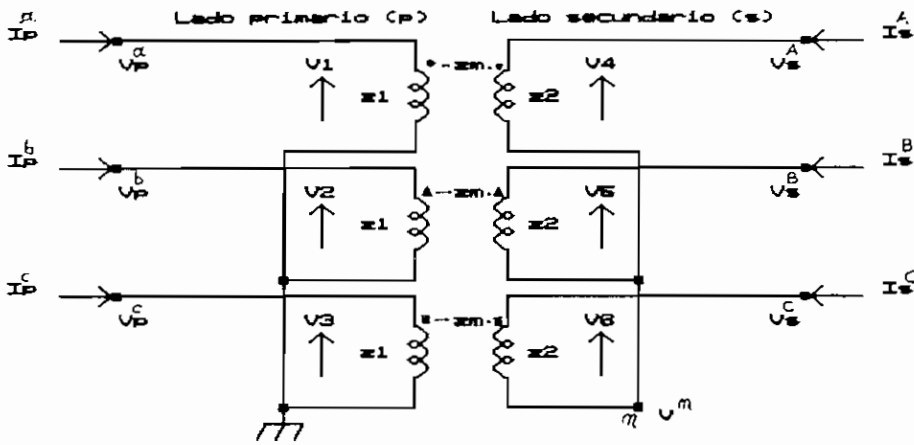


Fig. A4.3 Banco de transformadores monofásicos con conexión Estrella-tierra/Estrella.

La matriz admitancia primitiva es igual a la ec. (A4-1.1), pero la matriz de incidencia [I] es diferente porque se trata de otra conexión, y es la siguiente:

$V_1$	1							$V_{a_p}$
$V_2$		1						$V_{b_p}$
$V_3$			1					$V_{c_p}$
$V_4$				1			-1	$V_{A_s}$
$V_5$					1		-1	$V_{B_s}$
$V_6$						1	-1	$V_{C_s}$
								$V_n$

[I]

Realizando las operaciones que señala la ec. (2.1.15) con ésta matriz [I] y la matriz de la ec.(A4.1.1), se obtiene:

$$[Y_{\text{barra}}] = \frac{1}{Z_1 Z_2 - Z_m^2} \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & A & B & C & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ A \\ B \\ C \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_2 & & & -Z_m & & & Z_m \\ & Z_2 & & & -Z_m & & Z_m \\ & & Z_2 & & & -Z_m & Z_m \\ -Z_m & & & Z_1 & & & -Z_1 \\ & -Z_m & & & Z_1 & & -Z_1 \\ & & -Z_m & & & Z_1 & -Z_1 \\ Z_m & Z_m & Z_m & -Z_1 & -Z_1 & -Z_1 & 3Z_1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Pero esta matriz forma parte de la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} I^a_p \\ I^b_p \\ I^c_p \\ I^A_s \\ I^B_s \\ I^C_s \\ I^n \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_1 Z_2 - Z_m^2} \begin{bmatrix} Z_2 & & & -Z_m & & & Z_m \\ & Z_2 & & & -Z_m & & Z_m \\ & & Z_2 & & & -Z_m & Z_m \\ -Z_m & & & Z_1 & & & -Z_1 \\ & -Z_m & & & Z_1 & & -Z_1 \\ & & -Z_m & & & Z_1 & -Z_1 \\ Z_m & Z_m & Z_m & -Z_1 & -Z_1 & -Z_1 & 3Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^a_p \\ V^b_p \\ V^c_p \\ V^A_s \\ V^B_s \\ V^C_s \\ V^n \end{bmatrix}$$

(A4.17)

Realizando la partición señalada en la ec.(A4.17) y tomando en cuenta que  $I_n = 0$  ya que no existe una fuente de corriente conectada al nodo "n", se tiene la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} I_x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_x & Y_{xn} \\ (Y_{xn})^T & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_n \end{bmatrix} \quad (A4.18)$$

De la segunda ecuación se resuelve para  $V_n$  en términos de los otros voltajes de nodo  $V_x$ , se llega a:

$$V_n = - (Y_{nn})^{-1} (Y_{xn})^T V_x \quad (A4.19)$$

Ahora, la ec. (A4.19) es reemplazada en la primera ecuación de la ec.(A4.18) para obtener:

$$[I_x] = [ Y_x - Y_{xn} \cdot (Y_{nn})^{-1} \cdot (Y_{xn})^T ] [V_x]$$

Es decir se obtiene la siguiente matriz admitancia de barra modificada:

$1$ <hr style="width: 100%;"/> $z_1 z_2 - z_m^2$	$z_2 - \frac{z_m^2}{3z_1}$	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$-\frac{2z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$
	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$z_2 - \frac{z_m^2}{3z_1}$	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$\frac{z_m}{3}$	$-\frac{2z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$
	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$-\frac{z_m^2}{3z_1}$	$z_2 - \frac{z_m^2}{3z_1}$	$\frac{z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$-\frac{2z_m}{3}$
	$-\frac{2z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$\frac{2z_1}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$
	$\frac{z_m}{3}$	$-\frac{2z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$	$\frac{2z_1}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$
	$\frac{z_m}{3}$	$\frac{z_m}{3}$	$-\frac{2z_m}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$	$-\frac{z_1}{3}$	$\frac{2z_1}{3}$

[Y<sub>barra</sub>]'

