

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**



**“ASIGNACION OPTIMA DE POTENCIA
REACTIVA EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PERCY ALAN PAJAN LAN

LIMA - PERU

1997

SUMARIO

En la presente tesis se desarrolla la problemática de la asignación óptima de la compensación reactiva para la minimización de pérdidas y mejoramiento del perfil de tensiones en sistemas eléctricos de potencia, se analizan distintas metodologías de optimización, teniendo como objetivo la implementación de un algoritmo de solución en un programa apropiado para aplicaciones académicas y profesionales. El resultado es el desarrollo de un programa para plataformas PC que optimiza el manejo de potencia reactiva, mediante una metodología basada en Algoritmos Genéticos. La efectividad de dicha metodología se ilustra con una aplicación al Sistema Interconectado Centro Norte.

**ASIGNACION OPTIMA DE POTENCIA
REACTIVA EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

TITULO : ASIGNACION OPTIMA DE POTENCIA REACTIVA EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

AUTOR : PERCY ALAN PAJAN LAN

GRADO : TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA

FACULTAD : INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

CIUDAD : LIMA - PERU

ANO : 1997

EXTRACTO

A continuación se da un resumen de los tópicos cubiertos en el presente trabajo :

En el capítulo I se desarrollan los conceptos fundamentales y definiciones, así como los beneficios de la compensación reactiva, problemática de su aplicación y alternativas para su optimización.

En el capítulo II se presenta el modelamiento de los componentes que intervienen en el sistema eléctrico.

En el capítulo III se realiza un análisis de los algoritmos disponibles en la literatura técnica de la especialidad que resuelven el problema de la optimización.

En el capítulo IV se describen las principales características del programa computacional desarrollado y su metodología para el proceso de optimización.

En el capítulo V se realizan aplicaciones al sistema IEEE-6 barras, como también al sistema interconectado Centro-Norte (SICN) con los respectivos análisis de los resultados con el fin de comprobar su efectividad.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
EL PROBLEMA DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMPENSACIÓN REACTIVA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	4
1.1 Conceptos Fundamentales y Definiciones	4
1.2 Beneficios de la compensación reactiva	5
1.3 Dispositivos que influyen en la generación y flujo de potencia reactiva	7
1.4 El problema de su aplicación y solución	8
1.5 Alternativas para la optimización	10
CAPITULO II	
MODELAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	12
2.1 Líneas de transmisión	12
2.2 Transformadores	13
2.3 Generadores	13
2.4 Capacitores y Reactores	16
2.5 Compensadores Estáticos variables	17
CAPITULO III	
METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN	22
3.1 Definiciones	22

3.2	Algoritmos disponibles	25
3.2.1	Programación lineal	25
3.2.2	Programación no lineal	26
3.2.3	Algoritmos Genéticos	27
CAPITULO IV		
IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA		30
4.1	Características generales del programa	30
4.2	Metodología desarrollada	31
4.2.1	Variables de Control	31
4.2.2	División por subsistemas	34
4.2.3	Evaluación de los sistemas de potencia	35
4.2.4	Primera generación	36
4.2.5	Operaciones genéticas	37
CAPITULO V		
APLICACION A SISTEMAS DE POTENCIA		44
5.1	Sistema Ward-Hale (IEEE-6 barras)	44
5.2	Sistema Interconectado Centro Norte (SICN)	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		55
ANEXOS		58
BIBLIOGRAFIA		96

INTRODUCCIÓN.

A medida que los sistemas eléctricos de potencia crecen cada vez mas, la compensación reactiva se hace cada vez más necesaria para lograr niveles adecuados de tensión y capacidad de transmisión. La forma clásica de solucionar este problema es por tanteos mediante repetidos flujos de carga. La magnitud de la compensación reactiva y su ubicación se varían en forma tentativa, ayudándose de la experiencia de los ingenieros de planeamiento, hasta encontrar una solución satisfactoria. Evidentemente, ésta es una solución por aproximaciones sucesivas que generalmente requiere un tiempo largo. Además, no permite garantizar que dicha solución sea la óptima.

La compensación reactiva permite un mejor control de tensión, reduciendo las pérdidas en el sistema, así como la descarga de equipos que pueden ser usados más eficientemente en generación y transmisión de potencia activa, lográndose así un funcionamiento económico y más confiable de un sistema eléctrico de potencia, así como también el mejoramiento de la calidad en el servicio

eléctrico.

Actualmente la energía reactiva toma una vital importancia, ya que el crecimiento constante de la demanda puede llevar al sistema eléctrico a ser inoperable debido a las bajas tensiones resultantes, con los consiguientes problemas de inestabilidad de tensión. Por lo tanto, el adecuado manejo de la energía reactiva es muy importante, tanto técnicamente como económicamente.

Desde 1968, se empezó a estudiar una forma sistemática de solucionar el problema, surgiendo diferentes metodologías, diferenciándose mayormente en los métodos matemáticos usados. Entre las metodologías utilizadas se encuentran la Programación Lineal (Hobson_[1], Mamandur_[2], Qiu_[3]); Programación no Lineal, (Shoults_[4], Burchett_[5], Sasson_[6]) y recientemente los Algoritmos Genéticos (Kenji Iba_[7]).

Los programas que existen para realizar este tipo de análisis actualmente no están accesibles a los profesionales y estudiantes, debido a sus altos costos de adquisición y requerimiento de computadores de alta tecnología.

La presente tesis esta dirigida al estudio de la asignación óptima de compensación reactiva en sistemas eléctricos de potencia mediante un programa computacional basado en algoritmos genéticos. A fin de facilitar la

utilización del programa se ha desarrollado un ambiente interactivo gráfico de edición de datos, ejecución de flujos y asignación óptima de compensación reactiva para la minimización de pérdidas y mejoramiento del perfil de tensiones, con características similares a las de otros programas para PC disponibles a nivel mundial.

Adicionalmente, se estudian algunas aplicaciones al Sistema Interconectado Centro - Norte para mostrar la efectividad del programa.

Cabe mencionar que por tener acceso al código fuente y la documentación del software, es posible mejorarlo y adaptarlo a nuevos requerimientos asociados a los sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMPENSACIÓN REACTIVA EN SISTEMAS ELECTRICOS

1.1. Conceptos Fundamentales y Definiciones.

Existe una relación muy estrecha entre el equilibrio de potencia reactiva y las tensiones del sistema. Si en un sistema de potencia existe déficit de reactivos se tendrá un perfil de tensiones bajo, así como también un incremento en el nivel de pérdidas, pudiéndose llegar al extremo de tener problemas de estabilidad. Si por el contrario se tiene exceso de reactivos, entonces se podrían tener altas tensiones, las cuales pueden llegar a ser peligrosas para el aislamiento del equipo.

La potencia reactiva, a diferencia de la activa no requiere ser transmitida en su totalidad, siendo lo más eficiente producirla donde se consume, ya que las deficiencias de reactivos producen condiciones locales de bajas tensiones.

Para transmitirla de un punto a otro se necesita una diferencia de tensión entre el nodo de envío y recepción, por lo que transmitir grandes cantidades de reactivos implica aumento de pérdidas. Lo ideal sería no transmitir potencia reactiva, sin embargo, esto es

imposible en la práctica y lo que normalmente sucede es que se transfiere potencia reactiva desde los sistemas de transmisión con altos niveles de tensión a los de menores tensiones.

Capacitores y Reactores fijos

Los capacitores y reactores son equipos pasivos, que en función del ángulo que forma su corriente con la tensión aplicada tienen respectivamente la propiedad de generar y absorber potencia reactiva; la cual varía con el cuadrado de la tensión. Los niveles de potencia de cortocircuito no se ven incrementados por el uso de estos elementos en una red eléctrica.

Compensadores estáticos de potencia reactiva

Los compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC) utilizan capacitores y reactores junto con tiristores para controlar la potencia reactiva. Estos equipos se distinguen por la habilidad de variar rápidamente y continuamente la potencia reactiva generada en respuesta a los cambios de las condiciones del sistema eléctrico. Por lo tanto los SVC son utilizados principalmente para estabilizar las tensiones del sistema y regular la potencia reactiva entre otras aplicaciones.

1.2. Beneficios de la Compensación reactiva.

El objetivo global de un sistema Eléctrico es satisfacer la demanda de electricidad con el menor costo posible garantizando adecuados niveles de confiabilidad,

calidad y seguridad. El manejo eficiente de la potencia reactiva, la cual, está presente en todos los sistemas de corriente alterna asociada a los campos electromagnéticos de los diferentes elementos conectados a la red, juega un papel importante en el logro del objetivo, ya que un deficiente manejo de los reactivos origina las siguientes consecuencias:

Aumento de pérdidas técnicas en el sistema.

Bajas o altas tensiones (mala calidad del servicio).

Inestabilidad o colapso del sistema.

Necesidades adicionales de capacidad de generación, transformación y redes de transmisión, subtransmisión y distribución.

Aumento de costos operativos por necesidades de generación mínima en plantas costosas.

Sobrecarga adicional en las líneas de transmisión o transformadores por conducción de potencia reactiva adicional.

Uno de los objetivos que se debe plantear en la optimización de reactivos es encontrar la transferencia que minimice costos de inversión del sistema, las pérdidas, los combustibles y los racionamientos. Un exceso de transferencia de potencia reactiva implica una disminución en la capacidad de transporte de potencia activa del sistema de transmisión y por ende un adelanto de inversiones por necesidades de refuerzos, un gran

incremento de pérdidas y un deterioro en los perfiles de tensión que pueden atentar contra la seguridad del sistema y la calidad en el servicio eléctrico.

Los principales beneficios conseguidos con un eficiente manejo de la energía reactiva son:

Reducción de pérdidas en el sistema.

Mantenimiento del nivel de tensiones frente a las variaciones diarias de carga o ante conexiones y desconexiones bruscas.

Aumento de la capacidad de transporte por las líneas.

Aumento de los márgenes de reserva de potencia reactiva en los grupos generadores para hacer frente a eventuales perturbaciones.

Mejora del margen de estabilidad estacionaria y transitoria del sistema.

1.3. Dispositivos que influyen en la generación y flujo de potencia reactiva.

Para una adecuada generación y flujo de potencia reactiva se deben considerar:

- La variación de la tensión de generación, dado que produciría cambios en la inyección de potencia reactiva entregada por los grupos.
- La variación de taps en los transformadores, teniendo como efecto una variación en la diferencia de las tensiones entre las barras del transformador, lo cual modifica el consumo de potencia reactiva del mismo.

