



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ALGORITMOS GENÉTICOS COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA
DE FLUJO DE POTENCIA**

José Francisco Castro García

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, agosto de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALGORITMOS GENÉTICOS COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE FLUJO
DE POTENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ FRANCISCO CASTRO GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Algoritmos genéticos como solución al problema de flujo de potencia,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 8 de mayo de 2007.

José Francisco Castro García

Guatemala, 10 de julio de 2007.

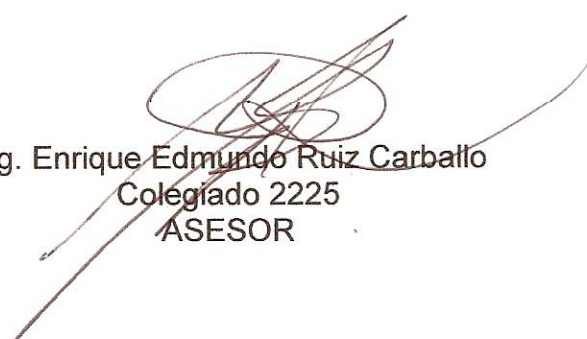
Ingeniero
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **“Algoritmos genéticos como solución al problema de flujo de potencia”**, elaborado por el estudiante **José Francisco Castro García**.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,



Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Colegiado 2225
ASESOR



Guatemala, 25 de julio 2007.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Algoritmos genéticos como solución al problema de flujo de potencia.** desarrollado por el estudiante; José Francisco Castro García, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador Área de Potencia

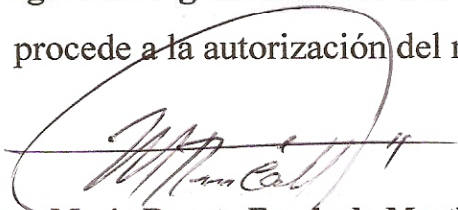
JGBB/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; José Francisco Castro García titulado: **Algoritmos genéticos como solución al problema de flujo de potencia**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Eschebado Martínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 1 DE AGOSTO 2,007.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 268.2007

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ALGORITMOS GENÉTICOS COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA**, presentado por el estudiante universitario **José Francisco Castro García**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto de 2007



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Dios Por todo lo que me ha dado y las maravillas que hará en mí.

Mis padres Francisco de Jesús Castro Palma y Dilia Amparo García de Castro, por el amor, dedicación y apoyo que siempre me han brindado.

Mis hermanos Luis Rodolfo, Digby, Marlon, Guisela, Erika y Conchita, por el apoyo y cariño de siempre.

Mis amigos Por su cariño y amistad sincera.

Mi asesor Por su colaboración en la realización de este trabajo de graduación.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A todos aquellos que, de alguna forma, me han ayudado a lo largo de toda mi vida.

*A Dios, a Él sea la gloria, aunque me
alejé y me olvidé de su existencia, Él
me encontró y me mostró el poder de
su presencia...*

*A mis queridos padres
Francisco de Jesús y Dilia Amparo,
una pareja ejemplar...*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1 EL PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA	1
1.1 Conceptos básicos de potencia.....	2
1.2 Descripción General de un sistema de potencia.....	5
1.2.1 Elementos básicos de un sistema de potencia.....	6
1.2.2 Modelado de elementos de un sistema de potencia.....	7
1.2.3 Cantidades en por unidad.....	11
1.3 Estudio de flujo de potencia.....	13
1.3.1 Datos del problema de flujo de potencia.....	14
1.3.2 Tipos de barras en problemas de flujo de potencia.....	15
1.3.3 Ecuaciones de flujo de potencia.....	16
1.3.4 Objetivo de los estudios de flujo de potencia.....	18
2 ALGORITMOS GENÉTICOS	21
2.1 Historia.....	23
2.2 Introducción a los algoritmos genéticos.....	25
2.3 Estructura de un algoritmo genético.....	27
2.3.1 Codificación de datos en un cromosoma.....	28
2.3.2 Población.....	29
2.3.3 Función de aptitud.....	30

2.3.4	Selección.....	30
2.3.4.1	Selección por ruleta.....	30
2.3.4.2	Selección basada en el rango.....	32
2.3.4.3	Selección por torneo.....	32
2.3.5	Operadores genéticos.....	33
2.3.5.1	Operador cruce.....	33
2.3.5.2	Operador mutación.....	35
2.4	Funcionamiento de un algoritmo genético.....	36

3 ALGORITMOS GENÉTICOS ORIENTADOS A LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FLUJO DE POTENCIA.....41

3.1	Datos del problema.....	43
3.2	Objetivo del algoritmo.....	44
3.3	Diseño de la estructura.....	45
3.3.1	Codificación de datos.....	46
3.3.2	Tamaño de la población.....	47
3.3.3	Diseño de la función de aptitud.....	48
3.3.4	Método de selección.....	50
3.3.5	Diseño de operadores genéticos.....	51
3.3.5.1	Cruce.....	51
3.3.5.2	Mutación.....	53
3.3.6	Ajuste del valor de los genes.....	54
3.3.7	Sustitución de la población.....	56
3.4	Funcionamiento.....	57

4 EJEMPLO DE SOLUCIÓN A UN PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA.....61

4.1	Descripción del problema.....	62
4.2	Diseño del algoritmo genético.....	64

4.3	Ejecución del programa.....	68
4.4	Interpretación de la solución.....	70
CONCLUSIONES.....		73
RECOMENDACIONES.....		77
REFERENCIAS.....		79
BIBLIOGRAFÍA.....		81
APÉNDICE A.....		83
APÉNDICE B.....		93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Símbolos de los principales elementos de un sistema de potencia.....	7
2.	Circuito equivalente del generador síncrono.....	9
3.	Circuito equivalente del transformador.....	10
4.	Circuito equivalente simplificado del transformador.....	10
5.	Circuito equivalente de una línea de transmisión.....	11
6.	Circuito equivalente simplificado de un sistema de potencia.....	14
7.	Cromosomas con genes de tipo binario, entero y real.....	28
8.	Funcionamiento del método de selección por ruleta.....	31
9.	Cruce en un punto.....	33
10.	Cruce en varios puntos.....	34
11.	Cruce uniforme.....	34
12.	Cruce aritmético.....	35
13.	Diagrama de flujo de un algoritmo genético.....	38
14.	Estructura del cromosoma.....	46
15.	Método de cruce.....	52
16.	Diagrama unifilar del sistema de potencia de ejemplo.....	62
17.	Diagrama de flujo del programa.....	67
18.	Gráfica de tolerancia versus generaciones del ejemplo.....	69

TABLAS

I.	Datos de las barras del sistema de potencia.....	63
II.	Datos de las líneas de transmisión.....	63
III.	Datos de los transformadores.....	64
IV.	Información de respuesta de las barras del ejemplo.....	70
V.	Flujo de potencia en las líneas de transmisión.....	71
VI.	Flujo de potencia en los transformadores.....	71

GLOSARIO

Algoritmo	Conjunto ordenado de operaciones bien definidas, que permiten resolver un problema.
Algoritmo genético	Técnica de programación que imita a los procesos que intervienen en la evolución biológica de las especies, como estrategia para resolver problemas de búsqueda y optimización.
Aptitud	Valor numérico asignado a un individuo de una población, el cual indica que tan bien, este individuo resuelve el problema.
Barra	Elemento conductor equipotencial que forma un terminal o punto de conexión entre diversos elementos de un sistema de potencia, como líneas de transmisión, transformadores, generadores, etcétera.
Barra de carga	Tipo de barra en la que únicamente se consume energía eléctrica; en estas barras se especifican como datos de entrada al problema de flujo de potencia, la potencia activa y reactiva que entran al sistema a través ellas.

Barra de compensación	Tipo de barra, única en un problema de flujo de potencia, en la que se especifican como datos de entrada, la magnitud y el ángulo de fase del voltaje.
Barra de voltaje controlado	Tipo de barra a la que se conectan equipos capaces de controlar la magnitud del voltaje y la potencia activa, como generadores síncronos; en estas barras se especifican como datos de entrada, la magnitud del voltaje y la potencia activa que entra al sistema de potencia a través de ellas.
Converger	Aproximarse a un valor numérico.
Cromosoma	Cada uno de ciertos corpúsculos en forma de filamentos que se encuentran en el núcleo de la célula y contienen el ADN. En los algoritmos genéticos, es la estructura que agrupa a todas las variables del problema en un solo elemento, en el cual se codifican las posibles soluciones.
Diagrama unifilar	Diagrama simplificado de un sistema eléctrico, en el cual se indica por una sola línea y por símbolos estándar, cómo se conectan las líneas de transmisión con los aparatos asociados al sistema eléctrico.
Estado estacionario	Régimen de operación de un sistema, en el que no ocurren cambios en las señales de entrada o la configuración del mismo.

Evolución	Proceso continuo de transformación de las especies, a través de cambios producidos en generaciones sucesivas.
Factor de potencia	Relación entre el consumo medio de potencia y la potencia aparente, en una parte de un circuito de corriente alterna; es el resultado del coseno del ángulo, en que la corriente desfasa al voltaje.
Fasor	Término que describe un valor complejo, que representa la combinación del valor eficaz de una magnitud senoidal y su ángulo de fase.
Fenotipo	Es el nivel de adaptación de un organismo con su medio ambiente. En los algoritmos genéticos, es el valor que toma un individuo de acuerdo a su aptitud para resolver el problema.
Gen	Es cada una de las partículas dispuestas en un orden fijo a lo largo del ADN y que, determinan la aparición de los caracteres hereditarios en los organismos. En un algoritmo genético, es cada uno de los elementos del cromosoma que puede tomar un valor numérico.
Generaciones	Serie de etapas en la que los descendientes reemplazan a los progenitores.

Generador	Máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica.
Genotipo	Forma codificada, de una posible solución a un problema, en los genes de un individuo.
Intensidad de corriente	Desplazamiento de cargas eléctricas en un conductor por unidad de tiempo.
Línea de transmisión	Sistema de conductores que permiten la transmisión de energía eléctrica de un lugar a otro.
Método iterativo	Procedimiento que permite resolver un problema, por medio de la repetición de una serie de pasos bien definidos.
Mutación	Cualquiera de las alteraciones producidas en la estructura genética de un organismo. En los algoritmos genéticos, es el cambio en el valor de uno o varios genes de un individuo.
Nodos	Uniones formadas cuando dos o más elementos de circuito se conectan por medio de sus terminales.
Población	Agrupación de individuos con diferentes valores genéticos, en una generación determinada.
Potencia	Es la razón en la que se realiza un trabajo o se convierte energía de una forma a otra.

Potencia activa	Energía que realmente se consume o se convierte de una forma a otra, por unidad de tiempo.
Potencia aparente	Energía total que es suministrada a una carga por unidad de tiempo; es el producto de los valores eficaces del voltaje y la corriente.
Potencia de carga	Energía recibida en un punto del sistema por unidad de tiempo.
Potencia de generación	Energía suministrada en un punto del sistema por unidad de tiempo.
Potencia reactiva	Es la razón en que la energía es almacenada y devuelta por un elemento inductivo o capacitivo.
Reproducción	Acción de producir nuevos seres vivos a través del intercambio genético de los seres progenitores. En un algoritmo genético, es el proceso en el cual se crean nuevos individuos a través del intercambio de información genética de las parejas formadas.
Selección	Competición que se realiza entre los miembros de una especie, con el objetivo de poder llegar a reproducirse. En un algoritmo genético, es el proceso en el cual se escoge a los individuos que integrarán las parejas que van a reproducirse.

Sistema eléctrico de potencia	Conjunto de elementos interconectados que permiten la producción, transporte y consumo de la energía eléctrica.
Transformador	Máquina estática que cambia los niveles de voltaje y corriente, sin alterar considerablemente el valor de la energía transferida.
Valor eficaz	Es aquel valor de corriente alterna que produce los mismos efectos que una corriente continua del mismo valor. Matemáticamente se obtiene calculando la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos que toma la señal durante un período.
Valor por unidad	Relación entre el valor real de una magnitud eléctrica con su valor base.
Voltaje	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito.

RESUMEN

El problema de flujo de potencia consiste en el cálculo, en estado estacionario, de las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras de un sistema de potencia, de acuerdo a un conjunto de datos especificados de potencias y voltajes, para después utilizar estos valores de voltaje encontrados, para calcular la potencia activa y reactiva que entra o sale del sistema de potencia a través de cada barra y también, el flujo de potencia activa y reactiva en todas las líneas de transmisión y transformadores del sistema. La solución del problema de flujo de potencia es básica para la mayoría de los análisis que se realizan en sistemas eléctricos de potencia; esto ha tenido como consecuencia que el esfuerzo que se ha dedicado al desarrollo de métodos de solución sea notable.

Los problemas de flujo de potencia pueden resolverse por medio de algoritmos genéticos, como una alternativa a los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel, que son los que se utilizan normalmente. Los algoritmos genéticos son técnicas de programación que imitan a los procesos de selección, reproducción sexual y mutación que intervienen en evolución biológica de las especies, como estrategia para resolver problemas de búsqueda y optimización.

Los procesos de selección, reproducción y mutación son realizados sobre una población de individuos que representan distintas posibles soluciones al problema, de forma que inicialmente, se tiene una población de posibles soluciones, las cuales van evolucionando durante el algoritmo genético, hasta que se encuentre la solución al problema.

OBJETIVOS

- **General**

Proporcionar las bases para la implementación de algoritmos genéticos capaces de resolver problemas de flujo de potencia, como una alternativa a los métodos iterativos normalmente utilizados.

- **Específicos**

1. Describir el problema de flujo de potencia, así como la información y los modelos utilizados en su planteamiento.
2. Proporcionar información referente a la estructura y funcionamiento de los algoritmos genéticos.
3. Diseñar e implementar un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia.
4. Realizar un ejemplo de solución a un problema de flujo de potencia, por medio de algoritmos genéticos.

INTRODUCCIÓN

La solución de problemas de flujo de potencia es básica en la mayoría de los análisis que se realizan en los sistemas eléctricos de potencia; un problema de flujo de potencia consiste en calcular los valores de voltaje, en estado estacionario, en las barras de un sistema de potencia y a partir de esos valores, calcular los flujos de potencia en las barras, líneas de transmisión y transformadores.

El cálculo de los valores de voltaje en las barras, involucra resolver un sistema de ecuaciones simultáneas no lineales; para esto, normalmente se utilizan los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel; pero estos métodos no son totalmente infalibles, por esta razón, es bueno conocer otras formas de resolver este tipo de problemas.

Este trabajo presenta un método alternativo para resolver problemas de flujo de potencia; este método consiste en aplicar la teoría de los algoritmos genéticos para resolver este tipo de problemas. Los algoritmos genéticos son técnicas de programación que aplican los procesos que intervienen en la evolución biológica como estrategia para resolver problemas de búsqueda y optimización, demostrando el poder de los principios evolutivos.

En el primer capítulo se repasan los conceptos básicos de potencia, se estudian los elementos que componen un sistema de potencia, el modelado de estos elementos y la forma en que se analizan; también se estudian los datos, tipos de barra y ecuaciones utilizadas en el planteamiento del problema de flujo de potencia y el objetivo de éste.

En el segundo capítulo se estudia la teoría de los algoritmos genéticos; se principia con la historia de cómo fue desarrollándose esta teoría; luego se realiza una introducción a los algoritmos genéticos y después, se describe la estructura y el funcionamiento de estos.

En el tercer capítulo se estudia el diseño de algoritmos genéticos enfocados a resolver problemas de flujo de potencia; en este capítulo se indican los datos utilizados para resolver este tipo de problemas y el objetivo de este tipo de algoritmos; describiendo el diseño de la estructura de un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia e indicando su funcionamiento.

Finalmente, en el cuarto capítulo se plantea un problema de flujo de potencia de ejemplo, el cual es resuelto por medio de un algoritmo genético; para esto, se desarrolla en Matlab, un programa capaz de resolver problemas de flujo de potencia, en base a los fundamentos descritos en este trabajo.

1 EL PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA

Los estudios de flujo de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de los sistemas de potencia, así como también, en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. La información que se obtiene de un estudio de flujo de potencia está constituida por la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada nodo, la potencia activa y reactiva que entran o salen del sistema a través de los nodos y las potencias que fluyen en las líneas de transmisión y transformadores.

La solución del problema de flujo de potencia es básica para la mayoría de los análisis que se realizan en sistemas eléctricos de potencia; esto ha tenido como consecuencia que el esfuerzo que se ha dedicado al desarrollo de métodos de solución sea notable, estos métodos se aplican en una variedad de problemas en grandes redes, los cuales están asociados a la planeación, operación y control de sistemas eléctricos de potencia y distribución, donde los flujos de potencia se resuelven para diferentes casos; por ejemplo, en la evaluación de la seguridad, donde se requiere de resolver situaciones ante contingencias, también como auxiliar en estudios de reconfiguración de redes de distribución, localización de capacitores en las mismas o para evaluar las condiciones iniciales en estudios de fallas.

El problema de flujo de potencia puede definirse como el cálculo, en estado estacionario, de las magnitudes de los voltajes nodales junto con sus ángulos de fase y posteriormente, el cálculo de los flujos de potencia a través de cada elemento de la red, bajo la suposición de generación y carga conocidas.

En los cálculos para la solución de problemas de flujo de potencia se ven involucradas funciones no lineales, las cuales no pueden ser resueltas mediante métodos matemáticos directos; antes de la aparición de las computadoras digitales, el problema de flujo de potencia se resolvía en analizadores de redes con muchas limitaciones; al desarrollarse las computadoras digitales, los métodos iterativos de Gauss y Gauss-Seidel resultaron adecuados, ya que el espacio de memoria de computadora que se requiere es mínimo, aunque presentan problemas de convergencia lenta y en varios casos, divergencia.

A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, se demostró que las propiedades de convergencia del método iterativo de Newton-Raphson, son superiores a las propiedades de los métodos iterativos de Gauss, pero este método tiene la desventaja de usar mucha más memoria de computadora. Al final de los años sesenta y principio de los setenta, se estudiaron las propiedades numéricas del Jacobiano, obteniéndose otras versiones del método de Newton-Raphson.

Sin embargo, debido a que estos métodos numéricos no son infalibles al resolver el problema de flujo de potencia, se ha continuado con la búsqueda de alternativas, tratando de lograr algoritmos eficientes y confiables.

1.1 Conceptos básicos de potencia

Potencia es la rapidez con la que se realiza un trabajo o se transfiere energía. Un trabajo se realiza cuando se aplica una fuerza a un objeto y ésta provoca su movimiento. El trabajo se puede expresar como la fuerza aplicada a un objeto por la distancia en que éste es movido y la potencia se puede expresar como el trabajo realizado por unidad de tiempo.

En electricidad, el voltaje es análogo a la fuerza aplicada a un objeto y los electrones son análogos al objeto al que se le aplica la fuerza, de forma que un voltaje puede producir un movimiento de electrones en un material (Intensidad de corriente eléctrica) y la rapidez con la que se realiza éste movimiento de electrones, es lo que se conoce como Potencia Eléctrica. La unidad básica de potencia es el Watt, que equivale a voltaje multiplicado por intensidad de corriente eléctrica y la unidad básica de trabajo o energía es el Joule, que equivale a potencia multiplicada por tiempo.

En corriente alterna senoidal, el voltaje y la corriente se pueden expresar matemáticamente mediante las siguientes expresiones:

$$v(t) = V_{\max} \cdot \cos(w \cdot t) \quad \text{e} \quad i(t) = I_{\max} \cdot \cos(w \cdot t - \theta) \quad [1-1]$$

Donde $v(t)$ e $i(t)$ representan el voltaje y la corriente en función del tiempo, V_{\max} e I_{\max} representan el voltaje y la corriente pico de la onda senoidal, w representa la frecuencia angular de la onda y θ representa el ángulo de fase en que la corriente atrasa al voltaje. Así, la potencia instantánea es la multiplicación del voltaje y la corriente:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \cos(w \cdot t) \cdot \cos(w \cdot t - \theta) \quad [1-2]$$

Al aplicar identidades trigonométricas, esta expresión se transforma en la siguiente:

$$p(t) = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{2} \cdot \cos\theta \cdot (1 + \cos(2 \cdot w \cdot t)) + \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{2} \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}(2 \cdot w \cdot t) \quad [1-3]$$

Se puede observar que esta expresión está compuesta por dos componentes, el primer término tiene un valor promedio de $\frac{1}{2} \cdot V_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \cos\theta$ y se conoce como Potencia Activa, el segundo término tiene un valor promedio de cero y se conoce como Potencia Reactiva; ambos términos de potencia oscilan entre un valor positivo y negativo, pero la Potencia Activa es la única que se consume en una carga.

