


ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION MEDIANTE  
CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN EL SISTEMA DE  
POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL"

por  
HECTOR ANIBAL BARRERA FLORES

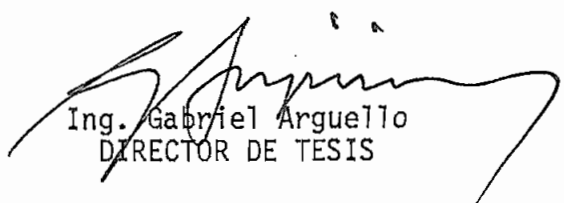
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGE-  
NIERO ELECTRICO, CON ESPECIALIZACION EN SISTEMAS  
DE POTENCIA

Quito, Agosto de 1985



2833

Certifico que el presente trabajo  
ha sido realizado en su totalidad  
por el señor HECTOR ANIBAL BARRE-  
RA FLORES.



Ing. Gabriel Arguello  
DIRECTOR DE TESIS

. A mis queridos padres y hermanos  
quienes me apoyaron en todo mo-  
mento para culminar con mi carre-  
ra. Con amor a mis sobrinas Sil-  
via Grace y María Gabriela.

### AGRADECIMIENTO

- A la Escuela Politécnica Nacional y a mis distinguidos Maestros quienes me han brindado sus valiosas enseñanzas.
- Al Ing. Gabriel Arguello Ríos, Director de esta Tesis por su acertada dirección en este trabajo.
- A INECEL por su colaboración del Centro de Procesamiento de Datos, al Dr. Ramiro Rodas, al Ing. Mario González y a todas aquellas personas que prestaron toda su ayuda altruista para su culminación.

## I N D I C E

	Pág.
RESUMEN	
CAPITULO I INTRODUCCION	
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Visión Histórica .....	2
1.3. Alcance del trabajo .....	5
CAPITULO II MODELACION MATEMATICA Y ALGORITMO PARA MINIMI- ZACION DE PERDIDAS EN SEP MEDIANTE UN MODELO - LINEAL.	
2.1. Concepción del problema .....	7
2.2. Formulación matemática del problema .....	10
2.2.1. Flujo de Potencia .....	10
2.2.1.1. Definición .....	10
2.2.1.2. Planteamiento matemático del flujo de potencia....	10
2.2.1.3. Método de Newton-Raphson para la solución del flu- jo de potencia .....	14
2.2.2. Flujo óptimo .....	19
2.2.3. Flujo óptimo de potencia reactiva .....	21
2.2.4. Planteamiento del problema del flujo óptimo de po- tencia reactiva.....	22
2.3. Planteamiento matemático para la obtención de la función objetivo lineal y de restricciones.....	24

	Pág.
2.3.1. Función objetivo (minimización de pérdidas).....	25
2.3.1.1. Cálculo de los coeficientes de la función objetivo mediante relaciones de sensibilidad del sistema de potencia.....	29
2.3.1.1.1. Sensitividad de las pérdidas con respecto a los taps de los transformadores .....	29
2.3.1.1.2. Sensitividad de las pérdidas con respecto al voltaje terminal en las barras de generación .....	32
2.3.1.1.3. Sensitividad de las pérdidas con respecto a las fuentes de potencia reactiva conectables en pasos .....	34
2.3.1.2. Método alternativo de calcular los coeficientes de la función objetivo mediante flujos de potencia.....	34
2.3.2. Restricciones de las variables de estado .....	38
2.3.3. Restricciones de las variables de control .....	46
2.3.4. Modelo para la solución del flujo de potencia reactiva .....	47
2.3.5. Mejoramiento del modelo básico .....	50
2.4. Algoritmo de solución del problema de control óptimo de reactivos .....	54

### CAPITULO III EJECUCION DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Ejemplo No.1: Sistema de 6 barras .....	59
3.1.1. Máxima carga .....	61
3.1.2. Media carga .....	72
3.1.3. Mínima carga .....	83
3.1.4. Análisis de Sensibilidad de la función objetivo y de la solución óptima para máxima carga.....	94

	Pág.
3.2. Ejemplo No.2 Sistema de 14 barras de IEEE.....	102
3.3. Ejemplo No.3 Sistema Nacional Interconectado ....	114
3.3.1. Máxima carga .....	116
3.3.2. Mínima carga .....	127
3.4. Análisis de resultados .....	138

#### CAPITULO IV PROGRAMA DIGITAL

4.1. Consideraciones en programación.....	143
4.2. Algoritmo de detalle.....	144
4.3. Descripción del programa, descripción de las sub rutinas.....	147
4.4. Diagramas de flujo: Programa principal y subruti nas.....	152
4.5. Características .....	162

#### CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 163

#### ANEXOS

APENDICE "A" DETALLES MATEMATICO DE MODELACION ..	165
A.1. Elementos del Jacobiano del flujo de potencia en coordenadas polares .....	165
A.2. Sensitividad de las pérdidas con respecto a la po tencia activa y reactiva ( $\frac{\partial PL}{\partial P}$ , $\frac{\partial PL}{\partial Q}$ )	166
A.3. Incidencia del taps del transformador en $Y_B$	170

	Pág.
A.4. Incidencia de capacitores o reactores conectados a tierra en la formación de $Y_B$ .....	172
A.5. Cálculo de: $\frac{\partial P}{\partial t_{pq}}$ , $\frac{\partial Q}{\partial t_{pq}}$ .....	173
$\frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}}$ , $\frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}}$	
$\frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta}$ , $\frac{\partial P_{pq}}{\partial V}$	
A.6. RESOLUCIÓN ILUSTRATIVA PARA OBTENER LA SOLUCION DEL F.O.P.R. EN UN SISTEMA DE 5 BARRAS.....	183
APENDICE "B" MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL .....	198
APENDICE "C" LISTADO DEL PROGRAMA .....	220
Referencias.	



## R E S U M E N

Para realizar el flujo óptimo de potencia reactiva se requiere que primeramente haya sido optimizado el flujo de potencia activa del sistema. En el presente trabajo se presenta un método lineal para minimizar las pérdidas activas (flujo óptimo de potencia reactiva) controlando el perfil de voltaje en el sistema.

El método que se presenta en esta tesis; es propuesto por Mamandur-Chenoweth [2], el mismo que mediante la aplicación de programación lineal obtiene iterativamente las correcciones sucesivas sobre las variables de control (voltajes de generación, taps de los transformadores y fuentes de potencia reactiva conectables en pasos capacitores y/o reactores) hasta obtener un punto de operación en el sistema mediante el cual la función objetivo (minimización de pérdidas) toman un valor óptimo cumpliendo con las restricciones planteadas.

El desarrollo del presente estudio está detallado en 5 Capítulos cuyo contenido a continuación se describe brevemente:

1. Introducción, visión histórica, alcance, objetivo del trabajo.
2. Formulación matemática del flujo óptimo de potencia reactiva; - planteando la función objetivo y las restricciones funcionales del sistema mediante relaciones de sensibilidad del sistema de potencia. También se presenta un segundo método para calcular la función objetivo por medio de flujos de potencia realizados alrededor del punto de operación.

3. Aplicaciones y análisis de los resultados sobre sistemas de prueba para diferentes condiciones de carga.
4. Programa digital; en lo que se refiere al programa principal a sus subrutinas y sus correspondientes diagramas, de flujo.
5. Conclusiones y Recomendaciones.

## CAPITULO I

### 1.1 GENERALIDADES

En la época actual se están investigando nuevos métodos para mejorar la operación de los sistemas de potencia. Principalmente aspectos de tipo económico ha hecho que el control de potencia reactiva tome una importancia significativa en los últimos tiempos. Además la necesidad de una adecuada operación de los elementos del sistema ha conducido analizar una serie de técnicas analíticas que permiten una operación más eficiente.

Los problemas que se derivan como consecuencia de los cambios en las demandas de carga, ocasionan bajos y altos niveles de voltaje en las tensiones normales del sistema, situación que puede ser convenientemente manejada por los operadores de los centros de control con una adecuada redistribución de la generación de potencia reactiva.

Esta redistribución de la potencia reactiva en sistemas de potencia se logra mediante un control en la magnitud de voltajes en las barras de generación, en los taps de los transformadores y mediante fuentes de potencia reactiva conectables en pasos. Además paralelamente a esto se minimiza las pérdidas del sistema por medio de la redistribución de potencia reactiva en la red, obteniéndose de este modo, una operación eficiente en los sistemas al mejorar el perfil de voltaje y minimizar las pérdidas activas de transmisión de los sistemas para una distribución definida de potencia activa.

## 1.2 VISION HISTORICA

El control de potencia reactiva en la década del 60 fue mantener los niveles de voltaje dentro de una tolerancia especificada por un control individual de reguladores de voltaje, por medio de los taps de transformadores y por medio de fuentes de potencia reactiva. Pero a medida que la complejidad de los sistemas de potencia ha ido creciendo con la configuración del sistema, se ha investigado una mejor utilización de los componentes controlables del sistema, mediante un control óptimo del flujo de potencia y del de potencia reactiva en particular.

Han aparecido algunos métodos para el control óptimo del flujo de potencia reactiva, empleando relaciones de sensibilidad y una técnica de aproximación del gradiente [2]:

J. Peschon, D. Piercy, W. Tinney, O. Tveit en el año 67 mediante la sensibilidad del flujo de potencia y las relaciones de sensibilidad de costos, optimizan la generación de la potencia activa y reactiva en el sistema.

J.F. Dopazo, O.A. Klifin, G.W. Stagg y M. Watson en el año 67 presentan un método de minimizar el costo de operación mediante una distribución de la potencia activa y reactiva del sistema. El procedimiento determina primero despacho de potencia activa basados en los multiplicadores de Lagrange y luego optimiza la distribución de la potencia reactiva por la aproximación del gradiente.

I. Hano, Y. Tamura, S. Narita y K. Matsumoto en el año 68 presentan una alternativa para controlar el voltaje y la distribución de potencia reactiva en el sistema, mediante relaciones de sensibilidad entre variables de control y variables dependientes e índices de sensibilidad de las pérdidas.

J. Peschon, D. Piercy, W. Tinney, O. Tveit, M. Cuenod en el año 67 presentan un método para minimizar las pérdidas del sistema por una adecuada selección en la inyección de potencia reactiva en el sistema y por medio de los taps de los transformadores mediante programación no-lineal.

H. Dommel, W. Tinney en el año 67 presentaron una técnica de optimización no-lineal para determinar la solución del flujo óptimo. Minimiza la función objetivo no-lineal de despacho económico o pérdidas o ambos a la vez usando condiciones de Kuhn-Tucker.

S.C. Savulescu en el año 75 presenta un método para el control de voltaje y la potencia reactiva en el sistema, el método determina la sensibilidad de las pérdidas, la transmisión de potencia reactiva e índices de estabilidad en estado estable; basados en estos índices encuentra la solución óptima.

Todos los algoritmos mencionados para un control del flujo óptimo de potencia reactiva, usan una técnica de aproximación del gradiente [2]

S. Narita y M. Hamman en el año 70 para el control de voltaje y potencia reactiva, presenta un método usando análisis de sensibilidad

del sistema de potencia, para controlar el nivel de voltaje a valores deseados, como un segundo paso minimizar las pérdidas.

R. Shoults y M.S. Chen en el año 75 presentan un método para el control de potencia reactiva mediante un ajuste en los taps de los transformadores y de los voltajes de generación para restituir el flujo de potencia reactiva en las líneas y los voltajes en las barras de carga a valores deseados.

E. Hobson en el año 78 desarrolla un método, encontrando las restricciones de red en el control de potencia reactiva mediante programación lineal. El problema es resuelto por una técnica de la programación lineal dando prioridad a los voltajes de generación del sistema. Este método mantiene blando los límites de los taps de los transformadores, voltajes de generación y fuentes de potencia reactiva.

R. Fernandes, H. Happ, K. Wirgw minimizan las pérdidas del sistema mediante un control en el voltaje del sistema, utilizando además el método de Dommel y Tinney para coordinar los ajustes en los taps de los transformadores y los voltajes de generación para minimizar las pérdidas.

Finalmente en 1980 K.R. Mamandur y R.D. Chenoweth formulan un control óptimo del flujo óptimo de potencia reactiva para mejorar los perfiles de voltaje y minimizar las pérdidas del sistema a partir de un despacho de potencia activa previamente definido, mediante un control en los voltajes de generación, taps de los transformadores y fuentes

de potencia reactiva conectables en pasos. Empleando relaciones de sensibilidad del sistema, forma la función objetivo y las restricciones operativas del sistema. Emplea el método de programación lineal, para encontrar los ajustes en las variables de control al mismo tiempo satisfaciendo las restricciones operativas del sistema y de las variables de control. El uso de programación lineal es importante por las características de convergencia de los métodos no-lineales.

### 1.3 ALCANCE DEL TRABAJO

Se presenta un método alternativo para el control óptimo del flujo de potencia reactiva mediante un modelo lineal el que se lo realiza una vez que el control de potencia activa ha sido previamente definido, el cual ha sido ampliamente analizado (14), (6).

El flujo óptimo de potencia reactiva como se presenta en esta tesis utiliza para su resolución el método propuesto por Mamandur-Chenoweth; la función objetivo lineal es minimizar pérdidas, por lo que el modelo minimiza las pérdidas activas de transmisión del sistema consiguiendo de esta forma mejorar el despacho de potencia activa que es definido inicialmente.

El control óptimo del flujo de potencia reactiva se lo define mediante la manipulación coordinada en las siguientes variables de control: en la magnitud de los voltajes en las barras de generación asociados también con condensadores sincrónicos, en los taps de los transforma-

dores y en las fuentes de potencia reactiva conectables en pasos como capacitores y reactores shunt existentes en el sistema, sujeto a las restricciones de operación del sistema es decir de los límites mí nimos y máximos de las variables dependientes como son: la generación de potencia reactiva de los generadores y los límites de los voltajes en las barras de carga, así como también sobre los límites de operación de las variables de control.

El método emplea relaciones de sensibilidad del sistema de potencia de Newton-Raphson para formar la función objetivo lineal y las restricciones lineales operativas del sistema relacionando con las variables de control.

Al minimizar la función objetivo lineal sujeto a las restricciones li neales aplicando programación lineal se encuentra los ajustes neces rios que se dan a las variables de control para encontrar la solución. Con la aplicación de este método se consigue un control en el perfil de voltaje y a la vez minimizar las pérdidas activas de transmisión, en condiciones de operación.

El objetivo y alcance de esta tesis es obtener una modelación del flu jo óptimo de potencia reactiva y desarrollar un programa digital que permita resolverlo mediante un modelo lineal para mejorar el perfil de voltaje en la red y minimizar las pérdidas de transmisión.

El análisis matemático y sus aplicaciones se dan en forma detallada en los siguientes capítulos, así como se presenta para una ejemplo de aplicación los distintos pasos hasta obtener la solución.



## CAPITULO II

### MODELACION MATEMATICA Y ALGORITMO PARA MINIMIZACION DE PERDIDAS EN S.E.P. MEDIANTE UN MODELO LINEAL

#### 2.1 CONCEPCION DEL PROBLEMA

El problema del control de potencia reactiva en sistemas de potencia, está directamente relacionado con la calidad y seguridad de suministrar energía eléctrica con una eficiente operación del sistema de potencia [4].

Los operadores del sistema de potencia pueden controlar los niveles de voltaje dentro de sus límites permisibles cuando se producen cambios por demandas de potencia o en la configuración del sistema, que puede dar como resultado bajos y altos voltajes.

Esta situación puede ser controlada por una redistribución de la generación de potencia reactiva una vez redistribuída la potencia activa en el sistema; es decir por: un ajuste en los transformadores con cambiador de taps, cambiando el voltaje de generación y por inyección de potencia reactiva (Fuentes de potencia reactiva conectables en pasos) en las barras de carga. De igual manera con un control adecuado de potencia reactiva es posible minimizar las pérdidas activas en el sistema.

De este modo, se consigue con un control óptimo de la potencia reactiva en el sistema de potencia:

1. Mejorar los perfiles de voltaje en toda la red.
2. Minimizar las pérdidas activas del sistema.

En general, todo problema de optimización (máximizarse o mínimizarse) consiste en plantear una función objetivo y un conjunto de restricciones; en el modelo lineal propuesto para un control óptimo del flujo de potencia reactiva, la optimización es la minimización, para lo cual se plantea la función objetivo y las restricciones a partir de relaciones -sensitivas del sistema de potencia. Aplicando programación lineal por el método simplex se encuentran las nuevas condiciones del sistema, hasta llegar a la solución óptima.

La programación lineal es aplicada en el control óptimo de potencia reactiva, por la problemática de las propiedades de convergencia de los métodos no-lineales alternativos. Para el control correctivo en sistemas prácticos por medio de incrementos, la programación lineal tiene la ventaja de ser rápida, confiable, versátil, suficientemente exacta para muchos propósitos [10].

Además, como en sistemas de potencia es típico trabajar con matrices porosas, el método es muy eficaz cuando va acompañado de técnicas que exploten esta porosidad.

De ahí que, el algoritmo propuesto sea recomendable para el operador

del sistema de potencia, para mejorar los perfiles de voltaje y minimizar las pérdidas del sistema.

## 2.2 FORMULACION MATEMATICA DEL PROBLEMA

### 2.2.1 Flujo de Potencia

#### 2.2.1.1 Definición

El flujo de potencia es la solución de estado estacionario de un sistema de potencia bajo ciertas condiciones preestablecidas de generación, carga y topología de la red [1].

El flujo de potencia proporciona los niveles de tensión en magnitud y ángulo de todas las barras del sistema; el flujo por todos los elementos de la red y sus pérdidas.

Los estudios de flujos de potencia permite investigar: en planificación, futuras expansiones del sistema, puesto que depende del conocimiento de los efectos de nuevas cargas, nuevos elementos o nuevas centrales. En operación el efecto de pérdidas temporales de generación o de circuitos de transmisión, sobrecargas del sistema, posición del cambiador de taps de los transformadores, pérdidas, etc.

#### 2.2.1.2 Planteamiento matemático del flujo de potencia.

Para el análisis de flujos de potencia se asume una red trifásica balanceada; de tal forma que se lo representa por su diagrama de secuencia positiva con parámetros serie lineales y concentrados; y ramas en derivación [1].

La ecuación de equilibrio de la red en el sistema de referencia nodal de  $n$  barras es:

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

donde:  $\bar{I}$  es el vector de corrientes netas inyectadas a la red  
 $\bar{E}$  es el vector de voltajes de las barras con respecto a tierra.  
 $Y$  es la matriz admitancia de barra

La corriente neta para cualquier barra p es:

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} E_q \quad p=1,2,\dots,n \quad (2)$$

Relacionando corrientes y potencias netas inyectadas:

$$S_p = E_p \cdot I_p^* = P_p + jQ_p \quad (3)$$

Reemplazando el valor de  $I_p$ :

$$P_p + jQ_p = E_p \sum_{q=1}^n (Y_{pq} E_q)^*$$

Si  $E_p$  y  $Y_{pq}$  se los representa en coordenadas polares:

$$E_p = V_p e^{j\theta_p} \quad (4)$$

$$Y_{pq} = |Y_{pq}| e^{j\gamma_{pq}} \quad (5)$$

Se tiene que:

$$P_p + jQ_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q |Y_{pq}| e^{j(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq})} \quad (6)$$

donde:

$$P_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q |Y_{pq}| \cos(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad p=1,2,\dots,n \quad (7)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q |Y_{pq}| \sin(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad (8)$$

El sistema lineal de ecuaciones (1) se transforma en el sistema (7) y (8) de ecuaciones, en el que las incógnitas es el vector  $\bar{E}_p$ . El sistema de ecuaciones es no-lineal por la presencia de productos de términos  $V_p$ ,  $V_q$  y funciones trigonométricas. Para la solución de este sistema de ecuaciones se recurre a las técnicas iterativas de Gauss-Seidel o Newton-Raphson.

Una vez determinado el vector  $\bar{E}_p$  de la ecuación de equilibrio, se determina el flujo de potencia por cada uno de los elementos; así como, la generación de la barra oscilante y las pérdidas del sistema.

El flujo de potencia por un elemento conectado entre una barra  $p$  y  $q$  es:

$$S_{pq}^* = E_p^* \cdot I_{pq} = P_{pq} - jQ_{pq} \quad (9)$$

$$I_{pq} = (E_p - E_q) Y_{pq} + E_p Y_{p0} \quad (10)$$

$$S_{pq}^* = E_p^* (E_p - E_q) Y_{pq} + E_p^* E_p Y_{p0} \quad (11)$$

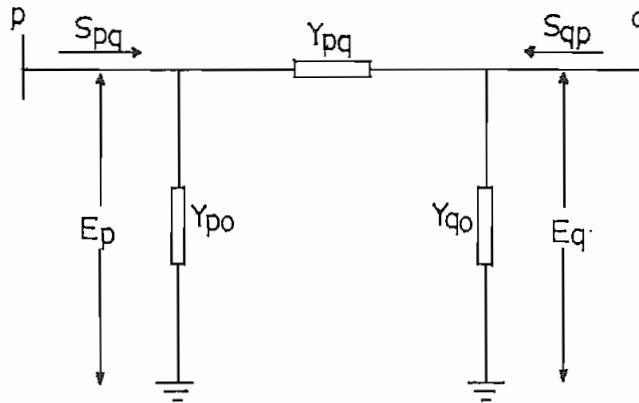


Fig. No.1

En forma similar:

$$S_{qp}^* = E_q^*(E_q - E_p)Y_{pq} + E_q^* E_q Y_{qo} \quad (12)$$

La potencia generada por la barra oscilante si es 1 es:

$$S_1^* = E_1^* \cdot I_1 = E_1^* \sum_{q=1}^n Y_{1q} E_q \quad (13)$$

Las pérdidas de la potencia activa en el sistema puede determinarse de la ecuación de balance definida por:

$$P_L = P_{GT} - P_{CT} = P_{G1} + \dots + P_{Gn} - P_{C1} - \dots - P_{Cn} \quad (14)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Ci} \quad (15)$$

### 2.2.1.3 Método de Newton-Raphson en la solución de flujo de potencia.

Para la solución de flujos de potencia el método utilizado es el Newton-Raphson, debido a que es una de las técnicas más eficiente para resolver sistemas de ecuaciones no-lineales.

Este método es una base para resolver problemas de optimización en planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia que no pueden ser resueltos con precisión y eficacia en cualquier otro método [6].

Desde el punto de vista del presente trabajo y con el propósito de reducir el tiempo de computación para solución de flujos de potencia, el método de Newton-Raphson Desacoplado es utilizado; el cuál considera que: pequeños cambios en la magnitud de voltajes de barra no producen cambios apreciables en la potencia activa inyectada en cualquier barra; y de idéntica manera, cambios pequeños angulares en el voltaje de barra no producen cambios apreciables en la potencia reactiva inyectada. Principio de desacoplamiento atribuido a la alta relación de  $X/R$  en los elementos componentes del sistema de transmisión.

Los resultados obtenidos casi no difieren del método de Newton-Raphson completo [1].

Para el sistema eléctrico de potencia planteado anteriormente; considerando, como la barra 1 como oscilante, las barras 2,3,...,m como de tensión controlada y las barras  $m+1, \dots, n$  como barras de carga, para



explicaciones posteriores; el sistema de ecuación matricial en forma general es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \hline \Delta V_{m+1}/V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde la matriz de coeficientes es el Jacobiano del sistema siendo:

$$\begin{aligned}
 |J_1|_{pq} &= \frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} \\
 |J_2|_{pq} &= \frac{\partial P_p}{\partial V_q} \cdot V_q \\
 |J_3|_{pq} &= \frac{\partial Q_p}{\partial \theta_q} \\
 |J_4|_{pq} &= \frac{\partial Q_p}{\partial V_q} \cdot V_q
 \end{aligned} \quad (17)$$

Por lo expuesto anteriormente, si:

$$\frac{\partial P_p}{\partial V_q} \cdot V_q \approx 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial Q_p}{\partial \theta_q} \approx 0 \quad (18)$$

La ecuación (16) queda:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & 0 \\ \hline 0 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \hline \Delta V_{m+1}/V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

o en la forma independiente el sistema de ecuaciones a resolver es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = J1 \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = J4 \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1}/V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

Los elementos de la submatriz [J1] y [J4] son calculados mediante las ecuaciones (86), (89) (Véase: Elementos del Jacobiano, Apéndice No.1).

Los elementos del vector dependiente de la ecuación (20) son:

$$\Delta P_p = P_{pESP} - P_p NETA \quad p=2,3,\dots,n \quad (22)$$

Donde:  $P_p \text{ ESP} = P_{pG} - P_{pC}$  (23)

$P_p \text{ NETA}$  es el valor de la potencia activa neta dado por la ecuación (7).

Los elementos del vector dependiente de las ecuaciones (21) son:

$$\Delta Q_p = Q_p \text{ ESP} - Q_p \text{ NETA} \quad p = m+1, \dots, n \quad (24)$$

Donde:  $Q_p \text{ ESP} = Q_{pG} - Q_{pC}$  (25)

$Q_p \text{ NETA}$  es el valor de potencia reactiva neta dado por la ecuación (8).

Asumiendo valores iniciales en los voltajes y ángulos, en las barras que se desconocen dichas magnitudes; se calculan la potencia activa y reactiva neta con las ecuaciones (7) y (8). El desbalance de potencias  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  es la diferencia entre los valores especificados y los calculados.

Los elementos del Jacobiano son evaluados con los valores conocidos de voltajes en todas las barras de generación, el ángulo en la barra oscilante y los restantes valores asumidos de  $V$  y  $\theta$ .

El sistema de ecuaciones (20) y (21) se resuelve respectivamente para  $\Delta \theta_p \quad p=2,3,\dots,n$  ;  $\frac{\Delta V_q}{V_q} \quad q = m+1,\dots,n$ . Entonces las nuevas estimaciones para los voltajes y ángulos en los valores asumidos son:

$$\theta_p^{K+1} = \theta_p^K + \Delta \theta_p^K$$

$$V_q^{K+1} = V_q^K + \Delta V_q^K$$

El proceso se repite hasta que  $\Delta P_p$  y  $\Delta Q_p$  para todas las barras, estén dentro de una tolerancia especializada.

#### 2.2.1.4 Sensitividad en un S.E.P. [4]

La sensitividad se define como la relación:

$$\frac{\Delta X}{\Delta Y} \quad (26)$$

relacionando pequeños cambios  $\Delta X$  de algunas variables dependientes para pequeños cambios  $\Delta Y$  de algunas variables de control o independientes.

En sistemas de potencia dos tipos dominantes de relaciones sensitivas son definidas.

- a. Sensitividad de una variable eléctrica como el voltaje  $V_i$  en el nodo  $i$  con respecto a otra variable eléctrica como la generación de potencia reactiva  $Q_j$  en el nodo  $j$  o las pérdidas activas de transmisión del sistema con respecto al voltaje  $V_i$  en el nodo  $i$

$$\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_j} \quad ; \quad \frac{\Delta P_L}{\Delta V_i}$$

- b. Sensitividad de los costos de operación  $F$  con respecto a varia-

bles eléctricas como de consumo  $C_i$  en el nodo  $i$  y la generación de potencia activa  $P_j$  en el nodo  $j$ .

$$\frac{\Delta F}{\Delta C_i} ; \frac{\Delta F}{\Delta P_j}$$

El primer tipo de relaciones sensitivas son las que se utilizará en posteriores análisis; para lo cual se requiere de la matriz Jacobiana asociada con las ecuaciones de flujos de potencia. Las relaciones sensitivas del segundo tipo no se utilizará en el presente trabajo.

### 2.2.2 Flujo Optimo

El estudio de flujos óptimos permite formular el flujo de potencia optimizándolo en algún sentido y cumpliendo un conjunto de restricciones. En general, cualquier problema de optimización (maximizar o minimizar) equivale a plantear una función objetivo y sus restricciones.

En la formulación de flujos óptimos las funciones objetivo generalmente son [1]:

- Minimizar costos de generación.
- Minimizar pérdidas.

Cada una de las funciones objetivo son importantes en la operación y planificación del sistema de potencia al minimizar costos de generación, minimizar pérdidas o ambos a la vez, es decir se trata de conseguir un modelo del sistema de potencia mediante el cuál se optimice el

funcionamiento del mismo, esto permite que el sistema opere en las mejores condiciones tanto técnicas como económicas para una operación actual o futura del sistema eléctrico de potencia. La base matemática del flujo óptimo, basa su formulación en una programación no-lineal - [6].

Particularizando el flujo óptimo; si previamente se considera que un flujo óptimo de potencia activa ha sido encontrado, es decir que se ha minimizado los costos de generación; es necesario que el sistema opere en las mejores condiciones técnicas lo que se consigue, si se realiza un flujo óptimo de potencia reactiva. Esto ha hecho, que el control de potencia reactiva ha sido reconocido como un factor importante en la planificación y operación de los sistemas eléctricos de potencia [16].

El método propuesto para un control óptimo del flujo de potencia reactiva en el sistema, tiene dos ventajas sobre otros métodos analizados.

- a. Utiliza un modelo lineal; la principal ventaja ha sido la problemática de las propiedades de convergencia de los métodos alternativos no-lineales [10].
- b. Permite optimizar adecuadamente el uso de fuentes de potencia reactiva conectables en pasos, tales como compensadores estáticos, los cuales son dificultoso o no son considerados por otros métodos alternativos [2].

### 2.2.3 Flujo Óptimo de Potencia Reactiva.

El control de potencia reactiva en sistemas eléctricos de potencia ha crecido en importancia por varias razones [1].

- a. La necesidad de mantener magnitudes adecuadas de voltaje en todas las barras del sistema con el objeto de mantener índices de calidad aceptables.
- b. Los requerimientos de una operación más eficiente debido a incrementos de costos de combustible y costos operativos. Para una distribución dada de potencia activa de generación se puede minimizar las pérdidas activas en la red, mediante la optimización del flujo de potencia reactiva.
- c. Los requerimientos cada vez mayores de transferencia de potencia activa, pueden ocasionar problemas de inestabilidad y de colapso de voltaje. El control de potencia reactiva es muy importante en estos casos.

Para el control de la optimización se requiere de la división de las variables del sistema en variables de control y variables de estado. El método lineal aplicado para el flujo óptimo de potencia reactiva utiliza relaciones de sensibilidad del sistema de potencia para establecer: la función objetivo para minimizar las pérdidas; restricciones de desigualdad, como los límites mínimos y máximos de las variables de control; restricciones funcionales, para tomar en cuenta los

límites mínimos y máximos de las variables de estado. El ajuste óptimo de las variables de control se encuentra aplicando el Método Simplex en programación lineal para resolver la función objetivo y al mismo tiempo que satisfagan las restricciones del problema.

El flujo óptimo de potencia se realiza en forma independiente para una distribución dada de potencia activa y en el mejor de los casos a partir de un flujo óptimo de potencia activa, dependiendo del estado del sistema.

#### 2.2.4 Planteamiento del problema del flujo óptimo de Potencia Reactiva

La distribución de la potencia reactiva en el sistema puede ser controlada en el sistema de potencia por una manipulación adecuada de las siguientes variables de control.

- a. Taps de los transformadores
- b. Magnitudes de voltajes en las barras de generación, asociados con condensadores sincrónicos.
- c. Fuentes de potencia reactiva conectables en pasos (capacitores y/o reactores shunt).

Un transformador a más de su importante función de transformar el nivel de tensión, también puede ejecutar ajustes pequeños en la magnitud de voltaje, generalmente van de +10% del voltaje nominal cuando éstos poseen cambiador de taps lo que en muchos casos es suficiente para mantener una buena regulación en las barras del transformador y las más



cercanas a él [1]. Dependiendo de la posición del taps en el transformador, se puede controlar el flujo de potencia reactiva entre las barras a las que se encuentra conectada.

De los estudios de flujos de potencia de un sistema así como de estudios de sensibilidad del mismo, se puede establecer que:

- Cambios en la magnitud de voltaje en una barra de generación afecta esencialmente la generación de potencia reactiva y por lo tanto el flujo de potencia reactiva por las líneas de transmisión.
- Cambios en la inyección de la potencia reactiva en una barra (donde está localizado las fuentes de potencia reactiva) afectan mayormente a la magnitud de voltaje de dicha barra y en menor grado a las demás y por lo tanto el flujo de potencia por las líneas de transmisión [1].

Cada una de las variables de control tienen sus límites mínimos y máximos de operación. Cualquier cambio que se realice en estas variables pueden hacer cambiar los niveles de voltaje y la generación de reactivos y por consiguiente las pérdidas del sistema.

El control del sistema de potencia que realiza el operador sobre: los taps de transformadores, magnitud de los voltajes en las barras de generación o sobre las fuentes de potencia reactiva conectables en pasos está limitado por las características operativas del sistema; es decir, por los límites de operación en las variables dependientes o de estado, como:

- a. La generación de potencia reactiva en los generadores.
- b. Los niveles de la magnitud de voltaje en las barras de carga.

Estas limitaciones son referidas a las restricciones operativas del sistema.

El problema de minimizar las pérdidas activas de transmisión y mejorar los perfiles de voltaje del sistema es encontrar los ajustes necesarios a estas variables de control simultáneamente satisfaciendo las restricciones de operación del sistema y los límites de operación de las variables de control.

### 2.3 PLANTEAMIENTO MATEMATICO PARA LA OBTENCION DE LA FUNCION OBJETIVO LINEAL Y DE RESTRICCIONES.

El método propuesto para un control óptimo del flujo de potencia reactiva, emplea relaciones de sensibilidad del sistema de potencia. El planteamiento matemático se basa en la matriz Jacobiano del flujo de potencia. Se forma la matriz Jacobiano aumentado, por las ecuaciones del flujo de potencia a través de los transformadores con cambiador de taps, la inversa de esta matriz se define como matriz de sensibilidad. Partes de esta matriz de sensibilidad son necesarios para plantear el problema de optimización lineal, tanto la función objetivo como las restricciones funcionales del sistema en términos de las variables de control [2].

La solución al minimizar la función objetivo sujeta a las restriccio-

nes de desigualdad de las variables de control y a las restricciones operativas del sistema, dará los ajustes necesarios a las variables de control, para mejorar los perfiles de voltaje de la red y minimizar las pérdidas activas de transmisión, lo que significa reducir la generación de potencia activa de la barra oscilante, mejorando el despacho de potencia activa definido inicialmente.

Como las variaciones de la potencia activa  $P$ , están fuertemente ligadas con los ángulos  $\theta$  y que las variaciones de la potencia reactiva  $Q$  con las magnitudes de voltaje  $V$  del sistema en el presente caso, para minimizar las pérdidas y mejorar los perfiles de voltaje de la red del sistema, se parte de un despacho de potencia activa definido, no habrá variaciones de los ángulos  $\theta$  pero si de la potencia reactiva, por ello este problema también se conoce como optimización de la potencia reactiva [3].

### 2.3.1 Función Objetivo.

El objetivo del flujo óptimo de potencia reactiva es minimizar las pérdidas activas  $P_L$  en el sistema por un control en: taps de los transformadores, magnitudes de voltaje en las barras de tensión controlada asociados con condensadores sincrónicos, magnitud de voltaje en la barra oscilante y por medio de fuentes de potencia reactiva conectables en pasos mediante un modelo lineal, por lo que, es necesario expresar las pérdidas activas del sistema como una función lineal de las variables de control.

Las pérdidas activas del sistema está dado por la ecuación (15) que representa la suma de las potencias activas netas en cada barra:

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (27)$$

Siendo  $P_i$  una función no-lineal de las variables de control:

- de la posición del taps de los transformadores  $t$ , por los términos en la formación de la admitancia de barra  $Y_B$  (ver apéndice No. 1).
- de los voltajes del sistema por el producto  $E_i \cdot E_j$
- de las fuentes de potencia reactiva: por cuanto cambios en la potencia reactiva en una barra afecta a las magnitudes de voltaje.  $P_i$  es no-lineal por la condición anterior.

$$P_L = P_L(tpq, V_i, Q_{m+x}) \quad (28)$$

donde  $tpq$  taps del transformador conectado entre las barras  $p$  y  $q$ .

$V_i$  son las magnitudes de los voltajes en las barras de generación  $i=1,2,\dots,m$

$Q_{m+x}$  potencia reactiva de la fuente de VAR conectables en pasos colocado en la barra de carga  $m+x$ ;  $m < m+x \leq n$ .

Analizando un flujo óptimo de potencia activa (caso base), en el que se especifica las magnitudes de las variables de control, obtendré-

mos en la red o en el sistema en estudio unas pérdidas iniciales -  $P_{L0}$ :

$$P_{L0} = P_{L0}(tpq_0, V_{i0}, Q_{m+x_0}) \quad (29)$$

Si se hace una variación muy pequeña alrededor del caso base en las variables de control, se obtendrá como resultado del flujo de potencia nuevas pérdidas  $P_{L1}$ , de tal manera que se considere que la variación en las pérdidas  $\Delta P_L = P_{L1} - P_{L0}$  como un segmento lineal en la curva de pérdidas.

$$P_{L1} = P_{L1}(tpq_1, V_{i1}, Q_{m+x_1}) \quad (30)$$

siendo:

$$tpq_1 = tpq_0 + \Delta tpq$$

$$V_{i1} = V_{i0} + \Delta V_i \quad i=1, \dots, m \quad (31)$$

$$Q_{m+x_1} = Q_{m+x_0} + \Delta Q_{m+x} \quad m < m+x \leq n$$

Reemplazando (31) en (30) se tiene:

$$P_{L1} = P_{L1}(tpq_0 + \Delta tpq, V_{i0} + \Delta V_i, Q_{m+x_0} + \Delta Q_{m+x}) \quad (32)$$

Expandiendo (32) en series de Taylor alrededor del valor nominal -  $P_{L0}(tpq_0, V_{i0}, Q_{m+x_0})$  y truncando la serie en la primera potencia - por cuanto  $\Delta tpq$ ,  $\Delta V_i$ ,  $\Delta Q_{m+x}$  son magnitudes muy pequeñas, y en forma general considerando el número de transformadores con cambiador de taps y el número de las fuentes de potencia reactiva conectado en las barras de carga, tenemos:

$$P_{L1} = P_{L0} + \sum_{\alpha} \Delta t_{pq} \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} + \sum_{i=1}^m \Delta V_i \frac{\partial P_L}{\partial V_i} + \sum_{\beta} \Delta Q_{m+x} \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \quad (33)$$

$$\text{si} \quad \Delta P_L = P_{L1} - P_{L0} \quad (34)$$

$$\Delta P_L = \sum_{\alpha} \Delta t_{pq} \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} + \sum_{i=1}^m \Delta V_i \frac{\partial P_L}{\partial V_i} + \sum_{\beta} \Delta Q_{m+x} \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \quad (35)$$

$\alpha$  es el número de transformadores con cambiador de taps

$\beta$  es el número de fuentes de potencia reactiva conectables en pa sos.

donde

$\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$  es la sensibilidad de las pérdidas con respecto al taps del transformador conectado entre las barras p y q

$\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$  es la sensibilidad de las pérdidas con respecto a los voltajes en las barras de generación  $i=1,2,\dots,m$ .

$\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$  es la sensibilidad de las pérdidas con respecto a la potencia reactiva de las fuentes de potencia reactiva, conectado en la barra de carga  $m+x$ .

La ecuación (35) es lineal, representa los cambios en las pérdidas del sistema como función de incrementos lineales en las variables de control; entonces el objetivo es minimizar  $\Delta P_L$ .

Los coeficientes de la función objetivo  $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$  son calculados en base a las relaciones de sensibilidad del flujo de potencia, y a manera de comprobación de estos coeficientes se presentan una segunda alternativa mediante flujos de potencia.

### 2.3.1.1 Cálculo de los coeficientes de la función objetivo mediante relaciones de sensibilidad del sistema de potencia.

#### 2.3.1.1.1 Sensibilidad de las pérdidas con respecto a los taps de los transformadores ( $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ )

Consideremos un transformador conectado entre las barras p y q, tomando en cuenta que el cambiador de taps está en la barra p y que q es la barra controlada.

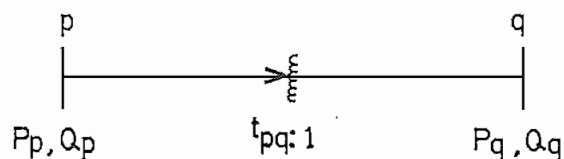
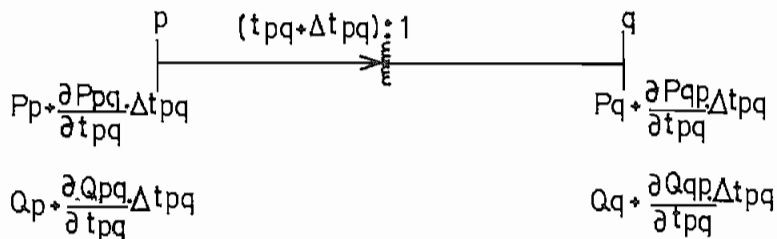


Fig. No.2

Donde  $P_p, Q_p$  la potencia activa y reactiva, especificadas en la barra p.

$P_q, Q_q$  la potencia activa y reactiva, especificados en la barra q.

Un incremento en el taps del transformador  $\Delta t_{pq}$ , resulta en un incremento del flujo de potencia entre p y q, debido a que se modifican las admitancias en el circuito equivalente por la nueva posición del taps, cambiando la inyección de potencia en las barras p y q, pero como la potencia activa y reactiva son fijas, entonces estos cambios de potencia tienden a ser eliminados por una inyección de potencia de signo opuesto, como se indica en la Fig.No.3. Esta inyección de potencia permite determinar el coeficiente de sensibilidad que se busca.



Representación de un transformador con inyección de potencia cuando hay un cambio  $\Delta t_{pq}$  en el taps.

Fig. No.3

Este incremento de potencia en la barra p es:

$$\Delta P_p = P_p - P_p(\text{calc}) \quad (36)$$

$$\Delta Q_p = Q_p - Q_p(\text{calc}) \quad (37)$$

donde:

$P_p$  es la potencia activa especificada en la barra p

$P_p(\text{calc})$  es la potencia activa calculado en la barra p.

$Q_p$  es la potencia reactiva especificada en la barra p.

$Q_p(\text{calc})$  es la potencia reactiva calculado en la barra p.



Reemplazando

$$\Delta P_p = P_p - \left( P_p + \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) = - \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \quad (38)$$

$$\Delta Q_p = Q_p - \left( Q_p + \frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} \Delta t_{pq} \right) = - \frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \quad (39)$$

Similarmente en la barra q:

$$\Delta P_q = P_q - P_q \text{ (calc)} \quad (40)$$

$$\Delta Q_q = Q_q - Q_q \text{ (calc)} \quad (41)$$

Reemplazando:

$$\Delta P_q = P_q - \left( P_q + \frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) = - \frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \quad (42)$$

$$\Delta Q_q = Q_q - \left( Q_q + \frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) = - \frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \quad (43)$$

La variación de las pérdidas activas como resultado de variar la posición del taps es:

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \quad (44)$$

estará dado justamente por las variaciones de la potencia activa y reactiva en las barras p y q.

Por lo tanto:

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial P_p} \cdot \Delta P_p + \frac{\partial P_L}{\partial Q_p} \Delta Q_p + \frac{\partial P_L}{\partial P_q} \Delta P_q + \frac{\partial P_L}{\partial Q_q} \cdot \Delta Q_q \quad (45)$$

Remplazando en (45), las ecuaciones (38), (39), (42), (43):

$$\begin{aligned} \Delta P_L = & \frac{\partial P_L}{\partial P_p} \left( - \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial Q_p} \left( - \frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} \Delta t_{pq} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial P_q} \left( - \frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) + \\ & + \frac{\partial P_L}{\partial Q_q} \left( - \frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

Iguando (44) y (46), eliminando  $\Delta t_{pq}$ , se tiene el coeficiente buscado.

$$\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} = \frac{\partial P_L}{\partial P_p} \left( - \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial Q_p} \left( - \frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial P_q} \left( - \frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial Q_q} \left( - \frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}} \right) \quad (47)$$

Donde  $\frac{\partial P_L}{\partial P_p}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_p}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial P_q}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_q}$  y  $\frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}}$  son calculados en el Apéndice A.

### 2.3.1.1.2 Sensitividad de las pérdidas con respecto al voltaje terminal en las barras de generación.

Sensitividad de las pérdidas con respecto al voltaje terminal en las barras de tensión controlada  $\left( \frac{\partial P_L}{\partial V_i} \right)_{i=2,3,..,m}$

El modificar el voltaje terminal en un generador resulta en modificar la inyección de la potencia reactiva en esa barra [2].

Por lo tanto la sensitividad de las pérdidas en el sistema con res-

pecto al voltaje en la barra de generación es:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} = \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \quad i = 2, 3, \dots, m \quad (48)$$

donde  $\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$   $i = 2, 3, \dots, m$  es el término calculado en la matriz Jacobiano del flujo de potencia ecuación (89). El término  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$   $i=2, 3, \dots, m$  es calculado en la ecuación (97), el cual es una función de la sensibilidad de las pérdidas con respecto a los ángulos  $\theta$  y de los voltajes  $V$  del sistema.  $\frac{P_L}{\partial V_i}$  calculado, refleja la sensibilidad de las pérdidas en el sistema entero, en contraste con  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$  calculado en la ecuación (100) en el que refleja las pérdidas incrementales de la parte de el sistema conectado directamente a la barra  $i$ .

#### Sensibilidad de las pérdidas con respecto al voltaje terminal en la barra oscilante.

Cualquier cambio en la magnitud de voltaje de la barra oscilante resulta en modificar la generación de la potencia reactiva en las barras de generación, este incremento está dado por:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial V_1} \quad i=2, 3, \dots, m$$

Además afecta a la inyección de la potencia reactiva, de las barras de carga conectado a la barra oscilante, los que tienen que ser eliminados, en razón de que la potencia reactiva en esas barras es fija, es decir:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_j} \left( - \frac{\partial Q_j}{\partial V_1} \right) \quad j = \# \text{ de barras de carga conectada a la barra oscilante}$$

Donde la sensibilidad de las pérdidas con respecto al voltaje en la barra oscilante es:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_1} = \sum_j \frac{\partial P_L}{\partial Q_j} \left( - \frac{\partial Q_j}{\partial V_1} \right) + \frac{\partial P_L}{\partial Q_2} \cdot \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} + \dots + \frac{\partial P_L}{\partial Q_m} \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial V_1} \quad (49)$$

Los términos  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_j}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_2}$ , ...,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_m}$  son calculados por la ecuación (97);  $\frac{\partial Q_j}{\partial V_1}$ , ..., es calculado en el Jacobiano del flujo de potencia;  $\frac{\partial Q_2}{\partial V_1}$ , ...,  $\frac{\partial Q_m}{\partial V_1}$  son obtenidos en la ecuación (72).

### 2.3.1.1.3

Sensitividad de las Pérdidas con respecto a las fuentes de potencia reactiva conectables en pasos  $\left( \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \right)$

La sensibilidad de las pérdidas con respecto a la inyección de la potencia reactiva en la barra  $m+x$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$  está dado directamente por la ecuación (97). (Ver apéndice A)

### 2.3.1.2 Método alternativo de calcular los coeficientes de la función objetivo mediante flujos de potencia [3]

Una segunda alternativa de calcular los coeficientes de la función objetivo mediante flujos de potencia es también presentado, el cual se detalla a continuación.

De la ecuación (35);

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} \cdot \Delta t_{pq} + \frac{\partial P_L}{\partial V_i} \cdot \Delta V_i + \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \cdot \Delta Q_{m+x} \quad (50)$$

donde  $\Delta P_L = P_L - P_{L0}$

$$\Delta t_{pq} = t_{pq} - t_{pq0} \quad (51)$$

$$\Delta V_i = V_i - V_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\Delta Q_{m+x} = Q_{m+x} - Q_{m+x0} \quad m < m+x < m$$

Siendo  $P_{L0} = P_{L0}(t_{pq0}, V_{i0}, Q_{m+x0})$  las pérdidas del sistema para el caso base. Realizando flujos de potencia alrededor del caso base, - modificando  $t_{pq}$ ,  $V_i$ ,  $Q_{m+x}$ ; de tal manera que el incremento en las - pérdidas  $\Delta P_L = P_L - P_{L0}$ , se considere como un segmento lineal en la curva de pérdidas; se puede calcular  $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$ .

Supongamos que realizamos  $r$  flujos de potencia del caso base; se tiene:

FLUJOS

$$\begin{array}{l} 1 \\ \vdots \\ r \end{array} \quad \begin{array}{l} P_{L1} - P_{L0} \\ \vdots \\ P_{Lr} - P_{L0} \end{array} = \begin{array}{l} \frac{P_L}{\partial t_{pq}} \Delta t_{pq} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} \Delta t_{pq} \end{array} + \begin{array}{l} \frac{P_L}{\partial V_1} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_1} \Delta V_1 \end{array} + \begin{array}{l} \frac{P_L}{\partial V_2} \Delta V_2 + \dots \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_2} \Delta V_2 + \dots \end{array} + \begin{array}{l} \frac{P_L}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{P_L}{\partial Q_{m+x}} \Delta Q_{m+x} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \Delta Q_{m+x} \end{array} \quad (52)$$

Planteándose un sistema de ecuaciones en las que se conocen  $P_{LK}$ ,  $P_{L0}$ ,  $\Delta t_{pqk}$ ,  $\Delta V_{ik}$ ,  $\Delta Q_{m+x}$ , siendo las incógnitas:  $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$  para --

$i=1,2,\dots,m$  y para  $K=1,2,\dots,r$  los flujos de potencia que se han corrido.