- Los bancos de condensadores, reactores y compensadores estáticos, dado que son fuentes de potencia reactiva y cuyos efectos sobre la red eléctrica son fundamentales, por lo que es importante encontrar la mejor ubicación y dimensionamiento de estos equipos.

Siendo el objetivo conseguir un adecuado punto de funcionamiento del sistema, tanto en su aspecto económico (minimización de pérdidas, racionamiento y costos de combustibles), como en el aspecto de calidad y seguridad (tensiones y límites de transferencias aún en casos de contingencias).

1.4. El problema de su aplicación y solución.

Para el adecuado control de la potencia reactiva durante la operación de un sistema eléctrico es necesario prever la instalación de equipos de compensación con la suficiente anticipación, para ello deben realizarse estudios para obtener la magnitud y la ubicación de la compensación en un determinado periodo de análisis.

Estos estudios deben estar coordinados con los de expansión de generación, transmisión, subtransmisión y distribución, y con los proyectos de reducción de pérdidas y manejo de la demanda, para lograr así la mayor eficiencia posible desde el punto de vista técnico, económico y financiero.

En los análisis de planeamiento se detectan también los requerimientos globales de compensación en las

diferentes áreas del sistema. Para definir estos requerimientos, se analizan diferentes áreas del sistema, con el criterio de que el voltaje en los nodos de carga se mantengan dentro de un rango aceptable. Estos requerimientos de reactivos sirven como base a cada una de las empresas del sector para que efectúe estudios más detallados de localización y dimensionamiento y además se incluyan en sus programas de inversión.

Las opciones disponibles tanto en el planeamiento como en la operación para disminuir los problemas de tensiones debidos a desbalances de potencia reactiva son:

Reducir los límites de transferencias.

Asignar generaciones mínimas de seguridad.

Adicionar compensación serie o paralelo.

Adicionar o utilizar los taps de los transformadores con conmutadores automáticos bajo carga.

Operar con tensiones más altas.

Instalar generadores con factores de potencia más bajos o reducir la generación de potencia activa para generar más potencia reactiva.

Instalar compensación estática controlada por tiristores.

Utilizar la capacidad de sobrecarga de los generadores.

Apertura de circuitos en el caso de altas tensiones durante períodos de carga mínima.

La selección de una o varias de las anteriores

opciones requiere de un cuidadoso análisis técnico-económico para garantizar la filosofía del mínimo costo.

1.5. Alternativas para la optimización

El manejo de la potencia reactiva debe tener como objetivo lograr un adecuado punto de operación, tanto en su aspecto económico (minimización de pérdidas, ahorro de combustible por mínima generación térmica, etc.) como en su aspecto de calidad y seguridad (tensiones y límites de transferencias), utilizando eficientemente los elementos de control de potencia reactiva disponibles.

Para definir las políticas específicas de movimiento de taps, excitación de generadores y maniobra de condensadores y reactores, se utiliza el flujo de carga óptimo como herramienta básica de análisis, complementadas con los programas de análisis de seguridad.

Cuando se llevan a cabo estudios del sistema para seleccionar compensación se plantean los siguientes objetivos:

a) Identificar los problemas del sistema que pueden ser solucionados con la compensación, los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Insuficiente capacidad de transporte.
- Insuficiente margen de estabilidad transitoria.
- Inestabilidad de tensión.
- Sobretensiones temporales.

- desbalances de carga.

b) Determinar los siguientes parámetros:

- Localización.
- Capacidad.
- Funciones.
- Configuración.
- Control.
- Protecciones.

c) Desarrollar las bases para la justificación técnico-económica, para las especificaciones técnicas y para el diseño definitivo por parte del fabricante.

d) Determinar los criterios de operación, para el cual se debe realizar los estudios necesarios para determinar el criterio o régimen de operación de las fuentes de potencia reactiva, que son dependientes del dinamismo del sistema eléctrico de potencia.

Dichos estudios se pueden agrupar en tres categorías:

- Calidad.
- Seguridad.
- Confiabilidad.

CAPITULO II MODELAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

Para el estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia en estado estacionario, mediante los análisis de flujos de potencia, sus componentes se representan mediante modelos estáticos o cuasiestacionarios. Por ello se usan modelos lineales, monofásicos, con parámetros concentrados o distribuidos.

A continuación se presenta el modelamiento del sistema de potencia:

2.1 Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión funcionan normalmente con cargas trifásicas equilibradas, la influencia de la asimetría es pequeña y por tanto pueden ser despreciadas.

Las líneas normalmente se representan por su equivalente π de parámetros agrupados o concentrados en lugar de uniformemente repartidos a lo largo de la línea, y para fines de cálculo deben ser expresados en por unidad. Sin embargo, es posible encontrar el circuito equivalente de una línea larga de transporte y representarla con precisión ya que la resistencia, reactancia, capacitancia y susceptancia están uniformemente repartidas a lo largo de la línea. En el

cálculo exacto de líneas largas debe considerarse este modelamiento.

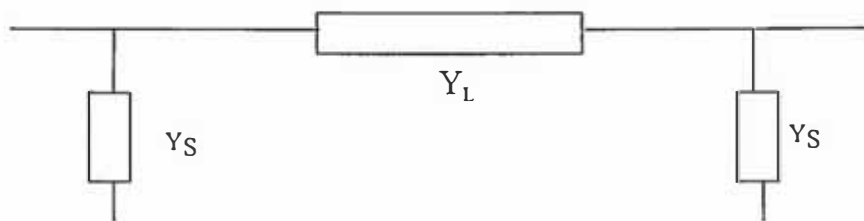


Fig. 2.1 Equivalente "pi" de una línea de transmisión

Donde :

Y_L = Admitancia serie

Y_S = Admitancia paralelo

2.2 Transformadores

La representación del transformador se realiza mediante el modelo equivalente "pi". La particularidad de los transformadores viene a ser la adición del tap, siendo este importante cuando tiene una posición diferente a la relación de transformación nominal. El efecto del tap debe ser incluido en la matriz de admitancia propia y mutua en el nodo al que está conectado dicho transformador.

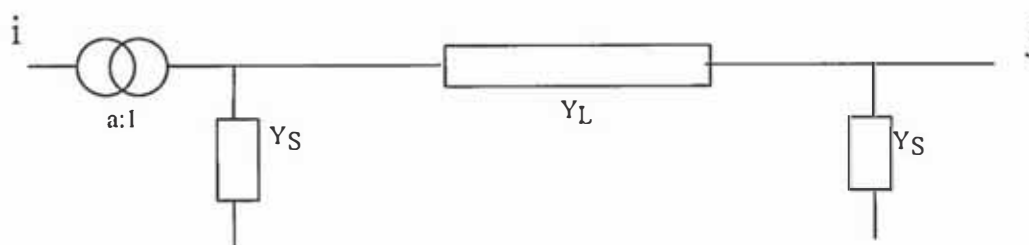


Figura 2.2 Transformador con Tap

2.3 Generadores

El principal componente de todo sistema eléctrico de potencia es el generador, ya que dependiendo de la forma

como se opere pueden definirse un sin número de casos, de los cuales pueden encontrarse los sistemas operativamente económicos o no.

El modelamiento de la máquina depende del area de aplicación en la cual se realiza el análisis. Para estudios de los sistemas de potencia de procesos transitorios y fenómenos dinámicos es necesario un modelamiento con mayor grado de detalle, como por ejemplo los estudios de estabilidad.

Ya que el intervalo de tiempo que abarcan los algoritmos de operación económica es largo con respecto a los tiempos de interés en los estudios de estabilidad, el modelo utilizado comúnmente en los generadores en los estudios de operación económica óptima es la clásica fuente de tensión detrás de una reactancia equivalente.

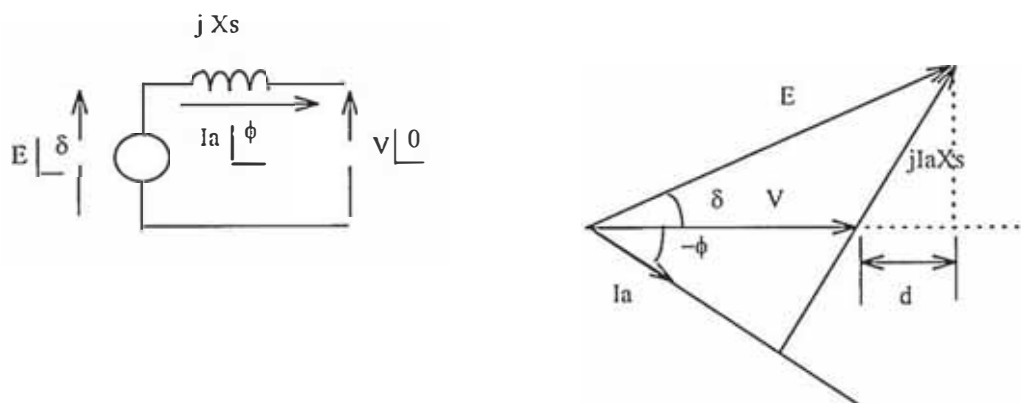


Figura 2.3 Circuito equivalente y diagrama fasorial de la máquina síncrona

Cambiar la excitación de las máquinas síncronas es un factor importante para el control de la potencia reactiva.

Para ilustrar esta propiedad se puede considerar un generador conectado por sus terminales a un gran sistema de potencia, tan grande que el voltaje V en los terminales del generador no se altera con los cambios en la excitación del generador.

Para la definición básica de la potencia activa y reactiva pueden ser usadas las expresiones:

$$P_g = V I_a \cos \phi$$

$$Q_g = V I_a \sin \phi$$

La tensión V en los bornes de la máquina es tomada como referencia respecto a la corriente de armadura I_a , un voltaje ficticio E representa a la tensión requerida para generar la corriente I_a . El ángulo δ es el ángulo del torque.

