

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO  
DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

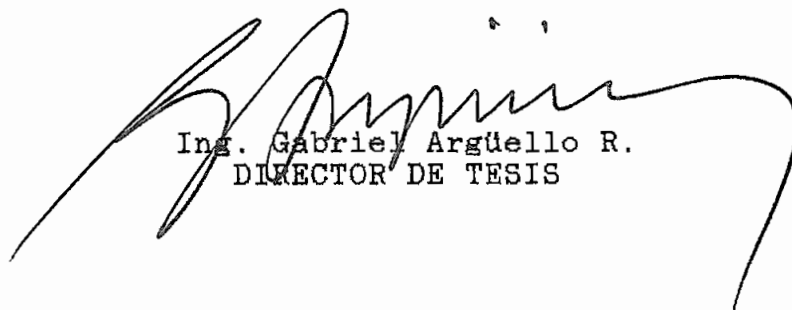
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN  
LA ESPECIALIZACION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

LUIS P. PROANO V.

QUITO, 1991.

## CERTIFICACION

Certifico que la presente tesis ha sido elaborada en su totalidad por el Sr. Luis P. Proaño Vallejo, bajo mi dirección.



Ing. Gabriel Argüello R.  
DIRECTOR DE TESIS

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mis sinceros agradecimientos al Ing. Gabriel Argüello Ríos por su acertada dirección.

# I N D I C E

|  | Pag. |
|--|------|
| <b>RESUMEN: OBJETIVO Y ALCANCE</b>   | viii |
| <br><b>CAPITULO I</b>  |      |
| <b>INTRODUCCION</b>  |      |
| 1.1. Antecedentes.....   | 1    |
| 1.2. Contenido del Paquete Interactivo.....  | 2    |
| 1.3. Ventajas de la Programación Interactiva.....  | 4    |
| <br><b>CAPITULO II</b>   |      |
| <b>EL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA</b>   |      |
| 2.1. Modelo del Flujo de Potencia.....   | 6    |
| 2.1.1. Definición de Flujo de Potencia.....  | 6    |
| 2.1.2. Planteamiento del Problema.....   | 7    |
| 2.1.3. Planteamiento Matemático del Flujo de Potencia.....   | 9    |
| 2.1.4. Técnica Numérica de Newton Raphson en la Solución del Flujo de Potencia.....                            | 13   |
| 2.2. Modelo del Flujo de Potencia por el Método de Newton.....   | 16   |
| 2.2.1. Definición del Flujo Optimo de Potencia.....  | 16   |
| 2.2.2. Planteamiento del Problema.....   | 16   |
| 2.2.3. Desarrollo Matemático y Formulación del Modelo de Flujo Optimo de Potencia por el Método de Newton..... | 19   |
| 2.2.3.1 Las Variables del Problema.....  | 20   |
| 2.2.3.2 Las Funciones Objetivo.....  | 24   |
| 2.2.3.3 Las Restricciones.....   | 27   |
| 2.2.3.4 Modelo General de Optimización por el Método de Newton.....  | 34   |
| 2.3. Algoritmo para la Solución del Flujo Optimo de Potencia por el Método de Newton.....                      | 39   |
| 2.3.1. El Grupo Activo de Restricciones.....   | 40   |
| 2.3.1.1 El Grupo Activo para el Flujo Optimo General.....  | 41   |
| 2.3.1.2 El Grupo Activo para el Flujo Optimo de Potencia Activa.....   | 42   |
| 2.3.1.3 El Grupo Activo para el Flujo Optimo de Potencia Reactiva.....   | 44   |
| 2.3.2. Técnica de Penalización.....  | 45   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.3.2.1 | Penalización de Variables.....  | 45 |
| 2.3.2.2 | Penalización de Restricciones de Desigualdad Sobre la Potencia Reactiva.....  | 49 |
| 2.3.2.3 | Penalización de Restricciones de Desigualdad Sobre la Diferencia Angular..... | 51 |
| 2.3.3.  | Algoritmo para el F.O.P. de Newton.....                                       | 53 |
| 2.4.    | Diferencias Entre el Método del Gradiente Reducido y el Método de Newton..... | 54 |
| 2.4.1.  | Método del Gradiente Reducido.....  | 54 |
| 2.4.2.  | Diferencias Entre los Métodos.....  | 61 |

### CAPITULO III

#### FORMULACION Y DISEÑO DEL MODELO INTERACTIVO PARA FLUJO OPTIMO DE POTENCIA

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.1.    | Definición Conceptual del Modelo.....                                      | 63 |
| 3.2.    | Estructura y Características del Programa de Flujo Optimo de Potencia..... | 65 |
| 3.2.1.  | Requerimientos y Características.....                                      | 65 |
| 3.2.2.  | Estructura del Programa de Flujo Optimo.....                               | 66 |
| 3.3.    | Esquema de la Base de Datos.....   | 70 |
| 3.3.1.  | Aspectos Generales.....  | 70 |
| 3.3.2.  | Descripción del Modelo Interactivo.....                                    | 72 |
| 3.3.2.1 | Función de Selección del Sistema.....                                      | 73 |
| 3.3.2.2 | Funciones de Mantenimiento.....  | 73 |
| 3.3.2.3 | Funciones de Reportes.....   | 74 |
| 3.3.2.4 | Funciones Específicas.....   | 75 |
| 3.3.2.5 | Funciones de Apoyo.....  | 75 |
| 3.3.2.6 | Funciones de Operación.....  | 77 |
| 3.3.3.  | Estructura de la Base de Datos.....  | 77 |
| 3.3.4.  | Esquema del Programa Interactivo.....                                      | 77 |
| 3.3.5.  | Requerimientos del Programa Interactivo.....                               | 78 |

### CAPITULO IV

#### APLICACION DEL PROGRAMA INTERACTIVO

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1.   | Aplicación Didáctica.....   | 81 |
| 4.1.1. | Ejemplo No. 1.....  | 82 |
| 4.1.2. | Ejemplo No. 2.....  | 85 |
| 4.2.   | Aplicación al Sistema Nacional Interconectado.....  | 87 |
| 4.3.   | Comparación de Resultados del Método de Optimización de Newton y Método del Gradiente Reducido..... | 89 |
| 4.4.   | Guía de Laboratorio.....  | 90 |

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 5.1. Conclusiones.....    | 95 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 98 |

### ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| 1. Modelo Matemático General de un Elemento Serie del SEP.....                               | 100 |
| 2. Función de Costo de Combustible.....  | 104 |
| 3. Modelación del Transformador con Cambiador de TAPS.                                       | 109 |
| 4. Ecuaciones de Flujo de Potencia como Funciones Explícitas de los Valores de Taps.....     | 114 |
| 5. Desarrollo de la Ecuación Matricial $W Z = -g$ .....                                      | 120 |
| 6. Desarrollo de las Fórmulas de los Elementos de la Matriz "W" y Vector Gradiente "-g"..... | 125 |
| 7. Listado de los Programas.....   | 146 |
| 8. Manual del Programador.....   | 148 |
| 9. Manual de Uso de los Programas.....   | 150 |
| 10. Ejemplo 1.....   | 182 |
| 11. Ejemplo 2.....   | 191 |
| 12. Aplicación al Sistema Nacional Interconectado.....                                       | 200 |
| 13. Ejemplo para la Guía de Laboratorio.....   | 209 |
| <br>   |     |
| BIBLIOGRAFIA.....  | 212 |

## RESUMEN: OBJETIVO Y ALCANCE.

El objetivo de la presente tesis es desarrollar un paquete de programas INTERACTIVOS que resuelvan, utilizando computadores personales y el Método de Newton, los siguientes tópicos: Flujo Optimo de Potencia General, Flujo Optimo de Potencia Activa y Flujo Optimo de Potencia Reactiva; para ser empleados con fines educacionales y de práctica en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.

La interactividad de los programas permitirá al usuario ingresar, revisar, modificar los datos de un sistema eléctrico en forma fácil, consultar, sacar reportes de los datos o resultados de un flujo y adicionalmente la posibilidad de conocer los conceptos básicos del modelo matemático empleado en la optimización.

Por otra parte, el paquete computacional podrá almacenar gran cantidad de información de varios Sistemas Eléctricos, en el Sistema de Base de Datos diseñado.

Cabe finalmente indicar, que los programas no solamente servirán a los estudiantes de Sistemas Eléctricos de Potencia sino también a los profesionales de esta área, pues podrán

# C A P I T U L O I

## INTRODUCCION.

### 1.1 ANTECEDENTES.

El estudio del Flujo Optimo de Potencia es uno de los tópicos más importantes en el análisis de un Sistema Eléctrico de Potencia en estado estacionario, pues permite obtener información necesaria para la planificación y operación de dichos sistemas.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional se han venido desarrollando técnicas de análisis para Sistemas Eléctricos de Potencia que conjuntamente con la disponibilidad de la computación interactiva han abierto una nueva dimensión en la educación de la ingeniería.

Es así como en los últimos años dichas técnicas de análisis y programación interactiva han sido utilizadas sobre todo para resolver flujos de potencia convencional [6], y flujos óptimos [7]. En cuanto al estudio de flujos óptimos, trabajos de investigación de tesis realizados anteriormente [17],[7], resuelven el problema utilizando como base el Método del Gradiente Reducido. En el presente trabajo, en cambio, se tiene como objetivo desarrollar un programa interactivo que resuelva el flujo óptimo en algunos tópicos haciendo uso de la técnica de



optimización de los multiplicadores de Lagrange, del teorema de Kuhn y Tucker y fundamentalmente del Método de Newton, para llegar a un punto de operación del sistema eléctrico en el cual las funciones objetivo planteadas tienen un valor óptimo.

Los programas desarrollados según la línea de interactividad con característica didáctica y práctica; al ser utilizables en un computador personal se convierten en una herramienta de trabajo tanto para los estudiantes como para los profesionales del área de Sistemas Eléctricos de Potencia.

## 1.2 CONTENIDO DEL PAQUETE INTERACTIVO.

El paquete interactivo, pretende dar al usuario (estudiante o profesional) una mejor herramienta acorde con las nuevas técnicas de solución para el estudio del flujo óptimo en Sistemas Eléctricos de Potencia, por lo cual se aborda los siguientes tópicos:

- Flujo Óptimo de Potencia General
- Flujo Óptimo de Potencia Activa
- Flujo Óptimo de Potencia Reactiva

a ser resueltos todos ellos por el Método de Newton propuesto en la referencia [16].

El programa de flujo óptimo, siguiendo el método iterativo de Newton-Raphson, calcula primero el valor de las variables que minimizan la función objetivo, posteriormente los flujos de potencia activa y reactiva en cada uno de los elementos que conforman el Sistema Eléctrico de Potencia, y finalmente las pérdidas del mismo.

La matriz admitancia de barra y las submatrices Jacobiano y Hessiano que resultan de la solución matemática del método empleado, son almacenadas aprovechando la característica dispersa de sus estructuras.

Para darle al paquete la característica de interactividad propiamente dicha, se ha desarrollado un Sistema de Base de Datos (siguiendo el proceso explicado y detallado en la referencia [7]), el mismo que utiliza el FOXBASE como administrador y se fundamenta en el concepto de Bases de Datos Relacionales. El Sistema, basado en menús que aparecen en la pantalla del computador, permite ingresar, obtener y manejar la información de manera rápida y ágil.

El paquete interactivo presenta cinco tipos de opciones:

- Selección del Sistema Eléctrico de Potencia.
- Mantenimiento de datos (creación, modificación, eliminación

y consulta de datos).

- Reportes de datos y resultados.
- Ejecución de programas especiales como son los de flujo de potencia y flujo óptimo.
- Información teórica sobre tópicos referentes al tema.

El paquete interactivo tiene adicionalmente la posibilidad de validar los datos ingresados, enviando mensajes de error cuando los valores se encuentran fuera de rangos especificados o adecuados.

### **1.3 VENTAJAS DE LA PROGRAMACION INTERACTIVA.**

Con la disponibilidad de programas computacionales interactivos se pretende dar un nuevo enfoque al estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia; proporcionando al usuario mediante niveles de ayuda como son los menús, submenús, mensajes de error y ayuda, la capacidad no solo de entender el modelo matemático sino también el de plantear y elaborar los datos, analizar resultados y tomar decisiones de control.

En general, la programación interactiva mantiene el interés del usuario facilitándole a que realice una serie de variaciones o cambios en los parámetros, probando estrategias de operación y visualizando las consecuencias de dichos cambios.

Por consiguiente, sin lugar a dudas, la programación interactiva es una modernización en la enseñanza que al ser aplicada en el estudio de Sistemas Eléctricos de Potencia permite al usuario profundizar de forma fácil en las bases teóricas del fenómeno en estudio, adquiriendo adicionalmente experiencia en el análisis y control.

## C A P I T U L O   I I

### EL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA

#### 2.1. MODELO DEL FLUJO DE POTENCIA.

##### 2.1.1. DEFINICION DEL FLUJO DE POTENCIA.

El flujo de potencia (o flujo de carga), es el nombre dado a la solución de un sistema de potencia en estado estacionario, bajo ciertas condiciones pre-establecidas de generación, carga y topología de la red [17].

El estudio del flujo de potencia de un sistema, es decir su solución, conduce básicamente a obtener las tensiones en cada una de las barras, así como, las potencias activas y reactivas que fluyen por cada uno de sus elementos y las pérdidas del mismo.

Adicionalmente, los estudios de flujo de potencia se los puede utilizar en análisis de [8],[11]:

- Influencia de la incorporación de nuevas cargas.
- Influencia de la pérdida de generadores y/o líneas de transmisión.
- La posición óptima del cambiador de taps de los transformadores.

- Planificación del futuro desarrollo y ampliación del sistema eléctrico de potencia.
- Condiciones óptimas de operación y de distribución de carga.

### 2.1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El problema del flujo de potencia consiste en determinar satisfactoriamente el estado estacionario de un sistema eléctrico, lo cual se logra definiendo cuatro cantidades eléctricas en cada una de sus barras, éstas son:

- Potencia activa neta ( $P_{NETA}$ )
- Potencia reactiva neta ( $Q_{NETA}$ )
- Magnitud de voltaje ( $V$ )
- Angulo de fase ( $\theta$ )

Tres tipos de barras son definidas en los cálculos de flujo de potencia y en cada barra dos de las cuatro cantidades eléctricas deben ser especificadas. Dependiendo de las cantidades especificadas, la clasificación de las barras es la siguiente:

- Barra  $V\theta$  .- Se la conoce como barra oscilante. En esta barra se especifica el voltaje en magnitud y ángulo.

$$E_k = V_k \angle \theta_k$$

- Barras PQ .- Llamadas también barras de carga. Se especifica en estas barras la potencia neta, tanto activa como reactiva.

$$S_{NETAK} = P_{NETAK} + j Q_{NETAK} = (PG_k - PC_k) + j(QG_k - QC_k)$$

- Barras PV .- Conocidas como barras de tensión controlada o de generación. Se define en estas barras la potencia activa neta y la magnitud de voltaje.

$$P_{NETAK} = PG_k + PC_k$$

$$V_k = |E_k|$$

Para resolver el flujo de potencia, se requiere definir las cantidades especificadas para cada tipo de barra y de la información del sistema en sí mismo; información que se logra con la matriz  $Y_{Barra}$ , matriz que es la descripción matemática de la conectividad del sistema y de la característica de sus elementos componentes [7].

En las ecuaciones de flujo de potencia, lo conocido no son las corrientes netas inyectadas sino las potencias netas inyectadas en cada barra. Por tal motivo el sistema de

ecuaciones a resolver es no lineal, haciendo que su cálculo no sea tan simple y directo como  $\bar{E} = Z\bar{I}$  o  $\bar{I} = Y\bar{E}$ .

### 2.1.3. PLANTEAMIENTO MATEMATICO DEL FLUJO DE POTENCIA.

Una representación monofásica por su equivalente unifilar de secuencia positiva es adecuada cuando un sistema de potencia es balanceado.

La ecuación que describe la presentación de un sistema de potencia balanceado es:

$$\bar{I}_B = Y_B * \bar{E}_B \quad (2.1.1)$$

en donde:

$\bar{I}_B$  = Vector de corrientes netas inyectadas al sistema.

$\bar{E}_B$  = Vector de voltajes de barra, con respecto a la barra de referencia.

$Y_B$  = Matriz admitancia de barra.

La matriz admitancia de barra puede ser formada tomando como referencia la barra de tierra. Los elementos de las matrices, entonces, incluirán los efectos de los elementos shunt a tierra tales como capacitores estáticos y reactores, efecto capacitivo de las líneas y elementos shunt de transformadores equivalentes. Cuando la tierra es incluida y seleccionada como nodo de



referencia, los voltajes de barra de la ecuación (2.1.1) son medidos con respecto a tierra [14].

Expresando matricialmente la ecuación (2.1.1) se tiene:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ E_n \end{vmatrix} \quad (2.1.2)$$

$$I_k = Y_{k1} * E_{k1} + Y_{k2} * E_2 + \dots + Y_{kn} * E_n$$

$$I_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} * E_i \quad k = 1, \dots, n. \quad (2.1.3)$$

La potencia neta aparente, inyectada en la barra k es por definición:

$$S_{NETAK} = E_k * I_k^{\dagger} \quad k = 1, \dots, N. \quad (2.1.4)$$

Conjugando esta última ecuación y combinándola con la ecuación (2.1.3), se obtiene:

$$P_{NETAK} - j Q_{NETAK} = E_k^{\dagger} \sum Y_{ki} E_i \quad (2.1.5)$$

En coordenadas polares:

$$E_i = V_i e^{j\theta_i} \quad (2.1.6)$$

$$Y_{ki} = |Y_{ki}| e^{-j\alpha_{ki}}$$

k= 1, ..., N.  
i= 1, ..., N.

Reemplazando (2.1.6) en (2.1.5) y separando esta ecuación en sus partes real e imaginaria :

$$P_{NETAK} = \sum_{i=1}^n V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ki}) \quad (2.1.7)$$

$$Q_{NETAK} = \sum_{i=1}^n V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ki}) \quad (2.1.8)$$

Si llamamos a los segundos términos  $P_k(V, \theta)$  y  $Q_k(V, \theta)$  respectivamente [17]:

$$P_k(V, \theta) - P_{NETAK} = 0 \quad (2.1.9)$$

$$Q_k(V, \theta) - Q_{NETAK} = 0 \quad (2.1.10)$$

Ahora considerando que un sistema tiene N barras, de las cuales S barras son de tensión controlada, M barras de carga y una barra oscilante, entonces:

$$N = M + S + 1 \quad (2.1.11)$$

con lo que se deberán plantear las siguientes ecuaciones:

- Una ecuación con la forma de la ecuación (2.1.9) para cada barra de tensión controlada, debido a que se conoce la  $P_{NETAK}$  y  $V_k$ .
- Para las barras de carga, en las que se conoce la  $P_{NETAK}$  y  $Q_{NETAK}$ , es necesario plantear dos ecuaciones de la forma indicada en (2.1.9) y (2.1.10) para cada una de ellas.

No se plantea ecuación alguna en la barra oscilante, puesto que en ésta se conoce  $V_k$  y  $\theta_k$  que son las incógnitas de un flujo de potencia.

En resumen para encontrar la solución del flujo de potencia es necesario plantear  $(2M + S)$  ecuaciones con  $(2M + S)$  incógnitas [17].

Una vez determinadas todas las incógnitas del sistema, esto es, voltajes en magnitud y ángulo en cada una de las barras, el estado eléctrico del mismo puede ser completamente determinado calculando el flujo de potencia activa y reactiva en cada uno de sus elementos, la potencia activa y reactiva de la barra oscilante, las potencias reactivas de las barras de tensión controlada y las pérdidas (ver Anexo N<sup>o</sup> 1).

Como se dijo anteriormente y se verifica en las expresiones (2.1.7) y (2.1.8), el sistema de ecuaciones a resolverse para el

flujo de potencia es no lineal, razón por la cual son necesarias técnicas iterativas para su solución.

#### 2.1.4. TECNICA NUMERICA DE NEWTON RAPHSON EN LA SOLUCION DEL FLUJO DE POTENCIA.

Sea la función:

$$f(x)=K \quad (2.1.12)$$

y  $x^0$  el valor inicial de  $x$ . La diferencia entre  $K$  y  $f(x^0)$  es el error llamado  $\epsilon$  indicado en la figura (2.1.1) y dado en la ecuación (2.1.13).

$$f(x^0) + \epsilon = K \quad (2.1.13)$$

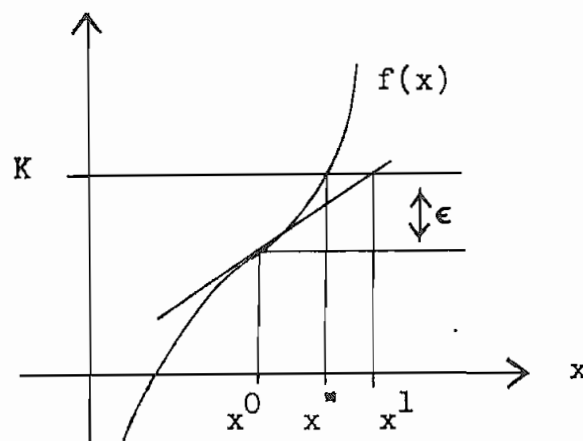


figura 2.1.1

Dirigir el error  $\epsilon$  a cero, haciendo ajustes  $\Delta x$  a la variable

independiente asociada con la función  $f(x)$ , es la idea base de la técnica de Newton Raphson.

Para dirigir el error a cero, se aplica el teorema de expansión en series de Taylor a la ecuación (2.1.12) alrededor de  $x^0$ , con lo que se obtiene:

$$f(x^0) + \frac{\delta f(x^0)}{\delta x} \Delta x + R = K \quad (2.1.14)$$

Bajo la condición de que  $x^0$  es muy próximo a  $x^k$  (solución), entonces  $R$  se lo puede despreciar y los ajustes  $\Delta x$  calcular mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta x = \left[ \frac{\delta f(x^0)}{\delta x} \right]^{-1} [K - f(x^0)] \quad (2.1.15)$$

Cuando resolvemos un flujo de potencia mediante esta técnica, lo que se hace es extender la técnica de Newton Raphson al caso multivariable (el caso multivariable es el llamado Método de Newton Raphson) [18].

El problema del flujo de potencia puede ser resuelto por el Método de Newton Raphson usando el grupo de ecuaciones no lineales (2.1.9) y (2.1.10), que expresan la potencia activa y reactiva en función de los voltajes de barra y en términos de la

matriz  $Y_{\text{barra}}$ . Esto nos permite plantear el grupo de ecuaciones lineales, que en forma polar para un sistema de N barras, donde M barras son de carga y S de tensión controlada, es:

$$\Delta P_k = \sum_{i=1}^n \frac{\delta P_k}{\delta \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_{i=1}^n \frac{\delta P_k}{\delta V_i} \Delta V_i \quad (2.1.16)$$

$k = 2, \dots, N.$

$$\Delta Q_k = \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_k}{\delta \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_{i=1}^n \frac{\delta Q_k}{\delta V_i} \Delta V_i \quad (2.1.17)$$

$k = s+2, \dots, N.$

Representando matricialmente el sistema de ecuaciones:

$$\begin{vmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{Q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta \bar{P} / \delta \bar{\theta} & \delta \bar{P} / \delta \bar{V} \\ \delta \bar{Q} / \delta \bar{\theta} & \delta \bar{Q} / \delta \bar{V} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{V} \end{vmatrix} \quad (2.1.18)$$

$$\bar{S} = J * \bar{E}$$

donde J es la matriz JACOBIANO.

Al resolver el conjunto de ecuaciones lineales (2.1.18), a partir de valores iniciales, se determinan las correcciones E que actualizan los valores de voltaje de barra de la iteración anterior así:

$$\theta_k^{(r+1)} = \theta_k^{(r)} + \Delta \theta_k^{(r)}$$

$$V_k^{(r+1)} = V_k^{(r)} + \Delta V_k^{(r)}$$

$$k = 2, \dots, N.$$

Con los nuevos valores de voltajes de barra se forma nuevamente el conjunto de ecuaciones (2.1.18), repitiéndose el proceso hasta que las correcciones sean menores o iguales a una tolerancia.

## 2.2. MODELO DEL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON.

### 2.2.1. DEFINICION DEL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA.

Es la solución de un sistema eléctrico de potencia, que optimiza una función objetivo específica tal como costo de combustible, pérdidas de la red, etc., cumpliendo al mismo tiempo un conjunto de restricciones impuestas por el equipo y condiciones de operación.

### 2.2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En optimización, un problema de la vida real, es usualmente representado con una función a ser minimizada o maximizada sujeta a las numerosas restricciones que se hallen. Las restricciones pueden ser otras funciones o condiciones simples tales como límites sobre las variables, que necesariamente deben ser usadas.

En problemas de flujos óptimos de potencia (F.O.P.), es justamente la función matemática a optimizar (minimizar o maximizar) denominada función objetivo, la que da el nombre a la optimización. Para propósitos de este trabajo las optimizaciones a estudiarse serán:

- Flujo óptimo de potencia activa (despacho económico).
- Flujo óptimo de potencia reactiva (minimización de pérdidas).
- Flujo óptimo de potencia general (despacho económico y minimización de pérdidas a la vez).

Como se dijo, estas funciones objetivo están sujetas a restricciones, que en forma general para el caso de F.O.P. son:

- a) Restricciones de desigualdad. Pertenecen a este grupo los límites sobre las variables que para el F.O.P. de Newton, dependiendo del caso de optimización, pueden ser: potencias activas de generación, ángulos de voltaje, magnitudes de voltajes, cambiadores de taps, y funciones especiales como límites de generación de potencia reactiva, transmisión de potencia por elementos, etc.
- b) Restricciones de igualdad. Este grupo lo conforman básicamente las ecuaciones de flujo de potencia.



La función objetivo puede ser una función no lineal de todas o algunas de las variables anteriormente mencionadas, y sabiendo de ante mano que las ecuaciones de flujo de potencia son funciones no lineales de voltajes, ángulos, y como se detalla en el anexo No. 4, de las relaciones de taps de los transformadores; entonces el problema de F.O.P. es no lineal, requiriéndose por tanto de métodos de optimización iterativos para su solución.

El método utilizado en el presente trabajo hace uso de la técnica de optimización de los multiplicadores de Lagrange, del teorema de Kuhn y Tucker, y de la técnica numérica de Newton Raphson, con el objetivo de obtener iterativamente, correcciones sobre las variables que sean del caso, hasta llegar a un punto de operación del sistema de potencia en el cual, además de cumplir con las restricciones, las funciones objetivo planteadas tienen un valor óptimo. Adicionalmente, debido a que en sistemas eléctricos de potencia es muy común trabajar con matrices porosas o dispersas, se usará técnicas que exploten esta porosidad (Ej: Técnica de Bifactorización) y programación apropiada, condiciones sin las cuales el método de optimización sería degradado y no muy eficaz.

Finalmente, antes de pasar al detalle matemático del método se debe mencionar la importancia del F.O.P. como herramienta poderosa y necesaria en la planificación y operación de Sistemas

Eléctricos de Potencia.

### 2.2.3. DESARROLLO MATEMATICO Y FORMULACION DEL MODELO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON.

En general, la optimización consiste en minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a restricciones. En el caso del presente trabajo la optimización es una minimización para los siguientes tres tipos de estudios:

- Flujo óptimo para despacho económico
- Flujo óptimo para minimización de pérdidas
- Flujo óptimo general

El F.O.P. por el método de Newton será descrito en notación matemática detallada con ayuda de los anexos, de tal forma de proporcionar en esta sección una percepción clara de los aspectos básicos.

Sea el sistema de potencia de  $N$  barras, donde se tiene una barra oscilante,  $M$  barras de carga, y  $S$  barras de generación en las que a su vez se hace la siguiente división:

- $S_1$  barras de generación (PV), no asociadas a condensadores sincrónicos.
- $(S-S_1)$  barras de generación (PV), asociadas a condensadores

sincrónicos.

La división es debido a la necesidad de saber que unidades tienen capacidad de generación de potencia activa.

En este sistema la organización de las barras, por facilidad de programación y de explicación, es la que se hace a continuación:

- $BARRA_K$        $K=1$                       Barra oscilante (OSC).
- $BARRAS_K$        $K=2, \dots, S+1$  Barras de generación (PV) no asociadas a condensadores sincrónicos.
- $BARRAS_K$        $K=S+2, \dots, S+1$  Barras de generación (PV) asociadas a condensadores sincrónicos.
- $BARRAS_K$        $K=S+2, \dots, N$  Barras de carga (PQ).

Adicionalmente, el sistema de potencia puede tener entre sus elementos serie de interconexión  $L$  transformadores con cambiadores de taps.

### 2.2.3.1. LAS VARIABLES DEL PROBLEMA.

En el método de optimización descrito en la referencia [17] las variables de un problema de optimización son clasificadas como sigue:

- Variables independientes, de control o superbásicas. Simbolizadas típicamente como U, cuyos valores son controlables directamente.
- Variables dependientes, de estado o básicas. Los valores de estas variables dependen de los valores de las variables independientes. Ellas son típicamente simbolizadas como X.
- Variables fijas, constantes o no básicas. Estas son variables de las clases anteriores que han alcanzado un límite superior o inferior y son mantenidas en ese límite.

En el F.O.P. por el método de Newton esta clasificación o distinción no es importante, pues todas las variables (dependientes, independientes o fijas) sin distinción de su clase son procesadas idénticamente.

Por la similitud de cálculos de los tres tipos de flujo óptimo en estudio se ha considerado utilizar el mismo vector de variables; pero esto no debe llevar a la idea errónea de que el grupo de variables es el mismo sea cual sea el tipo de optimización, pues dependiendo del caso, ciertas variables permanecerán fijas como constantes desde el inicio hasta el final del algoritmo.

El grupo completo de variables para cualquier tipo de flujo óptimo estudiado en este trabajo forman el vector " $\bar{Y}$ " que es

ordenado como sigue:

$$\bar{Y}^T = [ PG_k, t_{jm}, \theta_1, V_1, \dots, \theta_i, V_i ] \quad (2.2.1)$$

K= 1, ..., S1+1.  
cualquier j, m  
i= 1, ....., N.

en donde:

$PG_k$  Es la potencia activa de generación de la barra oscilante y barras PV no asociadas a condensadores sincrónicos.

$t_{jm}$  Relaciones de taps de los transformadores existentes.

$\theta_k$  Angulos de fase de todas las barras del sistema.

$V_k$  Magnitudes de voltaje de todas las barras.

A continuación, para cada caso de optimización, se especifica los elementos del vector de variables " $\bar{Y}$ " a mantenerse constantes durante todo el proceso.

a) Variables fijas para el flujo óptimo de potencia general.-

El flujo óptimo de potencia activa, que realiza la repartición de la potencia total de carga entre las diferentes unidades de generación con el objeto de obtener la mayor economía en el funcionamiento del sistema, y el flujo óptimo de potencia reactiva, el cual minimiza las pérdidas del sistema distribuyendo el flujo de reactivos eficientemente mediante una configuración

adecuada de voltajes en las barras; se combinan en un mismo algoritmo denominado flujo óptimo general. Debido al alcance y necesidades de este algoritmo, como se plantea, todas las variables del vector " $\bar{Y}$ " son libres para tomar los valores que el proceso de solución lo requiera.

Sólo un ángulo de fase, como sucede también en flujos de potencia, debe mantenerse constante a fin de tener una referencia angular. Generalmente el ángulo tomado como referencia es el de la barra oscilante, por este motivo el único elemento a mantenerse fijo durante este proceso de optimización es el ángulo  $\theta_1$  haciéndole igual a cero.

b) Variables fijas para el flujo óptimo de potencia activa.-

Para este caso, los elementos del vector " $\bar{Y}$ " a mantenerse fijos durante todo el proceso son:

- $\theta_1$                               Ángulo de la barra oscilante, tomado como referencia.
- $V_i$        $i = 1, \dots, S1+1$       Las magnitudes de los voltajes complejos de las barras de generación y oscilante.
- $t_{jm}$       cualquier  $j, m$       Taps de los transformadores existentes.

c) VARIABLES FIJAS PARA EL FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA REACTIVA.-

Para este caso, los elementos del vector " $\bar{Y}$ " que permanecen fijos durante todo el proceso son:

- $\theta_1$                                    Angulo de la barra oscilante tomado como referencia angular.
- $PG_k$        $k= 2, \dots, S+1$       Potencia activa generada en la barra K, excluyendo la de la barra oscilante.

