

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL

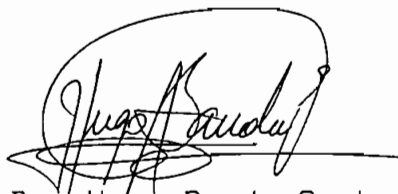
IDENTIFICACION DE PARAMETROS UTILIZANDO UN
ALGORITMO GENETICO DE OPTIMIZACION, APLICACION
AL CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MAQUINA DE INDUCCION.

ANTONIO JAVIER QUINTANA MORENO

MARZO DE 1994

QUITO - ECUADOR

Certifico que esta Tesis de Grado ha sido desarrollada en su totalidad por el Sr. Antonio Javier Quintana Moreno.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Hugo Banda Gamboa". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping initial "H" and "B".

Dr. Hugo Banda Gamboa

Director de Tesis

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron a hacer realidad este trabajo, y, de manera muy especial, la ayuda brindada por el Dr. Hugo Banda.

DEDICATORIA:

A mis queridos padres, que con amor y abnegación inculcaron en mí el deseo de superación. Para ellos mi amor y eterna gratitud.

Antonio Javier

A la memoria de mi gran amigo
Wladimir, a quien el destino no
permitió alcanzar la meta que yo he
logrado. Que Dios te guarde en tu
seno.

INDICE.

INTRODUCCION	1
CAP. I. ALGORITMOS GENETICOS. GENERALIDADES	4
I.1. Características de la Evolución Artificial ...	4
I.2. Fundamentos de los Algoritmos Genéticos	6
I.2.1. Definición de los Algoritmos Genéticos	7
I.2.2. Terminología empleada por los Algoritmos Genéticos	9
I.2.3. Teorema Fundamental de los Algoritmos Genéticos	10
I.3. Procesos Genéticos Artificiales	12
I.4. Aplicación de los Algoritmos Genéticos	16
I.4.1. Aplicaciones varias	16
I.4.2. Identificación de los parámetros óptimos de la Máquina de Inducción Trifásica	18
CAP. II. MODELACION DE LA MAQUINA DE INDUCCION TRIFASICA	20
II.1. Modelo de la Máquina de Inducción	20
II.2. Técnicas de medición y evaluación de los parámetros del circuito equivalente	23

II.2.1.	Técnica recomendada por el IEEE Std-112	24
II.2.2.	Técnica tradicional ó BASICA	25
II.3.	Cálculo de los parámetros del circuito equivalente, según la recomendación del IEEE Std-112	26
II.4.	Cálculo de los parámetros del circuito equivalente, por el método BASICO	31
CAP. III.	PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE	34
III.1.	Organización general del programa de cálculo	34
III.2.	Función para la lectura de los datos experimentales	36
III.3.	Funciones para el cálculo de los parámetros ..	40
III.4.	Función para la salida de resultados	41
CAP. IV.	PROGRAMA DE EVOLUCION ARTIFICIAL	43
IV.1.	Organización general del programa	43
IV.2.	Función para la adquisición de datos	49
IV.3.	Función para supervisar el proceso de Reproducción	52
IV.4.	Función para supervisar el proceso de Mutación	52

IV.5.	Función para supervisar el proceso de Cruce	53
IV.6.	Función para evaluar la aptitud de los grupos de parámetros	54
IV.6.1.	Determinación de los valores referenciales ...	56
IV.6.2.	Estimación de los valores de impedancia y torque, durante el proceso de evolución artificial	58
IV.7.	Función para la presentación de resultados al usuario	60
CAP. V.	RESULTADOS	62
V.1.	Datos experimentales y población inicial de grupos de parámetros	62
V.1.1.	Características de la máquina bajo prueba	62
V.1.2.	Datos experimentales necesarios para la obtención de la población inicial de grupos de parámetros	62
V.1.3.	Determinación experimental del valor de la resistencia de estator	68
V.1.4.	Población inicial de grupos de parámetros	69
V.1.5.	Datos experimentales de la prueba de carga efectuada al Motor de Inducción Trifásico	72
V.2.	Proceso de evolución de la población inicial	75
V.2.1.	Ejemplo No.1	76
V.2.2.	Ejemplo No.2	80
V.3.	Resultados finales	84

V.3.1.	Resultados obtenidos a partir de la población inicial calculada por el método IEEE	85
V.3.2.	Resultados obtenidos a partir de la población inicial calculada por el método BASICO	87
CAP. VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
VI.1.	Discusión de los resultados obtenidos para la población inicial	89
VI.2.	Discusión de los resultados obtenidos del proceso genético	95
VI.3.	Conclusiones y Recomendaciones	111
VI.3.1.	Conclusiones	112
VI.3.2.	Recomendaciones	115
ANEXO A	BIBLIOGRAFIA.	
ANEXO B	MANUAL DE USO DEL PROGRAMA.	
ANEXO C	LISTADO DE PROGRAMAS.	

INTRODUCCION

INTRODUCCION.