Expresando (52) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} P_{L1} - P_{L0} \\ \vdots \\ P_{Lr} - P_{L0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t p q_1 & \Delta V_{11} & \Delta V_{21} \dots \Delta V_{m1} & \Delta Q_{m+x1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta t p q r & \Delta V_{1r} & \Delta V_{2r} \dots \Delta V_{mr} & \Delta Q_{m+xr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial t p q \\ \partial P_L / \partial V_1 \\ \partial P_L / \partial V_2 \\ \vdots \\ \partial P_L / \partial V_m \\ P_L / \partial Q_{m+x} \end{bmatrix} \quad (53)$$

En forma compacta se tiene:

$$Y = |A| X$$

$|A|$  es una matriz singular puesto que no es cuadrada y por tanto no existe la inversa no pudiéndose encontrar el vector incógnita  $X$ , la razón es que se necesitarían correr por lo menos tantos flujos como incógnitas ( $\#$  Incógnitas =  $\#$  variables de control =  $\#$  Transformadores con cambiador de taps +  $\#$  barras de generación +  $\#$  fuentes de potencia reactiva conectables en pasos); dependiendo del tamaño del sistema se pueden correr más flujos que incógnitas con el fin de disponer de un grupo redundante de ecuaciones y por lo tanto valores más apropiados para el vector  $X$  o correr unos pocos flujos, siendo entonces  $|A|$  una matriz singular.

La técnica para resolver el problema de la inversa para los casos que se quiera encontrar un funcional de determinado orden ( $P_L$ ) que mejor

cumpla el hecho real, físico o medido es la técnica de la estimación de los mínimos cuadrados lo que establece que la mejor estimación para  $X$  es:

$$X = |A^t A|^{-1} A^t Y \quad (55)$$

Donde  $|A^t A|$  es una matriz cuadrada, siendo  $A$  singular,  $|A^t A|^{-1} A^t$  es la inversa de  $A$ .

Para un sistema de ecuaciones  $Y = AX$ :

Si la matriz  $A$  tiene más hileras que columnas, la pseudo inversa se define como:

$$A_s = |A^t A|^{-1} A^t$$

Necesitándose que  $A^t.A$  sea no singular, en la solución de ecuaciones lineales este es el caso en el que hay más ecuaciones que incógnitas, la solución para  $X = A_s Y$  es la mejor en el sentido de los mínimos cuadrados. Si  $A$  tiene más columnas que hileras, la pseudo inversa se define como:

$$A_s = A^t |A A^t|^{-1}$$

Siendo el caso en el que hay menos ecuaciones que incógnitas, esta situación lleva a un infinito número de soluciones de mínimos cuadrados, la solución resultante de la pseudo inversa es también la mejor en el sentido de los mínimos cuadrados.

Para el presente análisis se considera el caso que hay más hileras que columnas; es decir, se realiza un mayor número de flujos alrededor del caso base que el número de incógnitas. Entonces la ecuación (55) da la solución para  $X$ , es decir:  $\frac{\partial PL}{\partial t_{pq}}, \frac{\partial PL}{\partial V_i}, \frac{\partial PL}{\partial Q_{m+x}}$ .

El objetivo de esta segunda alternativa es con el propósito de realizar una verificación entre los coeficientes obtenidos mediante relaciones de sensibilidad los que son calculados directamente y los obtenidos mediante flujos de potencia. Los resultados se dan en el siguiente capítulo.

### 2.3.2 Restricciones de las variables de Estado.

Las restricciones funcionales del sistema para el flujo óptimo de potencia reactiva toman en cuenta los límites mínimos y máximos de las variables de estado: la generación de potencia reactiva en las barras de tensión controlada, en la barra oscilante, como también los niveles de voltaje en las barras de carga, que se puede tener como respuesta del sistema a los incrementos de las variables de control, por lo que, se expresa a las variables de estado como función de las variables de control. Estos límites en forma gráfica son:

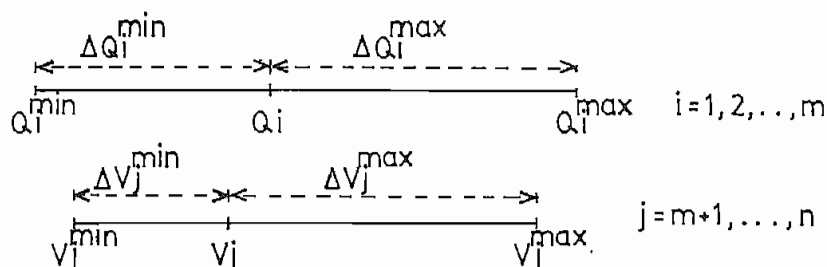


Fig. No. 4



donde:

$Q_i^{\min}$ ,  $Q_i^{\max}$  es la generación de potencia reactiva mínima, máxima en las barras de tensión controlada y en la barra oscilante.

$V_j^{\min}$ ,  $V_j^{\max}$  es el nivel de voltaje mínimo y máximo en las barras de carga.

Los máximos decrementos e incrementos en las variables de estado en un punto de operación  $Q_i$ ,  $V_j$ ; de la figura No.4 son:

$$\Delta Q_i^{\min} = Q_i^{\min} - Q_i \quad (58)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$\Delta Q_i^{\max} = Q_i^{\max} - Q_i \quad (59)$$

$$\Delta V_j^{\min} = V_j^{\min} - V_j \quad (60)$$

$$j = m+1, \dots, n$$

$$\Delta V_j^{\max} = V_j^{\max} - V_j \quad (61)$$

Es decir:

$$\Delta Q_i^{\min} \leq \Delta Q_i \leq \Delta Q_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (62)$$

$$\Delta V_j^{\min} \leq \Delta V_j \leq \Delta V_j^{\max} \quad j = m+1, \dots, n \quad (63)$$

Las desigualdades (62) y (63) representan los cambios mínimo y máximo que pueden tener las variables de estado para el flujo óptimo de potencia reactiva cuando cambian las magnitudes de las variables de control. Entonces es necesario que  $\Delta Q_i$ ,  $\Delta V_j$  sea función lineal de  $\Delta t_{pq}$ ,

$\Delta V_i, \Delta Q_{m+x}$ ; para lo cual, se sigue el siguiente procedimiento.

La potencia neta activa y reactiva puede expresarse como una función de los ángulos, de la posición de taps del transformador  $tpq$  conectado entre las barras  $p$  y  $q$ , y de los voltajes del sistema; en forma similar, la ecuación del flujo de potencia activa entre las barras  $p$  y  $q$  donde está localizado el transformador con cambiador de taps, es decir:

$$P_i = P_i(\theta_1, \dots, \theta_n, tpq, V_1, \dots, V_n) \quad i=1, \dots, n \quad (64)$$

$$P_{pq} = P_{pq}(\theta_1, \dots, \theta_n, tpq, V_1, \dots, V_n) \quad (65)$$

$$Q_i = Q_i(\theta_1, \dots, \theta_n, tpq, V_1, \dots, V_n) \quad (66)$$

Aplicando el método de solución de sistemas no-lineales de Newton-Raphson se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial t_{pq}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial t_{pq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta P_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} \\ \frac{\partial P_{pq}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_{pq}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial t_{pq}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial t_{pq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

(67)

La matriz de la ecuación (67) se lo define como matriz Jacobiano aumentado. La relación inversa es:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial \theta_1}{\partial P_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial P_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial P_{pq}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial P_{pq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial \theta_1}{\partial Q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{pq}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial t_{pq}}{\partial P_n} \\ \frac{\partial t_{pq}}{\partial P_{pq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{pq}}{\partial P_{pq}} \\ \frac{\partial t_{pq}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial t_{pq}}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{pq} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial P_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_{pq}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial P_{pq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$

(68)

La inversa de la matriz Jacobiano aumentado se lo define como matriz de sensibilidad [S]. Un cambio en la posición del taps del transformador conectado entre las barras p y q modifica la admitancia m $\bar{u}$ tua y propia entre dichas barras, ésto hace cambiar el flujo de potencia en la línea de p a q. Un cambio en la magnitud de los voltajes en las barras de tensión controlada y en la barra oscilante, modifica la generación de potencia en dichas barras:  $\Delta Q_i \quad i=1,2,\dots,m$ . Para el caso que exista una fuente de potencia reactiva conectables en pasos en una barra de carga m+x, se modifica la inyección de potencia reactiva en esa barra, en  $\Delta Q_{m+x}$ .

Considerando lo anterior y tomando en cuenta que la potencia neta activa permanece fija en todas las barras excepto en la oscilante (puesto que no se conoce las pérdidas del sistema), y que la potencia neta reactiva permanece fija en el resto de las barras de carga donde no existe compensadores estáticos; para el flujo óptimo de potencia reactiva, se tiene la nueva matriz [S']:

$$\begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{pq}}{\partial P_{pq}} & \frac{\partial t_{pq}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial t_{pq}}{\partial Q_m} & \frac{\partial t_{pq}}{\partial Q_{m+x}} \\ \frac{\partial V_1}{\partial P_{pq}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_m} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{m+x}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial P_{pq}} & \frac{\partial V_n}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial Q_m} & \frac{\partial V_n}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix}$$

Intercambiando variables dependientes o de estado al lado izquierdo y las variables de control al lado derecho de la ecuación (69) se tiene la matriz [S"]:

$\Delta P_{pq}$	$\frac{\partial P_{pq}}{\partial \tau_{pq}}$	$\frac{\partial P_{pq}}{\partial V_1} \dots \dots \dots$	$\frac{\partial P_{pq}}{\partial V_m}$	$\frac{\partial P_{pq}}{\partial Q_{m+x}}$	$\Delta \tau_{pq}$
$\Delta Q_1$	$\frac{\partial Q_1}{\partial \tau_{pq}}$	$\frac{\partial Q_1}{\partial V_1} \dots \dots \dots$	$\frac{\partial Q_1}{\partial V_m}$	$\frac{\partial Q_1}{\partial Q_{m+x}}$	$\Delta V_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\Delta Q_m$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \tau_{pq}}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial V_1} \dots \dots \dots$	$\frac{\partial Q_m}{\partial V_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial Q_{m+x}}$	$\Delta V_m$
$\Delta V_{m+1}$	$\frac{\partial V_{m+1}}{\partial \tau_{pq}}$	$\frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_1}$	$\frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_m}$	$\frac{\partial V_{m+1}}{\partial Q_{m+x}}$	$\Delta Q_{m+x}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$\Delta V_n$	$\frac{\partial V_n}{\partial \tau_{pq}}$	$\frac{\partial V_n}{\partial V_1} \dots \dots \dots$	$\frac{\partial V_n}{\partial V_m}$	$\frac{\partial V_n}{\partial Q_{m+x}}$	

(70)

Seleccionando únicamente a las variables de estado y a las variables de control:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_1}{\partial Q_{m+x}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{m+1}}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_m} & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial Q_{m+x}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial V_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial V_m} & \frac{\partial V_n}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix}$$

(71)

$$\begin{bmatrix} S_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_1}{\partial Q_{m+x}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix}$$

(72)

$$\begin{bmatrix} S_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{m+1}}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial V_m} & \frac{\partial V_{m+1}}{\partial Q_{m+x}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial V_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial V_m} & \frac{\partial V_n}{\partial Q_{m+x}} \end{bmatrix}$$

(73)

Haciendo las sustituciones de las ecuaciones (71), (72), (73) en las desigualdades (62) y (63) se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} S_1^* \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \hline \Delta V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \hline \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\max} \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{m+1}^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} S_2^* \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \hline \Delta V_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \hline \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1}^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\max} \end{bmatrix} \quad (75)$$

Las desigualdades (74) y (75) representan las restricciones de los incrementos en las variables de estado en función de los incrementos de las variables de control, las que forman las restricciones funcionales del sistema.

El flujo de potencia reactiva entre las barras p y q donde esta localizado un transformador con cambiador de taps puede expresarse como una función: de los ángulos, de la posición del taps del transformador y de los voltajes del sistema al igual que el flujo de potencia acti-

va ecuación (65); pero como la función minimiza las pérdidas activas, es necesario considerar el efecto del flujo de potencia activa entre las barras  $p$  y  $q$  para formar las restricciones, el cual, permite relacionar las variables dependientes y las variables de control.

### 2.3.3 Restricciones de las Variables de Control.

Las restricciones de: la posición del taps de los transformadores, de los voltajes en las barras de tensión controlada, barra oscilante y en las fuentes de potencia reactiva en las barras de carga; constituyen los límites de operación mínimo y máximo de cada variable. Expresando en forma gráfica:

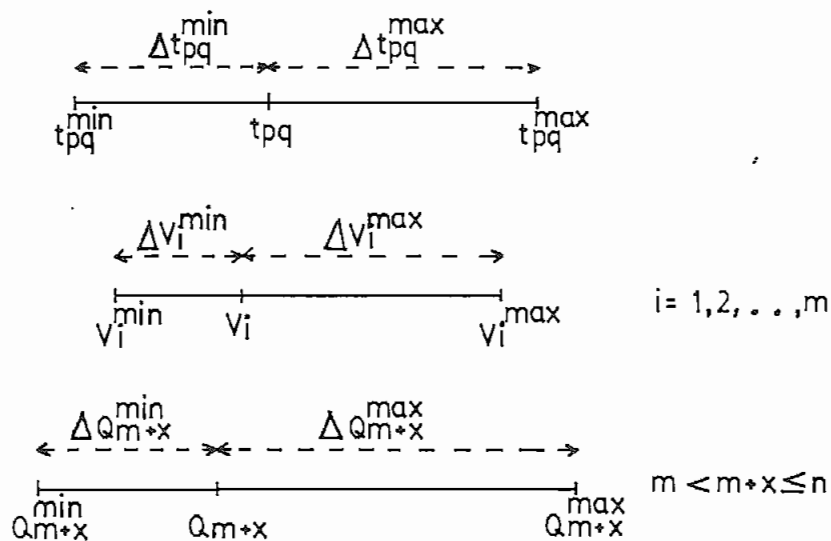


Fig. No.5

$tpq$ ,  $V_i$ ,  $Q_{m+x}$  es la posición de las variables de control en un punto de operación; los decrementos e incrementos de estas variables son:



$$\begin{aligned} \Delta t_{pq}^{\min} &= t_{pq}^{\min} - t_{pq} \\ \Delta t_{pq}^{\max} &= t_{pq}^{\max} - t_{pq} \\ \Delta V_i^{\min} &= V_i^{\min} - V_i \\ \Delta V_i^{\max} &= V_i^{\max} - V_i \\ \Delta Q_{m+x}^{\min} &= Q_{m+x}^{\min} - Q_{m+x} \\ \Delta Q_{m+x}^{\max} &= Q_{m+x}^{\max} - Q_{m+x} \end{aligned} \quad (76)$$

Por lo que, las restricciones de las variables de control está dado por:

$$\Delta t_{pq}^{\min} \leq \Delta t_{pq} \leq \Delta t_{pq}^{\max} \quad (77)$$

$$\Delta V_i^{\min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,m \quad (78)$$

$$\Delta Q_{m+x}^{\min} \leq \Delta Q_{m+x} \leq \Delta Q_{m+x}^{\max} \quad m < m+x \leq n \quad (79)$$

#### 2.3.4 Modelo para la solución del flujo óptimo de potencia reactiva.

El modelo para el control óptimo de potencia reactiva minimiza las pérdidas activas de transmisión (35); sujeto a las restricciones de las variables de estado, ecuaciones (74), (75); y de las variables de

control ecuaciones (77), (78), (79). El problema general para la minimización de las pérdidas activas puede formularse en forma simplificada como:

$$\min \Delta P_L = \begin{matrix} \frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial P_L}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_L}{\partial V_m} & \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}} \end{matrix} \begin{matrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{matrix}$$

(80)

Sujeto a las restricciones:

$$\begin{matrix} \begin{matrix} \Delta Q_1^{\min} \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\min} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \Delta V_{m+1}^{\min} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\min} \end{matrix} \\ \Delta t_{pq}^{\min} \\ \begin{matrix} \Delta V_1^{\min} \\ \vdots \\ \Delta V_m^{\min} \end{matrix} \\ \Delta Q_{m+x}^{\min} \end{matrix} \begin{matrix} S_1^* \\ S_2^* \\ 1 \\ \begin{matrix} 1 \\ \cdot \\ 1 \end{matrix} \\ 1 \end{matrix} \begin{matrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} \Delta Q_1^{\max} \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\max} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \Delta V_{m+1}^{\max} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\max} \end{matrix} \\ \Delta t_{pq}^{\max} \\ \begin{matrix} \Delta V_1^{\max} \\ \vdots \\ \Delta V_m^{\max} \end{matrix} \\ \Delta Q_{m+x}^{\max} \end{matrix}$$

(81)

El número de restricciones es igual al número de barras del sistema más el número de las variables de control; y el número de las variables de decisión es igual al número de las variables de control.

Como la función objetivo  $E_c(80)$ , las restricciones  $E_c(81)$  son lineales y el número de las variables de decisión es menor que el número de restricciones; es decir para minimizar las pérdidas dentro de la región factible establecida por las restricciones, se resuelve aplicando programación lineal; y el método aplicado está basado en el algoritmo Simplex desarrollado por Dantzing (Ref.12).

La solución del problema de la optimización lineal da como resultado los cambios requeridos en las variables de control, para disminuir las pérdidas y mejorar los perfiles de voltaje. La posición de las variables de control es modificada y un nuevo flujo de potencia por Newton-Raphson es realizado, cuyas pérdidas activas del sistema serán menores. Esto completa una iteración del problema del control del flujo óptimo de potencia reactiva.

Durante el proceso iterativo de solución, las restricciones son cumplidas y las pérdidas del sistema son reducidas hasta que en futuras iteraciones ya no son más posibles.

### 2.3.5 Mejoramiento del Modelo Básico

La técnica de la optimización implementada en el presente estudio es enteramente lineal; optimiza la función objetivo lineal sujeta a un número de restricciones lineales. Esto hace necesario analizar cómo las pérdidas activas del sistema varían en función de las variables de control en su rango de operación.

Las pérdidas del sistema ecuación (28), es función no-lineal de las variables de control por lo expuesto anteriormente. (Véase en el Capítulo III: Efecto de las variables de control en las pérdidas del sistema). Se puede linealizar el incremento de las pérdidas sobre la variación total si se escoge un rango pequeño, esto es posible si los cambios en los taps de los transformadores, en las magnitudes de los voltajes de generación y en las fuentes de potencia reactiva (capacitores o reactores shunt), para un paso en el flujo óptimo de potencia reactiva son pequeños alrededor del punto de operación.

Además los coeficientes de la función objetivo:  $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$   $i=1,2,\dots$ ,  $\dots, m$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$  son válidos únicamente para un pequeño rango de estas variables y no sobre el rango entero de operación como lo indica las ecuaciones (77), (78), (79); por cuanto para hallar esos coeficientes se emplea relaciones de sensibilidad.

Esto hace definir un rango modificado para poder incrementar o disminuir una variable de control del punto de operación en cada paso. En forma gráfica se tiene:

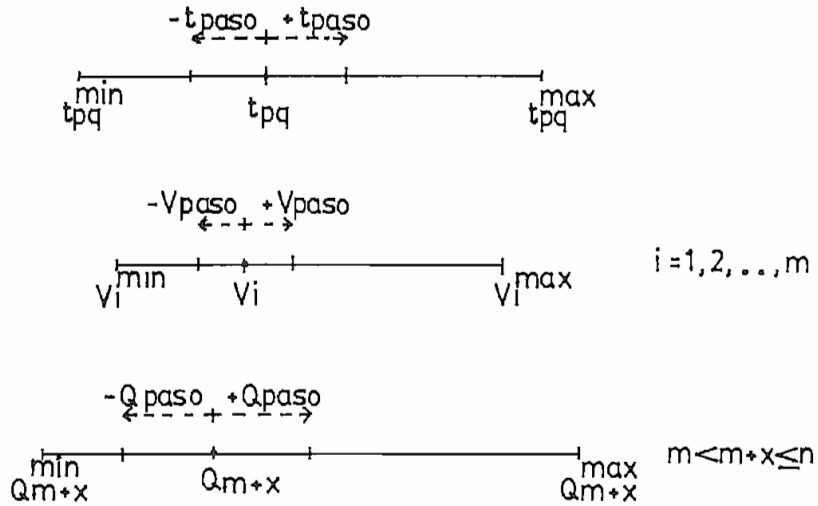


Fig. No. 6

Donde:  $t_{pq}$ ,  $V_i$ ,  $Q_{m+x}$  son las magnitudes de las variables de control en un punto de operación.

$t_{\text{paso}}$  el valor mínimo o máximo que la posición del taps de un transformador puede variar en un paso.

$V_{\text{paso}}$  el valor mínimo o máximo que los voltajes de generación pueden variar en un paso.

$Q_{\text{paso}}$  el valor mínimo o máximo que los capacitores o reactores shunt pueden variar en un paso.

Los cambios mínimos y máximos para un paso en las variables de control son:

$$\Delta t_{pq}^{\min} = - t_{\text{paso}}$$

$$\Delta t_{pq}^{\max} = t_{\text{paso}}$$

$$\Delta V_i^{\min} = - V_{\text{paso}}$$

$$\Delta V_i^{\max} = V_{\text{paso}}$$

$$\Delta Q_{m+x}^{\min} = - Q_{\text{paso}}$$

$$\Delta Q_{m+x}^{\max} = Q_{\text{paso}}$$

Consecuentemente las ecuaciones (77), (78), (79) se convierten en:

$$\boxed{\Delta t_{pq}^{\min}, - t_{\text{paso}}} \leq \boxed{\Delta t_{pq}} \leq \boxed{\Delta t_{pq}^{\max}, t_{\text{paso}}} \quad (83)$$

$$\boxed{\Delta V_i^{\min}, - V_{\text{paso}}} \leq \boxed{\Delta t_{pq}} \leq \boxed{\Delta V_i^{\max}, V_{\text{paso}}} \quad i=1,2,\dots,m \quad (84)$$

$$\boxed{\Delta Q_{m+x}^{\min}, - Q_{\text{paso}}} \leq \boxed{\Delta Q_{m+x}} \leq \boxed{\Delta Q_{m+x}^{\max}, Q_{\text{paso}}} \quad (85)$$

Utilizando estos límites restringidos para las variables de control; puede requerir para un control óptimo de potencia reactiva de muchas iteraciones hasta llegar a la solución; pero debido a que los cambios en las variables de control del sistema pueden ser pequeños; la solución de la programación lineal seguidos por flujos de potencia requiere de pocas iteraciones para que converja. Este procedimiento

en general minimiza el tiempo de computación considerablemente [2].

Valores ideales de:  $t_{\text{paso}}$ ,  $V_{\text{paso}}$ ,  $Q_{\text{paso}}$  son tratados en el siguiente capítulo.

## 2.4 ALGORITMO DE SOLUCION DEL PROBLEMA DE CONTROL OPTIMO DE REACTIVOS.

Una vez que se ha desarrollado el procedimiento matemático para el control óptimo del flujo de potencia reactiva en un sistema; el algoritmo de solución empleando programación lineal, es el siguiente:

1. Resolver una solución de flujos de potencia por el método de Newton-Raphson Desacoplado para un caso base.
2. Pasos previos para obtener los coeficientes de la función objetivo:
  - a) Formular la matriz Jacobiano considerando todas las barras; excepto la barra oscilante.
  - b) Calcular los vectores de la sensibilidad de las pérdidas con respecto a los ángulos y la sensibilidad de las pérdidas en base a los voltajes del sistema.

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} ; \frac{\partial P_L}{\partial V_i} \quad i=2,3,\dots,n$$

- c) Calcular la sensibilidad de las pérdidas con respecto a la potencia neta activa y reactiva:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} ; \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \quad i=2,3,\dots,n$$

3. a. Formular la matriz Jacobiano considerando todas las barras del sistema (incluyendo la barra oscilante) y añadiendo las ecua-



ciones del flujo de potencia activa entre las barras  $p$  y  $q$  en donde existe transformadores con combiador de taps. Ecuación (67)

- b. Factorizar la matriz Jacobiano aumentado
- c. Determinar partes de la matriz inversa  $[S]$ ; para relacionar variables de estado y variables de control, obteniendo  $[S']$ . Ecuación (69).
- d. Modificar la submatriz  $[S']$  a  $[S'']$  intercambiando las variables de control al lado derecho y las variables de estado al lado izquierdo. Ecuación (70)
- e. Seleccionar las partes de la matriz  $[S'']$  para obtener las variables de estado en función de las variables de control, obteniendo  $[S_1^*]$  y  $[S_2^*]$ . Ecuación (71)

5. Calcular los coeficientes de la función objetivo.

6. Resolver el problema de programación lineal para determinar las correcciones de las variables de control:  $\Delta t_{pq}$ ,  $\Delta V_1, \dots, \Delta V_m$ ,  $\Delta Q_{m+x}$ .

7. Modificar las magnitudes de las variables de control:  $t_{pq}$ ,  $V_1, \dots, V_m$ ,  $Q_{m+x}$  en  $\Delta t_{pq}$ ,  $\Delta V_1, \dots, \Delta V_m$ ,  $\Delta Q_{m+x}$  respectivamente.

8. Realizar un flujo de potencia con las nuevas magnitudes de las variables de control para obtener las nuevas condiciones de operación.

9. Si es necesario mejorar los perfiles de voltaje o reducir las pérdidas activas regresa al paso 2. En caso contrario, se ha obtenido el óptimo.

## CAPITULO III

### EJECUCION DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Para evaluar los resultados del programa digital, se presenta a continuación varios ejemplos de prueba.

- a. Sistema de Potencia de 6 barras para demanda máxima, media y mínima; comparando cada caso con los resultados de la referencia 2.
- b. Sistema de potencia de 14 barras; comparando los resultados con los obtenidos en la referencia 6.
- c. Sistema Nacional Interconectado para demanda máxima y mínima.

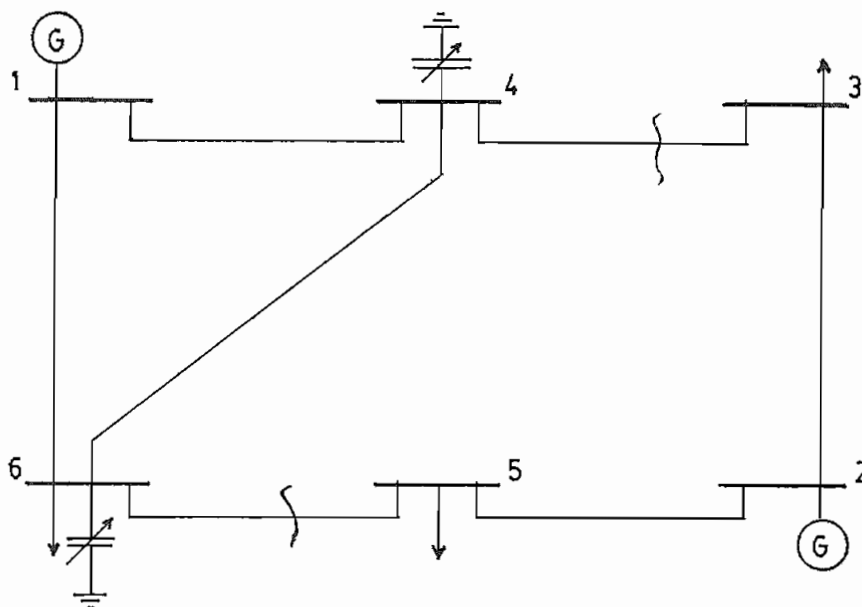
Para una mejor comprensión, se presentará para cada ejemplo lo siguiente:

- Diagrama unifilar del sistema
- Características generales
- Datos de líneas, transformadores, capacitores, reactores.
- Datos de barra
- Límites de operación del sistema
- Características de convergencia para:
  - Flujo de potencia (F.P.)
  - Flujo óptimo de potencia reactiva (F.O.P.R.)

- Rangos de  $t_{paso}$ ,  $V_{paso}$ ,  $Q_{paso}$
- Resultados del programa digital
- Comparación de resultados:
  - Caso base
  - Caso óptimo

Particularmente, se comenta para cada caso, el control óptimo del flujo de potencia reactiva en el sistema y poder ver su importante aplicación en el sistema de potencia.

## 3.1 EJEMPLO No.1 (Tomado de la referencia 2)

Diagrama UnifilarCaracterísticas Generales

Número de barras	6
Número de elementos	7
Barras de tensión controlada	1
Número de la barra oscilante	1
Base	100 MVA
Variables de control	6
1. Voltajes de las barras de generación	2
2. Transformadores con cambiador de taps	2
3. Capacitores Shunt	2

Datos de Líneas y Transformadores.

ELEMENTOS No.	LINEA		RESISTENCIA R	REACTANCIA X	SUSCEPTANCIA $Y_{Lpq}/2$	TAPS tpq
	p	q				
1	1	6	0.123	0.518		
2	1	4	0.080	0.370		
3	4	6	0.097	0.407		
4	6	5	0.000	0.300		1.025
5	5	2	0.282	0.640		
6	2	3	0.723	1.050		
7	4	3	0.000	0.133		1.100

Tabla No.1

Datos de Condensadores Shunt

ELEMENTO No.	BARRA No.	MVAR
1	4	0.0
2	6	0.0

Tabla No.2

Para este ejemplo de 6 barras y con los datos anteriores de líneas, transformadores y condensadores shunt, a continuación se analiza el flujo óptimo de potencia reactiva para 3 casos:

1. Máxima Carga.
2. Media Carga
3. Mínima Carga

### 3.1.1 Máxima Carga.

#### Datos de Barra

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		CARGA	
	V p.u.	P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
1	1.05	-		0.0	0.0
2	1.10	50.0		0.0	0.0
3				55.0	13.0
4				0.0	0.0
5				30.0	18.0
6				50.0	5.0

Tabla No.3

Límites de Operación del Sistema

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Transformadores con taps	$t_{6.5}$		0.9	1.1
	$t_{4.5}$		0.9	1.1
Voltajes de las barras de generación.	$V_1$	p.u.	1.0	1.1
	$V_2$	p.u.	1.1	1.15
Fuentes de VAR	$Q_4$	MVAR	0.0	5.0
	$Q_6$	MVAR	0.0	5.5

Tabla No.4

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de Potencia Reactiva	$Q_1$	MVAR	-20.0	100.0
	$Q_2$	MVAR	-20.0	100.0
Voltaje de las barras de carga.	$V_3$	p.u.	0.9	1.0
	$V_4$	p.u.	0.9	1.0
	$V_5$	p.u.	0.9	1.0
	$V_6$	p.u.	0.9	1.0

Tabla No.5



### Criterios de Convergencia.

Criterio de convergencia del F.P. 0.01 (p.u.)

Criterio de convergencia del F.O.P.R. 0.2 (MW)

### Rangos para optimización lineal de las variables de control

	$t_{65}$ $t_{43}$	$V_1$ $V_2$	$Q_4$ $Q_6$
	t paso	V paso p.u.	Q paso p.u.
1° ITERACION	$\pm 0.05$	$\pm 0.025$	$\pm 0.05$
PROCESO ITERATIVO	$\pm 0.05$	$\pm 0.025$	$\pm 0.05$

Tabla No.6

### Resultados del Programa Digital

A continuación se presentan los resultados del programa digital para un control óptimo del flujo de potencia reactiva, partiendo de los datos dados en las tablas anteriores.

### Comparación de Resultados

Los datos obtenidos mediante el programa digital se compara con los datos dados en la referencia 2.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR LN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAHANDUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA DE 6 BARRAS IEEE

MAXIMA CARGA

\*\*\*\*\*

DATOS GENERALES

NO. TOTAL DE BARRAS: 6  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 1  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/O TRANSFORMADORES: 7  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 2  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.20000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

DATOS DE BARRAS

BARRA NO.	TIPO DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	T	1.10000	50.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	55.00000	13.00000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	30.00000	18.00000
6	C	0.00000	0.00000	0.00000	50.00000	5.00000

DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)

NO.	BAR F	BAR D	RESISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1	1	6	0.12300	0.51800	0.00000				
2	1	4	0.08000	0.37000	0.00000				
3	4	6	0.09700	0.40700	0.00000				

4	5	5	0.10000	0.30000	0.00000	100.00	1.0250	1.0000	
5	5	2	0.28200	0.64000	0.00000				
6	2	3	0.72300	1.05000	0.00000				
7	4	3	0.00000	0.13300	0.00000	100.00	1.1000	1.0000	
8	4	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
9	6	6	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000

LIMITES DE OPERACION DEL SISTEMA

	BAR P	BAR Q	V.MIN	V.MAX	Q.MIN	Q.MAX	T.MIN	T.MAX
GENER	1		1.00000	1.10000	-20.00000	100.00000		
GENER	2		1.10000	1.15000	-20.00000	100.00000		
CARGA	3		0.90000	1.00000				
CARGA	4		0.90000	1.00000				
CARGA	5		0.90000	1.00000				
CARGA	6		0.90000	1.00000				
TRANS	4	3					0.90000	1.10000
TRANS	6	5					0.90000	1.10000
E VAR	6	6			0.00000	5.50000		
E VAR	4	4			0.00000	5.00000		

FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE

RESULTADOS

BAR NO.	VOLTAGE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC	DE BAR	A BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	PL	GRADCS	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0500	0.000	96.483	37.296	0.000	0.000	-0.000	1	4	50.990	20.187	2.182	10.093
								1	6	45.493	17.108	2.635	11.099
2	1.1000	-6.050	50.000	34.176	0.000	0.000	-0.000	2	3	20.470	12.132	3.343	4.913
								2	5	29.536	22.043	3.165	7.184
3	0.8575	-13.801	0.000	0.000	55.000	13.000	-0.000	3	2	-17.087	-7.219	3.343	4.913
								3	4	-37.910	-5.172	-0.000	2.644
4	0.9543	-9.914	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	4	1	-44.808	-10.094	2.182	10.093
								4	3	37.910	7.820	-0.000	2.644
								4	6	10.898	2.183	0.132	0.552
								5	2	-26.370	-14.859	3.165	7.184
								5	6	-3.625	-2.591	-0.000	0.073
	0.9334	-13.384	0.000	0.000	30.000	18.000	-0.000	6	1	-42.854	-6.009	2.635	11.099
								6	4	-10.767	-1.631	0.132	0.552
								6	5	3.625	2.664	-0.000	0.073
	0.9349	-12.624	0.000	0.000	50.000	5.000	-0.000						

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	146.483	71.471
TOTAL MVAR CAP/REAC:		-0.001
TOTAL CARGA:	135.000	36.000
TOTAL PERDIDAS:	11.498	36.563

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	2	1.1000

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
-----	---------	---------	---------------

1	4	3	1.10000
2	6	5	1.02500

### 3.- FUENTES DE VAR

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	0.0000
2	4	0.0000

### FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO

### RESULTADOS

BAR NO.	VCLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEA	
	PU	GRADCS	MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0914	0.603	43.867	36.298	0.000	0.000	-0.000	1 4	50.004	19.760	1.941	8.980
								1 6	43.864	16.538	2.269	9.556
2	1.1500	-3.550	50.000	19.469	0.000	0.000	-0.000	2 3	18.864	4.567	2.059	2.991
								2 5	31.032	14.902	2.527	5.735
3	1.0000	-11.801	0.000	0.000	55.000	13.000	-0.000	3 2	-16.804	-1.577	2.059	2.991
								3 4	-38.407	13.607	-0.000	1.729
4	0.9998	-8.520	0.000	0.000	0.000	0.000	4.998	4 1	-48.062	-10.780	1.941	8.980
								4 3	38.407	-11.878	-0.000	1.729
								4 6	9.834	2.236	0.099	0.414
5	1.0003	-11.373	0.000	0.000	30.000	18.000	-0.000	5 2	-28.505	-9.167	2.527	5.735
								5 6	-1.454	21.631	-0.000	0.000
6	0.9819	-11.130	0.000	8.000	50.000	5.000	5.303	6 1	-41.594	-6.982	2.269	9.556
								6 4	-9.735	-1.822	0.099	0.414
								6 5	1.454	-21.625	-0.000	0.000

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	143.867	55.767
TOTAL MVAR CAP/REAC:		10.301
TOTAL CARGA:	135.000	36.000
TOTAL PERDIDAS:	8.896	29.411

### POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

#### 1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VCLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0914
2	2	1.1500

#### 2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	4	3	0.98366

2        6            5            0.95631

3.- FUENTES DE VAR

-----

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	5.5000
2	4	5.0000

CONVERGE EN 5 ITERACIONES EL F.O.P.R.

## CASO BASE

Referencia 2

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05	0.0	95.9	37.07	1	1.05	0.0	96.483	37.296
2	1.10	- 5.91	50.0	34.28	2	1.10	- 6.05	50.0	34.176
3	0.858	-13.67			3	0.858	-13.801		
4	0.955	- 9.86			4	0.954	- 9.914		
5	0.902	-13.25			5	0.903	-13.384		
6	0.935	-12.53			6	0.935	-12.628		

PERDIDAS	
PL MW	
Referencia 2	11.45
Esta tesis	11.498

Tabla No.7

## Resultados del Flujo Óptimo de Potencia Reactiva: CASO OPTIMO

Referencia 2

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.092	0	93.9	36.33	1	1.091	0.0	93.867	36.298
2	1.15	-3.66	50.0	19.38	2	1.15	-3.55	50.00	19.469
3	1.000	-12.08			3	1.000	-11.80		
4	1.000	-8.90			4	1.000	-8.92		
5	1.000	-11.44			5	1.000	-11.37		
6	0.983	-11.16			6	0.982	-11.13		

	Pérdidas
	PL MW
Referencia 2	8.930
Esta tesis	8.896

Tabla No.8

Posición de las variables de control.

VARIABLES DE CONTROL		CASO			
		BASE		OPTIMO	
		Ref. 2	Esta tesis	Ref. 2	Esta tesis
$t_{6.5}$		1.025	1.025	0.956	0.956
$t_{4.3}$		1.100	1.10	0.981	0.983
$V_1$	p.u.	1.05	1.05	1.092	1.091
$V_2$	p.u.	1.10	1.10	1.15	1.15
$Q_4$	MVAR	0.0	0.0	5.0	5.0
$Q_6$	MVAR	0.0	0.0	5.5	5.5

Tabla No.9

Comentario del Sistema.

Todos los resultados obtenidos en el ejemplo No.1 para demanda máxima en el programa digital son muy aproximados a los de la referencia 2, tanto en las variables de control como también en las variables de estado, para el caso base y para el caso óptimo, como lo indica las tablas No.7, 8, 9.

Analizando los niveles de voltaje para el caso base Tabla No.7, la magnitud de voltaje en la barra 3 es 0.857 p.u., y si se compara con el límite mínimo en dicha barra Tabla No.5 que es 0.9 p.u., esto indica



que el nivel de voltaje en esta barra de carga esta fuera del permitido. Las magnitudes de voltaje en las otras barras de carga, están cercanas al límite mínimo, y además se tiene pérdidas de 11.498 MW.

Al realizar un control óptimo del flujo de potencia reactiva, se consigue, como se ve en la tabla No.8, aumento en los niveles de voltaje en todas las barras del sistema, disminución en las pérdidas activas a 8.896 MW, es decir disminuir 2.602 MW, lo que equivale en disminuir la generación de potencia activa en 2.602 MW en la barra oscilante; - esto se comprueba si se resta la generación de la potencia activa para el caso base y para el caso óptimo  $P_G=96.483 \text{ MW} - 93.867 \text{ MW} = 2.616 \text{ MW}$ . Con esto se ha logrado disminuir las pérdidas activas de transmisión en un 22.6% y mejorar los perfiles de voltaje.

El reducir las pérdidas en 22.6% representa disminuir en 1.8%, la generación de potencia activa total, es decir se ha mejorado el despacho de potencia activa definido inicialmente.

Las características de convergencia de las pérdidas del sistema observados fue el siguiente.

ITERACION	P <sub>L</sub> MW
Caso base	11.498
1	9.868
2	9.079
3	8.978
4	9.006
5	8.896

Tabla No.10

3.1.2 Media CargaDatos de Barra

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		CARGA	
	V p.u.	P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
1	1.05	—		0.0	0.0
2	1.10	25.0		0.0	0.0
3				27.5	6.5
4				0.0	0.0
5				15.0	9.0
6				25.0	2.5

Tabla No.11

Límites de Operación del Sistema

VARIABLES DE CONTROL	DATOS	MINIMO	MAXIMO
Transformadores con taps.	$t_{65}$	0.9	1.1
	$t_{43}$	0.9	1.1
Voltajes de las ba- rras de generación.	$V_1$	p.u.	1.0
	$V_2$	p.u.	1.0
Fuentes de VAR	$Q_4$	MVAR	0.0
	$Q_6$	MVAR	0.0
			5.0
			5.5

Tabla No.12

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de potencia reactiva	Q <sub>1</sub>	MVAR	-20.0	100.0
	Q <sub>2</sub>	MVAR	-20.0	100.0
Voltaje de las barras de carga.	V <sub>3</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>4</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>5</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>6</sub>	p.u.	0.9	1.0

Tabla No. 13

Criterios de Convergencia.

Criterio de convergencia del F.P. 0.01 (p.u.)

Criterio de convergencia del F.O.P.R. 0.04 (MW)

Rangos para la Optimización Lineal de las Variables de Control

VARIABLES CONTROL	t <sub>65</sub> t <sub>43</sub>	V <sub>1</sub> V <sub>2</sub>	Q <sub>4</sub> Q <sub>6</sub>
	t paso	V paso p.u.	Q paso p.u.
1° Iteración	+ 0.05	+ 0.025	+ 0.055
Proceso Iterativo	+ 0.05	+ 0.025	+ 0.055

Tabla No. 14

Resultados del Programa Digital.

A continuación se presenta los resultados del programa digital con los datos de: líneas, transformadores, capacitores shunt; dados en las tablas No.1 y 2.

-----  
 ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 -----

-----  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 -----

-----  
 TESIS DE GRADO  
 -----

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARCUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR UN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANCUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA DE 6 BARRAS

MEDIA CARGA

\*\*\*\*\*

-----  
 DATOS GENERALES  
 -----

NO. TOTAL DE BARRAS: 6  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 1  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/O TRANSFORMADORES: 7  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 2  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.00000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

-----  
 DATOS DE BARRAS  
 -----

BARRA N.C.	TIPO DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	T	1.10000	25.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	27.50000	6.50000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	15.00000	9.00000
6	C	0.00000	0.00000	0.00000	25.00000	2.50000

-----  
 DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)  
 -----

NO.	BAR F	BAR Q	RESISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1	1	6	0.12300	0.51800	0.00000				
2	1	4	0.00000	0.37000	0.00000				
3	4	6	0.09700	0.40700	0.00000				

4	6	5	0.00000	0.30000	0.00000	100.00	1.0250	1.0000		
5	5	2	0.28200	0.64000	0.30000					
6	2	3	0.72300	1.05000	0.00000					
7	4	3	0.00100	0.15300	0.00000	100.00	1.1000	1.0000		
8	4	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	
9	6	6	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	

LIMITO DE OPERACION DEL SISTEMA

	BAR P	BAR Q	V.MIN	V.MAX	Q.MIN	Q.MAX	T.MIN	T.MAX
NER	1		1.00000	1.10000	-20.00000	100.00000		
NER	2		1.00000	1.10000	-20.00000	100.00000		
RCA	3		0.90000	1.00000				
RCA	4		0.90000	1.00000				
RCA	5		0.90000	1.00000				
RCA	6		0.90000	1.00000				
ANS	4	3					0.90000	1.10000
ANS	6	5					0.90000	1.10000
VAR	6	6			0.00000	5.50000		
VAR	4	4			0.00000	5.00000		

FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE

RESULTADOS

BAR P	VCLTALF		GENERACION		CARGA		CAP/REAC	DE A	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	FL	GRADCS	MW	MVAR	MW	MVAR			BAR PAR	MW	MVAR	MW
1.0500	0.600		45.517	4.140	0.000	0.000	-0.000	1 4	23.860	1.869	0.416	1.922
								1 6	21.656	2.271	0.529	2.228
1.1000	-3.348		25.000	21.103	0.000	0.000	-0.000	2 3	11.274	9.447	1.293	1.477
								2 5	13.731	11.656	0.756	1.716
0.9368	-6.133		0.000	0.000	27.500	6.500	-0.000	3 2	-9.981	-7.570	1.293	1.477
								3 4	-17.517	1.492	-0.000	0.469
1.0286	-4.609		0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	4 1	-23.445	0.053	0.416	1.922
								4 3	17.517	-1.024	-0.000	0.469
								4 6	5.929	1.123	0.335	0.140
0.9982	-6.220		0.000	0.000	15.000	9.000	-0.000	5 2	-12.975	-9.940	0.756	1.716
								5 6	-2.022	1.446	-0.000	0.019
1.0188	-5.869		0.000	0.000	25.000	2.500	-0.000	6 1	-21.127	-0.043	0.529	2.228
								6 4	-5.895	-0.983	0.033	0.140
								6 5	2.022	-1.428	-0.000	0.019

TOTAL GENERACION:	MW	MVAR
	70.517	25.243
TOTAL MVAR CAP/REAC:		-0.001
TOTAL CARGA:	67.500	18.000
TOTAL PERDIDAS:	3.027	8.379

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VCLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	2	1.1000

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	4	3	1.10000
2	6	5	1.02500

3.- FUENTES DE VAR

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	0.0000
2	4	0.0000

FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO

RESULTADOS

BARRA NO.	VOLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0287	0.000	44.175	7.009	0.000	0.000	-0.000	1 4	23.615	3.855	0.433	2.002
								1 6	20.560	3.154	0.503	2.118
2	1.0750	-1.431	25.000	7.778	0.000	0.000	-0.000	2 3	9.433	1.546	0.572	4.830
								2 5	15.499	6.232	0.641	1.545
3	0.9998	-6.121	0.000	0.000	27.500	6.500	-0.000	3 2	-8.862	-0.716	0.572	0.830
								3 4	-18.775	6.155	-0.000	0.417
4	0.9999	-4.701	0.000	0.000	0.000	0.000	4.998	4 1	-23.182	-1.853	0.433	2.002
								4 3	18.775	-5.738	-0.000	0.417
								4 6	4.659	0.547	0.021	0.090
5	1.0001	-5.785	0.000	0.000	15.000	9.000	-0.000	5 2	-14.818	-4.686	0.641	1.545
								5 6	-0.124	8.980	-0.000	-0.024
6	0.9933	-5.764	0.000	0.000	25.000	2.500	5.426	6 1	-20.058	-1.036	0.503	2.118
								6 4	-4.638	-0.457	0.021	0.090
								6 5	0.124	-9.004	-0.000	-0.024
TOTAL GENERACION:			MW	MVAR								
TOTAL MVAR CAP/REAC:			69.175	14.787								
TOTAL CARGA:			67.500	18.000								
TOTAL PERDIDAS:			2.210	6.978								

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0287
2	2	1.0750

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	4	3	0.99213
2	6	5	0.98044

## 3.- FUENTES DE VAR

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	5.5000
2	4	5.0000

CONVERGE EN 5 ITERACIONES EL F.O.P.R.



### Comparación de Resultados

Los datos obtenidos en el programa digital son comparados con los de la referencia 2.

#### CASO BASE

##### Referencia 2

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05		—	4.72
2	1.10		25.0	21.56
3	0.935			
4	1.027			
5	0.996			
6	1.018			

NS=1

##### Esta tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05	0.0	45.517	4.140
2	1.10	-3.348	25.0	21.103
3	0.936	-6.133		
4	1.028	-4.609		
5	0.998	-6.220		
6	1.018	-5.869		

NS=1

PERDIDAS	
PL MW	
Referencia 2	3.06
Esta tesis	3.027

Tabla No. 15

## Resultados del Flujo Optimo de Potencia Reactiva: Caso Optimo

Referencia 2

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.029		—	7.07
2	1.075		25.0	7.7
3	1.000			
4	1.000			
5	1.000			
6	0.994			

NS=1

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.029	0.0	44.175	7.009
2	1.075	-1.431	25.0	7.778
3	1.000	-6.121		
4	1.000	-4.701		
5	1.000	-5.785		
6	0.993	-5.764		

NS=1

PERDIDAS	
	P <sub>L</sub> MW
Referencia 2	2.24
Esta Tesis	2.21

Tabla No. 16

Posición de las Variables de Control.

VARIABLES DE CONTROL		CASO			
		BASE		OPTIMO	
		Ref.2	Esta Tesis	Ref.2	Esta Tesis
$t_{65}$		1.025	1.025	0.980	0.980
$t_{43}$		1.100	1.100	0.991	0.992
$V_1$	p.u.	1.05	1.05	1.029	1.029
$V_2$	p.u.	1.10	1.10	1.075	1.075
$Q_4$	MVAR	0.0	0.0	5.0	5.0
$Q_6$	MVAR	0.0	0.0	5.50	5.5

Tabla No. 17

Comentario del Sistema

Los resultados obtenidos en el ejemplo No.1 para media carga en el programa digital, son similares a los obtenidos en la referencia 2, como se observa en las tablas No.15, 16, 17.

El estado inicial del sistema está indicado en la tabla No.16, si se compara los niveles de voltaje para media carga, con el límite mínimo y máximo que deben tener las barras de carga, se observa que existe altos voltajes en la barra 4 de 1.0286 p.u. y en la barra 6 de 1.0188 p.u. comparado con el máximo permisible de 1 p.u. indicado en la tabla No.13; además se tiene unas pérdidas activas de transmisión de 3.027 MW.

Al realizar un flujo óptimo de potencia reactiva, se logra para este sistema, disminuir estos altos voltajes que se tenía en las barras 4 y 6, se ha conseguido subir los niveles de voltaje en las barras 3 y 5 a 1 p.u., esto ha significado disminuir los niveles de voltajes de generación en la barra 1 de 1.05 p.u. a 1.0287 p.u. y en la barra 2 de 1.10 p.u. a 1.075 p.u., los cuales son magnitudes aceptables en el rango considerado. Por otra parte se ha logrado disminuir las pérdidas del sistema a 2.21 MW.

Así pues, se ha logrado mejorar los perfiles de voltaje del sistema y además disminuir las pérdidas en un 27%.

La característica de convergencia de las pérdidas del sistema observado fue:

ITERACION	PL MW
Caso Base	3.027
1	3.056
2	2.314
3	2.435
4	2.24
5	2.21

Tabla No. 18

### 3.1.3 Mínima Carga

#### Datos de Barra

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		CARGA	
	V p.u.	P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
1	1.05	—		0.0	0.0
2	1.10	12.5		0.0	0.0
3				13.75	3.25
4				0.0	0.0
5				7.5	4.5
6				12.5	1.25

Tabla No. 19

#### Límites de Operación

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Transformadores con taps.	$t_{65}$		0.9	1.1
	$t_{43}$		0.9	1.1
Voltaje de las barras de gene- ración.	$V_1$	p.u.	1.0	1.1
	$V_2$	p.u.	1.1	1.15
Fuentes de VAR.	$Q_4$	MVAR	0.0	5.0
	$Q_6$	MVAR	0.0	5.5

Tabla No. 20

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de potencia reactiva.	Q <sub>1</sub>	MVAR	-20.0	100.0
	Q <sub>2</sub>	MVAR	-20.0	100.0
Voltaje de las barras de carga.	V <sub>3</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>4</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>5</sub>	p.u.	0.9	1.0
	V <sub>6</sub>	p.u.	0.9	1.0

Tabla No. 21

Criterios de Convergencia.