La potencia de la barra oscilante no se incluye en los elementos a permanecer fijos, puesto que es la barra oscilante la que debe ajustarse a los requerimientos de la carga y pérdidas del sistema.

### 2.2.3.2. LAS FUNCIONES OBJETIVO.

En general, la función objetivo "F" podría ser una función lineal, cuadrática, u órdenes superiores de cualquiera o todas las variables del vector " $\bar{Y}$ ", es decir pueden tenerse muchas diferentes formas de funciones "F" a ser usadas en aplicaciones de F.O.P. por el método de Newton. Pero no todas son utilizadas, porque de la configuración de la función objetivo dependerá que se genere mayor o menor cantidad de elementos diferentes de cero en la matriz de segundas derivadas "W" más adelante detallada,

provocando la disminución en la eficiencia del método [16]. Por este motivo es necesario el planteamiento de una adecuada función objetivo.

A continuación se especifican las "F" a ser utilizadas:

a) Función objetivo para flujo óptimo general.-

En este caso, el objetivo es minimizar costos de generación mediante el adecuado reparto de carga entre las diferentes unidades de generación, manteniendo valores adecuados de voltaje en las barras que minimicen además las pérdidas del sistema. Por ello una función objetivo generalmente asumida para este estudio es la suma de las funciones de costo de combustible de cada uno de los generadores de potencia activa, así:

$$F(\bar{Y}) = \sum_{k=1}^{S1+1} F_k(\bar{Y}) \quad (2.2.2)$$

en donde  $F_k(\bar{Y})$  es la función de costo de combustible del generador de la barra  $k$ , función que tiene la siguiente estructura matemática:

$$F_k(\bar{Y}) = a_k PG_k^2 + b_k PG_k + c_k \quad (2.2.3)$$

(Explicación de como se obtiene esta función en el anexo No. 2).



b) Función objetivo para flujo óptimo de potencia activa.-

Puesto que en este caso se debe realizar despacho económico, entonces, la función objetivo asumida será la misma que la de flujo óptimo general ( ecuación (2.2.2) ). La diferencia está en los elemento del vector de variables " $\bar{Y}$ " que deben permanecer fijos durante todo el proceso.

c) Función objetivo para flujo óptimo de potencia reactiva.-

La potencia de generación de la barra oscilante debe ajustarse a ecuación de equilibrio (2.2.4), debido a que no se puede determinar con anterioridad las pérdidas del sistema.

$$PG_1 = PL + \Sigma PC + \Sigma PG \quad (2.2.4)$$

en donde:

- |                 |  |
|-----------------|--|
| PG <sub>1</sub> | Es la potencia de generación de la barra oscilante.                        |
| - PL            | Es la potencia de pérdidas del sistema.                                    |
| - $\Sigma PC$   | Es la carga total del sistema.   |
| - $\Sigma PG$   | Es la potencia total de generación, excluyendo a la de la barra oscilante. |

En la ecuación (2.2.4) los términos  $\Sigma PC$  y  $\Sigma PG$  permanecen

fijos, el uno por ser dato del problema y el otro por definición del vector " $\bar{Y}$ " para este tipo de flujo, respectivamente. Según esto, minimizar las pérdidas del sistema significa precisamente minimizar la potencia activa de generación de la barra oscilante, por ello la función objetivo para este caso (minimización de pérdidas) será:

$$F(\bar{Y}) = PG_1 \quad (2.2.5)$$

### 2.2.3.3. LAS RESTRICCIONES.

Las restricciones son el conjunto de condiciones impuestas por el equipo y la operación de un sistema eléctrico de potencia. Estas restricciones reducen el espacio amplio de posibles soluciones a un espacio más pequeño y a la vez técnicamente posible.

En esta sección lo que se hará primero es plantear en forma general las restricciones a tomarse en cuenta y sus expresiones matemáticas que las representan; para posteriormente definir cuales de ellas forman parte del conjunto de restricciones en cada caso particular de optimización.

Las restricciones en problemas de optimización pueden ser clasificadas de diferentes formas, pero para propósitos explicativos posteriores se las dividirá en:

- Restricciones de desigualdad sobre variables.
- Restricciones de igualdad funcional.
- Restricciones de desigualdad funcional.
- Restricciones de desigualdad sobre variables.-

Estas restricciones pueden ser, según el caso de optimización, los límites superior o inferior sobre las variables del vector " $\bar{Y}$ " como se indica a continuación:

$$\begin{aligned}
 PG_k^{\min} &\leq PG_k \leq PG_k^{\max} \\
 t_{j0}^{\min} &\leq t_{j0} \leq t_{j0}^{\max} \\
 V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max}
 \end{aligned}
 \tag{2.2.6}$$

- Restricciones de igualdad funcional.-

Las restricciones de igualdad funcional son aquellas que presentan como característica el estar siempre activas<sup>1</sup>. Las ecuaciones de flujo de potencia neta son un buen ejemplo de este tipo de restricciones si se toma en cuenta que el sumatorio de potencias en un nodo o barra debe ser igual a cero en la solución.

---

<sup>1</sup>Una restricción sobre una variable o función es activa, cuando el algoritmo de solución la obliga a tomar el valor de un límite violado o un valor previamente establecido.

Para plantear la estructura matemática de estas restricciones se utilizará las ecuaciones (2.1.7) y (2.1.8), deducidas en el numeral (2.1.3), así:

$$P_{NETAK} = \sum_{i=1}^n V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ki}) \quad (2.2.7)$$

$$Q_{NETAK} = - \sum_{i=1}^n V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ki}) \quad (2.2.8)$$

si se llama a los segundos términos de estas ecuaciones  $P_k(\bar{Y})$  y  $Q_k(\bar{Y})$  respectivamente y sabiendo que la potencia neta activa como reactiva es por definición:

$$P_{NETAK} = PG_k + PC_k \quad (2.2.9)$$

$$Q_{NETAK} = QG_k + QC_k \quad (2.2.10)$$

entonces se escribirá:

$$0 = P_k(\bar{Y}) - PG_k - PC_k \quad (2.2.11)$$

$$0 = Q_k(\bar{Y}) - QG_k - QC_k \quad (2.2.12)$$

Estas dos últimas ecuaciones son verdaderas cuando se ha llegado a la solución del sistema eléctrico. Pero como se indicó anteriormente, la técnica de Newton-Raphson parte de valores iniciales arbitrariamente cercanos a la solución de un flujo de

potencia, los mismos que deben ser corregidos iterativamente. Por ello en forma general las ecuaciones (2.2.11) y (2.2.12) se las expresar como sigue:

$$CP_k = P_k(\bar{Y}) - PG_k - PC_k \quad (2.2.13)$$

$$CQ_k = Q_k(\bar{Y}) - QG_k - QC_k \quad (2.2.14)$$

en donde:

- $CP_k$  Es la ecuación de incrementos de potencia activa en la barra K.
- $CQ_k$  Es la ecuación de incrementos de potencia reactiva en la barra K.
- $PG_k$  Es la potencia activa de generación en la barra K.
- $QG_k$  Es la potencia reactiva de generación en la barra K.
- $PC_k$  Es la potencia activa de carga en la barra K.
- $QC_k$  Es la potencia reactiva de carga en la barra K.

Las ecuaciones (2.2.13) y (2.2.14) en el caso de las barras de carga se las modificará como sigue:

$$CP_k = P_k(\bar{Y}) - PC_k \quad (2.2.15)$$

$$CQ_k = Q_k(\bar{Y}) - QC_k \quad (2.2.16)$$

- Restricciones de desigualdad funcional. -

Por motivos de utilidad se ha tomado en cuenta la potencia reactiva de los generadores y los desfases angulares entre barras interconectadas como el grupo de restricciones de desigualdad funcional.

A continuación es presentado el planteamiento matemático de estas restricciones:

- La potencia reactiva de los generadores es restringida por el límite superior e inferior, así:

$$Q_{G_k}^{\min} \leq Q_{G_k} \leq Q_{G_k}^{\max} \quad (2.2.17)$$

Si  $Q_k$  va más allá de los valores permitidos, entonces necesita forzarse, lo que se logra cuando en la ecuación (2.2.14),  $Q_{G_k}$  toma el valor del límite violado.

- El flujo de potencia a través de una línea conectada entre las barras (k) y (m) puede ser mantenido aproximadamente dentro límites especificados (por motivos de operación por ejemplo), haciendo uso de la diferencia angular ( $\theta_k - \theta_m$ ) [15].

La función para forzar la diferencia angular ( $\theta_k - \theta_m$ ), a un

valor dado por  $\theta_{kn}$  es [15]:

$$\mu\theta_{kn} = (S_{\theta_{kn}}/2) (\theta_k - \theta_n - \theta_{kn}) \quad (2.2.18)$$

Una vez planteadas las restricciones a ser utilizadas y su forma matemática, lo que se hará a continuación es especificar de manera concisa el conjunto de restricciones para cada caso de optimización:

a) Restricciones para el flujo óptimo de potencia general.-

- Las restricciones de desigualdad para este caso son:

$$\begin{aligned} PG_k^{\min} &\leq PG_k \leq PG_k^{\max} && k=1, \dots, S1+1. \\ t_{jm}^{\min} &\leq t_{jm} \leq t_{jm}^{\max} && \text{cualquier } j, m \\ V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} && i=1, \dots, N. \end{aligned}$$

- Las restricciones de igualdad funcional son:

$$\begin{aligned} CP_k &= P_k(\bar{Y}) - PC_k && k=S+2, \dots, N. \\ CQ_k &= Q_k(\bar{Y}) - QC_k && k=S+2, \dots, N. \\ CP_k &= P_k(\bar{Y}) - PG_k - PC_k && k=1, \dots, S1+1. \end{aligned}$$

- Las restricciones de desigualdad funcional que pueden ser activas o no son:

$$CQ_k = Q_k(\bar{Y}) - QG_k - QC_k \quad k=1, \dots, S+1.$$

$$\mu_{\theta_{km}} = (S_{\theta_{km}}/2) (\theta_k - \theta_m - \theta_{km}) \quad \begin{array}{l} k \neq m \\ \text{barra } k \text{ y } m \\ \text{interconectadas} \end{array}$$

b) Restricciones para el flujo óptimo de potencia activa.-

- Las restricciones de desigualdad sobre variables para este caso son:

$$PG_k^{\min} \leq PG_k \leq PG_k^{\max} \quad k=1, \dots, S+1.$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad k=S+2, \dots, N.$$

- Las restricciones funcionales de igualdad y desigualdad son las mismas que para el caso de flujo óptimo general.

c) Restricciones para el flujo óptimo de potencia reactiva.-

- Las restricciones de desigualdad sobre variables para este caso son:

$$PG_k^{\min} \leq PG_k \leq PG_k^{\max} \quad k=1$$

$$t_{jm}^{\min} \leq t_{jm} \leq t_{jm}^{\max} \quad \text{cualquier } j, m$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i=1, \dots, N.$$



- Las restricciones funcionales de igualdad y desigualdad son las mismas que para el caso de flujo óptimo general.

#### 2.2.3.4. MODELO GENERAL DE OPTIMIZACION POR EL METODO DE NEWTON.

A continuación se presenta una explicación detallada de como formular el sistema lineal de ecuaciones para la versión de F.O.P. por el método de Newton.

Una vez planteadas las variables, la función objetivo y las restricciones para cada uno de los casos de optimización propuestos, el modelo general se expresa como sigue:

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimizar:} & F(\bar{Y}) \\
 \text{sujeta a:} & CP_k = 0 \\
 & CQ_k = 0 \\
 & k=1, \dots, N.
 \end{array} \quad (2.2.19)$$

Para resolver el problema se utiliza el método clásico de optimización de los multiplicadores de Langrange; esto permite formular la función ampliada, que para cualquiera de los casos de optimización planteados se expresa:

$$L = F(\bar{Y}) - \sum_{i=1}^N \tau p_i CP_i - \sum_{i=1}^N \tau q_i CQ_i \quad (2.2.20)$$

en donde:

|              |   |
|--------------|---|
| $F(\bar{Y})$ | Es la función objetivo.                       |
| $\tau p_i$   | Es el multiplicador de Lagrange para $CP_i$ . |
| $\tau q_i$   | Es el multiplicador de Lagrange para $CQ_i$ . |
| $N$          | Es el número de barras del sistema.           |

Esta función ampliada "L", debe cumplir con las siguientes condiciones en el mínimo:

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{Y}} = \bar{0} \quad (2.2.21)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{\tau p}} = \bar{0} \quad (2.2.22)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{\tau q}} = \bar{0} \quad (2.2.23)$$

Estas ecuaciones, ampliadas por medio de las series de Taylor con el fin de que sean resueltas por el método de Newton, forman un sistema lineal de ecuaciones que minimizan la función ampliada. Las ecuaciones en forma matricial se expresan:

$$\begin{vmatrix} H(\bar{Y}, \bar{\tau}) & - J^T(\bar{Y}) \\ - J(\bar{Y}) & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \bar{Y} \\ \Delta \bar{\tau} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} - \bar{g}(\bar{Y}) \\ - \bar{g}(\bar{\tau}) \end{vmatrix} \quad (2.2.24)$$

en donde:

$H(\bar{Y}, \bar{\tau})$  Es la matriz Hessiano.

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $J(\bar{Y})$          | Es la matriz Jacobiano.                     |
| $\bar{g}(\bar{Y})$    | Es el gradiente con respecto a $\bar{Y}$    |
| $\bar{g}(\bar{\tau})$ | Es el gradiente con respecto a $\bar{\tau}$ |

(La demostración de la ecuación (2.2.24), véase en el anexo No. 5).

La ecuación (2.2.24) se puede expresar más concisamente sustituyendo por símbolos simples las matrices y vectores, así:

$$W \Delta \bar{Z} = - \bar{g} \quad (2.2.25)$$

La ecuación matricial (2.2.24) es reordenada con el propósito de facilitar el cálculo de los elementos de la matriz "W" y vector "-g", y hacer más fácil la factorización de la matriz "W" [16].

El ordenamiento utilizado de la ecuación (2.2.25), es indicado esquemáticamente en la figura (2.2.2) con ayuda del sistema eléctrico presentado en la figura (2.2.1) [16].

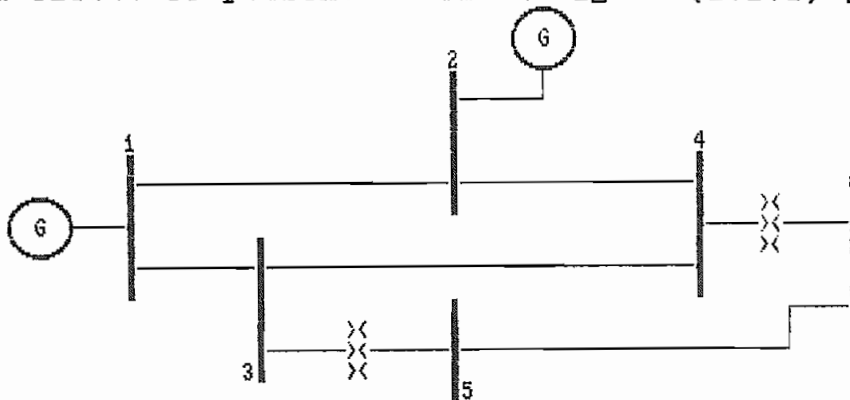


Figura 2.2.1

|   | W                |                        |                              |                              |                              |                              | $\Delta \bar{z}$             | $-\bar{g}$   |   |
|---|------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|---|
|   | 0                | 1                      | 2                            | 3                            | 4                            | 5                            | 6                            |  |   |
| 0 | H<br>H<br>H<br>H | 1                      | 1                            | HHJJ                         | HHJJ                         | HHJJ                         | HHJJ                         | $\Delta P1$<br>$\Delta P2$<br>$\Delta t35$<br>$\Delta t46$               | $\delta L/\delta P1$<br>$\delta L/\delta P2$<br>$\delta L/\delta t35$<br>$\delta L/\delta t46$                    |
| 1 |                  | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0 | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 |                              |                              |                              | $\Delta \theta 1$<br>$\Delta V1$<br>$\Delta \tau p1$<br>$\Delta \tau q1$ | $\delta L/\delta \theta 1$<br>$\delta L/\delta V1$<br>$\delta L/\delta \tau p1$<br>$\delta L/\delta \tau q1$      |
| 2 |                  |                        | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | 0000<br>0000<br>0000<br>0000 | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 |                              |                              | $\Delta \theta 2$<br>$\Delta V2$<br>$\Delta \tau p2$<br>$\Delta \tau q2$ | $\delta L/\delta \theta 2$<br>$\delta L/\delta V2$<br>$\delta L/\delta \tau p2$<br>$\delta L/\delta \tau q2$      |
| 3 |                  |                        |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 |                              | $\Delta \theta 3$<br>$\Delta V3$<br>$\Delta \tau p3$<br>$\Delta \tau q3$ | =<br>$\delta L/\delta \theta 3$<br>$\delta L/\delta V3$<br>$\delta L/\delta \tau p3$<br>$\delta L/\delta \tau q3$ |
| 4 |                  |                        |                              |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | 0000<br>0000<br>0000<br>0000 | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 | $\Delta \theta 4$<br>$\Delta V4$<br>$\Delta \tau p4$<br>$\Delta \tau q4$ | $\delta L/\delta \theta 4$<br>$\delta L/\delta V4$<br>$\delta L/\delta \tau p4$<br>$\delta L/\delta \tau q4$      |
| 5 |                  |                        |                              |                              |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | HHJJ<br>HHJJ<br>JJ00<br>JJ00 | $\Delta \theta 5$<br>$\Delta V5$<br>$\Delta \tau p5$<br>$\Delta \tau q5$ | $\delta L/\delta \theta 5$<br>$\delta L/\delta V5$<br>$\delta L/\delta \tau p5$<br>$\delta L/\delta \tau q5$      |
| 6 |                  |                        |                              |                              |                              |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | $\Delta \theta 6$<br>$\Delta V6$<br>$\Delta \tau p6$<br>$\Delta \tau q6$ | $\delta L/\delta \theta 6$<br>$\delta L/\delta V6$<br>$\delta L/\delta \tau p6$<br>$\delta L/\delta \tau q6$      |

Figura 2.2.2 .- Ordenamiento utilizado del sistema lineal.

El sistema lineal  $W \Delta \bar{z} = -\bar{g}$  consiste básicamente de tres partes principales que son: el vector gradiente " $-\bar{g}$ ", la matriz Hessiano "H", y la matriz Jacobiano "J", cuyos elementos serán examinados a continuación:

a) Elementos del vector gradiente " $-\bar{g}$ ".-

El vector gradiente " $-\bar{g}$ ", está compuesto por las primeras derivadas parciales de la forma  $\delta L/\delta Y_i$  o  $\delta L/\delta \tau_i$ , como se indica en la figura No. (2.2.2). Como ejemplo de un elemento del vector gradiente " $-\bar{g}$ " se presentará la expresión que evalúa  $\delta L/\delta P_2$ :

$$\begin{aligned} \frac{\delta L}{\delta P_2} &= \frac{\delta}{\delta P_2} \{ F_2(\bar{Y}) - \tau P_2 C P_2 \} \\ &= a_2 P G_2 + b_2 + \tau P_2 \end{aligned}$$

En el anexo No. 6 se indica lo que involucran las evaluaciones numéricas de cada uno de estos elementos y para cada tipo de optimización.

b) Elementos de la matriz Jacobiano.-

Los elementos de la matriz Jacobiano "J" son de la forma:

$$\frac{\delta^2 L}{\delta Y_i \delta \tau_j} = \frac{\delta^2 L}{\delta \tau_j \delta Y_i} \quad (2.2.26)$$

Como ejemplo de un elemento de la matriz "J" se presentará la expresión que evalúa  $\delta L/(\delta \tau_2 \delta \theta_3)$ :

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_3 \delta \tau_2} = \frac{\delta}{\delta \theta_3} (P C_3) = \frac{\delta P_3(\bar{Y})}{\delta \theta_3}$$

En el anexo No. 6 se indica lo que involucran las evaluaciones numéricas de cada uno de estos elementos y para cada tipo de optimización.

c) Elementos de la matriz Hessiano.-

Los elementos de la matriz Hessiano "H" son de la forma:

$$\frac{\delta^2 L}{\delta Y_i \delta Y_j} = \frac{\delta^2 L}{\delta Y_j \delta Y_i} \quad (2.2.27)$$

Como ejemplo de un elemento de la matriz "J" se presentará la expresión que evalúa  $\delta L / \delta P_2^2$  :

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P_3^2} = \frac{\delta^2}{\delta P_3^2} (F_3(\bar{Y}) - \tau P_3 C P_3(\bar{Y})) = 2 * a_3$$

En el anexo No. 6 se indica lo que involucran las evaluaciones numéricas de cada uno de estos elementos y para cada tipo de optimización.

### 2.3. ALGORITMO PARA LA SOLUCION DEL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON.

Antes de entrar al algoritmo propiamente dicho, es necesario recordar que hasta aquí se tiene ignorado la forma en que la ecuación matricial  $W\Delta\bar{Z} = -\bar{g}$ , es afectada por el grupo activo de restricciones. La disposición de la figura No.(2.2.2) implica que para el ejemplo de seis barras todas las variables son no restringidas y todas las ecuaciones de incrementos (que son las ecuaciones de flujo de potencia) son activas. Sin embargo esta condición nunca ocurre en la práctica. Cada solución del sistema matricial debe corresponder a un particular grupo activo de restricciones, en el cual algunas variables son restringidas y algunas ecuaciones de incrementos son libres. También es ignorada la forma de activar y desactivar restricciones sobre variables y funciones.

Por ello a continuación se detallará el grupo activo para cada caso de optimización en estudio y la técnica de penalización utilizada, para forzar dentro del algoritmo, una determinada restricción.

### **2.3.1. EL GRUPO ACTIVO DE RESTRICCIONES.**

El grupo activo de restricciones está formado por aquellas variables y funciones cuyos valores son fijados desde el inicio del algoritmo, y por las variables y funciones que podrían violar los límites de sus restricciones de desigualdad si sus límites

fueran no forzados.

A continuación se indicará el grupo activo para los casos de optimización en estudio; considerando el sistema de potencia de N barras, utilizado en anteriores secciones.

### 2.3.1.1. EL GRUPO ACTIVO PARA EL FLUJO OPTIMO GENERAL.

Los valores de las siguientes variables y funciones son forzadas incondicionalmente y están siempre en el grupo activo de restricciones:

a) El ángulo de referencia  $\theta_1 = 0$ .

b) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia tanto activa como reactiva en las barras de carga.

$$CP_i \text{ y } CQ_i \quad i=S+2, \dots, N.$$

c) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia activa en las barras de generación.

$$CP_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

Dependiendo del estado del sistema, las siguientes variables y funciones pueden ser activas o no:

d) Las variables que pueden violar uno de sus límites.



$$\begin{array}{ll}
 PG_i & i=1, \dots, S+1. \\
 t_{jm} & \text{cualquier } j, m. \\
 V_i & i=1, \dots, N.
 \end{array}$$

- e) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia reactiva de las barras de generación, en donde la inyección de reactivos por parte de los generadores podrían violar uno de sus límites.

$$CQ_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

- f) Las ecuaciones que limitan la diferencia angular entre barras interconectadas.

$$\mu_{km} = (S_{\theta_{km}}/2)(\theta_k - \theta_m - \theta_{km})^2 \quad \begin{array}{l} \text{cualquier } k, m \\ k \neq m \end{array}$$

### 2.3.1.2. EL GRUPO ACTIVO PARA EL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA ACTIVA.

- a) El ángulo de referencia  $\theta = 0$ .
- b) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia tanto activa como reactiva en las barras de carga.

$$CP_i \quad \text{y} \quad CQ_i \quad i=S+2, \dots, N.$$

- c) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia activa en las barras de generación.

$$CP_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

d) Los taps de los transformadores  $t_{jm}$  fijados a un valor predeterminado.

e) Los módulos de los voltajes de las barras de generación, fijados a un valor predeterminado.

$$V_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

Dependiendo del estado del sistema, las siguientes variables y funciones pueden ser activas o no:

f) Las variables que pueden violar uno de sus límites.

$$P_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

$$V_i \quad i=S+2, \dots, N.$$

g) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia reactiva de las barras de generación, en donde la inyección de reactivos por parte de los generadores podrían violar uno de sus límites.

$$CQ_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

h) Las ecuaciones que limitan la diferencia angular entre barras interconectadas.

$$\mu_{\theta_{km}} = (S_{\theta_{km}}/2)(\theta_k - \theta_m - \theta_{km})^2 \quad \text{cualquier } k, m \\ k \neq m$$

### 2.3.1.3. EL GRUPO ACTIVO PARA EL FLUJO OPTIMO DE POTENCIA REACTIVA.

- a) El ángulo de referencia  $\theta = 0$ .
- b) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia tanto activa como reactiva en las barras de carga.

$$CP_i \text{ y } CQ_i \quad i=S+2, \dots, N.$$

- c) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia activa en las barras de generación.

$$CP_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

- d) Las variables  $P_i$ , es decir las potencias de generación de las barras PV no asociadas a condensadores sincrónicos; excluida la oscilante.

$$PG_i \quad i=2, \dots, S+1$$

Dependiendo del estado del sistema, las siguientes variables y funciones pueden ser activas o no:

- e) Las variables que pueden violar uno de sus límites.

$$t_{j,m} \quad \text{cualquier } j, m$$

$$j \neq m$$

$$V_i \quad i=1, \dots, N.$$

f) Las ecuaciones de incrementos de flujo de potencia reactiva de las barras de generación, en donde la inyección de reactivos por parte de los generadores podrían violar uno de sus límites.

$$CQ_i \quad i=1, \dots, S+1.$$

g) Las ecuaciones que limitan la diferencia angular entre barras interconectadas.

### 2.3.2. TECNICA DE PENALIZACION.

La técnica de penalización es a través de las funciones de penalización cuadrática. Estas son añadidas a la función objetivo para forzar un determinado grupo activo.

#### 2.3.2.1. PENALIZACION DE VARIABLES.

La forma simple de las funciones de penalización, más adelante indicada, es para hacer cumplir una restricción sobre una variable o para mantenerla en un predeterminado valor.

En el caso de que una variable quiera violar su límite superior o inferior, si ésta fuera libre, el algoritmo de F.O.P. deberá cambiar el valor de esa variable al relevante límite y retener este ahí. La variable entonces, es una constante, sea temporal o permanentemente.

Cuando una variable es mantenida constante en un límite, su corrección sobre cada subsiguiente iteración debe ser cero. Esto requiere que la ecuación  $W \Delta \bar{Z} = -\bar{g}$  sea modificada.

Como un ejemplo se asume que la variable  $Y_i$  tiene un valor  $Y_i^0$ , y  $Y_i^0$  es mayor que  $Y_i^{\max}$ . En la solución de  $W \Delta \bar{Z} = -\bar{g}$  para la próxima iteración se requiere que la corrección  $\Delta Y_i^0$  sea tal que mueva el valor de la variable a su límite superior.

La forma de forzar esto es añadiendo una función de penalización cuadrática para  $Y_i$  a la función objetivo de  $L$  [16].

Dejando que  $\mu_{Y_i}$  simbolice la función de penalización, entonces:

$$\mu_{Y_i} = (S_{Y_i}/2) (Y_i - Y_i^{\text{limite}})^2 \quad (2.3.1)$$

en donde  $S_{Y_i}$  es el factor de ponderación de la penalización.

Si la función de penalización  $\mu_{Y_i}$  es añadida a  $L$  y se tiene en cuenta en la evaluación de "W" y " $-\bar{g}$ "; entonces efectivamente forma parte de la función objetivo y de este modo crea un alto costo y/o altas pérdidas, según el caso de optimización, cuando la variable se desvía de su límite en la solución del sistema matricial  $W \Delta \bar{Z} = -\bar{g}$ .

Las funciones de penalización cuadrática pueden ser representadas gráficamente del siguiente modo:

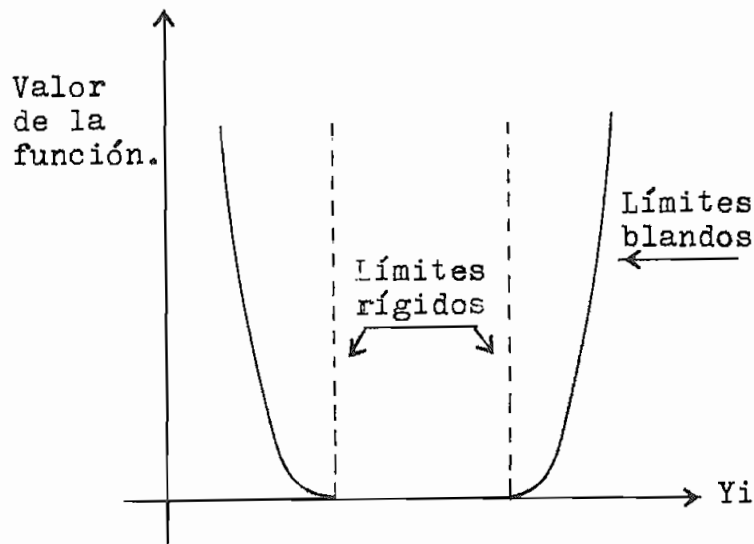


Figura 2.3.1 .- Función de penalización.

Como se observa, la función de penalización reemplaza los límites rígidos con límites blandos. Mientras más escarpada sea la función de penalización, es decir con factores de ponderación más altos, la función de penalización causará la corrección de la variable a valores muy cercanos al límite violado (límites rígidos).

Para incluir la función de penalización, se debe modificar los elementos respectivos de la matriz "W" y vector " $-\bar{g}$ ", calculando la primera y segunda derivada de forma similar al de cualquier otra función en L.

La primera y segunda derivadas de  $\mu_{Y_i}$  son:

$$\frac{\delta \mu_{Y_i}}{\delta Y_i} = S_{Y_i} (Y_i^0 - Y_i^{\text{limite}}) \quad (2.3.2)$$

$$\frac{\delta^2 \mu_{Y_i}}{\delta Y_i^2} = S_{Y_i} \quad (2.3.3)$$

De la misma forma como se penaliza una variable cuando ha violado uno de sus límites, también se penalizada cuando es necesario retenerla en un predeterminado valor desde el inicio hasta el final del algoritmo. Un ejemplo de esto es la variable  $\theta_1$  (ángulo de referencia) que no cambia en el proceso, fijándola al valor cero.

Cuando una función de penalización es impuesta sobre una variable, para forzar su valor a uno de sus límites en un particular estado del sistema, es necesario en posteriores iteraciones controlar si es requerida todavía. Esto se logra revisando si el valor de la variable sigue o no violando el límite pertinente. Para el efecto se toma la siguiente ecuación:

$$\beta_{Y_i} = ( Y_i - Y_i^{\text{límite}} ) \quad (2.3.4)$$

así, si  $Y_i^{\text{límite}}$  es un límite superior y  $\beta_{Y_i}$  es mayor que cero, o si es un límite inferior y  $\beta_{Y_i}$  es menor que cero, la penalización es todavía necesaria. De otra forma, la penalización no se requiere y ésta debe ser removida.

Una penalización sobre una variable es removida en la misma forma como fue impuesta, es decir modificando los factores de los elementos de "W" y " $\bar{g}$ ", permitiendo al algoritmo hacer nuevamente correcciones iterativas en los valores de dicha variable.

### 2.3.2.2 PENALIZACION DE RESTRICCIONES DE DESIGUALDAD SOBRE LA POTENCIA REACTIVA.

Como se indica en la figura No.(2.2.2), una fila/columna es incluida en la matriz "W" para restringir la inyección de potencia reactiva en cada una de las barras de generación del ejemplo, sean requeridas o no. Estas restricciones son siempre necesarias en las barras de carga, donde la potencia reactiva de carga es especificada y determinada; pero en las barras de generación, en donde la potencia reactiva es controlable, ellas son requeridas solamente cuando es necesario forzar la generación a un límite, ya sea superior o inferior, o a un valor predeterminado.