Un problema frecuente en muchos sistemas es el desconocimiento de los valores óptimos de sus parámetros de control, y la inexistencia de un algoritmo directo que permita descubrirlos. Las técnicas tradicionales de optimización dependen en gran medida de una relación determinística entre los parámetros de control y el funcionamiento resultante; un efecto explícito de una señal de entrada en el funcionamiento del sistema. Estas técnicas han mejorado, pero aún no son capaces de optimizar el comportamiento de sistemas muy complejos. El éxito que han alcanzado los métodos convencionales se logra en situaciones en las cuales el sistema puede ser modelado con suficiente precisión, o cuando el número de probables valores de los parámetros es lo suficientemente pequeño como para que puedan ser probados exhaustivamente. En cambio, para muchos sistemas que no pueden ser modelados adecuadamente, o para aquellos cuyo espacio de estado es muy grande, se requiere de una técnica diferente, una técnica que busque efectivamente los valores óptimos de los parámetros de control del sistema, sin contar necesariamente con un conocimiento previo del espacio de funcionamiento.

En el caso de un motor de inducción, existe un gran número de grupos de parámetros de su circuito equivalente que se adaptan muy bien a sus diversas condiciones de funcionamiento. Sin embargo, es muy difícil determinar cual de ellos es el grupo óptimo.

Desde los años setentas, en los países más desarrollados ha aparecido una nueva técnica, que utiliza los principios básicos de la genética natural, en la búsqueda de los parámetros óptimos de sistemas tanto simples como complejos.

A esta nueva técnica se la ha denominado como *Algoritmos Genéticos de Optimización y Búsqueda*.

Estos algoritmos trabajan muy bien con sistemas que tienen un espacio de estado muy amplio, o que están inmersos en un ambiente con mucho ruido. Esta característica muy particular de los algoritmos genéticos, ha llevado a pensar en la posibilidad de utilizarlos en la búsqueda de el grupo de parámetros óptimos de un motor de inducción.

Precisamente, esta Tesis de Grado, tiene como objetivo la implementación computacional, utilizando el lenguaje C, de un algoritmo genético que permita encontrar los parámetros óptimos del circuito equivalente de la máquina de inducción.

Para cumplir con este objetivo, esta tesis ha sido dividida en seis capítulos.

En el Capítulo I, se hace una breve introducción a los algoritmos genéticos, explicando sus principales características, sus fundamentos y la forma en que trabajan los operadores genéticos básicos. Así mismo, se menciona brevemente algunas de sus aplicaciones, y se profundiza un poco más en aquella que tiene relación con esta tesis.

En el Capítulo II, se presenta un circuito equivalente de la máquina de inducción, propuesto por el IEEE en su estándar 112 de 1991, así como dos métodos para calcular los parámetros que lo caracterizan.

En el Capítulo III, se describe un programa de computación, que permite obtener una población inicial de posibles parámetros del circuito equivalente dado en el Capítulo II. Esta población inicial es necesaria cuando se utiliza un algoritmo genético de optimización y búsqueda.

En el Capítulo IV, se detalla la forma de implementar, computacionalmente, este tipo de algoritmo cuando se lo aplica a la búsqueda de los parámetros óptimos de la máquina de

inducción.

En el Capítulo V, se incluyen los resultados obtenidos con los programas desarrollados en los dos capítulos anteriores.

El Capítulo VI, trata de las conclusiones y recomendaciones que surgen después de realizado un análisis de los resultados presentados en el capítulo anterior.

En el Anexo A, se hace referencia a la bibliografía utilizada en el desarrollo de esta Tesis de Grado.

En el Anexo B, se incluye el manual del usuario de los programas antes indicados.

El listado completo del programa desarrollado consta en un módulo adjunto a esta tesis.

CAPITULO I

CAPITULO I.

ALGORITMOS GENETICOS. GENERALIDADES.

I.1. CARACTERISTICAS DE LA EVOLUCION ARTIFICIAL.

Los intentos por encontrar nuevas técnicas de optimización y búsqueda, que puedan emplearse, tanto en sistemas simples como en otros más complejos, han llevado a sus investigadores a una interesante conclusión: "*allí donde se requiera un comportamiento robusto, la naturaleza lo hace mejor*"[3]. Por tanto, los secretos de la adaptación y la supervivencia, son las mejores enseñanzas que se pueden obtener de un estudio cuidadoso de los ejemplos que nos proporciona la naturaleza.

La Teoría de la Evolución de Darwin, en conjunto con la pasividad, el capricho y la naturaleza mecánica de los procesos evolutivos, suministran los datos para la mejor explicación racional, que se ha dado hasta ahora, sobre la evolución y la adaptabilidad de las especies. De acuerdo a Darwin, la base de la evolución natural es la ocurrencia, al azar, de modificaciones hereditarias en los organismos de las especies. Aquellas modificaciones que han sido ventajosas se adoptan como válidas, en tanto que las modificaciones desventajosas son descartadas a través de la selección natural. Es decir, aquellos organismos que han experimentado un cambio negativo, tienen una mayor dificultad para encontrar alimento y reproducirse, y, por tanto, se vuelven más vulnerables a los ambientes hostiles. En la actualidad se conoce que toda la información que determina el

comportamiento, la apariencia y demás características propias de cada organismo, se halla almacenada dentro de ellos en forma de cromosomas y genes. Es decir que, toda la información necesaria para el proceso de evolución natural se halla contenida dentro de cada organismo en esta forma de almacenamiento muy particular.