Del diagrama fasorial :

$$E \sin \delta = I_a X_s \cos \phi$$

$$E \cos \delta = V + I_a X_s \sin \phi$$

Por tanto :

$$P_g = (E V / X_s) (\sin \delta)$$

$$Q_g = (V / X_s) (E \cos \delta - V)$$

dando como conclusión que la potencia máxima obtenida de un generador es EV/X_s y que la potencia reactiva generada depende de la diferencia $d = (E \cos \delta - V)$

Para excitación normal $d=0$; $V = E \cos \delta$

Para sobreexcitación $d>0$; $V < E \cos \delta$

Para subexcitación $d<0$; $V > E \cos \delta$

Por tanto el cambio de la excitación de las máquinas sincronas es un factor importante para el control de la potencia reactiva, ya que si el generador está sobreexcitado y entrega corriente en atraso al sistema, suministra potencia reactiva al sistema; mientras que un generador subexcitado suministra corriente en adelanto, con lo cual absorberá potencia reactiva del sistema

2.4 Capacitores y Reactores

Un método muy importante para controlar la tensión de una barra es mediante bancos de condensadores en paralelo en las barras a niveles de transmisión y distribución a lo largo de las líneas o en subestaciones o cargas. Esencialmente los condensadores son un método de suministrar potencia reactiva en el punto de instalación. Los bancos de condensadores pueden estar permanentemente conectados, pero como reguladores de voltaje pueden alternativamente ser activados o desactivados del sistema según la demanda de carga. La conmutación puede ser manual o automática, bien sea por medio de relojes de tiempo o en respuesta al voltaje o a los requerimientos de potencia reactiva. Cuando están en paralelo con una carga que tiene un factor de potencia en atraso, los condensadores son la fuente de una parte o quizás de toda la potencia reactiva de la carga. Así, los condensadores reducen la corriente de línea necesaria para alimentar la carga y reducir la caída de voltaje en

la línea, a medida que se mejora el factor de potencia.

El modelamiento del shunt puede ser aplicado mediante la adición de una admitancia a la barra en la cual fue asignada.

$$Q_{g_i} = V_i^2 b_{ii} + \sum V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Adicionando un shunt b en la barra i :

$$Q_{g_i}' = V_i^2 (Y_{sh} + b_{ii}) + \sum V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_{g_i}' = V_i^2 Y_{sh} + V_i^2 b_{ii} + \sum V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_{g_i}' = Q_{g_{sh}} + Q_{g_i}$$

2.5 Compensadores Estáticos variables

Los capacitores y reactores tienen la propiedad de generar y absorber potencia reactiva, la que varía con el cuadrado de la tensión. Los sistemas estáticos de compensación reactiva "SVC", utilizan los capacitores y reactores junto con los tiristores de potencia para controlar la corriente que fluye en él. Los "SVC" se distinguen por la habilidad de variar rápidamente y continuamente la potencia reactiva generada en respuesta a los cambios de condiciones del sistema eléctrico. Por lo tanto los "SVC" son utilizados principalmente para estabilizar las tensiones del sistema y regular la potencia reactiva entre otras aplicaciones.

La función de los compensadores estáticos de potencia reactiva en alta tensión se puede resumir en lo siguiente:

- Mantener el voltaje en barras de salida en un valor

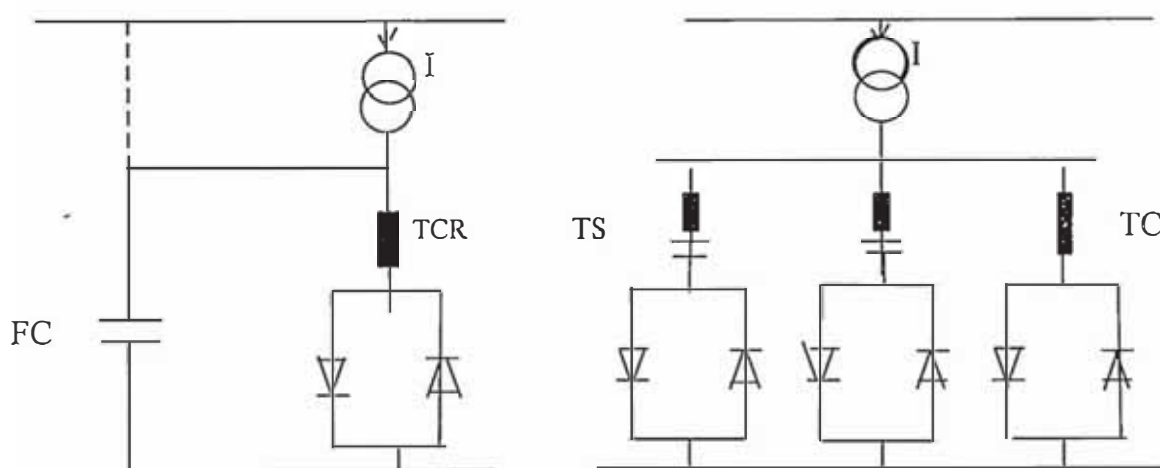
prefijado.

- Efectuar el control dinámico de la potencia reactiva con lo que se mejora la estabilidad permanente y transitoria del sistema eléctrico.
- Disminución de pérdidas en líneas de transmisión, al elevarse los niveles de tensión en el sistema.

Estos equipos pueden ser divididos en dos categorías básicas:

- Sistemas con condensadores fijos y reactores controlados por tiristores (FC+TCR).
- Sistemas con condensadores switchados por tiristores y reactores controlados por tiristores (TSC+TCR).

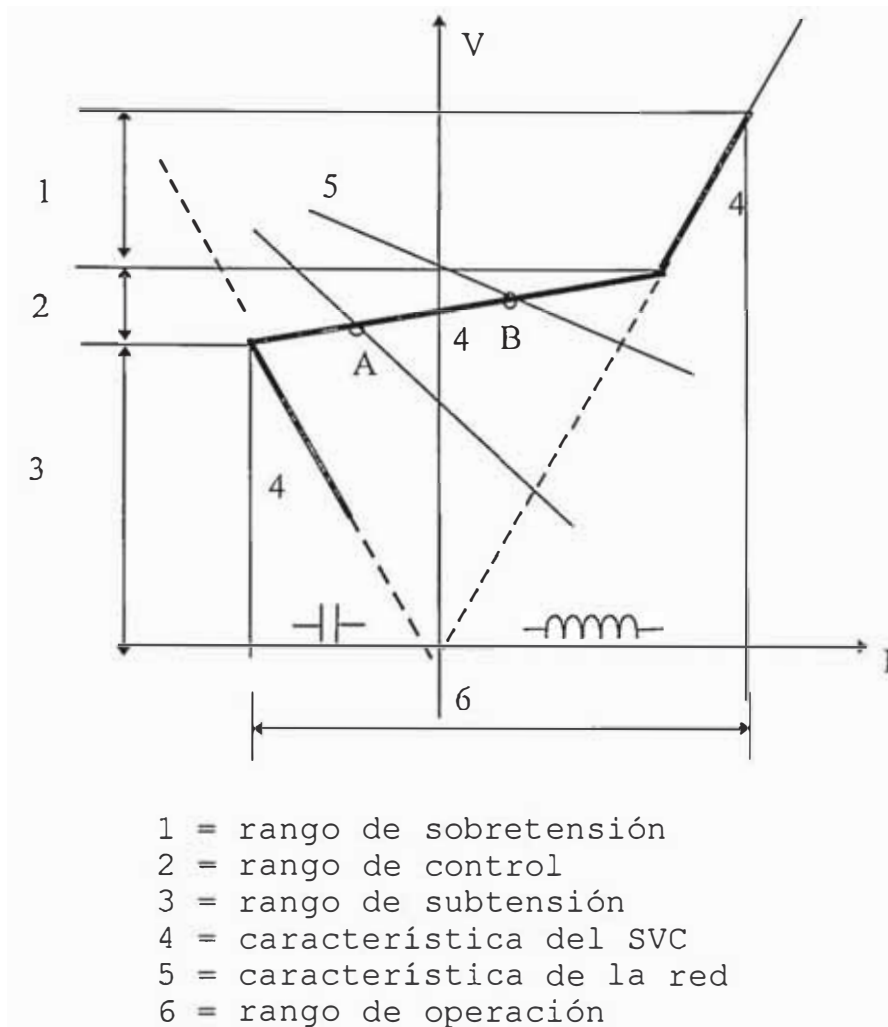
Las configuraciones básicas de estos sistemas son mostradas en las siguientes figuras:



FC = capacitores fijos
 TCR = reactores controlados por tiristores
 TSC = capacitores switchados por tiristores

Modelamiento Real

El rango de operación de un "SVC" para controlar la tensión se puede dividir en tres secciones principales, como se muestra en la siguiente figura:



Rango de control, es la zona en la cual la potencia del equipo es suficiente para estabilizar la tensión del sistema sobre la característica inclinada dada por la tensión de referencia, V_{ref} y la pendiente.

Rango de sobretensión, es la zona donde la tensión de la red es tan alta que el equipo opera totalmente inductivo. Su comportamiento corresponde al de una inductancia fija. En este rango de sobretensión el equipo puede operar brevemente en función de su capacidad de sobrecarga.

Rango de subtensión, es la zona en la cual la tensión de la red es baja y el equipo opera como un condensador

en forma continua. Si la tensión cae por debajo de cierto valor límite, el equipo es desconectado de la red (estrategia de mínima tensión).

Dependiendo de la pendiente elegida, la tensión en la barra del SVC variará ligeramente.

Las diferentes configuraciones de la red y los diferentes niveles de carga en una red, da a lugar a diferentes características de la red en el punto donde el equipo es conectado, estas características tienen las siguientes propiedades :

Son casi lineales desde que la impedancia de la red es muy pequeña con respecto a la impedancia del SVC.

Si la red tiene comportamiento inductivo la tensión en la barra de conexión es menor ya que la impedancia de la red es inductiva a frecuencia nominal.

La instalación se conecta al sistema de alta tensión a través de un interruptor, a continuación se ubica un transformador de potencia que permite bajar la tensión del sistema a un valor de tensión más conveniente para conectar el banco de condensadores, el reactor, los tiristores y los filtros.

Como parámetros de operación del SVC se debe tomar en cuenta básicamente la pendiente de la característica de operación y la tensión de referencia. Es importante seleccionar estos valores adecuadamente ya que una mala elección puede traer como consecuencia que se produzca

sobrecarga en el equipo o que el punto de operación se produzca fuera de la característica del equipo.

De la figura anterior se puede apreciar como cambia el punto de operación del "SVC" del punto A a B. Por ejemplo el punto A puede pertenecer a la máxima demanda y B a la mínima demanda.

Para la aplicación en la optimización de potencia reactiva se puede obtener los distintos puntos de operación adicionando shunts variables, obteniéndose en cada caso los distintos puntos de operación pudiéndose obtener el rango de operación en forma aproximada.

CAPITULO III METODOLOGIA DE OPTIMIZACIÓN

3.1 Definiciones

En los últimos años se ha dado mucha atención al problema de obtener flujos de potencia óptimos y se han publicado diversos métodos de optimización en sistemas de potencia, cada una de ellos introduciendo nuevas técnicas, otros modificando los métodos matemáticos.