El cálculo de la potencia también se puede hacer en forma compleja, para esto, se expresa el voltaje y la corriente en forma fasorial. Una onda senoidal de la forma $A \cdot \cos(\omega \cdot t + \Phi)$, se puede expresar en forma fasorial como $(A/\sqrt{2}) \cdot e^{j\Phi}$ o simplemente como $(A/\sqrt{2}) \angle \Phi$. Así, el producto del voltaje expresado en su forma fasorial por la corriente expresada en su forma fasorial conjugada es:

$$V \cdot I^* = |V| \cdot e^{j\alpha} \times |I| \cdot e^{-j\beta} = |V| \cdot |I| \cdot e^{j(\alpha-\beta)} \quad [1-4]$$

Al producto del voltaje por la corriente conjugada, se le conoce como Potencia Compleja o Potencia Aparente y se designa con la letra S; expresada en forma rectangular se obtiene:

$$S = V \cdot I^* = |V| \cdot |I| \cdot \cos(\alpha - \beta) + j \cdot |V| \cdot |I| \cdot \text{sen}(\alpha - \beta) \quad [1-5]$$

Se puede observar en esta expresión, que el primer término es la potencia activa, ya que $\alpha - \beta$ es igual al ángulo θ de las expresiones anteriores, también se observa, que el segundo término es la potencia reactiva multiplicada por j. La potencia activa se designa con la letra P y la potencia reactiva se designa con la letra Q; al coseno del ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente (θ ó $\alpha - \beta$) se le conoce como factor de potencia.

Ya que los inductores y capacitores no consumen energía, toda la potencia se disipa en los elementos resistivos; así, la potencia activa es la que se consume en los elementos resistivos y la potencia reactiva es almacenada y devuelta por los elementos inductivos y capacitivos. Un factor de potencia unitario implica que la carga es puramente resistiva, por lo tanto, el voltaje y la corriente están en fase; un factor de potencia menor que la unidad implica que la carga es tan inductiva o capacitiva como el valor del factor de potencia se acerque a cero. Un factor de potencia en adelanto indica que la corriente se adelanta al voltaje, por lo que se trata de una carga capacitiva; un factor de potencia en atraso indica que la corriente se atrasa al voltaje, por lo que se trata de una carga inductiva.

La potencia aparente o compleja se mide en voltamperios o VA, la potencia activa o real se mide en Watts o W y la potencia reactiva o imaginaria se mide en voltamperios reactivos o VAR. En el trabajo realizado por John Grainger¹ se desarrollan los conceptos de potencia de una forma mas detallada.

1.2 Descripción General de un sistema de potencia

Se le llama sistema eléctrico de potencia, al conjunto de elementos interconectados que permiten la producción, transporte y consumo de la energía eléctrica. Un sistema eléctrico de potencia está formado por tres partes principales, las cuales son: generación, transmisión y distribución. La generación es donde se produce la energía eléctrica, por medio de centrales generadoras; la transmisión está constituida por los elementos interconectados, encargados de transmitir la energía desde los centros de generación a los centros de consumo; finalmente, la distribución está constituida por los elementos encargados de entregar la energía a los usuarios.

En un sistema eléctrico de potencia se tienen diversos componentes eléctricos, cuyo conocimiento, tanto en su modelo como en sus características, es importante para el diseñador de sistemas eléctricos de potencia.

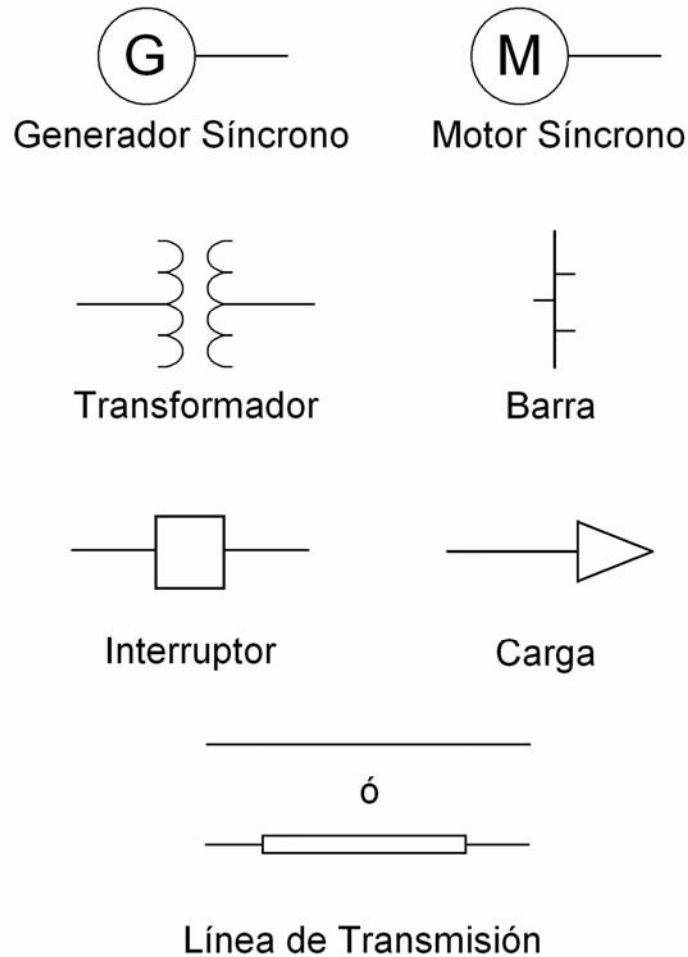
1.2.1 Elementos básicos de un sistema de potencia

Los principales elementos que forman un sistema eléctrico de potencia son: generadores y motores síncronos, transformadores, barras o nodos, interruptores, líneas de transmisión, cargas y elementos de compensación.

Un sistema eléctrico de potencia se puede representar por medio de un diagrama fácil de entender y someter a diversos análisis, eliminando las líneas que indiquen cada fase, comprendiendo que una sola línea representa el sistema trifásico balanceado y que dependiendo del tipo de análisis que se desee realizar, se adicionarán los equipos representados por su correspondiente simbología; a éste diagrama se le conoce como diagrama unifilar, ya que las líneas trifásicas se sustituyen por una sola línea. El diagrama unifilar indica por una sola línea y por símbolos estándar, cómo se conectan las líneas de transmisión con los equipos de un sistema eléctrico; el propósito de un diagrama unifilar es suministrar en forma concisa, información significativa acerca del sistema de potencia.

En la figura 1 se pueden observar los símbolos utilizados en los diagramas unifilares para indicar los principales elementos de un sistema de potencia; en ésta figura no se muestra el símbolo de los elementos de compensación, pero estos se representan por el símbolo de un capacitor, cuando se trata de bancos de capacitores y por el símbolo de una inductancia, cuando se trata de bancos de reactores; para una línea de transmisión puede usarse cualquiera de los dos símbolos mostrados en dicha figura.

Figura 1. Símbolos de los principales elementos de un sistema de potencia



1.2.2 Modelado de elementos de un sistema de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia poseen generadores trifásicos, que suministran energía a los centros de carga por medio de líneas de transmisión y transformadores trifásicos; idealmente todas las cargas se encuentran balanceadas, esto significa que las cargas tienen impedancias idénticas en sus tres fases.

Los voltajes y corrientes en un circuito trifásico balanceado, poseen igual magnitud en todas sus fases, pero se encuentran desfasados 120 grados entre si; por lo tanto, la potencia entregada o absorbida en cada fase es la misma.

La potencia absorbida por una carga trifásica balanceada, se calcula sumando la potencia en cada una de sus fases o simplemente multiplicando la potencia en cualquier fase por tres, ya que la potencia es la misma en todas las fases; por esta razón, los circuitos trifásicos balanceados se resuelven como si fueran una línea con un neutro. Los circuitos trifásicos balanceados, se resuelven utilizando únicamente los voltajes y corrientes de línea, ya que, aunque se tenga una conexión en estrella o en delta, la potencia activa siempre estará dada por la siguiente ecuación:

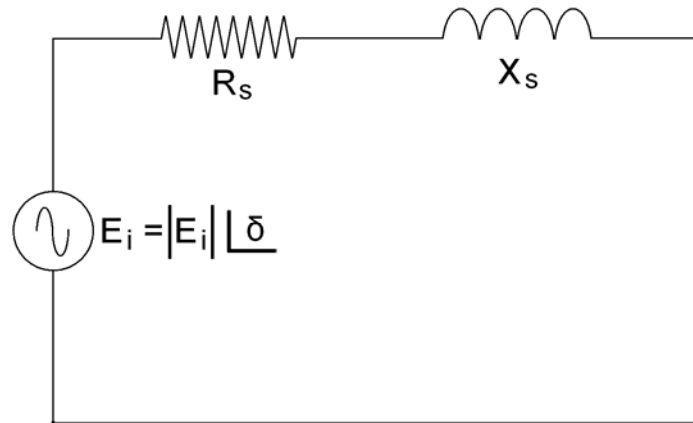
$$P = \sqrt{3} \cdot |V_L| \cdot |I_L| \cdot \cos \theta_P \quad [1-6]$$

Cuando se habla de un sistema trifásico se supone, a menos que se indique otra cosa, que este se encuentra balanceado; por lo que puede modelarse mediante su equivalente monofásico, en términos de sus voltajes y corrientes de línea.

Los elementos de un sistema eléctrico de potencia se modelan en términos de inductancia, capacitancia y resistencia. Cada elemento puede ser representado mediante su circuito equivalente de una fase, que es un modelo aproximado del comportamiento eléctrico de dicho elemento; de esta forma, se puede analizar un sistema de potencia, sustituyendo cada elemento del sistema por su circuito equivalente y así, determinar el comportamiento del sistema por medio del análisis del circuito resultante.

El circuito equivalente de un generador o un motor síncrono es mostrado en la figura 2, éste está constituido por una fuente de voltaje alterna en serie con la resistencia e inductancia síncrona; E_i representa el voltaje interno generado por la bobina de campo, R_s representa la resistencia de las bobinas del estator y X_s representa el flujo magnético disperso en el estator junto con el efecto de reacción de armadura.

Figura 2. Circuito equivalente del generador síncrono



El circuito equivalente de un transformador, se muestra en la figura 3; R_p y R_s representan la resistencia del devanado primario y secundario respectivamente, L_p y L_s el flujo magnético disperso en el devanado primario y secundario respectivamente, G_c representa las pérdidas en el núcleo del transformador y B_m el flujo de magnetización. Ya que la corriente de magnetización y la corriente de pérdidas en el núcleo de un transformador de potencia, son pequeñas en comparación a la corriente en el secundario, este circuito se puede simplificar al circuito de la figura 4, en el cual R_1 representa la resistencia y L_1 el flujo magnético disperso de ambos devanados.

Figura 3. Circuito equivalente del transformador

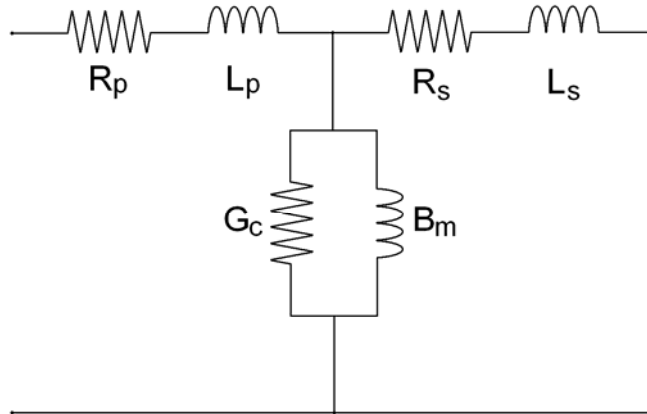
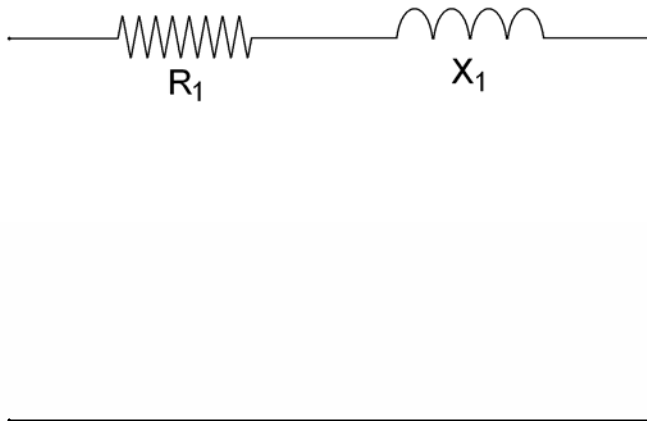
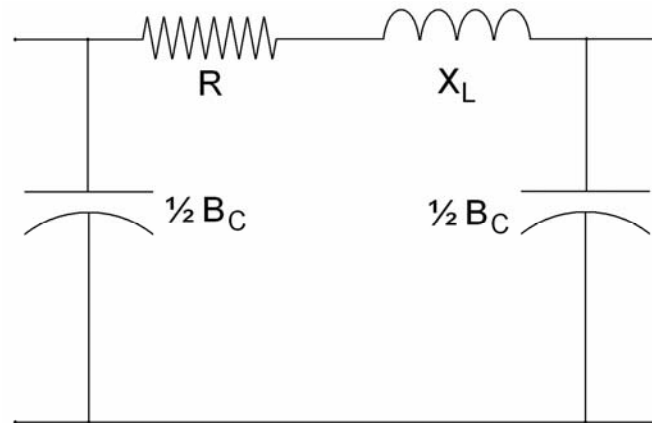


Figura 4. Circuito equivalente simplificado del transformador



En la figura 5 se muestra el circuito equivalente de una línea de transmisión, R representa la resistencia del conductor; X_L representa la inductancia de la línea, ésta se debe al campo magnético que produce la corriente que circula por la línea de transmisión; B_C representa la capacitancia que se forma entre la línea de transmisión y la tierra.

Figura 5. Circuito equivalente de una línea de transmisión



El tipo de carga determina su circuito equivalente, por ejemplo, si se trata de una carga inductiva, ésta se representa por una resistencia en serie con una inductancia, si la carga es capacitiva, su circuito equivalente es una resistencia en serie con un capacitor.

Al diagrama que se origina de la sustitución de los elementos del sistema de potencia, por su circuito equivalente monofásico, se le conoce como diagrama de impedancia; cuando se eliminan las resistencias de un diagrama de impedancia, éste pasa a ser un diagrama de reactancia.

1.2.3 Cantidades en por unidad

Los voltajes, corrientes e impedancias en un sistema de potencia, se expresan frecuentemente en cantidades por unidad de un valor base o de referencia que se elige para cada magnitud. El valor por unidad de una magnitud cualquiera, se define como la razón de su valor al valor base, expresado como un decimal; los cálculos en valores por unidad, resultan mucho más sencillos que los cálculos con valores reales en voltios, amperios u ohmios.

Para trabajar en cantidades por unidad, inicialmente se selecciona la potencia base para todo el sistema; luego se elige el voltaje base, de acuerdo con el nivel de tensión de una parte del sistema de potencia delimitada por transformadores; los voltajes base del resto del sistema se eligen según la relación de transformación entre la parte seleccionada y la actual; los valores base de las magnitudes restantes, se calculan de acuerdo a la relación de dichas magnitudes con el voltaje y la potencia base.

El valor por unidad de cualquier magnitud, se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Valor por unidad} = \frac{\text{Valor Real}}{\text{Valor Base}} \quad [1-7]$$

Algunas veces, la impedancia en por unidad de un elemento del sistema de potencia, se expresa sobre una base distinta a la seleccionada, para la parte del sistema donde está localizado dicho elemento, siendo necesario, convertir esa impedancia en por unidad, de una base a otra; para esto, se transforma dicho valor en por unidad a su valor real, de acuerdo a la base sobre la que se especificó dicho valor en por unidad y luego se transforma este valor real, en su valor en por unidad sobre la base deseada.

En el trabajo realizado por William Stevenson² se presentan los conceptos básicos de un sistema de potencia en una forma más detallada, describiendo sus principales elementos, con sus correspondientes circuitos equivalentes; en este trabajo también se describen las cantidades por unidad, indicando su forma de aplicación.

1.3 Estudio de flujo de potencia

El problema de flujo de potencia puede definirse como el cálculo con precisión de las tensiones complejas de estado estacionario, en todas las barras de una red eléctrica y a partir de ese cálculo, la potencia activa y reactiva que entra o sale del sistema a través de cada barra y los flujos de potencia real y reactiva en cada una de las líneas de transmisión y transformadores, bajo la suposición de generación y carga conocidas.

Los problemas de flujo de potencia no pueden resolverse mediante métodos matemáticos directos, sino que requieren la solución de un gran número de ecuaciones simultáneas, no lineales respecto a las variables de interés (tensiones en los nodos).

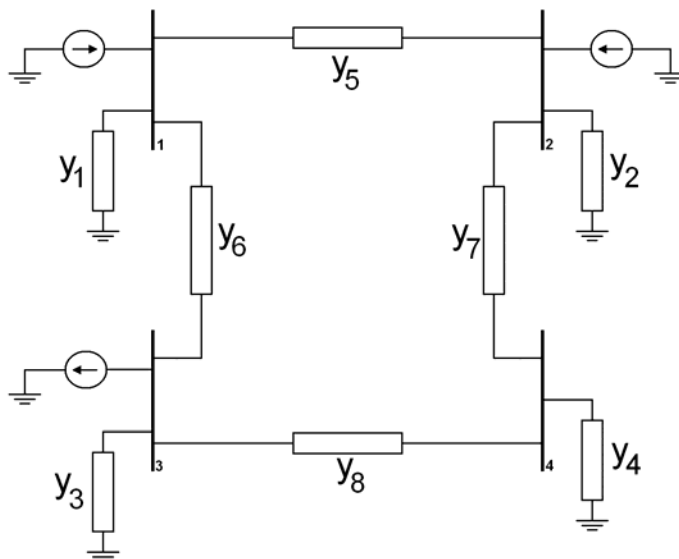
La solución del problema de flujo de potencia es básica para la mayoría de los análisis que se realizan en sistemas eléctricos de potencia; esto ha tenido como consecuencia que el esfuerzo que se ha dedicado al desarrollo de métodos de solución sea notable. Matemáticamente, el problema consiste en resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales, cuyo orden depende de la formulación utilizada.

Cuando se desarrollaron las computadoras digitales, los métodos iterativos de Gauss Seidel y Newton Raphson resultaron útiles; pero estos métodos presentan problemas de convergencia lenta o necesitan de gran capacidad de memoria y pueden alejarse de la solución en varios casos. Debido a que estos métodos numéricos no son infalibles, se ha continuado con la búsqueda de alternativas para resolver el problema de flujo de potencia convencional, tratando de lograr algoritmos eficientes y confiables.

1.3.1 Datos del problema de flujo de potencia

El punto de partida en la obtención de los datos necesarios para resolver un problema de flujo de potencia, es el diagrama unifilar del sistema de potencia; los datos de entrada están constituidos por información de barras, líneas de transmisión, transformadores y generadores. La información de las líneas de transmisión, consiste básicamente en los valores de impedancia serie y admitancia en paralelo de su circuito equivalente; la información de los transformadores y generadores consiste básicamente en los valores de impedancia serie de sus circuitos equivalentes; estos valores son utilizados para formar la matriz de admitancias de barra del sistema de potencia. Para obtener esta matriz de admitancias, debe simplificarse el circuito equivalente del sistema de potencia, de forma que exista solamente una admitancia entre dos barras y también una admitancia entre cada barra y tierra. El circuito equivalente simplificado del sistema de potencia debe tener una forma similar al mostrado en la figura 6, las fuentes de corriente indican la existencia de un generador o una carga en esa barra.