Varios investigadores partieron de estos conceptos para desarrollar un mecanismo de *evolución artificial*, que permita optimizar el funcionamiento de sistemas tanto simples como complejos. A continuación se presenta un modelo básico, pero muy utilizado, de este mecanismo[1]:

```
begin
  t = 0;
  Obtener la población inicial A(t);
  Evaluar las estructuras contenidas en A(t);
  while no se satisfaga la condición para terminar do
    begin
      t = t + 1;
      Seleccionar A(t) a partir de A(t-1);
      Recombinar las estructuras en A(t);
      Evaluar las estructuras contenidas en A(t);
    end
  end.
end.
```

Figura 1.1. Ejemplo de un mecanismo básico de evolución artificial, escrito en pseudo-código.

Estos mecanismos escritos en forma algorítmica se conocen como *Algoritmos Genéticos*. Es necesario aclarar que el solo hecho de que estos algoritmos se hayan obtenido por la observación de la forma como la naturaleza realiza el proceso de evolución de las especies, no es razón suficiente para aceptarlos como válidos. Sin embargo, muchos artículos

técnicos y disertaciones han establecido la validez de esta técnica en la optimización de funciones y en las aplicaciones de control. Habiendo sido reconocida como una herramienta válida para problemas que requieren una búsqueda eficiente y efectiva, los algoritmos genéticos encuentran ahora una amplia gama de aplicaciones en los círculos de negocios, científicos y de ingeniería. Las razones detrás de este crecimiento son claras, pues son algoritmos computacionalmente simples aunque poderosos en su búsqueda de lo mejor. Más aún, fundamentalmente, no están limitados por restricciones en su espacio de búsqueda, tales como las concernientes a continuidad, existencia de derivadas, unimodalidad y demás.

I.2. FUNDAMENTOS DE LOS ALGORITMOS GENETICOS.

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados en la Universidad de Michigan por John Holland, con la colaboración de sus colegas y estudiantes, partiendo de trabajos previos elaborados por varios investigadores en los años sesenta. En 1975 Holland escribió la primera monografía sobre este tópico denominada "Adaptation in Natural and Artificial Systems", razón por la cual se le considera como el *padre* de los algoritmos genéticos.

El tema central de la investigación en los algoritmos genéticos ha sido la *robustez*, es decir el balance entre la eficiencia y la eficacia necesaria para sobrevivir en diferentes ambientes. Los diseñadores de sistemas artificiales sólo pueden maravillarse de la robustez, la eficiencia y la flexibilidad que demuestran los sistemas biológicos. Las implicaciones de la robustez para los sistemas artificiales son muchas, ya que si se pueden conseguir sistemas artificiales más robustos, los costos de rediseño pueden ser reducidos o incluso eliminados.

Los beneficios más importantes de esta investigación han sido dos :

- explicar, abstracta y rigurosamente, los procesos adaptivos de los sistemas naturales, y
- diseñar programas de sistemas artificiales que conserven los mecanismos más importantes de los sistemas naturales.

I.2.1. DEFINICION DE LOS ALGORITMOS GENETICOS.

Yuval Davidor[2] define a los *Algoritmos Genéticos* como una estrategia de búsqueda heurística "ciega" - un procedimiento computacional de tipo general para la búsqueda y optimización, basado en modelos simplificados de poblaciones genéticas.

David Goldberg[3] proporciona una definición más amplia de los *Algoritmos Genéticos*, en la cual los considera como "algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de la selección natural y la genética natural, que combinan la sobrevivencia de una estructura de cadenas a una prueba de aptitud con un intercambio estructurado de información aunque aleatorio, para formar un algoritmo de búsqueda que tenga algo del innovativo instinto de la búsqueda humana". En cada generación se crea un nuevo grupo de criaturas artificiales (cadenas), empleando bits o piezas de las anteriores. Siendo aleatorios, los algoritmos genéticos no son un simple camino al azar, sino que explotan eficientemente la información histórica, para especular sobre nuevos puntos de búsqueda con una esperada mejora en su funcionamiento.

Como se puede ver, un algoritmo genético básico, como el presentado anteriormente en la Figura 1.1, con el cual se

pueden obtener buenos resultados, en la mayoría de problemas prácticos, requiere de, por lo menos, una población inicial de cadenas o estructuras de cadenas, una función objetivo a cumplirse y, tres operadores básicos: *reproducción*, *cruce* y *mutación*. La forma de aplicar estos operadores y sus implicaciones, se tratarán más adelante en este capítulo.

Es necesario aclarar el hecho de que existe otro tipo de algoritmos genéticos, más complejos, que no utilizan la información que proporciona la función objetivo. A estos algoritmos se los ha denominado *Algoritmos Genéticos de Conocimiento Dirigido*, los cuales no serán tratados en el presente trabajo. Sin embargo, las personas interesadas en este tipo especial de algoritmos puede revisar las referencias [3] y [4].