Criterio de convergencia del F.P. 0.01 (p.u.)

Criterio de convergencia del F.O.P.R. 0.02 (MW)

Rangos para la optimización lineal de las variables de control

Variables de Control	t <sub>65</sub> t <sub>43</sub>	V <sub>1</sub> V <sub>2</sub>	Q <sub>4</sub> Q <sub>6</sub>
	t <sub>paso</sub>	V <sub>paso</sub> p.u.	Q <sub>paso</sub> p.u.
1° Iteración	+0.05	+0.020	+0.055
Proceso Iterativo	+0.05	+0.025	+0.055

Tabla No. 22

### RESULTADOS DEL PROGRAMA DIGITAL

Utilizando el programa digital para un control del flujo óptimo de potencia reactiva para mínima carga se presenta a continuación los resultados obtenidos.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GARBIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR LN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D. CHENOLETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA DE 6 BARRAS

MINIMA CARGA

\*\*\*\*\*

DATOS GENERALES

NO. TOTAL DE BARRAS: 6  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 1  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/O TRANSFORMADORES: 7  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 2  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.02000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

DATOS DE BARRAS

-----

BARRA NO.	TIPC DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	T	1.10000	12.50000	0.00000	0.00000	0.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	13.75000	3.25000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	7.50000	4.50000
6	C	0.00000	0.00000	0.00000	12.50000	1.25000

DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTRES (P.U.-MVAR)

-----

NO.	BAR P	BAR Q	RESISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1.	1	6	0.12300	0.51800	0.00000				
2	1	4	0.08000	0.37000	0.00000				
3	4	6	0.09700	0.46700	0.00000				



4	6	5	0.00000	0.30000	0.00000	100.00	1.0250	1.0000		
5	5	2	0.28200	0.64000	0.00000					
6	2	3	0.72300	1.05000	0.00000					
7	4	3	0.00000	0.13300	0.00000	100.00	1.1000	1.0000		
8	4	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	
9	6	6	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000

-----  
 LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA  
 -----

	PAR	F	BAR	Q	V,MIN	V,MAX	Q,MIN	Q,MAX	T,MIN	T,MAX
FAER	1				1.00000	1.10000	-20.00000	100.00000		
ENER	2				1.00000	1.10000	-20.00000	100.00000		
ARSA	3				0.90000	1.00000				
ARSA	4				0.90000	1.00000				
ARSA	5				0.90000	1.00000				
ARSA	6				0.90000	1.00000				
RANS	4		3						0.90000	1.10000
RANS	6		5						0.90000	1.10000
VAR	6		6				0.00000	5.50000		
VAR	4		4				0.00000	5.00000		

-----  
 FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE  
 -----

-----  
 RESULTADOS  
 -----

BARRA	VOLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC	DE BAR	A BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR				MW	MVAR	MW	MVAR
1.0500	0.000		22.532	-6.541	0.000	0.000	-0.000	1	4	11.545	-4.674	0.109	0.503
								1	6	10.987	-2.467	0.141	0.596
1.1000	-2.787		12.500	17.683	0.000	0.000	-0.000	2	3	6.757	9.233	0.782	1.136
								2	5	5.746	8.451	0.243	0.552
0.9675	-3.013		0.000	0.000	13.750	3.250	-0.000	3	2	-5.975	-8.097	0.742	1.136
								3	4	-7.774	5.174	-0.000	0.124
1.0565	-2.375		0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	4	1	-11.436	4.577	0.109	0.503
								4	3	7.774	-5.050	-0.000	0.124
								4	6	3.663	0.647	0.012	0.050
1.0362	-3.437		0.000	0.000	7.500	4.500	-0.000	5	2	-5.502	-7.898	0.243	0.552
								5	6	-1.996	3.791	-0.000	0.051
1.0509	-3.114		0.000	0.000	12.500	1.250	-0.000	6	1	-10.845	3.063	0.141	0.596
								6	4	-3.651	-0.556	0.012	0.050
								6	5	1.996	-3.740	-0.040	0.051
			TOTAL GENERACION:		35.032	11.142							
			TOTAL MVAR CAP/REAC:			-0.001							
			TOTAL CARGA:		33.750	9.000							
			TOTAL PERDIDAS:		1.288	3.012							

-----  
 POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE  
 -----

-----  
 1.- VOLTAJES DE GENERACION  
 -----

NO.	BARRA	P	VOLTAJE	MAGNITUD
1	1		1.0500	
2	2		1.1000	

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	4	3	1.10000
2	6	5	1.02500

3.- FUENTES DE VAR

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	0.0000
2	4	0.0000

FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO

RESULTADOS

BARRA	VCLTAJE PU	VCLTAJE GRADOS	GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR RAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
			MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
1.0000	0.000	0.000	22.206	-0.805	0.000	0.000	0.000	1 4	11.993	-0.500	0.115	0.533
								1 6	10.213	-0.305	0.128	0.541
1.0300	-0.507	0.000	12.500	1.318	0.000	0.000	-0.000	2 3	4.648	-0.141	0.147	0.214
								2 5	7.795	1.460	0.167	0.379
1.0000	-3.279	0.000	0.000	0.000	13.750	3.250	-0.000	3 2	-4.500	0.355	0.147	0.214
								3 4	-9.173	13.931	-0.000	0.162
0.9933	-2.584	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.933	4 1	-11.878	1.033	0.115	0.533
								4 3	9.173	-13.769	-0.000	0.162
								4 6	2.152	0.183	0.005	0.019
1.0006	-3.052	0.000	0.000	0.000	7.500	4.500	-0.000	5 2	-7.627	-1.080	0.167	0.379
								5 6	0.185	10.307	-0.000	0.035
0.9905	-3.083	0.000	0.000	0.000	12.500	1.250	5.395	6 1	-10.084	0.846	0.128	0.541
								6 4	-2.147	-0.164	0.005	0.019
								6 5	-0.185	-10.273	-0.000	0.035

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	34.706	0.513
TOTAL MVAR CAP/REAC:		10.328
TOTAL CARGA:	33.750	9.000
TOTAL PERDIDAS:	0.563	1.883

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VCLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0000
2	2	1.0300

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
-----	---------	---------	------------------

1	4	3	0.98847
2	6	5	0.97984

3.- FUENTES DE VAP  
-----

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	6	5.5000
2	4	5.0000

CONVERGE EN 5 ITERACIONES EL F.O.P.R.

### Comparación de Resultados.

Los datos obtenidos mediante el programa digital se compara con los datos de la referencia 2 para mínima carga.

### Caso Base

#### Referencia 2

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05			- 6.11
2	1.1		12.5	18.02
3	0.966			
4	1.056			
5	1.035			
6	1.05			

NS=1

#### Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.050	0.00	22.532	-6.541
2	1.100	-2.787	12.50	17.683
3	0.9675	-3.013		
4	1.0565	-2.375		
5	1.0362	-3.437		
6	1.0509	-3.114		

NS=1

	PERDIDAS
	PL MW
Referencia 2	1.31
Esta Tesis	1.288

Tabla No. 23

Resultados del Flujo Optimo de Potencia Reactiva: Caso Optimo.

Referencia 2

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.000			-0.45	1	1.000	0.0	22.206	-0.809
2	1.025		12.5	-0.17	2	1.030	-0.507	12.500	1.321
3	1.001				3	1.000	-3.279		
4	0.993				4	0.993	-2.584		
5	1.001				5	1.001	-3.052		
6	0.989				6	0.990	-3.084		

PERDIDAS	
P <sub>L</sub> MW	
Referencia 2	0.56
Esta Tesis	0.563

Tabla No. 24

Posición de las Variables de Control

VARIABLES DE CONTROL		CASO			
		BASE		OPTIMO	
		Ref. 2	Esta Tesis	Ref. 2	Esta Tesis
t <sub>65</sub>		1.025	1.025	0.975	0.9798
t <sub>43</sub>		1.100	1.10	0.986	0.9885
V <sub>1</sub>	p.u.	1.05	1.05	1.00	1.00
V <sub>2</sub>	p.u.	1.10	1.10	1.025	1.03
Q <sub>4</sub>	MVAR	0.0	0.0	5.0	5.0
Q <sub>6</sub>	MVAR	0.0	0.0	5.5	5.5

Tabla No. 25

Comentario del Sistema

Los resultados obtenidos en el programa digital, son semejantes a los indicados en la referencia 2, tanto para el caso base como para el estado final del sistema, como lo demuestra las tablas No.23, 24, 25.

Para el caso base tabla No.23, se puede ver que existen altos voltajes en las barras 4, 5, 6 siendo: 1.0565 p.u., 1.0362 p.u., 1.0509 p.u. respectivamente, comparado con el máximo nivel de voltaje permitido en esas barras que es de 1 p.u. tabla No.21, obteniéndose al mismo tiempo unas pérdidas en el sistema de 1.288 MW.

Al realizar un flujo óptimo de potencia reactiva para mínima carga, - se consigue disminuir los niveles de voltaje de esas barras a valores p.u. y en la barra 3 se ha conseguido subir el voltaje. Notando además que los voltajes en las barras de generación a decrecido, pero - siempre dentro del límite de operación, esto se debe a que estas magnitudes son variables de control. Las nuevas pérdidas del sistema es ahora 0.563 MW lo que representa reducir en un 56.3%.

Las características de convergencia de las pérdidas del sistema fue el siguiente.

ITERACION	P <sub>L</sub> MW
Caso base	1.288
1	1.084
2	0.657
3	0.597
4	0.627
5	0.563

Tabla No. 26

Las características de convergencia para los 3 casos analizados, indican que la solución es factible después de la primera iteración, después del cual las pérdidas decrecen con posteriores iteraciones. De las observaciones hechas, las pérdidas pueden comenzar a oscilar alre

dedor del punto óptimo con otras iteraciones. Esto hace necesario im  
plementar un método de parada para encontrar la solución, el cual se  
detalla en el capítulo IV.

### 3.1.4 Análisis de la Sensibilidad de la Función Objetivo y de la so- lución óptima para máxima carga.

Los coeficientes de la función objetivo ecuación (35):  $\frac{\partial P_L}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i}$ , -  
 $\frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$ , son calculados directamente mediante relaciones de sensitivi-  
dad del sistema de potencia demostrado en el capítulo II.

Si se realiza flujos de carga alrededor del punto de operación de tal  
manera que los incrementos en las pérdidas  $P_L$  se considere como un  
segmento lineal en la curva de pérdidas, se puede encontrar estos mis-  
mos coeficientes, al resolver un conjunto de ecuaciones lineales (Véa-  
se Capítulo No.II.)

El propósito de este análisis es comparar los coeficientes de la fun-  
ción objetivo calculados: directamente usando relaciones de sensitivi-  
dad que son utilizados para el flujo óptimo de potencia reactiva; y  
mediante flujos de potencia especificando  $\Delta t_{pq}$ ,  $\Delta V_i$ ,  $\Delta Q_{m+x}$ .

Se presentan los resultados obtenidos al correr 20 flujos de carga a  
rededor del caso base para dos incrementos diferentes en las varia-  
bles de control para máxima carga.



Para el caso 1 estos incrementos asumidos son:

$$\Delta t_{pq} = \underline{+0.002}$$

$$\Delta V_i = \underline{+0.002} \quad \text{p.u.}$$

$$\Delta Q_{m+x} = \underline{+0.005} \quad \text{p.u.}$$

A continuación se presentan las magnitudes de los taps de los transformadores, voltajes de generación y de las fuentes de potencia reactiva (capacitores shunt) para los flujos de potencia y las respectivas pérdidas para cada caso corrido.

No.	$t_{43}$	$t_{65}$	$V_1$ p.u.	$V_2$ p.u.	$Q_4$ p.u.	$Q_6$ p.u.	$P_L$ p.u.
Caso Base	1.100	1.0250	1.0500	1.1000	0.0	0.0	0.11498
1	1.098	1.0270	1.0500	1.0992	0.00250	0.00250	0.11466
2	1.1012	1.0242	1.0510	1.1010	0.00400	0.00500	0.11411
3	1.0992	1.0238	1.0503	1.1000	0.00500	0.00100	0.11432
4	1.1002	1.0252	1.0498	1.1020	0.00150	0.00375	0.11471
5	1.0986	1.0262	1.0505	1.1014	0.00075	0.00450	0.11438
6	1.1018	1.0240	1.0492	1.0988	0.00325	0.00150	0.11498
7	1.0998	1.0258	1.0502	1.0980	0.00475	0.00025	0.11454
8	1.1008	1.0266	1.0501	1.0984	0.00200	0.00200	0.11450
9	1.0994	1.0246	1.0504	1.0996	0.00275	0.00300	0.11435
10	1.1006	1.0232	1.0498	1.1004	0.00375	0.00350	0.11449
11	1.1014	1.0248	1.0494	1.1018	0.00125	0.00425	0.11491
12	1.0988	1.0244	1.0496	1.0990	0.00300	0.00750	0.11477
13	1.0984	1.0268	1.0502	1.1002	0.00050	0.00175	0.11468
14	1.1010	1.0234	1.0500	1.0986	0.00350	0.00225	0.11456
15	1.1000	1.0256	1.0506	1.1006	0.00425	0.00475	0.11417
16	1.1016	1.0230	1.0492	1.0998	0.00450	0.00275	0.11475
17	1.1020	1.0236	1.0494	1.1008	0.00225	0.00125	0.11505
18	1.0990	1.0254	1.0496	1.0994	0.00250	0.00050	0.11479
19	1.0982	1.0264	1.0508	1.0982	0.00100	0.00325	0.11429
20	1.1004	1.0260	1.0507	1.1020	0.00175	0.0040	0.11446

Tabla No. 27

Por medio de la tabla No.27, se calcula  $\Delta PL$ ,  $\Delta t_{pq}$ ,  $\Delta V_i$ ,  $\Delta Q_{m+x}$  aplicando la ecuación (51). Los coeficientes de la función objetivo se encuentran con el procedimiento dado en el Capítulo II mediante flujos de potencia. Los resultados están dados en la tabla No.28.

Un segundo caso fue analizado con incrementos mayores:

$$\Delta t_{pq} = +0.01$$

$$\Delta V_i = +0.005 \quad \text{p.u.}$$

$$\Delta Q_{m+x} = +0.025 \quad \text{p.u.}$$

en forma similar al primer caso, se encontraron los coeficientes de la función objetivo al realizar 20 flujos de potencia.

Los resultados obtenidos para los 2 casos analizados y a la vez los obtenidos usando relaciones de sensibilidad del sistema de potencia para el caso base son:

Coeficientes	Usando relaciones de sensibilidad	CASO 1	CASO 2
$\frac{\partial PL}{\partial t_{43}}$	0.08505	0.08710	0.09021
$\frac{\partial PL}{\partial t_{65}}$	0.02918	0.03990	0.04341
$\frac{\partial PL}{\partial V_1}$	-0.32672	-0.31123	-0.29833
$\frac{\partial PL}{\partial V_2}$	0.04387	0.01472	0.01132
$\frac{\partial PL}{\partial Q_4}$	-0.07432	-0.07131	-0.07078
$\frac{\partial PL}{\partial Q_6}$	-0.07815	-0.07416	-0.07254

Tabla No. 28

Como se puede ver en la tabla No.28, los coeficientes para el primer caso son aproximados a los encontrados usando relaciones de sensibilidad. Si se aumenta dichos incrementos a  $\Delta t_{pq}=0.01$ ,  $\Delta V_i=0.005$ ,  $\Delta Q_{m+x}=0.025$ , los coeficientes para el caso 2 se alejan de los primeros debido a que estos incrementos considerados ya no representan segmentos lineales en la curva de pérdidas.

#### Efecto de las variables de control en las pérdidas del sistema.

Para el caso de máxima carga se analiza el efecto de cada variable de control en las pérdidas del sistema. La posición de los taps de los transformadores  $t_{65}$ ,  $t_{43}$ ; la magnitud de voltaje en la barra oscilante  $V_1$ , la magnitud de voltaje en la barra de tensión controlada  $V_2$ ; la inyección de la potencia reactiva de los capacitores  $Q_4$ ,  $Q_6$  son cambiados desde su límite mínimo a su límite máximo en incrementos iguales, cada uno de estos cambios define un nuevo estado al sistema, los que se presentan a continuación.

No.	$V_1$ p.u.	PL MW
1	1.00	13.272
2	1.01	12.874
3	1.02	12.499
4	1.03	12.145
5	1.04	11.812
6	1.05	11.498
7	1.06	11.203
8	1.07	10.926
9	1.08	10.667
10	1.09	10.424
11	1.10	10.198

No.	$V_2$	PL MW
1	1.00	11.927
2	1.01	11.792
3	1.02	11.669
4	1.03	11.558
5	1.04	11.648
6	1.05	11.588
7	1.06	11.543
8	1.07	11.511
9	1.08	11.493
10	1.09	11.489
11	1.10	11.498
12	1.11	11.521
13	1.12	11.558
14	1.13	11.608
15	1.14	11.672
16	1.15	11.750

No.	$t_{65}$	PL MW
1	0.9	11.401
2	0.92	11.348
3	0.94	11.325
4	0.96	11.328
5	0.98	11.356
6	1.00	11.406
7	1.02	11.477
8	1.04	11.567
9	1.06	11.673
10	1.08	11.796
11	1.10	11.933

No.	$t_{43}$	PL MW
1	0.90	10.764
2	0.92	10.702
3	0.94	10.678
4	0.96	10.687
5	0.98	10.728
6	1.00	10.798
7	1.02	10.894
8	1.04	11.014
9	1.06	11.156
10	1.08	11.318
11	1.10	11.498

No.	$Q_4$ MVAR	PL MW
1	0.0	11.498
2	0.5	11.461
3	1.0	11.425
4	1.5	11.389
5	2.0	11.354
6	2.5	11.318
7	3.0	11.283
8	3.5	11.249
9	4.0	11.214
10	4.5	11.180
11	5.0	11.146

No.	$Q_6$ MVAR	PL MW
1	0.0	11.498
2	1.0	11.428
3	1.5	11.387
4	2.0	11.351
5	2.5	11.314
6	3.0	11.278
7	3.5	11.243
8	4.0	11.207
9	4.5	11.172
10	5.0	11.138
11	5.5	11.103

Representando en forma gráfica se tiene:

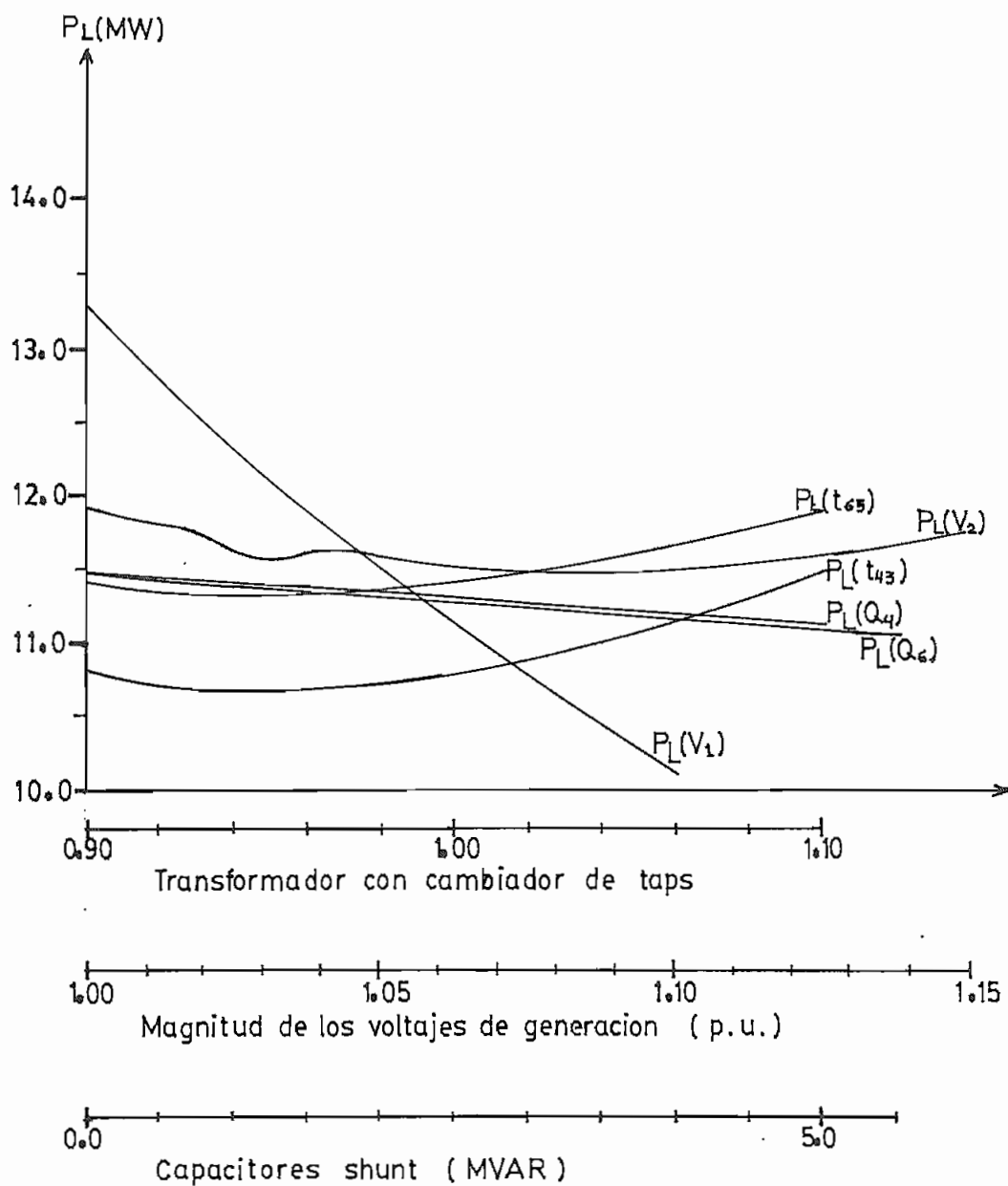


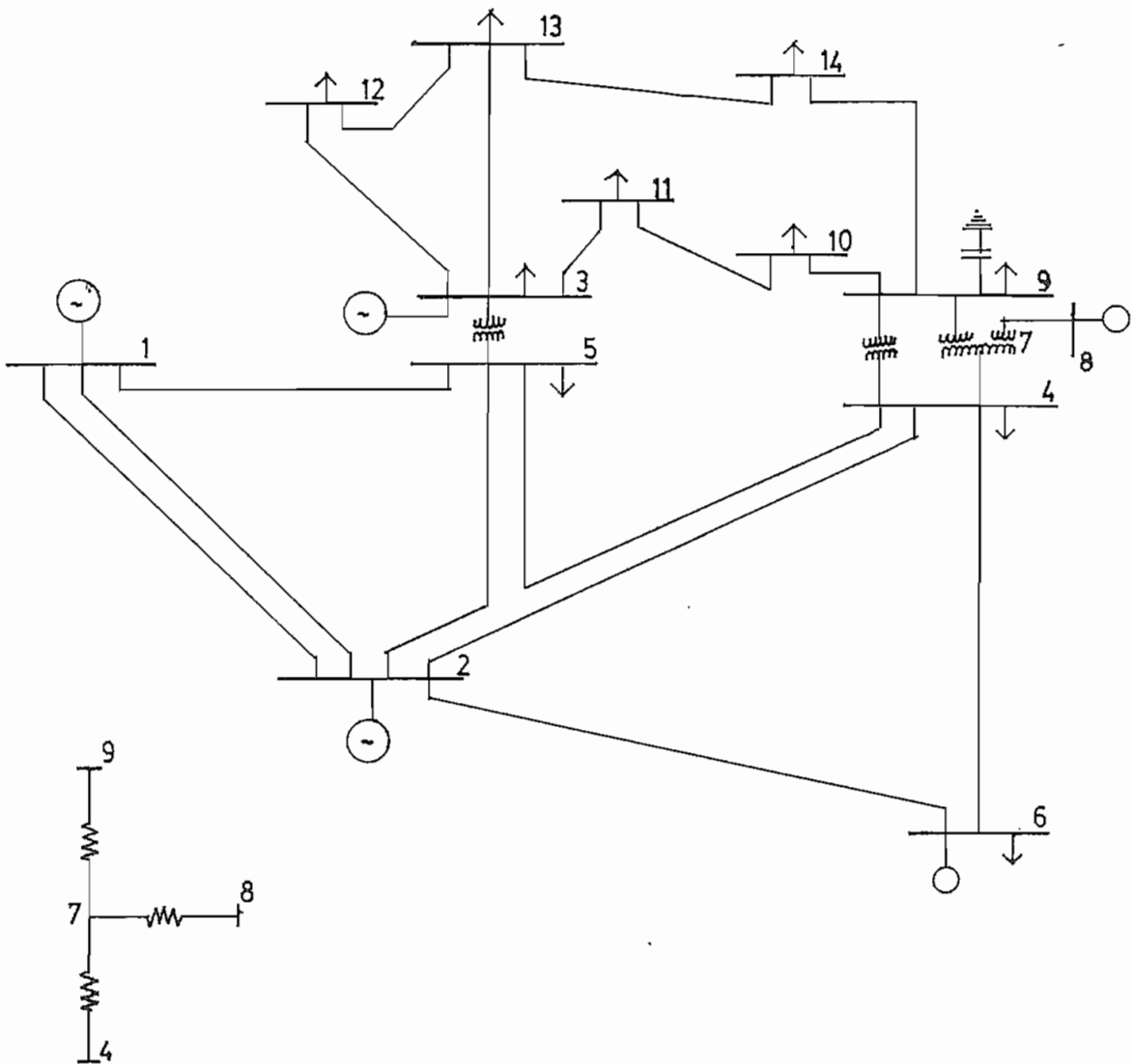
Fig. No. 7

La fig. No.7 indica que las pérdidas activas del sistema varía no-linealmente en el rango de operación de  $t_{65}$ ,  $t_{43}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ . Sin embargo las pérdidas se puede representar como pequeños segmentos lineales en las curvas de pérdidas, si los incrementos en  $t_{65}$ ,  $t_{43}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ , son pequeños alrededor de un punto de operación. La variación de las pérdidas activas son lineales con respecto a  $Q_4$ ,  $Q_6$  en el rango de sus capacidades.

Para la programación lineal algunos rangos para las variables de control ( $t_{paso}$ ,  $V_{paso}$ ,  $Q_{paso}$ ) fueron observados, cada uno de los cuales lleva a la solución cercano al óptimo. Dichos rangos para la primera iteración del F.O.P.R. fue modificado del proceso iterativo como se indica en cada ejemplo de prueba, en algunos casos necesarios para que el sistema converja.

## 3.2 EJEMPLO No.2

(Sistema de 14 barras AEP-IEEE)

Diagrama UnifilarCaracterísticas Generales.

Número de barras	14
Número de elementos	21
Barras de Tensión Controlada	4
Número de la Barra Oscilante	1
Base	100 MVA
Variables de Control	5
1. Voltajes de las barras de generación	5



Datos de Líneas y Transformadores (p.u.)

ELEMENTOS No.	LINEA		RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA
	p	q	R	X	$Y_{Lpq/2}$
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264
2	1	5	0.05403	0.22305	0.0246
3	2	4	0.05811	0.17635	0.0187
4	2	5	0.05695	0.17388	0.0170
5	2	6	0.04699	0.19794	0.0219
6	3	5	0.0	0.23488	0.0
7	3	11	0.09498	0.19890	0.0
8	3	12	0.12291	0.25581	0.0
9	3	13	0.06615	0.13027	0.0
10	4	5	0.01335	0.04211	0.00640
11	4	6	0.06701	0.17103	0.01730
12	4	7	0.0	0.20452	0.0
13	4	9	0.0	0.53894	0.0
14	7	8	0.0	0.17615	0.0
15	7	9	0.0	0.11001	0.0
16	9	10	0.03181	0.08459	0.0
17	9	14	0.12711	0.24038	0.0
18	10	11	0.08205	0.19207	0.0
19	12	13	0.22092	0.19988	0.0
20	13	14	0.17093	0.34802	0.0

Tabla No. 29

Datos del Condensador Shunt

ELEMENTO No.	BARRA No.	MVAR
21	9	19.0

Tabla No.30

Datos de Barra (Despacho de potencia activa tomado de la referencia 6)

BARRA No.	VOLTAJE V p.u.	GENERACION		CARGA	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
1	1.06			0.0	0.0
2	1.045	68.68		21.7	12.7
3	1.07	38.94		11.2	7.5
4				47.8	3.9
5				7.6	1.6
6	1.01	0.0		94.2	19.0
7				0.0	0.0
8	1.09	0.0		0.0	0.0
9				29.5	16.6
10				9.0	5.8
11				3.5	1.8
12				6.1	1.6
13				13.5	5.8
14				14.9	5.0

Tabla No. 31

Límites de Operación del Sistema

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Voltajes de generación	V <sub>1</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>2</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>3</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>6</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>8</sub>	p.u.	1.0	1.1

Tabla No. 32

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de Potencia Reactiva.	Q <sub>1</sub>	MVAR	-50.0	100.00
	Q <sub>2</sub>	MVAR	-80.0	100.00
	Q <sub>3</sub>	MVAR	-60.0	100.00
	Q <sub>6</sub>	MVAR	-50.0	100.0
	Q <sub>8</sub>	MVAR	-60.0	100.0
Voltajes de las Barras de Carga.	V <sub>4</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>5</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>7</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>9</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>10</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>11</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>12</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>13</sub>	p.u.	1.0	1.1
	V <sub>14</sub>	p.u.	1.0	1.1

Tabla No. 33

Criterios de Convergencia.

Criterio de convergencia del F.P. 0:01 (p.u.)

Criterio de convergencia del F.O.P.R. 0.05 (MW)

Rangos para la optimización lineal de las variables de Control.

Variables de Control	V <sub>1</sub> V <sub>2</sub> V <sub>3</sub> V <sub>6</sub> V <sub>8</sub>
	V paso p.u.
1° Iteración	+0.025
Proceso Iterativo.....	+0.01

Tabla No. 34

Resultados del Programa Digital.

A continuación se presenta los resultados obtenidos mediante el programa digital con los datos y límites de operación para el sistema de 14 barras, a partir de un flujo óptimo de potencia activa obtenida en la referencia 6.

TESIS DE GRADO

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR UN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA DE  
 14 BARRAS IEEE

\*\*\*\*\*

DATOS GENERALES

NO. TOTAL DE BARRAS: 14  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 4  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/O TRANSFORMADORES: 20  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 1  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.05000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

DATOS DE BARRAS

BARRA NO.	TIPO DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.06000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	T	1.04500	68.67999	0.00000	21.70000	12.70000
3	T	1.07000	38.93999	0.00000	11.20000	7.50000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	47.80000	3.90000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	7.60000	1.60000
6	T	1.01000	0.00000	0.00000	94.20000	19.00000
7	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	T	1.09000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9	C	0.00000	0.00000	0.00000	29.50000	16.60000
10	C	0.00000	0.00000	0.00000	9.00000	5.80000
11	C	0.00000	0.00000	0.00000	3.50000	1.80000
12	C	0.00000	0.00000	0.00000	6.10000	1.60000
13	C	0.00000	0.00000	0.00000	13.50000	5.80000

-----  
 DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)  
 -----

NO.	BAR P	BAR Q	RFSISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640				
2	1	5	0.05403	0.22305	0.02460				
3	2	4	0.05811	0.17632	0.01870				
4	2	5	0.05695	0.17388	0.01700				
5	2	6	0.04699	0.19794	0.02190				
6	3	5	0.00000	0.23468	0.03000				
7	3	11	0.07498	0.19890	0.06000				
8	3	12	0.12291	0.25581	0.00000				
9	3	13	0.06615	0.13027	0.00000				
10	4	5	0.01335	0.04211	0.00640				
11	4	6	0.06701	0.17103	0.01730				
12	4	7	0.00000	0.29452	0.00000				
13	4	9	0.03000	0.53894	0.00000				
14	7	8	0.03000	0.17615	0.06000				
15	7	9	0.00000	0.11001	0.00000				
16	9	10	0.03181	0.08459	0.03000				
17	9	14	0.12711	0.27038	0.00000				
18	10	11	0.08295	0.19207	0.00000				
19	12	13	0.22092	0.19988	0.00000				
20	13	14	0.17093	0.34802	0.00000				
21	9	9	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	19.000

-----  
 LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA  
 -----

	BAR P	BAR Q	V.MIN	V.MAX	Q.MIN	Q.MAX	T.MIN	T.MAX
GENER	1		1.00000	1.10000	-50.00000	100.00000		
GENER	2		1.00000	1.10000	-80.00000	100.00000		
GENER	3		1.00000	1.10000	-60.00000	100.00000		
CARGA	4		1.00000	1.10000				
CARGA	5		1.00000	1.10000				
GENER	6		1.00000	1.10000	-50.00000	100.00000		
CARGA	7		1.00000	1.10000				
GENER	8		1.00000	1.10000	-60.00000	100.00000		
CARGA	9		1.00000	1.10000				
CARGA	10		1.00000	1.10000				
CARGA	11		1.00000	1.10000				
CARGA	12		1.00000	1.10000				
CARGA	13		1.00000	1.10000				
CARGA	14		1.00000	1.10000				

-----  
 FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE  
 -----

-----  
 RESULTADOS  
 -----

BAR NO.	VOLTAJE		GENERACION		CAPGA		CAP/REAC	DE A		FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR		BAR	PAR	MW	MVAR	MW	MVAR
								1	2	104.598	-7.348	1.890	-0.078
								1	5	55.931	-3.668	1.505	0.786
1	1.0600	0.000	160.529	-11.016	0.000	0.000	-0.000	2	1	-102.708	7.270	1.890	-0.078
								2	4	47.783	-8.194	1.235	-0.287
								2	5	33.427	-8.854	0.608	-1.838
2	1.0450	-3.247	88.680	6.970	21.700	12.700	-0.001	2	6	68.495	4.048	2.037	3.954
								3	5	-17.476	13.931	-0.000	1.025
								3	11	14.933	2.880	0.192	0.402
								3	12	8.537	2.232	0.084	0.174
3	1.0700	-8.636	38.940	33.491	11.200	7.500	-0.000	3	13	22.140	6.948	0.311	0.613
								4	2	-46.548	7.907	1.235	-0.287
								4	5	-61.735	0.303	0.477	0.132
								4	6	28.225	1.120	0.506	-2.315
								4	7	20.414	-11.004	-0.000	1.025
4	1.0322	-7.917	0.000	0.000	47.800	3.900	-0.001	4	9	11.752	-2.216	-0.000	0.723
								5	1	-54.427	4.455	1.505	0.786
								5	2	-32.819	7.016	0.608	-1.838
								5	3	17.476	-12.907	-0.000	1.025
5	1.0401	-6.523	0.000	0.000	7.600	1.600	-0.001	5	4	62.212	-0.171	0.477	0.132
								6	2	-66.458	-0.094	2.037	3.954
								6	4	-27.718	-3.435	0.506	-2.315
6	1.0100	-10.462	0.000	15.471	94.200	19.000	-0.000	7	4	-20.414	12.036	-0.000	1.025
								7	8	0.000	-21.070	0.000	0.703
								7	9	20.413	9.034	-0.000	0.493
7	1.0548	-10.115	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	8	7	0.000	21.773	0.000	0.703
8	1.0900	-10.115	0.000	21.773	0.000	0.000	-0.000	9	4	-11.752	2.940	-0.000	0.723
								9	7	-20.413	-8.541	-0.000	0.493
								9	10	-2.046	5.349	0.000	0.026
								9	14	4.876	4.302	0.000	0.107
9	1.0456	-11.281	0.000	0.000	29.500	16.600	20.772	10	9	2.050	-5.323	0.000	0.026
								10	11	-11.069	-0.475	0.093	0.217
0	1.0419	-11.101	0.000	0.000	9.000	5.800	-0.000	11	3	-14.742	-2.478	0.142	0.402
								11	10	11.162	0.672	0.093	0.217
1	1.0517	-10.009	0.000	0.000	3.500	1.800	-0.000	12	3	-8.454	-2.058	0.004	0.174
								12	13	2.989	0.350	0.018	0.014
2	1.0550	-9.606	0.000	0.000	6.100	1.600	-0.000	13	3	-21.824	-6.335	0.311	0.613
								13	12	-2.971	-0.334	0.018	0.316
								13	14	10.301	1.042	0.167	0.340
3	1.0481	-9.875	0.000	0.000	13.500	5.800	-0.000	14	9	-4.826	-4.285	0.050	0.107
								14	13	-10.134	-0.703	0.167	0.340
	1.0284	-11.686	0.000	0.000	14.900	5.000	-0.000						

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	268.149	66.688
TOTAL MVAR CAP/REAC:		20.768
TOTAL CARGA:	259.000	81.300
TOTAL PERDIDAS:	9.182	6.224

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0600
2	2	1.0450
3	3	1.0700
4	6	1.0100
5	8	1.0900

RESULTADOS

BAR NO.	VOLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC	DE BAR	A BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEA	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR				MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0750	0.000	160.258	-7.066	0.000	0.000	-0.000	1	2	104.908	-7.227	1.848	-0.373
								1	5	55.350	0.160	1.437	0.391
2	1.0600	-3.163	68.680	15.982	21.700	12.700	-0.001	2	1	-103.059	6.854	1.848	-0.373
								2	4	47.786	-3.606	1.182	-0.534
								2	5	33.270	-4.038	0.563	-2.054
								2	6	68.904	4.073	2.003	3.678
3	1.0550	-8.253	38.940	20.590	11.200	7.500	-0.000	3	5	-16.736	3.846	-0.000	0.622
								3	11	14.281	1.079	0.175	0.367
								3	12	8.361	2.076	0.082	0.171
								3	13	20.919	6.089	0.282	0.555
4	1.0394	-7.595	0.000	0.000	47.800	3.900	-0.001	4	2	-46.604	3.071	1.182	-0.534
								4	5	-61.858	0.697	0.473	0.099
								4	6	27.851	-3.372	0.482	-2.455
								4	7	20.883	-4.671	-0.000	0.867
								4	9	12.067	0.354	-0.000	0.727
5	1.0471	-6.214	0.000	0.000	7.600	1.600	-0.001	5	1	-53.914	0.230	1.837	0.391
								5	2	-32.707	1.984	0.563	-2.054
								5	3	16.736	-3.224	-0.000	0.622
								5	4	62.330	-0.598	0.473	0.099
6	1.0250	-10.212	0.000	19.522	94.200	19.000	-0.000	6	2	-66.901	-0.395	2.003	3.678
								6	4	-27.369	0.917	0.482	-2.455
7	1.0494	-9.839	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	7	8	-24.883	-5.538	-0.000	0.867
								7	8	3.000	-15.746	0.000	0.372
								7	9	26.883	9.768	-0.000	0.530
8	1.0750	-9.839	0.000	15.618	0.000	0.000	-0.000	8	7	0.000	15.618	0.000	0.372
9	1.0395	-11.046	0.000	0.000	29.500	16.600	20.529	9	4	-12.067	0.373	-0.000	0.727
								9	7	-20.883	-0.178	-0.000	0.530
								9	10	-1.729	7.182	0.016	0.342
								9	14	5.051	5.576	0.067	0.142
10	1.0342	-10.846	0.000	0.000	9.000	5.800	-0.000	10	9	1.745	-7.139	0.016	0.042
								10	11	-16.800	1.349	0.091	0.213
11	1.0404	-9.662	0.000	0.000	3.500	1.800	-0.000	11	3	-14.106	-0.713	0.175	0.367
								11	10	10.891	-1.156	0.091	0.213
12	1.0404	-9.236	0.000	0.000	6.100	1.600	-0.000	12	3	-8.279	-1.905	0.082	0.171
								12	13	2.497	0.253	0.013	0.012
13	1.0346	-9.472	0.000	0.000	13.500	5.800	-0.000	13	3	-20.637	-5.533	0.282	0.555
								13	12	-2.484	-0.242	0.013	0.012
								13	14	10.140	-0.112	0.164	0.334
14	1.0188	-11.401	0.000	0.000	14.900	5.000	-0.000	14	9	-4.985	-5.434	0.067	0.142
								14	13	-9.976	0.446	0.164	0.334

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	267.878	64.645
TOTAL MVAR CAP/REAC:		20.524
TOTAL CARGA:	259.000	81.300
TOTAL PERDIDAS:	8.878	3.703

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0750
2	2	1.0600
3	3	1.0550
4	6	1.0250
5	8	1.0750



Comparación de Resultados.

Caso Base

Referencia 6

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.06	0.0	160.94	-9.96	1	1.06	0.000	160.529	-11.016
2	1.045	-3.25	68.68	10.51	2	1.045	-3.247	68.68	6.97
3	1.07	-8.98	38.94	49.08	3	1.07	-8.636	38.94	33.491
4	1.0287	-7.83			4	1.0322	-7.917		
5	1.0377	-6.53			5	1.0401	-6.523		
6	1.01	-10.48	0.0	17.61	6	1.01	-10.462	0.0	15.47
7	1.0348	-9.94			7	1.0548	-10.115		
8	1.09	-9.94	0.0	34.16	8	1.09	-10.115	0.0	21.77
9	1.0042	-11.10			9	1.0456	-11.28		
10	1.0076	-10.99			10	1.0419	-11.101		
11	1.0342	-10.09			11	1.0517	-10.009		
12	1.0515	-9.97			12	1.055	-9.606		
13	1.0423	-10.10			13	1.0481	-9.875		
14	1.002	-11.71			14	1.0284	-11.686		

Pérdidas	
MW	
Referencia 6	9.535
Esta Tesis	9.182

Tabla No.35

Resultados del Flujo Optimo de Potencia Reactiva: CASO OPTIMO

Referencia 6

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.0600	0.0	160.81	-8.06	1	1.075	0.0	160.258	-7.066
2	1.0450	- 3.26	68.68	14.91	2	1.06	-3.163	68.68	15.982
3	1.0507	- 8.85	38.94	37.77	3	1.055	-8.253	38.94	20.59
4	1.0254	- 7.82			4	1.0394	-7.595		
5	1.0336	- 6.46			5	1.0471	-6.214		
6	1.0100	-10.51	0.0	19.57	6	1.025	-10.212	0.0	19.522
7	1.0303	- 9.99			7	1.0494	-9.839		
8	1.0900	- 9.99	0.0	36.93	8	1.075	-9.839	0.0	15.618
9	0.9960	-11.19			9	1.0395	-11.046		
10	0.9976	-11.06			10	1.0342	-10.846		
11	1.0196	-10.07			11	1.0404	-9.682		
12	1.0328	- 9.88			12	1.0404	-9.236		
13	1.0243	-10.04			13	1.0346	-9.472		
14	0.9895	-11.77			14	1.0188	-11.401		

Pérdidas	
PL MW	
Referencia 6	9.4174
Esta Tesis	8.878

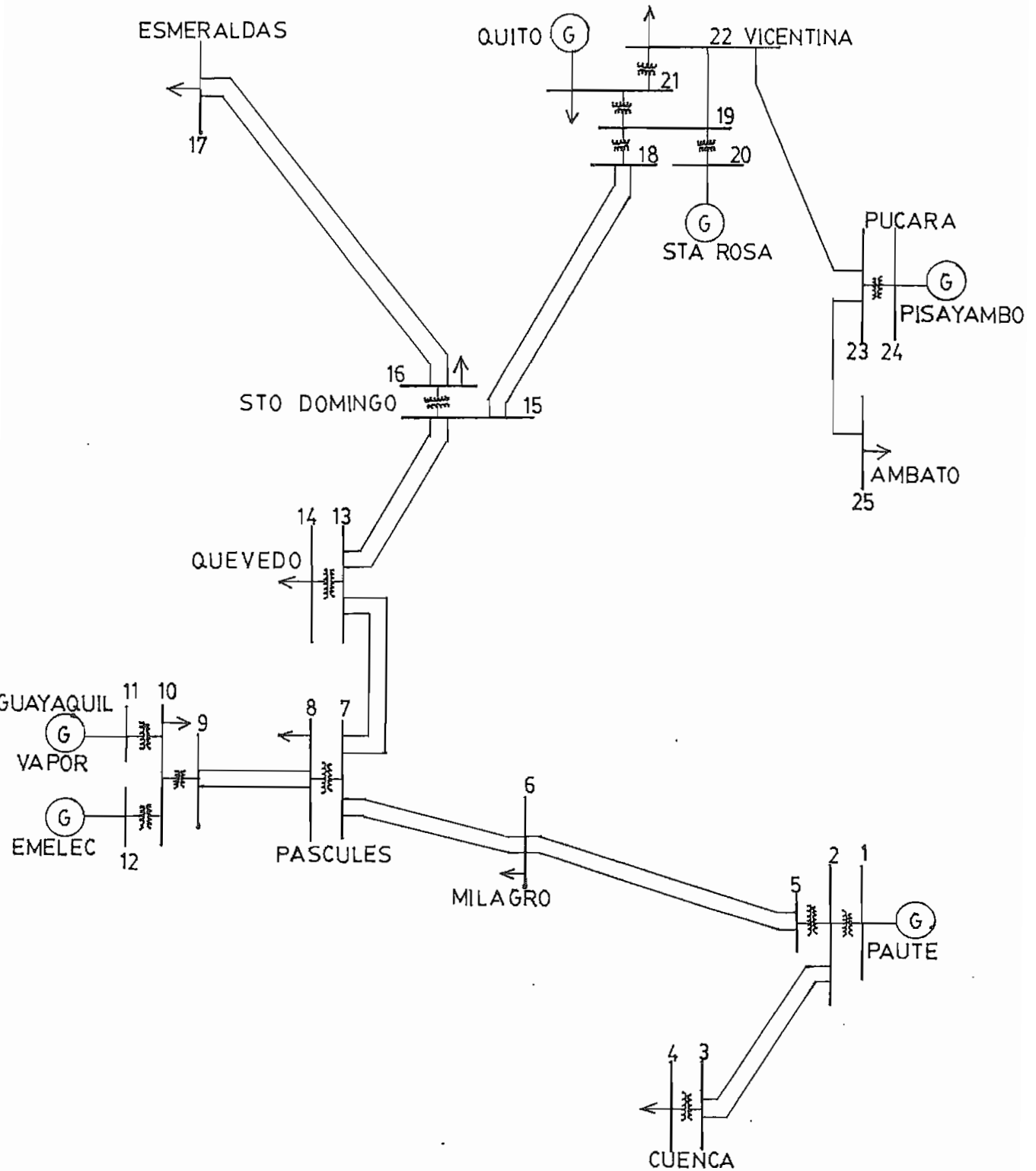
Tabla No. 36

Comentario del Sistema

Al realizar un flujo óptimo de potencia reactiva a partir del caso base se ha logrado disminuir las pérdidas en 0.304 MW lo que significa disminuir en un 3.31%; manteniendo los niveles de voltaje dentro de sus límites de operación.

## 3.3 Ejemplo No.3 Sistema Nacional Interconectado

Diagrama Unifilar



Características Generales del Sistema

Número de barras	25
Número de elementos	26
Barras de tensión controlada	5
Número de la barra oscilante	1
Base	100 MVA

Datos de Líneas y Transformadores (p.u.)

$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$   
 $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$

ELEMENTOS No.	LINEA		RESISTENCIA R	REACTANCIA X	SUSCEPTANCIA $Y_{Lpq}/2$	TAPS tpq
	p	q				
1	1	2		0.0208		
2	2	3	0.0298	0.0927	0.0440	
3	3	4		0.0683		
4	2	5		0.0098		
5	5	6	0.0079	0.0641	0.2558	
6	6	7	0.0025	0.0210	0.0840	
7	8	9	0.0061	0.0218	0.0107	
8	7	13	0.0081	0.0646	0.2696	
9	13	14		0.0449		
10	13	15	0.0059	0.0468	0.1955	
11	15	16		0.0449		
12	16	17	0.0654	0.2007	0.0986	
13	15	18	0.0044	0.0361	0.1411	
14	19	20		0.1143		
15	19	21		0.1150		
16	19	22	0.0126	0.0508	0.0110	
17	22	23	0.0751	0.2897	0.0670	
18	23	24		0.1272		
19	23	25	0.0176	0.0672	0.016	
20	7	8		0.0196		0.9756
21	9	10		0.0560		0.9756
22	11	10		0.0533		0.9804
23	12	10		0.4720		1.0250
24	19	18		0.0196		1.0250
25	21	22		0.1069		1.0256

### 3.3.1 Máxima Carga

#### Características del Sistema para Demanda Máxima

Número de variable de control	9
1. Voltajes de las barras generación	6
2. Transformadores con cambiador de Taps	3
Número de Capacitores shunt	1

#### Datos de Barra

Despacho económico: tomado de la referencia 6

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		CARGA		
	V p.u.	P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR	
1	1.05					
2						
3						
4					8.6	12.0
5						
6					12.2	3.0
7						
8					19.9	9.0
9						
10					255.0	87.0
11	1.03	107.27				
12	1.02	99.58				
13						
14				41.7	9.0	
15						
16				10.0	5.0	
17				11.2	6.0	
18						
19						
20	1.02	40.29				
21	1.01	84.42		192.30	82.2	
22				18.40	7.0	
23						
24	1.02	58.2				
25				39.1	22.0	

Tabla No.38

Límites de Operación del Sistema

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Transformadores con Taps.	t 7.8		0.95	1.05
	t 9.10		0.95	1.05
	t19.18		0.95	1.05
Voltajes de las barras de generación.	V <sub>1</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>11</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>12</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>20</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>21</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>24</sub>	p.u.	0.95	1.05

Tabla No.39

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de Potencia Reactiva.	Q <sub>1</sub>	MVAR	-25.0	100.0
	Q <sub>11</sub>	MVAR	0.0	80.
	Q <sub>12</sub>	MVAR	0.0	40.
	Q <sub>20</sub>	MVAR	-20.0	50.
	Q <sub>21</sub>	MVAR	0.0	50.
	Q <sub>24</sub>	MVAR	0.0	30.
Voltaje de las barras de carga.	V <sub>2</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>3</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>4</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>5</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>6</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>7</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>8</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>9</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>10</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>13</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>14</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>15</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>16</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>17</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>18</sub>	p.u.	0.95	1.05
	V <sub>19</sub>	p.u.	0.95	1.05
V <sub>22</sub>	p.u.	0.95	1.05	
V <sub>23</sub>	p.u.	0.95	1.05	
V <sub>25</sub>	p.u.	0.95	1.05	

Tabla No. 40

Criterios de Convergencia.