Por otro lado la relación de vueltas efectiva ( $n_1/n_2$ ) en esta conexión es 1, por lo que las ecs.(A4.15) y (A4.16) quedan:

$$\frac{z_m}{z_1 z_2 - z_m^2} \approx y_{cc}$$

$$\frac{z_1}{z_1 z_2 - z_m^2} \approx y_{cc}$$

Reemplazando estas ecuaciones en la matriz admitancia de barra anterior, y considerando que  $y = y_{cc} = z_2 / (z_1 z_2 -$

$z_m^2$ ) se llega a obtener la siguiente matriz admitancia:

$$[Y_{\text{barra}}]' = \frac{1}{3} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} \text{a} & \text{b} & \text{c} & \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ \hline 2y & -y & -y & -2y & y & y & \text{a} \\ -y & 2y & -y & y & -2y & y & \text{b} \\ -y & -y & 2y & y & y & -2y & \text{c} \\ -2y & y & y & 2y & -y & -y & \text{A} \\ y & -2y & y & -y & 2y & -y & \text{B} \\ y & y & -2y & -y & -y & 2y & \text{C} \end{array} \end{array}$$

De donde las submatrices coinciden con aquellas especificadas en la tabla 2.2.

## **ANEXO 5**

***ANALISIS DE LOS ELEMENTOS DE UN  
SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA  
POR COMPONENTES SIMETRICAS***

LINEAS DE TRANSMISION.-

Para una línea de transmisión trifásica balanceada se tiene la siguiente matriz impedancia serie:

$$[Z_{abc}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (A5.1)$$

Y la matriz impedancia serie en componentes simétricas es obtenida a partir de:

$$[Z_{012}] = [T_s]^{-1} [Z_{abc}] [T_s] \quad (A5.2)$$

de donde:

$[Z_{abc}] =$  matriz de impedancia en términos de componentes de fase con una estructura de acoplamientos magnéticos.

$[T_s] =$  matriz de transformación a componentes simétricas.

$[Z_{012}] =$  matriz de impedancia en términos de componentes de secuencia.

Por lo que la matriz de la ec.(A5.1), queda:

	$\emptyset$	1	2	
$[Z_{\emptyset 12}] =$	$Z_s + 2Z_m$			(A5.3)
1		$Z_s - Z_m$		
2			$Z_s - Z_m$	

De esta matriz se observa que no existe elementos mutuos entre las componentes de secuencia cero ( $\emptyset$ ), positiva (1) y negativa (2), es decir existe un desacople entre las componentes de secuencia, por lo que los elementos propios son:

$$Z_{\emptyset} = Z_s + 2Z_m \quad ; \quad Z_1 = Z_s - Z_m \quad ; \quad Z_2 = Z_s - Z_m$$

La fig. A5.1, muestra una representación gráfica de la matriz de la ec.(A5.3).

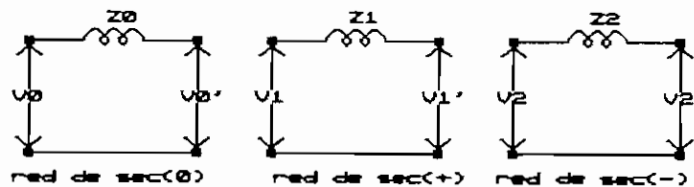


Fig. A5.1 Redes monofásicas de secuencia desacopladas.



Por otro lado, sea la siguiente matriz impedancia serie de una línea de transmisión desbalanceada:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (A5.4)$$

Aplicando la ec.(A5.2) a la ec.(A5.4) se obtiene la matriz impedancia en componentes de secuencia, como lo indica la siguiente matriz:

	0	1	2	
	$Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc}+2Z_{ba}+2Z_{ca}+2Z_{cb}$	$Z_{aa}+a^2Z_{bb}+aZ_{cc}-aZ_{ba}-a^2Z_{ca}-Z_{cb}$	$Z_{aa}+aZ_{bb}+a^2Z_{cc}-a^2Z_{ba}-aZ_{ca}-Z_{cb}$	0
1 - 3	$Z_{aa}+aZ_{bb}+a^2Z_{cc}-a^2Z_{ba}-aZ_{ca}-Z_{cb}$	$Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc}-Z_{ba}-Z_{ca}-Z_{cb}$	$Z_{aa}+a^2Z_{bb}+aZ_{cc}+2aZ_{ba}+2a^2Z_{ca}+2Z_{cb}$	1
	$Z_{aa}+a^2Z_{bb}+aZ_{cc}-aZ_{ba}-a^2Z_{ca}-Z_{cb}$	$Z_{aa}+aZ_{bb}+a^2Z_{cc}+2a^2Z_{ba}+2aZ_{ca}+2Z_{cb}$	$Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc}-Z_{ba}-Z_{ca}-Z_{cb}$	2

$[Z_{012}]$  (A5.5)

de donde:  $a = e^{j120^\circ}$

Esta matriz resulta con acoplamientos entre las componentes de secuencia, es decir no existe una diagonalización de la matriz impedancia serie de la ec.(A5.4).

despreciables. Entonces, la matriz de impedancia en componentes simétricas es:

$$[Z_{sim}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 0 & I & II \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 0 \\ I \\ II \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_0 & & & Z_{00} & & \\ & Z_1 & & & & \\ & & Z_2 & & & \\ Z_{00} & & & Z_0 & & \\ & & & & Z_1 & \\ & & & & & Z_2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

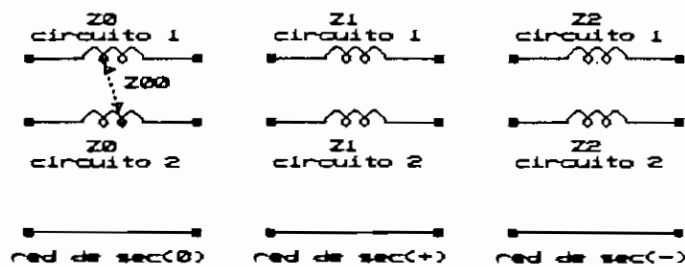


Fig. A5.3 Redes de secuencia para línea de doble circuito.