De lo dicho hasta este momento, se puede concluir que los algoritmos genéticos difieren de los procedimientos tradicionales de optimización y búsqueda, en cuatro formas :

- 1.- Trabajan con un código del grupo de parámetros, y no con los parámetros en sí mismos, ya que codifican estos parámetros en cadenas de longitud finita en algún alfabeto finito.
- 2.- Buscan en una población de puntos, y no en un sólo punto.
- 3.- Utilizan una función objetivo (información en recompensa), y no derivadas u otro conocimiento auxiliar.
- 4.- Emplean reglas de transición probabilísticas, y no determinísticas.

I.2.2. TERMINOLOGIA EMPLEADA POR LOS ALGORITMOS GENETICOS.

Debido a que los algoritmos genéticos están enraizados tanto en la genética natural como en la ciencia de los computadores, la terminología empleada en su literatura es una mezcla de lo natural y lo artificial. Así tenemos que las cadenas de los sistemas artificiales son análogos a los *cromosomas* en los sistemas biológicos. En los sistemas naturales dos o más cromosomas se combinan para formar la descripción genética total para la construcción y operación de algún organismo, este paquete genético total se conoce como *genotipo*. En los sistemas genéticos artificiales el paquete total de cadenas se conoce como una *estructura*. En los sistemas naturales, los organismos formados por la interacción de todo el paquete genético con su entorno se conoce como el *fenotipo*. En los sistemas artificiales, las estructuras son decodificadas para formar un particular *grupo de parámetros, soluciones alternativas ó puntos* (en el espacio solución). El diseñador de un sistema genético artificial tiene una variedad de alternativas para codificar tanto los parámetros numéricos como los no-numéricos.

En la terminología natural, se dice que los cromosomas están compuestos de *genes*, los cuales pueden tomar algunos valores llamados *alleles*. En genética, la *ubicación* de un gene (su posición) es identificada separadamente de la función que realiza. Así, se puede hablar de un gene en particular, por ejemplo el gene que define el color de ojos de un animal, su ubicación (posición 10), y el valor de su allele (ojos azules). En la búsqueda genética artificial, se dice que las cadenas están compuestos de *rasgos ó características*, los cuales toman diferentes *valores*. Los rasgos o características pueden ser ubicadas en diferentes *posiciones* en la cadena. La correspondencia entre la terminología artificial y la natural se resume a continuación en la Tabla 1.1.

I.2.3. TEOREMA FUNDAMENTAL DE LOS ALGORITMOS GENETICOS.

El fundamento matemático de los Algoritmos Genéticos lo estableció Holland en 1975 con su *Teorema del Esquema*, al cual Goldberg[3] lo denominó como *Teorema Fundamental de los Algoritmos Genéticos*. Antes de enunciar este teorema, es necesario definir lo que significa un *Esquema*.

Holland define al *esquema* como "un patrón de semejanza que describe un subgrupo de cadenas con semejanzas en ciertas

corresponde a un 1 en la cadena, un 0 corresponde a un 0, ó un * corresponde a cualesquiera de los dos. Por ejemplo, el esquema *0000 agrupa a las cadenas 00000 y 10000; en cambio, el esquema *111* incluye a las cuatro cadenas siguientes {01110, 01111, 11110, 11111}. Como se puede ver, la idea de un esquema suministra una herramienta, poderosa y compacta, para enunciar todas las semejanzas definidas entre cadenas de longitud finita sobre un alfabeto también finito. Es necesario aclarar que el símbolo * es sólo un metasímbolo (un símbolo de otros símbolos) y jamás es procesado, explícitamente, por el algoritmo genético. Simplemente es un elemento notacional que permite describir todas las posibles semejanzas que pueden existir entre cadenas de una longitud y alfabeto particulares.

No todos los esquemas son creados iguales, algunos son más específicos que otros. Por ejemplo, el esquema 101*1** es más definido que el esquema 1*****. Más aún, ciertos esquemas abarcan una porción mayor de la longitud total de la cadena que otros. Por ejemplo, el esquema 1*****0 abarca una porción mayor de la cadena que el esquema 1*0****. Para cuantificar estas ideas se han introducido dos propiedades del esquema: *orden* y *longitud de definición*.

El *orden* de un esquema H , denotado por $O(H)$ es, simplemente, el número de posiciones fijas presentes en el esquema (en un alfabeto binario, el número de 1s y 0s). Por ejemplo, el esquema 101*1** es de orden 4; en símbolos se representaría como $O(101*1**) = 4$.

La *longitud de definición* de un esquema H , denotada por $\delta(H)$, es la distancia que existe entre la última y la primera posición específica de la cadena. Por ejemplo, el esquema 101*1** tiene una longitud de definición $\delta = 5 - 1 = 4$.

A los esquemas con una pequeña longitud de definición y con una elevada aptitud se los denomina *bloques de construcción*.