Criterio de convergencia del F.P.	0.01 (p.u.)
Criterio de convergencia del F.O.P.R.	0.05 (MW)

Rangos para la optimización lineal de las variables de control.

VARIABLES DE CONTROL	t paso	Vpaso p.u.
1° Iteración	0.01	0.005
Proceso Iterativo	0.005	0.0025

Tabla No.41

Resultados del Programa Digital

A continuación se presentan los resultados del programa digital, del Sistema Nacional Interconectado, demanda máxima para Mayo/84.



TESIS DE GRADO

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR UN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA NACIONAL

DEMANDA MAXIMA MAYO/84

\*\*\*\*\*

DATOS GENERALES

NO. TOTAL DE BARRAS: 25  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 5  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/C TRANSFORMADORES: 25  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 1  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.05000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P.: 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPCS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

DATOS DE BARRAS

BARRA NO.	TIPC DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	8.60000	12.00000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6	C	0.00000	0.00000	0.00000	12.20000	3.00000
7	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	C	0.00000	0.00000	0.00000	19.90000	9.00000
9	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	C	0.00000	0.00000	0.00000	255.00000	87.00000
11	T	1.03000	107.26999	0.00000	0.00000	0.00000
12	T	1.02000	99.57999	0.00000	0.00000	0.00000
13	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
14	C	0.00000	0.00000	0.00000	41.70000	9.00000
15	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

19	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20	T	1.02000	40.28999	0.00000	0.00000	0.00000
21	T	1.01000	84.42000	0.00000	192.29999	82.20000
22	C	0.00000	0.00000	0.00000	18.40000	7.00000
23	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
24	T	1.02000	58.20000	0.00000	0.00000	0.00000
25	C	0.00000	0.00000	0.00000	39.10000	22.00000

-----  
 DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)  
 -----

NO.	BAR F	BAR Q	RESISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1	1	2	0.00000	0.02000	0.00000				
2	2	3	0.02980	0.09270	0.04400				
3	3	4	0.00000	0.06830	0.00000				
4	2	5	0.00000	0.00980	0.00000				
5	5	6	0.00790	0.06410	0.25580				
6	6	7	0.00250	0.02100	0.08400				
7	7	8	0.00000	0.01960	0.00000	100.00	0.9756	1.0000	
8	8	9	0.00610	0.02180	0.01370				
9	9	11	0.00000	0.05600	0.00000	100.00	0.9756	1.0000	
10	11	10	0.00000	0.05330	0.00000	100.00	0.9804	1.0000	
11	12	10	0.00000	0.47200	0.00000	100.00	1.0250	1.0000	
12	7	13	0.00810	0.06460	0.26960				
13	13	14	0.00000	0.04490	0.00000				
14	13	15	0.00590	0.04680	0.19550				
15	15	16	0.00000	0.04490	0.00000				
16	16	17	0.06540	0.20070	0.09860				
17	15	18	0.00440	0.03610	0.14110				
18	19	18	0.00000	0.01960	0.00000	100.00	1.0250	1.0000	
19	19	20	0.00000	0.11430	0.00000				
20	19	21	0.00000	0.11500	0.00000				
21	19	22	0.01260	0.05080	0.61100				
22	21	22	0.00000	0.10690	0.00000	100.00	1.0256	1.0000	
23	22	23	0.07510	0.28970	0.06700				
24	23	24	0.00000	0.12720	0.00000				
25	23	25	0.01760	0.06720	0.01600				
26	21	21	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	12.000

-----  
 LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA  
 -----

	BAR F	BAR Q	V.MIN	V.MAX	G.MIN	G.MAX	T.MIN	T.MAX
GENER	1		0.95000	1.05000	-25.00000	100.00000		
CARCA	2		0.95000	1.05000				
CARGA	3		0.95000	1.05000				
CARGA	4		0.95000	1.05000				
CARGA	5		0.95000	1.05000				
CARGA	6		0.95000	1.05000				
CARGA	7		0.95000	1.05000				
CARGA	8		0.95000	1.05000				
CARGA	9		0.95000	1.05000				
CARGA	10		0.95000	1.05000				
GENER	11		0.95000	1.05000	0.00000	80.00000		
GENER	12		0.95000	1.05000	0.00000	40.00000		
CARGA	13		0.95000	1.05000				
CARGA	14		0.95000	1.05000				
CARGA	15		0.95000	1.05000				
CARGA	16		0.95000	1.05000				
CARGA	17		0.95000	1.05000				
CARGA	18		0.95000	1.05000				
CARGA	19		0.95000	1.05000				
GENER	20		0.95000	1.05000	-20.00000	50.00000		
GENER	21		0.95000	1.05000	0.00000	50.00000		
CARGA	22		0.95000	1.05000				
CARGA	23		0.95000	1.05000				
GENER	24		0.95000	1.05000	0.00000	30.00000		
CARGA	25		0.95000	1.05000				
TRANS	7	8					0.95000	1.05000
TRANS	9	10					0.95000	1.05000
TRANS	19	18					0.95000	1.05000

RESULTADOS

BAR NO.	VOLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEA	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0500	0.000	226.599	-0.527	0.000	0.000	-0.001	1 2	226.599	-0.529	-0.000	9.686
								2 1	-226.599	10.215	-0.000	9.686
								2 3	8.285	2.622	0.034	-9.535
								2 5	218.112	-12.836	-0.000	4.234
2	1.0511	-2.446	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005	3 2	-8.251	-12.157	0.034	-9.535
								3 4	8.628	12.138	-0.000	0.139
3	1.0421	-2.733	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	4 3	-8.628	-11.999	-0.000	0.139
4	1.0342	-3.046	0.000	0.000	8.600	12.000	-0.000	5 2	-218.112	17.071	-0.000	4.234
								5 6	218.150	-17.080	3.403	-28.263
5	1.0525	-3.555	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	6 5	-214.752	-11.183	3.403	-28.263
								6 7	202.966	8.100	0.963	-9.867
6	1.0377	-10.865	0.000	0.000	12.200	3.000	-0.002	7 6	-202.003	-17.968	0.963	-9.867
								7 8	68.514	72.372	-0.000	1.745
								7 13	133.277	-54.361	1.406	-46.511
7	1.0301	-13.127	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	8 7	-68.514	-70.627	-0.000	1.745
								8 9	48.835	61.568	0.355	-1.023
8	1.0425	-13.826	0.000	0.000	19.900	9.000	-0.001	9 8	-48.480	-62.591	0.355	-1.023
								9 10	48.161	62.669	-0.000	3.160
9	1.0266	-14.191	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	10 9	-48.161	-59.519	-0.000	3.160
								10 11	-107.177	-57.167	-0.000	7.571
								10 12	-99.518	29.634	-0.000	48.992
10	1.0192	-15.632	0.000	0.000	255.000	87.000	-0.001	11 10	107.177	64.737	-0.000	7.571
11	1.0300	-12.574	107.270	64.738	0.000	0.000	-0.001	12 10	99.518	19.358	-0.000	48.992
12	1.0200	11.958	99.560	19.358	0.000	0.000	-0.000	13 7	-131.870	7.850	1.406	-46.511
								13 14	41.806	9.730	-0.000	0.766
								13 15	90.177	-17.621	0.445	-38.467
13	1.0393	-17.852	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	14 13	-41.806	-8.565	-0.000	0.766
14	1.0353	-18.851	0.000	0.000	41.700	9.000	-0.000	15 13	-89.732	-20.846	0.445	-38.467
								15 16	21.333	-9.776	-0.000	0.231
								15 18	68.447	30.602	0.279	-27.310
15	1.0334	-20.093	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	16 15	-21.333	10.009	-0.000	0.231
								16 17	11.320	-15.006	0.089	-20.994
16	1.0377	-20.604	0.000	0.000	10.000	5.000	-0.000	17 16	-11.231	-5.988	0.089	-20.994
17	1.0393	-21.964	0.000	0.000	11.200	6.000	-0.000	18 15	-68.168	-57.512	0.279	-27.310
								18 19	67.904	58.011	-0.000	1.518
18	1.0148	-21.333	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	19 18	-67.904	-56.493	-0.000	1.518
								19 20	-40.298	8.754	-0.000	1.837
								19 21	61.960	18.894	-0.000	4.560
								19 22	46.583	28.700	0.364	-0.813
19	1.0287	-22.082	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	20 19	40.298	-6.918	-0.000	1.837
20	1.0200	-19.566	40.290	-6.918	0.000	0.000	-0.000	21 19	-61.960	-14.335	-0.000	4.560
								21 22	-45.920	-20.686	-0.000	2.796
21	1.0100	-26.014	84.420	34.939	192.300	82.200	12.241	22 19	-46.218	-29.513	0.364	-0.813
								22 21	45.920	23.482	-0.000	2.796
								22 23	-18.461	-0.817	0.278	-12.530
22	1.0085	-23.181	0.000	0.000	18.400	7.000	-0.001	23 22	18.739	-11.713	0.278	-12.530
								23 24	-58.160	-8.475	-0.000	4.336
								23 25	39.623	20.114	0.355	-1.821
23	1.0066	-19.906	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	24 23	58.160	12.811	-0.000	4.336
24	1.0200	-15.774	58.200	12.811	0.000	0.000	-0.000	25 23	-39.269	-21.935	0.355	-1.821
25	0.9855	-21.223	0.000	0.000	39.100	22.000	-0.000					

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	616.359	124.401
TOTAL MVAR CAP/REAC:		12.212
TOTAL CARGA:	608.400	242.200
TOTAL PERDIDAS:	7.970	-105.563

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE

-----

1.- VOLTAJES DE GENERACION

-----

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	11	1.0300
3	12	1.0200
4	20	1.0200
5	21	1.0100
6	24	1.0200

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

-----

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	7	8	0.97560
2	9	10	0.97560
3	19	18	1.02500

FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO

-----

RESLLTADOS

-----

VOLTAJE U	GRADOS	GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS FN LINEAS	
		MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR	MW	MVAR
3	0.000	226.419	-14.275	0.000	0.000	-0.001	1 2	226.419	-14.275	-0.000	9.842
							2 1	-226.419	24.117	-0.000	9.842
							2 3	6.636	2.692	0.036	-9.448
							2 5	217.783	-26.809	-0.000	4.306
	-2.472	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	3 2	-8.600	-12.140	0.036	-9.448
							3 4	8.600	12.141	-0.000	0.140
	-2.777	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	4 3	-8.600	-12.141	-0.000	0.140
	-3.092	0.000	0.000	8.600	12.000	-0.000	5 2	-217.783	31.115	-0.000	4.306
							5 6	217.783	-31.120	3.403	-28.414
	-3.586	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	6 5	-214.381	2.707	3.403	-28.414
							6 7	202.181	-5.744	0.939	-10.320
	-10.922	0.000	0.000	12.200	3.000	-0.002	7 6	-201.242	-4.576	0.939	-10.320
							7 8	68.329	-110.094	-0.000	0.410
	-13.163	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	7 13	132.913	-56.387	1.582	-47.713
							8 7	-68.330	110.504	-0.000	0.410
	-13.860	0.000	0.000	19.900	9.000	-0.002	8 9	48.430	50.349	0.280	-1.298
							9 8	-48.150	-51.647	0.280	-1.298
							9 10	48.150	35.023	-0.000	1.801

1.0298	-14.256	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	10 9	-48.150	-33.222	-0.000	1.861
							10 11	-107.270	-67.288	-0.000	8.435
							10 12	-99.579	29.380	0.230	50.215
1.0066	-15.790	0.000	0.000	255.000	87.000	-0.001	11 10	107.270	75.713	-0.000	8.435
1.0233	-12.620	107.270	75.723	0.000	0.000	-0.000	12 10	99.579	20.835	-0.000	50.215
1.0110	12.516	99.580	20.835	0.000	0.000	-0.000	13 7	-131.531	8.674	1.382	-47.713
							13 14	41.700	9.752	-0.000	0.748
							13 15	89.831	-18.418	0.433	-39.334
1.0487	-17.800	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	14 13	-41.700	-9.004	-0.000	0.748
1.0447	-18.780	0.000	0.000	41.700	9.000	-0.001	15 13	-89.397	-20.916	0.433	-39.334
							15 16	21.288	-10.154	-0.000	0.229
							15 18	68.109	31.112	0.275	-27.901
1.0431	-19.993	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	16 15	-21.288	10.383	-0.000	0.229
							16 17	11.288	-15.406	0.088	-21.407
1.0475	-20.495	0.000	0.000	10.000	5.000	-0.001	17 16	-11.200	-6.001	0.088	-21.407
1.0495	-21.832	0.000	0.000	11.200	6.000	-0.000	18 15	-67.834	-59.013	0.275	-27.901
							18 19	67.834	-133.221	-0.000	0.757
1.0243	-21.202	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	19 18	-67.834	133.978	-0.000	0.757
							19 20	-40.290	19.515	-0.000	2.152
							19 21	62.063	13.945	-0.000	4.357
							19 22	46.061	24.437	0.329	-0.975
1.0316	-21.937	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	20 19	40.290	-17.363	-0.000	2.152
1.0110	-19.406	40.290	-17.363	0.000	0.000	-0.000	21 19	-62.063	-9.088	-0.000	4.357
							21 22	-45.817	-17.497	-0.000	2.605
1.0190	-25.830	84.420	43.155	192.300	82.200	12.460	22 19	-45.732	-25.412	0.329	-0.975
							22 21	45.817	20.102	-0.000	2.605
							22 23	-18.484	-1.756	0.269	-12.738
1.0136	-23.042	0.000	0.000	18.400	7.000	-0.001	23 22	18.753	-10.981	0.269	-12.738
							23 24	-58.200	-9.072	-0.000	4.290
							23 25	39.447	20.089	0.347	-1.899
1.0142	-19.841	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	24 23	58.200	13.362	-0.000	4.290
1.0282	-15.770	58.200	13.362	0.000	0.000	-0.000	25 23	-39.100	-21.986	0.347	-1.899
0.9932	-21.131	0.000	0.000	39.100	22.000	-0.000					

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	616.178	121.438
TOTAL MVAR CAP/REAC:		12.440
TOTAL CARGA:	608.399	242.200
TOTAL PERDIDAS:	7.779	-111.158

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0429
2	11	1.0233
3	12	1.0110
4	20	1.0110
5	21	1.0190
6	24	1.0282

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	7	8	0.98493
2	9	10	0.99560
3	19	18	1.01830

Comparación de Resultados

Caso Base

Referencia 6

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05	0.0	226.57	-10.02	1	1.05	0.0	226.599	- 0.527
2	1.0529	- 2.44			2	1.0511	- 2.448		
3	1.0439	- 2.74			3	1.0421	- 2.733		
4	1.036	- 3.06			4	1.0342	- 3.046		
5	1.0552	- 3.54			5	1.0525	- 3.555		
6	1.0461	-10.81			6	1.0377	-10.865		
7	1.0402	-13.04			7	1.0301	-13.127		
8	1.0551	-13.72			8	1.0425	-13.826		
9	1.0162	-14.11			9	1.0266	-14.191		
10	1.0141	-15.57			10	1.0192	-15.632		
11	1.0300	-12.49	107.25	74.82	11	1.030	-12.574	107.25	64.738
12	1.0200	12.21	99.57	20.49	12	1.020	11.958	99.57	19.358
13	1.0467	-17.66			13	1.0393	-17.852		
14	1.0427	-18.64			14	1.0353	-18.851		
15	1.0385	-19.85			15	1.0334	-20.093		
15	1.0429	-20.36			16	1.0377	-20.604		
17	1.0447	-21.70			17	1.0393	-21.964		
18	1.0179	-21.06			18	1.0148	-21.333		
19	1.0390	-21.81			19	1.0287	-22.082		
20	1.0200	-19.29	40.33	-8.85	20	1.02	-19.566	40.29	- 6.918
21	1.0100	-25.72	84.42	31.77	21	1.01	-26.014	84.42	34.939
22	1.0098	-22.89			22	1.0085	-23.181		
23	1.0071	-19.61			23	1.0066	-19.906		
24	1.0200	-15.48	58.16	12.47	24	1.02	-15.774	58.16	12.811
25	0.9859	-20.92			25	0.9855	-21.223		

PERDIDAS	
	PL MW
Referencia 6	9.44
Esta Tesis	7.97

Tabla No.42

Resultados del Flujo Optimo de Potencia Reactiva: CASO OPTIMO

Referencia 6

Esta Tesis

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05	0.0	226.67	- 5.21	1	1.0429	0.0	226.419	-14.275
2	1.0520	- 2.45			2	1.0468	- 2.472		
3	1.0430	- 2.75			3	1.0377	- 2.777		
4	1.0351	- 3.06			4	1.0297	- 3.092		
5	1.0538	- 3.55			5	1.0495	- 3.586		
6	1.0419	-10.83			6	1.0434	-10.922		
7	1.0353	-13.07			7	1.0387	-13.163		
8	1.0490	-13.76			8	1.0433	-13.860		
9	1.0091	-14.13			9	1.0298	-14.256		
10	1.0169	-15.58			10	1.0066	-15.740		
11	1.0300	-12.51	107.27	69.3	11	1.0233	-12.620	107.27	75.723
12	1.0200	12.11	99.58	19.83	12	1.0110	12.516	99.58	20.835
13	1.0430	-17.73			13	1.0487	-17.800		
14	1.0390	-18.72			14	1.0447	- 8.780		
15	1.0359	-19.94			15	1.0431	-19.993		
16	1.0403	-20.45			16	1.0475	-20.495		
17	1.0420	-21.80			17	1.0495	-21.832		
18	1.0163	-21.17			18	1.0243	-21.202		
19	1.0298	-21.91			19	1.0316	-21.937		
20	1.0200	-19.40	40.29	-7.86	20	1.0110	-19.406	40.29	-17.363
21	1.0100	-25.83	84.42	33.39	21	1.0190	-25.830	84.42	43.155
22	1.0091	-23.00			22	1.0136	-23.042		
23	1.0068	-19.72			23	1.0142	-19.841		
24	1.02	-15.58	58.20	12.65	24	1.0282	-15.770	58.20	13.362
25	0.9857	-21.03			25	0.9932	-21.131		

Pérdidas	
PL MW	
Referencia 6	9.544
Esta tesis	7.779

Tabla No.43

### Comentario del Sistema

Los resultados obtenidos son satisfactorios al obtener niveles de voltaje en todo el sistema dentro del rango especificado; así, en la barra 2 se tiene un voltaje de 1.0511 p.u. y en la barra 5 un voltaje de 1.0525 p.u. Al realizar un F.O.P.R. al sistema, en dichas barras los niveles de voltaje bajan a sus límites permisibles, es decir en la barra 2 a 1.0468 p.u. y en la barra 5 a 1.0495 p.u.; además se ha conseguido reducir las pérdidas del sistema en 2.4%, en 3 iteraciones.

En el presente caso cumple con el objetivo de minimizar las pérdidas y mejorar los perfiles de voltajes de sistema. Se puede asegurar que si el S.N.I. esta con las condiciones encontradas, estaría operando en las mejores condiciones para máxima carga.



### 3.3.2 Mínima Carga del S.N.I. Febrero/85

#### Características del Sistema para demanda mínima.

Número de variables de control	13
1. Voltajes de generación	6
2. Transformadores con cambiador con taps	3
3. Reactores shunt	4

ELEMENTO No.	BARRA m+x	MVAR
1	2	0
2	8	0
3	16	0
4	19	0

Tabla No. 44

Datos de Barra

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		CARGA	
	V p.u.	P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
1	1.05				
2					
3					
4				3.6	4.1
5					
6				6.4	1.6
7					
8				13.9	6.3
9					
10				156.0	53.9
11	1.03	30.6			
12	1.03	48.9			
13					
14				24.9	5.4
15					
16				7.5	3.7
17				7.0	3.5
18					
19					
20	1.05	0.0			
21	1.05	28.68		75.7	32.4
22				7.5	2.8
23					
24	1.02	10.39			
25				18.8	10.6

Tabla No. 45

### Límites de Operación del Sistema

Los límites de operación son los mismos de las tablas No.39, 40, además:

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Reactores Shunt	Q <sub>2</sub>	MVAR	-20.0	0.0
	Q <sub>8</sub>	MVAR	-20.0	0.0
	Q <sub>16</sub>	MVAR	-10.0	0.0
	Q <sub>19</sub>	MVAR	-20.0	0.0

Tabla No. 46

### Criterios de Convergencia

Criterio de convergencia del F.P.                      0.01 (p.u.)  
 Criterio de convergencia del F.O.P.R.                0.02 (MW)

VARIABLES DE CONTROL	t paso	V <sub>paso</sub> p.u.	Q <sub>paso</sub> p.u.
1° Iteración	0.01	0.005	0.1
Proceso Iterativo	0.005	0.0025	0.1

Tabla No. 47

## Resultados del Programa Digital

A continuación se presentan los resultados del programa digital del S.N.I., demanda mínima para Febrero/85

### Resultados

Puesto que no existe referencia con lo cuál se compare los resultados del flujo óptimo de potencia reactiva para mínima carga del S.N.I., se presenta a continuación los resultados obtenidos en el caso base y en el caso óptimo.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
-----

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
-----

TESIS DE GRADO  
-----

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
POR UN CONTROL OPTIMO EN:  
1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
2.- VOLTAJES DE GENERACION  
3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA NACIONAL

DEMANDA MINIMA FERRERO/85

\*\*\*\*\*

DATOS GENERALES  
-----

NO. TOTAL DE BARRAS: 25  
NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 5  
NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 1  
NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
Y/O TRANSFORMADORES: 25  
NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 4  
MVA. BASE: 100.000  
CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.02000  
MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
T VOLTAJE CONTROLADO  
C CARGA

DATOS DE BARRAS  
-----

BARRA NG.	TIPO DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	S	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4	C	0.00000	0.00000	0.00000	3.60000	4.10000
5	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6	C	0.00000	0.00000	0.00000	6.40000	1.60000
7	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	C	0.00000	0.00000	0.00000	13.70000	6.30000
9	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	C	0.00000	0.00000	0.00000	156.00000	53.87999
11	T	1.03000	30.60000	0.00000	0.00000	0.00000
12	T	1.03000	48.89999	0.00000	0.00000	0.00000
13	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
14	C	0.00000	0.00000	0.00000	24.90000	5.40000
15	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
16	C	0.00000	0.00000	0.00000	7.50000	3.70000
17	C	0.00000	0.00000	0.00000	7.00000	3.50000
18	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

19	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20	T	1.05000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
21	T	1.05000	28.68000	0.00000	75.70000	32.39999
22	C	0.00000	0.00000	0.00000	7.50000	2.80000
23	C	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
24	T	1.02000	10.39000	0.00000	0.00000	0.00000
25	C	0.00000	0.00000	0.00000	18.80000	10.60000

-----  
 DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)  
 -----

NO.	BAR P	BAR Q	RESISTEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC (DISPONIBLE)
1	1	2	0.00000	0.02080	0.00000				
2	2	3	0.02980	0.09270	0.04400				
3	3	4	0.00000	0.06830	0.00000				
4	2	5	0.00000	0.00980	0.00000				
5	5	6	0.00790	0.06410	0.25580				
6	6	7	0.00250	0.02100	0.08800				
7	7	8	0.00000	0.01960	0.00000	100.00	0.9756	1.0000	
8	8	9	0.00610	0.02180	0.01070				
9	9	10	0.00000	0.05600	0.00000	100.00	0.9756	1.0000	
10	11	13	0.00000	0.05530	0.00000	100.00	0.9804	1.0000	
11	12	10	0.00000	0.47200	0.00000	100.00	1.0250	1.0000	
12	7	13	0.00810	0.06460	0.26960				
13	13	14	0.00000	0.04490	0.00000				
14	13	15	0.00590	0.04620	0.19550				
15	15	16	0.00000	0.04490	0.00000				
16	16	17	0.06540	0.20070	0.09860				
17	15	18	0.00440	0.03610	0.14110				
18	19	18	0.00000	0.01960	0.00000	100.00	0.9756	1.0000	
19	19	20	0.00000	0.11430	0.00000				
20	19	21	0.00000	0.11500	0.00000				
21	19	22	0.01260	0.05080	0.01100				
22	21	22	0.00000	0.10690	0.00000	100.00	1.0256	1.0000	
23	22	23	0.07510	0.28970	0.06700				
24	23	24	0.00000	0.12720	0.00000				
25	23	25	0.01760	0.06720	0.01690				
26	2	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
27	8	8	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
28	16	16	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
29	19	19	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000

-----  
 LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA  
 -----

	BAR P	BAR Q	V.MIN	V.MAX	Q.MIN	Q.MAX	T.MIN	T.MAX
GENER	1		0.95000	1.05000	-25.00000	100.00000		
CARGA	2		0.95000	1.05000				
CARGA	3		0.95000	1.05000				
CARGA	4		0.95000	1.05000				
CARGA	5		0.95000	1.05000				
CARGA	6		0.95000	1.05000				
CARGA	7		0.95000	1.05000				
CARGA	8		0.95000	1.05000				
CARGA	9		0.95000	1.05000				
CARGA	10		0.95000	1.05000				
GENER	11		0.95000	1.05000	-25.00000	100.00000		
GENER	12		0.95000	1.05000	-20.00000	50.00000		
CARGA	13		0.95000	1.05000				
CARGA	14		0.95000	1.05000				
CARGA	15		0.95000	1.05000				
CARGA	16		0.95000	1.05000				
CARGA	17		0.95000	1.05000				
CARGA	18		0.95000	1.05000				
CARGA	19		0.95000	1.05000				
GENER	20		0.95000	1.05000	-20.00000	50.00000		
GENER	21		0.95000	1.05000	-20.00000	100.00000		
CARGA	22		0.95000	1.05000				
CARGA	23		0.95000	1.05000				
GENER	24		0.95000	1.05000	-10.00000	50.00000		
CARGA	25		0.95000	1.05000				
S TRANS	7	8					0.95000	1.05000
S TRANS	9	10					0.95000	1.05000
S TRANS	19	18					0.95000	1.05000
NTE VAR	2	2			-20.00000	0.00000		
NTE VAR	8	8			-20.00000	0.00000		
NTE VAR	16	16			-10.00000	0.00000		
NTE VAR	19	19			-20.00000	0.00000		

RESULTADOS

BAR NO.	VOLTAGE PU	GRADCS	GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A		FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEA	
			MW	MVAR	MW	MVAR		BAR	BAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.0500	0.000	209.158	-48.576	0.000	0.000	-0.001	1	2	209.158	-48.578	-0.000	8.699
								2	1	-209.158	57.277	-0.000	8.699
								2	3	3.559	-5.761	0.003	-9.882
								2	5	205.785	-51.533	-0.000	3.921
2	1.0604	-2.239	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	3	2	-3.556	-4.121	0.003	-9.882
								3	4	3.607	4.118	-0.000	0.018
3	1.0601	-2.420	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	4	3	-3.607	-4.100	-0.000	0.018
4	1.0575	-2.546	0.000	0.000	3.600	4.100	-0.001	5	2	-205.785	55.454	-0.000	3.921
								5	6	205.831	-55.461	2.997	-34.185
5	1.0654	-3.262	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	6	5	-202.834	21.276	2.997	-34.185
								6	7	197.220	-23.016	0.848	-12.212
6	1.0734	-9.593	0.000	0.000	6.400	1.600	-0.000	7	6	-196.373	10.804	0.848	-12.212
								7	8	91.348	85.746	-0.000	2.547
								7	13	104.807	-96.509	1.076	-55.369
7	1.0721	-12.072	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	8	7	-91.348	-85.199	-0.000	2.547
								8	9	77.501	76.883	0.629	-6.220
8	1.0838	-12.933	0.000	0.000	13.900	6.300	-0.003	9	8	-76.872	-77.103	0.629	-6.220
								9	10	76.612	77.160	-0.000	5.569
9	1.0637	-13.536	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	10	9	-76.612	-71.591	-0.000	5.569
								10	11	-30.578	1.930	-0.000	0.452
								10	12	-48.854	15.773	-0.000	11.253
10	1.0515	-15.480	0.000	0.000	156.000	53.900	-0.000	11	10	30.578	-1.478	-0.000	0.452
								12	10	48.854	-4.519	-0.000	11.253
11	1.0500	-14.835	30.600	-1.477	0.000	0.000	-0.001	13	7	-103.730	41.140	1.076	-55.369
								13	14	25.005	5.612	-0.000	0.241
								13	15	78.880	-46.800	0.325	-45.448
12	1.0300	-3.074	48.900	-4.519	0.000	0.000	-0.000	14	13	-25.005	-5.371	-0.000	0.241
								15	13	-78.855	1.311	0.325	-45.448
								15	16	14.607	-17.367	-0.000	0.197
								15	18	63.993	16.040	0.186	-32.947
13	1.1058	-15.603	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	16	15	-14.607	17.553	-0.000	0.187
								16	17	7.108	-21.256	0.068	-24.743
14	1.1035	-16.130	0.000	0.000	24.900	5.400	-0.001	17	16	-7.040	-3.487	0.068	-24.743
								18	15	-63.807	-48.987	0.186	-32.947
								18	19	63.263	49.164	-0.000	1.041
15	1.1118	-17.386	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	19	18	-63.263	-48.123	-0.000	1.041
								19	20	0.000	12.338	0.000	0.154
								19	21	29.400	12.768	-0.000	1.044
								19	22	34.082	22.995	0.195	-1.665
16	1.1188	-17.688	0.000	0.000	7.500	3.700	-0.001	20	19	0.000	-12.184	0.000	0.154
								21	19	-29.400	-11.664	-0.000	1.044
								21	22	-17.547	-22.773	-0.000	0.843
17	1.1302	-18.598	0.000	0.000	7.000	3.500	-0.000	22	19	-33.887	-24.661	0.195	-1.665
								22	21	17.547	23.615	-0.000	0.843
								22	23	8.547	-1.653	0.072	-14.130
18	1.0986	-18.401	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	23	22	-8.475	-12.477	0.072	-14.130
								23	24	-10.379	4.924	-0.000	0.159
								23	25	19.016	7.491	0.074	-3.054
19	1.0633	-18.994	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	24	23	10.379	-4.764	-0.000	0.159
								25	23	-18.941	-10.545	0.074	-3.054
20	1.0500	-18.994	0.000	-12.184	0.000	0.000	-0.000						
21	1.0500	-20.730	28.680	-2.036	75.700	32.400	-0.000						
22	1.0477	-19.728	0.000	0.000	7.500	2.800	-0.000						
23	1.0260	-20.819	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000						
24	1.0200	-20.096	10.390	-4.764	0.000	0.000	-0.000						
25	1.0168	-21.432	0.000	0.000	18.800	10.600	-0.000						

TOTAL GENERACION:	MW	327.728	MVAR	-73.558
TOTAL MVAR CAP/REAC:				-0.028
TOTAL CARGA:	MW	321.300	MVAR	124.300
TOTAL PERDIDAS:	MW	6.473	MVAR	-197.766

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	11	1.0300
3	12	1.0300
4	20	1.0500
5	21	1.0500
6	24	1.0200

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	7	8	0.97560
2	9	10	0.97560
3	19	18	0.97560

3.- FUENTES DE VAR

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	2	0.0000
2	8	0.6000
3	16	0.0000
4	19	0.0000

FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO

RESULTADOS

VOLTAGE PU	VCLTAE GRADOS	GENERACION		CARGA		CAP/PFAC MVAR	DE A		FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
		MW	MVAR	MW	MVAR		BAR	BAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1.0441	0.000	208.834	-7.561	0.000	0.000	-0.000	1	2	208.834	-7.562	-0.000	8.332
							2	1	-208.835	15.844	-0.000	8.332



1.0464	-2.279	0.000	0.000	0.000	0.000	-21.904
1.0460	-2.464	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
1.0433	-2.593	0.000	0.000	3.600	4.100	-0.000
1.0496	-3.328	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004
1.0466	-10.239	0.000	0.000	6.400	1.600	-0.003
1.0421	-12.395	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
1.0383	-13.332	0.000	0.000	13.900	6.300	-21.563
1.0280	-14.140	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
1.0235	-16.451	0.000	0.000	156.000	53.900	-0.001
1.0241	-15.577	30.600	41.614	0.000	0.000	-0.000
1.0250	-3.418	48.900	0.609	0.000	0.000	-0.000
1.0502	-16.017	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002
1.0478	-16.599	0.000	0.000	24.900	5.400	-0.001
1.0392	-17.893	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002
1.0406	-18.243	0.000	0.000	7.500	3.700	-10.828
1.0562	-19.229	0.000	0.000	7.000	3.500	-0.000
1.0183	-19.009	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002
1.0483	-19.702	0.000	0.000	0.000	0.000	-21.580
1.0310	-19.702	0.000	-15.586	0.000	0.000	-0.000
1.0390	-21.495	28.680	3.399	75.700	32.400	-0.000
1.0355	-20.481	0.000	0.000	7.500	2.800	-0.001
1.0257	-21.760	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
1.0250	-21.039	10.390	-0.523	0.000	0.000	-0.000
1.0165	-22.367	0.000	0.000	18.800	10.600	-0.000

2 3	5.604	-5.561	0.004	-9.621
2 5	205.231	-32.312	-0.000	3.861
3 2	-3.600	-4.120	0.004	-9.621
3 4	3.600	4.119	-0.000	0.019
4 3	-3.600	-4.161	-0.000	0.019
5 2	-205.231	36.173	-0.000	3.861
5 6	205.231	-36.179	3.025	-31.659
6 5	-202.206	4.520	3.025	-31.659
6 7	195.806	-6.172	0.075	-10.974
7 6	-194.931	-4.801	0.875	-10.974
7 8	90.778	-14.462	-0.000	1.073
7 13	104.153	-52.010	0.848	-52.252
8 7	-90.778	15.555	-0.000	1.073
8 9	76.878	26.779	0.378	-0.932
9 8	-76.500	-27.711	0.378	-0.932
9 10	76.500	-8.171	-0.000	2.796
10 9	-76.500	10.967	-0.000	2.796
10 11	-30.600	-40.513	-0.000	1.303
10 12	-48.900	10.680	-0.000	11.288
11 10	30.600	41.615	-0.000	1.303
12 10	48.900	0.609	-0.000	11.288
13 7	-103.306	-0.241	0.248	-52.252
13 14	24.900	5.650	-0.000	0.265
13 15	76.406	-5.439	0.345	-10.954
14 13	-24.900	-5.585	-0.000	0.265
15 13	-78.063	-34.515	0.143	-39.954
15 16	14.561	-3.241	-0.300	0.692
15 18	63.502	37.759	0.279	-27.581
16 15	-14.561	3.336	-0.000	0.692
16 17	7.061	-17.882	0.061	-21.362
17 16	-7.000	-3.588	0.061	-21.362
18 15	-63.223	-65.240	0.279	-27.581
18 19	63.223	-363.930	-0.000	8.709
19 18	-63.223	372.719	-0.000	8.789
19 20	0.000	15.846	0.300	0.261
19 21	29.642	8.522	-0.000	1.003
19 22	33.551	17.082	0.168	-1.713
20 19	0.000	-15.585	0.000	0.261
21 19	-29.642	-7.919	-0.000	1.003
21 22	-17.378	-21.082	-0.000	0.775
22 19	-33.414	-18.794	0.168	-1.713
22 21	17.378	21.860	-0.000	0.778
22 23	8.536	-5.822	0.052	-14.031
23 22	-8.484	-8.209	0.052	-14.031
23 24	-10.390	0.654	-0.000	0.131
23 25	18.874	7.541	0.074	-3.055
24 23	10.390	-0.522	-0.000	0.131
25 23	-18.800	-10.596	0.074	-3.055

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	327.404	21.954
TOTAL MVAR CAP/REAC:		-76.296
TOTAL CARGA:	321.299	124.300
TOTAL PERDIDAS:	6.105	-173.143

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

---

1.- VOLTAJES DE GENERACION

---

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0441
2	11	1.0241
3	12	1.0250
4	20	1.0310
5	21	1.0390
6	24	1.0250

2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

---

NO.	BARRA P	BARRA Q	TAPS POSICION
1	7	8	0.99365
2	9	10	0.99060
3	19	18	1.04230

3.- FUENTES DE VAR

---

NO.	BARRA P	CAP/REAC
1	2	-20.0000
2	8	-20.0000
3	16	-10.0000
4	19	-20.0000

CONVERGE EN 8 ITERACIONES EL F.O.P.R.

Caso base

Caso Optimo

BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE		GENERACION	
	V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR		V p.u.	$\theta$ grados	P MW	Q MVAR
1	1.05	0.0	209.15	-48.57	1	1.0441	0.00	208.83	- 7.56
2	1.0604	- 2.23			2	1.0464	- 2.27		
3	1.0601	- 2.42			3	1.0460	- 2.46		
4	1.0575	- 2.54			4	1.0433	- 2.59		
5	1.0654	- 3.36			5	1.0496	- 3.32		
6	1.0734	- 9.99			6	1.0466	-10.23		
7	1.0721	-12.07			7	1.0421	-12.39		
8	1.0838	-12.93			8	1.0383	-13.33		
9	1.0637	-13.54			9	1.0280	-14.14		
10	1.0515	-15.68			10	1.0235	-16.45		
11	1.0300	-14.83	30.6	- 1.47	11	1.0241	-15.57	30.60	41.61
12	1.0300	- 3.07	48.9	- 4.52	12	1.0250	- 3.41	48.90	0.60
13	1.1058	-15.60			13	1.0502	-16.01		
14	1.1035	-16.13			14	1.0478	-16.59		
15	1.1118	-17.38			15	1.0392	-17.89		
16	1.1188	-17.68			16	1.0406	-18.24		
17	1.1308	-18.59			17	1.0502	-19.22		
18	1.0986	-18.40			18	1.0183	-19.01		
19	1.0633	-18.99			19	1.0483	-19.70		
20	1.0500	-18.99	0.0	-12.18	20	1.0310	-19.70	0.00	-15.58
21	1.0500	-20.73	28.68	- 2.03	21	1.0390	-21.49	28.68	3.39
22	1.0477	-19.72			22	1.0355	-20.48		
23	1.0260	-20.81			23	1.0257	-21.76		
24	1.0200	-20.09	10.39	- 4.76	24	1.0250	-21.03	10.39	- 0.52
25	1.0168	-21.43			25	1.0165	-22.36		

PERDIDAS	
PL MW	
Caso Base	6.473
Caso Optimo	6.105

Tabla No. 48

## POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL

Variables de Control	CASO	
	BASE	OPTIMO
t <sub>78</sub>	0.9756	0.9936
t <sub>910</sub>	0.9756	0.9906
t <sub>918</sub>	1.025	1.0423
V <sub>1</sub>	1.05	1.044
V <sub>11</sub>	1.03	1.024
V <sub>12</sub>	1.03	1.025
V <sub>20</sub>	1.05	1.031
V <sub>21</sub>	1.05	1.039
V <sub>24</sub>	1.02	1.025
Q <sub>2</sub>	0.0	-20.000
Q <sub>8</sub>	0.0	-20.000
Q <sub>16</sub>	0.0	-10.000
Q <sub>19</sub>	0.0	-20.000

Tabla No. 49

## 3.4 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos al realizar un control óptimo del flujo de potencia reactiva para los diferentes casos analizados son satisfactorios, cumplen con el objetivo planteado de minimizar las pérdidas activas de transmisión y mejorar los perfiles de voltaje del sistema de potencia.

En el ejemplo No.1 los resultados obtenidos en esta tesis para máxima

carga, media carga y mínima carga son similares a los obtenidos en la referencia 2; en el cual, se basa el desarrollo de esta tesis, lo que comprueba que el programa digital realizado trabaja satisfactoriamente.

En el ejemplo No.2 y para el S.N.I. para máxima carga para Mayo/84, se consigue corregir los niveles de voltaje en las barras cuyos voltajes están fuera de los límites permitidos, a magnitudes aceptables y a la vez minimiza ligeramente las pérdidas activas del sistema, esto se debe a que el sistema está operando en el caso base cercano al óptimo. Las diferencias existentes con la referencia 6 se deben básicamente a los criterios de convergencia que se usan en cada método, en cualquier caso se llega a un punto de operación cercano al óptimo.

Para mínima carga del S.N.I. de Febrero/85, se emplea además como variables de control a reactores shunt colocados en algunas barras de carga.

Si se observa los niveles de voltaje para el caso base tanto para máxima carga y para mínima carga en los ejemplos 1 y 3 se ve que para el segundo caso son más críticos, se elevan sobre de los límites máximo permitido en las barras del sistema. Esto se debe a la poca carga reactiva y a la alta generación de reactivos en las líneas de transmisión, por la posición de taps de los transformadores, esto hace que los niveles de voltaje suban debido a que la potencia reactiva afecta directamente al voltaje. Con una redistribución de la generación de potencia reactiva en el sistema, se consigue que el perfil de voltaje en la red esté dentro del rango deseado; notándose además que la generación

de potencia reactiva total en las barras de generación disminuye como se podrá ver en la tabla No.50, y un aumento en la inyección de reactivos en los capacitores y/o reactores shunt colocados en el sistema, esto es, debido a la redistribución de la generación de reactivos que se hace en el sistema para mejorar los perfiles de voltaje de la red y minimizar las pérdidas activas de transmisión.

EJEMPLOS		CASO BASE		CASO OPTIMO	
		QG TOTAL MVAR	QCAP y/o REACT. T. MVAR	QG TOTAL MVAR	QCAP y/o REACT. T. MVAR
Sistema de 6 barras	Máxima carga	71.471	0.0	55.767	10.3
	Media carga	25.243	0.0	14.787	10.424
	Mínima carga	11.142	0.0	0.513	10.328
Sistema de 14 barras		66.688	20.7	64.64	20.5
S.N.I.	Máxima carga	124.401	12.21	121.438	12.5
	Mínima carga	-73.558	0.0	21.954	-76.296

Tabla No. 50

### Magnitudes $T_{paso}$ , $V_{paso}$ , $Q_{paso}$

De los ejemplos analizados, los rangos para la optimización lineal de las variables de control difieren de un ejemplo a otro, como se podrá ver en la siguiente tabla:

EJEMPLOS		1º ITERACION			PROCESO ITERATIVO		
		t <sub>paso</sub>	V <sub>paso</sub>	Q <sub>paso</sub>	t <sub>paso</sub>	V <sub>paso</sub>	Q <sub>paso</sub>
Sistema de 6 barras	máxima carga	0.05	0.025	0.05	0.05	0.025	0.05
	media carga	0.05	0.025	0.055	0.05	0.025	0.055
	mínima carga	0.05	0.020	0.055	0.05	0.025	0.055
Sistema de 14 barras			0.025		0.01		
S.N.I.	máxima carga	0.01	0.005		0.005	0.0025	
	mínima carga	0.01	0.005	0.1	0.005	0.0025	0.1

Tabla No. 51

$t_{paso}$ ,  $V_{paso}$ ,  $Q_{paso}$  fueron definidos en base a los rangos para formar los coeficientes de la función objetivo mediante flujos de potencia y en base a las curvas de pérdidas obtenidas al variar cada una de las variables de control en el ejemplo No.1 y de las observaciones hechas en cada ejemplo.

Los rangos de  $t_{paso}$ ,  $V_{paso}$ ,  $Q_{paso}$  para la primera iteración fue modificado del proceso iterativo en la programación lineal como lo indica en la tabla No.51, en algunos casos necesarios para llegar a la solución.

#### Convergencia del F.O.P.R.

La solución óptima se encuentra si la diferencia de las pérdidas activas expresados en la base del sistema es menor o igual a un  $\Delta P_L$ , los cuales varían para los ejemplos analizados en el rango de:

$$0.02(MW) \leq \Delta P_L \leq 0.2(MW)$$



## CAPITULO IV

### PROGRAMA DIGITAL

#### 4.1. CONSIDERACIONES EN PROGRAMACION

El programa digital se presenta en detalle en lenguaje FORTRAN IV el cual ha sido desarrollado en el computador PRIME de Inceel, luego del cual ha sido grabado y probado en el computador IBM 370-125 de la Escuela Politécnica Nacional.

El programa elaborado para la solución del flujo óptimo de potencia reactiva se basa en el modelo desarrollado en el Capítulo II de esta tesis, este consta de un programa principal y catorce subrutinas. Las mismas que a continuación se mencionan:

Subrutina INPUT

Subrutina SOLVE

Subrutina PRUEBA

Subrutina JACOB

Subrutina PERDI

Subrutina RESTRI

Subrutina OBJE

Subrutina OPTI

Subrutina ARRE

Subrutina ENCERO

Subrutina ORDEM

Subrutina SIMORD

Subrutina REDUC

Subrutina SOLUC

Las variables y arreglos utilizados a lo largo del programa digital, se hallan detallados en el manual de uso del programa Apéndice A

#### 4.2. ALGORITMO DE DETALLE

A continuación se presenta una explicación de cada una de las partes que tiene el programa digital, en el que se ha implementado además una forma de parada, para la solución óptima del flujo de potencia reactiva en base a las características de convergencia observados para los tres casos analizados del Ejemplo No. 1 en el Capítulo III.

a) Se leen todos los datos necesarios para un control óptimo del flujo de potencia reactiva, a partir de los cuales se definen variables auxiliares.

- Se forma la matriz admitancia de barra  $Y_B$ .

- Se asigna un valor grande a una variable  $X1 = 999$ . cuyo objetivo es formar el criterio de parada, de acuerdo a las características de convergencia observados.

- b) - Se calcula flujos de potencia para obtener las condiciones iniciales de operación del caso base.
- c) - Se verifica, si el valor absoluto de la diferencia  $X1$  y las pérdidas activas totales de transmisión, es menor que el criterio de convergencia impuesto para el F.O.P.R., si se cumple; se ha obtenido el óptimo, en caso contrario; continúa al siguiente paso.
- d) - Se calcula la matriz jacobiana del flujo de potencia.

Para el cálculo de la función objetivo a ser minimizada y las restricciones de desigualdad se hace los siguientes cálculos:

- e) - Se calcula las pérdidas incrementales con respecto a los ángulos y voltaje del sistema:  $\frac{\partial P_L}{\partial \theta}$  ,  $\frac{\partial P_L}{\partial V}$  . V por medio de la ecuación (101).

- Se calcula las pérdidas incrementales con respecto a la potencia activa y reactiva neta en cada barra, a excepción de la barra oscilante:  $\frac{\partial P_L}{\partial P}$  ,  $\frac{\partial P_L}{\partial Q}$  por medio de la ecuación (97).

- f) - Para formar las restricciones funcionales del sistema en función de las variables de control se siguen los siguientes pasos:

- Se forma la nueva matriz jacobiano en los que se incluye ade

más las ecuaciones del flujo de potencia de los transformadores con cambiadores de taps a ser optimizados, ecuación (67).

- Se factoriza la matriz y se define como matriz de sensibilidad.
- Se determina partes de la matriz de sensibilidad, en la que se relacione variables de estado y de control, se forma la matriz  $[S]$ , ecuación (69).
- Se forma la matriz  $[S'']$ , donde las variables de estado forman el vector dependiente y las variables de control forman el vector independiente, ecuación (71).
- Se forma las restricciones de desigualdad de las variables de control.

g) - Se calcula los coeficientes de la función objetivo a ser minimizada:

$$\frac{\partial \bar{P}_L}{\partial t_{pq}}, \frac{\partial P_L}{\partial V_i} \quad i=1,2,\dots,m, \frac{\partial P_L}{\partial Q_{m+x}}$$

h) - Se resuelve el problema de programación lineal, con lo cual se determina las variaciones de las variables de control:  $\Delta t_{pq}$ ,  $\Delta V_i$ ,  $\Delta Q_{m+x}$ .

i) Se modifican las variables de control, con las variaciones calculadas.

ladas.

j) - Se modifica la admitancia de barra con los nuevos valores de los taps de los transformadores y de las fuentes de potencia reactiva conectables en pasos.

k) - Se calcula flujos de potencia del nuevo estado del sistema.

- Se reemplaza  $X1$  con el menor valor de las pérdidas activas to tales de transmisión obtenido.

l) - Se regresa a c.

#### 4.3. DESCRIPCION DEL PROGRAMA, DESCRIPCION DE SUBROUTINAS

##### PROGRAMA PRINCIPAL:

El Programa Principal se encarga de la lectura y escritura de los datos generales del sistema, tales como: Número de barras, número de barras de tensión controlada, número de la barra oscilante, número de elementos, número de capacitores o reactores shunt, base del sistema, criterios de convergencia. A partir de estos datos se de fine variables auxiliares del programa que son resultados de calcu los cuyo objetivo es obtener los dimensionamientos de los arreglos que se usarán en las distintas subrutinas. La figura No. 8 representa el diagrama de flujo del programa principal.

## Descripción de Subrutinas.

### Subrutina INPUT

Lee y escribe los datos de barra, con los que identifica el tipo de barra e inicializa las componentes real e imaginaria del voltaje.

Lee y escribe los datos de líneas de transmisión, transformadores, capacitores y reactores con los que forma la matriz admitancia de barra  $Y_B$ , la cual la desarrolla en forma de vector tomando únicamente a los elementos diferentes de cero.

Lee y escribe los límites máximo y mínimo de voltaje, de potencia reactiva de generación, de los taps de los transformadores. Esta subrutina fue desarrollada en la referencia (15) y modificada en este programa.

### Subrutina SOLVE

Calcula y escribe los resultados de flujos de potencia, para lo cual utiliza el método de Newton-Raphson Desacoplado. Esta subrutina y las subrutinas ENCERO y ORDEN fueron desarrolladas en la referencia (15).

### Subrutina PRUEBA

Escribe las magnitudes de las variables de control: Voltaje de las

barras de generación, taps de los transformadores y fuentes de potencia reactiva conectables en pasos cuyos valores están almacenados en los vectores V,T,Q respectivamente para el caso base y para el caso óptimo. La Fig. No.9 representa el diagrama de flujo de esta subrutina.