El acoplamiento entre redes de secuencia cero, existe aún si la línea tiene transposición de conductores.

La fig. A5.2, muestra las respectivas redes de secuencia para una línea de transmisión desbalanceada.

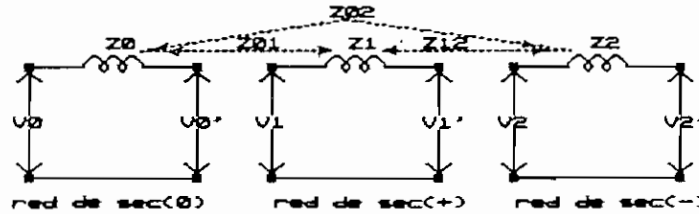


Fig. A5.2 Acoplamiento de redes monofásicas de secuencia.

Ahora si se consideran dos líneas trifásicas paralelas balanceadas, la matriz en términos de componentes simétricas se obtiene a partir de:

$$[Z_{sim}] = \begin{bmatrix} [T_s]^{-1} & [\emptyset] \\ [\emptyset] & [T_s]^{-1} \end{bmatrix} [Z_{fase}] \begin{bmatrix} [T_s] & [\emptyset] \\ [\emptyset] & [T_s] \end{bmatrix}$$

(A5.6)

Luego de realizar las operaciones respectivas, se obtiene una matriz en componentes simétricas que se caracteriza por tener un acoplamiento significativo entre la secuencia cero de la línea de un circuito y la secuencia cero del otro circuito (ver fig.A5.3), mientras que los otros términos de acoplamiento son pequeños con relación al que existe entre secuencias cero, por lo que se los puede considerar

TRANSFORMADORES TRIFASICOS.-

Se realiza la conversión a componentes simétricas de las submatrices admitancia de la ec.(2.2.4), para lo cual se usa la siguiente relación:

$$[Y_{\emptyset 12}] = [T_{\emptyset}]^{-1}[Y_{abc}][T_{\emptyset}] \quad (A5.7)$$

Entonces:

- \* Para la submatriz del lado Estrella-tierra, de la ec.(2.2.5):

$$[Y_{PP\emptyset 12}] = [T_{\emptyset}]^{-1} \begin{array}{|c|c|c|} \hline y_P & y_{m'} & y_{m'} \\ \hline y_{m'} & y_P & y_{m'} \\ \hline y_{m'} & y_{m'} & y_P \\ \hline \end{array} [T_{\emptyset}]$$

Es decir:

$$[Y_{PP\emptyset 12}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline y_P + 2y_{m'} & \emptyset & \emptyset \\ \hline \emptyset & y_P - y_{m'} & \emptyset \\ \hline \emptyset & \emptyset & y_P - y_{m'} \\ \hline \end{array} \quad (A5.8)$$

\* Para la submatriz del lado Delta (ec.(2.2.6)):

$$[Y_{\Delta\Delta\emptyset 12}] = \frac{1}{3} [T_{\Delta}]^{-1} \begin{bmatrix} 2(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') \\ -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & 2(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') \\ -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & -(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') & 2(y_{\Delta}-y_{\Delta}''') \end{bmatrix} [T_{\Delta}]$$

Es decir:

$$[Y_{\Delta\Delta\emptyset 12}] = \begin{bmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & y_{\Delta}-y_{\Delta}''' & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & y_{\Delta}-y_{\Delta}''' \end{bmatrix} \quad (A5.9)$$

\* Para la submatriz mutua entre el lado Estrella-tierra y el lado Delta, de la ec.(2.2.7).

$$[Y_{\Delta\Delta\emptyset 12}] = \frac{1}{\sqrt{3}} [T_{\Delta}]^{-1} \begin{bmatrix} -(y_{\Delta}+y_{\Delta}''') & (y_{\Delta}+y_{\Delta}''') & \emptyset \\ \emptyset & -(y_{\Delta}+y_{\Delta}''') & (y_{\Delta}+y_{\Delta}''') \\ (y_{\Delta}+y_{\Delta}''') & \emptyset & -(y_{\Delta}+y_{\Delta}''') \end{bmatrix} [T_{\Delta}]$$

Es decir:

$$[Y_{\Delta\Delta\emptyset 12}] = \begin{bmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & -(y_{\Delta}+y_{\Delta}''')/\sqrt{3} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & -(y_{\Delta}+y_{\Delta}''')/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (A5.10)$$

Con las submatrices de secuencia obtenidas, se forma la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_{P0} \\ \hline I_{P1} \\ \hline I_{P2} \\ \hline I_{S0} \\ \hline I_{S1} \\ \hline I_{SII} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline y_P+2y_{m'} & & & \emptyset & & \\ \hline & y_P-y_{m'} & & & y_1 & \\ \hline & & y_P-y_{m'} & & & y_2 \\ \hline \emptyset & & & \emptyset & & \\ \hline & y_1 & & & y_S-y_{m''} & \\ \hline & & y_2 & & & y_S-y_{m''} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_{P0} \\ \hline V_{P1} \\ \hline V_{P2} \\ \hline V_{S0} \\ \hline V_{S1} \\ \hline V_{SII} \\ \hline \end{array}$$