La función  $\tau q_i CQ_i$ , en la función ampliada, restringe la inyección de potencia reactiva en la barra i. Cuando esta restricción es activa,  $CQ_i = (Q_i(\bar{Y}) - QG_i - QC_i)$  tiende a cero con  $QG_i$  igual al valor del límite violado y  $\tau q_i$  tiene un valor diferente de cero determinado por el algoritmo.

Forzando  $\tau q_i$  a cero, la restricción deja de ser activa, y la



ecuación  $\tau q_i$   $CQ_i$  no necesita ser eliminada del sistema matricial. Esto es, una fila/columna para la restricción es reservada en la matriz "W" sea ésta requerida o no, haciendo que la restricción pueda activarse o desactivarse con alta eficiencia.

Por lo tanto, una restricción sobre la inyección de potencia reactiva en la barra  $i$  deja de ser activa, imponiendo una penalización cuadrática sobre la corrección de su multiplicador de Lagrange, tal que,  $\tau q_i$  cambie de su valor diferente de cero a cero en la próxima iteración.

La forma de la penalización cuadrática  $\mu_{qi}$  para desactivar la restricción es indicada en la siguiente ecuación:

$$\mu_{qi} = (S_{qi}/2) \tau q_i^2 \quad (2.3.5)$$

Para imponer la penalización sobre  $\tau q_i$ , añadir (2.3.6) al elemento  $dL/d\tau q_i$  del vector " $-\bar{g}$ " y (2.3.7) al elemento  $d^2L/d\tau q_i^2$  de la matriz "W". Para remover la penalización, sustraer estos mismos elementos.

La primera y segunda derivadas de  $\mu_{qi}$  son:

$$\delta \mu_{qi} / \delta \tau q_i = S_{qi} \tau q_i \quad (2.3.6)$$

$$\delta^2 \mu_{qi} / \delta \tau q_i^2 = S_{qi} \quad (2.3.7)$$

Cuando una restricción de desigualdad funcional ha sido activada, es necesario en posteriores iteraciones, probar si es requerida todavía.

Como en el caso de las variables, el signo de la siguiente función:

$$\beta_{qi} = Q_i(\bar{Y}) - QC_i - QG_i^{\text{limite}} \quad (2.3.8)$$

sirve para la prueba. Si  $QG_i^{\text{limite}}$  es límite superior y  $\beta_{qi}$  es mayor que cero, o si  $QG_i^{\text{limite}}$  es límite inferior y  $\beta_{qi}$  es menor que cero, entonces la restricción es requerida todavía. De otra manera ésta no es necesaria y debería ser desactivada imponiendo una penalización cuadrática sobre su multiplicador de Lagrange.

### 2.3.2.3. PENALIZACION DE RESTRICCIONES DE DESIGUALDAD SOBRE LA DIFERENCIA ANGULAR.

El flujo de potencia a través de una línea conectada entre las barras (k) y (m) se mantiene aproximadamente dentro de límites especificados haciendo uso de la diferencia angular ( $\theta_k - \theta_m$ ).

La función de penalización cuadrática que fuerza la diferencia angular ( $\theta_k - \theta_m$ ) a un valor dado por  $\theta_{km}$  es:

$$\mu_{\theta_{km}} = (S_{\theta_{km}}/2)(\theta_k - \theta_i - \theta_{km}) \quad (2.3.9)$$

de la que se puede obtener las siguientes derivadas:

$$\delta\mu_{\theta_{km}}/\delta\theta_k = S_{\theta_{km}}(\theta_k - \theta_i - \theta_{km}) \quad (2.3.10)$$

$$\delta\mu_{\theta_{km}}/\delta\theta_m = -S_{\theta_{km}}(\theta_k - \theta_i - \theta_{km}) \quad (2.3.11)$$

$$\delta^2\mu_{\theta_{km}}/\delta\theta_k^2 = S_{\theta_{km}} \quad (2.3.12)$$

$$\delta^2\mu_{\theta_{km}}/\delta\theta_m^2 = S_{\theta_{km}} \quad (2.3.13)$$

$$\delta^2\mu_{\theta_{km}}/(\delta\theta_k \delta\theta_m) = -S_{\theta_{km}} \quad (2.3.14)$$

Para activar una penalización de este tipo, se necesita evaluar las derivadas de  $\mu_{\theta_{km}}$  e incluirlas en los respectivos elementos de " $-\bar{g}$ " y " $W$ ". Para remover la penalización sustraer estos mismos elementos.

El signo de la función:

$$\beta_{\theta_{km}} = |\theta_k - \theta_m| - \theta_{km} \quad (2.3.15)$$

sirve para la prueba. Si  $\beta_{\theta_{km}}$  es mayor que cero la restricción es requerida todavía. De otra manera esta no es necesaria y debería ser desactivada removiendo la función de penalización cuadrática.

### 2.3.3. ALGORITMO PARA EL F.O.P. DE NEWTON.

Esta sección presenta el algoritmo básico utilizado para resolver el flujo óptimo de potencia por el método de Newton, en los tres casos de optimización estudiados en esta tesis.

Pasos:

- a) Inicio. Asumir valores iniciales para las variables.
- b) Fijar la iteración con el contador en  $K=0$ .
- c) Seleccionar el grupo activo.
- d) Evaluar  $-\bar{g}^k$ .
- e) Prueba para el óptimo:

Detenerse a ver si las siguientes condiciones son satisfechas;

-  $-\bar{g}^k = \bar{0}$ .

- Todas las ecuaciones ( $\mu$ ) para las restricciones de desigualdad, son satisfechas.

Si estas condiciones se cumplen, el óptimo se ha alcanzado, entonces imprimir resultados y salir.

Caso contrario continúe al paso siguiente.

f) Prueba del número de iteraciones:

Si  $K$  es mayor que un número máximo, entonces salga.

Caso contrario continúe al paso siguiente.

g) Evaluar y factorizar  $W(\bar{Z}^K)$ .

h) Resolver  $W(\bar{Z}^K) \Delta \bar{Z}^{K+1} = -\bar{g}(\bar{Z}^K)$  para obtener las correcciones.

i) Calcular el nuevo estado del sistema:

$$\bar{Z}^{K+1} = \bar{Z}^K + \Delta \bar{Z}^{K+1}.$$

j) Avanzar a la iteración  $K=K+1$ , e ir al paso (c).

#### 2.4. DIFERENCIAS ENTRE EL METODO DEL GRADIENTE REDUCIDO Y EL METODO DE NEWTON.

En esta sección se establecerá las diferencias básicas entre el Método del Gradiente Reducido, explicado en las referencias [17] y [7], y el propuesto en este trabajo, Método de Newton. Para este fin se hará a continuación una breve descripción del Método del Gradiente Reducido.

##### 2.4.1. METODO DEL GRADIENTE REDUCIDO [17].

En este método la optimización, es también la minimización

de una función objetivo, para lo que se requiere de un conjunto de variables que se las divide en variables de control, variables independientes y de estado; las mismas que se las ubica en los siguientes vectores:

$$\bar{Y} = \begin{vmatrix} \bar{X} \\ \bar{u} \\ \bar{p} \end{vmatrix} \quad (2.4.1)$$

en donde:

- $\bar{X}$  Es el vector de variables de estado.
- $\bar{u}$  Es el vector de variables de control.
- $\bar{p}$  Es el vector de variables fijas o independientes.

Al definirse las variables y la función objetivo para un caso de optimización específico, el modelo general a resolverse puede expresarse como:

$$\min F(\bar{x}, \bar{u}) \quad (2.4.2)$$

sujeto a las restricciones de igualdad impuestas por el flujo de potencia:

$$L(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}) = F(\bar{x}, \bar{u}) + \bar{\tau}^T \bar{g}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}) \quad (2.4.3)$$

en donde, los elementos del vector  $\bar{\tau}$  son los llamados multiplicadores de Lagrange y  $\bar{g}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p})$  son las ecuaciones de flujo de potencia. La función ampliada "L" deberá cumplir con las siguientes condiciones necesarias en el mínimo:

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{x}} = \frac{\delta F}{\delta \bar{x}} + \left( \frac{\delta \bar{g}}{\delta \bar{x}} \right)^T \bar{\tau} = \bar{0} \quad (2.4.4)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{u}} = \frac{\delta F}{\delta \bar{u}} + \left( \frac{\delta \bar{g}}{\delta \bar{u}} \right)^T \bar{\tau} = \bar{0} \quad (2.4.5)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \bar{\tau}} = \bar{g}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}) = \bar{0} \quad (2.4.6)$$

La ecuación (2.4.4) contiene la matriz  $[\delta \bar{g} / \delta \bar{x}]$ , que es la matriz Jacobiano de la última iteración del flujo de potencia. La ecuación (2.4.5) contiene la matriz  $[\delta \bar{g} / \delta \bar{u}]$ , que se conoce como el Jacobiano reducido; y la ecuación (2.4.6) son las ecuaciones del flujo de potencia.

Al encontrar los valores de los elementos de los vectores  $\bar{u}$  y  $\bar{x}$ , que satisfacen las ecuaciones (2.4.4), (2.4.5), (2.4.6), se ha encontrado el valor óptimo del vector " $\bar{u}$ " que minimiza la función objetivo planteada tomando en cuenta además que se debe cumplir con las restricciones adicionales sobre máximos y mínimos en las variables  $u$  y  $x$ .

En general, en cualquier punto de solución factible, no necesariamente el óptimo, el flujo de potencia puede ser resuelto, o sea que las ecuaciones (2.4.6) pueden ser

satisfechas. Una vez resuelto el flujo de potencia, con la ayuda del Jacobiano de la última iteración y con el vector de las derivadas de  $F$  con respecto al vector " $\bar{x}$ ", se puede encontrar el vector de los multiplicadores de Lagrange aplicando la ecuación (2.4.4). Reemplazando el vector en la ecuación (2.4.5) se encontrará en general, con que el vector  $[\delta L/\delta \bar{u}]$  no es igual a cero ya que no necesariamente se está en el óptimo.

El vector  $\delta L/\delta \bar{u}$  tiene un significado importante, es el vector gradiente, el cual es ortogonal a los contornos de valores constantes de la función objetivo.

Los contornos de valores constantes de las funciones objetivo planteadas tienen, en el caso de dos dimensiones las siguientes formas:

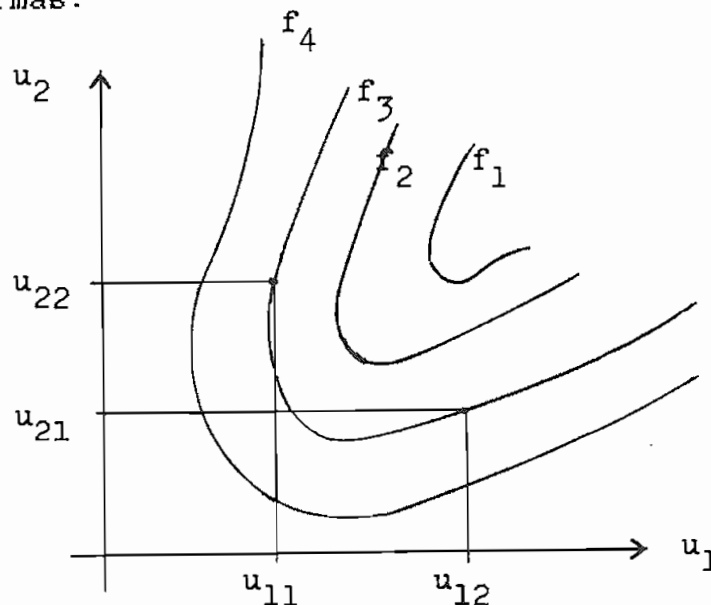


Figura 2.4.1.- contornos de valor constante funciones objetivo.



en donde las curvas más abiertas tienen mayor valor, así:

$$f_4 > f_3 > f_2 > f_1$$

Cada una de estas curvas indica el lugar geométrico en donde la función objetivo tiene un valor constante. Así por ejemplo se tendrá un valor  $f_4$  de la función objetivo cuando las variables de control tomen los valores  $(u_{11}, u_{21})$  o cuando tomen los valores  $(u_{12}, u_{22})$ .

Un valor de la función objetivo se puede obtener con infinito número de soluciones, de las cuales unas serán factibles y otras no, siendo necesario introducir restricciones, las mismas que son forzadas por medio de las funciones de penalización cuadrática.

Las ecuaciones (2.2.4), (2.2.5) y (2.2.6) son no lineales y deben resolverse con métodos iterativos. Para este efecto se utilizará el método del gradiente reducido.

La idea básica de este método es partir de una solución factible del flujo de potencia (en un punto de la figura anterior) y moverse a lo largo de la dirección con descenso más pronunciado o sea en la dirección del gradiente negativo, para encontrar un nuevo punto factible de solución, pero que estará más cerca al punto óptimo.

En dos dimensiones lo que se tendrá es:

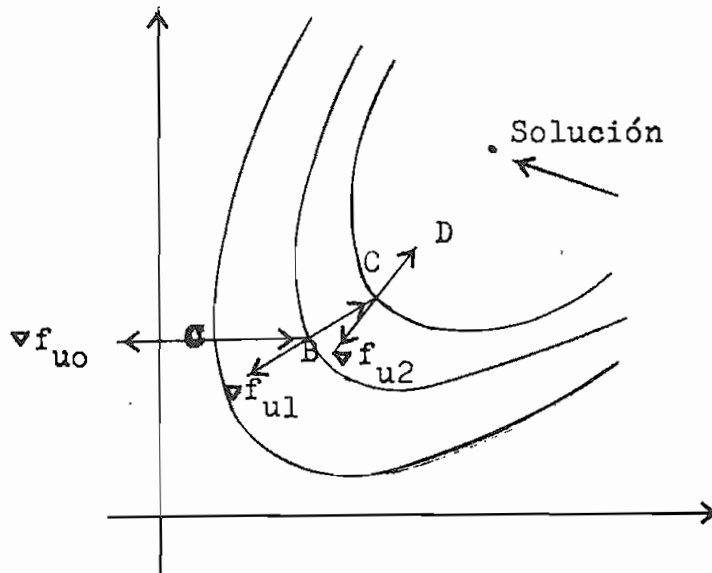


Figura 2.4.2.- Movimiento en la dirección del gradiente negativo.

En el gráfico, A es el punto de solución inicial del flujo de potencia. En este punto evaluar el vector gradiente  $\nabla f_{u0}$  para moverse al punto B a lo largo de la dirección del gradiente negativo. En el punto B se tendrá un valor de la función objetivo que será menor al valor del punto A. Ahora en el punto B se deberá satisfacer la ecuación (2.4.6), es decir resolver el flujo de potencia para conocer el vector de estado  $\bar{x}$ . Una vez satisfecha la ecuación (2.4.6), se tendrá que B es un nuevo punto de solución factible y se podrá nuevamente iniciar el proceso de manera sucesiva hasta satisfacer un criterio de convergencia.

El proceso descrito se lo puede resumir a través del siguiente algoritmo de solución:

- a) Asumir un conjunto de variables de control, para formar el vector de control " $\bar{u}$ ".
- b) Encontrar una solución factible del flujo de potencia por el método de Newton-Raphson formal. Con esto se obtendrá la matriz Jacobiano en el punto de solución, en forma factorizada.
- c) Resolver la ecuación (2.2.4) para obtener el vector " $\bar{\tau}$ ". Este vector será utilizado solamente en la iteración que se está ejecutando.
- d) Insertar el vector " $\bar{\tau}$ ", en la ecuación (2.2.5) para obtener el gradiente  $\nabla \bar{f}_u$ .
- e) Verificar la convergencia, si  $|\nabla \bar{f}_u|$  es suficientemente pequeño el mínimo ha sido alcanzado, de otra forma ir al paso siguiente.
- f) Encontrar un nuevo valor para cada una de las variables de control.  
Luego regresar al paso (b).

(Para mayor detalle del método ver la referencia [17]).

#### 2.4.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS METODOS.

Planteados los algoritmos de solución (del Método del Gradiente Reducido y del Método de optimización de Newton), se pueden establecer las siguientes diferencias básicas:

- a) En el caso del flujo óptimo por el Método del Gradiente Reducido, la optimización es una minimización que requiere de un conjunto de variables, las mismas que se las divide en variables de control, de estado, e independientes. En el Método de optimización de Newton, estas distinciones no son importantes, pues el algoritmo procesa todas las variables de igual forma. Además las variables forman un vector, el mismo que nunca cambia de dimensión o tamaño.
- b) La potencia de la barra oscilante, en el caso del Método del Gradiente Reducido, no entra en la clasificación de las variables, pues es al final de una corrida de flujo de potencia cuando su valor es determinado. En el caso del flujo óptimo por el Método de Newton, la potencia de generación de la barra oscilante es siempre parte del vector de variables.
- c) En el Método del Gradiente Reducido cada iteración requiere

previamente de la solución del flujo de potencia para posteriormente calcular el vector de los multiplicadores de Lagrange  $\bar{\tau}$  y luego el vector que da el nombre a este método. En el método de Newton, todas las correcciones de las variables, multiplicadores de Lagrange y cálculos de flujos de potencia se hacen en forma coordinada dentro de la misma iteración, es decir, no son procesos separados.

# C A P I T U L O    I I I

## FORMULACION Y DISEÑO DEL MODELO INTERACTIVO PARA FLUJO OPTIMO DE POTENCIA

### 3.1. DEFINICION CONCEPTUAL DEL MODELO.

Se ha desarrollado programas complementarios entre sí para formar un paquete de Software con característica interactiva, es decir, de fácil comunicación a través del teclado y pantalla del computador; orientado a usarse en computadoras personales para la solución del flujo óptimo de potencia.

Este Software básicamente está constituido por dos grupos de programas que son:

- Los programas desarrollados en FOXBASE, y
- El grupo de programas desarrollados en FORTRAN.

A través de los programas desarrollados en FOXBASE que le dan al paquete la característica de interactividad propiamente dicha, se ha construido una base de datos informatizada, la misma que es una colección de datos interrelacionados, almacenados de modo que resulten independientes de los programas que la usan.

Los programas desarrollados en FOXBASE tienen la finalidad

de administrar la información total existente de la base de datos referente a un Sistema Eléctrico de Potencia, presentando además la capacidad de: dar información teórica de los flujos óptimos de potencia; proporcionar menús de ayuda que faciliten la creación, modificación, consulta, eliminación y visualización de los datos; validar los datos en el momento mismo de su ingreso; ejecutar los programas de flujo de potencia y flujo óptimo de potencia; consultar y obtener reportes de los resultados.

Los programas escritos en FORTRAN resuelven el Flujo Óptimo de Potencia utilizando el Método de Newton propuesto en la referencia [16]. Este método requiere primeramente establecer el vector de variables y definir las funciones objetivo a ser utilizadas en el proceso. Luego de realizar estos dos requerimientos, el algoritmo usa la técnica de optimización de los multiplicadores de Lagrange, el teorema de Kuhn y Tucker y el método de Newton con el objeto de obtener iterativamente correcciones sucesivas sobre las variables, hasta llegar a un punto de operación del SEP en el cual la funciones objetivo tienen un valor óptimo.

Los programas que resuelven el flujo óptimo de potencia tienen la capacidad de ejecutar tres tipos de optimización que son:

- Flujo Óptimo de Potencia General, en el que se realiza a la

vez despacho económico y minimización de pérdidas.

- Flujo Optimo de Potencia Activa, en el que se realiza solo despacho económico.
- Flujo Optimo de Potencia Reactiva, en el que se realiza solo minimización de pérdidas.

La modelación incluye además restricciones de desigualdad sobre variables y restricciones funcionales de desigualdad.

### **3.2. ESTRUCTURA Y CARACTERISTICA DEL PROGRAMA DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA.**

#### **3.2.1. REQUERIMIENTOS Y CARACTERISTICAS.**

Los programas se han diseñado para resolver el problema de flujo óptimo usando el algoritmo de Newton en sistemas que tengan hasta cuarenta barras, con un número de elementos de interconexión serie que no sobrepasen los cincuenta y cinco elementos, siendo de éstos máximo quince transformadores. En cuanto a los elementos shunt sean reactores o condensadores, su número queda limitado al número de barras existentes. El criterio de convergencia para cualquiera de los casos de optimización está entre 0.07 y 0.1, valor adimensional que es aplicado como referencia límite del valor de cada uno de los elementos del vector gradiente " $-\bar{g}$ " explicado en detalle en el capítulo Nº 2. El máximo número de iteraciones es de cien.



Para determinar los límites en cuanto a número de barras, elementos serie, y elementos shunt, se usó un computador personal XT con 640 Kbytes de memoria RAM.

Las restricciones principales que se dan para la ejecución del programa son:

- Siempre un sistema debe poseer una barra oscilante.
- El mínimo de barras a tener un SEP a optimizar es de dos.
- El programa funciona con cualquier número de barras de carga y barras de tensión controlada (asociadas o no a condensadores sincrónicos), siempre que el número de barras independientemente de la combinación, sea menor a cuarenta.

El ingreso de datos de barras puede ser en cualquier orden, y su numeración nada tiene que ver con el tipo de barra, lo cual libera al usuario de una rigurosa numeración u ordenamiento preestablecido. Esta forma de ingresar los datos de barras es posible gracias a los programas desarrollados en FOXBASE, haciendo que el paquete en general a más de su interactividad sea de alta aplicación didáctica.

### **3.2.2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE FLUJO OPTIMO.**

La estructura del programa de F.O.P. se encuentra detallada en el diagrama de bloques expuesto en la figura (3.1); en donde

se puede detectar y advertir que el proceso de solución se lo realiza a través de un programa principal y nueve subrutinas, cuya función se describe de manera breve a continuación:

- Programa Principal .-

El programa principal se encarga entre otras cosas, de la lectura de datos generales, salida de resultados, test del óptimo, conteo del número de iteraciones, corrección de las variables, y llamado de las diferentes subrutinas utilizadas en el proceso.

- Subrutina IMPUT .-

Esta subrutina realiza el proceso de captación o lectura de datos de barras, elementos serie y elementos shunt que existan en un sistema eléctrico.

- Subrutina YBARRA .-

Esta subrutina forma la matriz admitancia de barra del sistema, y es en ella donde se refleja la variación de los cambios de taps de los transformadores debido al proceso de optimización para el caso de flujo óptimo de potencia general y flujo óptimo de potencia reactiva, por lo que para estos dos casos señalados la subrutina YBARRA es utilizada en todas las posteriores iteraciones.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

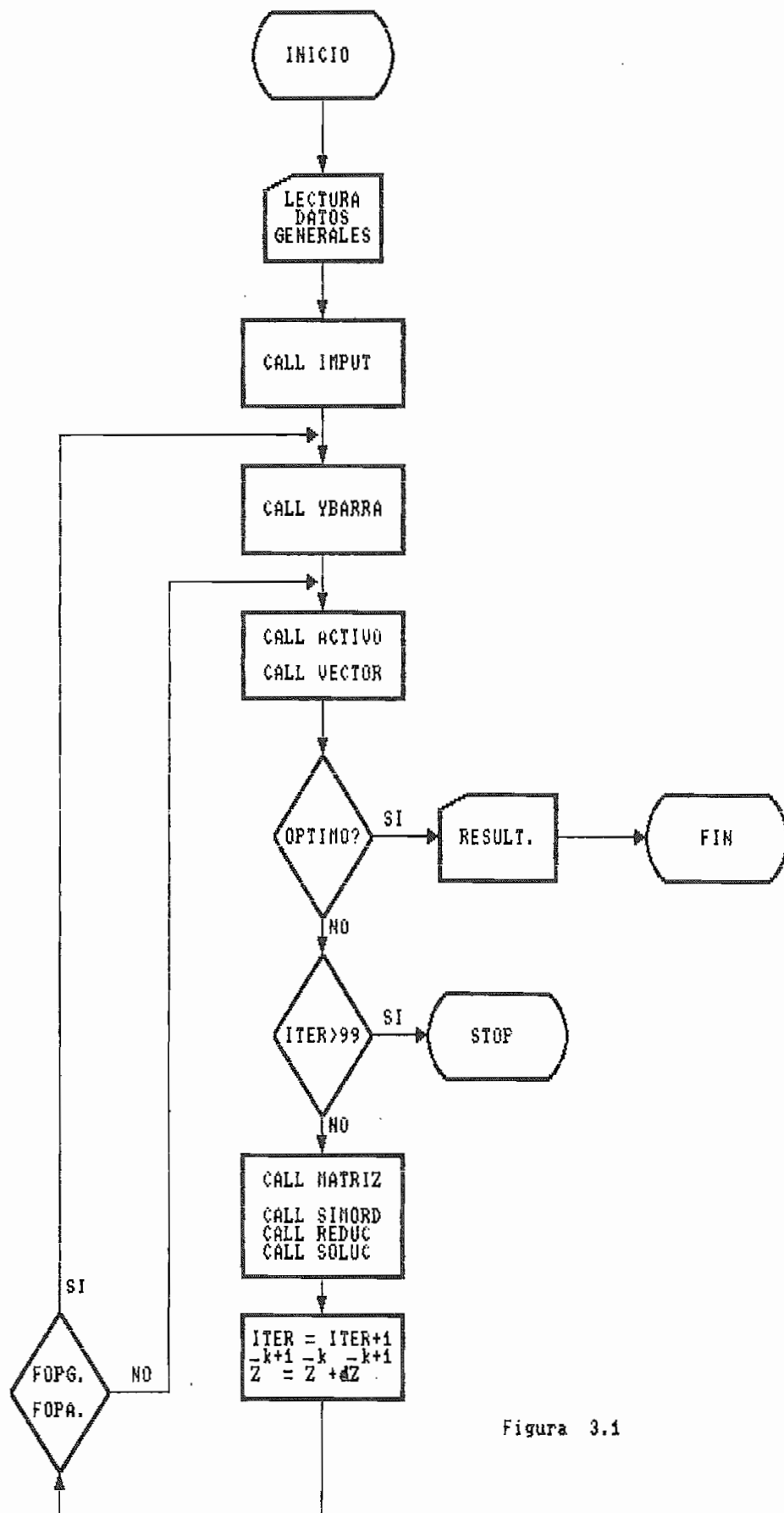


Figura 3.1

- Subrutina ACTIVO .-

Esta subrutina es la encargada de introducir el efecto de las penalizaciones en el vector " $-\bar{g}$ " y matriz "W"; penalizaciones debidas a la presencia de restricciones que necesitan ser activadas o desactivadas (como se explicó en el capítulo N<sup>o</sup> 2), según el estado del sistema y del tipo de flujo ejecutado.

- Subrutina VECTOR .-

Esta subrutina se encarga de calcular los valores de cada uno de los elementos del vector " $-\bar{g}$ " según las fórmulas detalladas en el anexo N<sup>o</sup> 6 para cada tipo de optimización estudiado en esta tesis.

- Subrutina MATRIZ .-

En forma similar a la anterior subrutina, ésta se encarga de calcular los valores de los elementos de la matriz "W" según las fórmulas detalladas en el anexo N<sup>o</sup> 6 para cada tipo de optimización.

- Subrutina SIMORD. REDUCT. SOLUC .-

Estas tres últimas subrutinas, tomadas de la referencia [8], son las encargadas de la solución de la ecuación matricial  $W \Delta \bar{Z} = -\bar{g}$  mediante el método numérico de la bi-factorización<sup>1</sup>; rescatando el vector solución que corrige las variables,

---

<sup>1</sup> Explicación del método numérico de la bifactorización en las referencias [8], [1].

posteriormente usadas en una nueva iteración.

Los detalles de la estructura del programa se encuentran en el anexo N° 8; y el listado del programa principal y de las diferentes subrutinas en el anexo N° 7.

### **3.3. ESQUEMA DE LA BASE DE DATOS.**

#### **3.3.1. ASPECTOS GENERALES.**

Una base de datos puede definirse como una colección de datos interrelacionados, almacenados en conjunto sin redundancias perjudiciales o innecesarias; su finalidad es la de servir a una o varias aplicación de la mejor manera posible [7].

Varias de las características con las que debe cumplir una base de datos son:

- Mantenerse en plena crisis de cambio y crecimiento, presentando una facilidad a la reestructuración siempre que se dé, la necesidad de agregar nuevos tipos de datos o utilizarla en nuevas aplicaciones.
  
- Armonizar el grado de redundancia, evitando inconvenientes como son la utilización adicional de memoria y el incremento de tiempo al hacerse múltiples operaciones de actualización

en las copias redundantes.

- Almacenar los datos de modo que resulten independientes de los programas que los usan.
- Emplear métodos bien determinados para incluir datos nuevos o para modificar y extraer los datos almacenados.

Una base de datos en forma general se encuentra conformada por entidades y cada una de estas entidades dispone de atributos.

Para explicar mejor esta terminología en el dialecto de las computadoras, se tomará el siguiente ejemplo:

| barras |        |      |          |             |
|--------|--------|------|----------|-------------|
| número | nombre | tipo | vol.(pu) | áng.(grad.) |
| 01     | barral | OSC  | 1.01     | 0           |
| 02     | barra2 | PV   | 1.00     | 12          |

Ejemplo 3.1

Se llamará entidad, desde el punto de vista computacional, al nombre del fichero sobre el cual se almacena la información. Este puede ser un suceso, un nombre de tarea, los sistemas eléctricos, las "barras", etc.. Toda entidad tiene propiedades que conviene registrar según las necesidades, éstas para el ejemplo son: el número, nombre de la barra, tipo, voltaje,

ángulo. A estas propiedades se las conoce como atributos y son los campos de una base de datos informatizada. La información almacenada en los campos (columnas del ejemplo 3.1) define el tipo de campo (carácter, numérico, lógico, etc.). El conjunto de campos para un suceso específico (información dispuesta en filas en el ejemplo 3.1) se denomina registro.

( Explicaciones más amplias y conceptos adicionales sobre bases de datos, en las referencias [7], [6], [3]).

El concepto utilizado en la presente tesis será el de base de datos relacionales. Las bases de datos relacionales son aquellas cuyas entidades que la componen, tienen campos en común, a través de los cuales se establecen relaciones entre dichas entidades. Además el proceso seguido para el desarrollo de los programas interactivos con el objetivo de conformar una base de datos informatizada, es el mismo explicado y detallado en la tesis de la Ing. Consuelo Guijarro.

### **3.3.2. DESCRIPCION DEL MODELO INTERACTIVO.**

En el modelo interactivo se consideran las siguientes funciones:

- Selección del sistema.
- Mantenimiento de datos (creación, modificación, eliminación y consulta de datos).

- Reportes tanto de datos como de resultados.
- Funciones específicas como son los programas que resuelven el flujo de potencia y el flujo óptimo de potencia en los casos estudiados en esta tesis, que son: flujo óptimo de potencia general, despacho económico y minimización de pérdidas.
- Funciones operacionales, como son los menús, submenús, mensajes de ayuda, de error, y todos los programas que dan al modelo la característica interactiva.
- Funciones de apoyo, que son aquellas que facilitan la consulta de información teórica sobre tópicos referentes al tema.

#### **3.3.2.1. FUNCION DE SELECCION DEL SISTEMA.**

En la base de datos puede existir almacenados varios Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), pero ninguno utilizable mientras no sea seleccionado solo uno de ellos a la vez. De ahí la importancia de esta función que permite escoger de entre los SEP previamente creados a uno de ellos para activarlo, es decir, poder realizar con él las funciones de mantenimiento y reportes.

#### **3.3.2.2. FUNCIONES DE MANTENIMIENTO.**

Hacer el mantenimiento de datos significa poder crear,



modificar o eliminar los datos de un determinado Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), crear nuevos sistemas o eliminar sistemas existentes; todo esto ayudado por la posibilidad de localizar y consultar fácilmente un dato específico o cualquier sistema en la base de datos.

Como se indicó anteriormente, en la base de datos puede existir varios SEP, los mismos que están conformados por barras, elementos serie de interconexión entre barras, elementos shunt y parámetros generales; diferente tipo de información a la que se debe dar el mantenimiento respectivo, es decir, efectuar las siguientes funciones:

- Mantenimiento de datos generales del SEP
- Mantenimiento de datos de barras
- Mantenimiento de datos de elementos serie

#### **3.3.2.3. FUNCIONES DE REPORTE.**

Con estas funciones se puede obtener reportes tanto por pantalla como por impresora.

Los reportes por impresora pueden ser parciales o totales. En los reportes parciales se tiene la opción de escoger el tipo de datos o resultados a imprimirse siendo estos: datos de líneas, de barras, transformadores, coeficientes de las funciones de

costo, o resultados de taps de transformadores, de flujos y resultados en las barras. Los reportes totales permiten obtener la salida de datos y resultados en una sola orden.