Figura 6. Circuito equivalente simplificado de un sistema de potencia



Los elementos de la matriz de admitancias de barra, se obtienen a partir de las admitancias del circuito equivalente simplificado del sistema de potencia, mediante las siguientes reglas:

- Los elementos de la diagonal de la matriz Y_{ij} son iguales a la suma de todas las admitancias que están directamente conectadas al nodo j .
- Los elementos fuera de la diagonal Y_{ij} son iguales al negativo de la admitancia total conectada entre los nodos i y j .

Los valores en la diagonal de la matriz de admitancias de barra se llaman admitancias propias de los nodos y los valores que están fuera de la diagonal se llaman admitancias mutuas de los nodos. En el trabajo de William Stevenson³ se estudia de forma mas detallada la matriz de admitancias de barra.

Con cada barra se encuentran asociadas cuatro variables, las cuales son: la magnitud de voltaje V , el ángulo de fase δ , la potencia activa neta P y la potencia reactiva neta Q entregadas o tomadas del sistema de potencia; en todas las barras, dos de estas cuatro variables se especifican como datos de entrada y las otras dos variables se calcularán al momento de resolver el problema de flujo de potencia.

1.3.2 Tipos de barras en problemas de flujo de potencia

Físicamente no es posible establecer, como una regla general, que en todas las barras del sistema de potencia se especifiquen las mismas variables, esto ha llevado a clasificar las barras según sus dos variables especificadas y sus dos incógnitas.

Cada barra puede clasificarse en uno de los tres tipos siguientes:

- **Barras de carga:** las barras de este tipo, tienen especificadas la potencia activa y reactiva neta, mientras que no se conoce la magnitud del voltaje y su ángulo de fase. A estas barras se les da el nombre de barras PQ.
- **Barras de voltaje controlado:** en este tipo de barras, se puede incluir a aquellas que tienen instalados dispositivos capaces de controlar la magnitud del voltaje en sus terminales, mediante la generación o absorción de potencia reactiva, como generadores síncronos; en este caso, se especifica la magnitud del voltaje en la barra y la potencia activa neta, mientras que no se especifica la potencia reactiva neta y el ángulo de fase del voltaje. A estas barras se les da el nombre de barras PV.
- **Barra de compensación o barra oscilante:** en un sistema de potencia, debe existir un generador que absorba las pérdidas en las líneas de transmisión, las cuales no pueden conocerse antes de resolver el problema de flujo de potencia, de modo que para este generador, no podrá especificarse su potencia activa; en este caso, las variables especificadas son la magnitud del voltaje en la barra y su ángulo de fase, el cual se usará como referencia para el ángulo de fase en las demás barras; por lo común se selecciona un ángulo de fase de 0° . En esta barra no se especifica la potencia activa y reactiva neta.

1.3.3 Ecuaciones de flujo de potencia

La potencia compleja entregada o recibida en la k-ésima barra del sistema de potencia, puede expresarse de la siguiente forma:

$$S_k = P_k + j \cdot Q_k = V_k \cdot I_k^* \quad [1-8]$$

Siendo el conjugado complejo de la expresión anterior, el siguiente:

$$S_k^* = P_k - j \cdot Q_k = V_k^* \cdot I_k \quad [1-9]$$

Donde S_k es la potencia compleja, P_k es la potencia activa y Q_k la potencia reactiva que entran a la k-ésima barra, V_k es el voltaje en forma compleja de la k-ésima barra e I_k es la corriente en forma compleja que entra a la k-ésima barra. El signo positivo o negativo de S_k , P_k o Q_k , indica que la potencia está entrando o saliendo de la barra, respectivamente. De la misma forma el signo de I_k , indica si la corriente está entrando o saliendo de la barra.

La corriente que entra o sale de la k-ésima barra, en un sistema de potencia de N barras, se puede calcular de la siguiente forma:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \quad [1-10]$$

Donde Y_{kn} es el elemento que se localiza en la fila k y columna n de la matriz de admitancias de barra del sistema de potencia y V_n es el voltaje en forma compleja de la n-ésima barra.

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación de la potencia compleja conjugada, se obtiene una expresión que relaciona los voltajes complejos con la potencia activa y reactiva neta en las barras, esta expresión es la siguiente:

$$P_k - j \cdot Q_k = V_k^* \cdot \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \quad [1-11]$$

Ya que los voltajes complejos se trabajan en forma polar, la expresión anterior puede separarse en su parte real e imaginaria, obteniendo las siguientes expresiones:

$$P_k = \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad [1-12]$$

$$Q_k = -\sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \text{sen}(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad [1-13]$$

Donde $|Y_{kn}|$ es la magnitud del elemento que se localiza en la fila k y columna n de la matriz de admitancias de barra, θ_{kn} es el ángulo de fase en forma polar de ese mismo elemento de la matriz; $|V_k|$ y δ_k es la magnitud y ángulo de fase, respectivamente, del voltaje en la k-ésima barra; $|V_n|$ y δ_n es la magnitud y ángulo de fase, respectivamente, del voltaje en la n-ésima barra.

Las expresiones anteriores se conocen como ecuaciones de flujo de potencia en forma polar, se puede observar que estas ecuaciones son no lineales y que para su cálculo directo es necesario conocer la magnitud y ángulo de fase del voltaje en todas las barras del sistema de potencia.

1.3.4 Objetivo de los estudios de flujo de potencia

El propósito del análisis de flujo de potencia es calcular con precisión la magnitud y ángulo de fase de los voltajes de estado estacionario en todas las barras de una red y a partir de ese cálculo, los flujos de potencia activa y reactiva en cada una de las barras, líneas de transmisión y transformadores, bajo la suposición de generación y carga conocidas.

Las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes de barra que no se especifican en los datos de entrada, se llaman variables de estado, ya que describen el estado del sistema de potencia; también se les llama variables dependientes, porque sus valores dependen de las cantidades especificadas en cada una de las barras. Entonces, el problema de flujo de potencia consiste en determinar los valores de todas las variables de estado, resolviendo un igual número de ecuaciones de flujo de potencia simultáneas, basadas en los datos especificados.

El estado completo del sistema de potencia se conoce hasta cuando se han calculado las variables de estado; después de esto, pueden determinarse todas las demás cantidades que dependen de las variables de estado, como es el caso de la potencia activa y reactiva para la barra de compensación y la potencia reactiva para las barras de voltaje controlado.

Para el cálculo de las variables de estado, se emplean métodos iterativos como el método de Gauss-Seidel o el método de Newton-Raphson; en el trabajo realizado por John Grainger⁴ se estudia la solución al problema de flujo de potencia por medio de estos métodos iterativos.

2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos de búsqueda y optimización son métodos capaces de encontrar, en el espacio de todas las posibles soluciones a un problema, la mejor solución o la única. Existen cuatro tipos básicos de métodos de búsqueda y optimización, estos son: métodos analíticos, métodos exhaustivos, métodos aleatorios y métodos heurísticos.

Los métodos analíticos o basados en cálculos, buscan la solución a un problema, resolviendo ecuaciones en forma directa o por medio de técnicas iterativas. Muchos problemas no pueden resolverse matemáticamente en forma directa, por lo que la búsqueda de la solución se realiza mediante iteraciones, variando la solución de forma relacionada con el gradiente local; estos métodos presentan el problema de estancarse en máximos o mínimos locales y necesitan que la función objetivo sea diferenciable.

Los métodos exhaustivos o enumerativos, recorren todo el espacio finito de posibles soluciones al problema, eligiendo la mejor solución; aunque estos métodos tienen la ventaja de ser bastante simples, generalmente el espacio de búsqueda es demasiado grande como para buscar la solución punto por punto.

Los métodos aleatorios o de búsqueda al azar, recorren de forma aleatoria varios puntos del espacio de búsqueda, sin ningún criterio de selección y tratando de cubrir todas las zonas de este espacio, eligiendo la mejor solución que se haya explorado; aunque estos métodos son sencillos y no consumen demasiado tiempo, pueden dar una solución que no sea la mejor.

Los métodos heurísticos utilizan reglas y técnicas no rigurosas, para encontrar la solución de un problema, en un determinado espacio de búsqueda; existen diversos métodos heurísticos de búsqueda y optimización, entre ellos están los algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización, que aplican los mismos métodos de la evolución biológica, los cuales son: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación.

También se puede decir que un algoritmo genético es una técnica de programación, que imita a la evolución biológica, como estrategia para resolver problemas. Dado un problema específico a resolver, la entrada del algoritmo genético consiste en un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, las cuales pueden especificarse o generarse aleatoriamente; estas soluciones son codificadas de alguna forma y evaluadas mediante una función de aptitud, que permite valorar cuantitativamente a cada candidata; este conjunto de soluciones son sometidas a acciones aleatorias, semejantes a las que actúan en la evolución biológica, hasta encontrar la mejor solución al problema.

En un algoritmo genético cada solución potencial constituye un individuo de la población; a cada individuo se le asigna un valor de aptitud, para que los mejores individuos tengan mayor probabilidad de reproducirse, transmitiendo parte de su información a sus descendientes, como sucede en la evolución biológica.

Aunque puede parecer asombroso y no intuitivo, los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia enormemente poderosa y exitosa para resolver problemas, demostrando el poder de los principios evolutivos.

2.1 Historia

La teoría de la evolución fue descrita por Charles Robert Darwin en 1859, en el famoso tratado “el origen de las especies por medio de la selección natural”. La hipótesis de Darwin, presentada junto con Alfred Russel Wallace, que llegó a las mismas conclusiones independientemente, es que pequeños cambios heredables en los seres vivos y la selección, son los dos hechos que provocan el cambio en la naturaleza y la generación de nuevas especies; pero Darwin desconocía cual es la base de la herencia, pensaba que los rasgos de un ser vivo eran como un fluido y que los fluidos de los dos padres se mezclaban en la descendencia; esta hipótesis tenía el problema de que al cabo de cierto tiempo, una población tendría los mismos rasgos intermedios.

Fue Gregor Johann Mendel quien descubrió en 1866, que los caracteres se heredaban de forma discreta, y que se tomaban del padre o de la madre, dependiendo de su carácter dominante o recesivo; a estos caracteres que podían tomar diferentes valores los llamó genes y a los valores que podían tomar los llamó alelos. En realidad, las teorías de Mendel, que trabajó en total aislamiento, se olvidaron y no se volvieron a redescubrir hasta principios del siglo XX.

En 1930, el genetista inglés Robert Aylmer relacionó las teorías de Darwin y Mendel, demostrando que los genes mendelianos eran los que proporcionaban el mecanismo necesario para la evolución; por la misma época, el biólogo alemán Walther Flemming describió los cromosomas, como ciertos filamentos que contenían la cromatina del núcleo celular; poco más adelante, se descubrió que las células de cada especie viviente tenían un número fijo y característico de cromosomas.

Fue hasta 1953, cuando el genetista estadounidense James Dewey Watson y el británico Francis Harry Compton Crick descubrieron que la base molecular de los genes está en el ácido desoxirribonucleico (ADN); el ADN está contenido dentro de los cromosomas y por tanto, los genes están dentro de los cromosomas. La molécula de ADN es una cadena alargada en forma de doble hélice, compuesta por adenina, citosina, guanina y timina; la combinación y secuencia de estas bases forma el código genético, único para cada ser vivo.

Todos estos hechos forman hoy en día la teoría del neo-darwinismo, que afirma que la historia de la mayoría de la vida está causada por una serie de procesos que actúan en las poblaciones, éstos son: reproducción, mutación y selección. En el proceso de reproducción, los genes de los padres son mezclados y transmitidos a los hijos, creando diversidad genética. La mutación consiste en la alteración de los genes en forma aleatoria. Finalmente, la selección es el proceso de competición entre los individuos de la población, para sobrevivir y poder heredar parte de sus genes a sus descendientes.

La evolución puede definirse como el proceso de cambio en los genes de una población. Según los informáticos evolutivos, la evolución optimiza, puesto que va creando seres cada vez más perfectos cuya cumbre es el hombre; además, indicios de esta optimización se encuentran en el organismo de los animales, desde el tamaño y tasa de ramificación de las arterias, diseñada para maximizar flujo, hasta el metabolismo, que optimiza la cantidad de energía extraída de los alimentos. Sin embargo, los genetistas y biólogos evolutivos afirman que la evolución no optimiza, sino que adapta y optimiza localmente en el espacio y el tiempo; evolución no significa progreso, ya que un organismo más evolucionado puede estar en desventaja competitiva con uno de sus antepasados, si ambos se colocan en el ambiente del último.

En los años 60, John Holland leyendo el libro “la teoría genética de la selección natural”, escrito por el biólogo evolucionista Ronald A. Fisher, comenzó a descubrir que la evolución era una forma de adaptación más potente que el simple aprendizaje, tomando la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar programas bien adaptados para un fin determinado. En los años 70, Holland junto con otras personas, crearon las ideas que más tarde se convertirían en los algoritmos genéticos.

Actualmente se utilizan algoritmos genéticos en una amplia variedad de campos, para desarrollar soluciones a problemas de igual o mayor complejidad que los abordados por los diseñadores humanos; además, las soluciones que consiguen son a menudo más eficientes, más elegantes o más complejas, que una, que un ingeniero humano produciría.

2.2 Introducción a los algoritmos genéticos

Un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Los algoritmos genéticos tratan de resolver problemas que consisten básicamente en encontrar un grupo de valores x_1, x_2, \dots, x_n , tales que la función $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sea máxima, pudiendo ser esta función, lineal, no lineal, continua o discontinua con respecto a cada una de sus variables.

En un algoritmo genético, se llama cromosoma a la agrupación de todas las variables x_1, x_2, \dots, x_n de un problema. La agrupación de valores numéricos asignados a cada una de las variables x_1, x_2, \dots, x_n del cromosoma, se conoce como genotipo; un genotipo representa una solución al problema en forma codificada y puede verse como un arreglo de valores numéricos. Cada genotipo constituye el material genético de un individuo de la población.

A la función $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ se le conoce como función de aptitud y el valor que esta función devuelve, al evaluarla con el grupo de valores x_1, x_2, \dots, x_n del genotipo de un individuo, se llama fenotipo del individuo; el fenotipo consiste en un valor numérico que indica que tan buena es esa solución al problema.

Para resolver un problema mediante un algoritmo genético, primero se debe determinar de que parámetros depende el problema y asignar una variable a cada parámetro, estas variables x_1, x_2, \dots, x_n constituyen el cromosoma del algoritmo genético; después debe construirse la función de aptitud $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que permita evaluar que tan buena es una solución.

La población inicial consiste en un grupo de soluciones al problema (individuos) codificadas en genotipos; estos genotipos pueden especificarse o ser generados aleatoriamente entre un intervalo determinado de valores para cada variable del cromosoma.

Cuando se tiene la población inicial, se evalúan todos los genotipos de los individuos, por medio de la función de aptitud, para determinar el fenotipo de cada individuo; luego se asigna un valor de probabilidad a cada individuo, según su fenotipo, de forma que los mejores individuos de la población tengan mayor valor de probabilidad.

Después de que cada individuo tiene asignado un valor de probabilidad, se crea un determinado número de parejas de individuos al azar, según la probabilidad de cada uno y pudiendo participar, en la creación de cada pareja, todos los individuos de la población, sin importar si ya fue seleccionado en otra pareja; luego cada pareja se reproduce, produciendo un determinado número de hijos, que constituyen un intercambio de la información de los padres.

Los hijos de todas las parejas, luego de su creación, pueden sufrir mutaciones, esto es, cambios en los valores de su genotipo; para un funcionamiento adecuado de un algoritmo genético, la probabilidad de mutación de un individuo debe ser baja.

Los hijos de todas las parejas de individuos formarán parte de la segunda generación, estos nuevos individuos pueden sustituir a todos los de la generación anterior o solamente a los que tengan menor valor de probabilidad; también puede calcularse el fenotipo de estos nuevos individuos, para que sólo los mejores sustituyan a otros de la generación anterior.

Cuando los nuevos individuos han sustituido a otros de la generación anterior, se habrá formado una nueva población o generación de individuos; después se vuelve a realizar el mismo proceso de emparejamiento, reproducción y sustitución de individuos de la población, hasta que aparezca el individuo que constituya la solución al problema.

De lo anterior, puede verse que los individuos de cada generación compiten para ver cuál constituye la mejor solución al problema, de forma que sólo los mejores sobrevivan o leguen parte de su material genético (genotipo) a las siguientes generaciones, al igual que en la evolución de las especies.

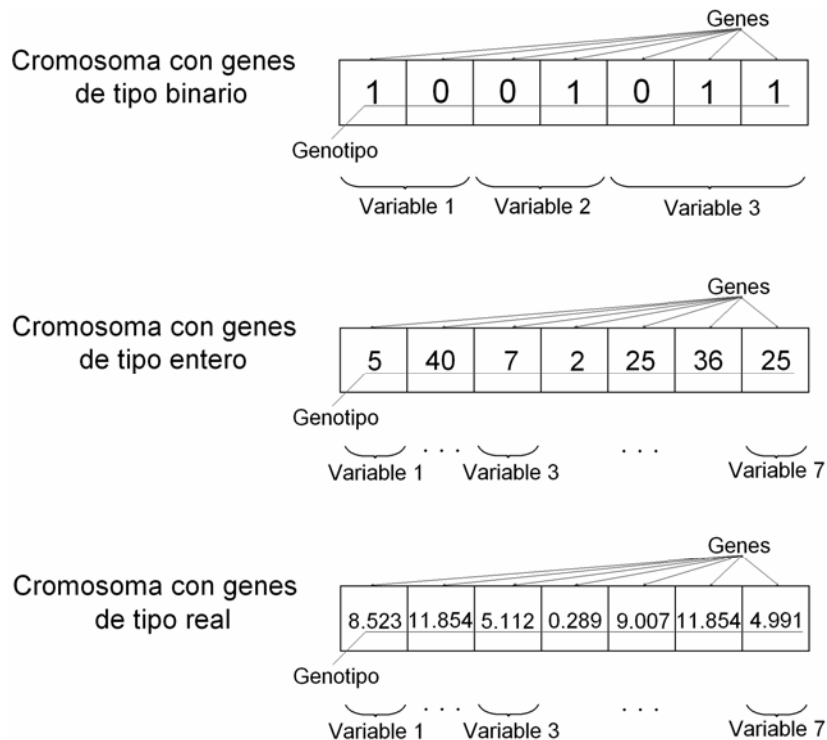
2.3 Estructura de un algoritmo genético

Un algoritmo genético contiene una serie de procesos, similares a los observados en la evolución biológica de las especies, que permiten solucionar un problema; éstos se describen a continuación.

2.3.1 Codificación de datos en un cromosoma

El cromosoma es la estructura que nos permite representar las posibles soluciones al problema dentro del algoritmo genético; a cada posible solución representada en un cromosoma se le conoce como genotipo. Para diseñar la estructura del cromosoma deben considerarse todas las variables de las que depende la solución del problema; estas variables pueden ser discretas o continuas y sus valores deben estar dentro de un intervalo determinado para cada variable. Se llaman genes a los componentes individuales del cromosoma; cuando las variables de las que depende el problema son discretas, los genes pueden ser de tipo entero o binario; cuando estas variables son continuas, los genes son de tipo real. En la figura 7 se muestra un cromosoma con genes de tipo binario, otro con genes de tipo entero y otro con genes de tipo real.

Figura 7. Cromosomas con genes de tipo binario, entero y real



El diseño correcto de la estructura del cromosoma puede ser la clave para resolver adecuadamente el problema; un criterio usado para diseñar la estructura del cromosoma, es que las variables relacionadas entre sí, deben de estar cercanas en el cromosoma.

El tamaño del cromosoma varía con cada problema a resolver, ya que éste es proporcional a la cantidad de variables de las cuales depende la solución del problema.

2.3.2 Población

La población es el conjunto de individuos con los que se trabaja en el algoritmo genético, estos individuos constituyen posibles soluciones al problema. Los individuos que constituyen la población van cambiando durante el funcionamiento del algoritmo genético, pero el tamaño de la población permanece constante.

El tamaño de la población de un algoritmo genético debe ser suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones; no existe una regla para determinar el tamaño óptimo de la población, por lo que éste se determina según el criterio del diseñador, tomando en cuenta la cantidad de genes del cromosoma y el intervalo de valores que éstos pueden adquirir.