El término flujo de potencia óptimo es introducido para determinar la operación óptima al mínimo costo de operación o con las mínimas pérdidas de potencia siendo condición prioritaria para cualquiera de ellas las restricciones de tensiones máximas y mínimas exigidas, así como también el uso de los recursos existentes en las cantidades óptimas.

Por ello, para un buen manejo de los recursos de potencia reactiva, se han utilizado técnicas que van desde el ensayo y error, pasando por análisis de sensibilidades, hasta técnicas de optimización matemática lineal y no lineal.

Las herramientas que se utilicen para optimizar el manejo de la potencia reactiva deben tener en cuenta la operación del sistema y sus restricciones. En casos de

expansión, se deben tener en cuenta también los costos de inversión, pérdidas, combustible y racionamiento.

En la optimización de la utilización de recursos de potencia reactiva se han utilizado técnicas matemáticas muy diversas, siendo esto todavía un área de investigación, donde se requieren algoritmos robustos y altamente eficientes. Entre las técnicas usadas para la solución de este problema con función objetivo y restricciones no lineales, cabe destacar las siguientes:

- Programación lineal
- Programación no lineal
- Algoritmos Genéticos

El problema general de la optimización es definido como:

Minimizar $f(x)$

sujeito a las restricciones:

$g_i(x) \geq 0, \quad i=1, \dots, m$

donde

$x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Donde la función objetivo f , generalmente es la reducción de las pérdidas, o la reducción en el costo de operación.

Las restricciones g_i , están asociadas a los límites de potencia activa y reactiva generada por las máquinas, así como también las tensiones límites aceptables y las condiciones de cargas.

En resumen, las restricciones g_i pueden definirse como:

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}$$

$$Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax}$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{i \max}$$

$$P_i = 0$$

$$Q_i = 0$$

Entre las variables consideradas están la capacidad de las fuentes de potencia reactiva, tensión de generación y valores de taps, teniéndose como límites:

$$Sh_{imin} \leq Sh_i \leq Sh_{imax}$$

$$Vg_{imin} \leq Vg_i \leq Vg_{imax}$$

$$Tap_{imin} \leq Tap_i \leq Tap_{imax}$$

Por lo que la solución de un flujo de potencia óptimo presenta infinitas soluciones, estando entre los principales problemas de la optimización convencional la convergencia a una solución local, ya que los flujos óptimos no son un problema matemático convexo, tienden a converger a un punto óptimo local, más no siempre al óptimo global.

El segundo problema es la aplicación de variables enteras, muchas variables de control (posición de taps de transformadores, bancos de compensadores/reactores) son valores enteros, por lo que se hace difícil la asignación de resultados directamente con las metodologías tradicionales.

Generalmente el planteamiento del problema se puede distinguir entre una formulación acoplada y una

desacoplada que descompone el problema en dos subproblemas; uno de potencia activa (P-q) y otro de secuencia de potencia reactiva (Q-V). Esta última formulación, considerando únicamente el problema (Q-V) es la tendencia más generalizada.

En la solución de este subproblema (Q-V) se han utilizado las mas diversas técnicas, que van desde aquellas que linealizan el programa iterando con un flujo de carga permitiendo aplicar programación lineal cuando la función objetivo se ha linealizado (Hobson_[1], Mamandur_[2], Qiu_[3]), o aquellas que linealizan las restricciones y mantienen la función objetivo no lineal (Shoults_[4], Burchett_[5], Sasson_[6]).

3.2 Algoritmos disponibles

3.2.1 Programación Lineal:

La aplicación de programación lineal se fundamenta en suponer que para pequeños cambios, la relación entre la tensión y la potencia reactiva es lineal tal como se considera en el flujo de carga desacoplado rápido.

La metodología utilizada por J.Qui y S.M.Shahidehpour_[3] tiene como objetivo minimizar las pérdidas controlando la tensión en barras, ajustes de taps y ajustes en fuentes de potencia reactiva utilizando para ello la programación lineal en forma sucesiva; este método utiliza pasos discretos entre iteraciones. El método usado no requiere de la inversión de la matriz

jacobiana, utilizando para ello sólo partes modificadas de ésta, por tanto este método es eficiente en tiempo de ejecución y requerimientos de memoria, pudiéndose aplicar así a sistemas de potencia de mayor magnitud.

El trabajo realizado por Mamandur y Chenoweth_[2], tiene como objetivo la minimización de pérdidas y el mejoramiento del perfil de tensiones utilizando sensibilidades de las variables de control respecto a las pérdidas, para ello utiliza la matriz jacobiana parcial y el uso de la programación lineal dual sucesivamente.

Entre los problemas encontrados en este trabajo se encuentra la inversión de la matriz jacobiana para el cálculo de las sensibilidades, teniendo así mayores requerimientos de memoria y tiempo de ejecución para sistemas grandes.

La formulación matemática en la aplicación de la programación lineal en la optimización de la potencia reactiva se detalla en el anexo C.1.

3.2.2 Programación no lineal

Un método desarrollado es el del gradiente reducido, el cual utiliza las características de desacoplamiento entre la potencia activa y reactiva en sistemas eléctricos (matrices B' y B''), tanto en el cálculo del flujo de potencia como en el cálculo de los multiplicadores de Lagrange, resultando por ello un método atractivo desde el punto de vista de requerimiento

de memoria de computador y tiempo de cálculo.

El cálculo de los multiplicadores de lagrange es un proceso iterativo con las mismas características del método del desacoplado rápido, por lo que su implementación y cálculo se hace sencillo de programar.

La formulación matemática en la aplicación de la programación no lineal en la optimización de la potencia reactiva se detalla en el anexo C.2.

3.2.3 Algoritmos Genéticos

Este método se aparta de las teorías matemáticas convencionales, siendo netamente probabilístico, basado en la teoría de la evolución de Darwin adicionándole conceptos de sobrevivencia de los individuos con mas aptitud o más aptos, los cuales tienen mayor probabilidad de reproducirse en la siguiente generación.

Entre las ventajas de éste método se encuentran la simplicidad de la programación, no uso de matemáticas convencionales, no necesidad de uso de matrices, poderoso concepto de optimización global, múltiples rutas de búsqueda y la utilización de variables de control enteras.

Entre sus desventajas está el elevado tiempo de cálculo, dado que para la búsqueda de un óptimo global se debe tener en cuenta un alto número de generaciones y un moderado número de individuos en la población.

Kenji Iba_[7] desarrolló un nuevo método basado en la

teoría de los algoritmo genéticos teniendo como variables o genes de cada sistema que conforman cada generación los variables de control del sistema de potencia.

Entre las virtudes de éste método está el uso de evaluaciones de aptitud de los sistemas mediante combinaciones de varias funciones objetivos y manipulaciones en los genes o variables de control dependiendo de criterios usados para la optimización.

Representación de soluciones candidatas

Una solución candidata, llámese "cromosoma" para la aplicación de los algoritmos genéticos, es representada como una cadena de longitud finita. Para la optimización de la potencia reactiva se representa la solución candidata mediante una cadena de valores conteniendo un estado de las variables de control (tensiones de generación, shunts y taps de transformadores).

Los valores en la cadena son numeros enteros por lo que se debe realizar la conversión entre ellos, por esta razón que el tamaño de la cadena es dado por la cantidad de variables de control considerados.

Función de Evaluación.

La función de evaluación evalúa la aptitud de un cromosoma, dicha función de evaluación es maximizada durante la búsqueda de la solución óptima global. En la implementación de la función objetivo se utiliza las pérdidas activas, las tensiones y la potencia reactiva

generada fuera de los límites permitidos.

Dado que en la metodología de los Algoritmos Genéticos se maximiza la función de aptitud, se utiliza la inversa de dicha función, con el fin de minimizar las pérdidas, las tensiones en barras como también las potencia de generadores fuera de límites.

CAPITULO IV IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

En el presente trabajo se ha implementado un programa computacional interactivo y gráfico el cual tiene la facultad de dibujar y editar diagramas unifilares convencionales de sistemas eléctricos, efectuar el cálculo de flujos de potencia y optimización de la potencia reactiva mediante algoritmos genéticos de una manera directa e interactiva, aprovechando las facilidades que brinda el entorno Windows.

Fundamentalmente se desarrolla una metodología basada en la optimización de las fuentes de potencia reactiva, con el mejoramiento de los perfiles de tensiones, consideración de límites de potencia reactiva en generadores y minimización de pérdidas activas en el sistema eléctrico de potencia.

4.1 Características generales del programa

Entre las características del programa desarrollado se encuentran :

- Uso de menus interactivos para manejo de archivos, edición de datos, ejecución, visualización e impresión de resultados, entre otros.
- Uso de barra de herramientas para creación y edición de

datos, cálculos, impresión y manejo de archivos.

- Cálculo del flujo de potencia, mediante el método de Newton-Raphson completo.
- Cálculo de factores de penalización.
- Simulación de contingencias considerando desconexión de elementos del sistema.
- Reconocimiento y cálculos por sistemas aislados.
- Generación de reportes típicos para barras, flujos en enlaces, generadores, tensiones fuera de límites, etc.
- Impresión total o parcial del diagrama con las facilidades que ofrece Windows (presentación preliminar, ajustes sobre cualquier dimensión de papel, tipos de impresora, etc.).
- Optimización de la asignación de potencia reactiva mediante algoritmos genéticos.
- Integramente desarrollado en C++.

El programa puede considerar como variables de estado y control para la optimización, las magnitudes de voltajes en barras de generación, los taps de los transformadores y magnitud de potencia en shunts.

4.2 Metodología desarrollada:

La optimización mediante algoritmos genéticos se basó en la metodología desarrollada por Kenji Iba^[7], la cual tiene los siguientes definiciones y conceptos:

4.2.1 Variables de Control

La reubicación de la potencia reactiva en el sistema

de potencia logra una mejora significativa en las magnitudes de voltaje en las barras del sistema, así como también la minimización de las pérdidas y las condiciones de operación de los generadores, para ello se deben tener en cuenta todos aquellos elementos que pueden influir en la generación y flujo de potencia reactiva a los cuales se les denomina variables de control.

Las variables de control considerados para el despacho de potencia reactiva identificados son:

1. Tensiones de generación.
2. Bancos de capacitores y reactores.
3. Taps de transformadores.

La teoría original de los algoritmos genéticos se basa en la descomposición de las variables en bits 1/0, el presente trabajo utiliza las variables como números enteros, teniéndose rangos máximos y mínimos para cada una de ellas.