Los reportes por pantalla presentan los resultados de un flujo ejecutado.

#### **3.3.2.4. FUNCIONES ESPECIFICAS.**

Estas funciones se refieren a los programas escritos en FORTRAN que permiten hacer en un SEP los siguientes flujos:

- Flujo de Potencia por el Método de N-R.
- Flujo Optimo de Potencia General
- Flujo Optimo de Potencia Activa
- Flujo Optimo de Potencia Reactiva

En la figura 3.2 se indica esquemáticamente el proceso que se realiza para correr un flujo.

#### **3.3.2.5. FUNCIONES DE APOYO.**

Se define como funciones de apoyo a toda la información teórica disponible en el paquete, la misma que puede ser impresa pero de ninguna manera, su texto, alterado o dañado por el usuario.

## PROCESO PARA CORRER UN FLUJO

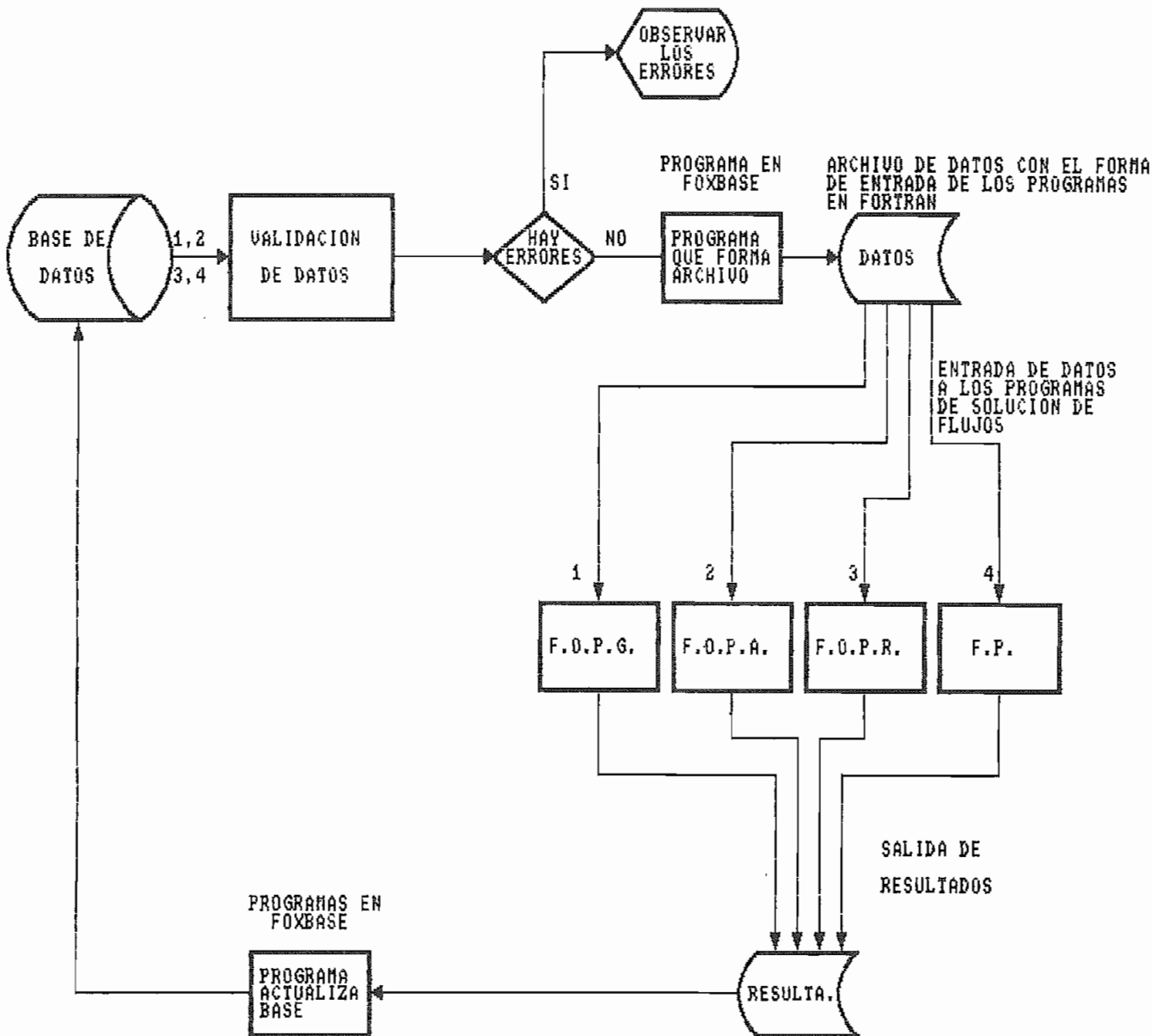


Figura 3.2

#### **3.3.2.6. FUNCIONES DE OPERACION.**

Estas funciones están encaminadas a facilitar la ejecución de todos los programas que complementan a la base de datos. Las funciones de operación son los menús, submenús, mensajes de error y mensajes de ayuda.

A través de los menús y submenús se llega a ejecutar una operación específica (ver manual de uso).

Los mensajes de ayuda y error son guías muy claras que le permiten al usuario operar ágilmente con todo el paquete, sin permitirle que se pierda en el mismo o que introduzca datos erróneos en la base de datos.

#### **3.3.3. ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS.**

La estructura se encuentra detallada en el anexo N° 8.

#### **3.3.4. ESQUEMA DEL PROGRAMA INTERACTIVO.**

El esquema del programa interactivo se encuentra detallado en la figura 3.3.

### 3.3.5. REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA INTERACTIVO.

Como se indicó anteriormente, el programa interactivo está hecho en FOXBASE, y las funciones específicas o programas que resuelven el flujo de potencia y el flujo óptimo de potencia de un SEP están desarrollados en FORTRAN. Todos estos programas forman un paquete computacional que requiere para su funcionamiento de un computador cuya memoria RAM sea de 640 KB y que posea disco duro.

Adicionalmente, debido a que los programas compilados en FOXBASE no son ejecutables directamente a través del sistema operativo, es necesario tener a disposición ( cargado en el disco duro ) el paquete de FOXBASE con el que se ha realizado la compilación de los programas fuentes, para poder utilizarlos.

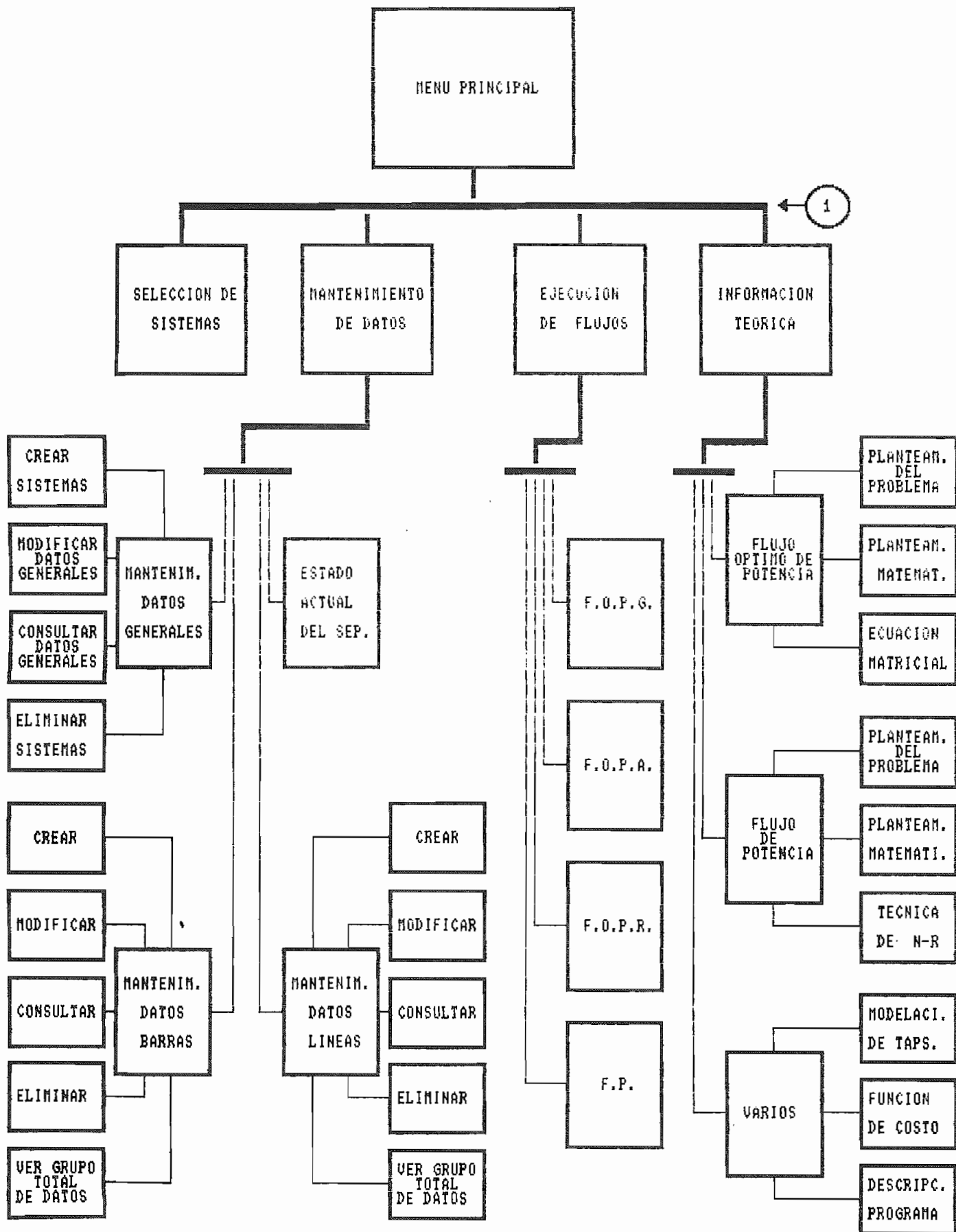


Figura 3.3 .- ESQUEMA DEL PAQUETE INTERACTIVO

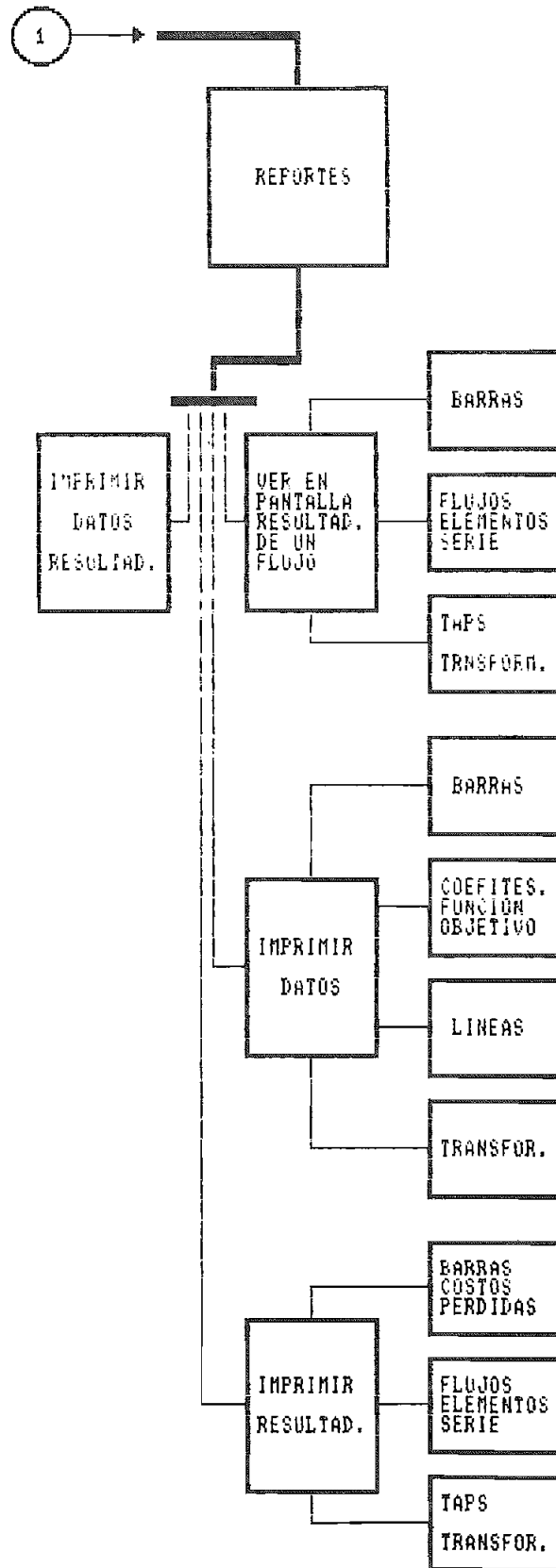


Figura 3.3 .- CONTINUACION

# C A P I T U L O    I V

## APLICACION DEL PROGRAMA INTERACTIVO

### 4.1. APLICACION DIDACTICA.

En la actualidad el computador personal constituye una herramienta muy útil en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia, pues con la aplicación de programas interactivos, el estudiante directamente a través del computador puede obtener inmediatamente resultados, analizar el comportamiento de diversos tópicos del SEP, variar parámetros; posibilitándole todo esto a asimilar mejor la teoría y sobre todo a ejercitarse en las estrategias operativas.

Como el paquete computacional desarrollado en esta tesis se centraliza en la solución del Flujo Optimo de Potencia, el estudiante puede correr un mismo ejemplo para los tres tipos de optimización de que dispone el programa ( Flujo Optimo de Potencia General, Flujo Optimo de Potencia Activa y Flujo Optimo de Potencia Reactiva), variando parámetros, comparando y analizando resultados.

Como ejemplo de aplicación didáctica se incluye en este trabajo un Sistema Eléctrico sencillo tomado de la referencia [7], el mismo que se le resolverá por los tres tipos de



optimización indicados anteriormente.

Antes de entrar a la aplicación del programa es necesario indicar ciertas características en cuanto a modelación de los elementos, las mismas que deberán ser asumidas para todos los sistemas a correrse con el programa:

- Las líneas se las modelará por parámetros concentrados utilizando el modelo PI.
- La modelación del transformador con cambiador de taps también deberá ser PI.
- Los bancos de condensadores (si existen) deberán ser modelados como elementos shunt conectados desde las barras a tierra.

#### 4.1.1.1. EJEMPLO Nº 1.

El sistema que se indica en el gráfico (4.1) es el sistema base del análisis que se realizará más adelante.

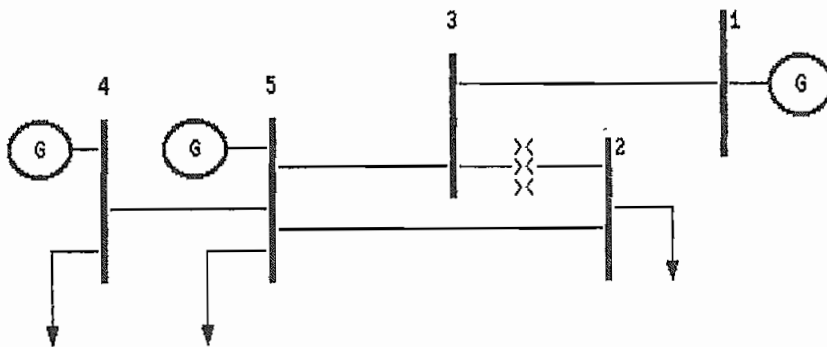


Gráfico 4.1 .- Diagrama Unifilar [7]

Este sistema eléctrico tomado de la referencia [7], consta de cuatro líneas, un transformador, tres generadores y dos barras de carga.

Los reportes de datos y resultados del sistema EJEMPLO1 para los diferentes flujos de optimización, se encuentran en el anexo N<sup>o</sup> 10.

- Tabulación de resultados .-

|                              | N <sup>o</sup> o Tipo | Valor | F.O.P.G | F.O.P.A | F.O.P.R |
|------------------------------|-----------------------|-------|---------|---------|---------|
| Magnitud<br>Voltaje<br>(pu.) | 1 OSC                 | 1     | 1.0500  | 1.0000  | 1.0500  |
|                              | 2 PQ                  | 1     | 0.9879  | 0.9556  | 0.9891  |
|                              | 3 PQ                  | 1     | 0.9840  | 0.9341  | 0.9902  |
|                              | 4 PV                  | 1     | 1.0500  | 1.0000  | 1.0500  |
|                              | 5 PV                  | 1     | 1.0370  | 1.0000  | 1.0409  |
| Pot. gen.<br>activa<br>(MW.) | 1 OSC                 | 20    | 53.568  | 33.686  | 32.900  |
|                              | 4 PV                  | 100   | 168.145 | 175.905 | 175.905 |
|                              | 5 PV                  | 100   | 49.052  | 61.544  | 61.544  |
| Tap<br>(pu.)                 | Trans.                | 1.025 | 1.004   | 1.025   | 1.000   |
| Costo gen.<br>(\$/H.)        |                       |       | 1148.14 | 1157.54 | 1154.52 |
| Pérdidas<br>(MW.)            |                       |       | 5.9154  | 6.2051  | 5.5132  |

- Análisis de resultados .-

Los voltajes de las barras de tensión controlada y oscilante varían para los casos de F.O.P.G y F.O.P.R debido a que son variables para estos procesos, no sucede lo mismo para el caso de

F.O.P.A en donde los voltajes de generación permanecen constantes.

Es importante notar que en los casos de F.O.P.G y F.O.P.R los voltajes adquieren valores que tienden al límite superior; ya que con mayores niveles de voltaje en las barras de generación se consigue disminuir las pérdidas del sistema.

El valor del tap del transformador varía para los casos de F.O.P.G y F.O.P.R . No así en el caso del F.O.P.A , debido a que en este proceso los taps de los transformadores son variables fijas.

Si se quiere llegar a valores muy cercanos a los del F.O.P.G por medio del F.O.P.A y F.O.P.R, debe ejecutar en ese orden las optimizaciones.

Para el F.O.P.R son variables fijas las potencias de generación de las barras PV. No ocurre lo mismo con la potencia de generación de la barra oscilante ya que ésta tiene que ajustarse a las pérdidas del sistema.

De acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a costo de generación y pérdidas, se determina que los menores valores se dan en el F.O.P.G , y no cuando se realiza individualmente cada uno de los flujos óptimos. Esto es como consecuencia de que en

el F.O.P.G todos los voltajes, potencias de generación y taps de los transformadores que presenta el SEP son variables durante el proceso de solución, situación que no sucede en los otros dos casos, en que por necesidades puntuales de optimización ciertos valores iniciales permanecen fijos (como anteriormente se indicó), haciendo que el punto de solución encontrado sea el óptimo pero para condiciones pre-establecidas.

En lo que se refiere a la distribución de la potencia de generación (observando los datos del F.O.P.G) se determina que la distribución es inversa al costo, es decir, el generador que mayor función de costo tiene, es el que menos genera.

Comparando los valores de flujos por los elementos en el F.O.P.A y F.O.P.R se advierte que las potencias activas son prácticamente iguales en los dos casos, en tanto que los valores correspondientes a las potencias reactivas son modificadas considerablemente, ratificándose que el F.O.P.R hace fundamentalmente una redistribución de reactivos por los elementos.

#### 4.1.2. EJEMPLO Nº 2.

El ejemplo 2 utiliza el mismo sistema eléctrico del ejemplo 1, pero en este caso los coeficientes de la función objetivo de la barra 4 aumentan de valor.

Los reportes de datos del ejemplo 2 y de los resultados obtenidos para los diferentes casos de optimización de que dispone el programa, se indican en el anexo N° 11.

Los resultados de las corridas del ejemplo 2, obedecen a los mismos criterios dados en el análisis del ejemplo 1.

Para tomar en cuenta el cambio realizado, se ha tabulado los datos referentes a potencia de generación, costos y pérdidas del sistema.

- Tabulación de resultados .-

|                      |       | Ejemplo 1<br>F.O.P.G | Ejemplo 2<br>F.O.P.G |
|----------------------|-------|----------------------|----------------------|
| Pot. gen.<br>(MW.)   | 1 OSC | 53.5689              | 65.2302              |
|                      | 4 PV  | 168.1452             | 128.4850             |
|                      | 5 PV  | 49.0524              | 76.6823              |
| Costo gen.<br>(\$/h) |       | 1148.1392            | 1347.0330            |
| Pérdidas<br>(MW.)    |       | 5.9154               | 5.5681               |

Comparando las potencias de generación activa en los dos ejemplos es importante recalcar la nueva redistribución. En el ejemplo 2, el generador de la barra 4 (cuyos valores de los coeficientes de su función objetivo fueron aumentados), genera

menos que en el ejemplo 1 y la diferencia de potencia activa se reparte entre los otros dos generadores. Esto ratifica el criterio de que la potencia de generación es menor cuando es mayor el costo de generación y viceversa.

El costo de generación y las pérdidas del sistema en el ejemplo 2 han aumentado y disminuido respectivamente con respecto al ejemplo 1. Esto nos indica que el proceso de optimización no es un proceso unidireccional en el que solo tiene importancia la reducción de costos, sino que es un proceso que reúne un conjunto de condiciones entre las que se considera también las pérdidas del sistema.

#### **4.2. APLICACION AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO.**

Si bien es cierto el presente trabajo de tesis ha sido desarrollado para contribuir con el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, también es aplicable en SEP reales para el análisis del flujo óptimo. Por lo tanto este programa puede ser una herramienta muy útil para el Ingeniero Eléctrico en la toma de decisiones sobre la operación de un sistema real.

Como ejemplo de aplicación en sistemas eléctricos reales se resolverá el SNI tomado de la referencia [7].

El diagrama unifilar del SNI se indica en el gráfico (4.2).

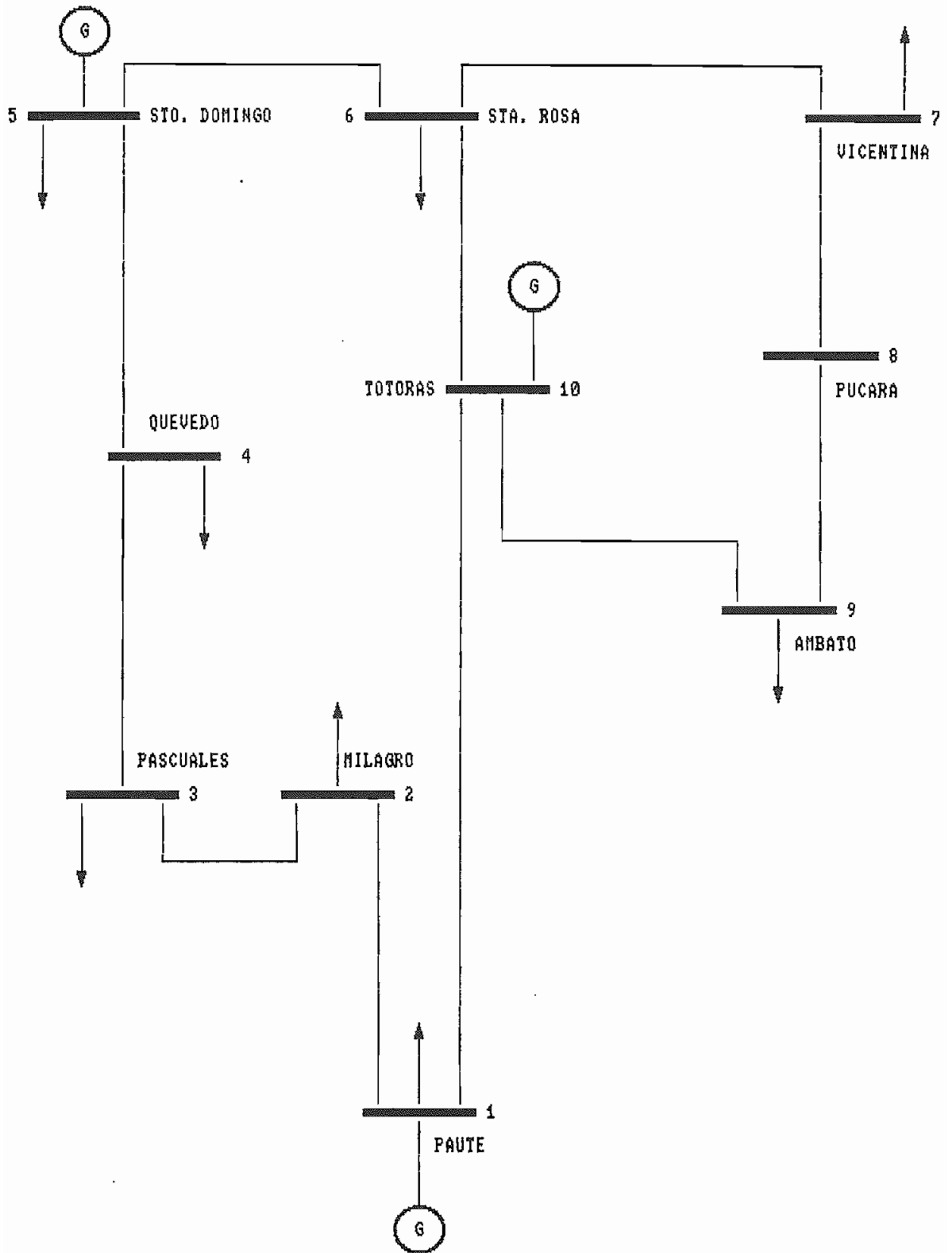


Figura 4.2 .- DIAGRAMA UNIFILAR DEL SNI.

En este sistema se ha hecho ciertas modificaciones, como por ejemplo, el asumir simples circuitos; además los coeficientes de las funciones objetivo de los generadores, han sido supuestos.

Los reportes de datos y resultados para este ejemplo se encuentran en el anexo N<sup>o</sup> 12.

#### 4.3. COMPARACION DE RESULTADOS DEL METODO DE OPTIMIZACION DE NEWTON Y METODO DEL GRADIENTE REDUCIDO.

Para realizar la comparación se tomará los resultados del F.O.P.G. del ejemplo 1 y ejemplo 2 de la aplicación didáctica. En estos ejemplos se empleó el mismo sistema eléctrico utilizado en las referencias [7] y [17]; referencias en la que se aplica el método del gradiente reducido para la optimización de un SEP.

##### - Tabulación de resultados .-

|        |       | Ejemplo 1        |                   | Ejemplo 2        |                   |
|--------|-------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|        |       | Método<br>Newton | Método<br>G. Red. | Método<br>Newton | Método<br>G. Red. |
| Módulo | 1 OSC | 1.0500           | 1.0500            | 1.0500           | 1.0500            |
| volt.  | 2 PQ  | 0.9879           | 0.9980            | 0.9935           | 1.0025            |
| (pu.)  | 3 PQ  | 0.9840           | 0.9749            | 0.9845           | 0.9787            |
|        | 4 PV  | 1.0500           | 1.0500            | 1.0500           | 1.0500            |
|        | 5 PV  | 1.0370           | 1.0362            | 1.0428           | 1.0439            |
| Ang.   | 1 OSC | 0.00             | 0.00              | 0.00             | 0.00              |
| volt.  | 2 PQ  | -11.59           | -11.77            | -14.35           | -14.42            |
| (grd.) | 3 PQ  | -11.57           | -11.74            | -14.26           | -14.33            |
|        | 4 PV  | -3.40            | -3.40             | -9.38            | -9.36             |
|        | 5 PV  | -7.98            | -8.11             | -11.75           | -11.74            |
| Pot.   | 1 OSC | 53.57            | 54.36             | 65.23            | 65.54             |



|                 |         |         |         |        |
|-----------------|---------|---------|---------|--------|
| activa 2 PV     | 168.15  | 170.55  | 128.48  | 128.59 |
| (MW.) 3 PV      | 49.05   | 47.11   | 76.68   | 77.46  |
| Costo<br>(\$/h) | 1148.14 | 1153.20 | 1347.03 | 1352.5 |
| Pérd.<br>(MW.)  | 5.9154  | 6.1150  | 5.5681  | 5.5970 |

Tomando como referencia los resultados obtenidos a través del Método del Gradiente Reducido, y comparándolos con los obtenidos por el Método de Newton, se determina que las magnitudes de los voltajes, ángulos de los voltajes y potencias de generación respectivamente, tienen un error absoluto menor a  $\pm 1.5\%$ . Esto confirma la validez del Método de Newton.

En cuanto a los resultados de costo de generación y pérdidas, es necesario recalcar que tanto en el ejemplo 1 como en el ejemplo 2 se obtienen valores menores, es decir, con el método de optimización de Newton se llega más cerca del valor óptimo ideal que con el método del gradiente.

#### **4.4 GUIA DE LABORATORIO**

En este numeral se presenta una práctica de Laboratorio la misma que puede ser incluida en el plan académico del Laboratorio de SEP.

- Objetivos .-

- Realizar un análisis comparativo de los tres tipos de flujos óptimos ( F.O.P.G , F.O.P.A y F.O.P.R.)
- Ver la aplicación del flujo óptimo de potencia.
- Información .-

El flujo óptimo de potencia es la solución de un sistema eléctrico de potencia que optimiza una función objetivo específica tal como costo de combustible, pérdidas de la red, etc., cumpliendo al mismo tiempo un conjunto de restricciones impuestas por el equipo y condiciones de operación.

En optimización, un problema de la vida real, es usualmente representado con una función a ser minimizada o maximizada sujeta a las numerosas restricciones que se hallen. Las restricciones pueden ser otras funciones o condiciones simples tales como límites sobre las variables que necesariamente deben ser usadas.

En problemas de flujos óptimos de potencia (F.O.P.) es justamente la función matemática a optimizar (minimizar o maximizar) denominada función objetivo, la que da el nombre a la optimización. Para propósitos de este trabajo las optimizaciones a estudiarse serán:

- Flujo óptimo de potencia activa (despacho económico).
- Flujo óptimo de potencia reactiva (minimización de

pérdidas).

- Flujo óptimo de potencia general (despacho económico y minimización de pérdidas a la vez).

Como se dijo, estas funciones objetivo están sujetas a restricciones, que en forma general para el caso de F.O.P. son:

- a) Restricciones de desigualdad; pertenecen a este grupo los límites sobre las variables que para el F.O.P. de Newton, dependiendo del caso de optimización, pueden ser: potencias activas de generación, ángulos de voltaje, magnitudes de voltajes, cambiadores de taps, y funciones especiales como límites de generación de potencia reactiva, transmisión de potencia por las ramas, etc.
  
- b) Restricciones de igualdad; este grupo lo conforman básicamente las ecuaciones de flujo de potencia.

La función objetivo puede ser una función no lineal de todas o algunas de las variables anteriormente mencionadas, y sabiendo de ante mano que las ecuaciones de flujo de potencia son funciones no lineales de voltajes, ángulos y de las relaciones de taps de los transformadores; entonces el problema de F.O.P. es no lineal, requiriéndose por tanto de métodos de optimización iterativos para su solución.

El método utilizado en el presente trabajo hace uso de la técnica de optimización de los multiplicadores de Lagrange, del teorema de Kuhn y Tucker, y de la técnica numérica de Newton Raphson con el objetivo de obtener iterativamente correcciones sobre las variables que sean del caso, hasta llegar a un punto de operación del sistema de potencia en el cual además de cumplir con las restricciones, las funciones objetivo planteadas tienen un valor óptimo.

- **Procedimiento:**

- Encienda el computador y digite FOPNR.
- Para el sistema del gráfico (4.3) que se encuentra a continuación, ingrese los datos que se encuentran en el anexo N<sup>o</sup> 13.
- Realice los diferentes flujos de optimización para este caso.
- Varíe los límites máximos y mínimos del módulo de los voltajes de barra poniéndoles en 1.1 y 0.9 respectivamente. Realice la corrida de los flujos.

- **Informe .-**

- Presente y analice todos los resultados.
- Realice un análisis comparativo de los resultados del primer caso y del segundo en que se varió los límites de los voltajes.

- Conclusiones y recomendaciones.