La población inicial generalmente es creada asignando valores aleatorios a los genes de cada individuo, dentro de un intervalo determinado y con la misma probabilidad de ocurrencia; esto permite que la población inicial abarque todo el espacio de búsqueda.

2.3.3 Función de aptitud

La función de aptitud es la herramienta que permite medir que tan buena es una solución; esta función tiene como entrada el genotipo de un individuo y su salida es el fenotipo de ese individuo. El fenotipo es la medida de la adaptación de un individuo o dicho de otra forma, es la medida de cómo un individuo resuelve el problema.

La función de aptitud debe ser diseñada para cada problema de manera específica; ésta debe asignar un valor numérico a cada individuo, que permita comparar su aptitud para resolver el problema, con el resto de la población.

2.3.4 Selección

La selección es el proceso en el cual, se escogen los individuos que integrarán las parejas que van a reproducirse; todos los individuos pueden participar en la formación de dichas parejas. La selección se realiza al azar y los métodos más comunes son la selección por ruleta, selección basada en el rango y selección por torneo.

2.3.4.1 Selección por ruleta

En este método, se asigna un valor de probabilidad a cada individuo, de acuerdo con el valor de su fenotipo y de forma que la suma de las probabilidades de todos los individuos sea uno; como se dijo anteriormente, el fenotipo de un individuo es obtenido por medio de la función de aptitud.

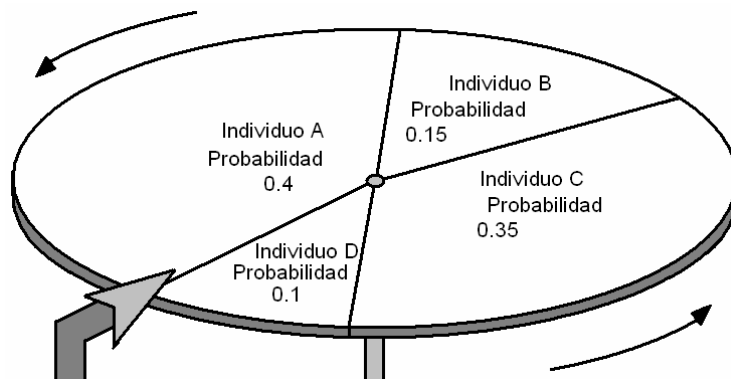
Al asignar a cada individuo su valor de probabilidad, debe considerarse que los individuos mejor adaptados deben tener mayor valor de probabilidad; este valor de probabilidad puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$Probabilidad_i = \frac{Fenotipo_i}{\sum_{j=1}^N Fenotipo_j} \quad [2-1]$$

Donde **Probabilidad_i** es la probabilidad del i-ésimo individuo, **Fenotipo_i** es el fenotipo de i-ésimo individuo, **Fenotipo_j** es el fenotipo de j-ésimo individuo y **N** es el número de individuos en la población.

Después de que cada individuo tiene un valor de probabilidad, se construye un modelo que imite a una ruleta que está dividida en porciones que corresponden a cada individuo y que el tamaño de las porciones sea proporcional al valor de probabilidad de los individuos; se selecciona el individuo correspondiente al punto en el cual la ruleta deja de girar; en la figura 8 se muestra el funcionamiento de este método de selección, en ella puede observarse que los individuos mejor adaptados tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

Figura 8. Funcionamiento del método de selección por ruleta



Para programar este método de selección, se asigna a cada individuo un intervalo de valores, de acuerdo con su valor de probabilidad, desde cero hasta uno; luego se genera un valor aleatorio entre cero y uno, el individuo seleccionado será aquel cuyo intervalo contenga ese valor generado.

El método de ruleta también es conocido como selección proporcional; este método es el más utilizado en los algoritmos genéticos, ya que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado, es proporcional a su aptitud para resolver el problema.

2.3.4.2 Selección basada en el rango

En este método los individuos son ordenados, de acuerdo a su fenotipo, asignándoles un número entero correlativo desde el peor hasta el mejor; por ejemplo, si se tienen n individuos, el peor tendrá un valor de 1 y el mejor tendrá un valor de n ; este número correlativo reemplaza al fenotipo de cada individuo, luego con los nuevos fenotipos, se realiza el mismo procedimiento utilizado en el método de ruleta.

Este método puede hacer que el algoritmo genético converja lentamente a la solución, ya que no existirá mucha diferencia entre los mejores y los peores individuos.

2.3.4.3 Selección por torneo

En este método se toma de la población un determinado número de individuos de forma aleatoria y se escoge el mejor de ellos.

2.3.5 Operadores genéticos

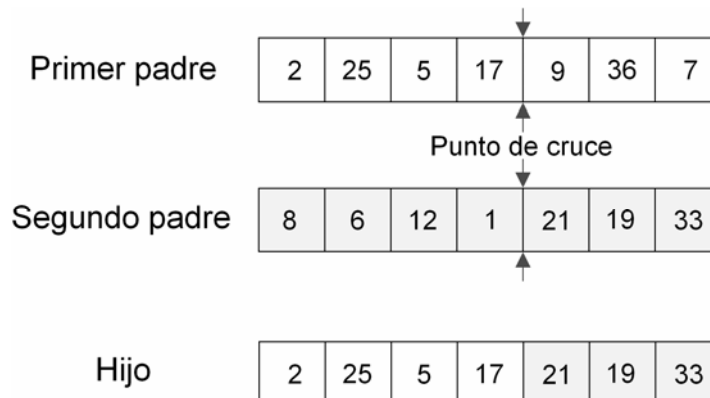
Los operadores genéticos son los que introducen diversidad genética en la población; éstos permiten crear nuevos individuos en base a los existentes. Los operadores más utilizados son: operador cruce y operador mutación.

2.3.5.1 Operador cruce

El operador cruce realiza la reproducción de cada pareja de individuos; este operador nos permite crear individuos nuevos y mejor adaptados, combinando el material genético de los padres. Existen muchas formas de cruzar dos individuos, entre ellas están: cruce en un punto, cruce en varios puntos, cruce uniforme y cruce aritmético.

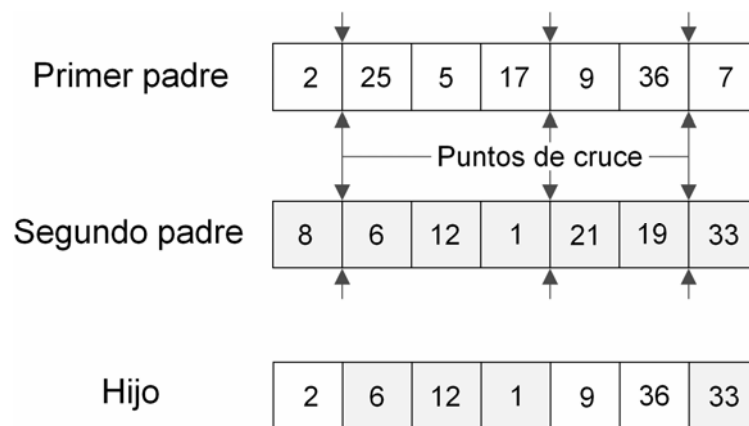
El cruce en un punto consiste en copiar en el hijo, los valores de los genes del primer padre hasta un punto de corte y el resto copiarlo del segundo padre; el cromosoma es dividido en dos partes por el punto de corte, éste puede ser un punto fijo o bien, ser seleccionado al azar en cada cruce. En la figura 9 se muestra el cruce en un punto de dos individuos con genes de tipo entero.

Figura 9. Cruce en un punto



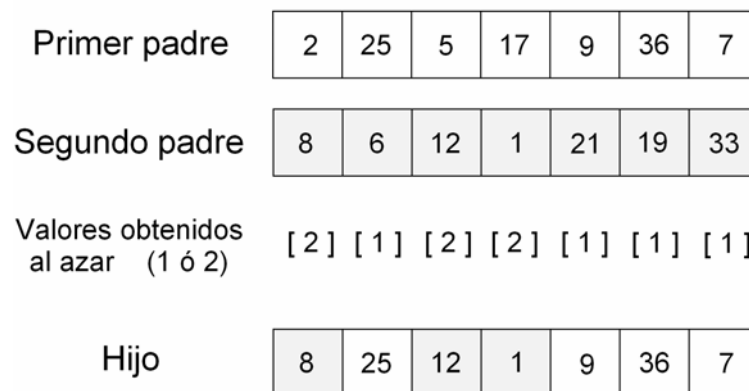
El cruce en varios puntos es similar al cruce en un punto, la diferencia consiste en que existen varios puntos de corte que dividen al cromosoma en varias partes, los valores copiados en el hijo se alternan entre un padre y otro en cada punto de corte. En la figura 10 se muestra el cruce en tres puntos de dos individuos con genes de tipo entero.

Figura 10. Cruce en varios puntos



En el cruce uniforme, para cada gen del cromosoma se selecciona al azar de cual padre se copiará el valor respectivo. En la figura 11 se muestra el cruce uniforme de dos individuos cuyos genes son de tipo entero.

Figura 11. Cruce uniforme



El cruce aritmético consiste en obtener los valores de los genes del hijo por medio de operaciones aritméticas con los valores de los genes de los padres. En la figura 12 se muestra el cruce aritmético de dos individuos con genes de tipo real en el cual se promediaron los valores de sus genes.

Figura 12. Cruce aritmético

Primer padre	5.200	8.560	1.905	8.521	7.005	1.000	11.110
	Promedio de ambos padres						
Segundo padre	3.156	2.004	8.005	7.123	1.117	2.000	5.004
Hijo	4.178	5.282	4.955	7.822	4.061	1.500	8.057

También se pueden diseñar formas de cruce en las cuales se combinen los métodos anteriores, como por ejemplo, copiar una parte del genotipo del primer padre y obtener la otra parte promediando los valores de los genes de ambos padres.

2.3.5.2 Operador mutación

El operador mutación cambia el valor de uno o varios genes de un individuo, alterando su material genético; en la evolución biológica de las especies, las mutaciones son sucesos bastante poco comunes, en algunos casos producen la muerte del organismo, pero en promedio contribuyen a la diversidad genética; en los algoritmos genéticos las mutaciones tienen la misma función y su probabilidad de ocurrencia debe ser baja.

El operador mutación se aplica, con muy baja probabilidad, a los individuos recién creados por el operador cruce; la probabilidad de mutación se establece según el criterio del diseñador, pero ésta debe ser bastante baja, ya que puede reducir el algoritmo genético a una búsqueda aleatoria; generalmente la probabilidad de mutación es de una en mil.

Existen muchas formas de mutar un individuo, una de ellas consiste en seleccionar un gen al azar y cambiar su valor, según el criterio del diseñador; otra forma puede ser, recorrer cada uno de los genes del individuo, decidiendo al azar si se cambiará su valor.

2.4 Funcionamiento de un algoritmo genético

El funcionamiento de un algoritmo genético comienza generando la población inicial, ésta constituye la primera generación de individuos; también puede utilizarse como población inicial, un conjunto de individuos que representen soluciones aproximadas al problema, obtenidas por algún otro método de búsqueda.

Cuando se tiene la población inicial, se evalúan todos los individuos por medio de la función de aptitud y se le asigna, a cada uno, su valor de fenotipo; luego, utilizando un método de selección, se construyen las parejas de individuos que van a reproducirse; la cantidad de parejas es determinada por el diseñador del algoritmo genético.

Después de tener las parejas de individuos, se realiza la reproducción utilizando un operador de cruce; esto permite obtener un nuevo grupo de individuos, con diferentes características a los actuales.

Los hijos de cada pareja pueden ser obtenidos de la aplicación de uno o varios operadores de cruce; la cantidad de hijos la determina el criterio del diseñador del algoritmo genético; generalmente se obtienen dos hijos de cada pareja y se aplica un operador de cruce, cambiando el orden de los padres, al aplicar el operador, para obtener cada hijo.

Después de la reproducción, se determina aleatoriamente, utilizando la probabilidad de mutación, si se aplica el operador mutación a cada uno de los hijos de las parejas.

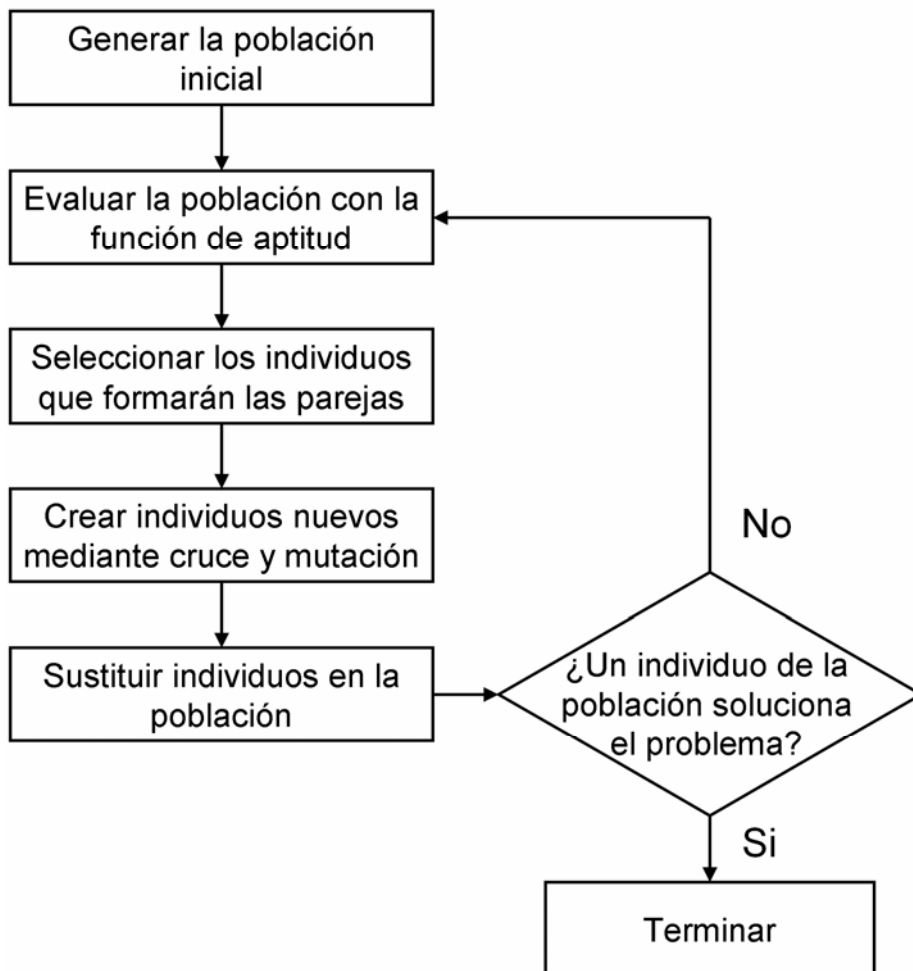
Cuando se han aplicado los operadores genéticos, los hijos de las parejas pueden sustituir a la población actual completa o a una parte de ella; también se puede evaluar a los nuevos individuos con la función de aptitud y que los mejores sean los que sustituyan a los peores de la población actual.

Esta nueva población, formada por hijos de la población anterior y talvez por los mejores individuos de dicha población, constituye la segunda generación de individuos; todos los individuos de esta nueva población son evaluados para determinar si alguno soluciona el problema, en caso de no existir dicho individuo, se repite todo el proceso anterior sobre la nueva población, hasta que un individuo solucione el problema.

Antes del funcionamiento del algoritmo genético, debe determinarse la forma más adecuada de codificar las soluciones en el cromosoma, la estructura del cromosoma, la función de aptitud, el tamaño de la población, el número de parejas, los operadores de cruce mas adecuados, el número de hijos de cada pareja, la probabilidad de mutación, la forma de sustituir una población por otra y la condición de parada, la cual debe determinar si algún individuo soluciona el problema.

El funcionamiento de un algoritmo genético se resume en el diagrama de flujo mostrado en la figura 13.

Figura 13. Diagrama de flujo de un algoritmo genético



A diferencia de otros métodos de búsqueda y optimización, los algoritmos genéticos buscan la solución a partir de una población de puntos, en lugar de un solo punto, no utilizan derivadas ni propiedades de la función objetivo, sino únicamente la propia función objetivo y se rigen mediante reglas probabilísticas, en lugar de reglas deterministas.

Ya que la operación de cruce consiste en intercambiar o mezclar los genes de dos individuos que representan soluciones válidas al problema, los individuos que resulten de este cruce, pueden representar soluciones válidas e inválidas al problema, dependiendo de la forma como se codifiquen las soluciones válidas en los genotipos de los individuos, el tipo de operación de cruce que se utilice y del tipo de problema que se intenta resolver. La operación de mutación también podría producir individuos que representen soluciones válidas e inválidas al problema, ya que esta operación altera los valores genéticos de los individuos.

En muchas aplicaciones se presenta el caso, que los individuos creados mediante la operación de cruce o alterados por la operación de mutación, no representan soluciones válidas al problema; para resolver este inconveniente, debe ajustarse el genotipo de cada individuo, luego de aplicar las operaciones de cruce y mutación; este ajuste consiste en alterar los genes del individuo, de forma que sea válida la solución que éste represente.

En algunas aplicaciones, todos los individuos que se producen, luego de la operación de cruce y mutación, contienen soluciones válidas al problema; en estas aplicaciones no es necesario ajustar los genotipos de los individuos, aunque en algunos casos sus valores se ajustan para evitar que la población se aleje de la solución. El ajuste que debe realizarse al genotipo de cada individuo, varía con el tipo de problema que se intenta resolver; el objetivo de este ajuste es hacer que la solución, que el individuo representa, sea válida.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS ORIENTADOS A LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE FLUJO DE POTENCIA

Los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda y optimización que pueden utilizarse en diversos campos de aplicación, como solución a diferentes tipos de problemas. Un problema que puede ser resuelto por medio de algoritmos genéticos, es el problema de flujo de potencia; ya que éste consiste básicamente en encontrar las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras, en base a valores de potencia activa y reactiva que entran o salen de estas barras, siendo conocidas las funciones que permiten calcular estas potencias, a partir de las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras.

Para resolver el problema de flujo de potencia por medio de algoritmos genéticos, deben codificarse en un cromosoma, las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras de carga, así como los ángulos de fase de los voltajes en las barras de voltaje controlado. A diferencia de los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel, en los algoritmos genéticos deben especificarse los intervalos de valores, que pueden tomar las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras, en lugar de indicar los valores iniciales de estas magnitudes y ángulos de fase; estos intervalos de valores son utilizados únicamente para generar la población inicial. Los valores de los ángulos de fase varían en el intervalo de $-\pi$ a π , mientras que las magnitudes de los voltajes podrían adquirir valores que escapen de un intervalo fijado, pero si se trabaja con valores en por unidad, todos los voltajes de las barras del sistema de potencia, deben tener una magnitud cercana a la unidad, por lo que su puede fijar un intervalo de valores alrededor de la unidad.

En base a los valores de magnitud y ángulo de fase de los voltajes en las barras, que contiene cada individuo, se calculan los valores de potencia activa y reactiva en las barras de carga y los valores de potencia activa en las barras de voltaje controlado; si todos los valores de potencia obtenidos, son idénticos a los proporcionados en el problema, ese individuo constituye la solución al problema y sus valores de voltaje en las barras son los correctos; si los valores de potencia calculados no son iguales a los proporcionados, se calculan las diferencias en dichos valores y en base a estas diferencias, se determina si un individuo es mejor que otro.

Los algoritmos genéticos funcionan de forma muy diferente a los métodos iterativos normalmente utilizados en la solución del problema de flujo de potencia, proporcionándonos una alternativa en la solución de este tipo de problemas.

Una ventaja de los algoritmos genéticos es que no necesitan hacer uso de derivadas parciales de las ecuaciones de flujo de potencia, ni necesitan realizar cálculos matriciales complejos, lo que los hace más sencillos de programar en un computador; otra ventaja es que los algoritmos genéticos buscan la solución a partir de una población de puntos en el espacio de búsqueda, no como los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel, que buscan la solución moviéndose solamente en un punto.

Ya que los algoritmos genéticos se rigen mediante reglas probabilísticas, la forma en que se llega a la solución, variará cada vez que se ponga a funcionar el algoritmo, a diferencia de los métodos iterativos tradicionales, en los cuales siempre se llega a la solución de la misma forma, debido a que éstos se rigen mediante reglas deterministas.