(A5.11)

de donde:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= - (y_m+y_{m''}) / \underline{30^\circ} \\
 y_2 &= - (y_m+y_{m''}) / \underline{-30^\circ}
 \end{aligned}$$

Puesto que las matrices de secuencia están desacopladas, se tiene las redes de secuencia en forma independiente, así:

a) Para la secuencia cero:

$$\begin{array}{|c|} \hline I_{P0} \\ \hline I_{S0} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \emptyset & \emptyset \\ \hline y_P+2y_{m'} & \emptyset \\ \hline \emptyset & \emptyset \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline V_{P0} \\ \hline V_{S0} \\ \hline \end{array}$$

y el circuito equivalente de secuencia cero, es:

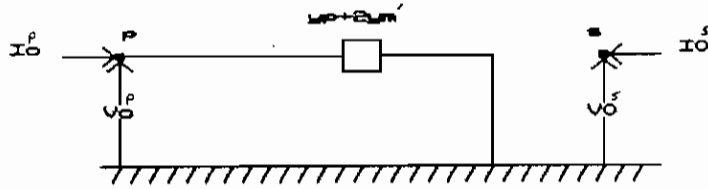


Fig. A5.4 Modelo en secuencia cero para transformador trifásico de núcleo común con conexión Estrella-tierra/Delta.

b) Para la secuencia positiva:

		1	I		
$I_{P1}$	=	1	$y_p - y_m'$	$-(y_m + y_m'')/30^\circ$	$V_{P1}$
$I_{R1}$	=	I	$-(y_m + y_m'')/30^\circ$	$y_m - y_m''$	$V_{R1}$

y el circuito equivalente de secuencia positiva, es:

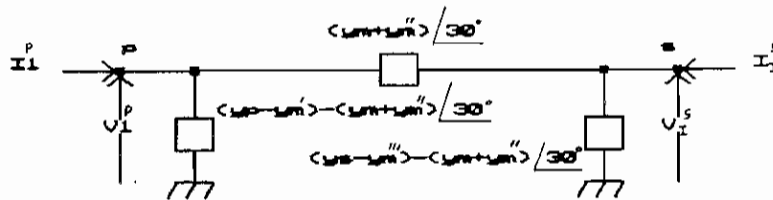


Fig. A5.5 Modelo en secuencia positiva para transformador trifásico de núcleo común con conexión Estrella-tierra/Delta.

c) Para la secuencia negativa:

		2		II	
$I_{P2}$	=	2	$y_P - y_{m'}$	$-(y_m + y_{m''}) / -30^\circ$	$V_{P2}$
$I_{II}$	=	II	$-(y_m + y_{m'}) / -30^\circ$	$y_m - y_{m''}$	$V_{II}$

y el circuito equivalente de secuencia negativa, es:

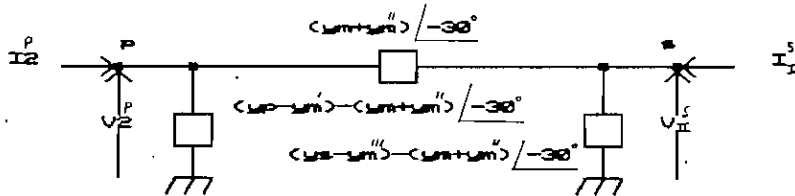


Fig. A5.6 Modelo en secuencia negativa para transformador trifásico de núcleo común con conexión Estrella-tierra/Delta.

En forma similar se puede obtener las redes de secuencia para otras conexiones del transformador trifásico.

Observaciones:

- \* En condiciones de desbalance por el devanado Estrella-tierra fluyen las corrientes de secuencia cero, positiva y negativa. Mientras que por el devanado



Delta fluyen únicamente las corrientes de secuencia positiva y negativa, según la ec. (A5.9). Así mismo entre el lado Estrella-tierra y el Delta pasan las corrientes de secuencia positiva y negativa.

- \* Existe un cambio de fase de  $30^\circ$  en las admitancias de transferencia en la secuencia positiva y de  $-30^\circ$  en la secuencia negativa. Este cambio es debido a la submatriz mutua entre el lado Estrella-tierra y el Delta.
  
- \* Este nivel de defasaje en general, depende de la designación o nomenclatura de las fases en el primario y secundario, pudiendo ocurrir defasajes de  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ , etc..

Pero, en realidad estas redes de secuencia son modelos equivalentes que tienen su grado de complejidad para ser aplicados en los estudios de sistemas eléctricos, por lo que se simplifican haciendo las siguientes consideraciones [4]:

- El cambio de fase que aparece en las admitancias de transferencia de las secuencias positiva y negativa, es ignorado.
  
- Las admitancias mutuas entre fases son iguales, es

decir que,  $y_m' = y_m'' = y_m'''$ .

Estas son iguales a cero en un banco de tres transformadores monofásicos.

- Las diferencias  $(y_p - y_m)$  y  $(y_s - y_m)$  son muy pequeñas y por lo tanto despreciadas.

Con estas simplificaciones, se llega a obtener los modelos en componentes de secuencia para transformadores trifásicos, que han sido usados en los estudios convencionales de estado estable.

La tabla 2.2.1, ilustra esos modelos con la impedancia de cortocircuito en las tres secuencias.