#### Subrutina JACOB

Calcula el Jacobiano completo del sistema en coordenadas polares y almacena en los vectores HAC1, HAC2, HAC3, HAC4, HAC5, HAC6, y que se toma únicamente los elementos distintos de cero.

Calcula la sensibilidad de las pérdidas con respecto a los ángulos que se almacena en el vector HAPD, y con respecto a los voltajes que se almacena en el vector HAPV. La Fig. No.10 representa el diagrama de flujo de esta subrutina.

#### Subrutina PERDI

Calcula la sensibilidad de las pérdidas con respecto a la potencia neta activa y reactiva, para lo cual el Jacobiano transpuesto del flujo de potencia se almacena en los vectores DE, RE, CE, ITAG, NO ZE, LNXT, NSEQ, el vector VP1 se forma con los vectores HAPD y HAPV que se usa luego en las tres subrutinas especiales de bi-factorización. La Fig. No.11 representa el diagrama de flujo de esta subrutina.

Subrutina RESTRI

Forma las restricciones funcionales del sistema. Se forma la matriz Jacobiano aumentado, los mismos que son almacenados en los vectores: DE, CE, RE, ITAG, NOZE, LNXT, NSEQ, se define el vector VP para factorizar la matriz y encontrar las partes que relacionen variables de estado y variables de control. Se encuentra las variables de estado como función de las variables de control, los mismos que son almacenados en la matriz Z.

Se define los rangos lineales tpaso, Vpaso, Qpaso. La fig. No. 12 representa el diagrama de flujo de esta subrutina.

Subrutina OBJE

Calcula los coeficientes de la función objetivo que va a ser minimizada  $\frac{\partial PL}{\partial t_{pq}}$ ,  $\frac{\partial PL}{\partial V_i}$   $i=1,2,\dots,m$ ,  $\frac{\partial PL}{\partial Q_{m+x}}$ , los cuales se almacenan en el vector RE. La fig. No.13 representa el diagrama del flujo de esta subrutina.

Subrutina OPTI

Se ordena las restricciones funcionales del sistema y las restricciones de desigualdad de acuerdo a los requerimientos de la subrutina para resolver el problema de programación lineal.

Realiza la minimización de la función objetivo planteado anterior-



mente la cual es lineal y sujeta a varias restricciones lineales de igualdad y de desigualdad. Calcula las variaciones de las variables de control.

La técnica de la programación lineal utilizada; se trata del Método Simplex, el cual se basa en el algoritmo de Dantzing. Esta subrutina fue desarrollada en la referencia (12) y modificada en esta tesis.

#### Subrutina ARRE

Modifica la posición de las variables de control: los voltajes de generación, taps de los transformadores, capacitores y/o reactores - shunt.

Modifica la admitancia de barra con los nuevos valores que tienen los taps y la susceptancia de los capacitores y/o reactores shunt. La fig. No.14 representa el diagrama de flujo de esta subrutina.

#### Subrutina SIMORD, REDUC, SOLUC

Con las tres subrutinas especiales de bi-factorización. Trabajan: con el Jacobiano en el flujo de potencia, para calcular  $\frac{\partial PL}{\partial P}$  y  $\frac{\partial PL}{\partial Q}$  y para encontrar las restricciones funcionales del sistema.

Para ingresar a estas subrutinas se necesita que la matriz a ser factorizada esté almacenada dentro de los vectores LCOL, DE, CE, RE, LNXT, NOZE, NSEQ. Se necesita además conocer el valor LF y el vec-

tor VPI que son determinados dependiendo del caso. Estas tres subrutinas son conocidas y han sido utilizadas en trabajos precedentes para el tratamiento de matrices porosas. Referencia 6, 15, 17.

#### 4.4 DIAGRAMAS DE FLUJO: PROGRAMA PRINCIPAL Y SUBRUTINAS.

Fig. No.8 PROGRAMA PRINCIPAL

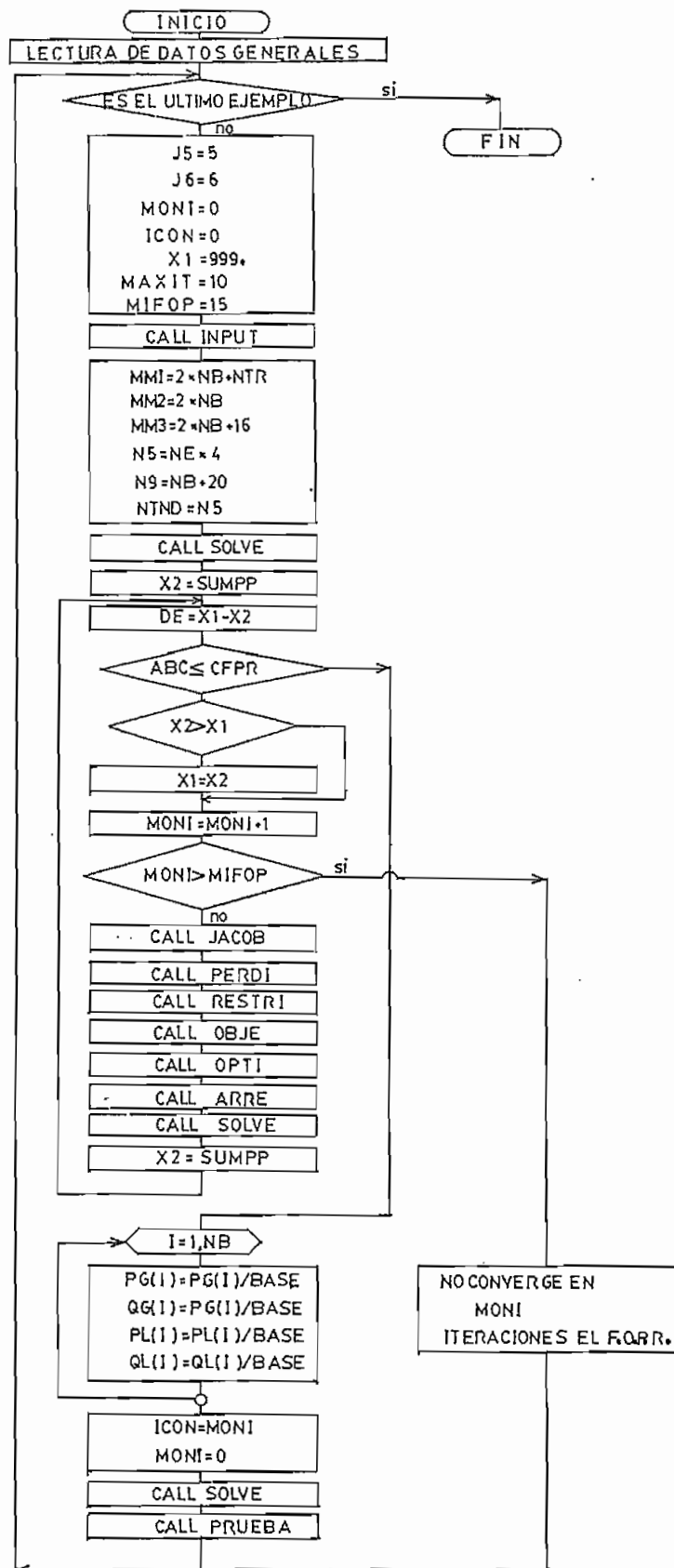
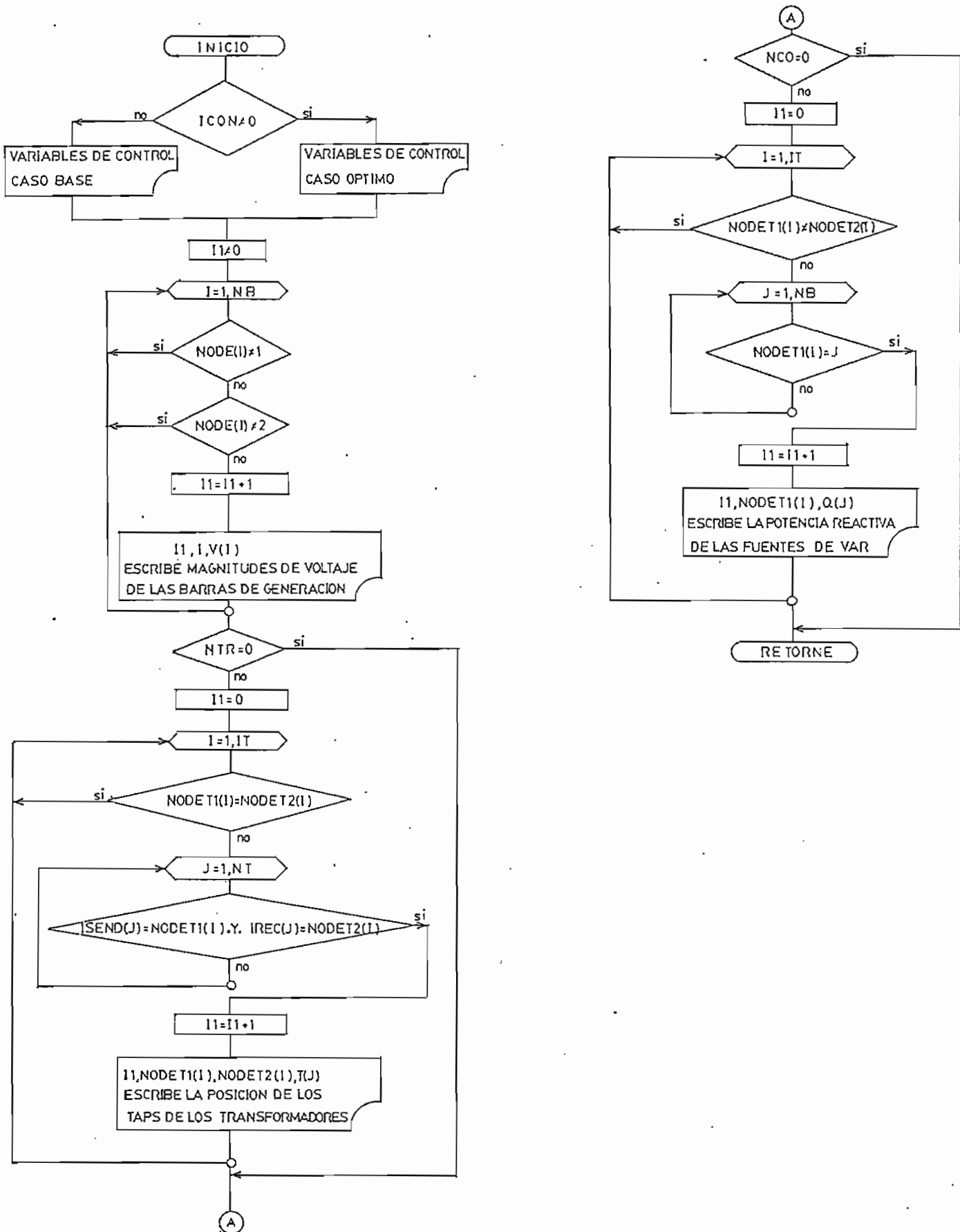
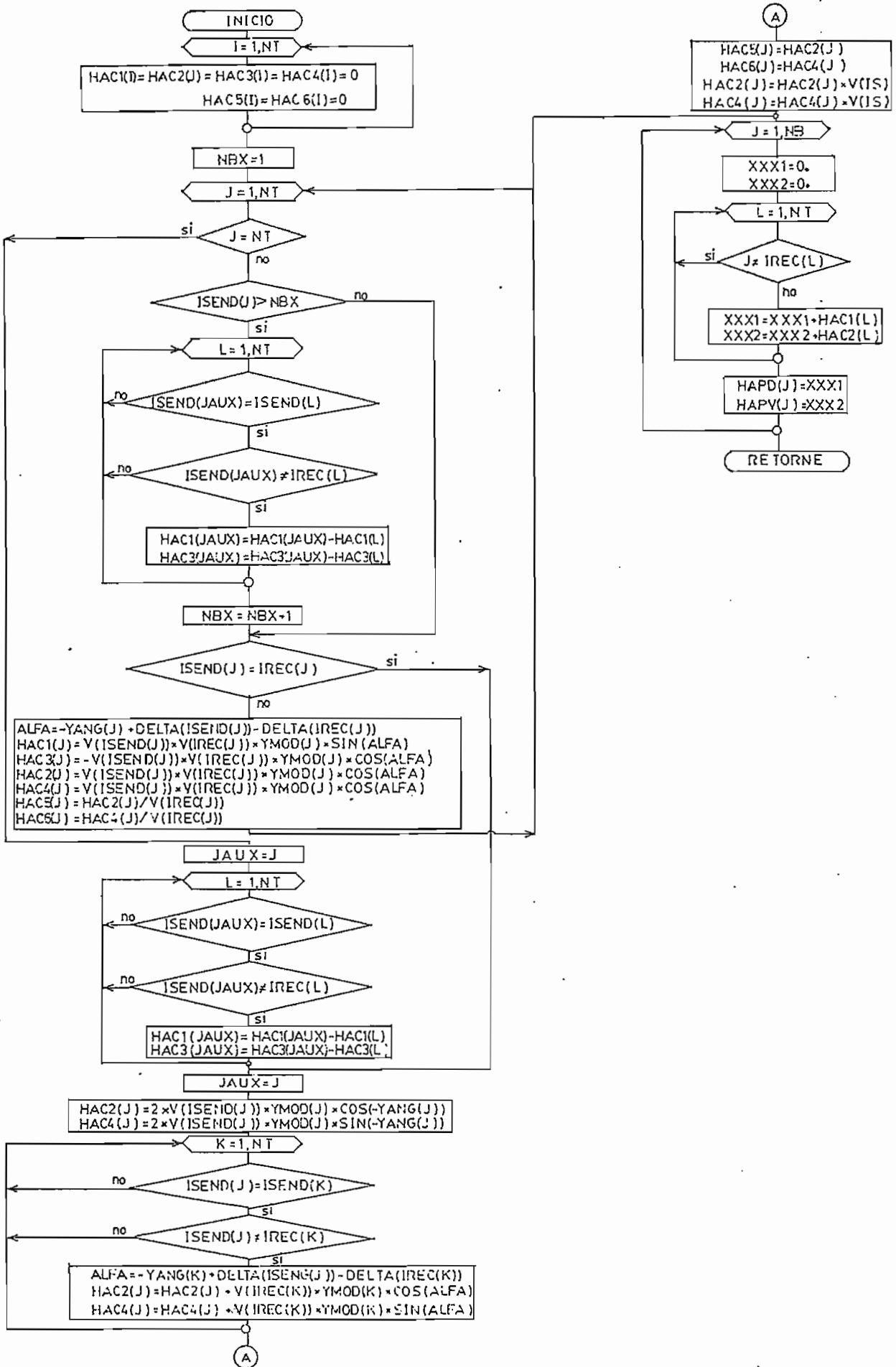
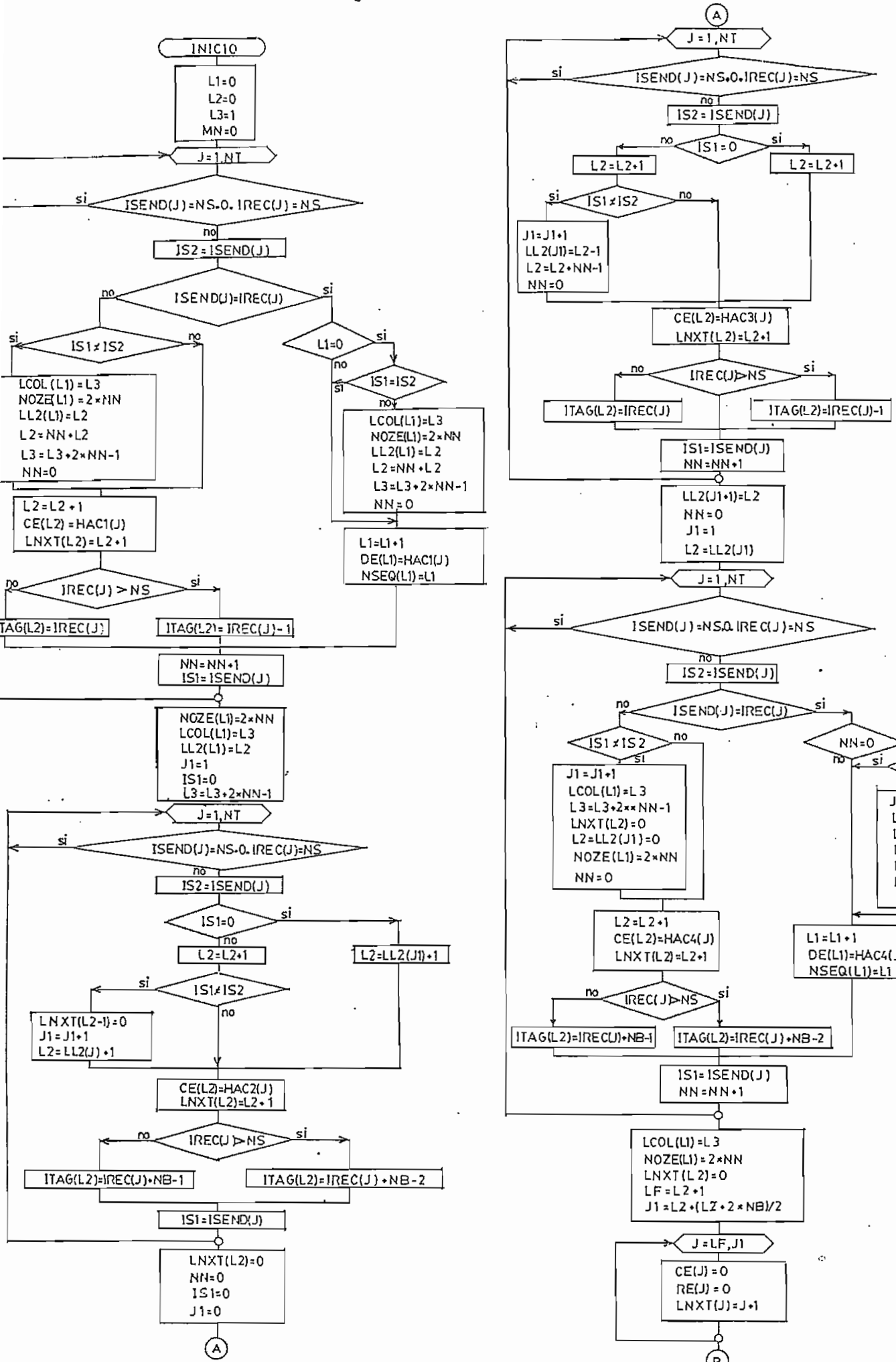
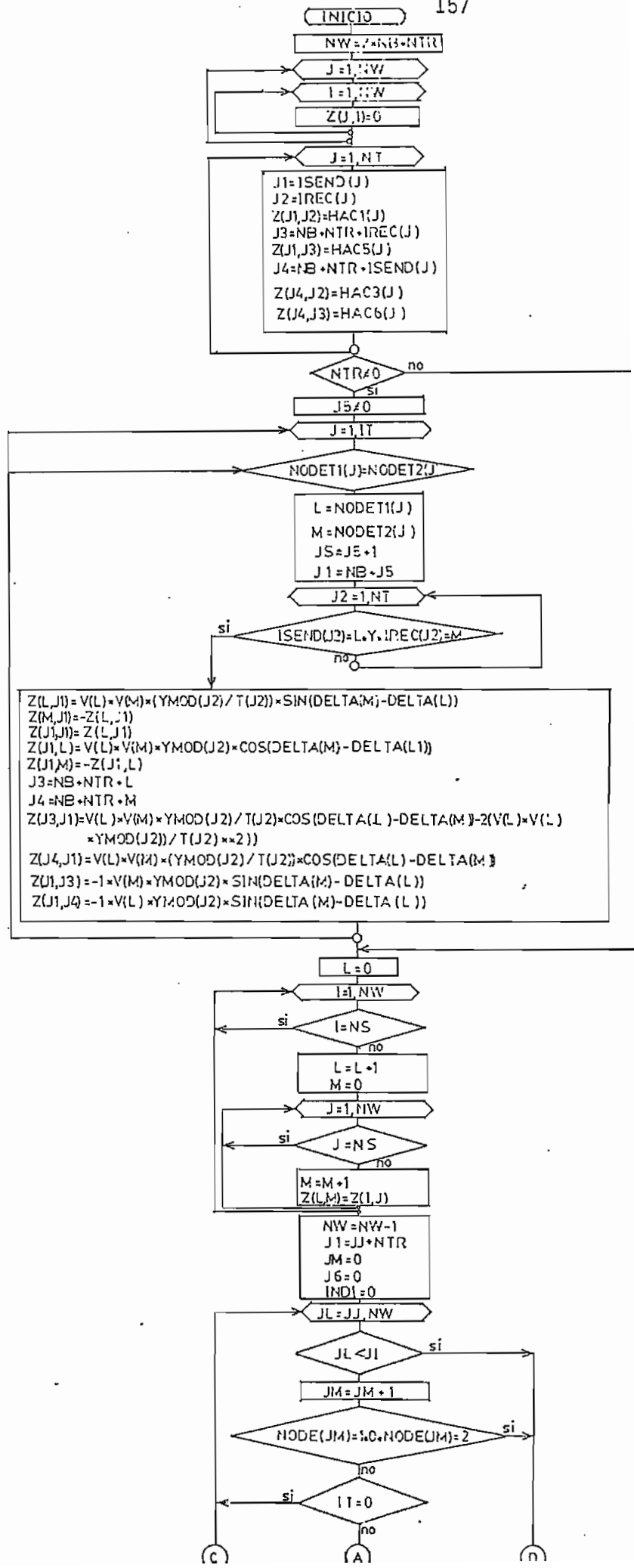
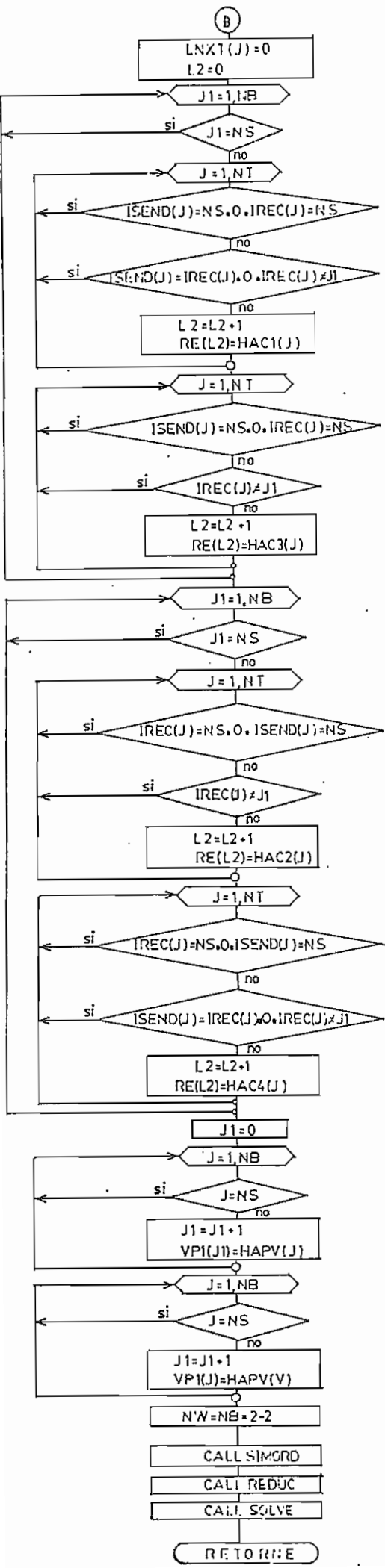


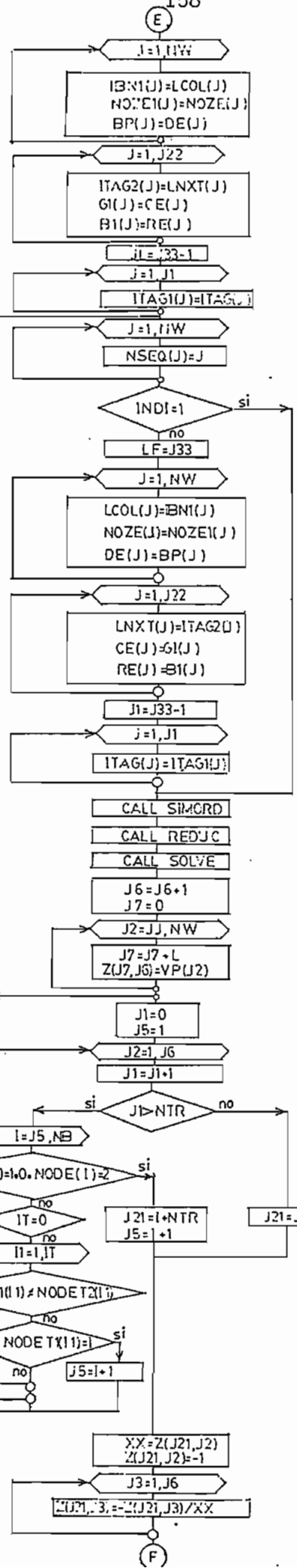
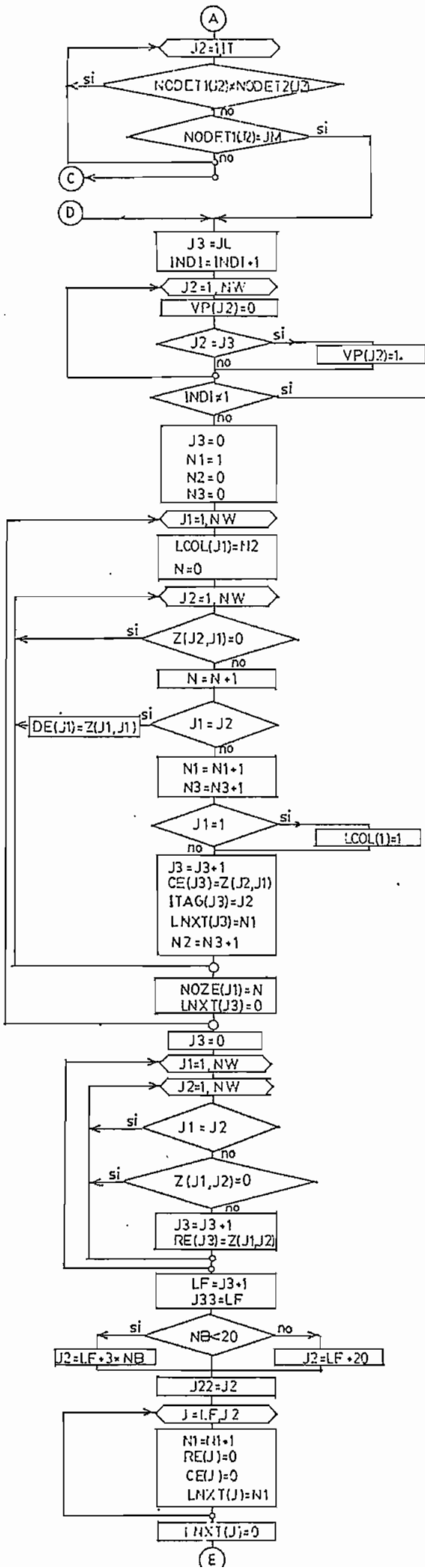
Fig. No.9 SUBROUTINA PRUEBA









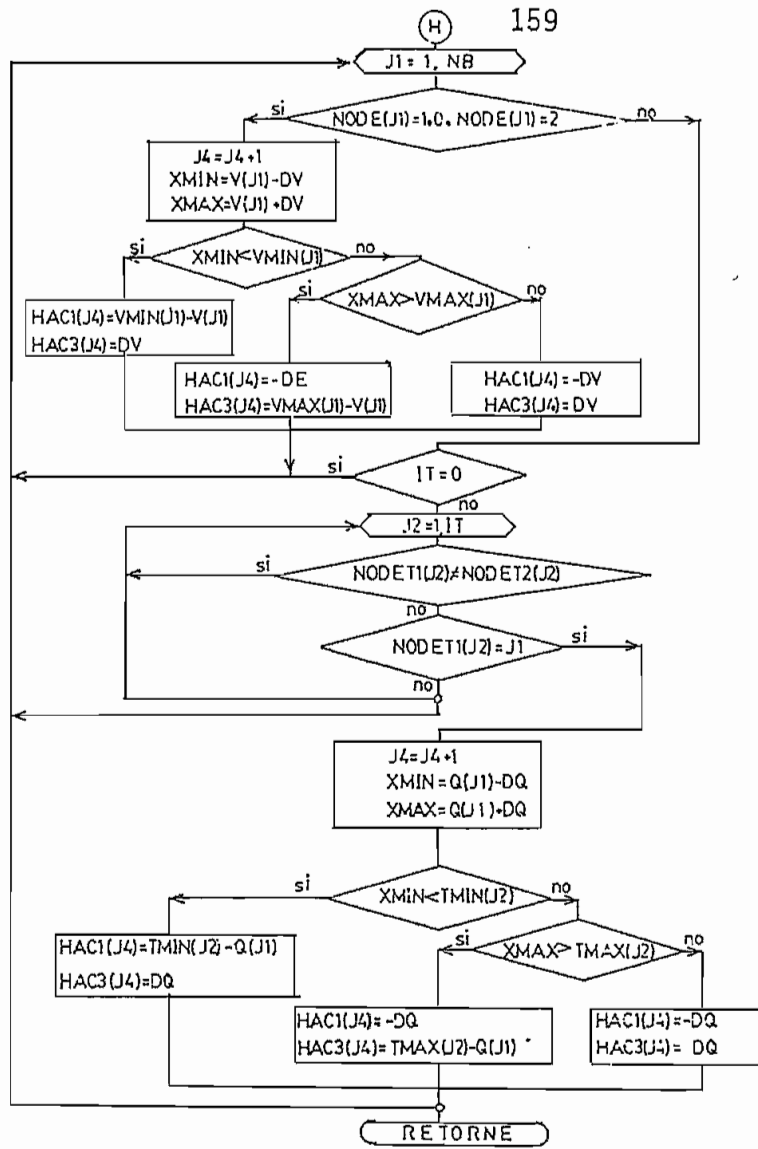
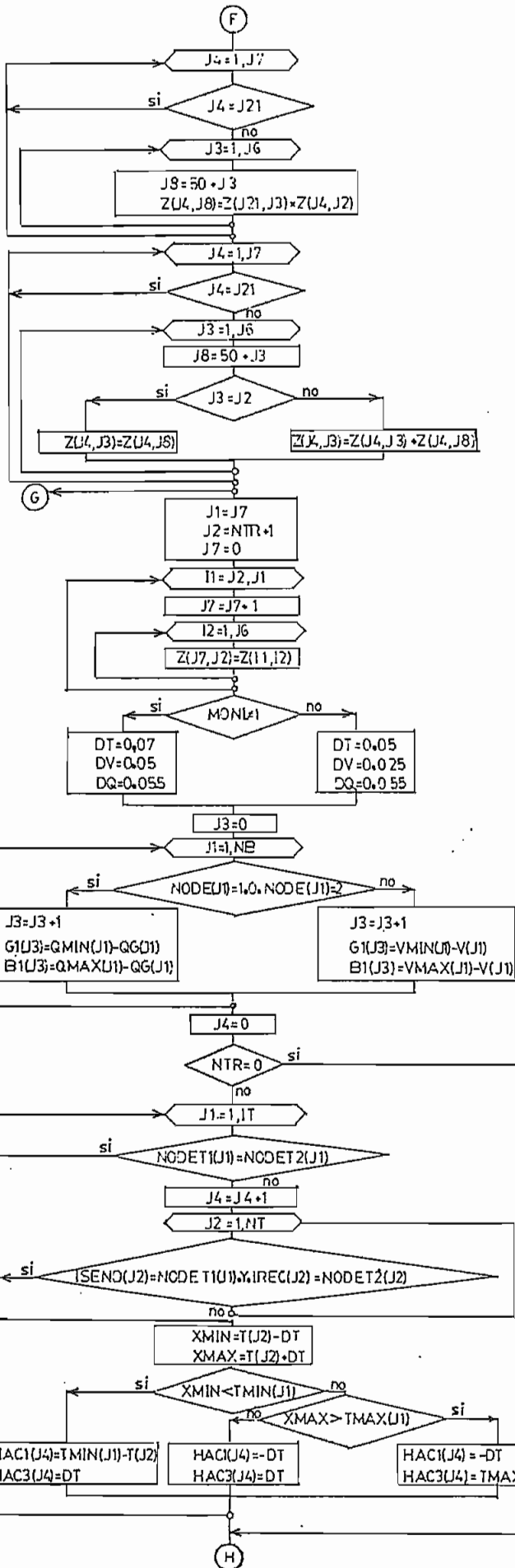


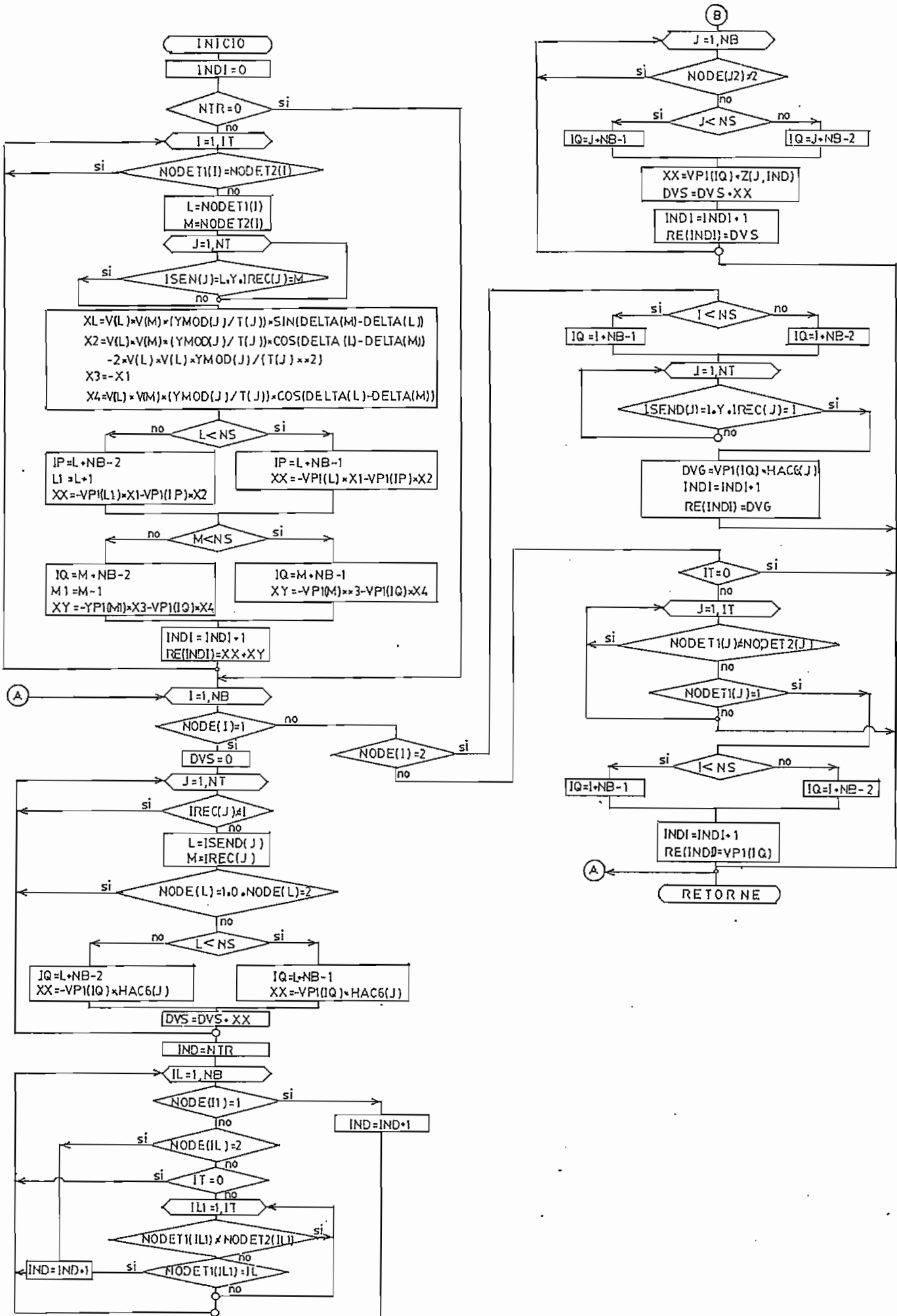
(C)

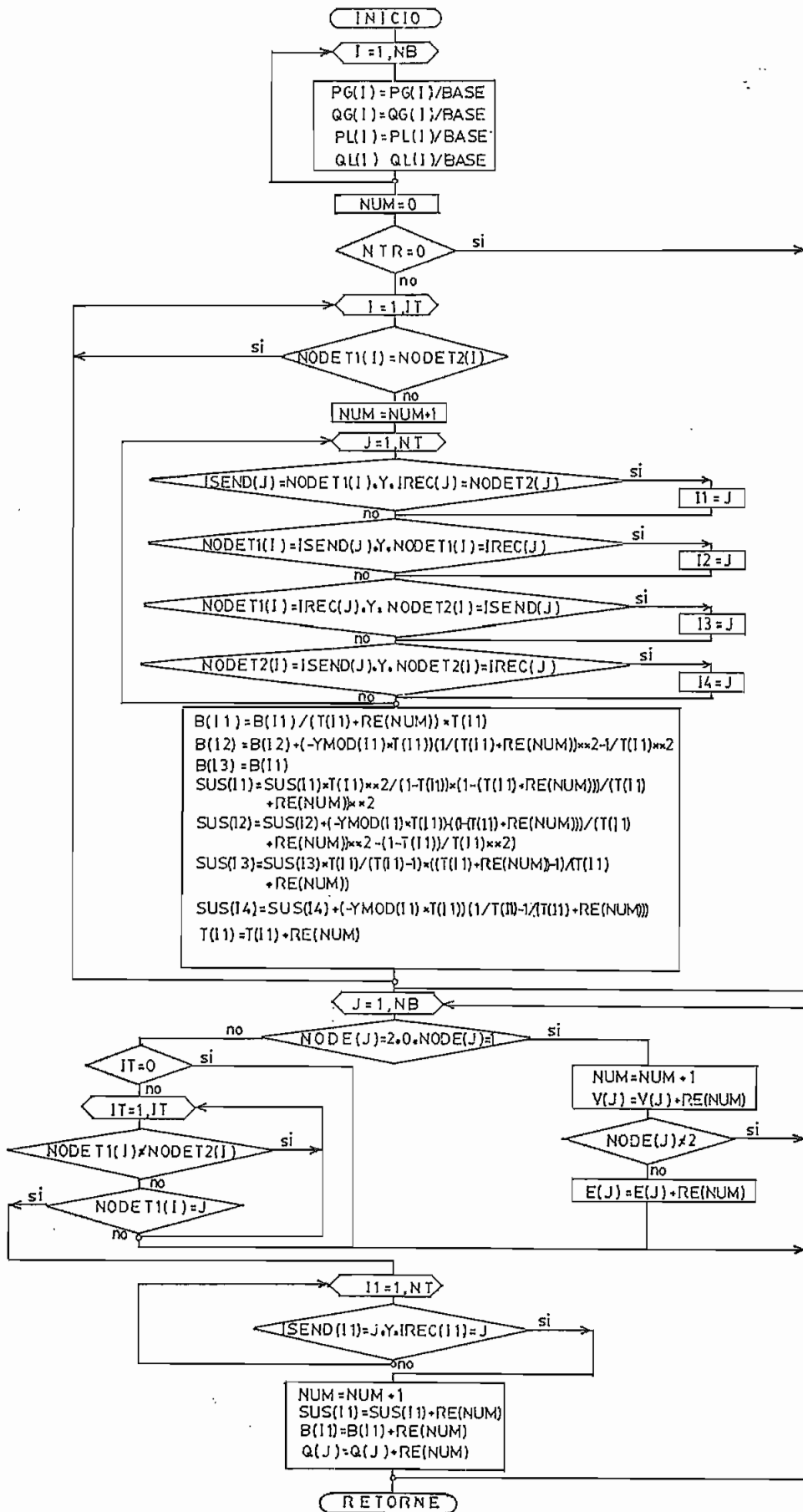
(G)

(F)









#### 4.5 CARACTERISTICAS

"MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION MEDIANTE CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL"

Lenguaje : Fortran IV

Elaborado en : El computador PRIME DE INECEL

Probado y Grabado en: El computador IBM 370-125 de la E.P.N.

Capacidad : Máximo número de barras 100

Máximo número de elementos 120

Máximo número de transformadores con cambiador de taps a ser optimizados. 20

Máximo número de capacitores o reactores. 100

Máximo número de variables de control 50

DATOS: en p.u. o en cualquier base.

La numeración de las barras es indiferente y cualquiera puede ser la oscilante, de tensión controlada o de carga.

## CAPITULO V .

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al realizar el flujo óptimo de potencia reactiva se minimizan las pérdidas activas del sistema y por lo tanto se reduce la generación de la potencia activa en la barra oscilante y en consecuencia la generación de potencia activa definida inicialmente. Por lo mismo, disminuyen los costos de operación; controlando además las magnitudes del voltaje que están fuera de los límites de operación, a rangos permitidos.
- De los resultados obtenidos en esta tesis comparados con los obtenidos mediante un modelo no - lineal, se desprende que los resultados son confiables, con la ventaja de que el utilizar el modelo lineal implica una modelación más sencilla, y por lo mismo una resolución más rápida del problema. La convergencia observada para sistemas del orden de 14 y 25 barras mediante el modelo lineal propuesto en esta tesis converge más rápidamente que con el modelo no - lineal propuesto en la referencia 6, así por ejemplo para el sistema de 14 barras se llega a la solución en 4 iteraciones - mientras que con el modelo no - lineal emplea 8 iteraciones y para el sistema de 25 barras la convergencia observada en esta tesis es de 3 iteraciones y 11 iteraciones con el método no-lineal.
- El programa digital está diseñado de manera que todos los arreglos con excepción de uno sean vectores y es diseñado para un número

de 100 barras y 120 elementos pudiendo ser modificados los dimensionamientos de los arreglos y la inicialización de las variables auxiliares dependiendo del computador disponible.

- Se recomienda acoplar el flujo óptimo de potencia reactiva a un flujo óptimo de potencia activa resuelto por un algoritmo de optimización lineal para disponer de un flujo óptimo mediante un modelo lineal.
  
- Debido al cambio continuo de la demanda de carga, en los sistemas y por ende de las condiciones operativas, se recomendaría aplicar este método en un centro de control de tal forma de que, con un procesamiento rápido como el analizado en este trabajo, se pueda obtener las correcciones de las variables de control necesarias debido a la variación de la carga.

## APENDICE "A" .

### DETALLE MATEMATICO DE MODELACION

#### A.1 Elementos del Jacobiano del Flujo de Potencia en coordenadas polares

Los elementos de la submatriz del Jacobiano son calculados a partir de las ecuaciones (7) y (8).

Subjacobiano J1

Los elementos no-diagonales y diagonales son:

$$\frac{\partial P_p}{\partial \theta_q} = V_p V_q |Y_{pq}| \text{Sen}(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad \begin{matrix} p \neq q \\ p=1, \dots, n \end{matrix} \quad (86)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial \theta_p} = - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_p V_q |Y_{pq}| \text{Sen}(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq})$$

Subjacobiano J2

Los elementos no-diagonales y diagonales son:

$$\frac{\partial P_p}{\partial V_q} \cdot V_q = V_p V_q |Y_{pq}| \text{Cos}(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad \begin{matrix} p \neq q \\ p=1, \dots, n \end{matrix} \quad (87)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial V_p} \cdot V_p = 2V_p V_p |Y_{pp}| \text{Cos}(\gamma_{pp}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_p V_q |Y_{pq}| \text{Cos}(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq})$$

Subjacobiano J3

Los elementos no-diagonales y diagonales son:

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \theta_q} = -V_p V_q |Y_{pq}| \cos(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad \begin{matrix} p \neq q \\ p=1, \dots, n \end{matrix}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \theta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_p V_q |Y_{pq}| \cos(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad (88)$$

Subjacobiano J4

Los elementos no-diagonales y diagonales son:

$$\frac{\partial Q_p}{\partial V_q} \cdot V_q = V_p V_q |Y_{pq}| \sin(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad \begin{matrix} p \neq q \\ p=1, \dots, n \end{matrix}$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial V_p} \cdot V_p = -2V_p V_p |Y_{pp}| \sin(\gamma_{pp}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_p V_q \sin(\theta_p - \theta_q - \gamma_{pq}) \quad (89)$$

## A.2 Sensitividad de las pérdidas con respecto a la potencia neta activa y reactiva $(\frac{\partial P_L}{\partial P}, \frac{\partial P_L}{\partial Q})$

Previo a los cálculos de la sensitividad de las pérdidas con respecto a las variables de control, es necesario encontrar  $\frac{\partial P_L}{\partial P}$  y  $\frac{\partial P_L}{\partial Q}$ .

Las pérdidas activas en un sistema de potencia puede expresarse como una función de las potencias activas y reactivas netas inyectadas a las barras del sistema.



$$P_L = P_L(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_n) \quad (90)$$

donde  $n = \#$  de barras del sistema

La potencia neta inyectada se puede escribir como:

$$P_i = P_i(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \quad (91)$$

$$Q_i = Q_i(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \quad (92)$$

Siendo  $\theta_k, V_k$  el ángulo y la magnitud de voltaje de la barra  $k$  del sistema.

Un cambio incremental de la potencia de pérdidas con respecto a un cambio en el ángulo de cualquier barra esta dado por:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial \theta_i} + \dots + \frac{\partial P_L}{\partial P_n} \cdot \frac{\partial P_n}{\partial \theta_i} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_1} \cdot \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_i} + \dots + \frac{\partial P_L}{\partial Q_n} \cdot \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_i} \quad (93)$$

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

Igualmente:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} \cdot V_i = \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial V_i} V_i + \dots + \frac{\partial P_L}{\partial P_n} \cdot \frac{\partial P_n}{\partial V_i} V_i + \frac{\partial P_L}{\partial Q_1} \cdot \frac{\partial Q_1}{\partial V_i} V_i + \dots + \frac{\partial P_L}{\partial Q_n} \cdot \frac{\partial Q_n}{\partial V_i} V_i \quad (94)$$

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

Expresando (93) y (94) en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_n} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial V_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \dots \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \dots \frac{\partial P_n}{\partial V_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \tag{95}$$

Se puede observar que la matriz de derivadas parciales es el conocido Jacobiano, en este caso transpuesto utilizado en el flujo de potencia por el método de Newton-Raphson; en forma compacta se tiene:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial p} \\ \frac{\partial P_L}{\partial q} \end{bmatrix} \tag{96}$$

Donde  $\begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix}$  es el Jacobiano<sup>t</sup> de las ecuaciones del flujo de potencia, el cual es altamente poroso. Aplicando un método numérico

para resolver sistemas de ecuaciones lineales se tiene:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = J^t \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} \quad (97)$$

El vector independiente, formado por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix}$$

puede ser fácilmente calculado de la siguiente manera. Partiendo de la ecuación (15) tenemos:

$$P_L = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (98)$$

Un cambio incremental de las pérdidas con respecto a un cambio en el ángulo nodal está dado por:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_i} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial \theta_i} \quad i=1,2,\dots,n$$

(99)

Un cambio incremental de las pérdidas con respecto a un cambio en la magnitud del voltaje en un nodo del sistema, está dado por:

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} V_i = \frac{\partial P_1}{\partial V_i} V_i + \frac{\partial P_2}{\partial V_i} V_i + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial V_i} V_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (100)$$

expresando vectorialmente:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_1}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_n}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_n}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} \quad (101)$$

El elemento  $\frac{\partial P_L}{\partial V_i} V_i$  de la ecuación (101) representa la sensibilidad de las pérdidas con respecto a la variación del voltaje de la parte del sistema conectado a la barra  $i$  [2].

Una vez calculado  $\frac{\partial P_L}{\partial \theta}$  y  $\frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot V$ , juntamente con el Jacobiano de las ecuaciones del flujo de potencia, es fácil calcular  $\frac{\partial P_L}{\partial P}$  y  $\frac{\partial P_L}{\partial Q}$ .

### A.3 Incidencia del Taps del Transformador en $Y_B$ .

El modelo  $\pi$  equivalente de un transformador con el cambiador de taps en la barra  $p$  y siendo la barra controlada  $q$  es:

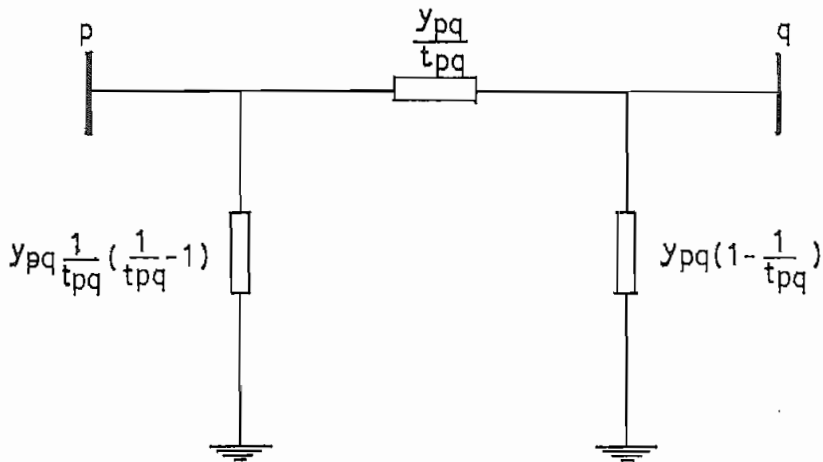


Fig. No. 15

Cuando la posición del taps se encuentra fuera de la posición nominal de un transformador conectado entre p y q la admitancia propia en la barra p donde esta localizado el cambiador de taps es: siendo la admitancia propia en cualquier barra la suma algebraica de todas las admitancias incidentes en dicha barra.

$$Y_{pp} = y_{p_i} + \dots + \frac{y_{pq}}{t_{pq}} + \dots + y_{p_n} + \frac{1}{t_{pq}} \left( \frac{1}{t_{pq}} - 1 \right) y_{pq} \quad (102)$$

$$Y_{pp} = y_{p_1} + \dots + \frac{y_{pq}}{t_{pq}^2} + \dots + y_{p_n} \quad (103)$$

La admitancia propia en la barra controlada q es:

$$Y_{qq} = y_{q_1} + \dots + \frac{y_{pq}}{t_{pq}} + \dots + y_{q_n} + \left( 1 - \frac{1}{t_{pq}} \right) y_{pq} \quad (104)$$

$$Y_{qq} = y_{q_1} + \dots + y_{q_p} + \dots + y_{q_n} \quad (105)$$

La admitancia mútua entre p y q es:

$$Y_{pq} = Y_{qp} = - \frac{y_{pq}}{t_{pq}} \quad (106)$$

#### A.4 Incidencia de capacitores o reactores conectados a tierra en la formación de $Y_B$ .

Los capacitores o reactores en serie se representan como una impedancia. De hallarse conectados a tierra se los representa para un capacitor como una fuente de reactivos y para el caso de un reactor como una carga reactiva.