Los esquemas, y sus propiedades, suministran los medios necesarios para analizar los efectos de la Reproducción, Cruce y Mutación sobre los bloques de construcción, contenidos en una población de cadenas.

Holland, y los demás investigadores que han seguido sus pasos, han llegado a la siguiente conclusión: "*los esquemas cortos, de bajo orden y con una aptitud sobre el promedio, incrementan exponencialmente el número de muestras en subsecuentes generaciones*". Esto es lo que se conoce como *El Teorema Fundamental de los Algoritmos Genéticos*.

La persona interesada en la demostración formal de este Teorema, puede revisar las referencias bibliográficas [1],[2] y [3].

I.3. PROCESOS GENETICOS ARTIFICIALES.

Como ya se dijo anteriormente, un algoritmo genético sencillo, con el cual se pueden obtener buenos resultados en muchos problemas prácticos, está compuesto de tres operadores: *reproducción, cruce y mutación*.

La *reproducción*, es un proceso en el cual cadenas individuales se copian de acuerdo al valor de su función objetivo, f . Intuitivamente, pensamos en la función f como una medida de su utilidad o bondad, la cual se quiere maximizar. El copiar cadenas de acuerdo a su aptitud significa que las cadenas con un valor alto de aptitud tienen una alta probabilidad de contribuir con una o más muestras en la siguiente generación. Por supuesto, este operador es una versión artificial del mecanismo de selección natural. En la naturaleza, la aptitud de las poblaciones está determinada por la habilidad que tienen sus miembros para sobrevivir a los depredadores, pestes y otros obstáculos que impiden la

proliferación de los adultos y su subsecuente *reproducción*. Es decir, la función objetivo es el árbitro final que decide cuales cadenas deben vivir o cuales deben morir.

El operador *reproducción* puede ser implementado en forma de algoritmo de diversas formas. Tal vez la manera más sencilla de hacerlo es construyendo una ruleta, dividida en un número de secciones igual al número de miembros en la población. Cada sección ocupará un área de la ruleta de tamaño proporcional a la aptitud de la cadena que representa. En la Figura 1.2 se presenta un ejemplo, para una población de 5 cadenas. Para realizar el proceso de *reproducción* es necesario hacer girar la ruleta un número de veces igual al tamaño de la población. Cada vez que se detenga la ruleta, se habrá seleccionado una cadena; luego una copia exacta de ella ingresará en un "*depósito de apareo*" para producir una nueva población tentativa, la cual se someterá a la acción de otros operadores genéticos. En esta forma, las cadenas que tienen una aptitud más alta, tendrán un número mayor de muestras en la siguiente generación.

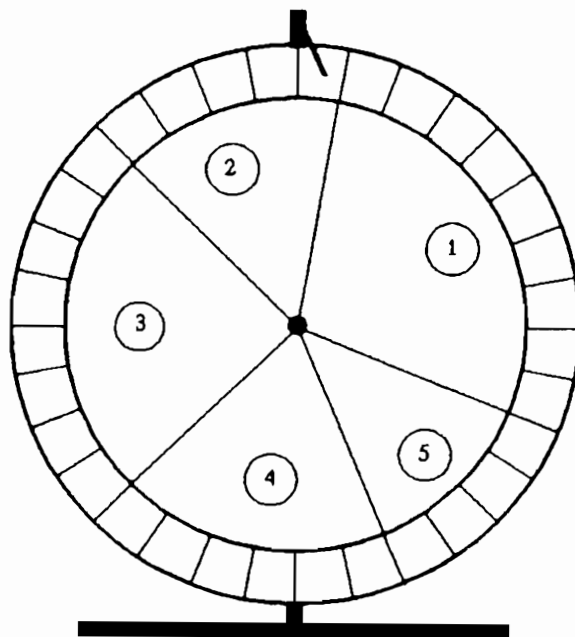
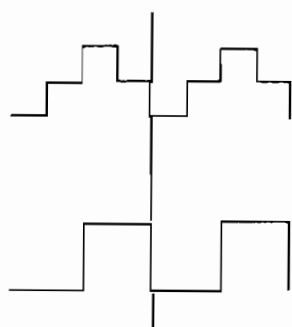


Figura 1.2. Ejemplo de una ruleta diseñada para ser utilizada en el proceso de Reproducción de una población de 5 cadenas.

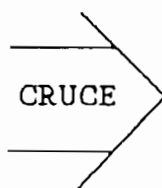
Después de la *reproducción*, viene el proceso de *cruce*, el cual se lo puede realizar en dos pasos. Primero, se selecciona, al azar, parejas entre aquellas cadenas que se encuentran en el "*depósito de apareo*". Segundo, cada pareja es sometida al proceso de *cruce* como sigue: se escoge al azar una posición de cruce k , comprendida entre la primera posición y la longitud total de la cadena (l) menos uno, $k \in [1, l-1]$. Luego, se forman dos nuevas cadenas al intercambiar las correspondientes subcadenas formadas por los caracteres comprendidos entre las posiciones $k+1$ y $l-1$, inclusive. Un ejemplo de este proceso, se indica en la Figura 1.3.