Tabla 2.2.1

Banco p	Banco s	Redes de secuencia		
		Positiva	Negativa	Cero
Estrella-tierra	Estrella-tierra			
Estrella-tierra	Estrella			
Estrella-tierra	Delta			
Estrella	Estrella			
Estrella	Delta			
Delta	Delta			

GENERADORES SINCRONICOS.-

Reemplazando la matriz impedancia de la ec. (2.3.1) en la ec. (A5.2) se obtiene el modelo del generador sincrónico en componentes simétricas, es decir:

$$[Z_{012}] = [T_a]^{-1} \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ \hline Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ \hline Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \\ \hline \end{array} [T_a]$$

pero como:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$$

$$Z_{ac} = Z_{ba} = Z_{cb}$$

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$$

se tiene que:

$$[Z_{012}] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Z_0 & & \\ \hline & Z_1 & \\ \hline & & Z_2 \\ \hline \end{array}$$

siendo:

$Z_0$  = impedancia de secuencia cero.

$Z_1$  = impedancia de secuencia positiva.

$Z_2$  = impedancia de secuencia negativa.

Estas impedancias contienen toda la información que se necesita para analizar comportamientos desbalanceados en estado estable de la máquina sincrónica.

Ya que la excitación de la máquina actúa simétricamente en las tres fases, la influencia de esa excitación estará únicamente en la red de secuencia positiva.

Las redes de secuencia negativa y cero no contienen ese voltaje en la barra interna, pero incluyen las impedancias del generador a las corrientes de secuencia negativa y cero respectivamente.

La fig. A5.7, ilustra el modelo completo del generador sincrónico en componentes simétricas.

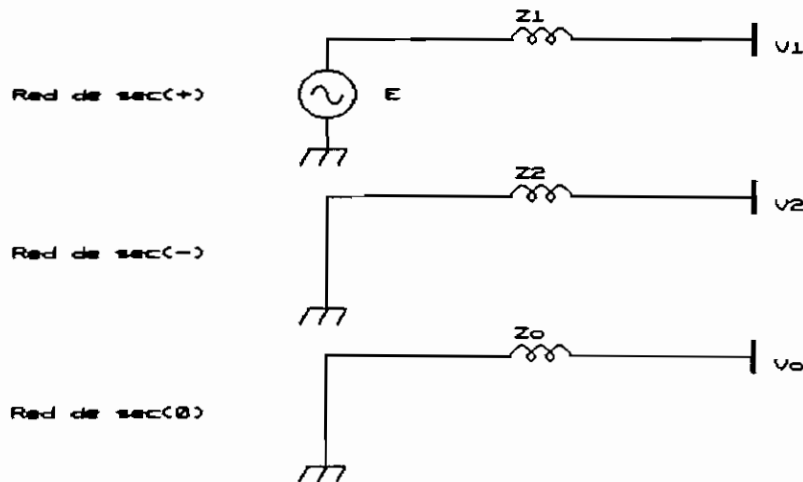


Fig. A5.7 Modelo del Generador Sincrónico en componentes simétricas.

En condiciones desbalanceadas, los voltajes terminal de secuencia positiva, negativa y cero son determinados por las siguientes ecuaciones que se plantean para cada red de secuencia:

$$V_1 = E - Z_1 I_1 \quad (A5.12)$$

$$V_2 = - Z_2 I_2 \quad (A5.13)$$

$$V_0 = - Z_0 I_0 \quad (A5.14)$$

Según la ec. (A5.12), el valor del voltaje terminal de secuencia positiva depende de los valores tanto de la excitación de la máquina como de la impedancia de secuencia positiva.

Sin embargo, para flujos de potencia trifásicos la excitación no es de interés y la impedancia de secuencia positiva puede tomar cualquier valor. Pero realmente se toma valores de  $Z_1$  pequeños con el afán de reducir el voltaje de excitación y permitir que esté en el orden de los valores reales, así como también tener una reducción en el ángulo entre los voltajes de la barra interna y de la barra terminal.

Estas dos características son importantes cuando se usa el algoritmo del Flujo de Potencia Trifásico Desacoplado-Rápido.

Para obtener la matriz impedancia en componentes de fase a partir de la matriz en componentes simétricas se aplica la siguiente ecuación:

$$[Z_g] = [T_s] \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} [T_s]^{-1}$$

es decir:

$$[Z_g] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0+Z_1+Z_2 & Z_0+aZ_1+a^2Z_2 & Z_0+a^2Z_1+aZ_2 \\ Z_0+a^2Z_1+aZ_2 & Z_0+Z_1+Z_2 & Z_0+aZ_1+a^2Z_2 \\ Z_0+aZ_1+a^2Z_2 & Z_0+a^2Z_1+aZ_2 & Z_0+Z_1+Z_2 \end{bmatrix}$$

Luego, para modelar al generador en componentes de fase, se usa las impedancias de secuencia, siendo el valor de  $Z_1$  arbitrario (valor recomendable de reactancia de 0.01 p.u. en el Flujo de Potencia Trifásico) mientras que para  $Z_2$  y  $Z_0$  son los valores normales.