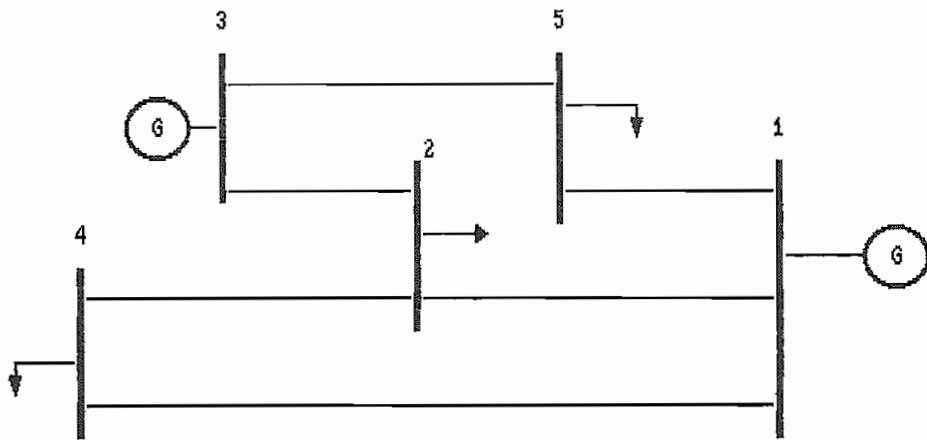


Gráfico 4.3 .- Diagrama Unifilar.  
Sistema tomado de las referencia [12],[13].

# C A P I T U L O V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis se ha desarrollado un paquete interactivo para ser utilizado en computadores personales, cuyo objetivo es la solución de Flujos Optimos de Potencia con fines didácticos y de aplicación práctica.

Para la realización de este objetivo, básicamente se ha trabajado en las siguientes áreas:

- Diseño de una Base de Datos.
- Elaboración de una biblioteca de programas, que le dan la característica interactiva a todo el modelo del Sistema de Base de Datos.
- Desarrollo de programas que resuelven, utilizando el Método de Newton, los siguientes casos de optimización: Flujo Optimo de Potencia Activa también conocido como Despacho Económico, Flujo Optimo de Potencia Reactiva denominado también Minimización de Pérdidas y Flujo Optimo General que es la combinación de los dos casos anteriores.

Considerando estos tres campos se obtienen las siguientes

conclusiones y recomendaciones:

### 5.1. CONCLUSIONES.

- El estudio del Flujo Óptimo en Sistemas de Potencia es de gran utilidad cuando se requiere proveer energía eléctrica a la carga, en las mejores condiciones de seguridad, calidad y economía tanto para el Sistema de Potencia cuanto para el usuario.
- El Método de Optimización de Newton entre otros aspectos es una aplicación directa del Método de Newton-Raphson; no necesita clasificación o diferenciación de las variables, porque todas son procesadas idénticamente; y corrige en forma coordinada dentro de un mismo proceso, variables y multiplicadores de Lagrange.
- Por los resultados obtenidos se puede afirmar que el Método de Optimización de Newton, aplicado a los flujos óptimos estudiados en esta tesis, lleva al Sistema Eléctrico de Potencia a un punto de operación en el que las funciones objetivo tiene un valor óptimo, cumpliendo al mismo tiempo un conjunto de restricciones impuestas por el equipo y condiciones de operación.
- Matemáticamente y computacionalmente el presente método es

superior al del Gradiente-reducido; también disponible en la Facultad.

- La programación interactiva utilizada en este trabajo, da un nuevo enfoque a la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia, pues el estudiante además de asimilar la parte teórica de los nuevos modelos matemáticos se ejercitará también en la preparación de datos, en el análisis de resultados y en la toma de decisiones sobre parámetros reales de los Sistemas de Potencia.
- La Base de Datos cumple con la característica de ser independiente de sus programas de aplicación, permitiendo que sus datos puedan ser fácilmente adaptados a otras aplicaciones tales como Cortocircuitos, Máxima Transferencia de Potencia, etc.
- El paquete interactivo además de su valía didáctica es de aplicación práctica, porque permite realizar estudios de planificación, diseño y operación en Sistemas de Potencia reales.
- Los programas que resuelven, el Flujo Optimo de Potencia requieren de vectores y matrices de gran dimensionamiento. En este trabajo y para los computadores personales del Laboratorio el programa se puede aplicar en sistemas



eléctricos de hasta cuarenta barras con cincuenta y cinco elementos de interconexión como máximo y cuarenta elementos en derivación a tierra.

- Los programas que resuelven, el Flujo Optimo tienen tiempos de ejecución aproximadamente proporcionales al tamaño de la red.

## 5.2 RECOMENDACIONES .-

- Se recomienda incorporar en el programa de prácticas de laboratorio el uso de este paquete interactivo como parte de la enseñanza formal de SEP.
- El método de Newton, para la optimización de otras funciones objetivo diferentes a las utilizadas en esta tesis, puede ser implementado con el mismo esquema utilizado. Por ello se recomienda el uso de este método en el análisis de Límite de Estabilidad por Voltaje en Sistemas Multimáquina [10], estudio que determina las máximas transferencias de potencia por las líneas.
- Se recomienda utilizar este paquete interactivo en el análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia para estudios de operación, planificación y diseño, por tanto es deseable que la EPN haga la difusión correspondiente en las entidades del

sector eléctrico nacional.

- Para mejorar el tiempo de solución y optimizar la memoria empleada por el programa de flujos óptimos desarrollado en esta tesis, se recomienda hacer una versión desacoplada del método.
  
- Este paquete de programas puede ser complementado con la elaboración de un tutor para la enseñanza de Flujos Óptimos de Potencia, el mismo que debe ser escrito en FOXBASE.

# A N E X O 1

## MODELO MATEMATICO GENERAL DE UN ELEMENTO SERIE DEL SEP.

El flujo de potencia por los elementos del SEP. pueden calcularse a partir del siguiente modelo matemático:

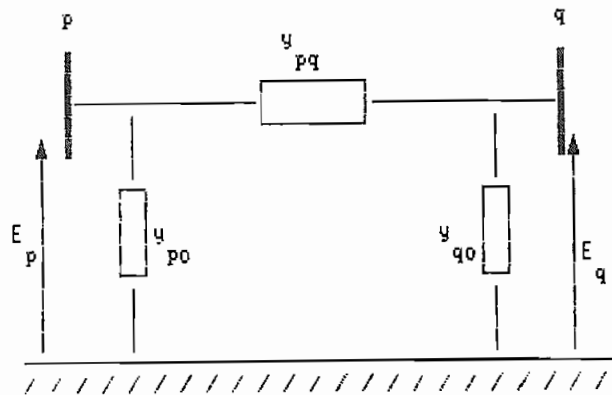


Figura A1.1

De acuerdo al gráfico, se puede plantear las siguientes ecuaciones:

$$S_{pq}^* = E_p^* I_{pq} = P_p - j Q_p \quad (A1.1)$$

$$I_{pq} = (E_p - E_q) y_{pq} + E_p y_{po} \quad (A1.2)$$

reemplazando la ecuación de corriente en la de potencia, se obtiene:

$$S_{pq}^* = E_p^* (E_p - E_q) y_{pq} + E_p^* E_p y_{po} \quad (A1.3)$$

en forma polar los voltajes y admitancias pueden escribirse como:

$$\begin{aligned}
 E_p &= V_p \angle \theta_p \\
 E_q &= V_q \angle \theta_q \\
 y_{pq} &= |y_{pq}| \angle \alpha_{pq} \\
 y_{po} &= |y_{po}| \angle \mu_{po}
 \end{aligned}
 \tag{A1.4}$$

la ecuación (A1.3), con ayuda de estas últimas expresiones se expresa:

$$\begin{aligned}
 S_{pq}^* &= V_p^2 |y_{pq}| \angle \alpha_{pq} - V_p V_q |y_{pq}| \angle (-\theta_p + \theta_q + \alpha) \\
 &\quad + V_p^2 |y_{po}| \angle \mu_{po}
 \end{aligned}
 \tag{A1.5}$$

separando la potencia aparente, en sus partes real e imaginaria:

$$\begin{aligned}
 P_{pq} &= V_p^2 |y_{pq}| \cos(\alpha) - V_p V_q |y_{pq}| \cos(-\theta_p + \theta_q + \alpha) \\
 &\quad + V_p^2 |y_{po}| \cos(\mu)
 \end{aligned}
 \tag{A1.6}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{pq} &= -V_p^2 |y_{pq}| \sin(\alpha) + V_p V_q |y_{pq}| \sin(-\theta_p + \theta_q + \alpha) \\
 &\quad - V_p^2 |y_{po}| \sin(\mu)
 \end{aligned}$$

por igual desarrollo las potencias activa y reactiva de la barra q a la barra p pueden ser calculadas.

$$\begin{aligned}
 P_{qp} &= V_q^2 |y_{pq}| \cos(\alpha) - V_q V_p |y_{pq}| \cos(-\theta_q + \theta_p + \alpha) \\
 &\quad + V_q^2 |y_{po}| \cos(\mu)
 \end{aligned}$$

(A1.7)

$$Q_{qp} = -V_q^2 |y_{pq}| \sin(\alpha) + V_q V_p |y_{pq}| \sin(-\theta_q + \theta_p + \alpha) - V_q^2 |y_{pq}| \sin(\mu)$$

La potencia de la barra oscilante será:

$$S_1^* = E_1^* * I_1 = E_1^* * \sum_{i=1}^N Y_{1i} E_i \quad (A1.8)$$

La potencia activa de pérdidas se la puede calcular como:

$$PL = \sum_{i=1}^N PG_i - \sum_{i=1}^N PC_i \quad (A1.9)$$

en donde:

$PG_i$  Es la potencia de generación en la barra  $i$ .

$PC_i$  Es la potencia de carga en la barra  $i$ .

La potencia reactiva de pérdidas será el sumatorio de todas las fuentes de potencia reactiva (generadores, líneas, condensadores) menos el sumatorio de la potencia reactiva de carga [17],[7].

## A N E X O 2

### FUNCION DE COSTO DE COMBUSTIBLE

El objetivo de un despacho económico en F.O.P., es minimizar los costos de generación, por ello, la función de costo de combustible clásicamente asumida, es muy útil en este tipo de estudios como función objetivo de cada unidad, previamente asumida como térmica en caso de no serlo.

Generalmente, las funciones de costo de combustible son curvas plinómicas con representación gráfica semejante a la figura A2.1.

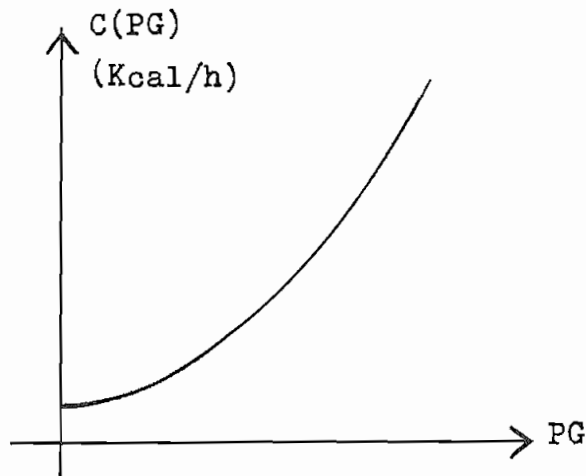


Figura A2.1.- Curva típica de entrada-salida.

En donde  $C(PG)$  es el consumo de combustible en Kcal/hora, que pueden traducirse a \$/hora, y  $PG$  es la potencia generada.

Midiendo experimentalmente la cantidad de combustible por hora que consume el generador para una potencia fija de generación, se obtiene un punto de la curva. Repitiéndose el proceso en diferentes potencias de generación, se obtendrá varios puntos y a partir de éstos, la curva [17].

El proceso de optimización requiere de una función analítica de la curva, por lo cual, típicamente se la aproxima a una función cuadrática, aunque en algunos casos se puede considerar que es lineal o cúbica [7], así:

$$C(PG) = a PG^2 + b PG + c \quad (A2.1)$$

Para propósitos del estudio se considera, que las funciones son cuadráticas con la estructura dada en (A2.1) en donde  $C(PG)$  se ha traducido a \$/hora y que se conoce dicha función para cada una de las unidades de generación del sistema.

Bajo la consideración de que (A2.1) se le ha traducido a \$/hora, entonces, los coeficientes de las funciones objetivo en valores reales tienen las siguientes características [17]:

| COEFICIENTE  | ORDEN     | UNIDAD               |
|--------------|-----------|----------------------|
| $a_i$ (real) | $10^{-3}$ | \$/h.MW <sup>2</sup> |
| $b_i$ (real) | $10^0$    | \$/h.MW              |
| $c_i$ (real) | $10^2$    |                      |

Debido a que los cálculos desarrollados a lo largo del presente trabajo son por unidad, es necesario entre los valores reales y los valores por unidad hacer una equivalencia que ayude a relacionarlos. Esta equivalencia se indica a continuación:

$$\begin{aligned} a_i (\text{real}) PG_i^2 (\text{MW}) + b_i (\text{real}) PG_i (\text{MW}) + c_i &= \\ a_i (\text{p.u.}) PG_i^2 + b_i (\text{p.u.}) PG_i (\text{p.u.}) + c_i (\text{p.u.}) & \quad (\text{A2.2}) \end{aligned}$$

Si en (A2.2) se relaciona términos de igual exponente para PG, se obtiene:

$$\begin{aligned} a_i (\text{real}) PG_i^2 (\text{MW}) &= a_i (\text{p.u.}) PG_i (\text{p.u.}) \\ b_i (\text{real}) PG_i (\text{MW}) &= b_i (\text{p.u.}) PG_i (\text{p.u.}) \\ c_i (\text{real}) &= c_i (\text{p.u.}) \end{aligned} \quad (\text{A2.3})$$

Teniendo en cuenta que por definición:

$$PG_i (\text{p.u.}) = PG_i (\text{MW}) * (P_{\text{BASE}})^{-1}$$

entonces, de las igualdades (A2.3) se sacan las relaciones buscadas, así:

$$a_i (\text{p.u.}) = a_i (\text{real}) * (P_{\text{BASE}})^2$$



$$b_i (\text{p.u.}) = b_i (\text{real}) \times (P_{\text{BASE}})$$

$$c_i (\text{p.u.}) = c_i (\text{real})$$

Por lo tanto, los coeficientes de las funciones objetivo con valores por unidad tendrán las siguientes características:

| COEFICIENTE         | UNIDAD |
|---------------------|--------|
| $a_i (\text{p.u.})$ | \$/h   |
| $b_i (\text{p.u.})$ | \$/h   |
| $c_i (\text{p.u.})$ | \$/h   |

El orden de los coeficientes  $a_i$  y  $b_i$  depende de la potencia base que se haya seleccionado.

## A N E X O 3

### MODELACION DEL TRANSFORMADOR CON CAMBIADOR DE TAPS.

El transformador con cambiador de taps, puede ser representado como una admitancia entre dos barras en combinación con un transformador ideal, como se indica en la siguiente figura [11]:

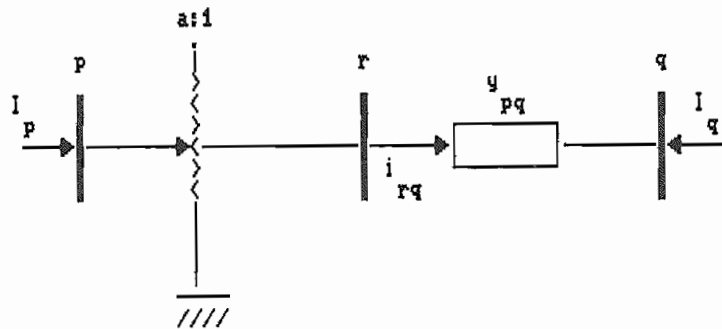


Figura A3.1

En la figura:

$r$  Es una barra intermedia, creada con el fin de facilitar el análisis.

$a$  Es la posición del tap. Cuando este se encuentra en la posición nominal, entonces  $a=1$ .

$y_{pq}$  Es la admitancia del transformador.

El transformador ideal, que se encuentra entre las barras  $p$  y  $r$ , puede considerarse como un autotransformador para modelar el cambio de tap, con lo que se puede plantear las siguientes

relaciones:

$$E_p = a E_r \quad (\text{A3.1})$$

$$I_p = i_{rq}/a \quad (\text{A3.2})$$

Además, del circuito de la figura, se establece las siguientes ecuaciones:

$$I_p = (E_r - E_q) (y_{pq}/a) \quad (\text{A3.3})$$

$$I_q = - i_{rq} = (E_q - E_r) (y_{pq}) \quad (\text{A3.4})$$

Reemplazando (A3.1) en las dos últimas ecuaciones, se obtiene las fórmulas del modelo físico del transformador, así:

$$I_p = (E_p/a - E_q) (y_{pq}/a) \quad (\text{A3.5})$$

$$I_q = (E_q - E_p/a) (y_{pq}) \quad (\text{A3.6})$$

Ahora, con ayuda del modelo  $\pi$  modelaremos el efecto del cambio de taps en función de impedancias, como en la figura A3.2, en donde se puede plantear las siguientes expresiones:

$$I_p = E_p B + (E_p - E_q) A \quad (\text{A3.7})$$

$$I_q = E_q C + (E_q - E_p) A \quad (\text{A3.8})$$

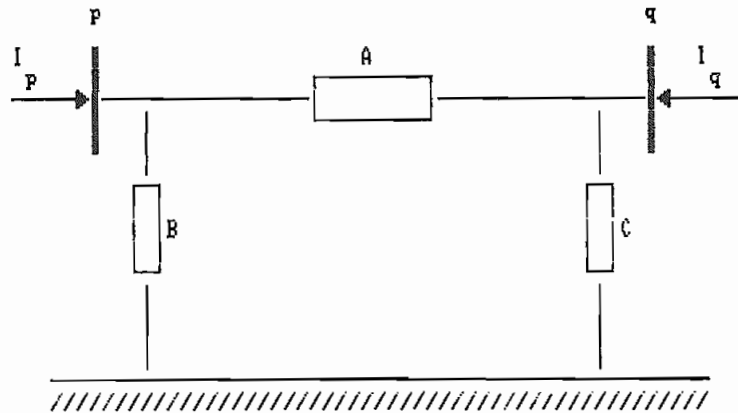


Figura A3.2 .- modelo  $\pi$  del transformador con cambio de taps.

Bajo las condiciones de que  $E_p = 1\text{pu.}$  y  $E_q = 0\text{pu.}$ , se obtienen los siguientes resultados:

a) En el modelo real:

$$I_p = (1/a^2)y_{pq}$$

$$I_q = (1/a)y_{pq}$$

b) En el modelo  $\pi$ :

$$I_p = B + A$$

$$I_q = -A$$

de estas relaciones se obtiene que:

$$A = (1/a)y_{pq} \quad (\text{A3.9})$$

$$B = (1/a^2 - 1/a)y_{pq} \quad (\text{A3.10})$$

Del mismo modo, haciendo para las condiciones  $E_p = 0\text{pu.}$  y

$$E_q = 1 \text{ pu.} :$$

$$C = (1 - 1/a)y_{pq} \quad (\text{A3.11})$$

Físicamente, cuando se incrementa "a", el voltaje en la barra q disminuye y cuando disminuye "a", el voltaje en la barra q aumenta. Para evitar esto que podría dar lugar a confusiones, se utiliza la siguiente definición:

$$t = 1/a \quad (\text{A3.12})$$

que utilizada en las ecuaciones de A, B y C nos da:

$$A = t y_{pq} \quad (\text{A3.13})$$

$$B = t(t-1)y_{pq} \quad (\text{A3.14})$$

$$C = (1-t)y_{pq} \quad (\text{A3.15})$$

## A N E X O 4

### ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA COMO FUNCIONES EXPLICITAS DE LOS VALORES DE TAPS.

En el proceso de solución de la optimización, se necesita hacer el cálculo de derivadas como  $dP_{NETAK} / dt_{jn}$ ,  $dQ_{NETAK} / dt_{jn}$ , etc., pero en las ecuaciones:

$$P_{NETAK} = \sum_{i=1}^N V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (A4.1)$$

$$Q_{NETAK} = \sum_{i=1}^N V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (A4.2)$$

deducidas en el capítulo No. 2, las variables  $t_{jn}$  se encuentran implícitas dentro de los elementos  $|Y_{ki}|$ , haciendo que el cálculo de dichas derivadas resulte difícil. Por ello, a continuación se utilizarán ciertos artificios con el objetivo de modificar las ecuaciones de potencia activa y reactiva neta, haciendo que sean funciones explícitas de los taps, es decir de las variables  $t_{jn}$ .

Para identificar el tap al cual nos referimos dentro de una red, se adoptará la convención de acompañar los "t" con dos subíndices, que corresponderán a las barras entre las cuales se encuentra conectado el transformador, indicando además, cual de ellas es la que contiene el cambiador de taps y cual es la barra controlada, así:

- $t_{jm}$  donde  $j$  es la barra que contiene el cambiador de taps, y  $m$  es la barra controlada.

Para visualizar la modificación de la matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  por el cambio de taps, se utilizará el siguiente ejemplo:

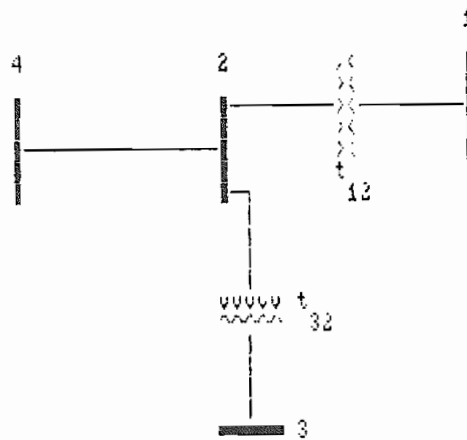


Figura A4.1.

La matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  para el caso en que todos los taps estén en posición nominal  $t=1$ , denominada  $Y_{\text{BARRA}}^{(0)}$  es:

$$Y_{\text{BARRA}}^{(0)} = \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ (y_{12}+y_{14}) & -y_{12} & 0 & -y_{14} \\ -y_{12} & (y_{12}+y_{23}+y_{20}) & -y_{23} & 0 \\ 0 & -y_{32} & y_{32}+y_{30} & 0 \\ -y_{14} & 0 & 0 & y_{41} \end{array} \right|$$

(A4.3)

La matriz  $Y_{\text{BARRA}}$  para el caso en que se tenga los taps  $t_2$  y

$t_{32}$  diferentes de la unidad, es:

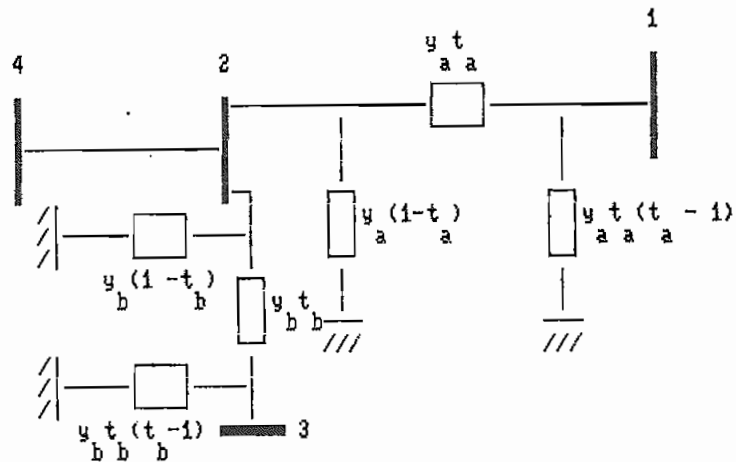


Figura A4.2.

haciendo

$$y_a = y_{12} = y_{21}$$

$$t_a = t_{12} = t_{12}^{\wedge} = t_{21}^{\wedge}$$

$$y_b = y_{23} = y_{32}$$

$$t_b = t_{32} = t_{23}^{\wedge} = t_{32}^{\wedge}$$

$$Y_{\text{BARRA}} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & (y_{12}t_{12}^{\wedge} + y_{14}) & -y_{12}t_{12}^{\wedge} & 0 & -y_{14} \\ 2 & -y_{21}t_{21}^{\wedge} & (y_{21} + y_{23} + y_{20}) & -y_{23}t_{23}^{\wedge} & 0 \\ 3 & 0 & -y_{32}t_{32}^{\wedge} & (y_{32}t_{32}^{\wedge} + y_{30}) & 0 \\ 4 & -y_{41} & 0 & 0 & y_{41} \end{array}$$

(A4.4)



Comparando los elementos de (A4.3) y (A4.4) se puede sacar las siguientes relaciones generalizadas:

$$- \quad |Y_{ki}| = |Y_{ki}^{(0)}| t_{ki}^{\wedge} \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, N \\ i=1, \dots, N \\ k = i \end{array} \quad (A4.5)$$

donde:  $t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = t_{ki}$  Para un transformador.  
 $t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = 1$  Para el caso de no ser un transformador (ej: Línea).

$$- \quad |Y_{kk}| = |y_{k0} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N Y_{ki}^{(0)} t_{ki}^{\#}| \quad (A4.6)$$

donde:  $t_{ki}^{\#} = t_{ki}^{\#}$  Para un transformador con  
 $t_{ik} = 1$  cambiador de taps en la barra k, control de la barra i.  
 $t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = 1$  Para el caso de no ser un transformador.

nota: Los  $t_{jn}$  son números reales positivos que escalan el módulo de un número complejo y no su ángulo, por ello en las relaciones anteriores se toma únicamente el módulo de las admitancias.

Reemplazando las relaciones (A4.5) y (A4.6), en las ecuaciones (A4.1) y (A4.2), se obtiene:

$$P_{NETAK} = V_k^2 |Y_{kk}| \cos(-\alpha_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki})$$

$$P_{NETAK} = V_k^2 |y_{k0} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki}^{(0)} t_{ki}^n| \cos(-\alpha_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i \\ |Y_{ki}^{(0)}| t_{ki}^n \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki})$$

$$P_{NETAK} = V_k^2 |y_{k0}| \cos(\alpha_{k0}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k |Y_{ki}^{(0)}| \{V_i t_{ki}^n \cos(\theta_k - \theta_i - \\ \alpha_{ki}) - V_k t_{ki}^n \cos(\alpha_{ki})\} \quad (A4.7)$$

Por similitud para la potencia reactiva:

$$Q_{NETAK} = -V_k^2 |y_{k0}| \sin(\alpha_{k0}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k |Y_{ki}^{(0)}| \{V_i t_{ki}^n \sin(\theta_k - \theta_i - \\ \alpha_{ki}) + V_k t_{ki}^n \sin(\alpha_{ki})\} \quad (A4.8)$$

Con estas ecuaciones se calculan las derivadas con respecto a  $t_{jn}$  que el algoritmo requiera.

## A N E X O 5

### DESARROLLO DE LA ECUACION MATRICIAL $W \Delta \bar{Z} = -\bar{g}$ .

Como se había visto en el capítulo No. 2, una vez planteada la función objetivo, las variables del problema, restricciones de desigualdad sobre variables, restricciones funcionales de igualdad y desigualdad; la meta es minimizar el valor de la función objetivo, es decir, matemáticamente:

$$\min F(\bar{Y}) \quad (\text{A5.1})$$

sujeta a las restricciones de igualdad impuestas por las ecuaciones de red (ecuaciones de tolerancia):

$$\bar{C}(\bar{Y}) = \bar{0} \quad (\text{A5.2})$$

y sujeta a las restricciones de desigualdad sobre variables y funciones:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{\min} &\leq \bar{Y} \leq \bar{Y}_{\max} \\ \bar{J}_{\min} &\leq \bar{g}(\bar{Y}) \leq \bar{J}_{\max} \end{aligned} \quad (\text{A5.3})$$

Para el desarrollo de la ecuación matricial, no se tomará en cuenta las restricciones de desigualdad.

Mediante la técnica de optimización de los multiplicadores de Lagrange, se modela la función ampliada de Lagrange que será igual a la función objetivo original  $F(\bar{Y})$ , más cada una de las restricciones multiplicadas por una constante, así:

$$L(\bar{Y}, \bar{\tau}) = F(\bar{Y}) - \tau_1 C_1 - \tau_2 C_2 - \dots - \tau_n C_n \quad (\text{A5.4})$$

en donde:  $n$  Es el número de restricciones de igualdad.

$\bar{Y}$  Es el vector conceptual de variables.

$\bar{\tau}$  Es el vector de los multiplicadores de Lagrange.

La ecuación (A5.4) puede plantearse en forma más compacta, de la siguiente forma:

$$L(\bar{Y}, \bar{\tau}) = F(\bar{Y}) - \bar{\tau}^T C(\bar{Y}) \quad (\text{A5.5})$$

Para llegar a tener el óptimo (mínimo), se deberán cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{Y}} = \bar{0} \quad (\text{A5.6})$$

$$\frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{\tau}} = \bar{0} \quad (\text{A5.7})$$

Estas dos últimas ecuaciones expandidas en series de Taylor, alrededor del punto  $(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)$ , [4],[2],[16]:

$$\bar{0} = \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{Y}} \Big|_{(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)} + \left[ \frac{\delta}{\delta \bar{Y}} \left( \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{Y}} \right) \Big|_{(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)} \right] \Delta \bar{Y} +$$

$$\left[ \frac{\delta}{\delta \bar{\tau}} \left( \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{Y}} \right) \Big|_{(Y_0, \tau_0)} \right] \Delta \bar{\tau} + \epsilon_1 \quad (\text{A5.8})$$

$$\begin{aligned} \bar{0} = & \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{\tau}} \Big|_{(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)} + \left[ \frac{\delta}{\delta \bar{Y}} \left( \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{\tau}} \right) \Big|_{(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)} \right] \Delta \bar{Y} + \\ & \left[ \frac{\delta}{\delta \bar{\tau}} \left( \frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{\tau}} \right) \Big|_{(\bar{Y}_0, \bar{\tau}_0)} \right] \Delta \bar{\tau} + \epsilon_2 \end{aligned} \quad (\text{A5.9})$$

en donde [18]:

- $\Delta \bar{Y}, \Delta \bar{\tau}$  Son las correcciones de las variables y multiplicadores de Lagrange, respectivamente.
- $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  Son los errores debido al acotamiento de las series de Taylor. Pero se les asume que tienden a cero, pues  $(Y_0, \tau_0)$  son muy cercanos al punto solución.
- $\frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{Y}} = \bar{g}_Y$  Es el vector gradiente de la función ampliada con respecto a las variables del vector  $Y$  (indicado en el capítulo No. 2).
- $\frac{\delta L(\bar{Y}, \bar{\tau})}{\delta \bar{\tau}} = \bar{g}_\tau$  Es el vector gradiente con respecto a los multiplicadores de Lagrange de la función  $L$ . Este vector contiene, como se puede comprobar las ecuaciones de incrementos  $CP_i$  y  $CQ_i$ .
- $\frac{\delta}{\delta \bar{Y}} (\bar{g}_\tau) = J(\bar{Y})$  Es la matriz Jacobiano de las ecuaciones de flujo de potencia.

- $\frac{\delta}{\delta \bar{\tau}}(\bar{g}_\tau) = J^T(\bar{Y})$  Es la matriz Jacobiano transpuesta de las ecuaciones de flujo de potencia.
- $\frac{\delta}{\delta \bar{Y}}(\bar{g}_Y) = H(\bar{Y})$  Es la matriz Hessiano de la función ampliada en donde todos sus elementos son las segundas derivadas de L de la forma  $\delta^2 L / (\delta \bar{Y}_i \delta \bar{Y}_j)$ , en las que  $Y_i, Y_j$  son cualquiera de las variables del vector  $\bar{Y}$ .
- $\frac{\delta}{\delta \bar{\tau}}(\bar{g}_\tau) = [0]$  Es una matriz cero, pues ninguno de los elementos del vector  $g_\tau$  es función de los multiplicadores  $\bar{\tau}$ .

En forma matricial las ecuaciones (A5.8) y (A5.9), con la nomenclatura asignada a cada término, se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{vmatrix} H(\bar{Y}, \bar{\tau}) & -J^T(\bar{Y}) \\ -J(\bar{Y}) & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \bar{Y} \\ \Delta \bar{\tau} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\bar{g}_Y \\ -\bar{g}_\tau \end{vmatrix} \quad (\text{A5.10})$$

y de manera más compacta:

$$W \Delta \bar{Z} = -\bar{g} \quad (\text{A5.11})$$

## A N E X O 6

### DESARROLLO DE LAS FORMULAS DE LOS ELEMENTOS DE LA MATRIZ "W" Y VECTOR GRADIENTE " $-\bar{g}$ ".

Como se dijo en el capítulo No. 2, la ecuación matricial para minimización de la función de Lagrange en cualquier problema de optimización por el método de Newton es:

$$W \Delta \bar{Z} = -\bar{g} \quad (A6.1)$$

Con el propósito de describir esta ecuación matricial en notación matemática concisa, para los tres tipos de optimización;

- (a) Flujo óptimo general.
- (b) Flujo óptimo de potencia activa.
- (c) Flujo óptimo de potencia reactiva.

se detallarán en este anexo las derivadas de los componentes del vector " $\bar{g}$ " y matriz "W".