3.1 Datos del problema

En un problema de flujo de potencia se proporciona toda la información de los elementos del sistema, que permita obtener la matriz de admitancias de barra del sistema de potencia; en las barras de carga se proporcionan los valores de potencia activa y reactiva que entran o salen de dichas barras; en las barras de voltaje controlado se proporcionan las magnitudes de voltaje y los valores de potencia activa que entran o salen de esas barras; debe existir solamente una barra de compensación, en la cual se especifica la magnitud y el ángulo de fase de su voltaje, este ángulo de fase se utiliza como referencia para el resto de las barras.

En el problema de flujo de potencia, se suponen valores para las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras de carga y también para los ángulos de fase en las barras de voltaje controlado; estos valores, junto con la magnitud y ángulo de fase del voltaje en la barra de compensación y la magnitud de los voltajes en las barras de voltaje controlado, permiten calcular los valores de potencia activa y reactiva en las barras de carga, junto con los valores de potencia activa en las barras de voltaje controlado, que corresponderían a esos valores supuestos de voltaje. Para este cálculo se utilizan las ecuaciones de flujo de potencia en forma polar, las cuales fueron deducidas en el capítulo 1 y con fines didácticos se repiten a continuación:

$$P_k = \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad [3-1]$$

$$Q_k = -\sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \text{sen}(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad [3-2]$$

Los valores de potencia calculados se comparan con los valores de potencia que se proporcionan, para determinar si los valores supuestos de voltaje son correctos o no. Todos los valores utilizados en un algoritmo genético orientado a solucionar problemas de flujo de potencia, son números reales; esto complica la búsqueda de una solución, ya que los valores de potencia calculados difícilmente serán idénticos a los proporcionados; por tal razón, debe especificarse el valor máximo en que puedan diferir los valores de potencia calculados con los proporcionados, para que una solución se considere correcta; este valor máximo se conoce como tolerancia en el valor de las potencias de la solución.

Además de los datos que son proporcionados con el problema de flujo de potencia, deben determinarse los intervalos de valores de magnitud de voltaje en las barras, los cuales son utilizados para generar la población inicial del algoritmo genético. Ya que se utilizarán valores en por unidad, todas las magnitudes de los voltajes en las barras deben estar cercanas a la unidad, por lo que estos intervalos pueden especificarse entre 0.5 y 1.5.

3.2 Objetivo del algoritmo

El objetivo del algoritmo genético es solucionar el problema de flujo de potencia, el cual consiste en obtener la magnitud y el ángulo de fase de los voltajes en las barras de carga, el ángulo de fase de los voltajes en las barras de voltaje controlado y los valores de potencia activa y reactiva neta en todas las barras; también deben calcularse los flujos de potencia en las líneas de transmisión y transformadores, utilizando la información de éstos, junto con los valores de magnitud y ángulo de fase de los voltajes en todas las barras.

Cada individuo de la población contendrá, en forma codificada, los valores desconocidos de magnitud y ángulo de fase de los voltajes en las barras; utilizando estos valores, se calcularán los valores de potencia proporcionados, mediante las ecuaciones de flujo de potencia en forma polar. La aptitud de un individuo para resolver el problema, se determina por la cercanía entre los valores de potencia proporcionados y los calculados para ese individuo.

El principal objetivo de un algoritmo genético orientado a solucionar problemas de flujo de potencia, es encontrar un individuo cuyos valores de potencia calculados difieran de los proporcionados, en un valor inferior a la tolerancia especificada. Luego de encontrar un individuo que solucione el problema, se calculan todas las potencias netas que entran o salen de las barras y los flujos de potencia en las líneas de transmisión y transformadores, utilizando los valores codificados en el genotipo del individuo solución.

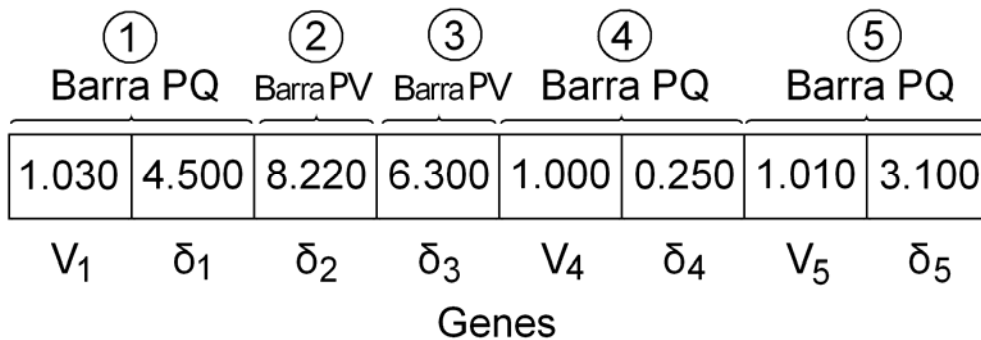
3.3 Diseño de la estructura

Al utilizar algoritmos genéticos para resolver problemas de flujo de potencia, los procesos del algoritmo genético deben adaptarse a este tipo de problemas; algunos de estos procesos no varían mucho de los utilizados en otro tipo de problemas, como es el caso del método de selección y la sustitución de individuos en la población; otros de estos procesos se diseñan especialmente para resolver problemas de flujo de potencia, como es el caso del diseño de la estructura del cromosoma para la codificación de datos, el diseño de la función de aptitud y los operadores de cruce. La estructura del cromosoma debe permitir codificar las magnitudes y ángulos de fase desconocidos de los voltajes en las barras y la función de aptitud debe ser capaz de medir que tan cerca de la solución se encuentra un individuo.

3.3.1 Codificación de datos

En un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia, los datos que se codificarán, utilizando la estructura del cromosoma, son la magnitud y el ángulo de fase de los voltajes en las barras de carga, junto con el ángulo de fase de los voltajes en las barras de voltaje controlado. Cada gen del cromosoma contendrá un valor de magnitud o ángulo de fase del voltaje en una barra; ya que estos valores de voltaje son de tipo real, todos los genes del cromosoma serán de este tipo. El orden en que se colocan los valores de voltaje en las barras, dependerá del número asignado a cada barra; ya que las variables que se relacionan entre sí, deben estar cercanas en el cromosoma de un algoritmo genético, se colocará la magnitud del voltaje en las barras de carga junto a su respectivo ángulo de fase. La estructura del cromosoma de un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia se muestra en la figura 14.

Figura 14. Estructura del cromosoma



Los valores de magnitud de los voltajes en las barras se colocan en por unidad, de esta forma, puede suponerse que todos los voltajes desconocidos tienen valores cercanos a la unidad al momento de generar la población inicial; el ángulo de fase de los voltajes en las barras puede colocarse en radianes o en grados como en la figura anterior.

3.3.2 Tamaño de la población

No existe un método definido para establecer el tamaño óptimo de la población en un algoritmo genético, por lo que éste se determina según el criterio del diseñador. El tamaño de la población debe establecerse cuidadosamente, ya que la búsqueda de la solución no mejorará al aumentar demasiado el tamaño de la población y si la población es muy pequeña, el algoritmo genético no podrá encontrar la solución al problema. Al establecer el tamaño de la población, debe tomarse en cuenta el tamaño del cromosoma, ya que al aumentar la cantidad de genes, también debe aumentarse el tamaño de la población. En la resolución de problemas de flujo de potencia, la cantidad de genes depende de la cantidad de barras en el sistema de potencia y del tipo de estas barras; por lo que para resolver un problema de flujo de potencia con una gran cantidad de barras, se necesita de una población mayor que la necesaria para resolver un problema con menor cantidad de barras; al tener una mayor población, el tiempo requerido por el algoritmo genético para encontrar la solución será mayor.

La población inicial se genera en forma aleatoria; ya que se utilizan cantidades por unidad, se supone que todos los voltajes del sistema de potencia deben tener valores cercanos a uno; por lo cual, las magnitudes de los voltajes en las barras de carga pueden generarse aleatoriamente entre un intervalo de valores alrededor de la unidad; los ángulos de fase de los voltajes en las barras de carga y voltaje controlado, pueden generarse al azar en el intervalo de $-\pi$ a π . Para obtener mejores resultados pueden estimarse los valores desconocidos de los voltajes en las barras o calcularse en forma aproximada por medio de métodos rápidos, luego generar la población inicial con valores aleatorios cercanos a los valores aproximados de los voltajes en las barras.

3.3.3 Diseño de la función de aptitud

La función de aptitud debe asignar un valor numérico a cada individuo, de acuerdo a su cercanía con la solución del problema; este valor nos permitirá comparar dos individuos y determinar que tan bueno es uno de ellos respecto al otro, en su capacidad para resolver el problema.

Para determinar si un individuo soluciona el problema de flujo de potencia, se deben calcular los valores de potencia correspondientes a los valores de voltaje codificados en el genotipo del individuo, para este cálculo se utilizan las ecuaciones de flujo de potencia en forma polar; si todos los valores de potencia calculados, son iguales a los especificados en el problema, los valores de voltaje codificados en el genotipo del individuo, solucionan el problema de flujo de potencia; en caso de que los valores calculados sean diferentes a los proporcionados, se deben calcular las diferencias entre ellos, para conocer que tan lejos se encuentra ese individuo de la solución. La diferencia que exista entre los valores de potencia especificados y los correspondientes a un individuo, nos indicará que tan bueno es ese individuo para resolver el problema.

Para calcular los valores de potencia activa y reactiva correspondientes a cada individuo, se utilizará la magnitud y el ángulo de fase especificados, para el voltaje en la barra de compensación, las magnitudes especificadas para los voltajes en las barras de voltaje controlado y los valores de voltaje codificados en el genotipo del individuo. Ya que no se especifican los valores de potencia activa y reactiva en todas las barras, en las barras de carga se calcularán sus valores de potencia activa y reactiva, en las barras de voltaje controlado solamente se calcularán sus valores de potencia activa y en la barra de compensación no se calcularán sus valores de potencia.

Las diferencias entre las potencias especificadas y las potencias correspondientes a los valores de voltaje codificados en el genotipo del individuo, pueden calcularse utilizando las siguientes expresiones:

$$\Delta P_k = \left| Pe_k - \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \right| \quad [3-3]$$

$$\Delta Q_k = \left| Qe_k + \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| \cdot |V_k| \cdot |V_n| \cdot \text{sen}(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \right| \quad [3-4]$$

Donde Pe_k es la potencia activa especificada en las barras de carga y voltaje controlado, Qe_k es la potencia reactiva especificada en las barras de carga, ΔP_k y ΔQ_k son las diferencias entre las potencias especificadas y las correspondientes al individuo.

La capacidad de un individuo para solucionar un problema de flujo de potencia se mide en las diferencias entre las potencias especificadas y las correspondientes a ese individuo; estas diferencias de potencia deben ser pequeñas en un individuo que se considere aceptable. La aptitud de un individuo se determina por la cercanía entre todas las potencias especificadas y las correspondientes a dicho individuo; ya que estos valores de diferencia de potencia son varios, la aptitud de un individuo se puede medir en base a la diferencia media y máxima, entre los valores de potencia especificados y los correspondientes al individuo.

Al diseñar la función de aptitud debe considerarse que un buen individuo debe poseer un mayor valor de aptitud que un mal individuo, así el valor de aptitud de un individuo debe ser inversamente proporcional al valor medio y máximo de las diferencias de potencia explicadas anteriormente.

Tomando en cuenta lo anterior, la función de aptitud puede diseñarse de la siguiente forma:

$$Aptitud = \frac{1}{\bar{X}(\Delta P_k, \Delta Q_k) + \max(\Delta P_k, \Delta Q_k)} \quad [3-5]$$

Donde $\bar{X}(\Delta P_k, \Delta Q_k)$ es la diferencia media entre los valores de potencia especificados y los correspondientes al individuo, $\max(\Delta P_k, \Delta Q_k)$ es la máxima diferencia entre esos valores de potencia y **Aptitud** es el valor de aptitud asignado a ese individuo.

3.3.4 Método de selección

En la resolución de problemas de flujo de potencia por medio de algoritmos genéticos, se puede utilizar cualquier método de selección para escoger a los individuos que integrarán las parejas que van a reproducirse; es preferible utilizar el método de selección por ruleta, ya que éste asigna a cada individuo una probabilidad de selección de acuerdo con su valor de aptitud. En el método de selección por ruleta, a cada individuo se le asigna una probabilidad de selección por medio de la siguiente expresión:

$$Probabilidad_i = \frac{Aptitud_i}{\sum_{j=1}^N Aptitud_j} \quad [3-6]$$

Donde **Probabilidad_i** es la probabilidad de selección del i-ésimo individuo, **Aptitud_i** es el valor de aptitud del i-ésimo individuo, **Aptitud_j** es el valor de aptitud del j-ésimo individuo y **N** es el número de individuos en la población.

El resultado de la suma de las probabilidades de selección de todos los individuos de la población debe ser uno. Para realizar la selección por ruleta, se debe asignar a cada individuo un intervalo, entre cero y uno, de magnitud igual a su probabilidad de selección; esto puede hacerse calculando la probabilidad acumulada de los individuos de la población y tomando como límites para el intervalo de cada individuo, su valor de probabilidad acumulada y el valor de probabilidad acumulada del individuo anterior. Después de que cada individuo tiene asignado un intervalo de valores, se genera un número aleatorio entre cero y uno, siendo elegido el individuo cuyo intervalo contenga al número generado.

3.3.5 Diseño de operadores genéticos

Los operadores genéticos deben ser capaces de acercar el algoritmo genético a la solución del problema; el más importante de éstos es el operador cruce, ya que éste debe crear nuevos individuos, con buenas capacidades para solucionar el problema, a partir de dos individuos existentes. El operador mutación debe tener una baja probabilidad de aplicación, este operador debe alterar un gen de un individuo de forma que éste o su descendencia, mejore su aptitud para resolver el problema.

3.3.5.1 Cruce

El operador cruce debe ser capaz de crear, a partir de dos individuos, otros individuos mejores que los anteriores; en un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia, los genes de los individuos poseen valores de tipo real, pudiendo ser operados aritméticamente.

En un problema de flujo de potencia, para acercarse al algoritmo genético a la solución, a partir de dos buenos individuos, se pueden intercambiar o promediar los valores de sus genes, los cuales representan magnitudes y ángulos de fase de voltajes en las barras. El cruce puede ser uniforme o realizarse en uno o varios puntos y además de intercambiar los valores de los genes de los padres, también se deben promediar estos valores, para que el algoritmo genético pueda acercarse a la solución del problema.

El método de cruce utilizado para resolver problemas de flujo de potencia puede variar según el criterio del diseñador, pero dependerá de un cruce adecuado, que se obtenga la solución del problema; el método que aquí se explica es una mezcla entre el cruce uniforme y el cruce aritmético, este método consiste en generar, para cada gen del cromosoma, un número aleatorio que puede tomar los valores uno, dos o tres; si el número generado es uno, se copiará en el hijo el valor del gen de un padre; si el número es dos, se promediará el valor del gen de ambos padres y se copiará el resultado en el hijo; si el número es tres, se copiará en el hijo el valor del gen del otro padre; este método de cruce se muestra en la figura 15.

Figura 15. Método de cruce

Primer padre	1.002	2.500	7.000	1.003	0.400	6.150
Segundo padre	1.000	3.100	5.000	1.002	2.800	9.210
Valores obtenidos al azar (1, 2 ó 3)	[2]	[1]	[2]	[3]	[1]	[3]
Hijo	1.001	2.500	6.000	1.002	0.400	9.210

Al utilizar este método de cruce pueden crearse tres hijos de cada pareja, siempre generando, para cada gen del cromosoma, un número aleatorio que puede tomar tres valores; si se genera un determinado número, uno de los hijos tomará el valor de un padre, otro el valor promedio y el último el valor del otro padre; si se genera otro número, entonces cambia el orden en que los hijos reciben estos valores.

El número de hijos que cada pareja produce en una operación de cruce lo determina el criterio del diseñador; generalmente se crean dos nuevos individuos en el cruce de cada pareja, pero en cada cruce puede crearse la cantidad de individuos que se desee.

3.3.5.2 Mutación

La operación de mutación se aplica a los nuevos individuos, luego de su creación; esta operación debe alterar, en una pequeña cantidad, el valor de un gen escogido al azar; la probabilidad de mutación se escoge según el criterio del diseñador del algoritmo genético, pero es común asignarle una probabilidad de 0.001, es decir que de cada mil nuevos individuos uno de ellos mutará.

En la mutación de un individuo se puede alterar la cantidad de genes que se desee, pero lo recomendable es solamente alterar un gen y variar su valor en una cantidad pequeña, ya que de no ser así, el valor de aptitud de ese individuo podría decrecer grandemente y esto provocaría que el individuo desapareciera sin legar su material genético. El objetivo de la mutación es generar nuevos tipos de soluciones que podrían acercar el algoritmo genético a la solución del problema.

3.3.6 Ajuste del valor de los genes

Ya que los nuevos individuos se producen a través del intercambio y promediado de los valores de voltaje de dos individuos cercanos a la solución y una poco probable variación en uno de estos valores, es posible que estos nuevos individuos adquieran valores de voltaje que produzcan valores de potencia mas cercanos a algunos de los valores especificados, pero mas lejanos a otros; esto hace que el algoritmo genético se aleje de la solución del problema.

Para evitar que el algoritmo genético se aleje de la solución, se deben ajustar los valores genéticos de los nuevos individuos, luego de la operación de cruce y mutación; el ajuste debe hacerse de forma que se mantengan iguales las diferencias en los valores de potencia especificados y los correspondientes al individuo; esto se logra por medio de una expresión que permite obtener los nuevos valores de voltaje a partir de los valores que se producen luego de las operaciones de cruce y mutación. Esta expresión se obtiene a partir de la ecuación de flujo de potencia en forma compleja, la cual fue deducida en el capítulo uno y con fines didácticos se repite a continuación:

$$P_k - j \cdot Q_k = V_k^* \cdot \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n \quad [3-7]$$

Donde P_k es la potencia activa que entra a la k-ésima barra, Q_k la potencia reactiva que entra a la k-ésima barra, Y_{kn} es el elemento que se localiza en la fila k y columna n de la matriz de admitancias de barra, V_k es el voltaje en forma compleja de la k-ésima barra; V_n es el voltaje en forma compleja de la n-ésima barra y N es la cantidad de barras del sistema de potencia.

La ecuación anterior también puede escribirse de la siguiente forma:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - j \cdot Q_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} \cdot V_n + Y_{kk} \cdot V_k \right) \quad [3-8]$$

La expresión anterior es la que se utiliza para ajustar los valores de los voltajes codificados en el genotipo de cada nuevo individuo; el lado derecho de esta expresión representa los valores especificados, junto con los valores actuales de voltaje, contenidos en el genotipo del individuo; el lado izquierdo de esta expresión es el valor ajustado de voltaje en forma compleja para la k-ésima barra. Los valores ajustados de los voltajes en forma compleja, deben separarse en sus magnitudes y ángulos de fase, para que puedan ser codificados en el genotipo de cada nuevo individuo y reemplacen a los valores genéticos anteriores.

Para ajustar los valores genéticos de los nuevos individuos, los valores de magnitud y ángulo de fase del voltaje en las barras de carga, se calculan únicamente por medio de la expresión anterior, mientras que para calcular el ángulo de fase del voltaje en las barras de voltaje controlado, primero se calcula la potencia reactiva, por medio de una de las ecuaciones de flujo de potencia en forma polar y luego se calcula el ángulo de fase del voltaje, utilizando la expresión anterior; en el cálculo de la potencia reactiva en las barras de voltaje controlado, también se utilizan los valores especificados, junto con los valores actuales de voltaje, contenidos en el genotipo del individuo. La expresión anterior permite calcular un valor de magnitud de voltaje para las barras de voltaje controlado, este valor se ignora, ya que el valor correcto fue especificado en el planteamiento del problema.

3.3.7 Sustitución de la población

En los algoritmos genéticos, los individuos nuevos, creados a través del cruce de parejas de individuos actuales y posibles mutaciones, van sustituyendo a la población actual en cada generación; una forma de pasar de una generación a otra, es reemplazar a todos los individuos actuales por los nuevos individuos; otra forma de sustitución de la población, es reemplazar los peores individuos de la población actual por los mejores individuos nuevos; esta forma de sustitución es mas recomendable que la anterior, ya que permite conservar a los mejores individuos de cada generación, mejorando la búsqueda de la solución; en los algoritmos genéticos, a la conservación de los mejores individuos de una población se le conoce como elitismo.