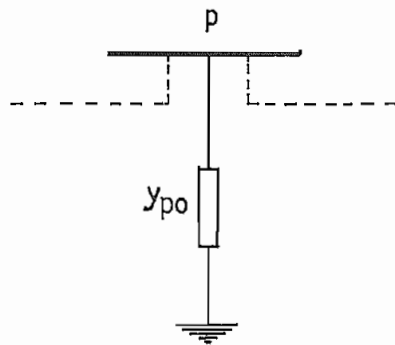


Fig. No. 16

La potencia que fluye desde p a tierra esta dado por:

$$S_{po} = E_p^2 y_{po} \quad |p.u.| \quad (107)$$

Para un capacitor se tiene:

$$S_{po} = jQ$$

y para un voltaje nominal  $E_p=1$  p.u. se tiene:

$$y_{po} = jQ \quad (108)$$

Para un reactor se tiene:

$$S_{po} = -jQ$$

y para un voltaje nominal  $E_p=1$  p.u. se tiene

$$y_{po} = -jQ \quad (109)$$

La admitancia propia en la barra p esta dado por:

$$Y_{pq} = y_{p1} + \dots + y_{po} + \dots + y_{pn} \quad (110)$$

Para el control óptimo del flujo de potencia reactiva taps de los transformadores, la inyección de potencia reactiva (capacitores y/o reactores shunt) son modelados como variables de control con lo cual el modelo de la matriz admitancia de barra se mantendrá constante durante una iteración de optimización. Cuando se ha completado una iteración de optimización, las variables de control tomarán nuevos valores, por lo cual los taps de los transformadores, los capacitores y/o reactores shunt tomarán nuevos valores y consecuentemente habrá que corregir la matriz admitancia de barra.

#### A.5 Cálculo de $\frac{\partial P}{\partial t_{pq}}$ ; $\frac{\partial Q}{\partial t_{pq}}$

De la fig. No.15 p es la barra con el cambiador de taps y q es la barra controlada.

$$\frac{\partial P_q}{\partial t_{pq}}, \frac{\partial Q_p}{\partial t_{pq}}$$

La potencia neta en la barra p es:

$$S_p^* = P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (111)$$

La corriente neta inyectada en la barra p es:

$$I_p = \sum_{i=1}^n Y_{pi} E_i = Y_{p1} E_1 + Y_{p2} E_2 + \dots + Y_{pp} E_p + Y_{pq} E_q + \dots + Y_{pn} E_n \quad (112)$$

Reemplazando (112) en (111);

$$S_p^* = E_p^* [Y_{p1} E_1 + Y_{p2} E_2 + \dots + Y_{pp} E_p + Y_{pq} E_q + \dots + Y_{pn} E_n] \quad (113)$$

Derivando con respecto a  $t_{pq}$  y tomando en cuenta las ecuaciones (103) y (106).

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}}(S_p^*) = E_p^* \left( -2 \frac{Y_{pq}}{t_{pq}^3} E_p + \frac{Y_{pq}}{t_{pq}^2} E_q \right) \quad (114)$$

$$\text{si } E_p = V_p \angle \theta_p \quad (115)$$

$$Y_{pq} = -j \frac{1}{X_{CC}} = -j B_{pq} = B_{pq} \angle -90 \quad (116)$$

Entonces



$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}}(Sp^*) = V_p \angle -\theta_p \left[ \frac{-2B_{pq} \angle -90}{t_{pq}^3} V_p \angle \theta_p + \frac{B_{pq} \angle -90}{t_{pq}^2} V_q \angle \theta_q \right] \quad (117)$$

$$= - \frac{2 \cdot B_{pq} V_p^2}{t_{pq}^3} \angle -90 + \frac{B_{pq} \cdot V_p \cdot V_q}{t_{pq}^2} \angle \theta_q - \theta_p - 90 \quad (118)$$

$$= \frac{2 \cdot B_{pq} V_p^2}{t_{pq}^3} j + \frac{B_{pq} \cdot V_p \cdot V_q}{t_{pq}^2} [\cos(\theta_q - \theta_p - 90) + j \text{Sen}(\theta_q - \theta_p - 90)] \quad (119)$$

$$\text{si} \quad \text{Sen}(\theta_q - \theta_p - 90) = -\text{Cos}(\theta_q - \theta_p) \quad (120)$$

$$\text{Cos}(\theta_q - \theta_p - 90) = \text{Sen}(\theta_q - \theta_p) \quad (121)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}}(Sp^*) = \frac{2 \cdot B_{pq} \cdot V_p^2}{t_{pq}^3} j + \frac{B_{pq} \cdot V_p \cdot V_q \cdot \text{Cos}(\theta_q - \theta_p)}{t_{pq}^2} - j \frac{B_{pq} \cdot V_p \cdot V_q}{t_{pq}^2} \text{Cos}(\theta_q - \theta_p)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial t_{pq}} - j \frac{\partial Q_p}{\partial t_{pq}} = \frac{B_{pq} \cdot V_p \cdot V_q \text{ Sen}(\theta_q - \theta_p)}{t_{pq}^2} + j \frac{B_{pq} \cdot V_p}{t_{pq}^2} \left( \frac{2 \cdot V_p}{t_{pq}} - V_q \text{Cos}(\theta_q - \theta_p) \right) \quad (122)$$

Igualando partes reales y partes imaginarias:

$$\frac{\partial P_p}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \text{ Sen}(\theta_q - \theta_p) \quad (123)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \cdot \text{Cos}(\theta_q - \theta_p) - \frac{2 \cdot V_p^2 \cdot B_{pq}}{t_{pq}^3} \quad (124)$$

$$\frac{\partial P_q}{\partial t_{pq}} ; \frac{\partial Q_q}{\partial t_{pq}}$$

De igual manera en la barra q:

$$S_q^* = P_q - jQ_q = E_q^* I_q \quad (125)$$

$$I_q = \sum_{i=1}^n Y_{qi} E_i = Y_{q1} E_1 + \dots + Y_{qq} E_q + Y_{qp} E_p + \dots + Y_{qn} E_n \quad (126)$$

Reemplazando (126) en (125):

$$S_q^* = E_q^* [Y_{q1} E_1 + \dots + Y_{qq} E_q + Y_{qp} E_p + \dots + Y_{qn} E_n] \quad (127)$$

Derivando (127) con respecto a  $t_{pq}$  y teniendo en cuenta (105) y (106):

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_q^*) = E_q^* \left( \frac{Y_{qp}}{t_{pq}^2} \cdot E_p \right) \quad (128)$$

Reemplazando (115), (116) en (128):

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_q^*) = V_q \angle -\theta_q \left( \frac{B_{pq} \angle -90^\circ V_p \angle \theta_p}{t_{pq}^2} \right) \quad (129)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_q^*) = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \angle \theta_p - \theta_q - 90^\circ$$

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_q^*) = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \left[ \cos(\theta_p - \theta_q - 90^\circ) + j \sin(\theta_p - \theta_q - 90^\circ) \right] \quad (130)$$

$$\text{si} \quad \cos(\theta_p - \theta_q - 90) = \text{Sen}(\theta_p - \theta_q) \quad (131)$$

$$\text{Sen}(\theta_p - \theta_q - 90) = -\text{Cos}(\theta_p - \theta_q) \quad (132)$$

Reemplazando (131), (132) en (130)

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (P_q - jQ_q) = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} (\text{Sen}(\theta_p - \theta_q) - j \text{Cos}(\theta_p - \theta_q)) \quad (133)$$

Iguando partes reales y partes imaginarias:

$$\frac{\partial P_q}{\partial t_{pq}} = - \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \text{Sen}(\theta_q - \theta_p) \quad (134)$$

$$\frac{\partial Q_q}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \text{Cos}(\theta_q - \theta_p) \quad (135)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{pq}} ; \frac{\partial Q_k}{\partial t_{pq}} \quad \text{si } \begin{matrix} k \neq p \\ k \neq q \end{matrix}$$

De modo similar:

$$S_k^* = P_k - jQ_k = E_k^* I_k \quad (136)$$

$$I_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} E_i = Y_{k1} E_1 + \dots + Y_{kp} E_p + Y_{kq} E_q + \dots + Y_{kn} E_n \quad (137)$$

Reemplazando (137) en (136):

$$S_k^* = E_k^*(Y_{k1} E_1 + \dots + Y_{kp} E_p + Y_{kq} E_q + \dots + Y_{kn} E_n) \quad (138)$$

Derivando (138) con respecto a  $t_{pq}$ :

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (P_k - jQ_k) = 0 \quad (139)$$

Donde:

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{pq}} = 0 \quad (140)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial t_{pq}} = 0 \quad (141)$$

Las ecuaciones (123), (124), (134), (135), (140) y (141) se emplea - para resolver la ecuación (67).

Cálculo de  $\frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}}$ ;  $\frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}}$

De la figura No.15

El flujo de potencia entre las barras p y q es:

$$S_{pq}^* = P_{pq} - j Q_{pq} = E_p^* I_{pq} \quad (142)$$

$$I_{pq} = (E_p - E_q) \frac{Y_{pq}}{t_{pq}} + E_p Y_{pq} \left( \frac{1}{t_{pq}} - 1 \right) \frac{1}{t_{pq}} \quad (143)$$

Reemplazando (143) en (142):

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* \left[ (E_p - E_q) \frac{Y_{pq}}{t_{pq}} + E_p Y_{pq} \left( \frac{1}{t_{pq}} - 1 \right) \frac{1}{t_{pq}} \right] \quad (144)$$

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* \left[ E_p \frac{Y_{pq}}{t_{pq}^2} - E_q \frac{Y_{pq}}{t_{pq}} \right] \quad (145)$$

Reemplazando (115), (116) en (145):

$$= \frac{V_p^2 \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \angle -90 - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \angle \theta_q - \theta_p - 90 \quad (146)$$

$$= - \frac{V_p^2 \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} j - \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}} (\cos(\theta_q - \theta_p - 90) + j \sin(\theta_q - \theta_p - 90)) \quad (147)$$

Reemplazando (120), (121) en (147):

$$P_{pq} - j Q_{pq} = - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \sin(\theta_q - \theta_p) - j \left( \frac{V_p^2 \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \cos(\theta_q - \theta_p) \right)$$

Derivando con respecto a  $t_{pq}$  e igualando partes reales y partes imaginarias se tiene:

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \sin(\theta_q - \theta_p) \quad (149)$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p \cdot V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}^2} \cos(\theta_q - \theta_p) - \frac{2 V_p^2 B_{pq}}{t_{pq}^3} \quad (150)$$

Cálculo de  $\frac{\partial P_{qp}}{\partial t_{pq}}$  ;  $\frac{\partial Q_{qp}}{\partial t_{pq}}$

De la fig. No.15

El flujo de potencia entre las barras q y p es:

$$S_{qp}^* = P_{qp} - j Q_{qp} = E_q^* I_{qp} \quad (151)$$

$$I_{qp} = (E_q - E_p) \frac{y_{pq}}{t_{pq}} + E_q y_{pq} \left(1 - \frac{1}{t_{pq}}\right) \quad (152)$$

Reemplazando (152) en (151):

$$S_{qp}^* = E_q^* \left( (E_q - E_p) \frac{y_{pq}}{t_{pq}} + E_q \cdot y_{pq} \left(1 - \frac{1}{t_{pq}}\right) \right) \quad (153)$$

$$S_{qp}^* = E_q^* \left( -E_p \frac{y_{pq}}{t_{pq}} + E_q \cdot y_{pq} \right) \quad (154)$$

Derivando con respecto a  $t_{pq}$ :

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_{qp}^*) = E_q^* \cdot \frac{E_p y_{pq}}{t_{pq}^2} \quad (155)$$

Reemplazando (115), (116) en (155):

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}} (S_{qp}^*) = V_q \angle -\theta_q : \frac{V_p \angle \theta_p B_{pq} \angle -90}{t_{pq}^2} \quad (156)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_{pq}}(P_{pq} - j Q_{pq}) = \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}^2} (\cos(\theta_p - \theta_q - 90) + j \sin(\theta_p - \theta_q - 90)) \quad (157)$$

Reemplazando (131), (132) en (157) e igualando partes reales y partes imaginarias:

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} = - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}^2} \sin(\theta_q - \theta_p) \quad (158)$$

$$\frac{\partial Q_{pq}}{\partial t_{pq}} = \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}^2} \cos(\theta_q - \theta_p) \quad (159)$$

Cálculo de  $\frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta}$  ;  $\frac{\partial P_{pq}}{\partial V}$

Iguando las partes reales de (148)

$$P_{pq} = - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \sin(\theta_q - \theta_p) \quad (160)$$

Derivando con respecto a  $\theta$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta^i} = 0 \quad \begin{matrix} i \neq p \\ i \neq q \end{matrix} \quad (161)$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta^p} = \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \cos(\theta_q - \theta_p) \quad (162)$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta^q} = - \frac{V_p V_q B_{pq}}{t_{pq}} \cos(\theta_q - \theta_p) \quad (163)$$

Derivando (160) con respecto a  $V$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial V_i} = 0 \quad \begin{matrix} i \neq p \\ i \neq q \end{matrix} \quad (164)$$

$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial V_p} = - \frac{V_q \cdot B_{pq}}{t_{pq}} \text{Sen}(\theta_q - \theta_p) \quad (165)$$

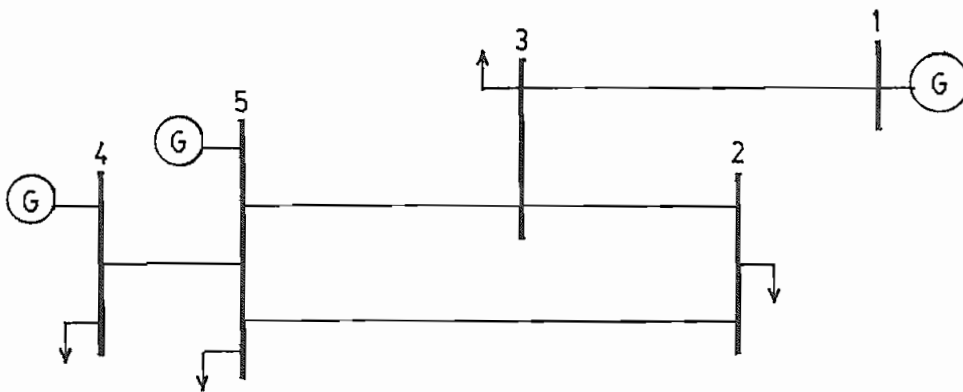
$$\frac{\partial P_{pq}}{\partial V_q} = - \frac{V_p \cdot B_{pq}}{t_{pq}} \text{Sen}(\theta_q - \theta_p) \quad (166)$$



A.6 RESOLUCION ILUSTRATIVA PARA OBTENER LA SOLUCION DEL F.O.P.R. EN UN SISTEMA DE 5 BARRAS

El sistema considerado tomado de las referencias (10), (6) es el siguiente:

Diagrama Unifilar.



Características Generales.

Número de barras	5
Número de elementos	5
Barras de tensión controlada	2
Número de la barra oscilante	5
Base	100 MVA
VARIABLES DE CONTROL	3
1. Voltajes de generación	3

DATOS DE LINEAS Y TRANSFORMADORES (p.u.)

ELEMENTOS No.	LINEA		RESISTENCIA R	REACTANCIA X	SUSCEPTANCIA $Y_{Lpq}/2$
	BAR P	BAR Q			
1	1	3	0.106	0.403	0.0
2	2	3	0.033	0.118	0.0
3	2	5	0.080	0.262	0.0
4	3	5	0.105	0.347	0.0
5	4	5	0.030	0.103	0.0

DATOS DE BARRA

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION	CARGA	
	V p.u.	P MW	P MW	Q MVAR
1	1.05	53.87	0.0	0.0
2			30.0	12.0
3			70.0	3.0
4	1.05	171.0	86.0	20.0
5	1.05	—	80.0	10.0

LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA

VARIABLES DE CONTROL		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Voltaje de generación	$V_1$	p.u.	0.95	1.05
	$V_4$	p.u.	0.95	1.05
	$V_5$	p.u.	0.95	1.05

VARIABLES DEPENDIENTES		DATOS	MINIMO	MAXIMO
Generación de Potencia Reactiva	$Q_1$	MVAR	0.0	50.0
	$Q_4$	MVAR	-50.0	70.0
	$Q_5$	MVAR	0.0	100.0
Voltajes de las barras de carga	$V_2$	p.u.	0.95	1.05
	$V_3$	p.u.	0.95	1.05

Criterios de Convergencia.

Criterio de Convergencia de F.P.      0.01      (p.u.)

Criterio de convergencia del F.O.P.R.   0.02      (MW)

RANGOS PARA LA OPTIMIZACION LINEAL DE LAS VARIABLES DE CONTROL.

Variables de Control	$V_1$ $V_4$ $V_5$
	V paso
1º Iteración Proceso Iterativo	$\pm 0.02$ $\pm 0.005$

A continuación se describe detalladamente los diferentes pasos para el control óptimo del flujo de potencia reactiva para el sistema de 5 barras con las condiciones de operación indicadas; y a la vez se compara con los obtenidos en la referencia (6) para el caso base y para el caso óptimo:

## 1. FLUJO DE CARGA PARA DESPACHO ECONOMICO: CASO BASE

Referencia 6

Esta tesis

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION	
	V p.u.	P MW	Q MW		V p.u.	P MW	Q MVAR
1	1.05	53.87	5.33	1	1.05	53.87	5.284
2	0.994			2	0.9948		
3	0.996			3	0.9960		
4	1.05	171.0	-0.88	4	1.05	171.00	-0.793
5	1.05	47.32	62.65	5	1.05	47.326	62.458

PERDIDAS	
P <sub>L</sub> MW	
Referencia 6	6.193
Esta tesis	6.137

2. a.- Formulamos la matriz Jacobiano considerando todas las barras excepto la barra oscilante (barra 5) como barra de carga.

$$[J^t] =$$

2.5058	0.0000	-2.2485	0.0000	1.2099	0.0000	-1.110	0.0000
0.0000	11.3544	-7.7925	0.0000	0.0000	2.9301	-2.1605	0.0000
-2.5058	-7.7828	12.747	0.0000	-0.1360	-2.1952	2.8839	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	10.0747	0.0000	0.0000	0.0000	3.7197
-0.1360	0.0000	1.1144	0.0000	2.6115	0.0000	-2.2485	0.0000
0.0000	-3.5309	2.1605	0.0000	0.0000	11.1144	-7.7925	0.0000
0.1360	2.1952	-4.2726	0.0000	-2.5058	-7.7828	12.6869	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	-2.0279	0.0000	0.0000	0.0000	9.6589

b. Calculamos  $\frac{\partial P_L}{\partial \theta}$  ;  $\frac{\partial P_L}{\partial V}$  .V aplicando la ecuación (101)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_L}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_1 \cdot V_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_2 \cdot V_2} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_3 \cdot V_3} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V_4 \cdot V_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2573 \\ -0.1466 \\ -0.3466 \\ 0.4867 \\ 0.0954 \\ -0.1175 \\ -0.1177 \\ 0.0206 \end{bmatrix}$$

c. Encontramos  $\frac{\partial P_L}{\partial P}$  ;  $\frac{\partial P_L}{\partial Q}$ , Ec (97)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^t \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_2} \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_3} \\ \frac{\partial P_L}{\partial P_4} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0711 \\ -0.0498 \\ -0.0492 \\ 0.0452 \\ -0.0468 \\ -0.0310 \\ -0.0342 \\ -0.0152 \end{bmatrix}$$

3. a.- Formulamos la matriz Jacobiano aumentado incluyendo todas las barras del sistema, Ec. (67)

$$[J] = \begin{bmatrix} 2.5058 & 0.0000 & -2.5058 & 0.0000 & 1.1523 & 0.0000 & -0.1366 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 11.3544 & -7.7828 & 0.0000 & 0.0000 & 2.9453 & -2.2041 & 0.0000 & -1.2721 \\ -2.2485 & -7.7925 & 12.7476 & 0.0000 & -1.0613 & -2.1717 & 2.8956 & 0.0000 & -0.9500 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 10.0747 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 3.5426 & -1.9313 \\ -0.1366 & 0.0000 & 0.1366 & 0.0000 & 2.4871 & 0.0000 & -2.5160 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -3.5309 & 2.1952 & 0.0000 & 0.0000 & 11.1720 & -7.8144 & 0.0000 & -3.4015 \\ 1.1144 & 2.1605 & -4.2726 & 0.0000 & -2.1414 & -7.8329 & 12.7384 & 0.0000 & -2.5776 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -2.0279 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 9.1989 & -9.5950 \\ 0.0000 & 0.8872 & 0.6703 & 3.6991 & 0.0000 & -3.7277 & -2.8169 & -9.1314 & 16.3345 \end{bmatrix}$$





$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.6799 & -0.0001 & -1.8409 \\ 0.2410 & -0.0002 & 0.8308 \\ 0.3447 & 0.0001 & 0.7295 \\ -0.0001 & 9.9120 & -9.9838 \\ -1.9576 & -10.4321 & 12.1803 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \end{bmatrix}$$

4. Los coeficientes de la función objetivo son:

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial V_1} \Delta V_1 + \frac{\partial P_L}{\partial V_4} \Delta V_4 + \frac{\partial P_L}{\partial V_5} \Delta V_5$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_1} = -0.1166$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_4} = -0.1405$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_5} = 0.0452$$

5. a) La función objetivo y las restricciones a ser minimizada es:

$$\Delta P_L = -0.1166 \Delta V_1 - 0.1405 \Delta V_4 + 0.0452 \Delta V_5$$

-0.4528	1.6799	-0.0001	-1.8409	$\Delta V_1$	0.9471
-0.0448	0.2410	-0.0002	0.8308	$\Delta V_4$	0.0551
-0.0459	0.3447	0.0001	0.7295	$\Delta V_5$	0.0540
-0.2920	-0.0001	9.9120	-9.9838		1.0079
-0.8255	-1.9576	-10.4321	12.1803		0.4744
-0.02	1				0.0
-0.02		1			0.0
-0.02			1		0.0

b. Los resultados de la programación lineal son:

$$\Delta V_1 = 0.0$$

$$\Delta V_4 = 0.0$$

$$\Delta V_5 = -0.02$$

6. Los nuevos valores de las variables de control son:

$$V_1 = 1.05$$

$$V_4 = 1.05$$

$$V_5 = 1.03$$

Para este caso particular, no se modifica la admitancia de barra puesto que no existe transformadores con cambiador de taps y capacitores o reactores shunt.

7. Se realiza flujos de potencia con las nuevas condiciones. Las pérdidas del nuevo estado del sistema es:

$$P_L = 6.125 \text{ MW}$$

8. Se comienza otra iteración del control óptimo de Potencia reactiva.
9. A continuación se presenta las partes más sobresalientes de cada iteración hasta tener una convergencia de  $\Delta P_L = 0.02 \text{ (MW)}$

	CASO BASE	ITERACION		
		1	2	3
$\partial P_L / \partial V_1$		-0.11665	-0.0899	-0.0959
$\partial P_L / \partial V_4$		-0.14059	-0.0393	-0.0630
$\partial P_L / \partial V_5$		0.0452	-0.0718	-0.0423
$\Delta V_1$		0.00	0.00	0.00
$\Delta V_4$		0.00	0.00	0.00
$\Delta V_5$		-0.02	0.005	0.005
$V_1 \text{ p.u.}$	1.05	1.05	1.05	1.05
$V_4 \text{ p.u.}$	1.05	1.05	1.05	1.05
$V_5 \text{ p.u.}$	1.05	1.03	1.035	1.04
$P_L \text{ (MW)}$	6.137	6.125	6.077	6.087
$ \Delta P_L $		0.012	0.048	0.01

## 10. Flujo de Potencia: CASO OPTIMO

Referencia 6

Esta tesis.

BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION		BARRA No.	VOLTAJE	GENERACION	
	V p.u.	P MW	Q MVAR		V p.u.	P MW	Q MVAR
1	1.05	53.79	7.36	1	1.05	53.870	7.127
2	0.9855			2	0.9866		
3	0.9877			3	0.9886		
4	1.05	171.00	12.12	4	1.05	171.00	9.11
5	1.039	47.32	62.65	5	1.04	46.655	50.562

NS=1

NS=5

	PERDIDAS
	P <sub>L</sub> MW
REFERENCIA 6	6.11
ESTA TESIS	6.084

En el presente apéndice se puede comprender el método utilizado en el flujo óptimo de potencia reactiva, el que esta indicando los diferentes pasos, hasta completar una iteración, y además los resultados obtenidos se compara con la referencia (6).

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TFSIS DE GRADO

TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA  
 EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION  
 POR UN CONTROL OPTIMO EN:  
 1.- TAPS DE LOS TRANSFORMADORES  
 2.- VOLTAJES DE GENERACION  
 3.- FUENTES DE REACTIVOS (CAPACITORES, REACTORES SHUNT)

METODO: PROPUESTO POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D. CHENOWETH

\*\*\*\*\*

SISTEMA DE

5 BARRAS

\*\*\*\*\*

-----  
 DATOS GENERALES  
 -----

NO. TOTAL DE BARRAS: 5  
 NO. DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA: 2  
 NO. DE LA BARRA FLOTANTE: 5  
 NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE,  
 Y/O TRANSFORMADORES: 5  
 NO. DE CAP/REAC EN PARALELO: 0  
 MVA. BASE: 100.000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P. 0.01000  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R. 0.02000  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. : 15  
 MAXIMO NO. DE ITERACIONES DEL F.O.P.R. : 15  
 TIPOS DE BARRA: S FLOTANTE  
 T VOLTAJE CONTROLADO  
 C CARGA

-----  
 DATOS DE BARRAS  
 -----

BARRA NO.	TIPO DE BARRA	VOLTAJE MAGNITUD	POT ACTIVA GENERACION	POT REACTIVA GENERACION	POT ACTIVA CARGA	POT REACTIVA CARGA
1	T	1.05000	53.87000	0.00000	0.00000	0.00000
2	C	0.00000	0.00000	0.00000	30.00000	12.00000
3	C	0.00000	0.00000	0.00000	70.00000	3.00000
4	T	1.05000	171.00000	0.00000	86.00000	20.00000
5	S	1.05000	0.00000	0.00000	80.00000	10.00000

-----  
 DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/REACTORES (P.U.-MVAR)  
 -----

NO.	BAR P	BAR Q	RFSTYEN	REACTANC	SUSCEPTAN	MVA T	TAP P	TAP Q	CAP/REAC(DISPONIBLE)
1	1	3	0.10600	0.40300	0.00000				
2	2	3	0.03300	0.11800	0.00000				
3	2	5	0.08000	0.26200	0.00000				
4	3	5	0.10500	0.34700	0.00000				
5	4	5	0.03000	0.10300	0.00000				

-----  
 LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA  
 -----

BAR	P	BAR Q	V.MIN	V.MAX	Q.MIN	Q.MAX	T.MIN	T.MAX
NER	1		0.95000	1.05000	-40.00000	100.00000		
RGA	2		0.95000	1.05000				
RGA	3		0.95000	1.05000				
NER	4		0.95000	1.05000	-30.00000	100.00000		
NER	5		0.95000	1.05000	-30.00000	100.00000		

-----  
 FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE  
 -----

-----  
 RESULTADOS  
 -----

P.U.	VOLTAJE GRADOS	GENERACION		CARGA		CAP/REAC MVAR	DE A BAR BAR	FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
		MW	MVAR	MW	MVAR			MW	MVAR		
1.0500	8.230	53.870	5.284	0.000	0.000	-0.000	1 3	53.691	5.284	2.798	10.640
0.9948	-3.525	0.000	0.000	30.000	12.000	-0.000	2 3	-1.975	-0.380	0.001	0.005
							2 5	-28.065	-11.618	0.746	2.442
0.9960	-3.398	0.000	0.000	70.000	3.000	-0.000	3 1	-50.893	5.355	2.798	10.640
							3 2	1.976	0.384	0.001	0.005
							3 5	-20.517	-8.774	0.527	1.742
1.0500	4.858	171.000	-0.793	86.000	20.000	-0.000	4 5	44.593	-20.793	2.065	7.089
							5 2	28.810	14.060	0.746	2.442
							5 3	21.044	10.515	0.527	1.742
1.0500	0.000	47.326	62.458	80.000	10.000	-0.001	5 4	-82.529	27.882	2.065	7.089

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	272.196	66.950
TOTAL MVAR CAP/REAC:		-0.001
TOTAL CARGA:	266.000	45.000
TOTAL PERDIDAS:	6.137	21.918

-----  
 POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE  
 -----

-----  
 1.- VOLTAJES DE GENERACION  
 -----

NO.	BAR P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	4	1.0500
3	5	1.0500

-----  
 FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO  
 -----

ORD.	VOLTAJE		GENERACION		CARGA		CAP/REAC	DE A		FLUJOS EN LINEAS		PERDIDAS EN LINEAS	
	PU	GRADOS	MW	MVAR	MW	MVAR		BAR	BAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1.0500	8.125		53.870	7.127	0.000	0.000	-0.000	1	3	53.815	7.127	2.833	10.772
0.9866	-3.599		0.000	0.000	30.000	12.000	-0.000	2	3	-1.655	-1.215	0.001	0.000
								2	5	-27.989	-10.814	0.735	2.408
0.9886	-3.508		0.000	0.000	70.000	3.000	-0.000	3	1	-50.982	3.644	2.833	10.772
								3	2	1.656	1.220	0.001	0.000
1.0500	4.771		171.000	9.110	86.000	20.000	-0.000	3	5	-20.514	-7.874	0.519	1.714
								4	5	85.000	-10.890	1.998	6.861
1.0400	0.000		46.655	50.562	80.000	10.000	-0.000	5	2	28.624	13.222	0.735	2.408
								5	3	21.033	9.589	0.519	1.714
								5	4	-83.002	17.751	1.998	6.861

	MW	MVAR
TOTAL GENERACION:	271.525	66.799
TOTAL MVAR CAP/REAC:		-0.001
TOTAL CARGA:	266.000	45.000
TOTAL PERDIDAS:	6.087	21.760

POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO

1.- VOLTAJES DE GENERACION

NO.	BARRA P	VOLTAJE MAGNITUD
1	1	1.0500
2	4	1.0500
3	5	1.0400

CONVERGE EN 3 ITERACIONES EL F.O.P.R.

## APENDICE "B"

### MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL

#### B.1 Título

Minimización de pérdidas activas de transmisión mediante control de flujo de potencia reactiva en sistemas de potencia utilizando un modelo lineal.

#### B.2 OBJETIVO

El programa digital realiza un control óptimo del flujo de potencia reactiva para minimizar las pérdidas activas de transmisión y mejorar los perfiles de voltaje en las barras de carga en cierto punto de operación ejerciendo control sobre:

- Transformadores con cambiador de taps.
- Magnitud de voltaje en las barras de generación
- Fuentes de Potencia Reactiva conectables en pasos (Capacitores y/o reactores shunt)

#### B.3 METODO

El método de solución es lineal, se basa en el algoritmo propuesto por K.R.C. Mamandur, R.D. Chenoweth en el que emplea relaciones de



sensitividad del sistema de potencia para formar tanto la función objetivo (minimizar pérdidas de transmisión), las restricciones funcionales de desigualdad y las restricciones sobre los parámetros de control; para ser resuelto por medio de programación lineal.

La descripción del programa digital se encuentra detallado en el capítulo VI de esta Tesis.

#### NOMENCLATURA

A continuación se detalla las variables de entrada y salida, características, forma de proporcionar los datos, esquemas de datos y de tarjetas de control del programa digital.

#### VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada están agrupadas en aquellas que representan a los datos generales del sistema, datos de barra, datos de elementos de interconexión, datos de límites de operación del sistema.

#### DATOS GENERALES

SIMBOLO	DESCRIPCION
NB	Número de barras del sistema
NBTC	Número de barras de tensión controlada, asociados con condensadores sincrónicos.
NS	Número de la barra oscilante
NE	Número de elementos serie del sistema (líneas de transmi-

SIMBOLO	DESCRIPCION
	sión, transformadores, capacitores o reactores serie)
NRC	Número de elementos paralelos del sistema (capacitores y/o reactores shunt)
BASE	MVA base del sistema, si se trabaja en p.u. se debe poner 1.0
CONV	Criterio de convergencia para el flujo de potencia (F.P.)
CFPR	Criterio de convergencia para el flujo óptimo de potencia reactiva (F.O.P.R.)

#### DATOS DE BARRAS

SIMBOLO	DESCRIPCION
k	Número de cada barra del sistema
Vk	Magnitud de voltaje especificado de cada barra. si: $V_k=0$ barra de carga $V_k \neq 0$ y $k=NS$ barra oscilante $V_k \neq 0$ y $k \neq NS$ barra de tensión controlada
PGK	Potencia activa de generación de la barra k en MVAR o p.u.
Q GK	Potencia reactiva de generación de la barra k en MVAR o p.u.
PLK	Potencia activa de carga de la barra K en MW o p.u.
QLK	Potencia reactiva de carga de la barra K en MVAR o p.u.

## DATOS DE ELEMENTOS DE INTERCONEXION

SIMBOLO	DESCRIPCION
L	Número de la barra de partida (barra p)
M	Número de la barra de llegada (barra q)
RR	<p>Según los valores de L, M, BK representan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia de línea en p.u., si: <math>L \neq M</math> y <math>BK=0</math></li> <li>- Reactancia de un transformador en p.u., si: <math>L \neq M</math> y <math>BK=1</math>.</li> <li>- Potencia de un capacitor o reactor a tierra en MVAR o p.u., si: <math>L=M</math> y <math>BK=0</math></li> </ul>
XX	<p>Según los valores de L, M y BK representa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactancia de la línea expresada en p.u., si: <math>L \neq M</math> y <math>BK=0</math></li> <li>- Potencia base de un transformador en MVA o p.u., si: <math>L \neq M</math> y <math>BK=1</math>.</li> </ul>
SS	<p>Según los valores de L, M y BK representan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Susceptancia de la línea en p.u., si: <math>L \neq M</math> y <math>BK=0</math></li> <li>- La relación de transformación vista desde el lado de envío (barra p) en un transformador. <math>L \neq M</math> y <math>BK=1</math>.</li> </ul>
BK	<p>Indicador que según su valor es:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>0. si es línea de transmisión, capacitor o reactor a tierra.</li> <li>1. Si es un transformador con cambiador de taps.</li> </ol>

## DATOS DE TRANSFORMADORES Y CAPACITORES Y/o REACTORES A SER OPTIMIZADOS

SIMBOLO	DESCRIPCION
NTR	Número de transformadores con cambiador de taps a ser optimizados, independiente del número de transformadores que existe en el sistema.
NCO	Número de capacitores y/o reactores shunt a ser optimizados, independiente del número de capacitores y/o reactores shunt que existe en el sistema.
IPER	Indicador <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cero (0) para no imprimir las pérdidas activas totales en cada iteración.</li> <li>- Uno (1) para imprimir las pérdidas activas totales en cada iteración. Sirve para el caso que no existe convergencia en el número máximo de iteraciones, ver el comportamiento de las pérdidas y escoger adecuadamente el valor de CFPR.</li> </ul>

## DATOS DE LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA

SIMBOLO	DESCRIPCION
L1	Según el valor de M1 representa. M1=0 Barra del sistema. Sirve para identificar el tipo de barra del sistema. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barra de generación, si: <math>V_{MIN} \neq 0</math>, <math>V_{MAX} \neq 0</math>, <math>Q_{MIN} \neq 0</math>, <math>Q_{MAX} \neq 0</math>; <math>T_{MIN} = 0</math>, <math>T_{MAX} = 0</math></li> <li>- Barra de carga, si: <math>V_{MIN} \neq 0</math>, <math>V_{MAX} \neq 0</math>, <math>Q_{MIN} = 0</math>, <math>Q_{MAX} = 0</math>, <math>T_{MIN} = 0</math>, <math>T_{MAX} = 0</math></li> </ul>

SIMBOLO	DESCRIPCION
M1≠0	<p>Existe entre las barras L1 y M1, transformadores con cambiadores de taps o capacitores y/o reactores shunt.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de la barra con el cambiador de taps (barra p), siendo M1 la barra controlada (barra q), cuando existe un transformador con cambiador de taps para ser optimizado, si: L1≠M1, VMIN=0, VMAX=0, QMIN=0, QMAX=0, TMIN≠0, TMAX≠0</li> <li>- Número de la barra de carga donde está localizado el capacitor o reactor a tierra, si: M1=L1, VMIN=0 VMAX=0; - QMIN≠0 y QMAX≠0 o QMIN=0 y QMAX≠0 o QMIN≠0 y QMAX=0; TMIN=0, TMAX=0</li> </ul>
VMIN	Magnitud de voltaje mínimo en la barra L1, si: M1=0
VMAX	Magnitud de voltaje máximo en la barra L1, si: M1=0
QMIN	<p>Según el valor de M1 representa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia reactiva mínima de generación en MVAR o p.u., si: M1=0</li> <li>- Inyección de potencia reactiva mínima del capacitor o reactor a tierra en MVAR o p.u., si: M1=L1</li> </ul>
QMAX	<p>Según el valor de M1 representa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia reactiva máxima de generación en MVAR o p.u., si: M1=0</li> <li>- Inyección de potencia reactiva máxima del capacitor o reactor a tierra en MVAR o p.u., si: M1=L1</li> </ul>
TMIN	Posición mínima del taps, si: M1≠0, L1≠M1
TMAX	Posición máxima del taps, si: M1≠0, L1≠M1

### VARIABLES DE SALIDA

Para la salida de los resultados del programa digital que comprende: datos del sistema, resultados del flujo de potencia para el caso base y para el caso óptimo, posición de las variables de control cuyas componentes han sido optimizadas para dar el menor valor de la función objetivo, se ha utilizado la siguiente nomenclatura.

SIMBOLO	DESCRIPCION
I	Número de la barra
VBASEV	Magnitud del voltaje de barra
DELTAG	Angulo del voltaje de barra en grados
PG	Potencia activa de generación
QG	Potencia reactiva de generación
PL	Potencia activa de carga en cada barra
QL	Potencia reactiva de carga en cada barra
FQII	Potencia reactiva de un capacitor o reactor
FPJ	Flujo de potencia activa en cada línea
FQJ	Flujo de potencia reactiva en cada línea
TPG	Potencia activa total de generación
TQG	Potencia reactiva total de generación
TFQ	Potencia reactiva total de capacitores y/o reactores
TPL	Potencia activa total de carga
TQL	Potencia reactiva total de carga
SUMPP	Potencia activa total de pérdidas
SUMPQ	Potencia reactiva total de pérdidas
Q	Potencia reactiva de cada capacitor y/o reactor, optimizados.

SIMBOLO	DESCRIPCION
T	Valor de taps, de los transformadores optimizados
ICON	Número de iteraciones del F.O.P.R.

#### FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS

Los datos del sistema de potencia, para realizar el flujo óptimo de potencia reactiva, deben estar en la siguiente forma: (Esquema N° 1)

1. El nombre o identificación del sistema, se da en cuatro tarjetas, si no se desea se deben dejar las 4 tarjetas en blanco.
2. Los datos generales del sistema, se indican en una sola tarjeta.
3. Los datos de barra se introducen en una tarjeta por cada barra.
4. Los datos de líneas, transformadores, capacitores y/o reactores serie se indican en una tarjeta por cada línea o elemento.

Para el caso de capacitores y/o reactores a tierra se introduce los datos, haciendo  $L=M$  y se indica en MVAR o p.u. siendo una cantidad positiva para el capacitor y negativa para el reactor.

5. El número de transformadores con cambiador de taps y el número de capacitores y/o reactores-paralelo ha ser optimizado se introduce en una tarjeta.
6. Los límites de operación se indican en una tarjeta por cada uno -

de: las barras del sistema, de los transformadores con cambiador de taps y de los capacitores y/o reactores a tierra.

7. La numeración de las barras es indiferente y cualquiera de ellas puede ser la oscilante pudiendo tener cualquiera de ellas un valor entre uno y el número de barras.

#### FORMA DE UTILIZAR EL PROGRAMA GRABADO EN DISCO O EN CINTA

En el Esquema No.5 se muestra claramente la forma de usar las tarjetas de control que se requiera para utilizar el programa en cualquiera de los dos casos.

#### RESTRICCIONES

El programa tiene las siguientes restricciones:

- El programa fue diseñado para operar con sistemas de potencia con un máximo de 100 barras y 120 elementos de interconexión.
- El número de transformadores con cambiador de taps que pueden como máximo ser optimizados, es 20.
- El número de capacitores y/o reactores a tierra que como máximo pueden ser optimizados es igual al número de las barras de carga, siempre que el número total de las variables de control no exceda de 50.

Cuando existe un capacitor y/o reactor a tierra en una barra de generación este no puede ser optimizado, se pondrá directamente su valor en MVAR o p.u.



- Considera un solo elemento entre dos barras interconectado.

NOTA: Una amplia información se optiene de la Tesis de grado "Minimización de pérdidas activas de transmisión mediante control de flujo de potencia reactiva en sistemas de potencia utilizando un modelo lineal" HECTOR ANIBAL BARRERA FLORES 1985 E.P.N.

## EJEMPLOS

Los resultados de los ejemplos que a continuación se presentan están analizados en el capítulo III

Ejemplo No.1 Tomado de la referencia 2

## Características

Número de barras	6
Número de elementos	7
Barras de tensión	1
Número de la barra oscilante	1
Base	100 MVA
Criterio de convergencia del F.P.	0.01 (p.u.)
Criterio de convergencia del F.O.P.R.	0.2 (MW)

La codificación de los datos para máxima carga de este sistema se encuentra en el esquema No.2

Ejemplo No.2 Tomado de la referencia 6, 14

## Características

Número de barras	14
Número de elementos	21
Barras de tensión controlada	4
Número de la barra oscilante	1

Base	100 MVA
Criterio de convergencia del F.P.	0.01 (p.u.)
Criterio de convergencia del F.O.P.R.	0.05(MW)

La codificación de los datos para este sistema se encuentra en el esquema No.3

Ejemplo No.3 Sistema Nacional Interconectado para demanda máxima.

#### Características

Número de barras	25
Número de elementos	25
Barras de tensión controlada	5
Número de la barra oscilante	1
Base	100 MVA
Criterio de convergencia del F.P.	0.01 (p.u.)
Criterio de convergencia del F.O.P.R.	0.05 (MW)

La codificación de los datos para este sistema se encuentra en el esquema No.4



















MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION MEDIANTE CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

No. ESQUEMA N° 5

Programador H. A. BARRERA F. Fecha: MAYO/85 Hoja No. 1 de 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
TARJETAS DE CONTROL PARA USAR EL PROGRAMA CON EL DISCO																																																																															
//	JOB	nombre cuenta																																																																													
//	DLBL	1 JSCCL, PROGRAMAS DE ELECTRICA																																																																													
//	EXEC																																																																														
DATOS																																																																															
//*	ASSGN	SYSCLB,UA																																																																													
//	\$\$\$	EOJ																																																																													



## APENDICE "C"

### LISTADO DEL PROGRAMA

A continuación se presenta un listado sacado en el computador PRIME de INECEL.

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \*  
 \*  
 \* ESCUELA POLITECNICA NACIONAL \*  
 \* ----- \*  
 \*  
 \* FAULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA \*  
 \* ----- \*  
 \*  
 \* DEPARTAMENTO DE POTENCIA \*  
 \* ----- \*  
 \*  
 \*\*\*\*\*

TESIS DE GRADO  
 -----

TEMA:  
 -----

MINIMIZACION DE PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION MEDIANTE  
 CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE  
 POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LINEAL

REALIZADO  
 -----

POR: HECTOR ANIBAL BARRERA FLORES  
 DIRIGIDO POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS

FECHA: FEBRERO 1985

PROGRAMA DIGITAL  
 -----

OBJETIVO: EL PROGRAMA DIGITAL REALIZA UN CONTROL OPTIMO DE  
 POTENCIA REACTIVA PARA MINIMIZAR LAS PERDIDAS  
 ACTIVAS DE TRANSMISION Y MEJORAR LOS NIVELES DE  
 VOLTAJE EN LA BARRAS DE CARGA EN CIERTO PUNTO DE  
 OPERACION EJERCIENDO CONTROL SOBRE:  
 - TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS  
 - VOLTAJES DE GENERACION  
 - FUENTES DE POTENCIA REACTIVA (CAPACITORES, REACTORES SHUN

METODO: PROPUESTO POR K.R.C.MAMANDUR, R.D.CHENOWETH  
 EL METODO EMPLEA RELACIONES SENSITIVAS LINEALIZADAS  
 DEL SISTEMA DE ENERGIA PARA ESTABLECER LA FUNCION  
 OBJETIVO PARA MINIMIZAR LAS PERDIDAS DEL SISTEMA  
 RELACIONANDO VARIABLES DEPENDIENTES Y VARIABLES DE  
 CONTROL PARA LO CUAL SE EMPLEA PROGRAMACION LINEAL  
 POR EL METODO SIMPLEX PARA LAS CORRECCIONES EN LAS  
 VARIABLES DE CONTROL .

## DESCRIPCION DE VARIABLES

## PROGRAMA GENERAL

```

NB.....> NUMERO DE BARRAS DEL SISTEMA
NETC.....> NUMERO DE BARRAS DE TENSION CONTROLADA
NS.....> NUMERO DE LA BARRA FLOTANTE
NE.....> NUMERO DE ELEMENTOS
NRC.....> NUMERO DE REACTORES Y/O CAPACITORES
BASE.....> BASE DEL SISTEMA MVA O PU
NTR.....> NUMERO DE TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS A SER
OPTIMIZADOS
NCO.....> NUMERO DE CAP/REAC CONECTADOS A TIERRA A SER OPTIMIZADOS
CONV.....> CONVERGENCIA DE LOS FLUJOS DE POTENCIA
CFPR.....> CONVERGENCIA DEL F.O.P.R.
NT.....> NUMERO DE ELEMENTOS DE YB DIFERENTES DE CERO
IT.....> NTR MAS NCO
MAXIT.....> NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES PARA UN F.P.
MIFOP.....> NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES PARA UN F.O.P.R.
PI.....> VECTOR, INCREMENTOS DE LAS VARIABLES DE CONTROL
V.....> VECTOR, MODULO DE VOLTAJES DE BARRAS
DELTA.....> VECTOR, ANGULOS DE VOLTAJE
G.....> VECTOR, CONDUCTANCIAS GPQ DE LA MATRIZ YB
B.....> VECTOR, SUSCEPTANCIAS BPQ DE LA MATRIZ YB
SUS.....> VECTOR, VALOR DE SUSCEPTANCIAS A TIERRA YLPQ/2
E.....> VECTOR, MODULO DEL VOLTAJE ESPECIFICADO, DADO EN P.U.
QMAX.....> VECTOR, POTENCIA REACTIVA MAXIMA DE GENERACION
QMIN.....> VECTOR, POTENCIA REACTIVA MINIMA DE GENERACION
PG.....> VECTOR, POTENCIA ACTIVA GENERADA
GG.....> VECTOR, POTENCIA REACTIVA GENERADA
PL.....> VECTOR, POTENCIA ACTIVA DE CARGA
QL.....> VECTOR, POTENCIA REACTIVA DE CARGA
YMOD.....> VECTOR, MODULO DE LA ADMITANCIA DE YB BARRA
YANG.....> VECTOR, ANGULO DE LA ADMITANCIA DE YB BARRA
T.....> VECTOR, POSICION DE LOS TAPS EN LOS TRANSFORMADORES
TMAX.....> VECTOR, POSICION MAXIMA DE LOS TAPS
TMIN.....> VECTOR, POSICION MINIMA DE LOS TAPS
VMAX.....> VECTOR, VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO EN UNA BARRA
VMIN.....> VECTOR, VOLTAJE MINIMO PERMITIDO EN UNA BARRA
Q.....> VECTOR, MAGNITUD DE LAS FUENTES DE REACTIVOS A SER OPTIMIZADO
NODE.....> VECTOR, INICADOR DEL TIPO DE BARRA
NODET1.....> VECTOR, BARRA P DEL TRANSFORMADOR
NODET2.....> VECTOR, BARRA Q DEL TRANSFORMADOR
ISEND.....> VECTOR, ARCISA DE LA MATRIZ YB DE LOS ELEMENTOS DIFERENTES
DE CERO
IREC.....> VECTOR, ORDENADA DE LA MATRIZ YB DE LOS ELEMENTOS DIFERENTES
DE CERO
DE.....> VECTORES PARA ENCONTRAR
RE.....> LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS
CE.....> CON RESPECTO A LA POTENCIA
LCOL.....> ACTIVA Y REACTIVA, LAS PARTES REQUERIDAS
NOZE.....> DE LA MATRIZ DE RETRICCIONES, LA INVERSA DEL JACOBIANO
NSEQ.....> EN EL PROBLEMA DE LOS FLUJOS DE CARGA,
VP.....> APLICANDO BI-FACTORIZACION

```

## VARIABLES EN LAS SUBROUTINAS



## SUBROUTINA SOLVE

PN.....> VECTOR, POTENCIA ACTIVA NETA ESPECIFICADA  
 QN.....> VECTOR, POTENCIA REACTIVA NETA ESPECIFICADA 223  
 X2.....> PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISION

## SUBROUTINA JACOB

HAC1.....> SUBJACOBIANO H DEL SISTEMA  
 HAC2.....> SUBJACOBIANO M DEL SISTEMA (DP/DV.V)  
 HAC3.....> SUBJACOBIANO N DEL SISTEMA  
 HAC4.....> SUBJACOBIANO L DEL SISTEMA (DQ/DV.V)  
 HAC5.....> SUBJACOBIANO M DEL SISTEMA (DQ/DV)  
 HAC6.....> SUBJACOBIANO L DEL SISTEMA (DQ/DV)  
 HAPD.....> VECTOR DE LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO  
 A LOS ANGULOS  
 HAPV.....> VECTOR DE LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO  
 A LOS VOLTAJES

## SUBROUTINA PERDI

VP1.....> VECTOR INDEPENDIENTE, SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON  
 RESPECTO A LOS ANGULOS Y VOLTAJES.  
 VECTOR SOLUCION, SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON REPECTO  
 A LA POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

## SUBROUTINA RESTRI

Z.....> MATRIZ QUE ALMACENA EL JACOBIANO INCLUYENDO LAS INYECCIONES  
 DE ENERGIA EN LA BARRA SLACK Y LAS ECUACIONES DEL FLUJO DE  
 ENERGIA DE LOS TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS  
 Z.....> MATRIZ, RESTRICION DEL SISTEMA S1\* Y S2\*  
 DT.....> INCREMENTO EN LOS TAPS DE UN TRANSFORMADOR POR ITERACION  
 DV.....> INCREMENTO EN LOS VOLTAJES DE GENERACION POR ITERACION  
 DQ.....> INCREMENTO EN LAS FUENTES DE REACTIVOS POR ITERACION  
 G1.....> VECTOR, VARIACION MINIMA DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES  
 B1.....> VECTOR, VARIACION MAXIMA DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES  
 HAC1.....> VECTOR, VARIACION MINIMA DE LAS VARIABLES DE CONTROL  
 HAC3.....> VECTOR, VARIACION MAXIMA DE LAS VARIABLES DE CONTROL

## SUBROUTINA OBJE

RE.....> VECTOR, SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO  
 A LOS VOLTAJES DE GENERACION, A LOS TRANSFORMADORES  
 CON TAPS, A LAS FUENTES DE REACTIVOS (COEFICIENTES DE  
 LA FUNCION OBJETIVO)

## SUBROUTINA OPTI

RE.....> VECTOR, COEFICIENTES DE LA FUNCION OBJETIVO  
 VECTOR, INCREMENTOS DE LAS VARIABLES DE CONTROL  
 G1.....> VECTOR, MINIMA VARIACION DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES  
 B1.....> VECTOR, MAXIMA VARIACION DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES  
 HAC1.....> VECTOR, MINIMA VARIACION DE LAS VARIAPLES DE CONTROL  
 HAC3.....> VECTOR, MAXIMA VARIACION DE LAS VARIABLES DE CONTROL  
 HAC4.....> VECTOR, LAS VARIACIONES DE LAS VARIABLES DE CONTROL  
 SON MAYORES QUE CERO  
 Z.....> MATRIZ DE RESTRICCIONES S1\* Y S2\*  
 Z.....> MATRIZ PARA REPRESENTAR LA FUNCION OBJETIVO Y LAS  
 RESTRICCIONES NECESARIOS EN EL METODO SIMPLEX  
 PI.....> VECTOR, ALMACENA LOS INCREMENTOS DE LAS VARIABLES DE CONTROL DE

```

.....> VECTOR, POSICION CORREGIDA DEL TAPS DEL TRANSFORMADOR
.....> VECTOR, POSICION CORREGIDA DE LAS FUENTES DE VAR
S.....> VECTOR, VALOR DE LA SUSCEPTANCIA CORREGIDA POR LAS NUEVAS
MAGNITUDES DE LOS TAPS EN LOS TRANSFORMADORES Y EN LAS
FUENTES DE REACTIVOS
.....> VECTOR, VALOR DE LA SUSCEPTANCIA BPQ DE LA MATRIZ YR MODIFIC
POR LAS NUEVAS MAGNITUDES DE LOS TAPS EN LOS TRANSFORMADORES
Y EN LAS FUENTES DE REACTIVOS.