## **ANEXO 6**

*COEFICIENTES SUBJACOBIANOS*

COEFICIENTES DE LA ECUACION MATRICIAL (3.2.17):

$$[A^{pm_{1k}}] = [\delta P_{p1} / \delta \theta^{mk}]$$

La ec. (3.2.12) también puede escribirse como:

$$P_{p1} = (V_{p1})^2 G_{p11} + V_{p1} \sum_k \sum_m V^{mk} [G^{pm_{1k}} \cos(\theta_{p1} - \theta^{mk}) + B^{pm_{1k}} \sin(\theta_{p1} - \theta^{mk})]$$

$$\begin{array}{ll} i = 1, \dots, nb & \\ k = 1, \dots, n & k \neq i \\ p, m = a, b, c & p \neq m \end{array}$$

Teniendo en cuenta que:

$$A^{pm_{1k}} = \frac{\delta P_{p1}}{\delta \theta^{mk}}$$

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$A^{pm_{1k}} = V_{p1} V^{mk} [G^{pm_{1k}} \sin(\theta_{p1} - \theta^{mk}) - B^{pm_{1k}} \cos(\theta_{p1} - \theta^{mk})] \quad (A6.1)$$

$$\begin{array}{ll} i, k = 1, \dots, nb & i \neq k \\ p, m = a, b, c & p \neq m \end{array}$$

Por otro lado para:

$$\frac{\delta P_{p1}}{\delta \theta_{p1}} = - V_{p1} \sum_k \sum_m V^{mk} [G^{pm_{1k}} \sin(\theta_{p1} - \theta^{mk}) - B^{pm_{1k}} \cos(\theta_{p1} - \theta^{mk})] \quad (A6.2)$$



Además la ec. (3.2.13), también puede escribirse como:

$$Q_{P_1} + (V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} = V_{P_1} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{Pm_1k} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta^m_k) - B^{Pm_1k} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta^m_k)] \quad (\text{A6.3})$$

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, nb \\ k &= 1, \dots, n & k \neq i \\ p, m &= a, b, c & p \neq m \end{aligned}$$

Reemplazando la ec. (A6.3) en la ec. (A6.2) se tiene:

$$A_{PP_{11}} = \frac{\delta P_{P_1}}{\delta \theta_{P_1}} = - (V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} - Q_{P_1} \quad (\text{A6.4})$$

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, nb \\ p &= a, b, c \end{aligned}$$

$$[E_{P_{11}}] = [\delta P_{P_1} / \delta \theta_{int_1}]$$

La ec. (3.2.12) puede escribirse como:

$$\begin{aligned} P_{P_1} &= V_{P_1} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{Pm_1k} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta^m_k) + B^{Pm_1k} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta^m_k)] \\ &+ V_{P_1} \sum_l \sum_m V^m_l [G^{Pm_1l} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta^m_l) + B^{Pm_1l} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta^m_l)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i, k &= 1, \dots, nb \\ l &= nb+1, \dots, n \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

Entonces:

$$E_{P_{11}} = \frac{\delta P_{P_1}}{\delta \theta_{int1}}$$

$$E_{P_{11}} = V_{P_1} \sum_m V_{int1} [G^{P_{11}m} \sin(\theta_{P_1} - \theta^m) - B^{P_{11}m} \cos(\theta_{P_1} - \theta^m)] \quad (A6.5)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, nb \\ l &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m &= a, b, c \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{(ángulo del} \\ \text{generador} \\ \text{oscilante} \\ \text{es la refe-} \\ \text{rencia)} \end{array}$$

$$[B^{mjk}] = [\delta P_{genj} / \delta \theta^m_k]$$

La ec. (3.2.15) también puede escribirse como:

$$\begin{aligned} P_{genj} &= \sum_p V_{intj} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{P_{mjk}} \cos(\theta_{P_j} - \theta^m_k) + B^{P_{mjk}} \sin(\theta_{P_j} - \theta^m_k)] \\ &+ \sum_p V_{intj} \sum_l \sum_m V^m_l [G^{P_{mjl}} \cos(\theta_{P_j} - \theta^m_l) + B^{P_{mjl}} \sin(\theta_{P_j} - \theta^m_l)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, nb \\ l &= nb+1, \dots, n \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

Entonces:

$$B^{mjk} = \frac{\delta P_{genj}}{\delta \theta^m_k}$$

$$B^{mjk} = \sum_p V_{intj} V^m_k [G^{P_{mjk}} \sin(\theta_{P_j} - \theta^m_k) - B^{P_{mjk}} \cos(\theta_{P_j} - \theta^m_k)] \quad (A6.6)$$

$$\begin{aligned} j &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ k &= 1, \dots, nb \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

$$[F_{j1}] = [\delta P_{genj} / \delta \theta_{int1}]$$

$$F_{j1} = \frac{\delta P_{genj}}{\delta \theta_{int1}} = 0 \quad \text{porque la barra interna del generador } j \text{ no esta conectada con la barra interna del generador } 1, \text{ siendo } j = 1$$

$$\text{con: } j, l = nb+1, \dots, nb+ng-1$$

Por otro lado, la ec. (3.2.15), puede escribirse como:

$$\begin{aligned} P_{gen1} = & \sum_p (V_{int1})^2 G_{pp11} \\ & + \sum_p V_{int1} \sum_k \sum_m V_{mk} [G_{p m 1 k} \cos(\theta_{p1} - \theta_{mk}) + B_{p m 1 k} \sin(\theta_{p1} - \theta_{mk})] \\ & + \sum_{m \neq p} \sum_p (V_{int1})^2 [G_{p m 1 1} \cos(\theta_{p1} - \theta_{m1}) + B_{p m 1 1} \sin(\theta_{p1} - \theta_{m1})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, nb \\ l &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

Por consiguiente:

$$F_{11} = \frac{\delta P_{gen1}}{\delta \theta_{int1}}$$

$$F_{11} = - \sum_p V_{int1} \sum_k \sum_m V_{mk} [G_{p m 1 k} \sin(\theta_{p1} - \theta_{mk}) - B_{p m 1 k} \cos(\theta_{p1} - \theta_{mk})] \quad (A6.7)$$