A. Tensiones de generación

Considera las tensiones máximas y mínimas de generación, la tensión de generación del flujo base y el paso entre uno y otro valor en por unidad.

$$\max_i = (VG_{i\max_{pu}} - VG_{ipu}) / \text{paso}_{pu}$$

$$\min_i = (VG_{i\min_{pu}} - VG_{ipu}) / \text{paso}_{pu}$$

$$\text{VAR}_i : [\min_i \dots \max_i]$$

La tensión de generación en por unidad aplicada será:

$$VG_{ipu}' = VG_{ipu} + \text{VAR}_i * \text{paso}_{pu}$$

B. Banco de capacitores/reactores

Considera la capacidad máxima y mínima de potencia reactiva factible de entregar a través de los bancos de los capacitores/reactores, el valor del shunt del flujo base y el tamaño de los bancos.

$$\max_i = (SH_{i\max} - SH_i) / BANCO_i$$

$$\min_i = (SH_{i\min} - SH_i) / BANCO_i$$

$$VAR_i : [\min_i \dots \max_i]$$

La potencia reactiva entregada por el shunt será:

$$SH_i' = SH_i + VAR_i * BANCO_i$$

C. Taps de los transformadores

Considera el valor máximo y mínimo del tap, el valor del tap del flujo base y el paso entre uno y otro estado en por unidad.

$$\max_i = (TAP_{i\max_{pu}} - TAP_{ipu}) / paso_{pu}$$

$$\min_i = (TAP_{i\min_{pu}} - TAP_{ipu}) / paso_{pu}$$

$$VAR_i : [\min_i \dots \max_i]$$

El valor de tap aplicado será:

$$TAP_{ipu}' = TAP_{ipu} + VAR_i * paso_{pu}$$

La representación de cada flujo de potencia en el presente trabajo se logra mediante la utilización de cadenas o vectores X:

$$X = [VAR_1, VAR_2, VAR_3, \dots, VAR_{Ncont}]$$

$$VAR_i : [\min_i \dots \max_i]$$

La combinación de todos los valores permitidos en cada una de las variables de control da la totalidad de flujos de potencia que podrían analizarse, los cuales son:

$$\prod_{i=1} (VAR_i^{max} - VAR_i^{min} + 1)$$

No siendo todos ellos factibles, resultando casos no convergentes, siendo así la búsqueda del flujo óptimo global tediosa, dada la gran cantidad de casos que pueden ser analizados.

Con la utilización de los algoritmos genéticos se busca el óptimo global, para ello se trata de combinar bloques de variables de control entre flujos de potencia de la misma generación con el fin de que la siguiente generación se vea favorecida por los mejores paquetes de variables, así como también la operación genética de mutación tratando así de simular la búsqueda en otros óptimos locales.

4.2.2 División por subsistemas

El sistema de potencia base puede dividirse manualmente en subsistemas considerando la topología de la red, de esta forma pueden identificarse las variables de control que pertenecen a cada subsistema y la influencia que éste puede tener sobre los perfiles de tensiones, los aportes de potencia reactiva en generadores y las pérdidas del subsistema.

La división del sistema de potencia por subsistemas, tiene como fin el intercambio de paquetes de variables de

control por subsistemas entre los sistemas de potencia de una misma generación, no implicando la definición de islas o sistemas aislados, por lo que el cálculo del flujo de potencia se aplicará al total del sistema.

Cada subsistema tendrá una evaluación independiente sobre las tensiones y potencia reactiva generada fuera de límites. Esta división tiene como fin la simulación de herencia de genes entre individuos, por lo que la siguiente generación tendrá paquetes enteros de genes provenientes de los individuos con mayor aptitud o los mejores calificados.

4.2.3 Evaluación de los sistemas de potencia

La división por subsistemas permite la evaluación de partes del sistema de potencia para el intercambio por conjuntos de las variables de control.

Para la evaluación de los subsistemas, se realizan dos consideraciones :

1. Tensiones fuera de límites
2. Potencia reactiva generada fuera de límites

Cada una de ellas tiene un valor de penalización asociado, los cuales son definidos según el énfasis aplicado en el estudio.

$$f_{\text{subsistema}}(x) = P1 * \sum_{i=1}^n (Vi_{pm} - ViLim_{pm})^2 + P2 * \sum_{i=1}^{mK} (Qgi_{pm} - QgiLim_{pm})^2$$

donde

P1 penalización a tensiones fuera de límites.

P2 : penalización a potencia reactiva generada fuera de límites.

Finalmente la evaluación del sistema de potencia será:

$$F(x) = \text{Perdidas}_{pu} + \sum_{i=1}^{n.\text{subsistemas}} f_i(x)$$

Para la representación de la Función de Aptitud se considera la inversa de la evaluación, esto con el fin de que los subsistemas con mejor evaluación, es decir con menor grado de tensiones fuera de límites o menor grado de potencias reactivas generadas fuera de límites, tendrá mayor posibilidades de copiar sus variables de control en la siguiente generación.

Esto simula la aptitud de individuos de una generación para poder reproducirse, con lo cual los individuos mejores calificados tendrán mayor probabilidad de reproducción y dejar así sus genes en los individuos de la siguiente generación.

4.2.4 Primera generación

La primera generación de sistemas de potencia, es creada de la siguiente manera:

El primer sistema se genera asignando a las variables de control valor cero, buscando con ello incorporar el sistema de potencia base en la primera generación. También se logra partir de una evaluación inicial conocida, ya que los siguientes sistemas generados podrían tener una evaluación alta.

Las variables de control de los siguientes sistemas de potencia son generados aleatoriamente. Debido a que no todos los sistemas de potencia generados son

convergentes, sólo los sistemas que logran la convergencia se incorporarán a esta generación.

Paralelamente a la incorporación del sistema de potencia se realiza el cálculo de las evaluaciones de los subsistemas y de las pérdidas activas para su respectiva consideración en la reproducción.

La generación de valores aleatorios por cada variable de control se realiza mediante la siguiente formula:

$$VAR_i = INT[random(VAR_i^{max} - VAR_i^{min} + 1)] + VAR_i^{min}$$

donde: INT():retorna el valor entero más cercano de un número.

Random():retorna un valor aleatorio decimal entre 0 y 1.

Se tiene una mayor dificultad en la creación de la primera generación a medida que las variables de control se incrementan, esto se da generalmente en sistemas de potencia con un alto número de barras, siendo la causa principal la no convergencia.

Las variables de control con un amplio rango de valores producen también problemas en la convergencia, pero cabe resaltar que éstas dificultades son mayormente en las primeras generaciones dado a que en las siguientes el intercambio de los valores de las variables de control por subsistemas facilita la convergencia.

4.2.5 Operaciones Genéticas

Entre las operaciones genéticas implementadas se encuentran la sobrevivencia de los individuos con mejor evaluación o aptitud, reproducción entre individuos,

manipulación de los genes para mejorar la aptitud de los individuos y la mutación de sus genes.

A. Sistemas sobrevivientes

Esta técnica llamada "elitismo" se basa en la sobrevivencia de los sistemas con mejor aptitud, con el objetivo de la conservación de individuos hasta que existan sistemas que puedan superar su aptitud, conservando así la información de variables de control sin alteraciones en las siguientes generaciones, logrando que puedan reproducirse y aportar sus valores de las variables de control a otros sistemas de generaciones futuras.

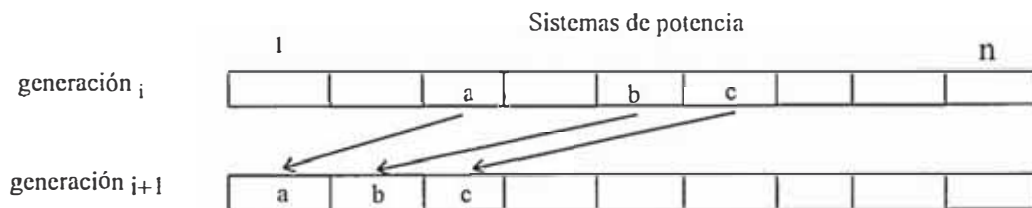


Figura No 4.a

Sobrevivencia de sistemas con mejores evaluaciones (a,b y c) de la generación_i a la generación_{i+1}.

B. Cruce/intercambio entre sistemas

La intención de ésta operación genética es la simulación de reproducción sexual entre individuos con el fin de procrear la siguiente generación con individuos más aptos. Para ello se debe tomar en cuenta la aptitud de todos los individuos de la presente población y realizar un torneo, en donde los individuos con mayor aptitud serán los que tengan mayor probabilidad de reproducción.

La creación de cada sistema se realiza considerando la transferencia de variables de control por subsistemas, por lo que para la creación de un sistema se debe repetir los siguientes pasos a cuantos subsistemas existan :

1. Selección de función

Seleccionar aleatoriamente la función de reducción de tensiones fuera de límites o reducción de potencia reactiva generada fuera de límites. En el caso de que las dos funciones tengan penalizaciones nulas, se seleccionará la función de reducción de pérdidas activas.

2. Torneo

Seleccionada la función a minimizar, se deberá elaborar una ruleta en la que cada subsistema tiene asignada una fracción proporcional al valor de la inversa de sus evaluación o su equivalente función de aptitud. En dicho torneo resultaran ganadores aquellos que tengan valores de aptitud más altos.

3. Traspasso de variables de control

Una vez seleccionado el subsistema ganador, se deberá copiar todos los valores de sus variables de control en proceso al subsistema en creación.

Culminado el proceso de creación del sistema completo se deberá ejecutar el flujo de potencia y realizar el cálculo de su aptitud, de encontrarse sistemas no convergentes se procederá a su respectiva eliminación.

En los casos donde las penalizaciones a las tensiones

y potencia reactiva generada fuera de límites son despreciables en relación a las pérdidas, se recomienda tener una población con un moderado número de individuos dado que las pérdidas entre sistemas no difieren mucho, pudiéndose seleccionar cualquier sistema como el mas apto.

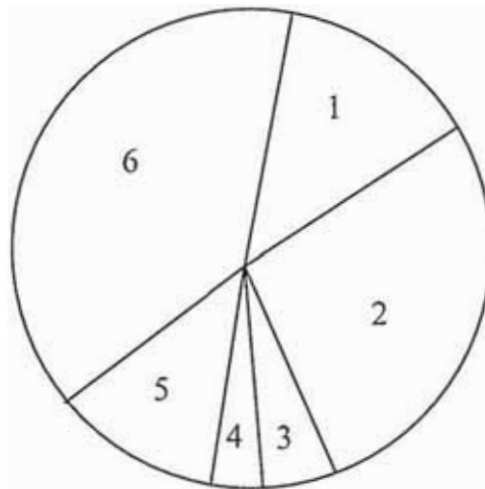


Figura No 4b

Ruleta de selección con valores de aptitud de subsistemas

C. Manipulación y mutación

Esta operación genética tiene como base la manipulación artificial de los genes de los individuos para mejorar la raza o la alteración de los genes aleatoriamente buscando encontrar individuos con mejores aptitudes.