Generalmente el proceso de *cruce* se realiza simultáneamente con el proceso de *mutación*. Es decir, en el momento de intercambiar las subcadenas entre los miembros de una pareja, se analiza si es factible que se mute algún elemento de dichas cadenas. En el caso de que las cadenas hayan sido construidas a partir de un alfabeto binario $\{0,1\}$, la *mutación* consistiría en cambiar un 1 por un 0, y viceversa.

ANTES DEL CRUCE



SITIO DE CRUCE



DESPUES DEL CRUCE

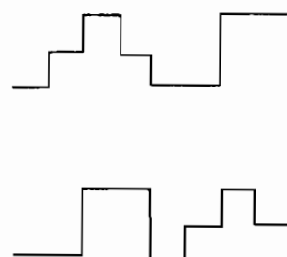


Figura 1.3. Ejemplo de un proceso de Cruce entre dos cadenas.

Como se puede ver, la *reproducción* y el *cruce* son mecanismos extraordinariamente simples que involucran la generación de números aleatorios, la copia de cadenas y el intercambio parcial de las mismas. A pesar de todo, el énfasis combinado de la *reproducción* y el estructurado (aunque a la vez aleatorio) intercambio de información del *cruce*, proporciona a los algoritmos genéticos mucho de su poder.

Para comprender mejor lo dicho, consideremos una población de n cadenas elaboradas en un alfabeto apropiado. Cada una de estas cadenas representa una idea completa sobre la manera en que se debe realizar una tarea en particular. Las subcadenas incluidas dentro de cada cadena (ó idea) contienen varias *nociones* de lo que es importante o relevante para esa tarea. Visto de esta manera, una población no solo contiene una muestra de n ideas, sino que contiene además una multitud de nociones y arreglos de las mismas para el desarrollo de una tarea. Los algoritmos genéticos utilizan efectivamente esta información al reproducir aquellas nociones que tienen una alta cualidad para su funcionamiento, e intercambiando estas nociones con otras que han funcionado bien en pruebas anteriores. El intercambio de nociones para formar nuevas ideas es un recurso intuitivo, si pensamos en términos de la *innovación*. Si definimos a una idea innovativa como la yuxtaposición de cosas que han funcionado bien en el pasado, entonces podemos decir que, la *reproducción* y el *cruce* se combinan para formar nuevas ideas que pueden ser potencialmente útiles.

En lo que respecta a la *mutación*, ésta juega un papel decididamente secundario en la operación de los algoritmos genéticos. Varios estudios empíricos realizados sobre estos algoritmos, han determinado que la *mutación* debe efectuarse sobre 1 de cada mil bits transferidos, con el objeto de obtener buenos resultados. La *mutación* es necesaria si pensamos en el hecho de que la *reproducción* y el *cruce* pueden sobreactuar en un momento determinado, durante el proceso de recombinación de nociones, provocando la pérdida de alguna información potencialmente útil. En los sistemas genéticos

artificiales, el operador de *mutación* sirve como una protección contra tales pérdidas. Cuando se la emplea, de manera cuidadosa, en conjunto con la *reproducción* y el *cruce*, se convierte en un seguro que evita la pérdida prematura de aquellas nociones consideradas importantes.

Es necesario aclarar que los operadores genéticos artificiales de *reproducción*, *cruce* y *mutación* no son los únicos que existen. Durante las investigaciones efectuadas sobre los algoritmos genéticos, se han ideado otros más complejos. Sin embargo, estos operadores no serán tratados en esta tesis, por cuanto no son necesarios para la actividad que se piensa realizar. Aquellas personas interesadas en conocer sobre esos operadores, pueden revisar la referencia [3] de la bibliografía.

I.4. APLICACION DE LOS ALGORITMOS GENETICOS.

Después de que los algoritmos genéticos de optimización y búsqueda fueron aceptados como una técnica válida, han aparecido muchas aplicaciones prácticas en los países desarrollados. Estas aplicaciones cubren distintos campos, como la biología, los negocios y la ingeniería, por nombrar solo algunos. A continuación se indican varias de estas aplicaciones.

I.4.1. APLICACIONES VARIAS.

- En 1983, David Goldberg [3] desarrolló un algoritmo para optimizar el transporte de gas natural a través de un oleoducto, como tema para su grado doctoral en la Universidad de Alabama.

- Otra aplicación práctica, es la optimización de las trayectorias de un brazo de robot hasta alcanzar una posición determinada en el espacio. Su mentor es Yuval Davidor [2], quien es ahora miembro del Instituto Weizmann de Israel,

- También se trabaja en el reconocimiento de imágenes por computador, utilizando un tipo especial de algoritmos genéticos de conocimiento dirigido. Dentro de este mismo campo, se han desarrollado nuevos procedimientos, denominados sistemas clasificadores, los cuales son utilizados en la enseñanza de máquinas especiales dotadas con una cierta inteligencia. Estas aplicaciones se encuentran documentadas en las referencias [3], [6] y [7].