A igual que la ec. (3.2.15) se plantea la ecuación para la Potencia Reactiva total generada, que tiene la siguiente forma:

$$Q_{genj} = \sum_p V_{intj} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{pmjk} \sin(\theta_{pj} - \theta^m_k) - B^{pmjk} \cos(\theta_{pj} - \theta^m_k)] \quad (A6.8)$$

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, n \\ j &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

Pero para el generador 1 y en forma más desarrollada tenemos:

$$\begin{aligned} Q_{gen1} &= \sum_p [-(V_{int1})^2 B^{pp11}] \\ &+ \sum_p V_{int1} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{pm1k} \sin(\theta_{p1} - \theta^m_k) - B^{pm1k} \cos(\theta_{p1} - \theta^m_k)] \\ &+ \sum_{m \neq p} \sum_p (V_{int1})^2 [G^{pm11} \sin(\theta_{p1} - \theta^m_1) - B^{pm11} \cos(\theta_{p1} - \theta^m_1)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= 1, \dots, nb \\ l &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\ p, m &= a, b, c \end{aligned}$$

de donde:

$$\begin{aligned} \sum_p V_{int1} \sum_k \sum_m V^m_k [G^{pm1k} \sin(\theta_{p1} - \theta^m_k) - B^{pm1k} \cos(\theta_{p1} - \theta^m_k)] &= Q_{gen1} \\ + \sum_p (V_{int1})^2 B^{pp11} - \sum_{m \neq p} \sum_p (V_{int1})^2 [G^{pm11} \sin(\theta_{p1} - \theta^m_1) & \\ - B^{pm11} \cos(\theta_{p1} - \theta^m_1)] & \end{aligned} \quad (A6.9)$$

Reemplazando la ec. (A6.9) en la ec. (A6.7) tenemos:

$$\begin{aligned}
 F_{11} &= \sum_p [-(V_{int1})^2 B^{pp11} - Q_{gen1}] \\
 &+ \sum_m \sum_p (V_{int1})^2 [G^{pm11} \sin(\theta_{p1} - \theta_{m1}) - B^{pm11} \cos(\theta_{p1} - \theta_{m1})]
 \end{aligned}
 \tag{A6.10}$$

$$\begin{aligned}
 l &= nb+1, \dots, nb+ng-1 \\
 p, m &= a, b, c \qquad m \neq p
 \end{aligned}$$

COEFICIENTES DE LA ECUACION MATRICIAL (3.2.18):

$$[K^{pm1k}] = V^{mk} [\delta Q_{p1} / \delta V^{mk}]$$

La ec. (3.2.13), puede escribirse como:

$$\begin{aligned}
 Q_{p1} &= - (V_{p1})^2 B^{pp11} \\
 &+ V_{p1} \sum_k \sum_m V^{mk} [G^{pm1k} \sin(\theta_{p1} - \theta_{mk}) - B^{pm1k} \cos(\theta_{p1} - \theta_{mk})]
 \end{aligned}
 \tag{A6.11}$$

$$\begin{aligned}
 i &= 1, \dots, nb \\
 k &= 1, \dots, n \qquad k \neq i \\
 p, m &= a, b, c
 \end{aligned}$$

Con la cual se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 K^{pm1k} &= V^{mk} \cdot \frac{\delta Q_{p1}}{\delta V^{mk}} = V^{mk} V_{p1} [G^{pm1k} \sin(\theta_{p1} - \theta_{mk}) \\
 &\qquad \qquad \qquad - B^{pm1k} \cos(\theta_{p1} - \theta_{mk})]
 \end{aligned}
 \tag{A6.12}$$

$$\begin{aligned}
 i, k &= 1, \dots, nb \qquad k \neq i \\
 p, m &= a, b, c
 \end{aligned}$$

Ahora con:

$$\frac{\delta Q_{P_1}}{\delta V_{P_1}} = - 2V_{P_1}B_{PP_{11}} + \sum_k \sum_m V_{m_k} [G_{P_{m_1 k}} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k}) - B_{P_{m_1 k}} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k})]$$

Multiplicando por  $V_{P_1}$  a los dos lados de esta ecuación, se obtiene:

$$\frac{\delta Q_{P_1}}{\delta V_{P_1}} \cdot V_{P_1} = - 2(V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} + V_{P_1} \sum_k \sum_m V_{m_k} [G_{P_{m_1 k}} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k}) - B_{P_{m_1 k}} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k})]$$

es decir:

$$\frac{\delta Q_{P_1}}{\delta V_{P_1}} \cdot V_{P_1} = - (V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} - (V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} + V_{P_1} \sum_k \sum_m V_{m_k} [G_{P_{m_1 k}} \text{SIN}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k}) - B_{P_{m_1 k}} \text{COS}(\theta_{P_1} - \theta_{m_k})] \quad (\text{A6.13})$$

Reemplazando la ec. (A6.11) en la ec. (A6.13), se tiene:

$$K_{PP_{11}} = V_{P_1} \cdot \frac{\delta Q_{P_1}}{\delta V_{P_1}} = - (V_{P_1})^2 B_{PP_{11}} + Q_{P_1} \quad (\text{A6.14})$$