Este proceso tiene su aplicación en la alteración de las variables de control para mejorar la calificación de los sistemas de potencia, que son básicamente procedimientos intuitivos.

Las manipulaciones implementadas son:

1. Manipulación en bancos de capacitores y reactores.
2. Manipulación de tensiones en generadores.
3. Manipulación de taps en transformadores.
4. Mutación de las variables de control.
5. Ninguna acción.

Sólo una de estas manipulaciones será realizada para todas las variables de control de cada individuo y la elección de ésta será aleatoria.

La aplicación de estos procedimientos tendrá como criterio los porcentajes de manipulación y mutación definidas, implicando que sólo a unas variables de control serán aplicados dichas operaciones genéticas.

Manipulación en bancos de shunts

Si la tensión en la barra es menor al límite inferior permitido se adicionará un banco de capacitores o quitará un banco de reactores, de ser la tensión mayor al límite superior se quitará un banco de capacitores o adicionará un banco de reactores.

Manipulación de tensiones en generadores.

Si la potencia reactiva del generador es mayor al límite superior permitido se reducirá un paso en por unidad la tensión de generación, de ser la potencia reactiva menor al límite inferior, se incrementará la tensión de generación en un paso.

Manipulación de taps en transformadores.

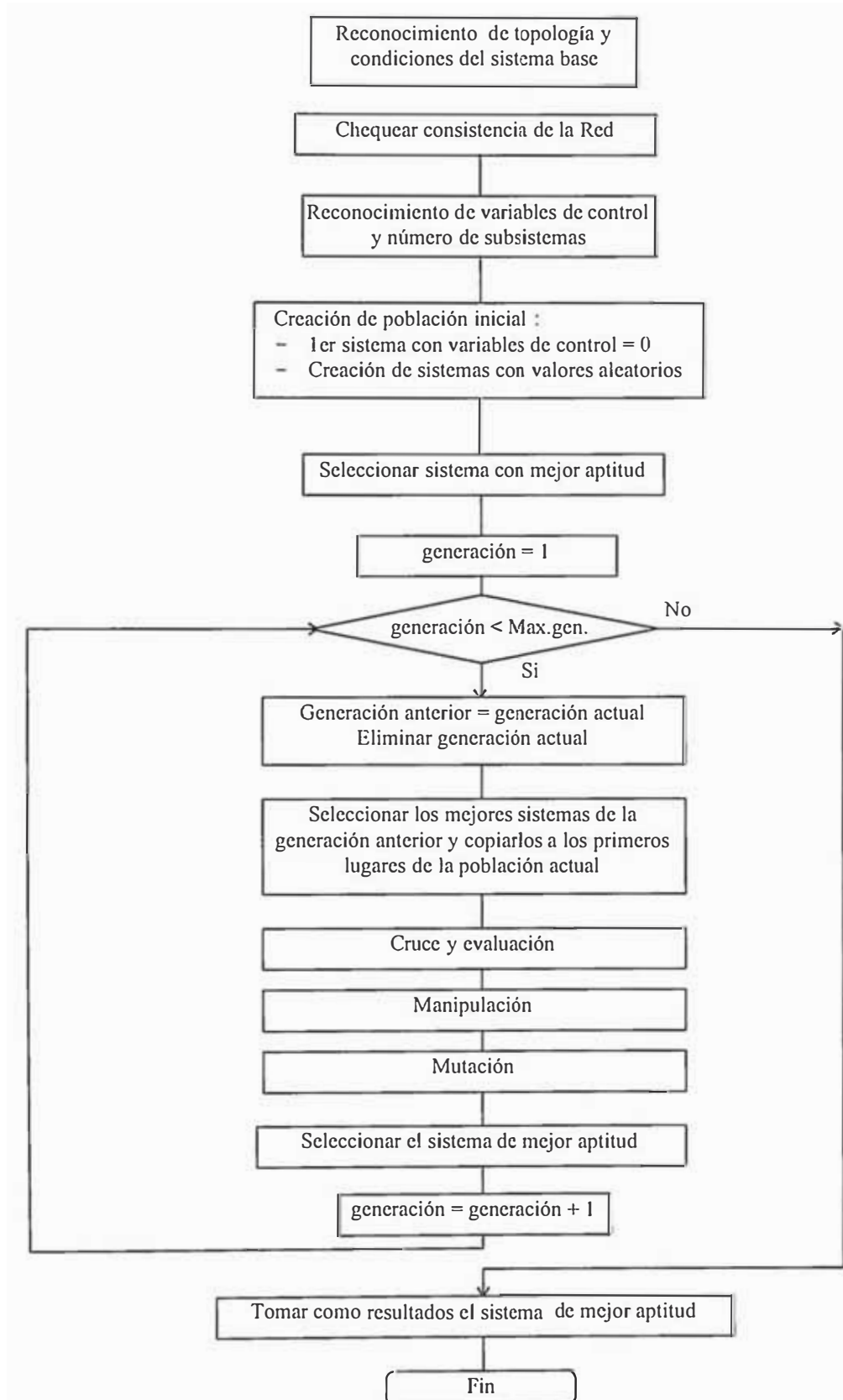
Si la tensión de la barra secundaria es menor al límite inferior permitido se bajará un paso en por unidad el tap del transformador, de ser la tensión mayor al límite superior se incrementará un paso.

Mutación de las variables de control.

La mutación tiene como fundamento la alteración aleatoria de los genes de los individuos teniéndose como objetivo la búsqueda de sistemas o subsistemas con mejores aptitudes, tratando así de encontrar otro optimo local.

El procedimiento de mutación es aplicado después del proceso de cruce/intercambio entre subsistemas.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA DE OPTIMIZACION DE POTENCIA
REACTIVA USANDO ALGORITMOS GENETICOS



CAPITULO V APLICACIÓN A SISTEMAS DE POTENCIA

5.1. SISTEMA WARD-HALE (IEEE - 6 BARRAS)

Este es un sistema de potencia ampliamente conocido, el sistema tiene elementos shunts variables y también posibilidad de controlar taps en transformadores. La solución del flujo de potencia con los datos del caso base muestra que las pérdidas de potencia activa en la transmisión son de 11,62 MW lo que representa el 7,92% de la potencia total de generación.

Para el presente análisis se utilizaron los parámetros de optimización mostrados en el cuadro 5a. De la Figura 5b se observa que la convergencia se logró mayormente antes de las 30 generaciones, más no así el quinto caso, el cual ejecutó cerca de 50 para converger.

Caso	1	2	3	4	5
Población	10	10	20	10	10
Generaciones	50	50	50	100	100
% Mutación	10	10	10	10	10
% Manipulación	70	70	70	70	70
Penalización en V	10	10	10	10	10
Penalización en Qg	5	5	5	5	5
Variables por subsistema	SI	SI	SI	SI	SI

Cuadro 5^a

Casos ejecutados - Sistema IEEE-6 Barras

Caso	Perdidas (p.u.)	Aptitud Total (p.u.)	Reducción	
			Perdidas (%)	Aptitud (%)
Base	0.11617	0.13619	-	-
1	0.08812	0.08868	24.15	34.88
2	0.08897	0.08898	23.41	34.67
3	0.08848	0.08864	23.83	34.91
4	0.08851	0.08890	23.81	34.72
5	0.08774	0.08820	24.47	35.24

Cuadro 5b

Pérdidas y Aptitud - Sistema IEEE-6 Barras

CASO	1	2	3	4	5
Tensión de Generación (kV)					
B1	11	10.9	11	11	11
B2	11.4	11.4	11.5	11.3	11.4
Shunt (MVAR)					
B4	4.5	5.5	2.5	5.5	5.5
B6	5	5	4.5	4.5	4
Tap de trafos(%)					
B4-B3	1	-1	-1	-1	-1
B6-B5	-3.5	-1.5	-2.5	-0.5	-2.5
Casos ejecutados					
Fallidos	0	0	0	0	0
Exitosos	602	616	1485	1189	1243

Cuadro 5c

Variables de control resultantes - Sistema IEEE-6 Barras

Barra	1	2	3	4	5
B1	1,100	1,090	1,100	1,100	1,100
B2	1,140	1,140	1,150	1,130	1,140
B3	0,981	0,994	0,998	0,998	0,999
B4	1,008	1,001	1,004	1,006	1,007
B5	0,995	0,977	0,992	0,970	0,986
B6	0,998	0,985	0,990	0,990	0,988

Cuadro 5d

Tensiones resultantes - Sistema IEEE-6 Barras

La reducción máxima de pérdidas y de aptitud la logró el quinto caso, siendo estos del 24,47% y del 35,24% respectivamente.

Las soluciones difieren, debido a que este método depende de los valores generados aleatoriamente en la población inicial y de los parámetros de optimización utilizados, mas cabe anotar que son soluciones alternativas, de las cuales se debe tomar como decisión la elección de la más conveniente, según sea el objetivo del estudio.

5.2 Sistema Interconectado Centro-Norte (SICN)

El Sistema Interconectado Centro Norte peruano está constituido por una red troncal de líneas de transmisión en 220 kV que opera en forma anillada en el area comprendida entre el Complejo Hidroeléctrico Mantaro- Restitución y Lima metropolitana, y en forma radial por el Sur hasta Marcona y por el Norte hasta Piura,

enlazando así diversas centrales y subestaciones que permiten la transmisión de energía a diversas zonas del país.

La ubicación dispersa de la generación en el norte y sur, así como las características propias de las líneas largas traen consigo diversos problemas de regulación de voltaje en horas de máxima y mínima demanda y que tienen incidencia sobre la capacidad de transmisión y las pérdidas.

El sistema tiene cuatro compensadores estáticos, dos ubicados en el área de Lima (Balnearios y Chavarría), mientras que los dos restantes se ubican en la zona Norte (Trujillo y Chiclayo); los sistemas de compensación por medio de capacitores y reactores fijos se encuentran ubicados en las Subestaciones de Piura, Guadalupe, Chimbote, Paramonga, Independencia, San Juan y Marcona; además se tiene también dos compensadores sincrónicos ubicados en el área del Centro, uno en Independencia y el otro en Marcona. Dicha compensación proporciona la potencia reactiva necesaria para tener un adecuado perfil de tensiones en el sistema.