```

```

DIMENSION Z(250,100),G1(550),B1(550)
DIMENSION V(200),E(100),G(350),R(350),NODE(100),NBUS(550)
DIMENSION PG(100),QG(100),PL(100),QL(100),QMAX(100),QMIN(100)
DIMENSION VP(100),SUS(350),QN(100),PN(100),IREC(350),DELTA(100)
DIMENSION ISEND(350),INE(350),LCOL(100),NOZE(100),DE(100)
DIMENSION NSEQ(100),ITAG(800),ITAG1(850),ITAG2(850),LNXT(850)
DIMENSION CE(550),RE(550),NODET1(20),NODET2(20),T(350),VMIN(100)
DIMENSION Q(100),VMAX(100),TMIN(20),TMAX(20),BP(350),RQ(550)
DIMENSION YMOD(350),YANG(350),HAPD(100),HAPV(100),XPI(50)
DIMENSION LL2(100),VP1(200),HAC6(350),NOZE1(350),PI(50),IBN1(350)
DIMENSION HAC1(350),HAC2(350),HAC3(350),HAC4(350),HAC5(350)
DIMENSION NBN1(350),NBP(100)
COMMON YANG
COMMON Z
COMMON TMIN,TMAX,Q
CERO=0.
MAXIT=15
MIFOP=15
JR=5
JW=6

```

## LECTURA DE DATOS DEL SISTEMA

```

READ(JR,120)NB,NBTC,NS,NE,NRC,BASE,CONV,CFPR
IF(NB.GE.999) GO TO 77
WRITE(JW,90)
WRITE(JW,91)

```

## TITULOS

```

DO 5 J=1,4
READ(JR,100) (E(I),I=1,80)
WRITE(JW,110) (E(I),I=1,80)
CONTINUE
WRITE(JW,129)
WRITE(JW,130)NB,NBTC,NS,NE,NRC,BASE,CONV,CFPR,MAXIT,MIFOP
NER=0
IF(NB.GT.2) GO TO 30
NER=NER+1
WRITE(JW,800)
IF(NB.LT.101) GO TO 31
NER=NER+1
WRITE(JW,801)
IF(NS.GT.0.AND.NS.LE.NB) GO TO 32
NER=NER+1
WRITE(JW,802)
IF(NRC.LE.NB) GO TO 33
NER=NER+1
WRITE(JW,803)
IF(NRC.GE.0) GO TO 34
NER=NER+1
WRITE(JW,804)
TAUX=NB-2

```

```

NER=NER+1
WRITE(JW,805)
IAUX=NB-1
IF(NE.GE.IAUX) GO TO 36
NER=NER+1
WRITE(JW,806)
IF(BASE.GT.CERO.AND.CONV.GT.CERO) GO TO 37
NER=NER+1
WRITE(JW,807)
IF(CONV.GT.0.0001) GO TO 38
WRITE(JW,808)
IF(NE.LE.125) GO TO 39
NER=NER+1
WRITE(JW,809)
IF(NER.GT.0) GO TO 77
NE=NE+NRC
NLE=2*NE+NB
N5=NE*6+100
N9=NB+40
NTND=N5
WRITE(JW,128)
MONI=0
ICON=0
X1=999.
CALL INPUT(NB,JR,JW,NS,BASE,DELTA,G,B,SUS,QMAX,QMIN,PG,PL,GG,QL,NO
1DE,NBUS,CERO,V,E,NE,NT,ISEND,IRES,NLE,INE,NSEQ,NTR,IT,HAC1,HAC2,HA
* C3,NODET1,NODET2,YMOD,T,TMIN,TMAX,VMIN,VMAX,Q,YANG,NCO,IPER)
WRITE(JW,336)

```

#### DIMENSIONAMIENTOS

```

MM1=2*NB+NTR
MM2=2*NB

```

J6=NÚMERO DE VARIABLES DE CONTROL

```
MM3=1+2*NB+J6
```

```
MM4=3+J6
```

```
MM5=NB*J6
```

```
MM3=1+2*NB+15
```

```
MM4=50
```

```
MM5=NB*12
```

```

CALL SOLVE(NB,NS,CONV,MAXIT,V,DELTA,G,B,NODE,SUS,QMAX,QMIN,PG,PL,Q
1G,QL,PN,QN,E,VP,JW,CERO,BASE,NT,ISEND,IRES,NBUS,INE,NLE,N5,N9,NTND
2,LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,X2,MONI)

```

```

CALL PRUEBA(JW,NT,IT,NTR,NODET1,NODET2,ISEND,IRES,Q,T,NODE,NB,ICON
1,V,BASE,NCO)

```

```
IF(MONI.EQ.1) GO TO 842
```

```
DX=X1-X2
```

```
IF(ABS(DX).LE.CFPR) GO TO 838
```

```
IF(X2.GT.X1) GO TO 842
```

```
X1=X2
```

```
MONI=MONI+1
```

```
IF(IPER.EQ.0) GO TO 669
```

```
WRITE(JW,670) X2
```

```
IF(MONI.GT.MIFOP) GO TO 666
```

```

CALL JACOB(NB,NT,V,DELTA,JW,ISEND,IRES,HAC1,HAC2,HAC3,HAC4,HAPD,HA
* PV,HAC5,HAC6,YMOD,YANG)

```

```

CALL PERDI(NT,NB,N5,N9,ISEND,IRES,LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,LNXT,CE,R
* E,LF,HAPD,HAPV,HAC1,HAC2,HAC3,HAC4,VPI,NW,NTND,LL2,JW,NS,MM2)

```

```

CALL RESTRI(ISEND,IRES,HAC1,HAC3,HAC5,HAC6,V,DELTA,LCOL,ITAG,LNXT,
* DE,NOZE,CE,NSEQ,NODE,VP,RE,NB,NTR,NT,LF,NTND,NW,N5,N9,JW,IT,NODET1
* ,NODET2,YMOD,T,IPN1,NOZE1,BP,ITAG1,ITAG2,G1,P1,TMIN,TMAX,VMIN,VMAX
* ,QMIN,QMAX,GG,Q,BASE,J6,J7,NS,MONI,MM1)

```

```

CALL OBJE(NODET1,NODET2,YMOD,T,DELTA,V,NS,NB,VP1,RE,NODE,ISEND,IRES
* C,HAC6,IT,JW,NT,NTR,J6,J7,MM2)

```

```
ALL SOLVE(NB,NS,CONV,MAXIT,V,DELTA,G,B,NODE,SUS,QMAX,QMIN,PG,PL,Q
,QL,PN,QN,E,VP,JW,CERO,BASE,NT,ISEND,IREC,NBUS,INE,NLE,N5,N9,NTND
LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,X2,MONI) 226
0 TO 50
F(IPER,EG,0) GO TO 900
RITE(JW,670) X2
0 710 I=1,NB
G(I)=PG(I)/BASE
G(I)=QG(I)/BASE
L(I)=PL(I)/BASE
L(I)=QL(I)/BASE
ONTINUE
CON=MONI
ONI=0
RITE(JW,337)
ALL SOLVE(NB,NS,CONV,MAXIT,V,DELTA,G,B,NODE,SUS,QMAX,QMIN,PG,PL,Q
,QL,PN,QN,E,VP,JW,CERO,BASE,NT,ISEND,IREC,NBUS,INE,NLE,N5,N9,NTND
LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,X2,MONI)
ALL PRUEBA(JW,NT,IT,NTR,NODET1,NODET2,ISEND,IREC,Q,T,NODE,NB,ICON
V,BASE,NC0)
0 TO 66
RITE(JW,667) MIFOP
RITE(JW,668)
0 TO 66
ALL EXIT
FORMAT(////,33X,*FLUJO DE POTENCIA: CASO BASE*,/,33X,28(1H-))
FORMAT(////,33X,*FLUJO DE POTENCIA: CASO OPTIMO*,/,33X,30(1H-))
FORMAT(//,20X,*ESCUELA POLITECNICA NACIONAL*,/,20X,28(1H-),//,20X
*FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA*,/,20X,32(1H-),//,20X,*TESIS DE
GRADO*,/,20X,14(1H-),//,20X,*TITULO: MINIMIZACION DE PERDIDAS ACT
IVAS DE TRANSMISION*,/,28X,*MEDIANTE CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA
REACTIVA*,/,28X,*EN SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UN MODELO LIN
AL*,//,20X,*REALIZADO POR: HECTOR A BARRERA FLORES*,/,21X,*DIRIGI
D POR: ING. GABRIEL ARGUELLO RIOS*,//)
FORMAT(20X,*OBJETIVO: MINIMIZAR LAS PERDIDAS ACTIVAS DE TRANSMISIO
*,/,30X,*POR UN CONTROL OPTIMO EN: *,/,30X,*1.- TAPS DE LOS TRANS
FORMADORES*,/,30X,*2.- VOLTAJES DE GENERACION*,/,30X,*3.- FUENTES
REACTIVOS(CAPACITORES,REACTORES SHUNT)*,//,20X,*METODO: PROPUES
POR K.R.C. MAMANDUR Y R.D.CHENOWETH*,//)
R*AT(80A1)
R*AT(/20X,80A1)
R*AT(5I10,3F10.5)
R*AT(20X,28HTIPOS DE BARRA: S FLOTANTE,/,37X,21HT VOLTAJE CON
LADO,/,37X,10HC CARGA )
R*AT(//,20X,*DATOS GENERALES*,/,20X,15(1H-))
R*AT(/,20X,*NO. TOTAL DE BARRAS:*,/16X,I5,//,20X,*NO. DE BARRAS D
ENSIION CONTROLADA:*,/I5,//,20X,*NO. DE LA BARRA FLOTANTE:*,/11X,I
/,20X,*NO. DE LINEAS, CAP/REAC EN SERIE*,/,20X,*Y/O TRANSFORMA
ES:*,/16X,I5,//,20X,*NO. DE CAP/REAC EN PARALELO:*,/8X,I5,//,20X,
A. BASE:*,/24X,F11.3,//,20X,*CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.P.*,/7X,
.5,//,20X,*CRITERIO DE CONVERGENCIA: F.O.P.R.*,/3X,F10.5,//,20X,
TIMO NO. DE ITERACIONES DEL F. P. :*,/5X,I5,//,20X,*MAXIMO NO. D
ITERACIONES DEL F.O.P.R. :*,/2X,I5,//)
R*AT(//,25X,*NO CONVERGE EL F.O.P.R. EN*,/I5,//)
R*AT(//,25X,*PONER EL INDICADOR IPER=1 PARA VER COMO VARIA LAS P
DAS*,/,25X,*1.- SI LAS PERDIDAS AUMENTA, CAMBIAR LOS RANGOS DT
DQ,A VALORES MAS PEQUEÑOS*,/25X,*2.- SI LAS PERDIDAS DISMINUY
OSCILAN, ESCOJA LA CONVERGENCIA PARA F.O.P.R.*,//)
R*AT(//,25X,*X---- PERDIDAS ACTIVAS =*,/F10.5,3X,*-----X*,/)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE BARRAS MENOR QUE 3*)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE BARRAS MAYOR QUE 100*)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE BARRA FLOTANTE > NO. BARRAS 0 < 1*)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE CAP/REAC MAYOR QUE NO. DE BARRAS*)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE CAP/REAC MENOR QUE 0*)
R*AT(10X,*ERROR: NO. DE BTC > NO. BARRAS - 2 n < n*)
```

-----  
 SUBROUTINA INPUT  
 -----

LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS DEL SISTEMA  
 FORMACION DE LA ADMITANCIA DE BARRA

SUBROUTINE INPUT(NB, JR, JW, NS, BASE, DELTA, G, B, SUS, QMAX, QMIN, PG, PL, GG  
 1, QL, NODE, NBUS, CERO, V, E, NE, NT, ISEND, IREC, NLE, INE, IAUXI, NTR, IT, HAC1,  
 \*HAC2, HAC3, NNODET1, NNODET2, YMOD, T, TMIN, TMAX, VMIN, VMAX, Q, YANG, NCO, IPER  
 2)

DIMENSION V(NB), DELTA(NB), G(NLE), B(NLE), NODE(NB), NBUS(NLE)  
 DIMENSION ISEND(NLE), QMAX(NB), QMIN(NB), PG(NB), PL(NB), QG(NB), QL(NB)  
 DIMENSION E(NB), SUS(NLE), IREC(NLE), INE(NLE), IAUXI(NB)  
 DIMENSION YMOD(NLE), YANG(NLE), G(NB), TMIN(20), TMAX(20), VMIN(NB)  
 DIMENSION VMAX(NB), NNODET1(20), NNODET2(20), T(NLE), HAC1(20), HAC2(20)  
 DIMENSION HAC3(20)  
 DO 510 I=1, NB  
 IAUXI(I)=0  
 NBUS(I)=0

LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE BARRA

WRITE(JW, 140)  
 DO 10 N=1, NB  
 READ(JR, 150) K, VK, PGK, QGK, PLK, QLK, QMAXK, QMINK  
 WRITE(JW, 160) K, VK, PGK, QGK, PLK, QLK  
 NER=0  
 IF(K.GT.0.AND.K.LE.NB) GO TO 500  
 NER=NER+1  
 WRITE(JW, 800)  
 CALL EXIT  
 IF(VK.GE.CERO.AND.VK.LT.1.5) GO TO 501  
 NER=NER+1  
 WRITE(JW, 801)  
 CONTINUE  
 NBUS(K)=1  
 V(K)=1.  
 DELTA(K)=0.  
 PG(K)=PGK/BASE  
 QG(K)=QGK/BASE  
 PL(K)=PLK/BASE  
 QL(K)=QLK/BASE  
 NODE(K)=3  
 IF(ABS(VK).LT.0.0001) GO TO 12  
 IF(K.EQ.NS) GO TO 14  
 E(K)=VK  
 QMAX(K)=QMAXK/BASE  
 QMIN(K)=QMINK/BASE  
 NODE(K)=2  
 WRITE(JW, 163)  
 GO TO 10  
 WRITE(JW, 161)  
 GO TO 10  
 V(K)=VK  
 NODE(K)=1  
 WRITE(JW, 162)  
 CONTINUE  
 DO 20 I=1, NB

```

NBUS(I)=0
DO 40 I=1,NLE
ISEND(I)=0
IREC(I)=0
G(I)=0.
B(I)=0.
SUS(I)=0.
CONTINUE

```

LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES  
CAPACITORES Y/O REACTORES

```

WRITE(JW,170)
J=0
JNTR=0
DO 50 NL=1,NE
GL=0.
BL=0.
READ(JR,180) L,M,RR,XX,SS,BK
IAUXI(L)=1
IAUXI(M)=1
IF(BK.LT.0.0001) GO TO 51
BL=(-1./RR)*((BK*BASE)/(SS*XX))
SUSC1=(-1./RR)*((BASE*BK)/(XX*SS))*((BK-SS)/SS)
SUSC2=(-1./RR)*((BASE)/XX)*((SS-BK)/SS)
WRITE(JW,195) NL,L,M,GL,RR,GL,XX,SS,BK
JNTR=JNTR+1
HAC1(JNTR)=L
HAC2(JNTR)=M
HAC3(JNTR)=SS
GO TO 62
IF(L.NE.M) GO TO 52
SUSC1=RR/BASE
SUSC2=RR/BASE
WRITE(JW,196) NL,L,M,GL,GL,GL,GL,GL,RR
Q(L)=RR/BASE
GO TO 62
WRITE(JW,190) NL,L,M,RR,XX,SS
RR=RR/1.0
XX=XX/1.0
SS=SS/1.0
Z=XX*XX+RR*RR
GL=RR/Z
BL=-XX/Z
SUSC1=SS/1.
SUSC2=SS/1.
J=J+1
IF(L.GT.0.AND.L.LE.NB) GO TO 520
NER=NER+1
WRITE(JW,810)
IF(M.GT.0.AND.M.LE.NB) GO TO 521
NER=NER+1
WRITE(JW,821)
CONTINUE
INE(J)=NL
ISEND(J)=L
IREC(J)=M
G(J)=GL
B(J)=BL
SUS(J)=SUSC1
IF(L.NE.M) GO TO 63
NBUS(L)=L
GO TO 50
J=J+1
INE(J)=NL
ISEND(J)=L

```

0(J)=8L  
SUS(J)=SUSC2  
CONTINUE

LECTURA DEL NUMERO DE TRANSFORMADORES Y CAPACITORES O REACTORES  
PARA SER OPTIMIZADOS 229

READ(JR,111) NTR,NCO,IPER  
NR=NB+NTR+NCO

LECTURA DE LOS DATOS DE OPERACION MAXIMA Y MINIMA DEL SISTEMA

```
WRITE(JW,151)
IT=0
NTR=0
DO 153 J1=1,NR
READ(JR,152) L,M,VMINL,VMAXL,QMINL,QMAXL,TMINL,TMAXL
IF(M.NE.0) GO TO 154
IF(VMINL.GT.VMAXL) GO TO 934
IF(QMINL.EQ.0.AND.QMAXL.EQ.0) GO TO 155
IF(QMINL.GT.QMAXL) GO TO 934
VMIN(L)=VMINL
VMAX(L)=VMAXL
QMIN(L)=QMINL/BASE
QMAX(L)=QMAXL/BASE
WRITE(JW,156) L,VMINL,VMAXL,QMINL,QMAXL
GO TO 153
VMIN(L)=VMINL
VMAX(L)=VMAXL
WRITE(JW,157)L,VMINL,VMAXL
GO TO 153
IF(L.NE.M) GO TO 158
IF(QMINL.GT.QMAXL) GO TO 934
IT=IT+1
NODET1(IT)=L
NODET2(IT)=L
TMIN(IT)=QMINL/BASE
TMAX(IT)=QMAXL/BASE
WRITE(JW,159) L,M,QMINL,QMAXL
GO TO 153
IT=IT+1
NTR=NTR+1
NODET1(IT)=L
NODET2(IT)=M
TMIN(IT)=TMINL
TMAX(IT)=TMAXL
IF(TMINL.GT.TMAXL) GO TO 934
WRITE(JW,100) L,M,TMINL,TMAXL
CONTINUE
GO TO 936
WRITE(JW,935)
CALL EXIT
K=J
```

FORMACION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA

```
DO 30 I=1,NB
IF(IAUXI(I).EQ.1) GO TO 530
NER=NER+1
WRITE(JW,830) I
CONTINUE
IF(NBUS(I).EQ.I) GO TO 30
K=K+1
NL=NL+1
INE(K)=NL
ISEND(K)=I
```

```

NTI=K
NTI=NT-1
DO 70 I=1,NTI
  J=I+1
DO 80 L=J,NT
  IF(ISEND(I).LE.ISEND(L)) GO TO 80
  IN=INE(I)
  M=ISEND(I)
  N=IREC(I)
  G1=G(I)
  B1=B(I)
  SUS1=SUS(I)
  INE(I)=INE(L)
  ISEND(I)=ISEND(L)
  IREC(I)=IREC(L)
  G(I)=G(L)
  B(I)=B(L)
  SUS(I)=SUS(L)
  INE(L)=IN
  ISEND(L)=M
  IREC(L)=N
  G(L)=G1
  B(L)=B1
  SUS(L)=SUS1
  CONTINUE
CONTINUE
J=1
DO 81 I=1,NB
  N=0
  G1=0.
  B1=0.
DO 82 L=J,NT
  IF(ISEND(L).NE.I) GO TO 82
  N=N+1
  G1=G1+G(L)
  B1=B1+B(L)+SUS(L)
  G(L)=-G(L)
  B(L)=-B(L)
  IF(ISEND(L).EQ.IREC(L)) M=L
  CONTINUE
  G(M)=G1
  B(M)=B1
  NBUS(I)=N
  J=J+N
  CONTINUE
DO 90 I=1,NTI
  J=I+1
DO 91 K=J,NT
  IF(ISEND(I).NE.ISEND(K)) GO TO 91
  IF(IREC(I).LE.IREC(K)) GO TO 91
  IN=INE(I)
  L=IREC(I)
  G1=G(I)
  B1=B(I)
  SUS1=SUS(I)
  INE(I)=INE(K)
  IREC(I)=IREC(K)
  G(I)=G(K)
  B(I)=B(K)
  SUS(I)=SUS(K)
  INE(K)=IN
  IREC(K)=L
  G(K)=G1
  B(K)=B1
  SUS(K)=SUS1
  CONTINUE

```



```

DO 72 L=1,NT
IF(NODET1(L).EQ.NODET2(L)) GO TO 72
DO 502 L1=1,JNTR
IF(HAC1(L1).EQ.NODET1(L).AND.HAC2(L1).EQ.NODET2(L)) GO TO 74
CONTINUE
WRITE(JW,503)
DO 73 I=1,NT
IF(ISEND(I).EQ.NODET1(L).AND.IREC(I).EQ.NODET2(L)) GO TO 504
CONTINUE
T(I)=HAC3(L1)
CONTINUE
G1=0.
R1=0.

```

IMPRESION DE LA MATRIZ ADMITANCIA DE BARRA

```

DO 83 J=1,NT
L=J+1
G1=G1+G(J)
B1=B1+B(J)
IF(J.EQ.NT) GO TO 86
IF(ISEND(J).EQ.ISEND(L).AND.IREC(J).EQ.IREC(L)) GO TO 83
CUAD=G1**2+B1**2
YMOD(J)=SQRT(CUAD)
IF(G1.NE.0.) GO TO 22
YANG(J)=1.5707963
GO TO 21
DUAC=B1/G1
YANG(J)=ATAN(DUAC)
IF(B1.GT.0.) YANG(J)=3.1415926+YANG(J)
YYY=YANG(J)*180./3.1415926
G1=0.
B1=0.
CONTINUE
RETURN
FOR*AT(2X,*TAPS TRANS*,3X,I3,4X,I3,57X,2F13.5)
FORMAT(3I5)
FORMAT(////20X,15H DATOS DE BARRAS,/20X,15(1H-),//10X,5HBARRA,2X,7
1HTIPO DE,2X,7HVOLTAJE,1X,2(2X,10HPOT ACTIVA,2X,12HPOT REACTIVA),/,
210X,3HNO.,4X,5HBARRA,4X,8HMAGNITUD,2(2X,10HGENERACION),4X,5HCARGA,
37X,5HCARGA,/)
FORMAT(I10,7F10.5)
FOR*AT(////20X,*LIMITE DE OPERACION DEL SISTEMA*,/20X,31(1H-),//16
*X,*BAR P*,2X,*BAR G*,8X,*V.MIN*,8X,*V.MAX*,8X,*Q.MIN*,8X,*Q.MAX*,8
*X,*T.MIN*,8X,*T.MAX*,/)
FORMAT(2I5,6F10.5)
FOR*AT(2X,*BAR GENER*,3X,I3,12X,4F13.5)
FOR*AT(2X,*BAR CARGA*,3X,I3,12X,2F13.5)
FOR*AT(2X,*FUENTE VAR*,3X,I3,4X,I3,31X,2F13.5)
FOR*AT(10X,I3,10X,2(1X,F10.5),2X,F10.5,2X,2(2X,F10.5),2(5X,F10.5))
FOR*AT(1H+,19X,*C*)
FOR*AT(1H+,19X,*S*)
FOR*AT(1H+,19X,*T*)
FOR*AT(////,20X,*DATOS DE LINEAS, TRANSFORMADORES (P.U.) Y/O CAP/
1REACTORES (P.U.-MVAR)*,/,20X,69(1H-),//,10X,*NO.*,3X,*BAR P*,2X,*B
2AR Q*,4X,*RESISTEN*,3X,*REACTANC*,2X,*SUSCEPTAN*,2X,*MVA T*,3X,*TA
3P P*,3X,*TAP Q*,3X,*CAP/REAC(DISPONIBLE)*,/)
FORMAT(2I10,4F10.5)
FOR*AT(9X,I3,2(4X,I3),2X,3(F11.5))
FOR*AT(9X,I3,2(4X,I3),2X,3(2X,F9.5),1X,F7.2,2(1X,F7.4))
FOR*AT(9X,I3,2(4X,I3),2X,3(2X,F9.5),1X,3(1X,F7.4),1X,F9.3)
FOR*AT(10X,*ERROR: EN EL NUMERO O EN LA POSICION DE LAS BARRAS DE
1LOS TRANSFORMADORES*)
FOR*AT(10X,*ERROR: NO. DE BARRA > NO. DE BARRAS O < 1*)
FOR*AT(10X,*ERROR: VOLTAJE ESPECIFICADO < 0. O >> 1*)
FOR*AT(10X,*ERROR: NO EXISTE DATOS DE BARRA*,I4)

```

-----  
 SUBROUTINA SOLVE  
 -----

RESULEVE LOS FLUJOS DE CARGA POR EL METODO DE  
 NEWTON RAPHSON DESACOPLADO

```

SUBROUTINE SOLVE(NB,NS,CONV,MAXIT,V,DELTA,G,B,NODE,SUS,QMAX,QMIN,P
G,PL,QG,QL,PN,QN,E,VP,JW,CERO,BASE,NT,ISEND,IREC,NBUS,INE,NLE,N5,N
9,NTND,LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,X2,MONI)
REAL ITER
DIMENSION V(NB),DELTA(NB),G(NLE),B(NLE),NODE(NB),NBUS(NLE)
DIMENSION QMAX(NB),QMIN(NB),PG(NB),PL(NB),QG(NB),QL(NB),PN(NB)
DIMENSION GN(NB),VP(N9),E(NB),SUS(NLE),ISEND(NLE),IREC(NLE)
DIMENSION INE(NLE),LCOL(N9),NOZE(N9),DE(N9),ITAG(N5),NSEQ(N9)
DIMENSION ITAG1(N5),ITAG2(N5),LNXT(N5),CE(N5),RE(N5)
JW=NB-1
    
```

CALCULO DE LA POTENCIA NETA ESPECIFICADA

```

DO 5 I=1,NB
IF(I.EQ.NS) GO TO 5
PN(I)=PG(I)-PL(I)
IF(NODE(I).EQ.2) GO TO 5
QN(I)=QG(I)-QL(I)
CONTINUE
ITER=0.
NDC=0
ND=0
P=1
Q=1
=0
=0
    
```

CALCULO DE LA VARIACION DE POTENCIA ACTIVA  
 CALCULO DE LA VARIACION DE POTENCIA REACTIVA

```

) 10 I=1,NB
(I.EQ.NS) J=J+NBUS(I)
(I.EQ.NS) GO TO 10
L+1
=0.
NBUS(I)
11 M=1,N
J+1
IREC(J)
=C1+V(K)*(G(J)*COS(DELTA(I)-DELTA(K))+B(J)*SIN(DELTA(I)-DELTA(K)
)
CONTINUE
V(I)*C1
L)=PN(I)-P
L.EQ.1) GO TO 13
ABS(VP(L))-VPMAX)10,10,13
AX=ABS(VP(L))
CONTINUE
VPMAX.LE.CONV) GO TO 110
ITER.GE.MAXIT) GO TO 190
    
```

L ENCERO(N5,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,LF)

```

NCN=0
DO 20 I=1,NB
LLL=0
MC=0
IF(I.EQ.NS) J=J+NBUS(I)
IF(I.EQ.NS) GO TO 20
L=L+1
LCOL(L)=LL
NNN=0
HII=0.
N=NBUS(I)
DO 21 MM=1,N
J=J+1
K=IREC(J)
IF(K.EQ.NS) GO TO 25
M=K
IF(LLL.NE.M) NNN=NNN+1
LLL=M
IF(K.EQ.I) GO TO 21
HIK=V(I)*V(K)*(G(J)*SIN(DELTA(I)-DELTA(K))-B(J)*COS(DELTA(I)-DELTA
1(K)))
HII=HII+HIK
IF(K.GT.NS) M=M-1
IF(K.EQ.NS) GO TO 21
IF(MC.NE.M) NCN=NCN+1
MC=M
ITAG(NCN)=M
ITAG1(NCN)=L
ITAG2(NCN)=M
LNXT(NCN)=NCN+1
RE(NCN)=HIK+RE(NCN)
CE(NCN)=HIK+CE(NCN)
CONTINUE
LL=LL+NNN-1
LF=NCN+1
NOZE(L)=NNN
LNXT(NCN)=0
NSEQ(L)=L
DE(L)=-HII
CONTINUE

```

#### CALCULO DE LAS CORRECCIONES DE ANGULO

```

CALL ORDEM(LF,ITAG1,ITAG2,CE,N5)
CALL SIMORD(NW,LF,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,JW,NSEQ,NTND)
CALL REDUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,NSEQ)
CALL SOLUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,VP,N5,N9,NSEQ)
L=0

```

#### CORRECCION DE ANGULOS

```

DO 50 I=1,NB
IF(I.EQ.NS) GO TO 50
L=L+1
DELTA(I)=DELTA(I)+VP(L)
CONTINUE
ITER=ITER+0.5
KQ=1
J=0
M=0
L=0

```

#### CALCULO DEL SUBJACOBIANO L

```

DO 60 I=1,NB
IF(I.EQ.NS) J=J+NBUS(I)

```

```

C1=0.
HII=0.
N=NPUS(I)
DO 61 MM=1,N
J=J+1
K=IREC(J)
HIK=V(I)*V(K)*(G(J)*SIN(DELTA(I)-DELTA(K))-B(J)*COS(DELTA(I)-DELTA
1(K)))
HII=HII+HIK
C1=C1+V(K)*(G(J)*SIN(DELTA(K))+B(J)*COS(DELTA(K)))
CONTINUE
IF(NODE(I).NE.2) GO TO 69
QN(I)=HII
VP(L)=E(I)**2-V(I)**2
GO TO 60
VP(L)=(PN(I)*SIN(DELTA(I))-QN(I)*COS(DELTA(I)))/V(I)-C1
M=M+1
VQ=QN(I)-HII
IF(M.EQ.1) GO TO 63
IF(ABS(VQ)-VQMAX)60,60,63
VQMAX=ABS(VQ)
CONTINUE
IF(VQMAX.LE.CONV) GO TO 112
IF(ITER.GE.MAXIT) GO TO 190
CALL ENCERO(N5,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,LF)
J=0
L=0
LL=1
NCN=0
DO 70 I=1,NB
LLL=0
IF(I.EQ.NS) J=J+NBUS(I)
IF(I.EQ.NS) GO TO 70
L=L+1
LCOL(L)=LL
NNN=0
N=NBUS(I)
DO 71 MM=1,N
J=J+1
K=IREC(J)
IF(K.EQ.NS) GO TO 71
M=K
IF(K.GT.NS) M=M-1
IF(LLL.NE.M) NNN=NNN+1
IF(LLL.NE.M) NCN=NCN+1
LLL=M
IF(K.EQ.I) GO TO 72
RE(NCN)=RE(NCN)+G(J)*SIN(DELTA(K))+B(J)*COS(DELTA(K))
CE(NCN)=RE(NCN)
ITAG(NCN)=M
ITAG1(NCN)=L
ITAG2(NCN)=M
LNXT(NCN)=NCN+1
IF(NODE(I).NE.2) GO TO 71
RE(NCN)=0.
CE(NCN)=0.
GO TO 71
JJ=J
NCN=NCN-1
CONTINUE
LL=LL+NNN-1
NOZE(L)=NNN
LF=NCN+1
LNXT(NCN)=0
NSEQ(L)=L
DE(L)=G(JJ)*SIN(DELTA(I))+B(JJ)*COS(DELTA(I))+PN(I)*SIN(DELTA(I))

```

```
CALL ORDEM(LF,ITAG1,ITAG2,CE,N5)
CALL SIMORD(NW,LF,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,JW,NSEQ,NTND)
CALL REDUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,NSEQ)
CALL SOLUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,VP,N5,N9,NSEQ)
L=0
```

CORRECCION DE VOLTAJES

```
DO 100 I=1,NB
IF(I.EQ.NS) GO TO 100
L=L+1
V(I)=V(I)+VP(L)
CONTINUE
ITER=ITER+0.5
KP=1
GO TO 8
KP=0
IF(KQ.EQ.0) GO TO 120
GO TO 59
KQ=0
IF(KP.EQ.0) GO TO 120
GO TO 8
IF(INDC.GE.2) GO TO 159
```

PRUEBA DE VIOLACION DE MAXIMA Y MINIMA GENERACION DE REACTIVOS

```
DO 64 I=1,NB
IF(NODE(I).NE.2) GO TO 64
QNE=QMAX(I)-QL(I)
IF(QN(I).LE.QNE) GO TO 66
QG(I)=QMAX(I)
QN(I)=QNE
NODE(I)=4
IND=1
GO TO 64
QNE=QMIN(I)-QL(I)
IF(QN(I).GE.QNE) GO TO 64
QN(I)=QNE
QG(I)=QMIN(I)
NODE(I)=5
IND=1
CONTINUE
IF(IND.EQ.1) INDC=INDC+1
IF(IND.EQ.1) GO TO 7
```

CALCULO DE FLUJOS DE CARGA, PERDIDAS Y POTENCIA EN LA BARRA FLOTANTE

```
DO 165 I=1,NB
IF(I.EQ.NS) GO TO 165
IF(NODE(I).NE.2) GO TO 166
QG(I)=QN(I)+QL(I)
PG(I)=PG(I)*BASE
QG(I)=QG(I)*BASE
PL(I)=PL(I)*BASE
QL(I)=QL(I)*BASE
CONTINUE
SUMPP=0.
SUMPQ=0.
TPG=0.
TQG=0.
TPL=0.
```

```

PG(NS)=PL(NS)
QG(NS)=QL(NS)
IF(MONI.NE.0) GO TO 37
WRITE(JW,405)
J=0
INDC=0
IND=2
DO 170 I=1,NB
N=NRUS(I)
DO 171 M=1,N
J=J+1
K=IREC(J)
FPJ=(-(G(J)*V(I)**2)+V(I)*V(K)*(G(J)*COS(DELTA(I)-DELTA(K))+B(J)*S
1IN(DELTA(I)-DELTA(K))))*BASE
FQJ=((B(J)-SUS(J))*V(I)**2-V(I)*V(K)*(B(J)*COS(DELTA(I)-DELTA(K))-
1G(J)*SIN(DELTA(I)-DELTA(K))))*BASE
IF(K.EQ.I) FQII=-FQJ
DO 172 L=1,NT
IF(INE(L).NE.INE(J)) GO TO 172
IF(L.EQ.J) GO TO 172
FPL=(-(G(L)*V(K)**2)+V(I)*V(K)*(G(L)*COS(DELTA(K)-DELTA(I))+B(L)*S
1IN(DELTA(K)-DELTA(I))))*BASE
FQL=((B(L)-SUS(L))*V(K)**2-V(I)*V(K)*(B(L)*COS(DELTA(K)-DELTA(I))-
1G(L)*SIN(DELTA(K)-DELTA(I))))*BASE
CONTINUE
IF(K.EQ.I) GO TO 180
PP=FPJ+FPL
PQ=FQJ+FQL
SUMPP=SUMPP+PP/2.
SUMPQ=SUMPQ+PQ/2.
IF(MONI.NE.0) GO TO 38
WRITE(JW,402)I,K,FPJ,FQJ,PP,PQ
CONTINUE
IF(I.NE.NS) GO TO 171
PG(I)=PG(I)+FPJ
QG(I)=QG(I)+FQJ
CONTINUE
VBASEV=V(I)
DELTA=DELTA(I)*180./3.14159265
IF(MONI.NE.0) GO TO 170
NO=NODE(I)
GO TO (174,175,176,177,179),NO
WRITE(JW,406)
GO TO 178
WRITE(JW,407)
GO TO 178
WRITE(JW,408)
GO TO 178
WRITE(JW,409)
IND=1
GO TO 178
WRITE(JW,501)
INDC=1
WRITE(JW,401)I,VBASEV,DELTA,PG(I),QG(I),PL(I),QL(I),FQII
TPG=TPG+PG(I)
TQG=TQG+QG(I)
TPL=TPL+PL(I)
TQL=TQL+QL(I)
TFQ=TFQ+FQII
CONTINUE
X2=SUMPP
IF(MONI.NE.0) GO TO 200
WRITE(JW,403)TPG,TQG,TFQ,TPL,TQL,SUMPP,SUMPQ
IF(IND.NE.1) GO TO 192
WRITE(JW,500)

```

```

WRITE(JW,400) MAXIT
RETURN
FORMAT(////,20X,2HEN,I6,32H ITERACIONES NO HAY CONVERGENCIA,///)
FORMAT(5X,I3,1X,F7.4,1X,F9.3,2(2X,F8.3,1X,F8.3),1X,F8.3,2X,44(' '))
1,/)
FORMAT(73X,I3,1X,I3,2(2X,F8.3,1X,F8.3))
FORMAT(//,48X,2HMW,8X,4HMVAR,/,20X,17HTOTAL GENERACION:,7X,F9.3,1X
1,F9.3,/,20X,21HTOTAL MVAR CAP/REAC: ,13X,F9.3,/,20X,12HTOTAL CARGA
2:,12X,F9.3,1X,F9.3,/,20X,15HTOTAL PERDIDAS:,9X,F9.3,1X,F9.3)
FORMAT(////,20X,10HRESULTADOS,/,20X,10(1H-),////,7X,3HBAR,5X,7HVO
1LTAJE,8X,10HGENERACION,12X,5HCARGA,7X,8HCAP/REAC,2X,2HDE,2X,1HA,4X
2,16HFLUJOS EN LINEAS,3X,18HPERDIDAS EN LINEAS,/,7X,3HNO.,4X,2HPU,3
3X,6HGRADOS,5X,2HMW,6X,4HMVAR,7X,2HMW,6X,4HMVAR,5X,4HMVAR,4X,3HBAR,
41X,3HBAR,4X,2HMW,6X,4HMVAR,7X,2HMW,6X,4HMVAR,/)
FORMAT(1H+,3X,1HS)
FORMAT(1H+,3X,1HT)
FORMAT(1H+,3X,1HC)
FORMAT(1H+,2X,2HLS)
FORMAT(//,10X,'LS.- BTC TRANSFORMADA EN BARRA DE CARGA DEBIDO A LA
1 VIOLACION DEL LIMITE DE MAXIMA GENERACION DE POTENCIA REACTIVA',/
2/)
FORMAT(1H+,2X,2HLI)
FORMAT(//,10X,'LI.- BTC TRANSFORMADA EN BARRA DE CARGA DEBIDO A LA
1 VIOLACION DEL LIMITE DE MINIMA GENERACION DE POTENCIA REACTIVA',/
2/)
END

```

```

-----
SUBROUTINA ENCERO
-----

```

```

SUBROUTINE ENCERO(N5,ITAG,ITAG1,ITAG2,LNXT,CE,RE,LF)
DIMENSION ITAG(N5),ITAG1(N5),ITAG2(N5),LNXT(N5),CE(N5),RE(N5)

```

```

SUBROUTINA DE ENCERAMIENTO

```

```

DO 10 I=1,N5
ITAG(I)=0
ITAG1(I)=0
ITAG2(I)=0
CE(I)=0.
RE(I)=0.
LNXT(I)=I+1
CONTINUE
LNXT(N5)=0
RETURN
END

```

```

-----
SUBROUTINA ORDEN
-----

```

```

SUBROUTINE ORDEN(LF,ITAG1,ITAG2,CE,N5)
DIMENSION ITAG1(N5),ITAG2(N5),CE(N5)

```

```

SUBROUTINA DE ORDENAMIENTO

```

```

LFI=LF-1
LFII=LF-2
DO 11 I=1,LFII
J=I+1

```

```

N=ITAG2(I)
CEE=CE(I)
ITAG2(I)=ITAG2(L)
ITAG1(I)=ITAG1(L)
CE(I)=CE(L)
ITAG2(L)=M
ITAG1(L)=N
CE(L)=CEE
CONTINUE
CONTINUE
DO 21 I=1,LFII
J=I+1
DO 20 L=J,LFI
IF(ITAG2(I).NE.ITAG2(L)) GO TO 20
IF(ITAG1(I).LE.ITAG1(L)) GO TO 20
M=ITAG1(I)
CEE=CE(I)
ITAG1(I)=ITAG1(L)
CE(I)=CE(L)
ITAG1(L)=M
CE(L)=CEE
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END

```

```

-----
SUBROUTINA SIMORD
-----

```

```

SUBROUTINE SIMORD(N,LF,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,JW,NSEQ,
1NTND)
DIMENSION LCOL(N9),NOZE(N9),DE(N9),ITAG(N5),LNXT(N5),CE(N5),RE(N5)
DIMENSION NSEQ(N9)

```

SUBROUTINA DE SIMULACION Y REORDENAMIENTO

```

NI=N-1
IND=0
DO 38 J=1,NI
IF(IND.GE.1) GO TO 38
K=NSEQ(J)
MIN=NOZE(K)
M=J
JS=J+1
DO 10 I=JS,N
K=NSEQ(I)
IF(NOZE(K).GE.MIN) GO TO 10
MIN=NOZE(K)
M=I
CONTINUE
KP=NSEQ(M)
NSEQ(M)=NSEQ(J)
NSEQ(J)=KP
LK=LCOL(KP)
IF(LK.LE.0) GO TO 38
K=ITAG(LK)
LA=0
LI=LCOL(KP)
IP=ITAG(LI)
L=LCOL(K)
I=ITAG(L)
IF(I-IP) 13,24,31

```



```

IF(L)16,16,19
IF(LI)17,17,18
LK=LNXT(LK)
GO TO 11
I=N+1
GO TO 12
I=ITAG(L)
GO TO 12
LN=LNXT(L)
IF(LA)21,21,22
LCOL(K)=LN
GO TO 23
LNXT(LA)=LN
LNXT(L)=LF
LF=L
CE(L)=0.
RE(L)=0.
NOZE(K)=NOZE(K)-1
L=LN
GO TO 15
LA=L
L=LNXT(L)
IF(L)25,25,26
I=N+1
GO TO 27
I=ITAG(L)
LI=LNXT(LI)
IF(LI)28,28,30
IF(L)17,17,29
IP=N+1
GO TO 12
IP=ITAG(LI)
GO TO 12
IF(IP-K)32,27,32
IF(LF)33,33,34
WRITE(JW,100)
IND=1
CALL EXIT
LN=LF
IF(LA)35,35,36
LCOL(K)=LN
GO TO 37
LNXT(LA)=LN
LF=LNXT(LN)
LNXT(LN)=L
ITAG(LN)=IP
NOZE(K)=NOZE(K)+1
LA=LN
GO TO 27
CONTINUE
RETURN
FORMAT(/,10X,'FALTA CAMPO')
END

```

```

-----
SUBROUTINA REDUC
-----

```

```

SUBROUTINE REDUC(N,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,NSEQ)
DIMENSION LCOL(N9),NOZE(N9),DE(N9),ITAG(N5),LNXT(N5),CE(N5),RE(N5)
DIMENSION NSEQ(N9)

```

```

SUBROUTINA DE REDUCCION

```

```

D=1.70E(KP)
DE(KP)=D
LK=LCOL(KP)
IF(LK.LE.0) GO TO 24
RE(LK)=D*RE(LK)
LK=LNXT(LK)
IF(LK.GT.0) GO TO 10
LK=LCOL(KP)
K=ITAG(LK)
CF=RE(LK)
RF=CE(LK)
LI=LCOL(KP)
IP=ITAG(LI)
L=LCOL(K)
IF(L)13,13,14
I=N+1
GO TO 15
I=ITAG(L)
IF(I-IP)16,17,23
L=LNXT(L)
GO TO 12
CE(L)=CE(L)-CF*CE(LI)
RE(L)=RE(L)-RF*RE(LI)
L=LNXT(L)
IF(L)18,18,19
I=N+1
GO TO 20
I=ITAG(L)
LI=LNXT(LI)
IF(LI)21,21,22
LK=LNXT(LK)
IF(LK)24,24,11
IP=ITAG(LI)
GO TO 15
IF(IP.NE.K) GO TO 20
DE(K)=DE(K)-CF*CE(LI)
GO TO 20
CONTINUE
RETURN
END

```

```

-----
SUBROUTINA SOLUC
-----

```

```

SUBROUTINE SOLUC(N,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,VP,N5,N9,NSEQ)
DIMENSION LCOL(N9),NOZE(N9),DE(N9),ITAG(N5),LNXT(N5),CE(N5),RE(N5)
DIMENSION VP(N9),NSEQ(N9)

```

```

SUBROUTINA DE RESOLUCION

```

```

DO 11 J=1,N
K=NSEQ(J)
CF=DE(K)*VP(K)
VP(K)=CF
L=LCOL(K)
IF(L.LE.0) GO TO 11
I=ITAG(L)
VP(I)=VP(I)-CE(L)*CF
L=LNXT(L)
GO TO 10
CONTINUE
NI=N-1
DO 15 NN=1,NI

```

```

L=LCO(L)
IF(L)13,13,14
VP(K)=SUM
GO TO 15
I=ITAG(L)
SUM=SUM-RE(L)*VP(I)
L=LNXT(L)
GO TO 12
CONTINUE
RETURN
END

```

```

-----
SUBROUTINA JACOB
-----

```

SUBROUTINA PARA EL CALCULO DEL JACOBIANO DEL SISTEMA

```

SUBROUTINE JACOB(NB,NT,V,DELTA,JW,ISEND,IREF,HAC1,HAC2,HAC3,HAC4,H
*APD,HAPV,HAC5,HAC6,YMOD,YANG)
DIMENSION V(NB),DELTA(NB),ISEND(NT),IREF(NT)
DIMENSION HAC1(NT),HAC2(NT),HAC3(NT),HAC4(NT),HAC5(NT)
DIMENSION YMOD(NT),YANG(NT),HAPD(NB),HAPV(NB),HAC6(NT)

```

CALCULO DEL JACOBIANO EN FORMA DE VECTOR Y EN COORDENADAS POLARES

```

DO 10 I=1,NT
HAC1(I)=0.
HAC2(I)=0.
HAC3(I)=0.
HAC4(I)=0.
HAC5(I)=0.
HAC6(I)=0.
CONTINUE
NBX=1

```

PROCESO ITERATIVO PARA CALCULAR SUBJACOBIANOS H - M - N - L

```

DO 75 J=1,NT
IF(J.EQ.NT) GO TO 20
IF(ISEND(J).GT.NBX) GO TO 30
IF(ISEND(J).EQ.IREF(J)) GO TO 45
JJ=J
IR=IREF(JJ)
IS=ISEND(JJ)
HAC1(JJ)=V(IS)*V(IR)*YMOD(JJ)*SIN(-YANG(JJ)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
HAC3(JJ)=-V(IS)*V(IR)*YMOD(JJ)*COS(-YANG(JJ)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
HAC2(JJ)=V(IS)*V(IR)*YMOD(JJ)*COS(-YANG(JJ)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
HAC4(JJ)=V(IS)*V(IR)*YMOD(JJ)*SIN(-YANG(JJ)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
HAC5(JJ)=HAC2(JJ)/V(IR)
HAC6(JJ)=HAC4(JJ)/V(IR)
GO TO 75
AUX=J
DO 60 L=1,NT
IF(ISEND(JAUX).EQ.ISEND(L).AND.ISEND(JAUX).NE.IREF(L)) GO TO 25
GO TO 60