- De la misma manera, varios investigadores han desarrollado una nueva técnica que emplea un algoritmo genético para entrenar redes neuronales. Se han publicado muchos informes al respecto, algunos de los cuales se indican en las referencias [8], [9] y [10], y cuyos autores aseguran que con ella se obtienen mejores resultados que los proporcionados por las técnicas tradicionales empleadas para este fin.

Hasta aquí se han nombrado solo unas cuantas aplicaciones de los algoritmos genéticos, del gran total que existe actualmente. Si se desea conocer sobre otras aplicaciones y profundizar en la historia de los algoritmos genéticos, se recomienda revisar el libro de David Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning" [3].

Sin embargo, la aplicación que más interesa, para efectos de la presente tesis, es la *Identificación de los Parámetros Óptimos de la Máquina de Inducción Trifásica*[11], tema en el cual se va a centrar este trabajo de ahora en adelante.

I.4.2. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS DE LA MAQUINA DE INDUCCION TRIFASICA.

Las técnicas convencionales de gradiente descendente para encontrar los mínimos de funciones, son rápidos y eficientes desde un punto de vista convencional, pero son de un limitado valor cuando existen varios mínimos locales. Tal comportamiento multimodal es asociado a menudo con funciones que envuelven datos experimentales con ruido, los cuales definen una superficie *rugosa* de búsqueda, tal como se encuentra en el caso de las medidas de prueba de un motor de inducción. Cuando las medidas de prueba son usadas para encontrar la representación interna del circuito equivalente, estos datos pueden suministrar una conclusión adecuada para varios grupos diferentes de parámetros. Por esta razón, se pensó en utilizar un algoritmo genético que permita obtener los valores óptimos de los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción.

El proceso genético de optimización propuesto utiliza el esquema general de evolución artificial, indicado anteriormente en la Figura 1.1, y emplea los tres operadores básicos: reproducción, cruce y mutación.

El problema consiste en encontrar un grupo de parámetros de la máquina de inducción que minimice una función de error, cuyo valor inverso se conoce como *aptitud*. Para ello es necesario contar con un circuito equivalente de la máquina bajo prueba, y con una población inicial de posibles grupos de parámetros. El método para obtener esta población inicial, así como el modelo de la máquina a utilizarse, se discutirá más adelante en los Capítulos 2 y 3.

Una vez obtenida esta población inicial, cada grupo de parámetros toma la forma de una cadena binaria, representativa de dicho grupo. Luego, se prueba cada una de estas cadenas para determinar su aptitud, al evaluar una función de error de parámetros.

Evaluada esta función de error, para cada uno de los grupos de parámetros, estos se copian a un depósito intermedio un número de veces proporcional a su aptitud, formando así una nueva población tentativa, con igual número de miembros que la anterior. Esto es lo que se conoce como el proceso de *reproducción*.

Después, para producir una diversidad, las cadenas de este depósito intermedio son pareadas aleatoriamente. Cada cadena apareada intercambia una porción de sus bits con su correspondiente pareja, escogida al azar. Esto produce un nuevo grupo de miembros, los cuales tienden a mantener muchas de las características de sus predecesores. Este es el paso de *cruce*.

Luego del cruce, la población debe experimentar la *mutación*. En este paso, una porción de bits, del total de la población, es alterado al azar. Típicamente, se modifica un promedio de 1 bit en 1000. Esta función previene al algoritmo de la pérdida de alguna información potencialmente útil.

Una vez que se han aplicado los tres operadores básicos, se obtiene una nueva población de posibles parámetros de la máquina, cuyos miembros reúnen, casi siempre, mejores características que sus predecesores. A continuación, se evalúa la aptitud de cada uno de los grupos de parámetros, miembros de esta nueva población, para después aplicar, otra vez, los tres operadores genéticos básicos, y así obtener otra población. Este proceso se repite, el número de veces (número de generaciones) necesarias para que el mejor grupo de parámetros, miembro de la última población obtenida, minimice el error. Cuando esto ocurre, este grupo de parámetros se convierte en el grupo de parámetros óptimos de la máquina de inducción.

Los detalles de este proceso de evolución artificial, así como su implementación computacional, se explican en el Capítulo 4.

CAPITULO II

CAPITULO II.

MODELACION DE LA MAQUINA DE INDUCCION TRIFASICA.

II.1. MODELO DE LA MAQUINA DE INDUCCION.

En una primera impresión, la máquina de inducción podría considerarse como una máquina de excitación única, debido a que en su estator se aplica tan solo corriente alterna polifásica. Sin embargo, en su rotor se induce una tensión alterna de frecuencia variable, de la misma forma que por el efecto de transformación se induce una tensión alterna en el secundario de un transformador. Por lo tanto, la máquina de inducción es un tipo de máquina rotativa con una doble excitación, que tiene una tensión alterna aplicada tanto a su devanado de estator como a su devanado de rotor.

Generalmente, la tensión aplicada al estator es de frecuencia constante y tensión suministrada a partir de unas barras polifásicas. En cambio, la tensión aplicada al rotor es una tensión inducida de frecuencia variable y tensión originada como resultado de la velocidad del rotor respecto a la velocidad de sincronismo de la máquina.