La sustitución de una parte de la población actual, puede hacerse sin comparar la aptitud de los individuos nuevos con la de los actuales, solamente seleccionar cierta cantidad de los peores individuos actuales y sustituirlos por una igual cantidad de los mejores individuos nuevos; en este caso se debe tratar de reemplazar como mínimo la mitad de la población, de lo contrario el algoritmo genético tardará demasiado tiempo en encontrar la solución. También se pueden agrupar los individuos actuales con los nuevos y elegir a los mejores individuos para que formen parte de la siguiente generación, de esta forma serán reemplazados todos los individuos de la población actual que tengan menor aptitud que los individuos nuevos.

Después de varias generaciones puede darse el caso de que todos los individuos de la población posean genes muy similares y aún no se haya alcanzado la solución del problema; de ser así se debe generar otra población, asignando a los genes de cada individuo, valores aleatorios dentro de intervalos de magnitud pequeña, que contengan el valor actual para cada gen.

3.4 Funcionamiento

Un algoritmo genético orientado a solucionar problemas de flujo de potencia debe principiar obteniendo los valores de magnitud y ángulo de fase de los voltajes en las barras, potencia activa y reactiva tomadas o ingresadas al sistema de potencia en las barras, el tipo de cada barra, así como la información de barras, líneas de transmisión, transformadores y generadores que permita calcular la matriz de admitancias de barra del sistema de potencia, la cual será utilizada en el cálculo de la aptitud de los individuos; luego de calcular la matriz de admitancias de barra, debe generarse la población inicial en forma aleatoria; ya que la población inicial se genera asignando a los genes de cada individuo, valores aleatorios entre un gran intervalo, algunas veces la solución se encuentra rápidamente y otras veces el algoritmo genético necesita mayor cantidad de tiempo para encontrar la solución.

Debe tenerse cuidado al momento de definir los intervalos de valores en los que se generará la población inicial, debido a que si la solución no se encuentra dentro de este intervalo, el algoritmo genético podría no encontrar la solución al problema o podría encontrar una solución que no es la deseada, como sucede en los métodos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel cuando se asignan mal los valores iniciales del voltaje en las barras.

En la población inicial de un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia, generalmente, los ángulos de fase de los voltajes en las barras se generan en el intervalo de $-\pi$ a π y las magnitudes de los voltajes en las barras se generan en el intervalo de 0.6 a 1.4, debido a que se trabaja con valores en por unidad y podría encontrarse una solución no deseada, la cual contenga voltajes por debajo de 0.6 por unidad o por arriba de 1.4 por unidad.

Después de generar la población inicial, se evalúa la aptitud de todos los individuos de la población, para esto se calculan las potencias correspondientes a los valores de voltaje codificados en el genotipo de cada individuo; luego se calcula la diferencia media y máxima entre estos valores de potencia calculados y los especificados, para después calcular el valor de aptitud de cada individuo, de la forma que fue descrita anteriormente.

Después de lo anterior y utilizando el valor de aptitud asignado a los individuos, se forman las parejas de individuos que van a reproducirse, eligiendo a los individuos, por medio de cualquiera de los métodos de selección que se explicaron anteriormente; debe tenerse cuidado de que cada pareja no este constituida por el mismo individuo, porque de ser así, los nuevos individuos que se produzcan en el cruce serán una copia exacta de ese mismo individuo y esto no ayudará al buen funcionamiento del algoritmo genético.

Cuando se tienen las parejas de individuos, se les aplica el operador cruce y luego se aplica aleatoriamente el operador mutación a los individuos creados; se puede utilizar cualquiera de los cruces que fueron explicados anteriormente, siempre que se promedien e intercambien los valores de los genes de los padres; el operador mutación utilizado en los algoritmos genéticos orientados a solucionar el problema de flujo de potencia, consiste en sumar o restar una pequeña cantidad, al valor de un gen seleccionado al azar.

Luego de crear un nuevo grupo de individuos con el operador cruce y aplicar aleatoriamente el operador mutación, se ajustan los valores genéticos de este nuevo grupo de individuos; los nuevos valores genéticos se calculan por medio de la expresión que fue explicada anteriormente, estos valores genéticos ajustados sustituyen a los anteriores en el genotipo de cada individuo.

Cuando se han ajustado los valores genéticos de todos los nuevos individuos, se determinan sus valores de aptitud, de la forma que se explicó anteriormente; después los individuos nuevos sustituyen a los individuos actuales en la población, de acuerdo con sus correspondientes valores de aptitud; la sustitución de la población puede realizarse en cualquiera de las formas que fueron explicadas anteriormente.

Después de la sustitución de individuos, se busca en la población actual, un individuo que constituya una solución aceptable; si no existe una solución aceptable, se repite el mismo proceso, hasta que se encuentre un individuo cuya diferencia máxima entre las potencias especificadas y las correspondientes a sus valores codificados, sea menor que la tolerancia requerida.

Cuando se ha encontrado un individuo que soluciona el problema, se toman sus valores de voltaje codificados en su genotipo y se calculan las potencias activas y reactivas tomadas o ingresadas al sistema de potencia en las barras, junto con los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión y transformadores.

Debido a que un algoritmo genético realiza muchas operaciones aleatorias, en algunas ocasiones la solución del problema se encuentra rápidamente y en otras ocasiones, el algoritmo genético necesita mayor cantidad de tiempo.

Cuando se necesita una buena exactitud en la búsqueda de la solución a un problema de flujo de potencia utilizando algoritmos genéticos, son necesarias muchas generaciones de individuos para encontrar la solución adecuada.

La etapa que demora más tiempo en un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia, es cuando se calculan los valores de potencia activa y reactiva en las barras; para mejorar el tiempo utilizado para procesar una generación, deben guardarse los valores de aptitud de cada individuo, así en la siguiente generación, no será necesario volver a calcular el valor de aptitud de los individuos que aún permanecen de la generación anterior.

4 EJEMPLO DE SOLUCIÓN A UN PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA

Como se explicó anteriormente, los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda y optimización basados en probabilidad, los cuales imitan los métodos que intervienen en la evolución biológica, como estrategia para resolver problemas; los algoritmos genéticos pueden utilizarse en diferentes aplicaciones, entre las cuales se encuentra la solución a problemas de flujo de potencia.

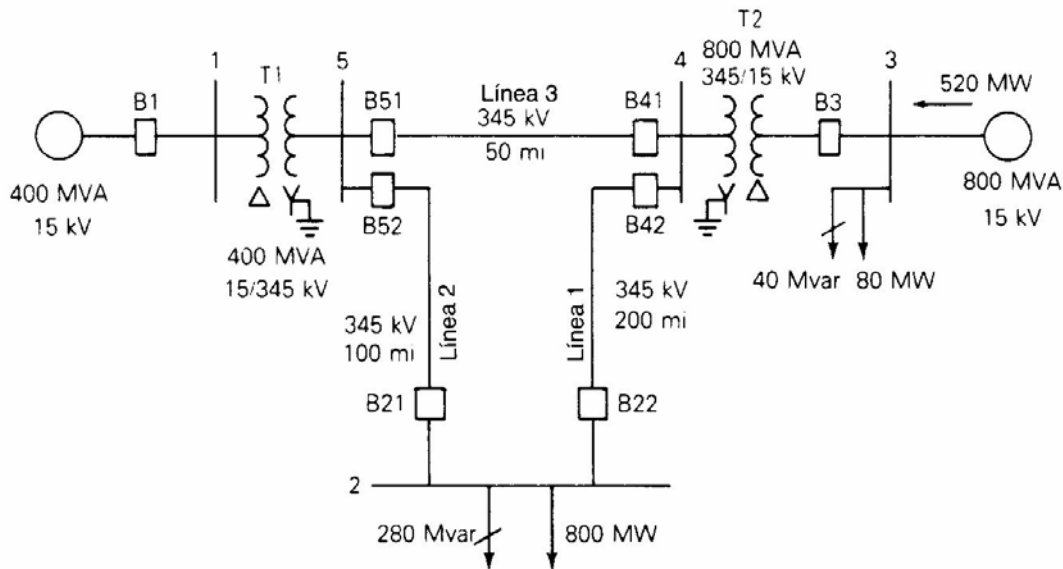
Un problema de flujo de potencia consiste básicamente en encontrar las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en las barras de un sistema de potencia, para después calcular la potencia activa y reactiva que entra o sale del sistema a través de cada barra, junto con los flujos de potencia en las líneas de transmisión y transformadores. Los problemas de flujo de potencia normalmente se resuelven por los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel; los algoritmos genéticos constituyen una alternativa a estos métodos, para resolver este tipo de problemas.

Para poner en práctica la teoría que se ha expuesto en este trabajo, en este capítulo se desarrolla un algoritmo genético orientado a resolver problemas de flujo de potencia, en base a los fundamentos que fueron descritos en los capítulos anteriores; este algoritmo genético es utilizado para resolver un problema de flujo de potencia, planteado en el libro *Sistemas de Potencia* escrito por Duncan Glover y Mulukutla Sarma⁵; este problema se describe a continuación.

4.1 Descripción del problema

En la figura 16 se muestra el diagrama unifilar de un sistema de potencia de cinco barras, identificadas por números; la barra uno, a la cual está conectado un generador de 400 MVA, es la barra de compensación; la barra tres, a la cual están conectados un generador de 800 MVA y una carga, es una barra de voltaje controlado; las barras dos, cuatro y cinco son barras de carga.

Figura 16. Diagrama unifilar del sistema de potencia de ejemplo



Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño**.

Pág. 277

Se debe calcular la magnitud de los voltajes en las barras de este sistema de potencia, junto con sus respectivos ángulos de fase, las potencias que entran y salen del sistema a través de cada barra y los flujos de potencia en las líneas de transmisión y transformadores. Los datos de las barras, líneas de transmisión y transformadores de este sistema de potencia, se muestran en las tablas I, II y III respectivamente.

Tabla I. Datos de las barras del sistema de potencia

Barra	Tipo de Barra	Magnitud de Voltaje en p.u.	Ángulo de Voltaje en grados	Potencia Activa Generada en MW	Potencia Reactiva Generada en MVAR	Potencia Activa de Carga en MW	Potencia Reactiva de Carga en MVAR
1	Compensación	1.00	0	-	-	0	0
2	Carga	-	-	0	0	800	280
3	Voltaje Controlado	1.05	-	520	-	80	40
4	Carga	-	-	0	0	0	0
5	Carga	-	-	0	0	0	0

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Pág. 278

Tabla II. Datos de las líneas de transmisión

Barra a Barra	Resistencia R en p.u.	Reactancia X en p.u.	Susceptancia B en p.u.	Capacidad Máxima (MVA)
2-4	0.00900	0.1000	1.720	1,200
2-5	0.00450	0.0500	0.880	1,200
4-5	0.00225	0.0250	0.440	1,200

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Pág. 278

Tabla III. Datos de los transformadores

Barra a Barra	Resistencia R en p.u.	Reactancia X en p.u.	Capacidad Máxima (MVA)
1-5	0.00150	0.020	600
3-4	0.00075	0.010	1,000

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Pág. 278

4.2 Diseño del algoritmo genético

Un algoritmo genético puede implementarse utilizando cualquier lenguaje de programación; en este trabajo se utilizó el software Matlab versión 6.5 desarrollado por Math Works para implementar el algoritmo genético orientado a solucionar problemas de flujo de potencia; este algoritmo genético se implementó en base a los fundamentos que se describieron en el capítulo 3, como parte de un programa que resuelve problemas de flujo de potencia.

Este programa inicialmente, lee los datos del problema que va a resolver, de un archivo de texto, cuyo nombre se ingresa como único parámetro al ejecutar el programa en Matlab; luego de esto, se genera la población inicial y se evalúa la aptitud de estos individuos; después se seleccionan los individuos que formarán las parejas que van a reproducirse; luego se cruzan estas parejas y se mutan algunos de los nuevos individuos; después de esto, se ajustan los valores genéticos de los nuevos individuos y se evalúa su aptitud; luego se sustituye la población y se revisa si se encontró la solución, si no se encontró, se vuelve a seleccionar individuos para formar las parejas que se reproducirán y se repite el proceso hasta que se encuentre la solución del problema.

Cuando se ha encontrado una solución aceptable, se calculan las potencias activa y reactiva que entran o salen del sistema de potencia a través de cada barra, utilizando los voltajes encontrados por medio del algoritmo genético; también se calculan los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión y transformadores; después de esto, se generan los reportes con la solución del problema.

Para que el archivo de texto con los datos del problema sea leído por este programa, debe tener el formato que se describe a continuación:

En la primera línea, se indica el nombre del sistema de potencia, la potencia base en MVA y la tolerancia en el cálculo de las potencias, esto se hace de la siguiente forma:

SISTEMA [*Nombre*] [*S_Base*] [*Tolerancia*]

Después se especifica la información de las barras; en cada una, se indica el nombre de la barra, el tipo de barra, la magnitud del voltaje en p.u., la potencia activa generada en MW, la potencia reactiva generada en MVAR, la potencia activa de carga en MW, la potencia reactiva de carga en MVAR y la potencia reactiva compensada por bancos de capacitores o inductores en MVAR; en el tipo de barra se coloca “CP” para la barra de compensación, “PV” para las barras de voltaje controlado y “PQ” para las barras de carga; todo esto se indica de acuerdo al siguiente formato:

BARRA [*Nombre*] [*Tipo*] [*Volt*] [*P_Gen*] [*Q_Gen*] [*P_Car*] [*Q_Car*] [*Q_Ban*]

Después se especifica la información de las líneas de transmisión; en cada línea, se indica la barra donde inicia la línea, la barra donde termina, la resistencia en serie de la línea en p.u., la reactancia en serie de la línea en p.u., la susceptancia en paralelo en p.u. y la capacidad máxima de potencia de la línea en MVA, de acuerdo al siguiente formato:

LINEA [*Inicia*] [*Termina*] [*R_Serie*] [*X_Serie*] [*B_Paral*] [*S_Max*]

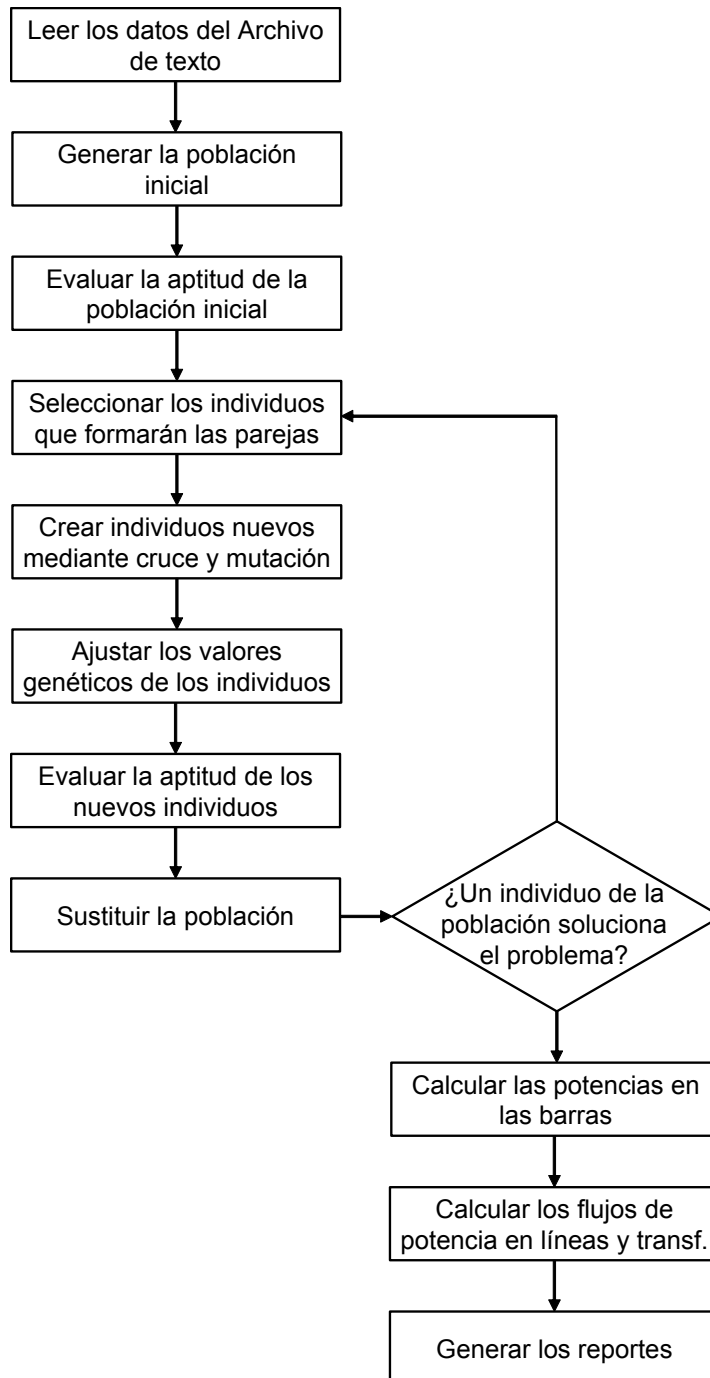
Al final se especifica la información de los transformadores; en cada uno, se indica la barra donde está conectado el primario del transformador, la barra donde está conectado su secundario, la resistencia en serie de su circuito equivalente en p.u., la reactancia en serie de su circuito equivalente en p.u. y la capacidad máxima de potencia en MVA del transformador, de acuerdo al siguiente formato:

TRANSFORMADOR [*Primar*] [*Secund*] [*R_Serie*] [*X_Serie*] [*S_Max*]

Se pueden escribir comentarios en cualquier línea del archivo de texto, colocando el carácter “%” al inicio de la línea, para que ésta no sea leída por el programa. En la información de las barras, no se especifica el ángulo de fase del voltaje en la barra de compensación, ya que el programa asumirá que éste es cero. En las barras de carga se coloca una magnitud de voltaje deseada, generalmente 1.0 por unidad; el intervalo utilizado para generar la población inicial será esta magnitud de voltaje deseada +/- 0.4 por unidad. Para las líneas de transmisión y transformadores, el programa utiliza los datos correspondientes a los circuitos equivalentes simplificados de éstos.

El diagrama de flujo de este programa que soluciona problemas de flujo de potencia por medio de algoritmos genéticos se muestra en la figura 17.

Figura 17. Diagrama de flujo del programa



El código fuente de este programa se presenta en el apéndice A; a este programa se le nombró genflupot y para utilizarse debe escribirse en la ventana de comandos de Matlab genflupot seguido del nombre y extensión del archivo de texto, que contiene la información del problema de flujo de potencia que se va a resolver.