La red del Sistema Interconectado Centro Norte (SICN) utilizada, corresponde al año 1997 para la condición de máxima demanda. Dicho sistema está conformado por 58 barras, 13 generadores, 65 líneas, 16 transformadores de 2 devanados, 3 transformadores de 3 devanados y 3

compensadores estáticos, la potencia total generada es de 1679 MW y la estimación de la carga total es de 1571 MW.

Parámetros de optimización aplicados

Para la aplicación de la optimización de la potencia reactiva en el Sistema Interconectado Centro Norte se aplicaron las constantes de optimización mostrados en el Cuadro 5e, teniendo consideraciones las siguientes:

- Límites de tensión en cargas aplicados: 0,92 y 1,05 pu.
- Los casos 1 y 4 intentan analizar el caso con una población de 20 sistemas y 100 generaciones.
- El caso 2 intenta analizar la situación de los casos 1 y 4, pero ignorando la penalización en las tensiones fuera de límites, dándole mayor énfasis en la reducción de pérdidas.
- El caso 3 intenta analizar el caso 2, pero ignorando además la penalización en las potencias reactivas generadas fuera de límites. Éste caso es interesante por el énfasis exclusivo que se le da en la reducción de las pérdidas, ignorando con ello toda restricción del sistema.
- El caso 5 considera una penalización en las tensiones fuera de límites del 50% respecto a los casos 1 y 4, con el fin de penalizar en igual magnitud a la potencia reactiva generada fuera de límites como a las tensiones fuera de límites.

Caso	1	2	3	4	5
Población	20	20	20	20	20
Generaciones	100	100	100	100	100
% Mutación	10	10	10	10	10
% Manipulación	80	80	80	80	80
Penalización en V	100	0	0	100	50
Penalización en Qg	50	50	0	50	50
Variables por subsistema	SI	SI	SI	SI	SI

Cuadro 5e

Casos ejecutados - SICN

Resultados obtenidos

1. El caso base presenta 107,99 MW de pérdidas, lo que corresponde el 6,43% de la potencia total generada, se presentan las 3 barras con tensiones fuera de límites, siendo la más alta RESTI200 con 1,057 pu.
2. El caso 2 obtuvo 11 barras con tensiones fuera de límites, siendo la mas alta RESTI220 con 1,113 pu, mientras que la más baja CHIM13 con 0,918 pu y pérdidas de 103,7 MW , lo que significa una reducción del 3,97%.
3. En el caso 3 se obtuvieron 32 barras con tensiones fuera de límites, siendo la más alta MARC220 con 1,15 pu, mientras que la mas baja SJNLS220 con 1,054 pu y pérdidas de 101,4 MW lo que significa una reducción del 6,12%.
4. En los casos 1, 4 y 5 no se obtuvieron barras con tensiones fuera de límites, presentándose reducciones de pérdidas de 0,97% como promedio.

Caso	Perdidas (p.u.)	Aptitud Total (p.u.)	Reducción	
			Perdidas (%)	Aptitud (%)
Base	1.07999	1.08640	-	-
1	1.07037	1.07037	0.89	1.48
2	1.03711	1.07037	3.97	1.48
3	1.01390	1.01390	6.12	6.67
4	1.06946	1.06946	0.98	1.56
5	1.06889	1.06893	1.03	1.61

Cuadro 5f

Pérdidas y Aptitud - SICN

Caso	Fallidos	Exitosos	Total
1	-	2.499	2.499
2	-	2.395	2.395
3	1	2.312	2.313
4	-	2.353	2.353
5	-	2.424	2.424
Promedio			2.397

Cuadro 5g

Flujos de potencia ejecutados - SICN

Observaciones

- Se aprecia que el objetivo en la optimización de la potencia reactiva no debe ser la minimización de pérdidas, sino la combinación de ésta y el mejoramiento del perfil de tensiones del sistema.
- Los flujos de potencia ejecutados por cada caso fueron 2.400 como promedio, el cual es una cantidad considerablemente alta, pero insignificante si se considera el total de casos posibles de ejecutar. Dicho

promedio pudo haberse reducido en los casos 1 y 5 en un 50% de sólo considerarse como máximo 50 generaciones, pero no así en el caso 4 ya que este obtuvo su convergencia aproximadamente en la generación 85.

- En la red utilizada los generadores y taps tienen un rango de 0,90 a 1,1 pu con pasos de 0,01 pu; dado que la red considera 16 generadores y 4 transformadores con taps variables, el total de combinaciones o sistemas posibles asciende a 20^{20} , o su equivalente de 104.857.600.000.000.000.000.000.000
- Debe notarse la cantidad casi nula de casos fallidos o flujos de potencia no convergentes, lo que denota que el sistema es altamente dinámico; por esta razón la búsqueda del óptimo global puede volverse muy complejo de no contar con una herramienta de optimización.