Consideremos el sistema de potencia de N barras, formado por una barra oscilante, M barras de carga y S barras de generación de las cuales (S-S1) barras son asociadas a condensadores sincrónicos, ordenadas de la siguiente forma:

barra<sub>1</sub>                      Oscilante.

barra<sub>2</sub>  
 ..... S1 barras PV.  
 barra<sub>S1+1</sub>  
  
 barra<sub>S1+2</sub>  
 ..... (S-S1) barras PV.  
 barra<sub>S+1</sub>  
  
 barra<sub>S+2</sub>  
 ..... M barras de carga PQ.  
 barra<sub>N</sub>

En este sistema se plantean matemáticamente las respectivas funciones ampliadas para cada caso de optimización, así:

$$(a) \quad L = \sum_{k=1}^{S1+1} a_k PG_k^2 + b_k PG_k + c_k - \sum_{k=1}^n \tau P_k CP_k - \sum_{k=1}^n \tau Q_k CQ_k \quad (A6.2)$$

$$(b) \quad L = \sum_{k=1}^{S1+1} a_k PG_k^2 + b_k PG_k + c_k - \sum_{k=1}^n \tau P_k CP_k - \sum_{k=1}^n \tau Q_k CQ_k \quad (A6.3)$$

$$(c) \quad L = PG_1 - \sum_{k=1}^n \tau P_k CP_k - \sum_{k=1}^n \tau Q_k CQ_k \quad (A6.4)$$

Funciones en las que sus elementos, explicados en mayor detalle en el capítulo No. 2, son:



- $PG_k$  Potencia activa de generación de las barras PV no asociadas a condensadores sincrónicos.
- $\tau P_k$  y  $\tau Q_k$  Multiplicadores de Lagrange.
- $a_k$ ,  $b_k$ , y  $c_k$  Coeficientes de las funciones de costo de generación.
- $CP_k$  y  $CQ_k$  Ecuaciones de incrementos.

De estos elementos, son las ecuaciones de incrementos las que mayor dificultad presentan en la derivación, por ello a continuación se da explícitamente su estructura matemática y el de sus componentes:

$$CP_k = P_k(\bar{Y}) - PG_k - PC_k \quad k=1, \dots, S+1. \quad (A6.5)$$

$$CP_k = P_k(\bar{Y}) - PC_k \quad k=S+2, \dots, N. \quad (A6.6)$$

$$CQ_k = Q_k(\bar{Y}) - QG_k - QC_k \quad k=1, \dots, S+1. \quad (A6.7)$$

$$CQ_k = Q_k(\bar{Y}) - QC_k \quad k=S+2, \dots, N. \quad (A6.8)$$

en donde:

$PG_k$  y  $QG_k$  Son las potencias activas y reactivas de generación.

$PC_k$  y  $QC_k$  Son las potencias activas y reactivas de carga.

$P_k(\bar{Y})$   
y  $Q_k(\bar{Y})$  Son las potencias netas inyectadas en la barra k.

" $\bar{Y}$ " Es el vector de variables.

Las ecuaciones de potencia neta inyectada en la barra K y el vector conceptual de variables, deducidos en el capítulo No. 2, son:

$$P_k(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^N V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (A6.9)$$

$$Q_k(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^N V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (A6.10)$$

$$\bar{Y} = [P_1, \dots, P_{S+1}, t_{j\#}, \theta_1, V_1, \theta_2, V_2, \dots, \theta_n, V_n] \quad (A6.11)$$

Hasta el momento todos los términos expresados, potencias netas inyectadas, funciones de costo, potencias de carga, potencias de generación, multiplicadores de Lagrange, ecuaciones de tolerancia, etc., que forman la función ampliada, no son funciones explícitas de las variables  $t_{j\#}$ , es decir de los cambiadores de taps de los transformadores. Por esto, para introducir el efecto de los taps en el proceso de optimización se ha modificado las ecuaciones (A5.9) y (A5.10), de tal forma de poder realizar las derivadas con respecto a un  $t_{j\#}$  de manera directa.

$$P_k(\bar{Y}) = V_k^2 |y_{k0}| \cos(\alpha_{k0}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k |Y_{ki}^{(0)}| \{V_i t_{ki}^{\wedge} \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - V_k t_{ki}^{\wedge} \cos(\alpha_{ki})\} \quad k=1, \dots, n \quad (A6.12)$$

$$Q_k(\bar{Y}) = -V_k^2 |y_{k0}| \sin(\alpha_{k0}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k |Y_{ki}^{(0)}| \{V_i t_{ki}^{\wedge} \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + V_k t_{ki}^{\wedge} \sin(\alpha_{ki})\} \quad k=1, \dots, n \quad (A6.13)$$

en donde:  $t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = t_{jn}^{\wedge}$  para transformadores

$t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = 1$  cuando el elemento entre las barras k e i no es un transformador.

$t_{ki}^{\wedge} = t_{jn}^{\wedge}$  para transformadores en que  $j=k$ .

$t_{ik}^{\wedge} = 1$

$t_{ki}^{\wedge} = t_{ik}^{\wedge} = 1$  cuando el elemento entre las barras k e i no es un transformador.

(ecuaciones deducidas en el anexo No. 4)

Con todos los detalles expuestos hasta el momento, se está en capacidad de deducir las derivadas de los distintos elementos del vector " $-\bar{g}$ " y matriz "W". Derivadas que podrían ser presentadas de diferentes formas, pero con el propósito básico de hacer fácil el entendimiento y ubicación dentro del sistema matricial, su presentación responderá a la organización de la matriz W, explicada en el capítulo No. 2 a través de las figuras (2.2.2) de este capítulo:

(ver figuras en las páginas siguientes)

|   | W           |                        |                           |                              |                              |                              | $\Delta Z$                   | $- E$   |   |
|---|-------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|---|
|   | 0           | 1                      | 2                         | 3                            | 4                            | 5                            | 6                            |   |   |
| 0 | H<br>H<br>H | 1                      | 1                         | HHJJ                         | HHJJ                         | HHJJ                         | HHJJ                         | $\Delta P1$<br>$\Delta P2$<br>$\Delta t35$<br>$\Delta t46$            | 8L/8P1<br>8L/8P2<br>8L/8t35<br>8L/8t46          |
| 1 |             | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0 | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>0 | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ |                              |                              | $\Delta \theta 1$<br>$\Delta V 1$<br>$\Delta T P 1$<br>$\Delta T q 1$ | 8L/8\theta 1<br>8L/8V 1<br>8L/8TP 1<br>8L/8Tq 1 |
| 2 |             |                        | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0    | 0000<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | 0000<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ |                              |                              | $\Delta \theta 2$<br>$\Delta V 2$<br>$\Delta T P 2$<br>$\Delta T q 2$ | 8L/8\theta 2<br>8L/8V 2<br>8L/8TP 2<br>8L/8Tq 2 |
| 3 |             |                        |                           | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ |                              | $\Delta \theta 3$<br>$\Delta V 3$<br>$\Delta T P 3$<br>$\Delta T q 3$ | 8L/8\theta 3<br>8L/8V 3<br>8L/8TP 3<br>8L/8Tq 3 |
| 4 |             |                        |                           |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | 0000<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | 0000<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | $\Delta \theta 4$<br>$\Delta V 4$<br>$\Delta T P 4$<br>$\Delta T q 4$ | 8L/8\theta 4<br>8L/8V 4<br>8L/8TP 4<br>8L/8Tq 4 |
| 5 |             |                        |                           |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | $\Delta \theta 5$<br>$\Delta V 5$<br>$\Delta T P 5$<br>$\Delta T q 5$ | 8L/8\theta 5<br>8L/8V 5<br>8L/8TP 5<br>8L/8Tq 5 |
| 6 |             |                        |                           |                              |                              | HHJJ<br>HJJ<br>00<br>0       | HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ<br>HHJJ | $\Delta \theta 6$<br>$\Delta V 6$<br>$\Delta T P 6$<br>$\Delta T q 6$ | 8L/8\theta 6<br>8L/8V 6<br>8L/8TP 6<br>8L/8Tq 6 |

Figura A6.1

3

|   |  |   |   |   |
|---|--|---|---|---|
|   | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_3^2}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_3 \delta V_3}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_3 \delta \tau_{p3}}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_3 \delta \tau_{q3}}$ |
| 3 |  | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_3^2}$               | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_3 \delta \tau_{p3}}$      | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_3 \delta \tau_{q3}}$      |
|   |  |   | 0   | 0   |
|   |  |   |   | 0   |

4

|   |   |  |   |   |
|---|---|--|---|---|
|   | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_4 \delta \theta_4}$  | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_4 \delta V_4}$  | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_4 \delta \tau_{p4}}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_4 \delta \tau_{q4}}$ |
| 3 | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_4 \delta \theta_4}$       | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_4 \delta V_4}$       | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_4 \delta \tau_{p4}}$      | $\frac{\delta^2 L}{\delta V_4 \delta \tau_{q4}}$      |
|   | $\frac{\delta^2 L}{\delta \tau_{p4} \delta \theta_4}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \tau_{p4} \delta V_4}$ | 0   | 0   |
|   | $\frac{\delta^2 L}{\delta \tau_{q4} \delta \theta_4}$ | $\frac{\delta^2 L}{\delta \tau_{q4} \delta V_4}$ | 0   | 0   |

Figura (A6.2).- bloques representativos de la figura (A6.1).

### 1. ELEMENTOS DEL VECTOR GRADIENTE " $-\bar{g}$ ".

El vector gradiente " $-\bar{g}$ " está compuesto de las primeras derivadas parciales de la forma  $\delta L / \delta P_k$ ,  $\delta L / \delta t_{jB}$ ,  $\delta L / \delta \theta_k$ ,  $\delta L / \delta V_k$ ,  $\delta L / \delta \tau_{pk}$  y  $\delta L / \delta \tau_{qk}$  como se muestra en la figura (A6.1).

A continuación se detallan dichas derivadas, las mismas que en su mayoría son iguales para los distintos tipos de optimización en estudio, por ello sólo cuando sea necesario se hará una diferenciación, anteponiendo a la derivada una letra (a), (b) o (c) dependiendo del caso de optimización a que corresponda.

$$(a) \quad \frac{-\delta L}{\delta PG_k} = - (a_k * 2) PG_k - b_k - \tau P_k \quad k=1, \dots, S1+1 \quad (A6.14)$$

(b) igual a (A5.14).

$$(c) \quad \frac{-\delta L}{\delta PG_1} = -1 - \tau P_1$$

$$\frac{-\delta L}{\delta PG_k} = - \tau P_k \quad k=2, \dots, S1+1 \quad (A6.15)$$

$$\frac{-\delta L}{\delta t_{jm}} = \tau P_k \sqrt{V} \{ \sqrt{V} |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - 2V_k |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\alpha_{kj}) \}$$

$$+ \tau P_i \sqrt{V} \sqrt{V} |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) + \tau q_k V_k \{ V_i |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + 2V_k |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\alpha_{ki}) \} + \tau q_i \sqrt{V} \sqrt{V} |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})$$

$$j=k, m=i$$

$$j \neq m \quad (A6.16)$$

$$\begin{aligned}
\frac{-\delta L}{\delta \theta_k} = & -\tau p_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k \{ \sum_{i=1}^n |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \{ \sum_{i=1}^n \tau p_i V_i \\ & |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \} + \tau q_k V_k \{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \\ & \alpha_{ki}) \} - V_k \{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \tau q_i V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \} \\ & k=1, \dots, N \quad (A6.17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{-\delta L}{\delta V_k} = & \tau p_k \{ 2V_k |Y_{kk}| \cos(\alpha_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \} + \\ & \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \tau p_i V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \} + \tau q_k \{ -2V_k |Y_{kk}| \sin(\alpha_{kk}) \\ & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \tau q_i V_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \\ & \alpha_{ik}) \} \\ & k=1, \dots, N \quad (A6.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{-\delta L}{\delta \tau p_k} = & \{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \} + V_k^2 |Y_{kk}| \cos(\alpha_{kk}) - \\ & PG_k - PC_k \\ & k=1, \dots, S1+1 \quad (A6.19)
\end{aligned}$$

$$\frac{-\delta L}{\delta \tau p_k} = \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \right\} + V_k^2 |Y_{kk}| \cos(\alpha_{kk}) -$$

$PC_k$

(A6.20)

$k=S1+2, \dots, N$

$$\frac{-\delta L}{\delta \tau q_k} = \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \right\} - V_k^2 |Y_{kk}| \sin(\alpha_{kk}) -$$

$QG_k - QC_k$

(A6.21)

$k=1, \dots, S1+S2+1$

$$\frac{-\delta L}{\delta \tau q_k} = \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \right\} - V_k^2 |Y_{kk}| \sin(\alpha_{kk}) -$$

$QC_k$

(A6.22)

$k=S1+S2+2, \dots, N$

## 2. ELEMENTOS DE LA MATRIZ "W".

La matriz "W" está compuesta por las segundas derivadas de la forma:

$$\frac{\delta L^2}{\delta y_k \delta \tau_i} = \frac{\delta L^2}{\delta \tau_i \delta y_k} \quad (A6.23)$$

$$\frac{\delta L^2}{\delta y_k \delta y_i} = \frac{\delta L^2}{\delta y_i \delta y_k} \quad (A6.24)$$



donde los  $y_k$  o  $y_j$  son los elementos del vector de variables " $\bar{Y}$ ", y  $\tau_i$  son los multiplicadores de Lagrange.

Las derivadas (A5.23) y (A5.24) pertenecen a las submatrices Jacobiano y Hessiano respectivamente, derivadas que se encuentran dispersas en la matriz W. Su presentación no será en función de la pertenencia a dichas submatrices sino en función del esquema de ordenamiento dado en las figuras (A5.1), (A5.2); y en igual forma que en el vector  $-\bar{g}$ , sólo cuando una derivada específica sea distinta para los tipos de optimización en estudio, se hará la respectiva acotación.

## 2.1. ELEMENTOS DEL BLOQUE CON COORDENADAS 0 - 0.

$$(a) \quad \frac{\delta^2 L}{\delta PG_k^2} = (a_k) * 2 \quad k=1, \dots, S1+1 \quad (A6.25)$$

(b) igual que (A5.25).

$$(c) \quad \frac{\delta^2 L}{\delta PG_k^2} = 0 \quad k=1, \dots, S1+1 \quad (A6.26)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta PG_k \delta PG_i} = 0 \quad \begin{array}{l} i \neq k \\ i=1, \dots, S1+1 \\ k=1, \dots, S1+1 \end{array} \quad (A6.27)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta t_{jm}} = 0 \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, S1+1 \\ \text{todo } j, m \end{array} \quad (\text{A6.28})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm}^2} = 2\tau P_k V_k^2 |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\alpha_{ki}^{(0)}) - 2\tau q_k V_k^2 |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\alpha_{ki}^{(0)})$$

$$\begin{array}{l} j=k \\ m=i \\ \text{todo } j, m, \quad j \neq m \end{array} \quad (\text{A6.29})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{ki} \delta t_{jm}} = 0 \quad \begin{array}{l} j \neq k \neq i \\ m \neq k \neq i \end{array} \quad (\text{A6.30})$$

## 2.2. ELEMENTOS DE LOS BLOQUES CON COORDENADAS O-I.

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta \theta_i} = 0 \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, S1+1 \\ i=1, \dots, N \end{array} \quad (\text{A6.31})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta V_i} = 0 \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, S1+1 \\ i=1, \dots, N \end{array} \quad (\text{A6.32})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta \tau P_i} = 1 \quad k=i \quad (\text{A6.33})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta \tau P_i} = 0 \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, S1+1 \\ i=1, \dots, N \\ k \neq i \end{array} \quad (A6.34)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta P G_k \delta \tau q_i} = 0 \quad \begin{array}{l} k=1, \dots, S1+1 \\ i=1, \dots, N \end{array} \quad (A6.35)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta \theta_j} = \tau P_k V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - V_i \tau P_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)}) - \tau q_k V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) + V_i \tau q_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

$j=k$   
 $m=i$   
 para todo  $j, m$   
 $j \neq m$

(A6.36)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta \theta_m} = -\tau P_k V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) + V_i \tau P_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)}) + \tau q_k V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - V_i \tau q_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

$j=k$   
 $m=i$   
 para todo  $j, m$   
 $j \neq m$

(A6.37)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta \theta_i} = 0 \quad \begin{array}{l} j \neq i \\ m \neq i \\ \text{para todo } j, m \\ j \neq m \end{array} \quad (A6.38)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta V_j} = -\tau P_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) + 4\tau P_k V_k |Y_{kj}| \cos(\alpha_{ki}) - \tau P_i V_i |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)}) - \tau q_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - 4\tau P_k V_k |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\alpha_{ki}) - \tau P_i V_i |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

j=k  
m=1  
para todo j,m  
j#m

(A6.39)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta V_m} = -\tau P_k V_k |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - V_k \tau P_i |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)}) - \tau q_k V_k |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - \tau q_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

j=k  
m=1  
para todo j,m  
j#m

(A6.40)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta V_i} = 0$$

j#i  
m#i  
para todo j,m  
j#m

(A6.41)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{jm} \delta \tau_j} = V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) - 2V_k^2 |Y_{ki}| \cos(\alpha_{ki})$$

j=k  
m=1  
todo j,m  
j#m

(A6.42)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{j\#} \delta \tau_{P\#}} = V_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

j=k  
 m=i  
 todo j,m  
 j#m

(A6.43)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{j\#} \delta \tau_{P_i}} = 0$$

j#i  
 m#i  
 todo j,m  
 j#m

(A6.44)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{j\#} \delta \tau_{Q_j}} = V_k V_i |Y_{ki}^{(0)}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}^{(0)}) + 2V_k^2 |Y_{ki}| \sin(\alpha_{ki})$$

j=k  
 m=i  
 todo j,m  
 j#m

(A6.45)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{j\#} \delta \tau_{P\#}} = V_i V_k |Y_{ik}^{(0)}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}^{(0)})$$

j=k  
 m=i  
 todo j,m  
 j#m

(A6.46)

$$\frac{\delta^2 L}{\delta t_{j\#} \delta \tau_{P_i}} = 0$$

j#i  
 m#i  
 todo j,m  
 j#m

(A6.47)

## 2.3. ELEMENTOS DE LOS BLOQUES CON COORDENADAS K - K.

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k^2} = \tau P_k V_k \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + V_k \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n \tau P_i V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) + \tau q_k V_k \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + V_k \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n \tau q_i V_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})$$

$$k=1, \dots, N \quad (A6.48)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta V_k} = \tau P_k \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n \tau P_i V_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) - \tau q_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \tau q_i V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})$$

$$k=1, \dots, N \quad (A6.49)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta \tau P_k} = V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki})$$

$$k=1, \dots, N \quad (A6.50)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta \tau q_k} = V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki})$$

$$k=1, \dots, N \quad (A6.51)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k^2} = 2 |Y_{kk}| (-\tau p_k \cos(\alpha_{kk}) + \tau q_k \sin(\alpha_{kk})) \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.52})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta \tau p_k} = 2V_k |Y_{kk}| \cos(\alpha_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.53})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta \tau q_k} = -2V_k |Y_{kk}| \sin(\alpha_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.54})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau p_k^2} = 0 \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.55})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau p_k \delta \tau q_k} = 0 \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.56})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau q_k^2} = 0 \quad k=1, \dots, N \quad (\text{A6.57})$$

## 2.4. ELEMENTOS DE LOS BLOQUES CON COORDENADAS K-I.

Para estos elementos  $k=1, \dots, N$   
 $i=1, \dots, N$   
 $i \neq k$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta \theta_i} = -\tau p_k V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - V_i \tau p_i V_k |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) - \tau q_k V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - V_i \tau q_i V_k |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (A6.58)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta V_i} = \tau p_k V_k |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - V_k \tau p_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) - \tau q_k V_k |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - V_k \tau q_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (A6.59)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta \tau p_i} = V_i V_k |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (A6.60)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \theta_k \delta \tau q_i} = -V_i V_k |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (A6.61)$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta \theta_i} = -\tau p_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) + \tau p_i V_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) + \tau q_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - \tau q_i V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (A6.62)$$



$$\begin{aligned} \frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta V_i} = & -\tau P_k |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - \tau P_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \\ & -\tau Q_k |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) - \tau Q_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \end{aligned} \quad (\text{A6.63})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta \tau P_i} = V_i |Y_{ik}| \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (\text{A6.64})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta V_k \delta \tau Q_i} = V_i |Y_{ik}| \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (\text{A6.65})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau P_k \delta \theta_i} = V_k V_i |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (\text{A6.66})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau P_k \delta V_i} = V_k |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (\text{A6.67})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau P_k \delta \tau P_i} = 0 \quad (\text{A6.68})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau P_k \delta \tau Q_i} = 0 \quad (\text{A6.69})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau q_k \delta \theta_i} = -V_k V_i |Y_{ki}| \cos(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (\text{A6.70})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau q_k \delta V_i} = V_k |Y_{ki}| \sin(\theta_k - \theta_i - \alpha_{ki}) \quad (\text{A6.71})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau q_k \delta \tau p_i} = 0 \quad (\text{A6.72})$$

$$\frac{\delta^2 L}{\delta \tau q_k \delta \tau q_i} = 0 \quad (\text{A6.73})$$

## **A N E X O 7**

### **LISTADOS DE LOS PROGRAMAS**

El anexo N<sup>o</sup> 7 corresponde a los listados, tanto del programa que resuelve el Flujo Optimo de Potencia, escrito en FORTRAN, como de los programas desarrollados en FOXBASE.

Estos listados se encuentran archivados en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

## **A N E X O 8**

### **MANUAL DEL PROGRAMADOR**

Este manual encuentra archivado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

## **A N E X O 9**

### **MANUAL DE USO DE LOS PROGRAMAS.**

El manual de uso tiene como objetivo proporcionar las explicaciones necesarias y suficientes para que el usuario pueda manejar todo el paquete interactivo de Flujo Optimo de Potencia por el método de Newton.

#### **1. INSTALACION DEL PROGRAMA.**

En el directorio raíz del disco duro de un computador personal debe encontrarse el archivo FOPNR.BAT, y en el directorio del disco duro creado con el nombre FX-PROGR deben estar: los programas compilados en FOX-BASE, los archivos de la base de datos, los archivos de indexamiento, el paquete de FOX-BASE y los programas en FORTRAN que resuelven el flujo de potencia y el flujo óptimo de potencia.

#### **2. INGRESO AL PROGRAMA INTERACTIVO.**

Una vez instalado el paquete computacional, para ingresar al mismo, se debe digitar FOPNR desde el directorio raíz y presionar ENTER. Si FOPNR ha sido digitado correctamente aparecerá la pantalla de presentación mostrada en la figura (A9.1).

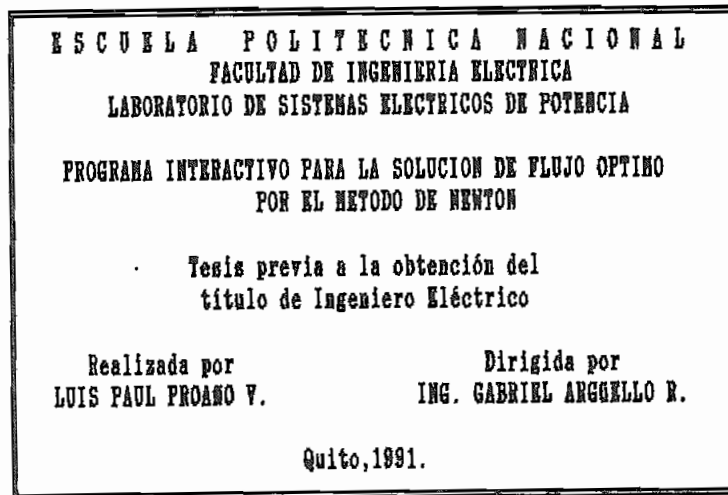


Figura A9.1

Presione cualquier tecla para continuar.

Presionando cualquier tecla, como se indica en la parte inferior de la pantalla, se despliega el MENU PRINCIPAL del programa interactivo mostrado en la figura (A9.2). A partir de este momento el usuario tiene la capacidad de seleccionar los diferentes menús (menús secundarios y submenús), mediante el movimiento del cursor con ayuda de las teclas , , , . Cuando el cursor se ubica sobre una opción del menú (menús secundarios y submenús), dicha opción se pinta en video inverso y su ejecución es provocada pulsando ENTER.

A continuación se dará una explicación de cada una de las opciones del menú principal y de sus respectivos submenús.

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

0.- SELECCION DEL SIST.  
1.- DATOS DEL S.E.P.  
2.- EJECUCION DE FLUJOS  
3.- REPORTES  
4.- INFORMACION TEORICA

Figura A9.2

[ Pulse Esc para salir del programa ]

### 3. DESCRIPCION DE MENUS Y SUBMENUS.

#### 3.1. SELECCION DEL SISTEMA ELECTRICO.

Con esta opción se escoge un sistema existente en la base de datos, es decir que previamente haya sido creado. Si existe datos la pantalla desplegada será la de la figura (A9.3), en donde:

- Con las teclas , son presentados de uno en uno los nombres de los SEP existentes en la base de datos.
- Con ENTER queda seleccionado el SEP que aparece dentro del recuadro pequeño y en video inverso; retornando al menú principal inmediatamente.

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

0.- SELECCION DEL SIST.  
1.- DATOS DEL S.E.P.  
2.- EJECUCION DE FLUJOS  
3.- REPORTES  
4.- INFORMACION TEORICA

SISTEMAS  
REQSA

Nº de Sist. = 5

Figura A9.3

, ) ; Seleccionar ( <| ) ; Menú anterior ( ESC )

- Con ESC se regresa al menú principal sin seleccionar ningún sistema.

La información que se encuentra en el vértice inferior derecho del recuadro pequeño de la figura (A9.3) se refiere al número de sistemas almacenados en la base de datos.

- MENSAJE .-

- Si la base de datos no tuviere almacenados los datos de ningún SEP, se desplegará el siguiente mensaje:

"No existen sistemas en memoria"

"Pulse cualquier tecla para continuar"



### 3.2. DATOS DEL SEP.

Esta opción despliega un menú secundario, el mismo que permite orientar al programa hacia los diferentes datos que requieren ser definidos en un SEP para las corridas de flujos. Al seleccionar esta opción del menú principal (DATOS DEL SEP), la pantalla desplegada es la de la figura (A9.4) en la que el cursor queda restringido a las opciones del recuadro inferior.

#### 3.2.1. DATOS GENERALES DEL SEP.

Esta opción de la figura (A9.4) despliega la pantalla indicada en la figura (A9.5), presentando un submenú con las siguientes posibilidades: crear, modificar, consultar y eliminar.

##### - CREAR .-

Este comando permite crear un sistema nuevo en la base de datos, pidiéndose los siguientes datos:

##### DATOS GENERALES DEL SISTEMA.

| NOMBRE DEL DATO                     | RANGO PERMITIDO      |
|-------------------------------------|----------------------|
| Nombre del SEP.                     | de 1 a 10 caracteres |
| Descripción                         | de 0 a 90 caracteres |
| Número total de barras              | 2 - 40               |
| Máximo desfase entre barras (grad.) | 12 - 30              |
| Criterio convergencia para F.P.     | 0.01 - 0.1           |

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

- 0.- SELECCION DEL SIST.
- 1.- DATOS DEL S.E.P.
- 2.- EJECUCION DE FLUJOS
- 3.- REPORTES
- 4.- INFORMACION TEORICA

EQSA

- 1.- DATOS GENERALES DEL S.E.P.
- 2.- DATOS DE BAR. Y ELEM. SHUNT
- 3.- DATOS DE ELEMENTOS SERIE
- 4.- ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.4

DATOS GENERALES DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

NOMBRE DEL SISTEMA : EQSA

DESCRIPCION :

NUMERO TOTAL DE BARRAS :  
 POTENCIA BASE (MVA) :  
 ANGULO MAXIMO DE DESFASE ENTRE BARRAS (grad):  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.P. :  
 CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.O.P. :  
 NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES :

1-Crear 2-Modificar 3-Consultar 4-Eliminar

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.5

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Criterio convergencia para F.O.P. | 0.01 - 0.7 |
| Máximo número de iteraciones      | 2 - 99     |

---

Todos los datos son sometidos a una debida validación en el momento mismo de su ingreso, dándose los siguientes mensajes según el error cometido:

- MENSAJES DE ERROR .-

- Si el nombre del SEP a crear es igual a uno ya almacenado:  
"El nombre ya existe. Pulse cualquier tecla."
- Si el número de la barra está fuera del rango definido:  
"Número fuera de rango. Pulse cualquier tecla"
- Si el ángulo de desfase angular entre barras conectadas está fuera del rango definido:  
"Angulo fuera de rango. Pulse cualquier tecla"
- Si los valores de los criterios de convergencia caen fuera del rango:  
"Valor fuera de rango. Pulse cualquier tecla"
- Si el número de iteraciones no está dentro del rango:  
"Número fuera de rango. Pulse cualquier tecla"

- MODIFICAR .-

Con esta opción se puede modificar los datos generales de un sistema creado o seleccionado, sometiéndolos a la misma validación del proceso de creación.

- MENSAJE .-

- Sin seleccionar o crear algún sistema previamente no se podrá ingresar a esta opción, saliendo en la pantalla el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema"

"Pulse cualquier tecla para continuar"

- CONSULTAR .-

Esta opción despliega en pantalla los datos generales de un sistema creado o seleccionado previamente, sin posibilidad de modificarlos.

- MENSAJE .-

- Sin seleccionar o crear algún sistema previamente no se podrá ingresar a esta opción, saliendo en la pantalla el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema"

"Pulse cualquier tecla para continuar"

- ELIMINAR .-

Utilizar con precaución esta opción ya que con ella se elimina los datos de un SEP seleccionado o creado en forma total, es decir, los datos generales, de barras, de elementos serie, elementos shunt y resultados que pudieran existir de un flujo

ejecutado, son borrados de los archivos de la base de datos.

La selección de esta opción ELIMINAR despliega la pantalla de la figura indicada en la figura (A9.6). En el recuadro inferior de esta pantalla se tiene las siguientes dos posibilidades:

- NO : anula el proceso de eliminación.
- SI : se ejecuta la eliminación, su efecto es irreversible.
- MENSAJE .-
- Sin seleccionar o crear algún sistema previamente no se podrá ingresar a esta opción, saliendo en la pantalla el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema"

"Pulse cualquier tecla para continuar"

### 3.2.2. DATOS DE BARRAS Y ELEMENTOS SHUNT.

Sin seleccionar o crear algún sistema no se podrá ejecutar esta opción de la figura (A9.4), presentándose el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema.

Pulse cualquier tecla para continuar"

si este no es el caso, el programa despliega la pantalla indicada en la figura (A9.7) presentando un submenú con las siguientes posibilidades: crear, modificar, consultar , eliminar y visualizar.

DATOS GENERALES DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

[ ELIMINACION DE SISTEMAS ]

NOMBRE DEL SISTEMA : EEQSA

DESCRIPCION : Es un ejemplo que se encuentra en la referencia de la Tesis de la Ing. Consuelo Guijarro.

NUMERO TOTAL DE BARRAS : 15

POTENCIA BASE (MVA) : 100.0000

ANGULO MAXIMO DE DESFASE ENTRE BARRAS (grad): 30.0000

CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.P. : 0.1000

CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.O.P. : 0.0700

NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES : 50

ATENCIÓN

Se elimina el sistema totalmente; barras, elementos serie y elementos shunt.