$i = 1, \dots, nb$   
 $p = a, b, c$

$$[PP_{11}] = V_{int1}[\delta Q_{P1}/\delta V_{int1}]$$

La ec. (3.2.13) también puede escribirse como:

$$Q_{P1} = V_{P1}\sum_k\sum_m V^{mk}[G^{pmk}\text{SIN}(\theta_{P1}-\theta^{mk})-B^{pmk}\text{COS}(\theta_{P1}-\theta^{mk})] \\ + V_{P1}\sum_l\sum_m V^{ml}[G^{pml}\text{SIN}(\theta_{P1}-\theta^{ml})-B^{pml}\text{COS}(\theta_{P1}-\theta^{ml})]$$

$$i, k = 1, \dots, nb \\ l = nb+1, \dots, n \\ p, m = a, b, c$$

Pero:

$$PP_{11} = V_{int1} \cdot \frac{\delta Q_{P1}}{\delta V_{int1}}$$

Con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$PP_{11} = V_{int1}V_{P1}\sum_m[G^{pml}\text{SIN}(\theta_{P1}-\theta^{ml})-B^{pml}\text{COS}(\theta_{P1}-\theta^{ml})] \quad (A6.15) \\ i = 1, \dots, nb \\ l = nb+1, \dots, nb+ng \\ p, m = a, b, c$$

$$[L^{mk}] = V^{mk}[\delta V_{regj}/\delta V^{mk}]$$

Pero si:

$$[L^{mk}]' = [\delta V_{regj}/\delta V^{mk}]$$

Entonces:

$$[L^{mjk}] = V^{mk}[L^{mjk}]' \quad (\text{A6.16})$$

$j = nb+1, \dots, nb+ng$   
 $k = \text{barra terminal del generador } j.$   
 $m = a, b, c$

Además, según la ec. (3.2.14) se tiene que:

$$V_{regj} = V^{ek}$$

Por lo tanto:

$$L^{mjk}' = \frac{\delta V_{regj}}{\delta V^{mk}} = 1$$

$k = \text{barra terminal del generador } j$   
 $m = a$

Mientras que:

$$L^{mjk}' = \frac{\delta V_{regj}}{\delta V^{mk}} = 0$$

$k = \text{barra terminal del generador } j$   
 $m = b, c$



Por otro lado:

$$L^{mk} = 0$$

k = no es la barra terminal del generador j  
m = a, b, c

$$[R_{j1}] = V_{int1}[\delta V_{regj}/\delta V_{int1}]$$

Como para todo j, l la especificación del regulador de voltaje del generador j (ec. 3.2.14), no incluye al voltaje interno de ese generador, así como también del generador l, entonces se tiene que:

$$\frac{\delta V_{regj}}{\delta V_{int1}} = 0$$

Por lo tanto:

$$R_{j1} = 0$$

$$j, l = nb+1, \dots, nb+ng$$

# **ANEXO 7**

*MANUAL DEL PROGRAMADOR*

Se lo presenta adjunto a este trabajo.

## **ANEXO 8**

*MANUAL DE USO DEL PROGRAMA*

Se lo presenta adjunto a este trabajo.

## **ANEXO 9**

### ***LISTADO DEL PROGRAMA***

Se lo presenta adjunto a este trabajo.

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

- [1] Aguilar L., "PROGRAMACION EN QUICK BASIC 4.0/4.5", McGraw-Hill, 1.990.
- [2] Argüello G., "MODELACION DE TRANSFORMADORES EN EL ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", JIEE, 1.9-89.
- [3] Argüello G., "ANALISIS Y CONTROL DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", E.P.N., 1.988.
- [4] Arrillaga J., Arnold C. P., Harker B. J., "COMPUTER MODELLING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS", Wiley and Sons Ltd., 1.983.
- [5] Arrillaga J., Harker B. J., "FAST-DECOUPLED THREE-PHASE LOAD FLOW", IEEE, 1.978.
- [6] Cañar H., "ANALISIS DEL DESBALANCEAMIENTO ELECTRO-MAGNETICO EN LINEAS AEREAS", Tesis, E.P.N., Quito, 1.979.
- [7] Chiluisa W., "PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO MATRICIAL DE PARAMETROS ELECTRICOS EN LINEAS DE TRANSMISION", Tesis, E.P.N., Quito, 1.979.



- [8] Dillon W. E., Chen M. S., "TRANSFORMER MODELLING IN UNBALANCED THREE-PHASE NETWORKS", IEEE, 1.972.
- [9] Dillon W. E., Chen M. S., "POWER SYSTEM MODELING", IEEE, 1.973.
- [10] Dommel H. W., "LINE CONSTANTS OF OVERHEAD LINES AND UNDERGROUND CABLES", University of British Columbia, 1.978.
- [11] Guerrero M., "PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJOS DE POTENCIA PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", Tesis, E.P.N., Quito, Enero 1.988.
- [12] Kenneth A. B., James J. G., John D. McDonald, "THREE PHASE LOAD FLOW PROGRAM", IEEE, 1.976.
- [13] Marmol E., "ESTUDIOS DE FLUJOS DE CARGA MEDIANTE LOS METODOS DE NEWTON-RAPHSON", Tesis, E.P.N., Quito, 1.983.
- [14] Mejía A., "PROGRAMA DIGITAL PARA CALCULO DE FLUJO DE CARGA EN FORMA TRIFASICA EN UN SISTEMA DESBALANCEADO", Tesis, E.P.N., Quito, 1.980.
- [15] Stevenson W. D., "ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", McGraw-Hill, 1.979.

- [16] Stagg W., El-Abiad A. H., "COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEM ANALYSIS", McGraw-Hill, 1.968.
- [17] Van Valkenburg M. E., "ANALISIS DE REDES", Limusa, S.A., México, 1.980.
- [18] "APUNTES SOBRE MODELACION DE TRANSFORMADORES", University of Texas at Arlington, 1.980.
- [19] "PROGRAMMING IN BASIC", Microsoft Corporation, 1.988.