4.3 Ejecución del programa

Para resolver, por medio de este programa, el problema de flujo de potencia que se describió al inicio de este capítulo, se creó un archivo de texto con la información de este problema y de acuerdo a las especificaciones descritas anteriormente; a este archivo se le nombró Ejemplo.txt y su contenido se muestra en el apéndice B; después de crear el archivo de texto, se escribió en la ventana de comandos de Matlab, lo siguiente:

>> genflupot Ejemplo.txt

Generando los siguientes resultados:

Respuesta Aceptable

```

|           Resultados de flujo de potencia del sistema de potencia Ejemplo1           |
|           Obtenidos en 90 generaciones                                           |
|===== Información de Barras =====|
Numero  Nombre  Magnitud del  Angulo de  Generación en  Carga en  Banco
de Barra de Barra Voltaje (p.u.) Fase (Grados)  MW y MVAR  MW y MVAR  de Cap.
          PG    QG    PL    QL    QC
1         Uno   1.0000    0.0000    394.86   114.29    0.00    0.00    0.00
2         Dos   0.8338   -22.4069    0.00     0.00   800.00   280.00    0.00
3         Tres  1.0500   -0.5980   519.99   337.48    80.00    40.00    0.00
4        Cuatro 1.0193   -2.8345    0.00     0.00    0.01   -0.00    0.00
5         Cinco 0.9743   -4.5482    0.00     0.00    0.01   -0.00    0.00

```



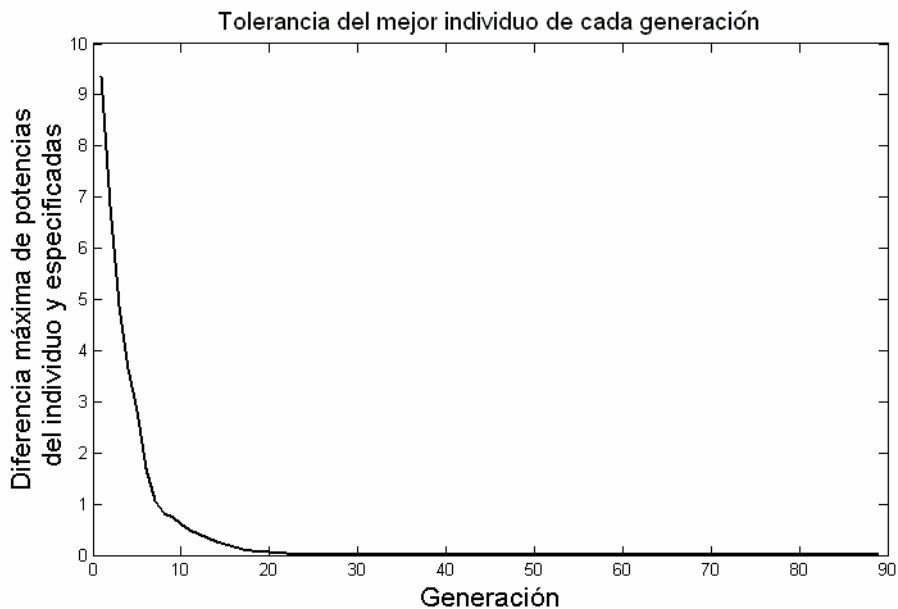
```

|===== Información de Flujo de Potencia en Líneas y Transformadores=====|
Tipo          Barra a Barra          P en MW          Q en MVAR          S en MVA
Línea         Dos          Cuatro          -291.84          -139.11          323.30
Línea         Cuatro         Dos          303.68          121.54          327.10
Línea         Dos          Cinco          -508.16          -140.89          527.33
Línea         Cinco         Dos          525.67          263.02          587.80
Línea         Cuatro         Cinco          134.38          150.36          201.66
Línea         Cinco         Cuatro          -133.34          -182.53          226.05
Transformador Uno          Cinco          394.86          114.29          411.07
Transformador Cinco         Uno          -392.33          -80.49          400.50
Transformador Tres          Cuatro          439.99          297.48          531.12
Transformador Cuatro        Tres          -438.07          -271.89          515.59
>>

```

El resultado se obtuvo en 90 generaciones, con una población de 300 individuos y 150 cruces en cada generación; en la figura 18 se muestra la gráfica de cómo el programa se fue acercando a la tolerancia aceptable durante su ejecución; esta gráfica fue generada por el programa, después de generar los reportes.

Figura 18. Gráfica de tolerancia versus generaciones del ejemplo



4.4 Interpretación de la solución

En la gráfica de la figura 18 se puede observar que al inicio, el algoritmo genético se encontraba bastante lejos de la solución, luego conforme avanzaron algunas generaciones éste se acercó a la solución en forma exponencial, hasta que la encontró en la generación número noventa.

La respuesta del problema de flujo de potencia, descrito al inicio de este capítulo, se encuentra en el libro *Sistemas de Potencia* escrito por Duncan Glover y Mulukutla Sarma⁶; esta información se muestra en las tablas IV, V y VI.

Tabla IV. Información de respuesta de las barras del ejemplo

Número de Barra	Voltaje		Potencia			
	Magnitud en p.u.	Ángulo de fase en grados	Activa	Reactiva	Activa	Reactiva
			Generación		Carga	
			PG en MW	QG en MVAR	PL en MW	QL en MVAR
1	1.000	0.000	394.8	114.4	0	0
2	0.834	-22.407	0	0	800	280
3	1.050	-0.597	520	337.6	80	40
4	1.019	-2.834	0	0	0	0
5	0.974	-4.548	0	0	0	0

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Tabla V. Flujo de potencia en las líneas de transmisión

Número de Línea	Barra a Barra	Potencia		
		Activa en MW	Reactiva en MVAR	Aparente en MVA
1	2 a 4	-292.0	-139.2	323.2
	4 a 2	303.6	121.6	327.2
2	2 a 5	-508.0	-140.8	527.2
	5 a 2	525.6	263.2	587.6
3	4 a 5	134.4	150.4	201.6
	5 a 4	-133.2	-182.4	226.0

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Pág. 288

Tabla VI. Flujo de potencia en los transformadores

Número de Transformador	Barra a Barra	Potencia		
		Activa en MW	Reactiva en MVAR	Aparente en MVA
1	1 a 5	394.8	114.4	411.2
	5 a 1	-392.4	-80.4	400.4
2	3 a 4	440.0	297.6	531.2
	4 a 3	-438.0	-272.0	515.6

Fuente: Duncan Glover y Mulukutla Sarma, **Sistemas de potencia, análisis y diseño.**

Pág. 288

Al comparar los resultados obtenidos por el programa con la información de las tablas IV, V y VI, se observa que el programa resolvió correctamente este problema de flujo de potencia y con esto se demuestra la capacidad de los algoritmos genéticos para resolver este tipo de problemas.

En el ejemplo que se resolvió se puede notar que no se excedió la capacidad de las líneas de transmisión y transformadores, pero la magnitud del voltaje en la barra 2 se encuentra por debajo del rango aceptable que es de 0.95 a 1.05 por unidad; para solucionar esto, se debe conectar a esta barra un banco de capacitores; esto elevará la magnitud del voltaje y suministrará parte de la potencia reactiva demandada por la carga conectada a esta barra.

En este ejemplo se demostró que los algoritmos genéticos son capaces de resolver problemas de flujo de potencia, aunque se necesitó de muchas generaciones para encontrar una solución dentro de la tolerancia aceptable, lo que hizo que la ejecución del programa fuera un poco tardada.

Los algoritmos genéticos tienen las ventajas de buscar la solución a partir de una población de puntos y no necesitar de derivadas de las ecuaciones de flujo de potencia; la desventaja de los algoritmos genéticos es que podrían ser un poco tardados, ya que el tamaño de la población es proporcional al número de barras y debido a que estos se rigen por reglas probabilísticas, podrían necesitar de muchas generaciones para llegar a la solución; por esta razón podría preferirse el uso de otros métodos para resolver este tipo de problemas. A pesar de esto, los algoritmos genéticos constituyen una alternativa para resolver problemas de flujo de potencia cuyo funcionamiento es muy diferente a los métodos iterativos normalmente utilizados.

CONCLUSIONES

1. Un problema de flujo de potencia consiste en encontrar los valores de magnitud y ángulo de fase de los voltajes en las barras de un sistema de potencia en estado estacionario, de acuerdo a un conjunto de datos especificados de potencias y voltajes, para después utilizar estos valores de voltaje encontrados, para calcular la potencia activa y reactiva que entra o sale del sistema de potencia a través de cada barra y también el flujo de potencia activa y reactiva en todas las líneas de transmisión y transformadores del sistema.
2. Los algoritmos genéticos son técnicas de programación que imitan a los procesos de selección, reproducción sexual y mutación que intervienen en la evolución biológica de las especies, como estrategia para resolver problemas de búsqueda y optimización, constituyendo una buena alternativa en la resolución de este tipo de problemas y demostrando el poder de los principios evolutivos.
3. Los algoritmos genéticos pueden ser utilizados para resolver problemas de flujo de potencia, como una alternativa a los métodos iterativos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel, obteniendo la solución por medio de la evolución de una población de individuos, cada uno, con su propio grupo de valores para los voltajes desconocidos, siendo este grupo de valores, una posible solución al problema.

4. El principio de optimización utilizado por los algoritmos genéticos, consiste en que los mejores individuos tienen mayor probabilidad de reproducirse y heredar su información genética a las nuevas generaciones, mientras que los peores individuos tienden a desaparecer sin heredar sus valores genéticos, siendo medida la capacidad de cada individuo por medio de la función de aptitud.

5. En la resolución de problemas de flujo de potencia, los algoritmos genéticos poseen las ventajas de buscar la solución a partir de una población de puntos que representan posibles soluciones y no necesitar hacer uso de derivadas parciales de las ecuaciones de flujo de potencia, siendo menos susceptibles a caer en máximos locales y mas sencillos de programar en un computador.

6. En la resolución de problemas de flujo de potencia, la desventaja de los algoritmos genéticos es que podrían demorar mucho tiempo en encontrar la solución, debido a que el tamaño de la población es proporcional al número de barras del sistema y que éstos se rigen por reglas probabilísticas; esto provoca que aumente el tiempo de búsqueda de la solución al aumentar el número de barras o disminuir el valor de la tolerancia aceptable.

7. Se desarrolló un programa que permite resolver problemas de flujo de potencia, por medio de algoritmos genéticos, a partir de un archivo de texto con los datos de entrada, escritos de acuerdo a un formato específico; este programa se desarrolló en el software Matlab, en base a los fundamentos descritos en este trabajo; el programa presenta la solución de cada problema por medio de reportes generados al final de su ejecución.

8. Se demostró la capacidad de los algoritmos genéticos para resolver problemas de flujo de potencia por medio de un ejemplo, en el cual se resolvió un problema de flujo de potencia para un sistema de cinco barras, tres líneas de transmisión, dos transformadores, dos generadores y dos cargas, obteniendo los resultados correctos; este problema se resolvió por medio de un programa desarrollado en base a los fundamentos descritos en este trabajo.

RECOMENDACIONES

1. Al resolver problemas de flujo de potencia por medio de cualquier método, se debe escoger adecuadamente los intervalos o valores iniciales para las magnitudes de voltaje desconocidas, ya que existen soluciones que permiten obtener los mismos valores de potencias especificadas, pero con niveles de voltaje indeseables; lo recomendable es seleccionar para las magnitudes de voltaje, intervalos alrededor de la unidad o valores iniciales de 1 por unidad.
2. Los algoritmos genéticos pueden utilizarse para resolver diversos problemas de búsqueda u optimización; para esto hay que adaptar a cada aplicación, los procesos descritos en el capítulo dos, principalmente la evaluación del individuo por medio de la función de aptitud y la operación de cruce.
3. Los algoritmos genéticos deben considerarse una alternativa para resolver problemas de flujo de potencia, tomando en cuenta que éstos funcionan de forma muy diferente a los métodos iterativos normalmente utilizados para resolver este tipo de problemas.
4. La función de aptitud debe diseñarse en forma específica para cada tipo de aplicación; esta función debe asignar a cada individuo, un valor numérico que represente su cercanía con la solución del problema y permita compararlo con otros individuos.

5. Los algoritmos genéticos deben considerarse un buen método de solución en aquellas aplicaciones que no pueden ser resueltas por los métodos de búsqueda tradicionales, a causa de existir inconvenientes para realizar derivadas parciales o que la solución tienda a caer en máximos locales.

6. Un algoritmo genético puede implementarse utilizando cualquier lenguaje de programación; en este trabajo se utilizó el software Matlab, por ser el más popular en el campo de la ingeniería eléctrica, pero para disminuir el tiempo de búsqueda de la solución, es preferible utilizar otro lenguaje de programación como por ejemplo C++.

7. El programa para resolver problemas de flujo de potencia que se desarrolló en el capítulo cuatro, puede utilizarse para resolver cualquier problema de este tipo, siempre que el archivo de texto se elabore de acuerdo al formato que se explicó en este trabajo.

8. Se pueden utilizar algoritmos genéticos para resolver problemas de flujo de potencia con cualquier cantidad de barras, generadores, cargas, líneas de transmisión y transformadores, pero debe considerarse que el tiempo de ejecución del algoritmo aumentará con el número de barras del sistema.

REFERENCIAS

1. John J. Grainger. **Análisis de sistemas de potencia.** (México: Editorial McGraw Hill Interamericana, 1996) pp. 1-35
2. William D. Stevenson. **Análisis de sistemas eléctricos de potencia.** (México: Editorial McGraw Hill Interamericana, 1988) pp. 108-132
3. Ibid., pp. 137-172
4. John J. Grainger, Op. cit., pp. 309-353
5. J. Duncan Glover y Mulukutla S. Sarma. **Sistemas de Potencia, Análisis y diseño.** (México: Editorial International Thomson, 2004) pp.277-278
6. Ibid., p. 288

BIBLIOGRAFÍA

1. Russell, Stuart J. y Meter Norvig. **Inteligencia artificial, Un enfoque moderno**. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 1996. 1,008 pp.
2. Stevenson, William D. **Análisis de sistemas eléctricos de potencia**. México: Editorial McGraw Hill Interamericana, 1988. 396 pp.
3. Winston, Patrick Henry. **Inteligencia artificial**. 3ª. Edición; Estados Unidos: Editorial Addison Wesley Iberoamericana, 1994. 832 pp.

Referencias electrónicas

4. Guevara Cruz, María Esther. **Uso de algoritmos genéticos**. <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/algoritmos-geneticos/algoritmos-geneticos.html>. México, Marzo 2007.
5. Herrán Gascón, Manuel. **Algoritmos Genéticos Avanzados**. <http://www.redcientifica.com/gaia/agsp-c.htm>. Estados Unidos, Abril de 2007.
6. Iglesias Otero, María Teresa. **Biología + Matemáticas + Informática = Algoritmos Genéticos**. <http://divulgamat.ehu.es/weborriak/TestuakOnLine/02-03/PG02-03-iglesias.pdf>. España: Universidad de Coruña, Abril de 2007.
7. Merelo Guervós, Juan Julián. **Informática evolutiva, Algoritmos genéticos**. <http://geneura.ugr.es/%7Ejmerelo/ie/ie.ps.gz>. España, Marzo 2007.

8. Rennard, Jean Philippe. **Introduction to Genetic Algorithms.** <http://www.rennard.org/alife/english/gavintrqb.html>. Estados Unidos, Abril de 2007.
9. Rodríguez Alberich, Gabriel. **Algoritmos genéticos y computación evolutiva.** <http://the-geek.org/docs/algen/algen.html>. Estados Unidos, Marzo 2007.
10. Rodríguez Vela, Camino y José Ramón Quevedo Pérez. **Algoritmos Genéticos.** <http://lear.inforg.uniovi.es/ia/Genetico-TSP/AGs.htm>. España, Abril de 2007.
11. Tovar Hernández, José Horacio y Héctor Francisco Ruiz Paredes. **Modelado y Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia en Estado Estacionario.** <http://elec.itmorelia.edu.mx/tovar/index.htm>. México, Abril de 2007.

APÉNDICE A

A continuación se presenta el código fuente del programa realizado en Matlab, para resolver problemas de flujo de potencia por medio de algoritmos genéticos, utilizado en el ejemplo del capítulo 4.

```
function genflupot(nomarchivo)
%José Francisco Castro García
%Trabajo de Graduación previo a obtener el título de Ingeniero Electricista
%Este programa calcula el flujo de potencia en un sistema de potencia utilizando algoritmos
%genéticos, los datos deben ser ingresados por medio de un archivo de texto que se ingresa
%como parámetro al utilizar este programa; para resolver un problema de flujo de potencia
%se debe teclear en la ventana de comandos: genflupot('nombre del archivo');
comentario=0; %numero de comentarios
numbarras=0; %numero de barras
nbarpq=0; %numero de barras pq
nbarpv=0; %numero de barras pv
numconec=0; %numero de lineas y transformadores
sistema=0; %Si existe la informacion del sistema de potencia
NomSistema=""; %Nombre del Sistema de potencia
Base=100; %Potencia Base en MVA
Tolerancia=0.0001; %Tolerancia en las potencias calculadas
%Lectura de la informacion del archivo de entrada
fid= fopen(nomarchivo,'r'); % Abrir el archivo con los datos del problema en modo lectura
if (fid==-1) %fid = -1 cuando hay error en la lectura del archivo
    mensaje =strcat('ERROR: No se puede abrir el archivo: ',nomarchivo);
    error(mensaje);
else %Si no hay error en la lectura del archivo
    linea=fgetl(fid); %lee una linea
    while feof(fid) == 0 %hasta que finalice de leer el archivo de entrada
        palabra=strread(linea,'%s'); %Separa las palabras en esa linea
        if (strncmpi(palabra{1},'%',1)==1) %Si se trata de un comentario
            comentario=comentario+1;
        elseif (strncmpi(palabra{1},'SISTEMA',6)==1) %Si es información del sistema
            if(sistema==0)
                sistema=1;
                NomSistema=palabra{2};
                Base=str2num(palabra{3});
                Tolerancia=str2num(palabra{4});
            else
                error('No puede existir mas de un sistema');
            end
        elseif (strncmpi(palabra{1},'BARRA',5)==1) %Si es información de una barra
            numbarras=numbarras+1;
            Barra(numbarras).Nombre=palabra{2};
            if (strncmpi(palabra{3},'PQ')==1) %Si es Barra de Carga
                nbarpq=nbarpq+1;
                Barra(numbarras).Tipo=1;
            elseif (strncmpi(palabra{3},'PV')==1) %Si es Barra de Voltaje controlado
```

```

        nbarpv=nbarpv+1;
        Barra(numbarras).Tipo=2;
    elseif (strcmpi(palabra{3},'CP')==1) %Si es la Barra de Compensación
        Barra(numbarras).Tipo=3;
        Barra(numbarras).Ang=0;
    end
    Barra(numbarras).Volt=str2num(palabra{4});
    Barra(numbarras).PG=str2num(palabra{5})/Base;
    Barra(numbarras).QG=str2num(palabra{6})/Base;
    Barra(numbarras).PL=str2num(palabra{7})/Base;
    Barra(numbarras).QL=str2num(palabra{8})/Base;
    Barra(numbarras).QC=str2num(palabra{9})/Base;
    Barra(numbarras).P=Barra(numbarras).PG-Barra(numbarras).PL;
    Barra(numbarras).Q=Barra(numbarras).QG+Barra(numbarras).QC-
Barra(numbarras).QL;
    elseif (strncmpi(palabra{1},'LINEA',5)==1) %Si es información de una línea de transmisión
        numconec=numconec+1;
        Conexion(numconec).Tipo='Linea    ';
        Conexion(numconec).Ndesde=palabra{2};
        Conexion(numconec).Nhacia=palabra{3};
        Conexion(numconec).R=str2num(palabra{4});
        Conexion(numconec).X=str2num(palabra{5});
        Conexion(numconec).B=str2num(palabra{6});
        Conexion(numconec).Capacidad=str2num(palabra{7});
    elseif (strncmpi(palabra{1},'TRANSFORMADOR',13)==1) %Si es información de un
transformador
        numconec=numconec+1;
        Conexion(numconec).Tipo='Transformador';
        Conexion(numconec).Ndesde=palabra{2};
        Conexion(numconec).Nhacia=palabra{3};
        Conexion(numconec).R=str2num(palabra{4});
        Conexion(numconec).X=str2num(palabra{5});
        Conexion(numconec).B=0;
        Conexion(numconec).Capacidad=str2num(palabra{6});
    end
    linea=fgetl(fid); %lee una línea del archivo de entrada
end
end
fclose(fid); %Cierra el archivo de entrada
%Colocar a las líneas los números de barras de inicio y fin
for c=1:1:numconec
    b=1;
    while((strcmpi(Barra(b).Nombre,Conexion(c).Ndesde)==0)&&(b<numbarras))
        b=b+1;
    end
    Conexion(c).Desde=b;
    b=1;
    while(strcmpi(Barra(b).Nombre,Conexion(c).Nhacia)==0)&&(b<numbarras)
        b=b+1;
    end
    Conexion(c).Hacia=b;
end
end