Esta Ud. seguro(a) ?

|    |    |
|----|----|
| NO | SI |
|----|----|

Figura A9.6

S I S T E M A : EEQSA

[ DATOS DE BARRAS DEL SISTEMA ELECTRICO ]

| BARRA No : | NOMBRE :         | TIPO DE BARRA :    |
|------------|------------------|--------------------|
|            | VOLTAJES         | POTENCIAS DE CARGA |
|            | Máximo (p.u.) :  | Activa (MW) :      |
|            | Mínimo (p.u.) :  | Reactiva (MVAR) :  |
|            | Inicial (p.u.) : |                    |
|            | Angulo (grad) :  |                    |

|   |
|---|
| 1-Crear 2-Modificar 3-Consultar 4-Eliminar 5-Visualizar |
|---|

Figura A9.7

Presione Esc para salir al menú anterior

- CREAR .-

Este comando permite crear las barras (en el SEP que se está trabajando), pidiéndose los siguientes datos:

## DATOS DE BARRAS Y ELEMENTOS SHUNT DEL SEP.

| NOMBRE DEL DATO                | RANGO PERMITIDO                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Número de la barra             | 1 - # definido en datos generales. |
| Nombre                         | 8 caracteres.                      |
| Tipo de barra                  | OSC, PV, PVCS, PQ                  |
| Voltaje máximo (pu.)           | 0.9 - 1.1                          |
| Voltaje mínimo (pu.)           | 0.9 - Volt. máx.                   |
| Voltaje inicial (pu.)          | Vol. min - Vol. máx.               |
| Angulo inicial (grad.)         | -12 - 12                           |
| Pot. activa de carga (MW)      | 0 - 9999.9999                      |
| Pot. reactiva de carga (MVAR)  | 0 - 9999.9999                      |
| Pot. activa máx. gener. (MW)   | 0 < - 9999.9999                    |
| Pot. activa min. gener. (MW)   | 0 < - Pot. máx. activa             |
| Pot. activa inicial (MW)       | Min. act. - Máx. act.              |
| Pot. react. máx. gener. (MVAR) | -999.9999 - 9999.9999              |
| Pot. react. min. gener. (MVAR) | -999.9999 - react. máx.            |
| Coefficiente a (pu.)           | 0 < - 9999.9999                    |
| Coefficiente b (pu.)           | 0 < - 9999.9999                    |
| Coefficiente c (pu.)           | 0 < - 9999.9999                    |
| Condens/Reactor                | 0 - 9999.9999                      |

Todos los datos son sometidos a una debida validación en el momento mismo de su ingreso, dándose mensajes según el error cometido.

- MENSAJES DE ERROR .-

- Si el número de la barra es mayor al número de barras totales definidas en los datos generales; o si a la barra se le asigna el número cero:

"Número mayor al total definidas o fue cero.

Pulse cualquier tecla para continuar."

- Si el número asignado a una barra a crearse es igual al de otra barra previamente ingresada en el SEP en el que se está trabajando:

"La barra ya fue ingresada. Pulse cualquier tecla"

- Si los datos de voltajes, ángulo, potencia, coeficientes, elementos shunt, no están dentro del rango especificado se tendrá:

"Valor fuera de rango. Pulse cualquier tecla"

- MODIFICAR .-

Esta función permite modificar en una barra creada previamente los datos referentes a su tipo, voltajes, ángulo, potencia y valores de elementos shunt conectados a ella.



Los datos modificados son sometidos al proceso de validación anterior.

- MENSAJES .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de barras creadas, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de barras ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- Si el número de la barra a eliminar en el SEP que se está trabajando no existe, se dará el siguiente mensaje:

"La barra no ha sido ingresada. Pulse cualquier tecla"

- CONSULTAR .-

Esta opción despliega en pantalla una a una las barras y sus datos sin posibilidad de modificarlos.

- MENSAJE .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de barras creadas, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de barras ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- ELIMINAR .-

Utilizar con precaución esta opción ya que con ella se

elimina la barra, los elementos serie y shunt conectados a ella.

La selección de esta opción ELIMINAR despliega la pantalla indicada en la figura (A9.8). En el recuadro inferior de esta pantalla se tiene las siguientes dos posibilidades:

- NO : anula el proceso de eliminación.
- SI : se ejecuta la eliminación, su efecto es irreversible.
- MENSAJES .-
- Si el SEP con el que se está trabajando carece de barras creadas, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de barras ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- Si el número de la barra a eliminar en el SEP en que se está trabajando no existe, se dará el siguiente mensaje:
- "La barra no ha sido ingresada. Pulse cualquier tecla"

- VISUALIZAR .-

Esta opción permite ver de manera conjunta las barras ingresadas y sus datos. Al seleccionar esta opción se tiene la posibilidad de desplegar las pantallas indicadas en las figuras (A9.9), (A9.10) y (A9.11)

- MENSAJES .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de barras

[ ELIMINACION DE BARRAS DEL SISTEMA ]

|                         |          |                   |                    |                     |  |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------------|---------------------|--|
| BARRA No : 01           |          | NOMBRE : BARRA1   |                    | TIPO DE BARRA : OSC |  |
| VOLTAJES                |          |                   | POTENCIAS DE CARGA |                     |  |
| Máximo (p.u.) :         | 1.1000   | Activa (MW) :     | 0.0000             |                     |  |
| Mínimo (p.u.) :         | 0.9000   | Reactiva (MVAR) : | 0.0000             |                     |  |
| Inicial (p.u.) :        | 1.0100   |                   |                    |                     |  |
| Angulo (grad) :         | 0.0000   |                   |                    |                     |  |
| POTENCIAS DE GENERACION |          |                   | COEFICIENTES       |                     |  |
| Max. React. (MVAR) :    | 250.0000 | a :               | 100.0000           |                     |  |
| Min. React. (MVAR) :    | 0.0000   | b :               | 351.0000           |                     |  |
| Max. Activ. (MW) :      | 500.0000 | c :               | 44.0000            |                     |  |
| Min. Activ. (MW) :      | 100.0000 |                   |                    |                     |  |
| Inic. Act. (MW) :       | 128.0700 |                   |                    |                     |  |

Eliminar? Si No

Se elimina la barra y todos los elementos conectados a ella

Figura A9.8

[ DATOS DE BARRAS ]

| No | NOMBRE  | TIPO | Volt. Mínimo (p.u.) | Volt. Inicial (p.u.) | Volt. Máximo (p.u.) | Angulo Inicial (grads.) | Cond./Reac Shunt (Mvar) |
|----|---------|------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 01 | BARRA1  | OSC  | 0.9000              | 1.0100               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 02 | BARRA2  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 03 | BARRA3  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 04 | BARRA4  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 05 | BARRA5  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 9.0000                  |
| 06 | BARRA6  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 07 | BARRA7  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 12.0000                 |
| 08 | BARRA8  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 3.0000                  |
| 09 | BARRA9  | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 4.5000                  |
| 10 | BARRA10 | PV   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 11 | BARRA11 | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 12 | BARRA12 | PV   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 0.0000                  |
| 13 | BARRA13 | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 6.8000                  |
| 14 | BARRA14 | PQ   | 0.9000              | 1.0000               | 1.1000              | 0.0000                  | 4.5000                  |

2-Pag.( ) 3-Grup(<-) 4-Grup() 5-Grup(->) | 1 ..DE.. 2

Figura A9.9

Presione Esc para salir al menú anterior

[ DATOS DE BARRAS ]

| No | NOMBRE  | TIPO | Pot.Reac.<br>Máxima<br>(Mvar) | Pot.Reac<br>Mínima<br>(Mvar) | Pot.Act.<br>Máxima<br>(MW) | Pot.Act.<br>Generación<br>(MW) | Pot.Act.<br>Mínima<br>(MW) |
|----|---------|------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 01 | BARRA1  | OSC  | 250.0000                      | 0.0000                       | 500.0000                   | 128.0700                       | 100.0000                   |
| 02 | BARRA2  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 03 | BARRA3  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 04 | BARRA4  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 05 | BARRA5  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 06 | BARRA6  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 07 | BARRA7  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 08 | BARRA8  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 09 | BARRA9  | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 10 | BARRA10 | PV   | 36.0000                       | 0.0000                       | 72.0000                    | 65.0000                        | 40.0000                    |
| 11 | BARRA11 | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 12 | BARRA12 | PV   | 10.0000                       | 0.0000                       | 20.0000                    | 15.0000                        | 5.0000                     |
| 13 | BARRA13 | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |
| 14 | BARRA14 | PQ   | 0.0000                        | 0.0000                       | 0.0000                     | 0.0000                         | 0.0000                     |

2-Pag.() 3-Grup(-) 4-Grup() 5-Grup(-) | 1..DE.. 2

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.10

[ DATOS DE BARRAS ]

| No | NOMBRE  | TIPO | Pot.Act.<br>Carga<br>(MW) | Pot.Reac.<br>Carga<br>(Mvar) | Coefic.<br>a<br>(\$/H) | Coefic.<br>b<br>(\$/H) | Coefic.<br>c<br>(\$/H) |
|----|---------|------|---------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 01 | BARRA1  | OSC  | 0.0000                    | 0.0000                       | 100.0000               | 351.0000               | 44.0000                |
| 02 | BARRA2  | PQ   | 0.0000                    | 0.0000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 03 | BARRA3  | PQ   | 0.0000                    | 0.0000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 04 | BARRA4  | PQ   | 36.8000                   | 7.5600                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 05 | BARRA5  | PQ   | 21.2600                   | 8.2500                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 06 | BARRA6  | PQ   | 0.0000                    | 0.0000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 07 | BARRA7  | PQ   | 31.7700                   | 11.5000                      | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 08 | BARRA8  | PQ   | 21.1200                   | 6.4000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 09 | BARRA9  | PQ   | 35.0000                   | 7.7000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 10 | BARRA10 | PV   | 0.0000                    | 0.0000                       | 100.0000               | 245.0000               | 105.0000               |
| 11 | BARRA11 | PQ   | 13.2000                   | 6.8000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 12 | BARRA12 | PV   | 0.0000                    | 0.0000                       | 100.0000               | 389.0000               | 40.6000                |
| 13 | BARRA13 | PQ   | 30.0000                   | 10.6000                      | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |
| 14 | BARRA14 | PQ   | 8.2000                    | 4.5000                       | 0.0000                 | 0.0000                 | 0.0000                 |

2-Pag.() 3-Grup(-) 4-Grup() 5-Grup(-) | 1..DE.. 2

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.11

creadas, se presentará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de barras ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

### 3.2.3. DATOS DE ELEMENTOS SERIE.

Sin seleccionar o crear algún sistema, no se podrá ejecutar esta opción de la figura (A9.4), presentándose el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema.

Pulse cualquier tecla para continuar"

si este no es el caso, el programa despliega la pantalla indicada en la figura (A9.12) presentando un submenú con las siguientes posibilidades: crear, modificar, consultar, eliminar y visualizar.

#### - CREAR .-

Este comando permite crear los elementos serie (en el SEP que se está trabajando), pidiéndose los siguientes datos:

#### DATOS DE ELEMENTOS SERIE DEL SEP.

| NOMBRE DEL DATO  | RANGO PERMITIDO                              |
|------------------|--|
| Tipo de elemento | Línea - Transformador                        |
| Nombre           | 8 caracteres.                                |
| Barra (P)        | 1 - # de barras definido en datos generales. |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Barra (Q)                 | 1 - # de barras definido en datos generales. |
| Resistencia L (pu.)       | 0 - 9.9999                                   |
| Reactancia en L o T (pu.) | 0 - 9.9999                                   |
| Susceptancia en L (pu.)   | 0 - 9.9999                                   |
| Tap máximo (pu.)          | 0.9 - 1.1                                    |
| Tap mínimo (pu.)          | 0.9 - Tap máximo.                            |
| Tap inicial (pu.)         | Tap minimo - Tap máximo.                     |

---

Todos los datos son sometidos a una debida validación en el momento mismo de su ingreso, dándose mensajes según el error cometido.

- MENSAJES DE ERROR .-

- Si el número de la barra (P) o (Q) es mayor al número de barras totales definidas en los datos generales, o si se les asigna el número cero:

"Número mayor al total definidas o fue cero.

Pulse cualquier tecla para continuar."

- Si el número asignado a la barra (Q) es igual al de la barra (P):

"Las barras (P) y (Q) deben ser distintas.

Pulse cualquier tecla para continuar."

- Si los datos de resistencias reactancias, susceptancias y taps, no están dentro del rango especificado:

"Valor fuera de rango. Pulse cualquier tecla"

- MODIFICAR .-

Esta opción permite modificar los datos de un elemento serie ya existente entre dos barras sin permitir cambiar las barras entre las que se encuentra conectado.

Los datos modificados son sometidos al proceso de validación anterior.

- MENSAJE .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de elementos serie creados, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de elementos serie ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- CONSULTAR .-

Esta opción despliega en pantalla uno a uno los elementos serie sin posibilidad de modificar sus datos.

- MENSAJE .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de elementos serie creados, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de elementos serie ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- ELIMINAR .-

La selección de esta opción ELIMINAR despliega la pantalla indicada en la figura (A9.13). En el recuadro inferior de esta pantalla se tiene las siguientes posibilidades:

- INICIAL, ANTERIOR, PROXIMO, FINAL : estas opciones facilitan el encontrar un elemento serie.
- MARCAR : esta opción permite marcar o desmarcar el elemento serie que en ese momento aparezca en pantalla. Los elementos serie marcados serán borrados al pulsar ESC.

- MENSAJE .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de elementos serie creados, se dará el siguiente mensaje:

"El sistema no tiene datos de elementos serie ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

- VISUALIZAR .-

Esta opción permite ver de manera conjunta los elementos serie creados y sus datos. Al seleccionar esta opción se tiene la posibilidad de desplegar las pantallas indicadas en las figuras (A9.14), (A9.15).

- MENSAJE .-

- Si el SEP con el que se está trabajando carece de elementos series creados, se dará el siguiente mensaje:



[ DATOS DE ELEMENTOS SERIE ]

| TIPO DE ELEMENTO | NOMBRE :             |
|------------------|----------------------|
| LINEA<br>TRANS.  | BARRA P(control) :   |
|                  | BARRA Q(controlada): |
|                  | RESISTENCIA [p.u.] : |
|                  | REACTANCIA [p.u.] :  |
|                  | SUCEPTANCIA [p.u.] : |
|                  | TAP MAXIMO [p.u.] :  |
|                  | TAP MINIMO [p.u.] :  |
|                  | TAP INICIAL [p.u.] : |

1-Crear 2-Modificar 3-Consultar 4-Eliminar 5-Visualizar

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.12

[ ELIMINACION DE ELEMENTOS SERIE ]

1..DE..16

| TIPO DE ELEMENTO | NOMBRE :                    |
|------------------|-----------------------------|
| LINEA            | LINEA1                      |
|                  | BARRA P(control) : 01       |
|                  | BARRA Q(controlada): 02     |
|                  | RESISTENCIA [p.u.] : 0.0120 |
|                  | REACTANCIA [p.u.] : 0.0620  |
|                  | SUCEPTANCIA [p.u.] : 0.0100 |
|                  | TAP MAXIMO [p.u.] :         |
|                  | TAP MINIMO [p.u.] :         |
|                  | TAP INICIAL [p.u.] :        |

Los elementos serie marcados serán eliminados al pulsar Esc

Marcar | Inicial Anterior Próximo Final

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.13

S I S T E M A : EEQSA

| NOMBRE LINEA | BARRA DE ENVIO (P) | BARRA DE RECEPC. (Q) | [ LINEAS ]                    |                   | ADMITANCIA A TIERRA SUSCEPTANCIA (p.u.) |
|--------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|---|
|              |                    |                      | IMPEDANCIA RESISTENCIA (p.u.) | REACTANCIA (p.u.) |   |
| LINEA1       | 01                 | 02                   | 0.0120                        | 0.0620            | 0.0100                                  |
| LINEA4       | 01                 | 06                   | 0.0130                        | 0.0510            | 0.0120                                  |
| LINEA2       | 03                 | 04                   | 0.0290                        | 0.0750            | 0.0000                                  |
| LINEA3       | 03                 | 05                   | 0.0300                        | 0.0800            | 0.0000                                  |
| LINEA        | 06                 | 07                   | 0.0000                        | 0.1076            | 0.0000                                  |
| LINEA6       | 07                 | 08                   | 0.0330                        | 0.1200            | 0.0000                                  |
| LINEA7       | 08                 | 09                   | 0.0200                        | 0.0860            | 0.0000                                  |
| LINEA8       | 08                 | 10                   | 0.0090                        | 0.0290            | 0.0020                                  |
| LINEA9       | 11                 | 07                   | 0.0300                        | 0.0900            | 0.0000                                  |
| LINEA10      | 11                 | 12                   | 0.0480                        | 0.1550            | 0.0000                                  |
| LINEA11      | 11                 | 13                   | 0.0430                        | 0.1160            | 0.0000                                  |
| LINEA12      | 13                 | 14                   | 0.0350                        | 0.1250            | 0.0020                                  |
| LINEA15      | 14                 | 01                   | 0.0000                        | 0.1440            | 0.0000                                  |
| LINEA13      | 14                 | 15                   | 0.0810                        | 0.2900            | 0.0000                                  |

4-Pag.( ) |

1 ..DE.. 2

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.14

S I S T E M A : EEQSA

| NOMBRE TRANSE. | BARRA DE ENVIO (P) | BARRA DE LLEGADA (Q) | BARRA DE CONTROL | [ TRANSFORMADORES ] |                   |                    |                   |
|----------------|--------------------|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                |                    |                      |                  | REACTANCIA (p.u.)   | TAP MINIMO (p.u.) | TAP INICIAL (p.u.) | TAP MAXIMO (p.u.) |
| TRANS1         | 02                 | 03                   | 02               | 0.1400              | 0.9000            | 1.0200             | 1.1000            |

4-Pag.( ) |

1 ..DE.. 1

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.15

"El sistema no tiene datos de barras ingresados."

"Presione cualquier tecla para continuar"

#### **3.2.4. ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA.**

Sin seleccionar o crear algún sistema no se ejecutará esta opción de la figura (A9.4), presentándose el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema.

Pulse cualquier tecla para continuar"

si este no es el caso, el programa despliega la pantalla indicada en la figura (A9.16).

Con esta opción el usuario tiene a la mano un resumen de la situación de un sistema en cuanto a datos ingresados ya que se entrega entre otra información el número de barras definidas, el número de barras ingresadas, el número de elementos serie y cuantos de ellos son líneas o transformadores, el número de elementos shunt, si existe algún flujo ejecutado, etc..

#### **3.3. EJECUCION DE FLUJOS.**

Esta opción de la figura (A9.2) permite ejecutar los programas en FORTRAN, desarrollados para el estudio de flujo óptimo de potencia.

[ ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA ]

DESCRIPCION : Es un ejemplo que se encuentra en la referencia de la Tesis de la Ing. Consuelo Guijarro.

POTENCIA BASE [MVA] : 100.0000

BARRAS DEFINIDAS : 15

BARRAS INGRESADAS : 15 OSC: SI PV: 2 PVCS: 0 PQ: 12

ELEMENTOS SERIE INGRESADOS : 16 L.: 15 T.: 1

ELEMENTOS SHUNT INGRESADOS : 6

DESE.ANGULAR ENTRE BARRAS : 30.0000

ITERACIONES MAXIMAS : 50

CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.P. : 0.1000

CRITERIO DE CONVERGENCIA PARA F.O.P. : 0.0700

FLUJO EJECUTADO : NINGUNO

Pulse cualquier tecla para continuar

Figura A9.16

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

- 0.- SELECCION DEL SIST.
- 1.- DATOS DEL S.R.P.
- 2.- EJECUCION DE FLUJOS
- 3.- REPORTES
- 4.- INFORMACION TEORICA

ERQSA

- 1.- F.O.P. GENERAL
- 2.- F.O.P. ACTIVA
- 3.- F.O.P. REACTIVA
- 4.- FLUJO DE POTENCIA

Figura A9.17

Presione Esc para salir al menú anterior

Sin seleccionar o crear algún sistema la opción de la figura (A9.4) no se podrá ejecutar, presentándose el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema.

Pulse cualquier tecla para continuar"

si este no es el caso, el programa despliega la pantalla indicada en la figura (A9.17) presentando un submenú con las siguientes posibilidades:

### **3.3.1. FLUJO OPTIMO DE POTENCIA GENERAL.**

Se puede ejecutar con datos ingresados o resultantes del flujo de potencia.

### **3.3.2. FLUJO OPTIMO DE POTENCIA ACTIVA.**

Se puede ejecutar con datos ingresados o resultantes del flujo de potencia.

### **3.3.3. FLUJO OPTIMO DE POTENCIA REACTIVA.**

Se puede ejecutar con datos ingresados, resultantes del flujo de potencia o resultantes del flujo óptimo de potencia activa.

### **3.3.4. FLUJO DE POTENCIA.**

Se ejecuta únicamente con datos ingresados.

- MENSAJES .-

- Si existe un flujo ejecutado el programa preguntará si desea continuar. Esto debido a que los datos de la última corrida se pierden al ejecutarse una nueva.

- Antes de ejecutarse un flujo se realiza la validación de todos los datos en conjunto, pudiéndose dar los siguientes mensajes:

"El sistema no tiene barra oscilante"

"Presione cualquier tecla para continuar"

"Existen barras que están aisladas"

"Presione cualquier tecla para continuar"

- Si al ejecutarse un flujo, éste no llega a convergencia, se da el siguiente mensaje:

"NO HAY CONVERGENCIA"

"Presione cualquier tecla para continuar"

### **3.4. REPORTE.**

Esta opción de la figura (A9.2) permite sacar reportes tanto por pantalla como por impresora.

Sin seleccionar o crear algún sistema la opción no se podrá ejecutar, presentándose el siguiente mensaje:

"No se ha seleccionado o creado ningún sistema."

Pulse cualquier tecla para continuar"

si este no es el caso, el programa despliega la pantalla indicada en la figura (A9.18) presentando un submenú con las siguientes posibilidades:

#### **3.4.1. VER RESULTADOS EN PANTALLA.**

Permite ver por pantalla los resultados de barras, flujos, tap de transformadores, costos, pérdidas e iteraciones del último flujo ejecutado siempre y cuando éste haya llegado a convergir.

#### **3.4.2. IMPRIMIR DATOS DEL SEP.**

Permite sacar individualmente reportes por impresora de los siguientes tópicos:

- Barras.
- Coefficientes.
- Líneas.
- Transformadores.

#### **1.4.3. IMPRIMIR RESULTADOS.**

Permite sacar individualmente reportes por impresora de los siguientes tópicos:

- Barras, Costos, Pérdidas.
- Flujos.
- Valores de taps de transformadores.

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

- 0.- SELECCION DEL SIST.
- 1.- DATOS DEL S.E.P.
- 2.- EJECUCION DE FLUJOS
- 3.- REPORTES
- 4.- INFORMACION TEORICA

EEQSA

- 1.- VER RESULTADOS EN PANTALLA
- 2.- IMPRINIR DATOS
- 3.- IMPRINIR RESULTADOS
- 4.- IMPRINIR DATOS Y RESULTAD.

Presione Ecs para salir al menú anterior

---

Figura A9.18

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

- 0.- SELECCION DEL SIST.
- 1.- DATOS DEL S.E.P.
- 2.- EJECUCION DE FLUJOS
- 3.- REPORTES
- 4.- INFORMACION TEORICA

EEQSA

- 1.- F.O.P
- 2.- F.P.
- 3.- VARIOS

Presione Esc para salir al menú anterior

Figura A9.19



#### 3.4.4. IMPRIMIR DATOS Y RESULTADOS.

Esta opción permite obtener en una sola orden los tópicos anteriormente mencionados.

#### 3.5. INFORMACION TEORICA.

Al seleccionar esta opción de la figura (A9.2) se despliega la pantalla indicada en la figura (A9.19), que presenta las siguientes opciones:

##### 3.5.1. F.O.P.

Este submenú contiene información referente al flujo óptimo de potencia por el método de Newton. Los temas a encontrarse son:

- Planteamiento del problema.
- Planteamiento matemático.
- Desarrolla de  $W$   $Z = -g$

##### 3.5.2. F.P.

Este submenú contiene información referente al flujo de potencia por el método de Newton. Los contenidos son:

- Planteamiento del problema.

- Planteamiento matemático.
- Técnica de Newton - Raphson.

### 3.5.3. VARIOS.

Este submenú contiene información sobre: la modelación del transformador con tap utilizada, la función de costo de combustible asumida y una breve descripción del programa.

## 4. SALIR.-

### 4.1. SALIR DE LOS SUBMENUS.

Para salir de los diferentes submenús que presenta el programa interactivo se debe pulsar ESC, produciéndose siempre el retorno al menú anterior o precedente.

### 4.2. SALIR DEL PROGRAMA.

Para salir del programa el cursor debe encontrarse en el menú principal y pulsar ESC, en este momento se desplegará la pantalla indicada en la figura (A9.20) pidiéndose confirmar la instrucción.

PROGRAMA INTERACTIVO PARA LA SOLUCION DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA  
POR EL METODO DE NEWTON

[ MENU PRINCIPAL ]

- 0.- SELECCION DEL SIST.
- 1.- DATOS DEL S.R.P.
- 2.- EJECUCION DE FLUJOS
- 3.- REPORTES
- 4.- INFORMACION TEORICA

EEQSA

Terminar la sesión de trabajo ?  NO  SI

Figura A9.20

---

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/91

## DATOS DE BARRAS

| NO | BARRA  |      | VOLT. MINIMO | VOLT. INICIAL | VOLT. MAXIMO | ANGULO INICIAL | POT.REAC. MINIMA | POT.REAC. MAXIMA | POT.ACT. CARGA | POT.REAC. CARGA | COND./REAC. SHUNT |
|----|--------|------|--------------|---------------|--------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------|
|    | NOMBRE | TIPO | (p.u.)       | (p.u.)        | (p.u.)       | (grados)       | (MVAR)           | (MVAR)           | (MW)           | (MVAR)          | (MVAR)            |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 0.9500       | 1.0000        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 50.0000          | 0.0000         | 0.0000          | 0.0000            |
| 02 | BARRA2 | PQ   | 0.9500       | 1.0000        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 30.0000        | 12.0000         | 0.0000            |
| 03 | BARRA3 | PQ   | 0.9500       | 1.0000        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 70.0000        | 3.0000          | 0.0000            |
| 04 | BARRA4 | PV   | 0.9500       | 1.0000        | 1.0500       | 0.0000         | -50.0000         | 70.0000          | 86.0000        | 20.0000         | 0.0000            |
| 05 | BARRA5 | PV   | 0.9500       | 1.0000        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 100.0000         | 80.0000        | 10.0000         | 0.0000            |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/91

## LIMITES DE POTENCIA ACTIVA DE GENERACION Y COEF. DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

| NO | BARRA  |      | POT.ACT. MINIMA | POT.ACT. INICIAL | POT.ACT. MAXIMA | COEFIC. A | COEFIC. B | COEFIC. C |
|----|--------|------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
|    | NOMBRE | TIPO | (MW)            | (MW)             | (MW)            | (\$/H)    | (\$/H)    | (\$/H)    |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 20.0000         | 20.0000          | 100.0000        | 50.0000   | 351.0000  | 44.0000   |
| 04 | BARRA4 | PV   | 50.0000         | 100.0000         | 200.0000        | 50.0000   | 245.0000  | 105.0000  |
| 05 | BARRA5 | PV   | 20.0000         | 100.0000         | 100.0000        | 50.0000   | 389.0000  | 40.6000   |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLD1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## DATOS DE LINEAS

| NOMBRE DE<br>LA LINEA | BARRA<br>ENVIÓ<br>(P) | BARRA<br>RECEP.<br>(B) | IMPEDANCIA            |                      | ADMITANCIA A TIERRA    |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
|                       |                       |                        | RESISTENCIA<br>(p.u.) | REACTANCIA<br>(p.u.) | SUSCEPTANCIA<br>(p.u.) |
| LINEA2                | 02                    | 05                     | 0.0800                | 0.2620               | 0.0000                 |
| LINEA4                | 03                    | 01                     | 0.1060                | 0.4030               | 0.0000                 |
| LINEA3                | 03                    | 05                     | 0.1050                | 0.3470               | 0.0000                 |
| LINEA1                | 04                    | 05                     | 0.0300                | 0.1030               | 0.0000                 |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLD1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## DATOS DE TRANSFORMADORES

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(B) | REACT.<br>(p.u.) | TAP<br>MINIMO<br>(p.u.) | TAP<br>INICIAL<br>(p.u.) | TAP<br>MAXIMO<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 0.0196           | 0.9500                  | 1.0250                   | 1.0500                  |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPL01  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. GENERAL

| Nº | BARRA  |      | VOLT.            | VOLT.             | POT.ACT.           | POT.REAC             | POT.ACT.      | POT.REAC.       |
|----|--------|------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|-----------------|
|    | NOMBRE | TIPO | MODULO<br>(p.u.) | ANGULO<br>(grad.) | GENERACION<br>(MW) | GENERACION<br>(MVAR) | CARGA<br>(MW) | CARGA<br>(MVAR) |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 1.0500           | 0.0000            | 53.5689            | 8.3090               | 0.0000        | 0.0000          |
| 02 | BARRA2 | PB   | 0.9879           | -11.5909          | 0.0000             | 0.0000               | 30.0000       | 12.0000         |
| 03 | BARRA3 | PB   | 0.9840           | -11.5680          | 0.0000             | 0.0000               | 70.0000       | 3.0000          |
| 04 | BARRA4 | PV   | 1.0500           | -3.4034           | 168.1452           | 12.7382              | 86.0000       | 20.0000         |
| 05 | BARRA5 | PV   | 1.0370           | -7.9813           | 49.0524            | 45.2190              | 80.0000       | 10.0000         |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1148.1392  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 5.9154  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 30

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPL01  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.O.P. GENERAL

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(B) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0045                 |

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Pag:

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE NEWTON

SISTEMA ELÉCTRICO: EJEMPLD1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. GENERAL

| ELEMENTO |        | BARRA DE | BARRA DE  | FLUJO DE P-Q |            | FLUJO DE Q-P |            |
|----------|--------|----------|-----------|--------------|------------|--------------|------------|
| SERIE    |        | ENVIÓ    | RECEPCIÓN | POT. ACT.    | POT. REAC. | POT. ACT.    | POT. REAC. |
| TIPO     | NOMBRE | (P)      | (Q)       | (MW)         | (MVAR)     | (MW)         | (MVAR)     |
| L        | LINEA2 | 02       | 05        | -27.4756     | -9.3413    | 28.1660      | 11.6022    |
| L        | LINEA4 | 03       | 01        | -50.7633     | 2.4466     | 53.5908      | 8.3032     |
| T        | TRANS1 | 03       | 02        | 2.0827       | 2.7685     | -2.0827      | -2.7668    |
| L        | LINEA3 | 03       | 05        | -20.8557     | -8.1278    | 21.3990      | 9.9233     |
| L        | LINEA1 | 04       | 05        | 82.2289      | -7.2861    | -80.3746     | 13.6526    |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. ACTIVA

| NO | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT.ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT.REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT.REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 01 | BARRA1          | DSC  | 1.0000                    | 0.0000                     | 33.6861                        | 9.5900                           | 0.0000                    | 0.0000                       |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 0.9556                    | -7.6375                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 30.0000                   | 12.0000                      |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 0.9341                    | -7.7292                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 70.0000                   | 3.0000                       |
| 04 | BARRA4          | PV   | 1.0000                    | 3.7643                     | 175.9050                       | -1.4060                          | 86.0000                   | 20.0000                      |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0000                    | -1.9194                    | 61.5442                        | 58.3767                          | 80.0000                   | 10.0000                      |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1157.5376  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 6.2051  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 31

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.O.P. ACTIVA

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTRDL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEBADA<br>(Q) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0250                 |



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/91

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. ACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE | BARRA DE<br>ENVID<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCION<br>(Q) | FLUJO DE P-Q     |                     | FLUJO DE Q-P     |                     |
|---------------------------|--------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|                           |        |                          |                              | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA2 | 02                       | 05                           | -37.2483         | -2.9923             | 38.4715          | 6.9984              |
| L                         | LINEA4 | 03                       | 01                           | -32.4043         | -4.6361             | 33.7060          | 9.5848              |
| T                         | TRANS1 | 03                       | 02                           | -7.6616          | 11.8982             | 7.6616           | -11.9281            |
| L                         | LINEA3 | 03                       | 05                           | -29.5017         | -7.4200             | 30.6152          | 11.1000             |
| L                         | LINEA1 | 04                       | 05                           | 89.9810          | -21.4281            | -87.4142         | 30.2405             |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/5