```

CALCULO DE LOS ELEMENTOS DIAGONALES DE SUBJACOBIANOS H - N

```

HAC1(JAUX)=HAC1(JAUX)-HAC1(L)
HAC3(JAUX)=HAC3(JAUX)-HAC3(L)
CONTINUE

```

IS=ISEND(J)

CALCULOS DE LOS ELEMENTOS DE SUJACOBIANOS M - L

242

```
HAC2(J)=2*V(IS)*YMGD(J)*COS(-YANG(J))
HAC4(J)=2*V(IS)*YMOD(J)*SIN(-YANG(J))
DO 55 K=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.ISEND(K).AND.ISEND(J).NE.IREC(K)) GO TO 50
GO TO 55
IR=IREC(K)
HAC2(J)=HAC2(J)+V(IR)*YMOD(K)*COS(-YANG(K)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
HAC4(J)=HAC4(J)+V(IR)*YMOD(K)*SIN(-YANG(K)+DELTA(IS)-DELTA(IR))
CONTINUE
HAC5(J)=HAC2(J)
HAC6(J)=HAC4(J)
HAC2(J)=HAC2(J)*V(IS)
HAC4(J)=HAC4(J)*V(IS)
GO TO 75
DO 40 L=1,NT
IF(ISEND(JAUX).EQ.ISEND(L).AND.ISEND(JAUX).NE.IREC(L)) GO TO 35
GO TO 40
HAC1(JAUX)=HAC1(JAUX)-HAC1(L)
HAC3(JAUX)=HAC3(JAUX)-HAC3(L)
CONTINUE
NBX=NBX+1
GO TO 15
CONTINUE
```

CALCULO DE LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RELACION A LAS VARIACIONES DE ANGULOS Y VOLTAJES

```
DO 28 J=1,NB
XX1=0.
XX2=0.
DO 26 L=1,NT
IF(J.NE.IREC(L)) GO TO 26
XX1=XX1+HAC1(L)
XX2=XX2+HAC2(L)
CONTINUE
HAPD(J)=XX1
HAPV(J)=XX2
CONTINUE
RETURN
END
```

-----  
SUBROUTINA PERDI  
-----

SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RELACION A LA INYECCION DE LA POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LAS BARRAS DEL SISTEMA, EXCEPTO EN LA BARRA OSCILANTE.

```
SUBROUTINE PERDI(NT,NB,N5,N9,ISEND,IREC,LCOL,NOZE,DE,NSEQ,ITAG,LNX
*T,CE,RE,LF,HAPD,HAPV,HAC1,HAC2,HAC3,HAC4,VP1,NW,NTND,LL2,JW,NS,MM2
*)
DIMENSION ISEND(NT),LCOL(N9),DE(N9),ITAG(N5),LNXT(N5),CE(N5)
DIMENSION NOZE(N9),RE(N5),IREC(NT),NSEQ(N9),LL2(N9),HAC1(NT)
DIMENSION VP1(MM2),HAPD(NB),HAPV(NB),HAC2(NT),HAC3(NT),HAC4(NT)
```

ALMACENA EL JACOBIANO EN LOS VECTORES QUE SE UTILIZA EN EL PROCESO DE LA BI-FACTORIZACION.

```

L2=0
L3=1
NN=0
DO 10 J=1,NT
IF (ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 10
IS2=ISEND(J)
IF (ISEND(J).EQ.IREC(J)) GO TO 11
IF (IS1.NE.IS2) GO TO 12
GO TO 13
LCOL(L1)=L3
NOZE(L1)=2*NN
LL2(L1)=L2
L2=NN+L2
L3=L3+2*NN-1
NN=0
L2=L2+1
CE(L2)=HAC1(J)
LNXT(L2)=L2+1
IF (IREC(J).GT.NS) GO TO 14
ITAG(L2)=IREC(J)
GO TO 15
ITAG(L2)=IREC(J)-1
GO TO 15
IF (L1.EQ.0) GO TO 70
IF (IS1.EQ.IS2) GO TO 70
LCOL(L1)=L3
NOZE(L1)=2*NN
LL2(L1)=L2
L2=NN+L2
L3=L3+2*NN-1
NN=0
GO TO 70
L1=L1+1
DE(L1)=HAC1(J)
NSEQ(L1)=L1
NN=NN+1
IS1=ISEND(J)
CONTINUE
NOZE(L1)=2*NN
LCOL(L1)=L3
LL2(L1)=L2
J1=1
IS1=0
L3=L3+2*NN-1
DO 16 J=1,NT
IF (ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 16
IS2=ISEND(J)
IF (IS1.EQ.0) GO TO 17
L2=L2+1
IF (IS1.NE.IS2) GO TO 18
GO TO 19
LNXT(L2-1)=0
J1=J1+1
L2=LL2(J1)+1
GO TO 19
L2=LL2(J1)+1
CE(L2)=HAC2(J)
LNXT(L2)=L2+1
IF (IREC(J).GT.NS) GO TO 20
ITAG(L2)=IREC(J)+NB-1
GO TO 21
ITAG(L2)=IREC(J)+NB-2
IS1=ISEND(J)
CONTINUE
LNXT(L2)=0
NN=0

```

IF (ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 22

IS2=ISEND(J)

IF (IS1.EQ.0) GO TO 23

244

L2=L2+1

IF (IS1.NE.IS2) GO TO 24

GO TO 25

J1=J1+1

LL2(J1)=L2-1

L2=L2+NN-1

NN=0

GO TO 25

L2=L2+1

CE(L2)=HAC3(J)

LNXT(L2)=L2+1

IF (IREC(J).GT.NS) GO TO 26

ITAG(L2)=IREC(J)

GO TO 27

ITAG(L2)=IREC(J)-1

IS1=ISEND(J)

NN=NN+1

CONTINUE

LL2(J1+1)=L2

NN=0

J1=1

L2=LL2(J1)

DO 29 J=1,NT

IF (ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 29

IS2=ISEND(J)

IF (ISEND(J).EQ.IREC(J)) GO TO 30

IF (IS1.NE.IS2) GO TO 31

GO TO 32

J1=J1+1

LCOL(L1)=L3

L3=L3+2\*NN-1

LNXT(L2)=0

L2=LL2(J1)

NOZE(L1)=2\*NN

NN=0

L2=L2+1

CE(L2)=HAC4(J)

LNXT(L2)=L2+1

IF (IREC(J).GT.NS) GO TO 33

ITAG(L2)=IREC(J)+NB-1

GO TO 34

ITAG(L2)=IREC(J)+NB-2

GO TO 34

IF (NN.EQ.0) GO TO 80

IF (IS1.EQ.IS2) GO TO 80

J1=J1+1

LCOL(L1)=L3

L3=L3+2\*NN-1

LNXT(L2)=0

L2=LL2(J1)

NOZE(L1)=2\*NN

NN=0

GO TO 80

L1=L1+1

DE(L1)=HAC4(J)

NSEQ(L1)=L1

IS1=ISEND(J)

NN=NN+1

CONTINUE

LCOL(L1)=L3

NOZE(L1)=2\*NN

LNXT(L2)=0

```

RE(J)=0
LNXT(J)=J+1
CONTINUE
LNXT(J)=0
L2=0
DO 35 J1=1,NB
IF(J1.EQ.NS) GO TO 35
DO 36 J=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 36
IF(ISEND(J).EQ.IREC(J).OR.IREC(J).NE.J1) GO TO 36
L2=L2+1
RE(L2)=HAC1(J)
CONTINUE
DO 37 J=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.NS.OR.IREC(J).EQ.NS) GO TO 37
IF(IREC(J).NE.J1) GO TO 37
L2=L2+1
RE(L2)=HAC3(J)
CONTINUE
CONTINUE
DO 38 J1=1,NB
IF(J1.EQ.NS) GO TO 38
DO 39 J=1,NT
IF(IREC(J).EQ.NS.OR.ISEND(J).EQ.NS) GO TO 39
IF(IREC(J).NE.J1) GO TO 39
L2=L2+1
RE(L2)=HAC2(J)
CONTINUE
DO 40 J=1,NT
IF(IREC(J).EQ.NS.OR.ISEND(J).EQ.NS) GO TO 40
IF(ISEND(J).EQ.IREC(J).OR.IREC(J).NE.J1) GO TO 40
L2=L2+1
RE(L2)=HAC4(J)
CONTINUE
CONTINUE
J1=0

```

#### FORMACION DEL VECTOR INDEPENDIENTE

```

DO 41 J=1,NB
IF(J.EQ.NS) GO TO 41
J1=J1+1
P1(J1)=HAPD(J)
CONTINUE
DO 42 J=1,NB
IF(J.EQ.NS) GO TO 42
J1=J1+1
P1(J1)=HAPV(J)
CONTINUE

```

SOLUCION DIRECTA DE LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS EMPLEANDO  
EL METODO DE BI-FACTORIZACION  
VP1 VECTOR SOLUCION

```

J=NB*2-2
CALL SIMORD(NW,LF,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,JW,NSEQ,NTND)
CALL REDUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,NSEQ)
CALL SOLUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,VP1,N5,N9,NSEQ)
TURN
D

```

-----  
SUBROUTINA RESTRI  
-----

```
SUBROUTINE RESTRI(ISEND,IREC,HAC1,HAC3,HAC5,HAC6,V,DELTA,LCOL,ITAG  
*,LNXT,DE,NOZE,CE,NSEQ,NODE,VP,RE,NB,NTR,NT,LF,NTND,NW,NS,N9,JW,IT,  
*NODET1,NODET2,YMOD,T,IBN1,NOZE1,BP,ITAG1,ITAG2,G1,B1,TMIN,TMAX,VMI  
*N,VMAX,QMIN,QMAX,GG,Q,BASE,J6,J7,NS,MONI,MM1)  
DIMENSION ISEND(NT),IREC(NT),HAC1(NT),HAC3(NT),HAC5(NT),HAC6(NT)  
DIMENSION V(NB),DELTA(NB),LCOL(N9),ITAG(N5),LNXT(N5),DE(N9)  
DIMENSION NOZE(N9),CE(N5),NSEQ(N9),NODE(NB),B1(N5)  
DIMENSION RE(N5),T(NT),YMOD(NT)  
DIMENSION NODET1(IT),NODET2(IT),VP(N9),Z(250,100)  
DIMENSION IBN1(N9),NOZE1(N9),BP(N9),ITAG1(N5),ITAG2(N5),G1(N5)  
DIMENSION TMIN(IT),TMAX(IT),VMIN(NB),VMAX(NB),QMIN(NB)  
DIMENSION QMAX(NB),QG(NB),Q(NB)  
COMMON Z  
NW=2*NB+NTR
```

FORMACION DE LAS ECUACIONES DE FLUJOS DE CARGA DE NEWTON RAPHSON  
AUMENTADO POR LAS ECUACIONES DE LA INYECCION DE ENERGIA EN LA  
BARRA OSCILANTE Y POR LA ECUACION DEL FLUJO DE ENERGIA DE LOS  
TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS

```
DO 10 J=1,NW  
DO 11 I=1,NW  
Z(J,I)=0.  
CONTINUE  
CONTINUE  
DO 12 J=1,NT  
J1=ISEND(J)  
J2=IREC(J)  
Z(J1,J2)=HAC1(J)  
J3=NB+NTR+IREC(J)  
Z(J1,J3)=HAC5(J)  
J4=NB+NTR+ISEND(J)  
Z(J4,J2)=HAC3(J)  
Z(J4,J3)=HAC6(J)  
CONTINUE  
IF(NTR.NE.0) GO TO 200  
L=0  
DO 201 I=1,NW  
IF(I.EQ.NS) GO TO 201  
L=L+1  
M=0  
DO 202 J=1,NW  
IF(J.EQ.NS) GO TO 202  
M=M+1  
Z(L,M)=Z(I,J)  
CONTINUE  
CONTINUE  
NW=NW-1  
GO TO 1000  
J5=0  
DO 13 J=1,IT  
IF(NODET1(J).EQ.NODET2(J)) GO TO 13  
L=NODET1(J)  
M=NODET2(J)  
J5=J5+1  
J1=NB+J5  
DO 14 J2=1,NT  
IF(ISEND(J2).EQ.L.AND.IREC(J2).EQ.M) GO TO 15  
CONTINUE  
Z(L,J1)=V(L)*V(M)* (YMOD(J2)/T(J2))*SIN(DELTA(M)-DELTA(L))
```



```

Z(J1,L)=V(L)*V(M)*YMOD(J2)*COS(DELTA(M)-DELTA(L))
Z(J1,M)=-Z(J1,L)
J3=NB+NTR+L
J4=NB+NTR+M
Z(J3,J1)=V(L)*V(M)*{YMOD(J2)/T(J2)}*COS(DELTA(L)-DELTA(M))-2*(V(L)
**2)*{YMOD(J2)/(T(J2)**2)}
Z(J4,J1)=V(L)*V(M)*{YMOD(J2)/T(J2)}*COS(DELTA(L)-DELTA(M))
Z(J1,J3)=-1.*V(M)*YMOD(J2)*SIN(DELTA(M)-DELTA(L))
Z(J1,J4)=-1.*V(L)*YMOD(J2)*SIN(DELTA(M)-DELTA(L))
CONTINUE
L=L+1

```

SE ELIMINA LA FILA Y LA COLUMNA DE LA BARRA SLACK  
EN EL JACOBIANO

```

DO 437 I=1,NW
IF(I.EQ.NS)GO TO 437
L=L+1
M=0
DO 439 J=1,NW
IF(J.EQ.NS)GO TO 439
M=M+1
Z(L,M)=Z(I,J)
CONTINUE
CONTINUE
NW=NW-1
JJ=NB
JI=JJ+NTR
JM=0
J6=0
INDI=0

```

SE FORMA LA MATRIZ S\* QUE CONTIENE UNICAMENTE VARIABLES  
DEPENDIENTES Y DE ESTADO DE CADA EJEMPLO, ESTO SE OBTIENE  
DE LA INVERSA DE LA MATRIZ JACOBIANO, EL METODO EMPLEADO  
PARA EL CALCULO DE LAS PARTES REQUERIDAS ES LA BI-FACTORIZACION

```
DO 26 JL=JJ,NW
```

SELECCIONA LAS VARIABLES DEPENDIENTES O DE ESTADO

```

IF(JL.LT.JI)GO TO 27
JM=JM+1
IF(NODE(JM).EQ.1.OR.NODE(JM).EQ.2)GO TO 27
IF(IT.EQ.0)GO TO 26
DO 28 J2=1,IT
IF(NODET1(J2).NE.NODET2(J2))GO TO 28
IF(NODET1(J2).EQ.JM)GO TO 27
CONTINUE
GO TO 26
J3=JL
INDI=INDI+1

```

CALCULA EL VECTOR INDEPENDIENTE

```

DO 29 J2=1,NW
VP(J2)=0.
IF(J2.EQ.J3)VP(J2)=1.
CONTINUE
IF(INDI.NE.1)GO TO 120
J3=0
N1=1
N2=0
N3=0

```

FORMACION DE LOS VECTORES REQUERIDOS PARA EL PROCESO DE

```

DO 16 J1=1,NW
LCOL(J1)=N2
N=0
DO 17 J2=1,NW
IF(Z(J2,J1).EQ.0.) GO TO 17
N=N+1
IF(J1.EQ.J2)GO TO 18
N1=N1+1
N3=N3+1
IF(J1.EQ.1) LCOL(1)=1
J3=J3+1
CE(J3)=Z(J2,J1)
ITAG(J3)=J2
LNXT(J3)=N1
N2=N3+1
GO TO 17
DE(J1)=Z(J1,J1)
CONTINUE
NOZE(J1)=N
LNXT(J3)=0
CONTINUE
J3=0
DO 21 J1=1,NW
DO 22 J2=1,NW
IF(J1.EQ.J2) GO TO 22
IF(Z(J1,J2).EQ.0.) GO TO 22
J3=J3+1
RE(J3)=Z(J1,J2)
CONTINUE
CONTINUE

```

IGUALANDO A CERO LOS VECTORES CE, RE DESDE LF HASTA J2

```

LF=J3+1
J33=LF
IF(NB.LT.20) GO TO 23
J2=LF+20
GO TO 24
J2=LF+3*NB
J22=J2
DO 25 J=LF,J2
N1=N1+1
RE(J)=0.
CE(J)=0.
LNXT(J)=N1
CONTINUE
LNXT(J)=0

```

SE ALMACENA TODOS LOS VECTORES QUE SE USA EN LA BI-FACTORIZACION PARA CALCULAR UNA NUEVA COLUMNA DE LA MATRIZ INVERSA

```

DO 121 J=1,NW
IBN1(J)=LCOL(J)
NOZE1(J)=NOZE(J)
BP(J)=DE(J)
CONTINUE
DO 122 J=1,J22
ITAG2(J)=LNXT(J)
G1(J)=CE(J)
B1(J)=RE(J)
CONTINUE
J1=J33-1
DO 123 J=1,J1
ITAG1(J)=ITAG(J)
CONTINUE
DO 124 J=1,NW

```

```

IF (IND1.EQ.1) GO TO 125
LF=J33
DO 126 J=1,NW
LCOL(J)=IBN1(J)
NOZE(J)=NOZE1(J)
DE(J)=BP(J)
CONTINUE
DO 127 J=1,J22
LNXT(J)=ITAG2(J)
CE(J)=G1(J)
RE(J)=B1(J)
CONTINUE
J1=J33-1
DO 128 J=1,J1
ITAG(J)=ITAG1(J)
CONTINUE
CALL SIMORD(NW,LF,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,JW,NSEQ,NTND)
CALL REDUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,N5,N9,NSEQ)
CALL SOLUC(NW,LCOL,NOZE,DE,ITAG,LNXT,CE,RE,VP,N5,N9,NSEQ)
J6=J6+1
J7=0

```

249

ALMACENA LOS TERMINOS DEL TERMINO INDEPENDIENTE NECESARIOS  
PARA FORMAR LA MATRIZ S°

```

DO 30 J2=JJ,NW
J7=J7+1
Z(J7,J6)=VP(J2)
CONTINUE
CONTINUE

```

SE TRANSFIERE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES O DE ESTADO AL  
LADO DERECHO Y LAS VARIABLES DEPENDIENTES AL LADO IZQUIERDO  
DE LAS ECUACIONES FORMADA POR LA MATRIZ S°, PARA OBTENER  
LA MATRIZ S°°

```

J1=0
J5=1
DO 31 J2=1,J6
J1=J1+1
IF(J1.GT.NTR) GO TO 32
J21=J2
GO TO 33
DO 156 I=J5,NB
IF(NODE(I).EQ.1.OR.NODE(I).EQ.2) GO TO 45
IF(IT.EQ.0) GO TO 156
DO 152 I1=1,IT
IF(NODET1(I1).EQ.NODET2(I1)) GO TO 153
GO TO 152
IF(NODET1(I1).EQ.I) GO TO 155
CONTINUE
CONTINUE
GO TO 31
J5=I+1
GO TO 31
J21=I+NTR
J5=I+1
GO TO 33
XX=Z(J21,J2)
Z(J21,J2)=-1.
DO 41 J3=1,J6
Z(J21,J3)=-Z(J21,J3)/XX
CONTINUE
DO 35 J4=1,J7
IF(J4.EQ.J21)GO TO 35
DO 36 J3=1,J6

```

```

CONTINUE
DO 37 J4=1,J7
IF(J4.EQ.J21) GO TO 37
DO 38 J3=1,J6
J8=50+J3
IF(J3.EQ.J2) GO TO 39
Z(J4,J3)=Z(J4,J3)+Z(J4,J8)
GO TO 38
Z(J4,J3)=Z(J4,J8)
CONTINUE
CONTINUE
CONTINUE
J1=J7

```

SELECCIONA LAS PARTES REQUERIDAS DE LA MATRIZ S<sup>00</sup>

```

J2=NTR+1
J7=0
DO 83 I1=J2,J1
J7=J7+1
DO 84 I2=1,J6
Z(J7,I2)=Z(I1,I2)
CONTINUE
CONTINUE

```

RANGO DE INCREMENTOS DE LAS VARIABLES DE CONTROL

```

IF(MONI.NE.1) GO TO 3333
DT=0.05
DV=0.025
DQ=0.05
GO TO 3334
DT=0.05
DV=0.025
DQ=0.05

```

RESTRICCIONES DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES

```
J3=0
```

VARIACIONES MINIMAS Y MAXIMAS DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES

```

DO 61 J1=1,NB
IF(NODE(J1).EQ.1.OR.NODE(J1).EQ.2) GO TO 62
J3=J3+1
G1(J3)=VMIN(J1)-V(J1)
B1(J3)=VMAX(J1)-V(J1)
GO TO 61
J3=J3+1
G1(J3)=QMIN(J1)-QG(J1)/BASE
B1(J3)=QMAX(J1)-QG(J1)/BASE
CONTINUE
J4=0
IF(NTR.EQ.0) GO TO 1001

```

RESTRICCIONES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES

```
DO 63 J1=1,IT
```

VARIACION MINIMA Y MAXIMA DE LOS TAPS EN LOS TRANSFORMADORES

```

IF(NODET1(J1).EQ.NODET2(J1)) GO TO 63
J4=J4+1
DO 64 J2=1,NT
IF(ISEND(J2).EQ.NODET1(J1).AND.IREC(J2).EQ.NODET2(J1)) GO TO 65
CONTINUE

```

```

XMIN=T(J2)-DT
XMAX=T(J2)+DT
IF(XMIN.LT.TMIN(J1)) GO TO 67
IF(XMAX.GT.TMAX(J1)) GO TO 68
HAC1(J4)=-DT
HAC3(J4)=DT
GO TO 63
HAC1(J4)=TMIN(J1)-T(J2)
HAC3(J4)=DT
GO TO 63
HAC1(J4)=-DT
HAC3(J4)=TMAX(J1)-T(J2)
CONTINUE

```

251

VARIACION MINIMA Y MAXIMA EN LOS VOLTAJES DE GENERACION Y EN LAS FUENTES DE REACTIVOS

```

DO 69 J1=1,NB
IF(NODE(J1).EQ.1.OR.NODE(J1).EQ.2) GO TO 70
GO TO 71
J4=J4+1
XMIN=V(J1)-DV
XMAX=V(J1)+DV
IF(XMIN.LT.VMIN(J1)) GO TO 72
IF(XMAX.GT.VMAX(J1)) GO TO 73
HAC1(J4)=-DV
HAC3(J4)=DV
GO TO 69
HAC1(J4)=-DV
HAC3(J4)=VMAX(J1)-V(J1)
GO TO 69
HAC1(J4)=VMIN(J1)-V(J1)
HAC3(J4)=DV
GO TO 69
IF(IT.EQ.0)GO TO 69
DO 74 J2=1,IT
IF(NODET1(J2).NE.NODET2(J2)) GO TO 74
IF(NODET1(J2).EQ.J1) GO TO 75
CONTINUE
GO TO 69
J4=J4+1
DQM=TMAX(J2)-TMIN(J2)
IF(DQ.LT.DQM) GO TO 399
DQ1=DQM-0.000001
GO TO 398
Q1=DQ
MIN=Q(J1)-DQ1
MAX=Q(J1)+DQ1
IF(XMIN.LT.TMIN(J2))GO TO 76
IF(XMAX.GT.TMAX(J2)) GO TO 77
AC1(J4)=-DQ1
AC3(J4)=DQ1
GO TO 69
AC1(J4)=-DQ1
AC3(J4)=TMAX(J2)-Q(J1)
GO TO 69
AC1(J4)=TMIN(J2)-Q(J1)
AC3(J4)=DQ1
CONTINUE
TURN
D

```

- LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO A LOS TAPS DE LOS TRANSFORMADORES ENTRE LA BARRA P Y Q.
- LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO A LA POTENCIA REACTIVA DE LAS FUENTES DE REACTIVOS EN LAS BARRAS DONDE EXISTE
- LA SENSITIVIDAD DE LAS PERDIDAS CON RESPECTO A LOS VOLTAJES DE GENERACION

```

SUBROUTINE OBJE(NODET1,NODET2,YMOD,T,DELTA,V,NS,NB,VP1,RE,NODE,ISE
*NO,IREC,HAC6,IT,JW,NT,NTR,J6,J7,MM2)
DIMENSION NODET1(IT),NODET2(IT),YMOD(NT),T(NT),DELTA(NB)
DIMENSION V(NB),VP1(MM2),RE(NT),NODE(NB),ISEND(NT),IREC(NT)
DIMENSION HAC6(NT),Z(250,100)
COMMON Z
INDI=0

```

FORMACION DE LOS COEFICIENTES DE LA FUNCION OBJETIVO CON RELACION A LOS TRANSFORMADORES CON TAPS EN EL SISTEMA

```

IF(NTR.EQ.0) GO TO 1000
DO 10 I=1,IT
IF(NODET1(I).EQ.NODET2(I)) GO TO 10
L=NODET1(I)
M=NODET2(I)
DO 11 J=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.L.AND.IREC(J).EQ.M) GO TO 12
CONTINUE
WRITE(JW,13)
FORMAT('ERROR 1')
X1=V(L)*V(M)*(YMOD(J)/T(J))*SIN(DELTA(M)-DELTA(L))
X2=V(L)*V(M)*(YMOD(J)/T(J))*COS(DELTA(L)-DELTA(M))-2*V(L)*V(L)*YMO
*D(J)/(T(J)**2)
X3=-X1
X4=V(L)*V(M)*(YMOD(J)/T(J))*COS(DELTA(L)-DELTA(M))
IF(L.LT.NS) GO TO 14
IP=L+NB-2
L1=L-1
XX=-VP1(L1)*X1-VP1(IP)*X2
GO TO 15
IP=L+NB-1
XX=-VP1(L)*X1-VP1(IP)*X2
IF(M.LT.NS) GO TO 16
IQ=M+NB-2
M1=M-1
XY=-VP1(M1)*X3-VP1(IQ)*X4
GO TO 17
IQ=M+NB-1
XY=-VP1(M)*X3-VP1(IQ)*X4
INDI=INDI+1
RE(INDI)=XX+XY
CONTINUE

```

FORMACION DE LOS COEFICIENTES DE LA FUNCION OBJETIVO CON RELACION A LOS VOLTAJES DE GENERACION Y A LAS FUENTES DE REACTIVOS

```

DO 18 I=1,NB
IF(NODE(I).EQ.1) GO TO 19
GO TO 20

```

COEFICIENTE CON RESPECTO A LA BARRA OSCILANTE

```

DVS=0
DO 21 J=1,NT

```

```

M=IREC(J)
IF(NODE(L).EQ.1.OR.NODE(L).EQ.2) GO TO 21
IF(L.LT.NS) GO TO 22
IQ=L+NB-2
XX=-VP1(IQ)*HAC6(J)
GO TO 23
IQ=L+NB-1
XX=-VP1(IQ)*HAC6(J)
DVS=DVS+XX
CONTINUE
IND=NTR
DO 24 IL=1,NB
IF(NODE(IL).EQ.1)GO TO 25
IF(NODE(IL).EQ.2)GO TO 26
IF(IT.EQ.0) GO TO 24
DO 27 IL1=1,IT
IF(NODET1(IL1).NE.NODET2(IL1)) GO TO 27
IF(NODET1(IL1).EQ.IL) GO TO 26
CONTINUE
GO TO 24
IND=IND+1
CONTINUE
WRITE(JW,28)
FORMAT('ERROR 2')
IND=IND+1
DO 29 J=1,NB
IF(NODE(J).NE.2)GO TO 29
IF(J.LT.NS) GO TO 30
IQ=J+NB-2
GO TO 31
IQ=J+NB-1
XX=VP1(IQ)*Z(J,IND)
DVS=DVS+XX
CONTINUE
INDI=INDI+1
E(INDI)=DVS
GO TO 18
IF(NODE(I).EQ.2) GO TO 100
GO TO 200

```

253

COEFICIENTE CON RESPECTO A LAS BARRAS DE GENERACION P-V

```

IF(I.LT.NS) GO TO 32
I=I+NB-2
GO TO 33
I=I+NB-1
DO 34 J=I,NT
(IFSEND(J).EQ.I.AND.IREC(J).EQ.I) GO TO 35
CONTINUE
ITE(JW,36)
FORMAT('ERROR 3')
S=VP1(IQ)*HAC6(J)
INDI=INDI+1
E(INDI)=DVG
GO TO 18

```

COEFICIENTE CON RESPECTO A LAS FUENTES DE VAR

```

IF(IT.EQ.0) GO TO 18
DO 37 J=1,IT
IF(NODET1(J).NE.NODET2(J)) GO TO 37
IF(NODET1(J).EQ.I)GO TO 39
CONTINUE
GO TO 18
IF(L.LT.NS)GO TO 40

```

```

IQ=1+NB-1
INDI=INDI+1
RE(INDI)=VP1(IQ)
M1=1+2*NB+J6
N1=3+J6
CONTINUE
RETURN
END

```

254

```

-----
SUBROUTINA OPTI
-----

```

EL METODO EMPLEADO EN ESTA SUBROUTINA OPTIMIZA LA FUNCION  
OBJETIVA ALGEBRAICA LINEAL SUJETO A UN NUMERO DE RESTRICCIONES  
ALGEBRAICAS LINEALES

```

SUBROUTINE OPTI(JW,G1,B1,NB,HAC4,J6,RE,BP,RQ,PI,NBP,XPI,HAC1,HAC3,
*J7,NBN1,IBN1,MM3,MM4,MM5)
INTEGER RNM1
DIMENSION BP(MM3),RQ(MM5),Z(250,100),PI(MM4),XPI(MM4)
DIMENSION HAC1(J6),HAC3(J6),HAC4(J6),RE(J6),IBN1(MM3),NBN1(MM3)
DIMENSION G1(NB),B1(NB)
COMMON Z
REAL LST,NBP(MM3)

```

HACE QUE LOS INCREMENTOS DE LAS VARIABLES DE CONTROL TENGAN  
VALORES SOLO POSITIVOS EN EL PROCESO DE OPTIMIZACION DEBIDO  
A LAS CONDICIONES QUE REQUIERE EL ALGORITMO DEL METODO  
SIMPLEX PARA RESOLVER

```

DO 80 I=1,J6
HAC4(I)=HAC3(I)-HAC1(I)
IF(HAC1(I).GE.0) GO TO 80
DO 81 I1=1,NB
G1(I1)=G1(I1)-Z(I1,I)*HAC1(I)
B1(I1)=B1(I1)-Z(I1,I)*HAC1(I)
CONTINUE
CONTINUE

```

PROGRAMA DE OPTIMIZACION POR EL METODO SIMPLEX

```

M=0
N=1
ISW=0
NROWS=0
NGE=0
ALE=0
NEQ=0
NEL=0
ARHS=0
NCCLS=0
M1=1+2*NB+J6
N1=3+J6
I1=0
DO 150 I=1,J6
OO 150 J=1,NB
I1=I1+1
RQ(I1)=Z(J,I)
CONTINUE

```

ENCERAMOS LA MATRIZ



Z(I,J)=0.  
RNM1=1

255

### GENERACION DE LAS VARIABLES SLACK POSITIVAS Y NEGATIVAS

```
DO 680 I=1,NB
RNM1=RNM1+1
M=M+1
NROWS=NROWS+1
IF(B1(I).GT.0.) GO TO 106
IF(B1(I).LT.0.) GO TO 108
GO TO 107
IBN1(M)=RNM1
NLE=NLE+1
BP(M)=0.
GO TO 101
IBN1(M)=RNM1
NGE=NGE+1
BP(M)=-1.0
Z(M,N)=-1.0
NBN1(N)=RNM1
NBP(N)=0.
N=N+1
GO TO 101
IBN1(M)=RNM1
NEQ=NEQ+1
BP(M)=-2.0
RNM1=RNM1+1
M=M+1
NROWS=NROWS+1
IF(G1(I).LT.0.) GO TO 102
IF(G1(I).GT.0.) GO TO 104
GO TO 103
IBN1(M)=RNM1
NLE=NLE+1
BP(M)=0.
GO TO 680
IBN1(M)=RNM1
NGE=NGE+1
BP(M)=-1.0
Z(M,N)=-1.0
NBN1(N)=RNM1
NBP(N)=0.
N=N+1
GO TO 680
IBN1(M)=RNM1
NEQ=NEQ+1
BP(M)=-2.0
CONTINUE
DO 681 I=1,J6
RNM1=RNM1+1
M=M+1
NROWS=NROWS+1
IBN1(M)=RNM1
NLE=NLE+1
BP(M)=0.
CONTINUE
IN=0
IND=2*NB+1
II=0
```

### ALMACENAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA MATRIZ DEL SIMPLEX

```
DO 504 II=1,J6
NBN1(N)=1000+II
Z(M,N)=1.0
```

```

RNM1=1
DO 119 I1=1,NB
NEL=NEL+1
RNM1=RNM1+1
DO 113 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 603
CONTINUE
WRITE(JW,8113)
FORMAT('ERROR 1')
IN=IN+1
IF (B1(I1).GE.0.) GO TO 3
VALUE=-RQ(IN)
GO TO 2
VALUE=RQ(IN)
Z(I,N)=VALUE
NEL=NEL+1
RNM1=RNM1+1
IF (G1(I1).GE.0.) GO TO 195
VALUE=-RQ(IN)
GO TO 601
VALUE=RQ(IN)
DO 114 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 100
CONTINUE
WRITE(JW,115)
FORMAT('ERROR 2')
Z(I,N)=VALUE
CONTINUE
VALUE=1.
NEL=NEL+1
RNM1=IND+II
DO 116 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 620
CONTINUE
WRITE(JW,8115)
FORMAT('ERROR 3')
Z(I,N)=VALUE
N=N+1
NCOLS=NCOLS+1
CONTINUE
NEL=NEL+1

```

#### ALMACENAMIENTO DE LOS ELEMENTOS RHS

```

DO 191 I=1,M
RQ(I)=0.
RNM1=1
DO 121 II=1,NB
RNM1=RNM1+1
DO 124 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 611
CONTINUE
WRITE(JW,8124)
FORMAT('ERROR 4')
VALUE=ABS(B1(II))
RQ(I)=VALUE
NRHS=NRHS+1
RNM1=RNM1+1
DO 125 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 612
CONTINUE
WRITE(JW,8125)
FORMAT('ERROR 5')
VALUE=ABS(G1(II))
RQ(I)=VALUE

```

```

DO 120 I=1,M
RNM1=RNM1+1
DO 127 I=1,M
IF (IBN1(I).EQ.RNM1) GO TO 613
CONTINUE
WRITE(JW,8126)
FORMAT(*ERROR 6*)
VALUE=ABS(HAC4(I))
RQ(I)=VALUE
NRHS=NRHS+1
CONTINUE
N=N-1

```

#### BORRAR NOMBRES ARTIFICIALES

```

DO 10 I=1,M
IF (BP(I)+1.0)19,11,10
IBN1(I)=0
GO TO 10
BP(I)=-1.0
IBN1(I)=0
CONTINUE

```

#### ACUMULA CONTADOR DE NO-FACTIVILIDAD

```

NINF=0
DO 6000 I=1,M
IF (BP(I))6001,6000,6000
NINF=NINF+1
CONTINUE

```

#### GENERA INDICADOR PARA MINIMIZAR LAS NO-FACTIVILIDADES

```

DO 6101 J=1,N
XPI(J)=0.
DO 6101 I=1,M
IF (BP(I))6102,6101,6101
XPI(J)=XPI(J)-Z(I,J)
CONTINUE
DO 6002 I=1,M
BP(I)=0.
IPHASE=1
IT=0
5 CONTINUE

```

#### IGNORE VARIABLES ARTIFICIALES

```

DO 194 J=1,N
PI(J)=-NBP(J)
DO 194 I=1,M
PI(J)=PI(J)+BP(I)*Z(I,J)
LST=-.0000001
KCOL=0
GO TO (751,552),IPHASE
IF (NINF)54321,54321,552
CONTINUE
DO 9102 J=1,N
IF (NBN1(J))651,9102,651
CONTINUE
GO TO (6003,6004),IPHASE
IF (XPI(J)-LST)6005,6006,6006
KCOL=J
LST=XPI(J)
GO TO 9102
CONTINUE
IF (PI(J)-LST)9103,9102,9102

```

CONTINUE  
CONTINUE  
IF (KCOL) 54321, 54321, 9104

258

DETERMINE LA FILA PIVOTE

KROW=0  
CJBAR=LST  
LST=1.0E20  
DO 9105 I=1, M  
IF (Z(I, KCOL)) 9105, 9105, 9106  
RATIO=RQ(I)/Z(I, KCOL)  
IF (RATIO-LST) 9107, 9105, 9105  
LST=RATIO  
KROW=I  
CONTINUE  
IF (KROW) 9112, 9112, 9114  
GO TO 54323  
CONTINUE

TRANSFORME DIVIDIENDO PARA EL PIVOTE

PIVOT=Z(KROW, KCOL)  
DO 9108 J=1, N  
Z(KROW, J)=Z(KROW, J)/PIVOT  
RQ(KROW)=RQ(KROW)/PIVOT  
DO 9109 I=1, M  
IF (I-KROW) 9110, 9109, 9110  
RQ(I)=RQ(I)-RQ(KROW)\*Z(I, KCOL)  
DO 4444 J=1, N  
IF (J-KCOL) 9111, 4444, 9111  
Z(I, J)=Z(I, J)-Z(KROW, J)\*Z(I, KCOL)  
CONTINUE  
CONTINUE  
DO 9300 I=1, M  
Z(I, KCOL)=-Z(I, KCOL)/PIVOT  
Z(KROW, KCOL)=1.0/PIVOT

INTERCAMBIAR VARIABLES BASICAS CON LAS NO-BASICAS

RNM1=NBNI(KCOL)  
NBNI(KCOL)=IBNI(KROW)  
IBNI(KROW)=RNM1  
LST=NBP(KCOL)  
BP(KROW)=LST  
IT=IT+1  
IF (NBNI(KCOL)) 6201, 6200, 6201  
NINF=NINF-1  
CONTINUE

CALCULA LA FUNCION OBJETIVO

N=0.  
DO 9301 I=1, M  
N=FN+BP(I)\*RQ(I)  
DO TO (7000, 7001), IPHASE  
AVE=PI(KCOL)  
DO 7003 J=1, N  
I(J)=PI(J)-SAVE\*Z(KROW, J)  
PI(J)=XPI(J)-CJBAR\*Z(KROW, J)  
CONTINUE  
I(KCOL)=-SAVE/PIVOT  
PI(KCOL)=-CJBAR/PIVOT  
DO TO 7004  
CONTINUE

PI(KCOL)=-CUBAR/PIVOT

CONTINUE

DO 6111 I=1,M

DO 6111 J=1,N

X=Z(I,J)

IF(ABS(X)-.0000001)6112,6112,6111

Z(I,J)=0.

CONTINUE

GO TO 9101

1 CONTINUE

IF(IPHASE-1)8000,8000,54322

IPHASE=2

IF(NINF)8003,8003,8004

GO TO 54322

CONTINUE

GO TO 54325

2 CONTINUE

SALIDA DE LOS VALORES OPTIMOS DE LA FUNCION OBJETIVO

DO 303 I=1,M

IF(IBN1(I).LE.1000) GO TO 303

IN=IBN1(I)-1000

RE(IN)=RQ(I)

CONTINUE

DO 309 J=1,N

IF(NBN1(J).LE.1000) GO TO 309

IN=NBN1(J)-1000

RE(IN)=0.

CONTINUE

LAS VARIABLES DE CONTROL REGRESAN SUS VALORES REALES LOS  
CUALES FUERON CAMBIADOS POR CONDICIONES DEL ALGORITMO

DO 307 I=1,J6

RE(I)=RE(I)+HAC1(I)

PI(I)=-RE(I)

CONTINUE

3 RETURN

END

-----  
SUBROUTINA ARRE  
-----

MODIFICA LA ADMITANCIA DE BARRA POR LOS CAMBIOS EN :  
- LA POSICION DE LOS TAPS EN LOS TRANSFORMADORES  
- LOS CAPACITORES Y/O REACTORES  
COMO RESULTADO DE OPTIMIZAR LAS PERDIDAS

SUBROUTINE ARRE(JW,NB,NS,ISEND,IREC,NT,G,B,SUS,NODET1,NODET2,IT,NT  
\*R,T,YMOD,RE,JW,PG,QG,PL,QL,BASE,NODE,V,G,E,NLE,J6,YANG)  
DIMENSION ISEND(NLE),IREC(NLE),G(NLE),B(NLE),SUS(NLE),NODET1(IT)  
DIMENSION NODET2(IT),T(NLE),YMOD(NLE),RE(J6),PG(NB),QG(NB),PL(NB)  
DIMENSION QL(NB),NODE(NB),V(NB),Q(NB),E(NB),YANG(NLE)

MODIFICA LA ADMITANCIA DE BARRA POR EL CAMBIO EN LA POSICION  
DEL TAP EN LOS TRANSFORMADORES

DO 710 I=1,NB

PG(I)=PG(I)/BASE

QG(I)=QG(I)/BASE

PL(I)=PL(I)/BASE

```

NUM=0
IF(NTR.EQ.0) GO TO 1000
DO 550 I=1,IT
IF(NODET1(I).EQ.NODET2(I)) GO TO 550
NUM=NUM+1
DO 511 J=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.NODET1(I).AND.IREC(J).EQ.NODET2(I)) I1=J
IF(ISEND(J).EQ.NODET1(I).AND.IREC(J).EQ.NODET1(I)) I2=J
IF(ISEND(J).EQ.NODET2(I).AND.IREC(J).EQ.NODET1(I)) I3=J
IF(ISEND(J).EQ.NODET2(I).AND.IREC(J).EQ.NODET2(I)) I4=J
CONTINUE
B(I1)=(B(I1)/(T(I1)+RE(NUM)))*T(I1)
B(I2)=B(I2)+(-YMOD(I1)*T(I1))*(1/((T(I1)+RE(NUM))**2)-1/(T(I1)**2)
*)
B(I3)=B(I1)
SUS(I1)=B(I1)*(1-T(I1)-RE(NUM))/(T(I1)+RE(NUM))
SUS(I3)=B(I1)*(T(I1)+RE(NUM)-1)
T(I1)=T(I1)+RE(NUM)
CONTINUE

```

MODIFICA LA ADMITANCIA DE BARRA POR EL CAMBIO EN LA POSICION DE LOS CAPACITORES Y/O REACTORES

```

DO 502 J=1,NB
IF(NODE(J).EQ.2.OR.NODE(J).EQ.1) GO TO 503
IF(IT.EQ.0) GO TO 502
DO 504 I=1,IT
IF(NODET1(I).NE.NODET2(I)) GO TO 504
IF(NODET1(I).EQ.J) GO TO 505
CONTINUE
GO TO 502
NUM=NUM+1
V(J)=V(J)+RE(NUM)
IF(NODE(J).NE.2) GO TO 502
E(J)=E(J)+RE(NUM)
GO TO 502
DO 506 I1=1,NT
IF(ISEND(I1).EQ.J.AND.IREC(I1).EQ.J) GO TO 507
CONTINUE
WRITE(JW,508)
FORMAT('ERROR-1')
NUM=NUM+1
SUS(I1)=SUS(I1)+RE(NUM)
B(I1)=B(I1)+RE(NUM)
Q(J)=Q(J)+RE(NUM)
CONTINUE
G1=0.
B1=0.
DO 83 J=1,NT
L=J+1
G1=G1+G(J)
B1=B1+B(J)
IF(J.EQ.NT) GO TO 86
-IF(ISEND(J).EQ.ISEND(L).AND.IREC(J).EQ.IREC(L)) GO TO 83
CUAD=G1**2+B1**2
YMGD(J)=SQRT(CUAD)
IF(G1.NE.0.) GO TO 22
YANG(J)=1.5707963
GO TO 21
DUAC=B1/G1
YANG(J)=ATAN(DUAC)
IF(B1.GT.0.) YANG(J)=3.1415926+YANG(J)
YYY=YANG(J)*180./3.1415926
G1=0.
B1=0.
CONTINUE

```

-----  
 SUBROUTINA PRUEBA  
 -----

ESCRIBE LOS VALORES DE LAS VARIABLES DE CONTROL  
 TANTO DEL CASO BASE COMO DEL CASO OPTIMO

```

SUBROUTINE PRUEBA(JW,NT,IT,NTR,NODET1,NODET2,ISEND,IREC,Q,T,NODE,N
1B,ICON,V,BASE,NCO)
DIMENSION NODET1(IT),NODET2(IT),ISEND(NT),IREC(NT),Q(NB),T(NT)
DIMENSION NODE(NB),V(NB)
IF(ICON.NE.0) GO TO 12
WRITE(JW,11)
GO TO 13
WRITE(JW,14)
WRITE(JW,15)
I1=0
DO 16 I=1,NB
IF(NODE(I).EQ.1.OR.NODE(I).EQ.2) GO TO 17
GO TO 16
I1=I1+1
WRITE(JW,18) I1,I,V(I)
CONTINUE
IF(NTR.EQ.0) GO TO 21
WRITE(JW,20)
I1=0
DO 22 I=1,IT
IF(NODET1(I).EQ.NODET2(I)) GO TO 22
DO 23 J=1,NT
IF(ISEND(J).EQ.NODET1(I).AND.IREC(J).EQ.NODET2(I)) GO TO 24
CONTINUE
I1=I1+1
WRITE(JW,25) I1,NODET1(I),NODET2(I),T(J)
CONTINUE
IF(NCO.EQ.0) GO TO 32
WRITE(JW,33)
I1=0
DO 29 I=1,IT
IF(NODET1(I).NE.NODET2(I)) GO TO 29
DO 30 J=1,NB
IF(NODET1(I).EQ.J) GO TO 31
CONTINUE
I1=I1+1
Q(J)=Q(J)*BASE
WRITE(JW,18) I1,NODET1(I),Q(J)
Q(J)=Q(J)/BASE
CONTINUE
GO TO 32
IF(ICON.EQ.0) GO TO 40
WRITE(JW,41) ICON
FORMAT(///,20X,'*POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO BASE',/
1,20X,47(1H-),///)
FORMAT(///,20X,'*POSICION DE LAS VARIABLES DE CONTROL: CASO OPTIMO
*',/20X,49(1H-),///)
FORMAT(20X,'1.- VOLTAJES DE GENERACION',/24X,22(1H-),//,17X,'NO.'
1,3X,'BARRA P',13X,'VOLTAJE',/,43X,'MAGNITUD',//)
FORMAT(/,18X,I2,4X,I3,16X,F8.4)
FORMAT(///,20X,'2.- TRANSFORMADORES CON CAMBIO DE TAPS',/24X,34(1
1H-),//,17X,'NO.',3X,'BARRA P',3X,'BARRA Q',3X,'TAPS',/,43X,'POSICI
20N',//)
FORMAT(/,18X,I2,4X,I3,7X,I3,6X,F8.5)

```

FORMAT(///.20X.\*CONVERGE FN\*.15.\* ITERACIONES EL F.O.P.R.\*.///)  
RETURN  
END



## REFERENCIAS

1. Arguello G., Operación Óptima de Sistemas de Potencia, INECEL, Quito, 1977.
2. K.R.C. Mamandur, R.D. Chenoweth, Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization, IEEE Trans. on PAS Vol 100, 1981, pp 3185 - 3194.
3. Arguello G., Minimización de Pérdidas de Transmisión en Sistemas de Potencia mediante Control de la Magnitud de Voltajes en las Barras de Generación del Sistema, INECEL, Quito, 1978.
4. J Peschon, D. Piercy, W. Tinney, O. Tveit, Sensitividad in Power Systems, IEEE Trans. on PAS Vol 87, 1968, pp 1687-1696.
5. I Hano, Y. Tamura, S. Narita, K. Matsumoto, Real Time Control of System Voltage and Reactive Power, IEEE Trans. on PAS Vol 88, - 1969, pp 1544 - 1559.
6. Vinueza F., Flujo Óptimo de Potencia, Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia, E.P.N., Quito, 1984.
7. H. Dommel, W. Tinney, Optimal Power Flow Solutions, IEEE Trans. on PAS Vol 87, 1968, pp 1866 - 1876.

8. S. Narita, M. Hamman, A Computational Algorithm for Real-Time - Control of System Voltage and Reactive Power, IEEE Trans. on PAS, 1970, pp 2495 - 2501.
9. R. Shoults, M. Chen, Reactive Power Control by Least Squares Minimization, IEEE Trans. on PAS Vol 95, 1976, pp 325 - 334.
10. E. Hobson, Network Constrained Reactive Power Control using Linear Programming, IEEE Trans. on PAS Vol 99, 1980, pp 868 - 877.
11. G. Stagg, A. El-Abiad, Computer Methods in Power Systems Analysis, McGraw-Hill, 1968.
12. J. Kuerter, J. Mize, Optimization Techniques with Fortran McGraw-Hill, 1973.
13. J. Peschon, D. Piercy, W. Tinney, O. Tveit, M. Cuenod, Optimum Control of Reactive Power Flow, IEEE Trans. on PAS Vol 87, 1968, pp 40-48.
14. González M., Optimización de la Producción de Energía en Sistemas Eléctricos de Potencia, Tesis previa al título de Ingeniero Eléctrico con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia, E.P.N., Quito, 1984.
15. Mármol E., Estudios de Flujos de Carga mediante los métodos de Newton Raphson, Tesis previa al título de Ingeniero Eléctrico con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia, E.P.N., Quito, 1983.

16. Miller T.J.E., Reactive Power Control in Electric Systems, General Electric Company, New York, 1982.
17. K. Zollen Kopf, "Bi-factorización, Basic Computational Algorithm and Programming Techniques", Large Sparse Sets of Linear Equations, Academic Press, U.S.A., 1971, pp 75-96.
18. F. Aboytes, B. Vidrio, H. Torres, Estudios de Flujos Optimos en Sistemas Eléctricos de Potencia, GGO, Atliguetzia, 1979.