```



```

numpob=300; %Tamaño de la población
numcruces=150; %Numero de cruces en cada generación
numgeneraciones=150; %Numero máximo de generaciones
%Calcular la Matriz de admitancias del sistema de potencia
Ybarra=zeros(numbarras,numbarras); %Matriz de admitancias
for c=1:1:length(Conexion)
    %Elementos diagonales

Ybarra(Conexion(c).Desde,Conexion(c).Desde)=Ybarra(Conexion(c).Desde,Conexion(c).Desde)+1/(Conexion(c).R+j*Conexion(c).X)+j*0.5*Conexion(c).B;

Ybarra(Conexion(c).Hacia,Conexion(c).Hacia)=Ybarra(Conexion(c).Hacia,Conexion(c).Hacia)+1/(Conexion(c).R+j*Conexion(c).X)+j*0.5*Conexion(c).B;
    %Elementos fuera de la diagonal

Ybarra(Conexion(c).Desde,Conexion(c).Hacia)=Ybarra(Conexion(c).Desde,Conexion(c).Hacia)-1/(Conexion(c).R+j*Conexion(c).X);

Ybarra(Conexion(c).Hacia,Conexion(c).Desde)=Ybarra(Conexion(c).Hacia,Conexion(c).Desde)-1/(Conexion(c).R+j*Conexion(c).X);
end
%Separar la matriz de admitancias en sus magnitudes y angulos
for i=1:1:numbarras
    for h=1:1:numbarras
        Ymag(i,h)=abs(Ybarra(i,h)); %Magnitud
        Yteta(i,h)=rad2deg(angle(Ybarra(i,h))); %Ángulo
    end
end
%Generar poblacion inicial
for m=1:1:numpob
    g=1;
    for n=1:1:numbarras
        if(Barra(n).Tipo==1) %El intervalo de voltajes es el valor ingresado +/- 0.4
            Individuo(m).Gen(g)=Barra(n).Volt-0.4+0.8*rand(1);
            TipoGen(g)=1; %%Magnitud de voltaje
            g=g+1;
            Individuo(m).Gen(g)=-180+360*rand(1);
            TipoGen(g)=2; %%Angulo de voltaje
            g=g+1;
        elseif(Barra(n).Tipo==2)
            Individuo(m).Gen(g)=-180+360*rand(1);
            TipoGen(g)=2; %%Angulo de voltaje
            g=g+1;
        end
    end
end
%Evaluar la aptitud de los individuos de la población inicial
for m=1:1:numpob
    %Asignar valores a los voltajes con el genotipo y los valores proporcionados
    g=1;
    for n=1:1:numbarras
        if(Barra(n).Tipo==1)%Barra de Carga

```

```

Vm(n)=Individuo(m).Gen(g);
g=g+1;
Angm(n)=Individuo(m).Gen(g);
g=g+1;
elseif(Barra(n).Tipo==2)%Barra de Voltaje Controlado
Vm(n)=Barra(n).Volt;
Angm(n)=Individuo(m).Gen(g);
g=g+1;
else %Barra de compensación
Vm(n)=Barra(n).Volt;
Angm(n)=Barra(n).Ang;
end
end
%Calcular la potencia activa en todas las barras para el individuo actual
%y las diferencias de los valores de potencia del individuo actual
d=1;
for k=1:1:numbarras
if(Barra(k).Tipo~=3) %Si es barra de carga o de voltaje controlado
Pcalc(k)=0;
for n=1:1:numbarras
Pcalc(k)=Pcalc(k)+Ymag(k,n)*Vm(k)*Vm(n)*cos(deg2rad(Yteta(k,n)+Angm(n)-
Angm(k)));
end
Delta(d)=abs(Barra(k).P-Pcalc(k)); %Diferencia entre las potencias del individuo
d=d+1; % y las especificadas
end
if(Barra(k).Tipo==1) %Si es barra de carga
Qcalc(k)=0;
for n=1:1:numbarras
Qcalc(k)=Qcalc(k)-Ymag(k,n)*Vm(k)*Vm(n)*sin(deg2rad(Yteta(k,n)+Angm(n)-
Angm(k)));
end
Delta(d)=abs(Barra(k).Q-Qcalc(k)); %Diferencia entre las potencias del individuo
d=d+1; % y las especificadas
end
end
end
Individuo(m).Toler=max(Delta); %Máxima diferencia entre las potencias del indiv. y las espec.
Individuo(m).Aptitud=1/(max(Delta)+mean(Delta)); %Asignar un valor de Aptitud del individuo
end
%Fin de la evaluación de la aptitud
%Ciclo del algoritmo genético
Aceptable=0; %Ya se llevo a la tolerancia aceptable
generacion=1; %Numero de generaciones
Historial=[];
while (generacion<numgeneraciones&&Aceptable==0)
%Calcular la probabilidad de reproducción de todos los individuos
Suma=0;
for m=1:1:numpob
Suma=Suma+Individuo(m).Aptitud; %Sumar todas las aptitudes
end
for m=1:1:numpob
Individuo(m).Prob=(Individuo(m).Aptitud/Suma); %Calcular la probabilidad de reproducción

```

```

end                                     %de cada individuo
%Selección por ruleta, cruce y mutación de individuos
Acum=0;
for m=1:1:numprob
    Acum=Acum+Individuo(m).Prob; %Asignar un valor de probabilidad acumulada a cada uno
    Individuo(m).Probacum=Acum;
end
%Obtener nuevos individuos ""crossover""
h=1;
for p=1:1:numcruces
    %Seleccionar la pareja (m1,m2) por el método de ruleta
    numero=rand(1);
    m1=1;
    while numero>Individuo(m1).Probacum
        m1=m1+1;
    end
    numero=rand(1);
    m2=1;
    while numero>Individuo(m2).Probacum
        m2=m2+1;
    end
    %Evitar que m1 sea igual a m2
    while m1==m2
        numero=rand(1);
        m2=1;
        while numero>Individuo(m2).Probacum
            m2=m2+1;
        end
    end
    %Cruzar los individuos m1 y m2
    %Crean 3 hijos por cada pareja
    for g=1:1:(numbarras+nbarpq-1)
        cruce=randint(1,1,3);
        if(cruce==0)
            Hijo(h).Gen(g)=Individuo(m1).Gen(g);
            Hijo(h+1).Gen(g)=(Individuo(m1).Gen(g)+Individuo(m2).Gen(g))/2;
            Hijo(h+2).Gen(g)=Individuo(m2).Gen(g);
        elseif(cruce==1)
            Hijo(h).Gen(g)=(Individuo(m1).Gen(g)+Individuo(m2).Gen(g))/2;
            Hijo(h+1).Gen(g)=Individuo(m2).Gen(g);
            Hijo(h+2).Gen(g)=Individuo(m1).Gen(g);
        elseif(cruce==2)
            Hijo(h).Gen(g)=Individuo(m2).Gen(g);
            Hijo(h+1).Gen(g)=Individuo(m1).Gen(g);
            Hijo(h+2).Gen(g)=(Individuo(m1).Gen(g)+Individuo(m2).Gen(g))/2;
        end
    end
    h=h+3;
end
numhijos=size(Hijo);
%Mutar a todos los hijos
for h=1:1:numhijos(2)

```

```

if rand(1)>0.999 %Con una probabilidad de 1 en 1000
    posicion=randint(1,1,(numbarras+nbarpq-1))+1;
    if(TipoGen(posicion)==1) %%Magnitud de voltaje
        Hijo(h).Gen(posicion)=Hijo(h).Gen(posicion)+0.1*randsrc; %Aumentar o reducir 0.1
    elseif(TipoGen(posicion)==2) %%Angulo de voltaje
        Hijo(h).Gen(posicion)=Hijo(h).Gen(posicion)+0.1*randsrc; %Aumentar o reducir 0.1
    end
end
end
end
%Ajustar los valores genéticos de todos los hijos
for h=1:1:numhijos(2)
    g=1;
    for n=1:1:numbarras
        if(Barra(n).Tipo==1) %Asignar valores a la función de ajuste
            Barra(n).Volt=Hijo(h).Gen(g); %%Magnitud de voltaje
            g=g+1;
            Barra(n).Ang=Hijo(h).Gen(g); %%Angulo de voltaje
            g=g+1;
        elseif(Barra(n).Tipo==2)
            Barra(n).Ang=Hijo(h).Gen(g); %%Angulo de voltaje
            g=g+1;
        end
    end
end
g=1;
for k=1:1:numbarras %Evaluar la función de ajuste
    if (Barra(k).Tipo==1)%Barra de carga
        Voltaje=(Barra(k).P-
j*Barra(k).Q)/(Ybarra(k,k)*Barra(k).Volt*(cos(deg2rad(Barra(k).Ang))-
j*sin(deg2rad(Barra(k).Ang))));
        for n=1:1:numbarras
            if (n~=k)
                Voltaje=Voltaje-
Ybarra(k,n)*Barra(n).Volt*(cos(deg2rad(Barra(n).Ang))+j*sin(deg2rad(Barra(n).Ang)))/Ybarra(k,k
);
            end
        end
        Hijo(h).Gen(g)=abs(Voltaje); %Colocar los nuevos valores genéticos
        g=g+1;
        Hijo(h).Gen(g)=rad2deg(angle(Voltaje));
        g=g+1;
    elseif(Barra(k).Tipo==2)%Barra de voltaje controlado
        Q=0;
        for n=1:1:numbarras
            Q=Q-Ymag(k,n)*Barra(k).Volt*Barra(n).Volt*sin(deg2rad(Yteta(k,n)+Barra(n).Ang-
Barra(k).Ang));
        end
        Voltaje=(Barra(k).P-j*Q)/(Ybarra(k,k)*Barra(k).Volt*(cos(deg2rad(Barra(k).Ang))-
j*sin(deg2rad(Barra(k).Ang))));
        for n=1:1:numbarras
            if (n~=k)

```

```

        Voltaje=Voltaje-
Ybarra(k,n)*Barra(n).Volt*(cos(deg2rad(Barra(n).Ang))+j*sin(deg2rad(Barra(n).Ang)))/Ybarra(k,k
);
        end
        end
        Hijo(h).Gen(g)=rad2deg(angle(Voltaje)); %Colocar los nuevos valores genéticos
        g=g+1;
    end
end
end
%Evaluar aptitud de todos los hijos
for h=1:1:numhijos(2)
    %Asignar valores a los voltajes con el genotipo y los valores proporcionados
    g=1;
    for n=1:1:numbarras
        if(Barra(n).Tipo==1)%Barra de Carga
            Vm(n)=Hijo(h).Gen(g);
            g=g+1;
            Angm(n)=Hijo(h).Gen(g);
            g=g+1;
        elseif(Barra(n).Tipo==2)%Barra de Voltaje Controlado
            Vm(n)=Barra(n).Volt;
            Angm(n)=Hijo(h).Gen(g);
            g=g+1;
        else %Barra de compensación
            Vm(n)=Barra(n).Volt;
            Angm(n)=Barra(n).Ang;
        end
    end
end
%Calcular la potencia activa en todas las barras para el hijo actual
%y las diferencias de los valores de potencia del hijo actual
d=1;
for k=1:1:numbarras
    if(Barra(k).Tipo~=3) %Si es barra de carga o de voltaje controlado
        Pcalc(k)=0;
        for n=1:1:numbarras
            Pcalc(k)=Pcalc(k)+Ymag(k,n)*Vm(k)*Vm(n)*cos(deg2rad(Yteta(k,n)+Angm(n)-
Angm(k)));
        end
        Delta(d)=abs(Barra(k).P-Pcalc(k)); %Diferencia entre las potencias del individuo
        d=d+1; % y las proporcionadas
    end
    if(Barra(k).Tipo==1) %Si es barra de carga
        Qcalc(k)=0;
        for n=1:1:numbarras
            Qcalc(k)=Qcalc(k)-Ymag(k,n)*Vm(k)*Vm(n)*sin(deg2rad(Yteta(k,n)+Angm(n)-
Angm(k)));
        end
        Delta(d)=abs(Barra(k).Q-Qcalc(k)); %Diferencia entre las potencias del individuo
        d=d+1; % y las proporcionadas
    end
end
end

```

```

    Hijo(h).Toler=max(Delta); %Máximo valor de diferencia entre las potencias
    Hijo(h).Aptitud=1/(max(Delta)+mean(Delta)); %Asignar un valor de Aptitud del individuo
end
%Fin de la evaluacion de la aptitud
%Eliminar los campos Probacum y Prob para que las estructuras Hijo e Individuo sean iguales
Individuo=rmfield(Individuo,{'Probacum' 'Prob'});
%Reemplazar los hijos mas adaptados por los individuos menos adaptados de la población
posh=find([Hijo.Aptitud]==max([Hijo.Aptitud]));
posp=find([Individuo.Aptitud]==min([Individuo.Aptitud]));
while(Hijo(posh(1)).Aptitud>Individuo(posp(1)).Aptitud)
    Individuo(posp(1))=Hijo(posh(1));
    Hijo(posh(1)).Aptitud=0;
    posh=find([Hijo.Aptitud]==max([Hijo.Aptitud]));
    posp=find([Individuo.Aptitud]==min([Individuo.Aptitud]));
end
%Buscar el individuo con valor menor de tolerancia
posmejor=find([Individuo.Toler]==min([Individuo.Toler]));
Historial=[Historial Individuo(posmejor(1)).Toler];
%Verificar si se ha alcanzado la tolerancia aceptable
if Individuo(posmejor(1)).Toler<Tolerancia
    msol=posmejor(1); %Si se alcanzo la tolerancia aceptable
    disp('Respuesta Aceptable');
    Aceptable=1;
    g=1;
    for n=1:1:numbarras %Colocar los valores del gen del individuo a los voltajes
        if(Barra(n).Tipo==1)%Barra de Carga
            Barra(n).Volt=Individuo(msol).Gen(g);
            g=g+1;
            Barra(n).Ang=Individuo(msol).Gen(g);
            g=g+1;
        elseif(Barra(n).Tipo==2)%Barra de Voltaje Controlado
            Barra(n).Ang=Individuo(msol).Gen(g);
            g=g+1;
        end
    end
end
generacion=generacion+1; %Nueva generación
end
plot(Historial); %Graficar la diferencia máxima de potencia a través de las generaciones
title('Tolerancia del mejor individuo de cada generacion');
ylabel('Diferencia maxima de potencias del individuo y especificadas');
xlabel('Generacion');
if(Aceptable==0) %Si llego al numero máximo de generaciones sin encontrar una solucion
    disp('No se encontro la solucion');
else %Si se encontró la solución
    for k=1:1:numbarras %Se calculan los valores de potencia
        Barra(k).P=0;
        for n=1:1:numbarras
            Barra(k).P=Barra(k).P+Ymag(k,n)*Barra(k).Volt*Barra(n).Volt*cos(deg2rad(Yteta(k,n)+Barra(n).Ang-Barra(k).Ang));
        end
    end
end

```

```

end
for k=1:1:numbarras
    Barra(k).Q=0;
    for n=1:1:numbarras
        Barra(k).Q=Barra(k).Q-
Ymag(k,n)*Barra(k).Volt*Barra(n).Volt*sin(deg2rad(Yteta(k,n)+Barra(n).Ang-Barra(k).Ang));
    end
end %Se despliegan los datos de salida
fprintf('|
|n',NomSistema); %Se despliegan los datos de salida
fprintf('|
|n',generacion); Obtenidos en %4d generaciones
fprintf('|===== Informacion de
Barras=====|n');
fprintf(' Numero Nombre Magnitud del Angulo de Generacion en MW y MVAR
Carga en MW y MVAR Banco de Cap.\n');
fprintf(' de Barra de Barra Voltaje (pu) Fase (Grados) PG QG PL
QL QC\n');
for n=1:1:numbarras
    if (Barra(n).Tipo==1)
        PG=Barra(n).PG;
        PL=PG-Barra(n).P;
        QG=Barra(n).QG;
        QC=Barra(n).QC;
        QL=QG+QC-Barra(n).Q;
    else
        PL=Barra(n).PL;
        PG=Barra(n).P+PL;
        QL=Barra(n).QL;
        QC=Barra(n).QC;
        QG=Barra(n).Q+QL-QC;
    end
    fprintf(' %3d %10s %4.4f %4.4f %8.2f %8.2f %8.2f %8.2f
%8.2f\n',n,Barra(n).Nombre,Barra(n).Volt,Barra(n).Ang,PG*Base,QG*Base,PL*Base,QL*Base,Q
C*Base);
end
fprintf('\n');
fprintf('|===== Informacion de Flujo de Potencia en Lineas y
Transformadores=====|n');
fprintf(' Tipo Barra a Barra P en MW Q en MVAR S en MVA\n');
for c=1:1:numconec
    R=Conexion(c).R;
    X=Conexion(c).X;
    B=Conexion(c).B;
    Vi=Barra(Conexion(c).Desde).Volt;
    Vj=Barra(Conexion(c).Hacia).Volt;
    AngPot=deg2rad(Barra(Conexion(c).Desde).Ang-Barra(Conexion(c).Hacia).Ang);
    Pij=(R*Vi^2-R*Vi*Vj*cos(AngPot)+X*Vi*Vj*sin(AngPot))/(R^2+X^2)*Base;
    Qij=(X*Vi^2-X*Vi*Vj*cos(AngPot)-R*Vi*Vj*sin(AngPot))/(R^2+X^2)*Base-0.5*B*Vi^2*Base;
    Sij=sqrt(Pij^2+Qij^2);
    if (Sij>Conexion(c).Capacidad)
        Sobrepasso='Capacidad Sobrepasada';
end

```

```

else
    Sobrepasso="";
end
fprintf('%8s      %10s      %10s      %8.2f      %8.2f      %8.2f
%15s\n',Conexion(c).Tipo,Conexion(c).Ndesde,Conexion(c).Nhacia,Pij,Qij,Sij,Sobrepasso);
Vi=Barra(Conexion(c).Hacia).Volt;
Vj=Barra(Conexion(c).Desde).Volt;
AngPot=deg2rad(Barra(Conexion(c).Hacia).Ang-Barra(Conexion(c).Desde).Ang);
Pij=(R*Vi^2-R*Vi*Vj*cos(AngPot)+X*Vi*Vj*sin(AngPot))/(R^2+X^2)*Base;
Qij=(X*Vi^2-X*Vi*Vj*cos(AngPot)-R*Vi*Vj*sin(AngPot))/(R^2+X^2)*Base-0.5*B*Vi^2*Base;
Sij=sqrt(Pij^2+Qij^2);
if (Sij>Conexion(c).Capacidad)
    Sobrepasso='Capacidad Sobrepasada';
else
    Sobrepasso="";
end
fprintf('%8s      %10s      %10s      %8.2f      %8.2f      %8.2f
%15s\n',Conexion(c).Tipo,Conexion(c).Nhacia,Conexion(c).Ndesde,Pij,Qij,Sij,Sobrepasso);
end
end

```


APÉNDICE B

A continuación se presenta el archivo de texto con la información de entrada para el ejemplo del capítulo 4.

```

%José Francisco Castro García
%Trabajo de Graduación previo a obtener el título de Ingeniero Electricista
%
%Ejemplo Problema de Flujo de potencia
%Sistema de 5 barras, 3 líneas de transmisión y 2 transformadores
%Tomado del libro Sistemas de Potencia de J. Duncan Glover y Mulukutla S. Sarma
%Pagina 277 Ejemplo 6.9
%La información del sistema de potencia tiene el siguiente formato:
%Sistema nombre Potencia base en MVA Tolerancia en las Potencias
SISTEMA Ejemplo1 100 0.0001
%La información de las barras tiene el siguiente formato:
%
%          Generación MVA Carga MVA Bancos
%          PU MW MVAR MW MVAR MVAR
%Barra Nombre Tipo Voltaje Pgen Qgen Pcarga Qcarga Qcap.
BARRA Uno CP 1.00 0 0 0 0 0
BARRA Dos PQ 1.00 0 0 800 280 0
BARRA Tres PV 1.05 520 0 80 40 0
BARRA Cuatro PQ 1.00 0 0 0 0 0
BARRA Cinco PQ 1.00 0 0 0 0 0
%
%La información de las líneas de transmisión debe tener el siguiente formato:
%
%          PU PU PU MVA
%Línea Desde Hacia Rserie Xserie Bparalelo Capacidad Máxima(MVA)
LINEA Dos Cuatro 0.00900 0.100 1.720 1200
LINEA Dos Cinco 0.00450 0.050 0.880 1200
LINEA Cuatro Cinco 0.00225 0.025 0.440 1200
%
%La información de los transformadores debe tener el siguiente formato:
%
%          PU PU MVA
%Transformador Desde Hacia Rserie Xserie Capacidad Máxima(MVA)
TRANSFORMADOR Uno Cinco 0.00150 0.020 600
TRANSFORMADOR Tres Cuatro 0.00075 0.010 1000
%
%fin del archivo de entrada

```