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. REACTIVA

| NO | BARRA  |      | VOLT.            | VOLT.             | POT.ACT.           | POT.REAC             | POT.ACT.      | POT.REAC.       |
|----|--------|------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|-----------------|
|    | NOMBRE | TIPO | MODULO<br>(p.u.) | ANGULO<br>(grad.) | GENERACION<br>(MW) | GENERACION<br>(MVAR) | CARGA<br>(MW) | CARGA<br>(MVAR) |
| 01 | BARRA1 | OSC  | 1.0500           | 0.0000            | 32.9008            | 8.7395               | 0.0000        | 0.0000          |
| 02 | BARRA2 | PQ   | 0.9891           | -6.7208           | 0.0000             | 0.0000               | 30.0000       | 12.0000         |
| 03 | BARRA3 | PQ   | 0.9902           | -6.8182           | 0.0000             | 0.0000               | 70.0000       | 3.0000          |
| 04 | BARRA4 | PV   | 1.0500           | 3.6326            | 175.9050           | 7.2980               | 86.0000       | 20.0000         |
| 05 | BARRA5 | PV   | 1.0409           | -1.4324           | 61.5442            | 48.1031              | 80.0000       | 10.0000         |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1154.5198  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 5.5132  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 13

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.O.P. REACTIVA

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(Q) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0000                 |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag:

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO1  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. REACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE | BARRA DE<br>ENVIO<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCION<br>(Q) | FLUJO DE P-Q     |                     | FLUJO DE Q-P     |                     |
|---------------------------|--------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|                           |        |                          |                              | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA2 | 02                       | 05                           | -38.1034         | -6.2453             | 39.3226          | 10.2382             |
| L                         | LINEA4 | 03                       | 01                           | -31.8073         | -4.4929             | 32.9227          | 8.7338              |
| T                         | TRANS1 | 03                       | 02                           | -8.5460          | 5.7849              | 8.5460           | -5.7638             |
| L                         | LINEA3 | 03                       | 05                           | -29.1708         | -4.3040             | 30.1018          | 7.3808              |
| L                         | LINEA1 | 04                       | 05                           | 89.9887          | -12.7263            | -87.7412         | 20.4430             |

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE NEWTON

SISTEMA ELÉCTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## DATOS DE BARRAS

| NO | BARRA  |      | VOLT.            | VOLT.             | VOLT.            | ANGULO              | POT.REAC.        | POT.REAC.        | POT.ACT.      | POT.REAC.       | COND./REAC.     |
|----|--------|------|------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|
|    | NOMBRE | TIPO | MINIMO<br>(p.u.) | INICIAL<br>(p.u.) | MAXIMO<br>(p.u.) | INICIAL<br>(grados) | MINIMA<br>(MVAR) | MAXIMA<br>(MVAR) | CARGA<br>(MW) | CARGA<br>(MVAR) | SHUNT<br>(MVAR) |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 0.9500           | 1.0000            | 1.0500           | 0.0000              | 0.0000           | 50.0000          | 0.0000        | 0.0000          | 0.0000          |
| 02 | BARRA2 | PQ   | 0.9500           | 1.0000            | 1.0500           | 0.0000              | 0.0000           | 0.0000           | 30.0000       | 12.0000         | 0.0000          |
| 03 | BARRA3 | PQ   | 0.9500           | 1.0000            | 1.0500           | 0.0000              | 0.0000           | 0.0000           | 70.0000       | 3.0000          | 0.0000          |
| 04 | BARRA4 | PV   | 0.9500           | 1.0000            | 1.0500           | 0.0000              | -50.0000         | 70.0000          | 86.0000       | 20.0000         | 0.0000          |
| 05 | BARRA5 | PV   | 0.9500           | 1.0000            | 1.0500           | 0.0000              | 0.0000           | 100.0000         | 80.0000       | 10.0000         | 0.0000          |

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE NEWTON

SISTEMA ELÉCTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## LÍMITES DE POTENCIA ACTIVA DE GENERACIÓN Y COEF. DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

| NO | BARRA  |      | POT.ACT.       | POT.ACT.        | POT.ACT.       | COEFIC.     | COEFIC.     | COEFIC.     |
|----|--------|------|----------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
|    | NOMBRE | TIPO | MINIMA<br>(MW) | INICIAL<br>(MW) | MAXIMA<br>(MW) | A<br>(\$/H) | B<br>(\$/H) | C<br>(\$/H) |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 20.0000        | 20.0000         | 100.0000       | 50.0000     | 351.0000    | 44.0000     |
| 04 | BARRA4 | PV   | 50.0000        | 100.0000        | 200.0000       | 60.0000     | 300.0000    | 200.0000    |
| 05 | BARRA5 | PV   | 20.0000        | 100.0000        | 100.0000       | 50.0000     | 389.0000    | 40.6000     |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICD: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## DATOS DE LINEAS

| NOMBRE DE<br>LA LINEA | BARRA<br>ENVIO<br>(P) | BARRA<br>RECEP.<br>(Q) | IMPEDANCIA            |                      | ADMITANCIA A TIERRA    |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
|                       |                       |                        | RESISTENCIA<br>(p.u.) | REACTANCIA<br>(p.u.) | SUSCEPTANCIA<br>(p.u.) |
| LINEA2                | 02                    | 05                     | 0.0800                | 0.2620               | 0.0000                 |
| LINEA4                | 03                    | 01                     | 0.1060                | 0.4030               | 0.0000                 |
| LINEA3                | 03                    | 05                     | 0.1050                | 0.3470               | 0.0000                 |
| LINEA1                | 04                    | 05                     | 0.0300                | 0.1030               | 0.0000                 |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICD: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## DATOS DE TRANSFORMADORES

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(Q) | REACT.<br>(p.u.) | TAP              | TAP               | TAP              |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                      |                            |                            |                  | MINIMO<br>(p.u.) | INICIAL<br>(p.u.) | MAXIMO<br>(p.u.) |
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 0.0196           | 0.9500           | 1.0250            | 1.0500           |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.D.P. GENERAL

| NO | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT. ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT. REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT. REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 01 | BARRA1          | DSC  | 1.0500                    | 0.0000                     | 65.2302                         | 7.8158                            | 0.0000                     | 0.0000                        |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 0.9935                    | -14.3526                   | 0.0000                          | 0.0000                            | 30.0000                    | 12.0000                       |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 0.9845                    | -14.2609                   | 0.0000                          | 0.0000                            | 70.0000                    | 3.0000                        |
| 04 | BARRA4          | PV   | 1.0500                    | -9.3850                    | 128.4850                        | 15.8307                           | 86.0000                    | 20.0000                       |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0428                    | -11.7456                   | 76.6823                         | 41.9729                           | 80.0000                    | 10.0000                       |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1347.0330  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 5.5681  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 39

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.D.P. GENERAL

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(Q) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0092                 |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. GENERAL

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO NOMBRE | BARRA DE<br>ENVIÓ<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCIÓN<br>(Q) | FLUJO DE P-Q      |                      | FLUJO DE Q-P      |                      |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                                  |                          |                              | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) |
| L LINEA2                         | 02                       | 05                           | -21.5651          | -11.7112             | 22.0532           | 13.3096              |
| L LINEA4                         | 03                       | 01                           | -61.0998          | 7.9763               | 65.2520           | 7.8101               |
| T TRANS1                         | 03                       | 02                           | 7.9881            | 0.7332               | -7.9881           | -0.7243              |
| L LINEA3                         | 03                       | 05                           | -16.4095          | -11.2981             | 16.8395           | 12.7191              |
| L LINEA1                         | 04                       | 05                           | 42.5687           | -4.1937              | -42.0709          | 5.9030               |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/5

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. ACTIVA

| NO | BARRA  |      | VOLT.            | VOLT.             | POT.ACT.           | POT.REAC             | POT.ACT.      | POT.REAC.       |
|----|--------|------|------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|-----------------|
|    | NOMBRE | TIPO | MODULO<br>(p.u.) | ANGULO<br>(grad.) | GENERACION<br>(MW) | GENERACION<br>(MVAR) | CARGA<br>(MW) | CARGA<br>(MVAR) |
| 01 | BARRA1 | DSC  | 1.0000           | 0.0000            | 34.3960            | 9.5061               | 0.0000        | 0.0000          |
| 02 | BARRA2 | PB   | 0.9557           | -7.8266           | 0.0000             | 0.0000               | 30.0000       | 12.0000         |
| 03 | BARRA3 | PB   | 0.9341           | -7.9125           | 0.0000             | 0.0000               | 70.0000       | 3.0000          |
| 04 | BARRA4 | PV   | 1.0000           | 1.2032            | 139.1256           | 6.2143               | 86.0000       | 20.0000         |
| 05 | BARRA5 | PV   | 1.0000           | -2.1715           | 95.9614            | 45.1893              | 80.0000       | 10.0000         |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1364.0905  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW) : 4.5527  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 17

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/5

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.O.P. ACTIVA

| NO | NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLESADE<br>(Q) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 01 | TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0250                 |



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPLO2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.D.P. ACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE | BARRA DE<br>ENVID<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCION<br>(Q) | FLUJO DE P-Q     |                     | FLUJO DE Q-P     |                     |
|---------------------------|--------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|                           |        |                          |                              | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA2 | 02                       | 05                           | -36.8786         | -3.1391             | 38.0786          | 7.0690              |
| L                         | LINEA4 | 03                       | 01                           | -33.0646         | -4.3638             | 34.4158          | 9.5009              |
| T                         | TRANS1 | 03                       | 02                           | -7.2922          | 11.7494             | 7.2922           | -11.7812            |
| L                         | LINEA3 | 03                       | 05                           | -29.2111         | -7.5434             | 30.3064          | 11.1629             |
| L                         | LINEA1 | 04                       | 05                           | 53.2017          | -13.8079            | -52.2953         | 16.9195             |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPL02  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/1

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.D.P. REACTIVA

| NO | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT.ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT.REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT.REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 01 | BARRA1          | DSC  | 1.0500                    | 0.0000                     | 33.7874                        | 7.6849                           | 0.0000                    | 0.0000                       |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 0.9961                    | -6.9614                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 30.0000                   | 12.0000                      |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 0.9939                    | -7.0531                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 70.0000                   | 3.0000                       |
| 04 | BARRA4          | PV   | 1.0500                    | 1.1975                     | 139.1256                       | 8.7066                           | 86.0000                   | 20.0000                      |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0474                    | -1.8335                    | 95.9614                        | 42.7378                          | 80.0000                   | 10.0000                      |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 1361.7467  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 4.0471  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 10

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: EJEMPL02  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10/9

## RESULTADOS DE TAPS DE TRANSFORMADORES PARA F.D.P. REACTIVA

| NOMBRE DEL<br>TRANS. | BARRA DE<br>CONTROL<br>(P) | BARRA DE<br>LLEGADA<br>(Q) | TAP<br>FINAL<br>(p.u.) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| TRANS1               | 03                         | 02                         | 1.0034                 |

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Pag:

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE NEWTON

SISTEMA ELÉCTRICO: EJEMPL02  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/10

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. REACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE | BARRA DE<br>ENVÍO<br>(F) | BARRA DE<br>RECEPCIÓN<br>(Q) | FLUJO DE P-Q      |                      | FLUJO DE Q-P      |                      |
|---------------------------|--------|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                           |        |                          |                              | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA2 | 02                       | 05                           | -37.5363          | -6.4242              | 38.7054           | 10.2532              |
| L                         | LINEA4 | 05                       | 01                           | -32.6535          | -3.2853              | 33.8092           | 7.6791               |
| T                         | TRANS1 | 03                       | 02                           | -7.9857           | 5.6603               | 7.9857            | -5.6414              |
| L                         | LINEA3 | 05                       | 05                           | -28.8839          | -5.3302              | 29.8009           | 8.3605               |
| L                         | LINEA1 | 04                       | 05                           | 53.2094           | -11.3178             | -52.4041          | 14.0824              |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/

## DATOS DE BARRAS

| BARRA          | VOLT. MINIMO | VOLT. INICIAL | VOLT. MAXIMO | ANGULO INICIAL | POT.REAC. MINIMA | POT.REAC. MAXIMA | POT.ACT. CARGA | POT.REAC. CARGA | COND./REA SHUNT |
|----------------|--------------|---------------|--------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Nº NOMBRE TIPO | (p.u.)       | (p.u.)        | (p.u.)       | (grados)       | (MVAR)           | (MVAR)           | (MW)           | (MVAR)          | (MVAR)          |
| 01 BARRA1 DSC  | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | -50.0000         | 555.0000         | 33.6000        | 12.0000         | 0.0000          |
| 02 BARRA2 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 12.2000        | 3.0000          | 0.0000          |
| 03 BARRA3 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 270.0000       | 96.8000         | 0.0000          |
| 04 BARRA4 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 41.7000        | 9.9000          | 0.0000          |
| 05 BARRA5 PV   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | -10.0000         | 156.0000         | 21.2000        | 11.5000         | 0.0000          |
| 06 BARRA6 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 192.9900       | 82.2000         | 0.0000          |
| 07 BARRA7 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 21.4000        | 7.5000          | 0.0000          |
| 08 BARRA8 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 0.0000         | 0.0000          | 0.0000          |
| 09 BARRA9 PB   | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 53.1000        | 22.7000         | 0.0000          |
| 10 BARRA10 PV  | 0.9000       | 1.0000        | 1.1000       | 0.0000         | -30.0000         | 160.0000         | 0.0000         | 0.0000          | 0.0000          |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/

## LIMITES DE POTENCIA ACTIVA DE GENERACION Y COEF. DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

| BARRA          | POT.ACT. MINIMA | POT.ACT. INICIAL | POT.ACT. MAXIMA | COEFIC. A | COEFIC. B | COEFIC. C |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Nº NOMBRE TIPO | (MW)            | (MW)             | (MW)            | (\$/H)    | (\$/H)    | (\$/H)    |
| 01 BARRA1 DSC  | 0.0000          | 300.0000         | 500.0000        | 50.0000   | 300.0000  | 40.0000   |
| 05 BARRA5 PV   | 0.0000          | 80.0000          | 133.0000        | 50.0000   | 300.0000  | 40.5600   |
| 10 BARRA10 PV  | 0.0000          | 100.0000         | 154.0000        | 50.0000   | 200.0000  | 50.0000   |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/9

## DATOS DE LINEAS

| NOMBRE DE<br>LA LINEA | BARRA<br>ENVIO<br>(P) | BARRA<br>RECEP.<br>(Q) | IMPEDANCIA            |                      | ADMITANCIA A TIERRA    |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
|                       |                       |                        | RESISTENCIA<br>(p.u.) | REACTANCIA<br>(p.u.) | SUSCEPTANCIA<br>(p.u.) |
| LINEA 1-2             | 01                    | 02                     | 0.0079                | 0.0640               | 0.5117                 |
| LINEA 1-10            | 01                    | 10                     | 0.0115                | 0.0955               | 0.7384                 |
| LINEA 2-3             | 02                    | 03                     | 0.0023                | 0.0179               | 0.1582                 |
| LINEA 3-4             | 03                    | 04                     | 0.0081                | 0.0646               | 0.5391                 |
| LINEA 4-5             | 04                    | 05                     | 0.0059                | 0.0468               | 0.3909                 |
| LINEA 5-6             | 05                    | 06                     | 0.0040                | 0.0361               | 0.2822                 |
| LINEA 6-7             | 06                    | 07                     | 0.0131                | 0.0483               | 0.0188                 |
| LINEA 6-10            | 06                    | 10                     | 0.0118                | 0.0975               | 0.1891                 |
| LINEA 7-8             | 07                    | 08                     | 0.0751                | 0.0287               | 0.0788                 |
| LINEA 8-9             | 08                    | 09                     | 0.0212                | 0.0783               | 0.0189                 |
| LINEA 9-10            | 09                    | 10                     | 0.0059                | 0.0185               | 0.0000                 |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/9

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. GENERAL

| NO | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT.ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT.REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT.REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 01 | BARRA1          | DSC  | 1.1000                    | 0.0000                     | 365.7809                       | -44.7580                         | 33.6000                   | 12.0000                      |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 1.0771                    | -8.0214                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 12.2000                   | 3.0000                       |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 1.0685                    | -10.1815                   | 0.0000                         | 0.0000                           | 270.0000                  | 96.8000                      |
| 04 | BARRA4          | PQ   | 1.0958                    | -9.5512                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 41.7000                   | 9.9000                       |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0986                    | -8.0615                    | 133.0741                       | 39.0201                          | 21.2000                   | 11.5000                      |
| 06 | BARRA6          | PQ   | 1.0743                    | -8.7261                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 192.9900                  | 82.2000                      |
| 07 | BARRA7          | PQ   | 1.0684                    | -7.8495                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 21.4000                   | 7.5000                       |
| 08 | BARRA8          | PQ   | 1.1000                    | -6.4286                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 0.0000                    | 0.0000                       |
| 09 | BARRA9          | PQ   | 1.0941                    | -4.1883                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 53.1000                   | 22.7000                      |
| 10 | BARRA10         | PV   | 1.1000                    | -3.2487                    | 154.0876                       | -23.3966                         | 0.0000                    | 0.0000                       |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 2811.5371  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 11.5306  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 18

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA POR EL MÉTODO DE NEWTON

SISTEMA ELÉCTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/9

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. GENERAL

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE     | BARRA DE<br>ENVÍO<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCIÓN<br>(Q) | FLUJO DE P-Q      |                      | FLUJO DE Q-P      |                      |
|---------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                           |            |                          |                              | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA 1-2  | 01                       | 02                           | 261.4182          | -5.6225              | -256.9147         | -18.5334             |
| L                         | LINEA 1-10 | 01                       | 10                           | 71.0205           | -51.1676             | -70.5371          | -34.1688             |
| L                         | LINEA 2-3  | 02                       | 03                           | 245.4101          | 15.4456              | -244.2039         | -24.2654             |
| L                         | LINEA 3-4  | 03                       | 04                           | -25.1178          | -72.6223             | 25.2868           | 10.8328              |
| L                         | LINEA 4-5  | 04                       | 05                           | -66.6211          | -20.7791             | 66.8396           | -24.5428             |
| L                         | LINEA 5-6  | 05                       | 06                           | 45.5301           | 52.0044              | -45.3034          | -83.2718             |
| L                         | LINEA 6-7  | 06                       | 07                           | -30.4350          | 20.5779              | 30.5934           | -22.1518             |
| L                         | LINEA 6-10 | 06                       | 10                           | -116.6941         | -19.5996             | 118.0941          | 8.8145               |
| L                         | LINEA 7-8  | 07                       | 08                           | -51.7642          | 14.4883              | 53.7642           | -22.9888             |
| L                         | LINEA 8-9  | 08                       | 09                           | -53.5961          | 22.8353              | 54.2001           | -22.8791             |
| L                         | LINEA 9-10 | 09                       | 10                           | -106.6795         | -0.0128              | 107.2403          | 1.7720               |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/91

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. ACTIVA

| NO | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT.ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT.REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT.REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 01 | BARRA1          | DSC  | 1.0000                    | 0.0000                     | 369.6089                       | -10.3958                         | 33.6000                   | 12.0000                      |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 0.9638                    | -9.8320                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 12.2000                   | 3.0000                       |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 0.9536                    | -12.5306                   | 0.0000                         | 0.0000                           | 270.0000                  | 96.8000                      |
| 04 | BARRA4          | PQ   | 0.9885                    | -11.7686                   | 0.0000                         | 0.0000                           | 41.7000                   | 9.9000                       |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0000                    | -10.0038                   | 133.0777                       | 71.8331                          | 21.2000                   | 11.5000                      |
| 06 | BARRA6          | PQ   | 0.9705                    | -10.7773                   | 0.0000                         | 0.0000                           | 192.9900                  | 82.2000                      |
| 07 | BARRA7          | PQ   | 0.9633                    | -9.6887                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 21.4000                   | 7.5000                       |
| 08 | BARRA8          | PQ   | 0.9985                    | -7.9412                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 0.0000                    | 0.0000                       |
| 09 | BARRA9          | PQ   | 0.9931                    | -5.2025                    | 0.0000                         | 0.0000                           | 53.1000                   | 22.7000                      |
| 10 | BARRA10         | PV   | 1.0000                    | -4.0623                    | 154.0891                       | -8.4225                          | 0.0000                    | 0.0000                       |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 2837.1174  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW): 14.4820  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 13



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/91

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. ACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO | NOMBRE     | BARRA DE<br>ENVID<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCION<br>(Q) | FLUJO DE P-Q     |                     | FLUJO DE Q-P     |                     |
|---------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|                           |            |                          |                              | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) | POT.ACT.<br>(MW) | POT.REAC.<br>(MVAR) |
| L                         | LINEA 1-2  | 01                       | 02                           | 262.8318         | 20.7073             | -257.2051        | -24.4735            |
| L                         | LINEA 1-10 | 01                       | 10                           | 73.3901          | -43.1298            | -72.7663         | -25.5297            |
| L                         | LINEA 2-3  | 02                       | 03                           | 245.5619         | 21.4030             | -244.0482        | -24.1636            |
| L                         | LINEA 3-4  | 03                       | 04                           | -25.4116         | -72.7054            | 25.6760          | 23.9621             |
| L                         | LINEA 4-5  | 04                       | 05                           | -67.0782         | -33.8998            | 67.3631          | -2.4838             |
| L                         | LINEA 5-6  | 05                       | 06                           | 44.9251          | 62.7682             | -44.6079         | -87.3070            |
| L                         | LINEA 6-7  | 06                       | 07                           | -30.4920         | 22.2174             | 30.6955          | -23.2247            |
| L                         | LINEA 6-10 | 06                       | 10                           | -117.4353        | -17.1867            | 119.1716         | 13.1717             |
| L                         | LINEA 7-8  | 07                       | 08                           | -51.9086         | 15.5916             | 54.3890          | -22.2285            |
| L                         | LINEA 8-9  | 08                       | 09                           | -54.2506         | 22.1020             | 54.9893          | -21.2480            |
| L                         | LINEA 9-10 | 09                       | 10                           | -107.5778        | -1.6105             | 108.2703         | 3.7814              |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/9

## RESULTADOS DE BARRAS PARA F.O.P. REACTIVA

| Nº | BARRA<br>NOMBRE | TIPO | VOLT.<br>MODULO<br>(p.u.) | VOLT.<br>ANGULO<br>(grad.) | POT. ACT.<br>GENERACION<br>(MW) | POT. REAC<br>GENERACION<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>CARGA<br>(MW) | POT. REAC.<br>CARGA<br>(MVAR) |
|----|-----------------|------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 01 | BARRA1          | OSC  | 1.1000                    | 0.0000                     | 365.7750                        | -44.7586                          | 33.6000                    | 12.0000                       |
| 02 | BARRA2          | PQ   | 1.0771                    | -8.0214                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 12.2000                    | 3.0000                        |
| 03 | BARRA3          | PQ   | 1.0685                    | -10.1815                   | 0.0000                          | 0.0000                            | 270.0000                   | 96.8000                       |
| 04 | BARRA4          | PQ   | 1.0958                    | -9.5512                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 41.7000                    | 9.9000                        |
| 05 | BARRA5          | PV   | 1.0986                    | -8.0615                    | 133.0777                        | 39.0197                           | 21.2000                    | 11.5000                       |
| 06 | BARRA6          | PQ   | 1.0743                    | -8.7261                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 192.9900                   | 82.2000                       |
| 07 | BARRA7          | PQ   | 1.0684                    | -7.8495                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 21.4000                    | 7.5000                        |
| 08 | BARRA8          | PQ   | 1.1000                    | -6.4286                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 0.0000                     | 0.0000                        |
| 09 | BARRA9          | PQ   | 1.0941                    | -4.1883                    | 0.0000                          | 0.0000                            | 53.1000                    | 22.7000                       |
| 10 | BARRA10         | PV   | 1.1000                    | -3.2487                    | 154.0891                        | -23.3966                          | 0.0000                     | 0.0000                        |

## COSTO - PERDIDAS - ITERACIONES

COSTO TOTAL DE GENERACION (\$/H) : 2811.5188  
 PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA (MW) : 11.5304  
 NUMERO TOTAL DE ITERACIONES : 11

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: S N I  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/

## RESULTADOS DE FLUJOS PARA F.O.P. REACTIVA

| ELEMENTO<br>SERIE<br>TIPO NOMBRE | BARRA DE<br>ENVIO<br>(P) | BARRA DE<br>RECEPCION<br>(Q) | FLUJO DE P-Q      |                      | FLUJO DE Q-P      |                      |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                                  |                          |                              | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) | POT. ACT.<br>(MW) | POT. REAC.<br>(MVAR) |
| L LINEA 1-2                      | 01                       | 02                           | 261.4156          | -5.6235              | -256.9122         | -18.5333             |
| L LINEA 1-10                     | 01                       | 10                           | 71.0172           | -51.1675             | -70.5339          | -34.1693             |
| L LINEA 2-3                      | 02                       | 03                           | 245.4080          | 15.4449              | -244.2018         | -24.2654             |
| L LINEA 3-4                      | 03                       | 04                           | -25.1201          | -72.6217             | 25.2892           | 10.8324              |
| L LINEA 4-5                      | 04                       | 05                           | -66.6233          | -20.7786             | 66.8417           | -24.5434             |
| L LINEA 5-6                      | 05                       | 06                           | 45.5321           | 52.0044              | -45.3054          | -83.2718             |
| L LINEA 6-7                      | 06                       | 07                           | -30.4348          | 20.5780              | 30.5932           | -22.1518             |
| L LINEA 6-10                     | 06                       | 10                           | -116.6931         | -19.5996             | 118.0931          | 8.8143               |
| L LINEA 7-8                      | 07                       | 08                           | -51.7637          | 14.4881              | 53.7638           | -22.9886             |
| L LINEA 8-9                      | 08                       | 09                           | -53.5956          | 22.8352              | 54.1996           | -22.8790             |
| L LINEA 9-10                     | 09                       | 10                           | -106.6788         | -0.0128              | 107.2397          | 1.7720               |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMA2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/91

## DATOS DE BARRAS

| BARRA          | VOLT. MINIMO | VOLT. INICIAL | VOLT. MAXIMO | ANGULO INICIAL | POT.REAC. MINIMA | POT.REAC. MAXIMA | POT.ACT. CARGA | POT.REAC. CARGA | COND./REAC. SHUNT |
|----------------|--------------|---------------|--------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| Nº NOMBRE TIPO | (p.u.)       | (p.u.)        | (p.u.)       | (grados)       | (MVAR)           | (MVAR)           | (MW)           | (MVAR)          | (MVAR)            |
| 01 BARRA1 DSC  | 1.0200       | 1.0200        | 1.0200       | 0.0000         | 0.0000           | 60.0000          | 0.0000         | 0.0000          | 0.0000            |
| 02 BARRA2 PQ   | 0.9000       | 0.9550        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 60.0000        | 30.0000         | 0.0000            |
| 03 BARRA3 PV   | 1.0400       | 1.0400        | 1.0400       | 0.0000         | 0.0000           | 60.0000          | 0.0000         | 0.0000          | 0.0000            |
| 04 BARRA4 PQ   | 0.9000       | 0.9230        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 40.0000        | 10.0000         | 0.0000            |
| 05 BARRA5 PQ   | 0.9000       | 0.9930        | 1.0500       | 0.0000         | 0.0000           | 0.0000           | 60.0000        | 20.0000         | 0.0000            |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMA2  
 POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/91

## LIMITES DE POTENCIA ACTIVA DE GENERACION Y COEF. DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

| BARRA          | POT.ACT. MINIMA | POT.ACT. INICIAL | POT.ACT. MAXIMA | COEFIC. A | COEFIC. B | COEFIC. C |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Nº NOMBRE TIPO | (MW)            | (MW)             | (MW)            | (\$/H)    | (\$/H)    | (\$/H)    |
| 01 BARRA1 DSC  | 30.0000         | 97.2000          | 120.0000        | 50.0000   | 351.0000  | 44.4000   |
| 03 BARRA3 PV   | 30.0000         | 68.0000          | 120.0000        | 50.0000   | 389.0000  | 40.6000   |

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Pag: 1

## PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON

SISTEMA ELECTRICO: SISTEMA2

POTEN. BASE (MVA): 100

Fecha: 07/11/9

## DATOS DE LINEAS

| NOMBRE DE<br>LA LINEA | BARRA<br>ENVIO<br>(P) | BARRA<br>RECEP.<br>(Q) | IMPEDANCIA            |                      | ADMITANCIA A TIERRA    |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
|                       |                       |                        | RESISTENCIA<br>(p.u.) | REACTANCIA<br>(p.u.) | SUSCEPTANCIA<br>(p.u.) |
| LINEA5                | 01                    | 02                     | 0.1000                | 0.4000               | 0.0000                 |
| LINEA6                | 01                    | 04                     | 0.1500                | 0.6000               | 0.0000                 |
| LINEA3                | 01                    | 05                     | 0.0500                | 0.2000               | 0.0000                 |
| LINEA2                | 03                    | 02                     | 0.0500                | 0.2000               | 0.0000                 |
| LINEA1                | 03                    | 05                     | 0.0500                | 0.2000               | 0.0000                 |
| LINEA4                | 04                    | 02                     | 0.1000                | 0.4000               | 0.0000                 |

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Aboytes F., Mota R., "NOTAS SOBRE TECNICAS DE ALMACENAMIENTO, ORDENAMIENTO Y FACTORIZACION DE MATRICES DISPERSAS", Comisión Federal de Electricidad - Centro Nacional de Control de Energía, Quito - Ecuador.
- [2] Burchett R., Happ H., Vierath D., "QUADRATICALLY CONVERGENT OPTIMAL POWER FLOW", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.11, November 1984.
- [3] Byers R., "INTRODUCCION A LAS BASES DE DATOS CON dBASE III PLUS", McGraw - Hill , Madrid, 1986.
- [4] Demidovich B., "PROBLEMAS Y EJERCICIOS DE ANALISIS MATEMATICO", Paraninfo, Madrid, 1978.
- [5] Fox Software Inc., "FoxBASE+ RELATIONAL DATABASE MANAGEMENT SYSTEM REVISION 2.10 COMMANDS & FUNCTIONS", Fox Software Inc., 1988.
- [6] Guerrero M., "PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO DE POTENCIA PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito -

Ecuador, 1983.

- [7] Guijarro C., "PROGRAMA INTERACTIVO DE FLUJO OPTIMO PARA LABORATORIO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA", Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 1988.
  
- [8] Mármol E., "ESTUDIOS DE FLUJOS DE CARGA MEDIANTE LOS METODOS DE NEWTON - RAPHSON", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 1983.
  
- [9] McCracken D., "PROGRAMACION FORTRAN IV" Limusa, México, 1975.
  
- [10] Obadina O. y Berg G., "DETERMINATION OF VOLTAGE STABILITY LIMIT IN MULTI MACHINE POWER SYSTEMS", IEEE Power Engineering Society, Enero de 1987.
  
- [11] Pai M. A., "COMPUTER TECHNIQUES IN POWER SYSTEM ANALYSIS", McGraw - Hill, New Delhi, 1979.
  
- [12] Rashed A., Kelly D., "OPTIMAL LOAD FLOW SOLUTION USING LAGRANGIAN MULTIPLIERS AND THE HESSIAN MATRIX", IEEE Power Engineering Society, Enero, 1973.
  
- [13] Reid G. y Hasdorff L., "ECONOMIC DISPATCH USING QUADRATIC PROGRAMMING", IEEE Power Engineering Society,

Enero 1973.

- [14] Stagg G. y El-Abiad A., "COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEM ANALYSIS", McGraw - Hill, Tokyo.
  
- [15] Sun D. Ashley B., Brewer B., Hughes A., Tinney W., "OPTIMAL POWER FLOW BY NEWTON APPROACH", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.10, Octubre 1984.
  
- [16] Sun D., Hughes A., Tinney W., Bright J., Lamont J., "OPTIMAL POWER FLOW BY NEWTON'S METHOD, IEEE, 1987.
  
- [17] Vinueza F., "FLUJO OPTIMO DE POTENCIA", Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 1984.
  
- [18] Wood A. y Wallenberg B., "POWER GENERATION, OPERATION AND CONTRL", John Wiley & Sons, New York.