FIGURA 5.A

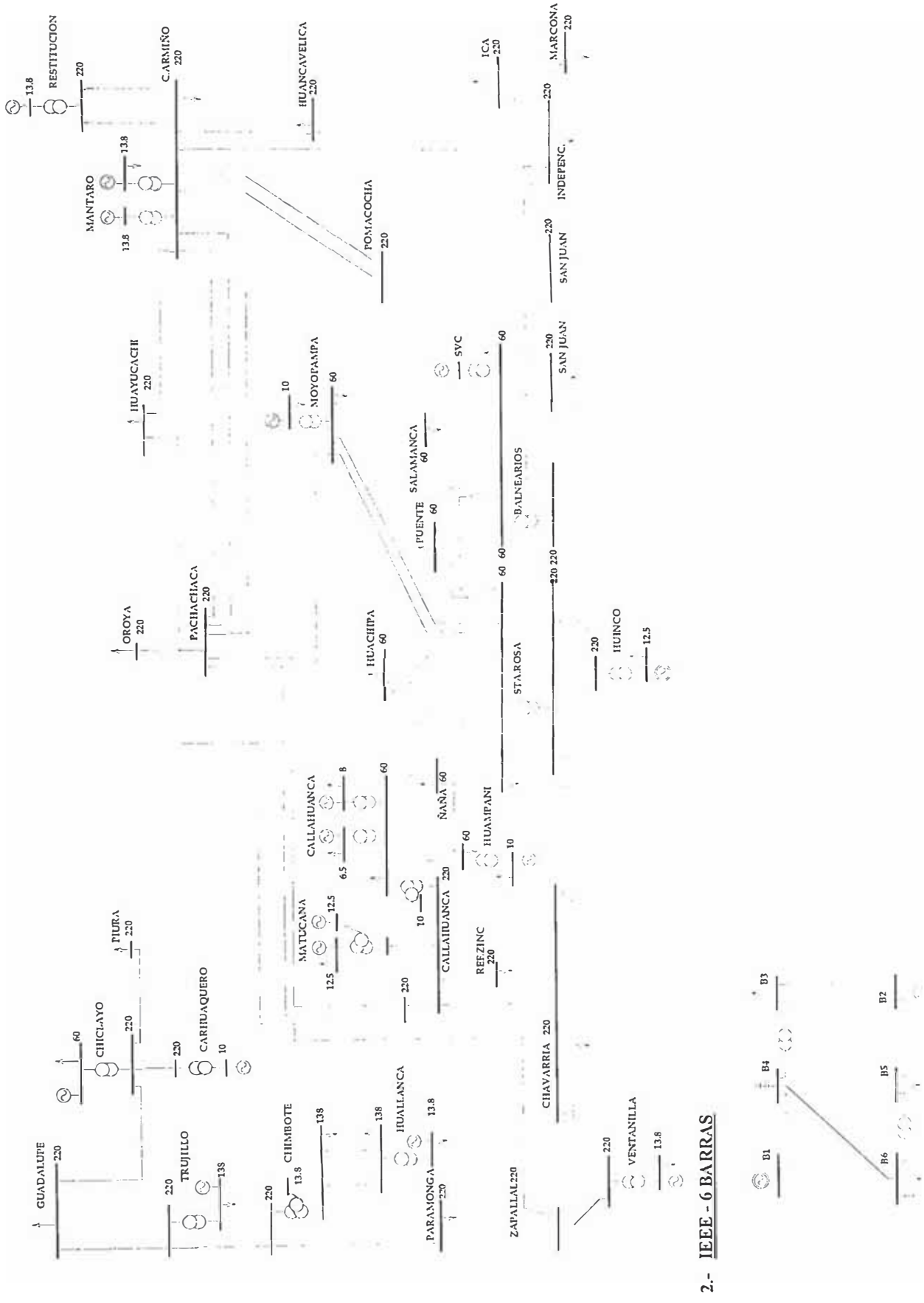


Grafico 5a
IEEE 6 Barras - Evolución de la aptitud

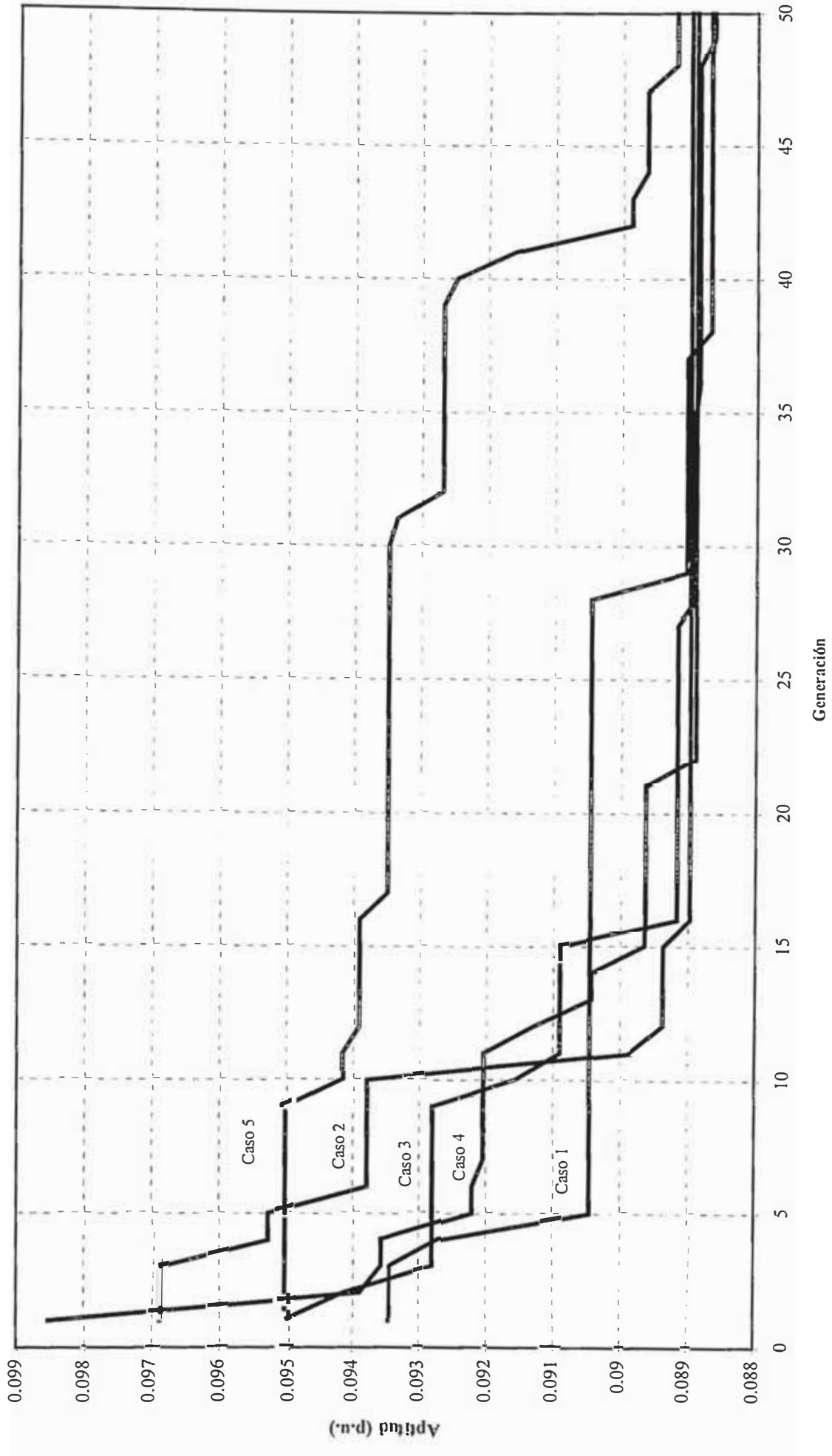
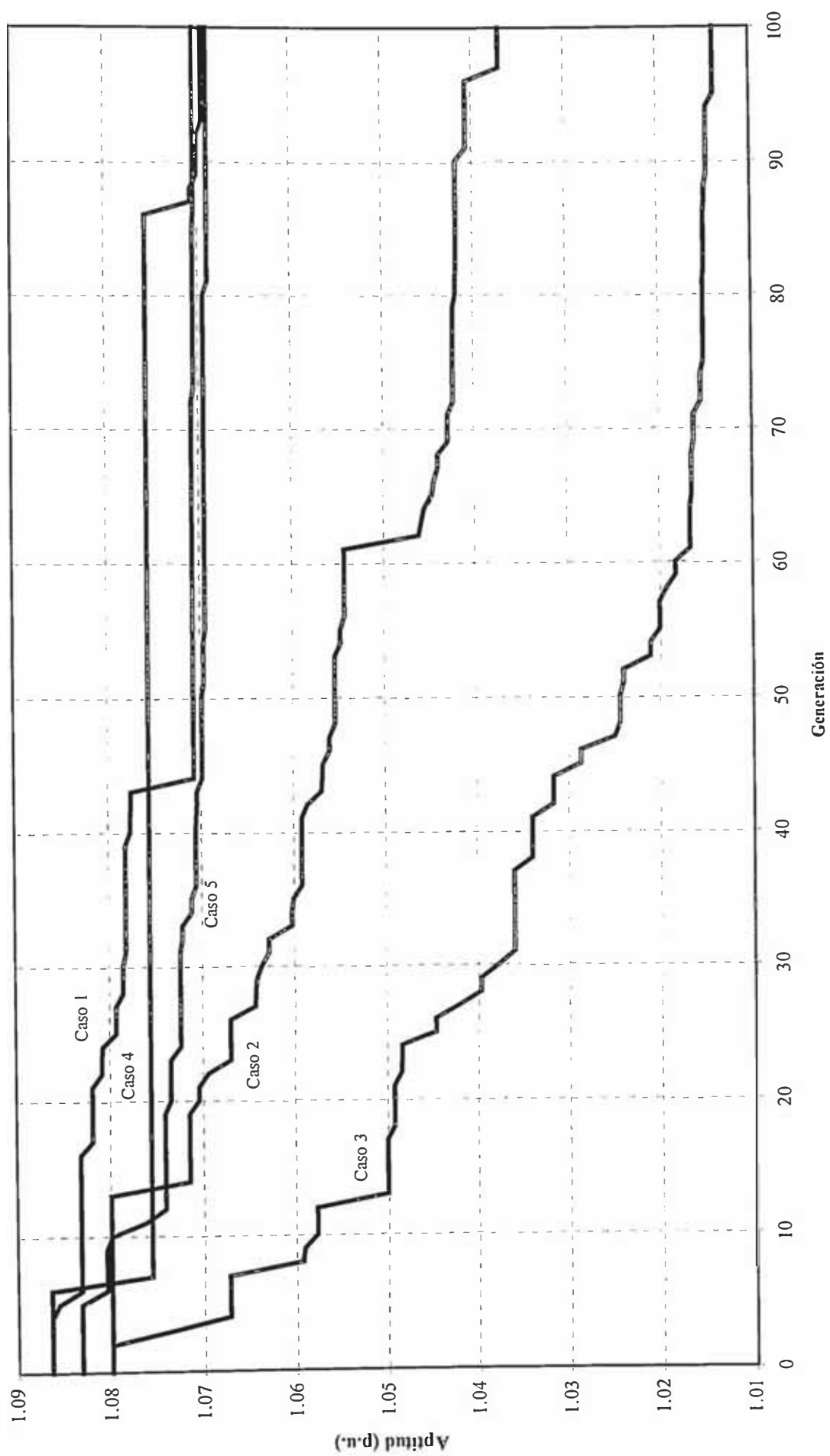


Grafico 5b
SICN - Evolución de la aptitud



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una herramienta computacional eficaz, versátil y hecha a la necesidad del especialista en análisis de sistemas de potencia. Mediante dicha herramienta se logra reducir el tiempo que normalmente se debe invertir en la búsqueda de sistemas de potencia óptimos en base a la experiencia de prueba y error.

Se ha demostrado la facilidad de la implementación de los algoritmos genéticos en la solución de problemas de optimización, así como también la eficacia en los resultados. Tales algoritmos pueden considerarse alternativos para distintas aplicaciones a sistemas eléctricos de potencia.

Con relación a las aplicaciones efectuadas en el presente trabajo a la optimización del manejo de la potencia reactiva, se ha demostrado la versatilidad de la función de aptitud. Con lo cual la optimización puede ser adaptado al énfasis que se desea dar al estudio. En los casos analizados, el correspondiente al Sistema Interconectado Centro Norte presentó mayor diversidad en las alternativas de solución, dependiendo de la ponderación relativa que se da al perfil de tensiones o a

las pérdidas en la función de aptitud.

Dentro de los casos analizados para el Sistema Interconectado Centro Norte, en tres alternativas se obtuvieron perfiles de tensiones dentro de los rangos permitidos y una reducción próxima al 1% de pérdidas como promedio. El tiempo necesario para dicha aplicación, en el caso de 100 generaciones con una población de 20 sistemas, fue de aproximadamente 6 minutos para una plataforma PC Pentium 166 Mhz, lo cual es bastante satisfactorio. Cabe resaltar que el avance tecnológico del Hardware en velocidad de computadores está en constante desarrollo, por lo que este tiempo de ejecución es sólo referencial.

Entre las recomendaciones que se pueden hacer para futuros trabajos se tienen:

Ampliar la versatilidad de la función objetivo, pudiéndose considerar los costos de capacitores, como también el de su instalación y montaje. Adicionalmente se podría adicionar penalizaciones a las sobrecargas producidas en las líneas y transformadores del sistema. Variación de los porcentajes de manipulación y mutación entre generaciones, con lo cual se obtendrían inicialmente poblaciones con mayor diversidad de valores en las variables de control, finalizándose con valores estabilizados o con menores probabilidades de variación. Esto puede complementarse con la variación

del tamaño de la población.

Las aplicaciones de algoritmos genéticos a problemas de sistemas de potencia son todavía incipientes, sin embargo se prevé que en los próximos años su desarrollo y difusión sean muy significativos. Se espera que el presente trabajo sea una contribución para su desarrollo y difusión en el Perú.

BIBLIOGRAFIA

1. Hobson: "Network constrained reactive power control using linear programming", IEEE Transactions on power apparatus and systems, May/June 1980.
2. Mammandur y R.D. Chenoweth : "Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profiles and for real power loss minimization", IEEE - Transactions on Power Apparatus and Systems, July 1981.
3. Qui y S.M. Shahidehpour : "A new approach for minimizing power losses and improving voltage profile", IEEE - Transactions on Power Systems, May 1987.
4. R. Shoults y D.Sun: "Optimal power flow based upon P-Q descomposition", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, February 1982.
5. R.C.Burchett, H.Happ, D.Vierath, K.Wirgau: "Developments in optimal power flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, February 1982.
6. Sasson, A.M.: "Nonlinear programming solutions for the load flow, minimum loss and economic dispatching problems", IEEE - Transactions on Power Apparatus and Systems, April 1969.
7. Kenji Iba: "Reactive power optimization by genetic algorithm", IEEE - Transactions on Power Systems, May 1994.
8. Lee y L.G. Pond : "An optimization technique for reactive power planning of subtransmission network under normal operation", IEEE - Transactions on Power Systems, May 1986.
9. Dommel y W.F. Tinney : "Optimal power flow solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, October 1968.

10. Alsac y B. Stott : "Optimal power flow with steady-state security", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, May/June 1974.
11. A.Sasson, F.Aboytes, R.Cardenas, F.Gomez, F.Viloria: "A comparison of power systems static optimization techniques", PICA conference, May 1971.
12. O.A. Bailetti : "Minimizaci3n de p3rdidas en sistemas de potencia usando programaci3n no lineal", COPIMERA VIII, Octubre 1979.
13. P.H.Corredor : "An3lisis de sistemas de Potencia en Estado Estacionario". 1992
14. J.Koza : "Genetic Programming II : Automatic Discovery of Reusable Programs", The MIT. Press, 1992.
15. Holland : "Adaptation in Natural and Artificial Systems" Ann Harbor: University of Michigan Press, 1975.