A las máquinas de inducción generalmente se las utiliza como motores, y, rara vez se las emplea como generadores debido a que sus características de funcionamiento como tales son inadecuadas para muchas aplicaciones. También se emplean como cambiadores de frecuencia, pero en menor proporción.

La máquina de inducción también recibe el nombre de máquina asincrónica, debido al hecho de que funciona como generador o como motor a una velocidad distinta de la de sincronismo de su campo magnético giratorio.

La modelación de la máquina de inducción consiste en obtener un circuito eléctrico equivalente, en el cual se representen corrientes, voltajes, resistencias, flujos, potencias, etc., para cada vuelta de la máquina rotativa. El circuito equivalente ofrece una base conveniente para determinar los parámetros característicos de la máquina de inducción, con la ayuda de ciertas pruebas factibles de realizarse, como son las pruebas de vacío, de rotor bloqueado y de carga.

El motor de inducción puede considerarse como un transformador estático, aún cuando el rotor está en movimiento, por tanto, su comportamiento se puede estudiar mediante el diagrama vectorial del transformador con una relación unitaria entre el número de espiras del rotor y las del estator, con la única diferencia que en un motor la carga es mecánica mientras que en un transformador la carga es eléctrica.

La carga mecánica de un motor asincrónico se puede asumir como una resistencia pura y además variable.

Para este tipo de motor, la consideración de deslizamiento igual a la unidad ($s = 1$), corresponde a tener bloqueado el rotor de la máquina, es decir, el rotor se encuentra sin movimiento por la acción de fuerzas externas. En estas condiciones la potencia mecánica es cero y la potencia real que se entrega al rotor se transforma en calor.

En cambio, la condición de deslizamiento cero ($s = 0$), corresponde a operar un transformador sin carga, es decir, el rotor de la máquina se encuentra girando a la velocidad de sincronismo.

Con estas consideraciones, el IEEE, en su Std-112 de 1991, propone el circuito equivalente, por fase, de la máquina de inducción trifásica, indicado en la Figura 2.1.

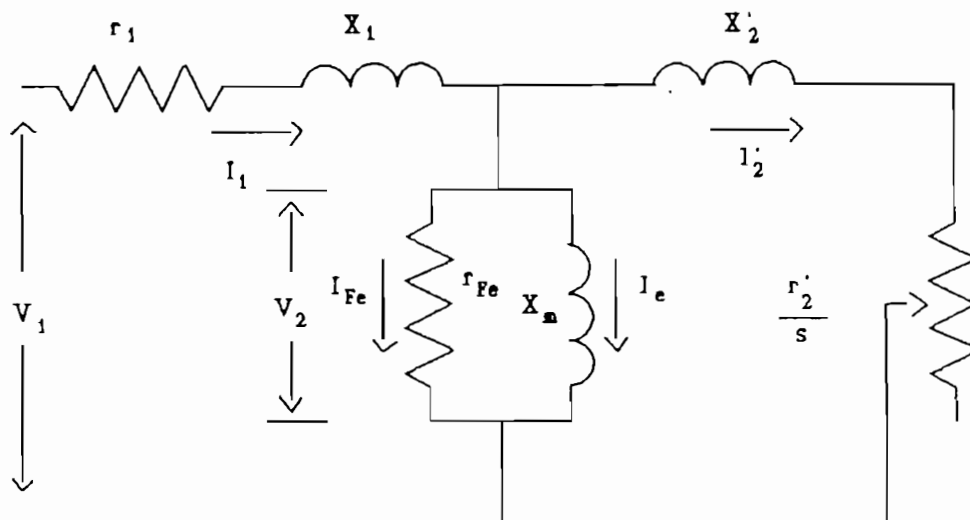


Figura 2.1. Circuito equivalente por fase de la máquina de inducción polifásica, recomendado por el IEEE Std - 112, 1991.

En donde: V_1 = Tensión de entrada.

r_1 = Resistencia de estator.

X_1 = Reactancia de dispersión del estator.

r'_2 = Resistencia de rotor referida al estator.

X'_2 = Reactancia de rotor referida al estator.

r_{Fe} = Resistencia de pérdidas en el núcleo.

X_m = Reactancia de magnetización del núcleo.

V_2 = Fuerza electromotriz inducida en el estator por el campo giratorio.

I_1 = Corriente en el estator.

I'_2 = Corriente en el rotor referida al estator.

I_m = Corriente de magnetización.

I_{Fe} = Corriente de pérdidas en el hierro.

s = Deslizamiento.

Para profundizar en el circuito equivalente propuesto, y para conocer otros no considerados en este trabajo, se recomienda revisar la referencias [12],[13],[14],[15],[16] y [18] de la bibliografía de esta tesis.

II.2. TECNICAS DE MEDICION Y EVALUACION DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

Para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción, indicado en la Figura 2.1, se han seleccionado las técnicas siguientes:

- 1) la recomendada por el *IEEE*, en su Std-112 de 1991; y,
- 2) la que se enseña en la cátedra de Máquinas Eléctricas, dictada en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. A esta técnica, de ahora en adelante, se la conocerá como método *BASICO*.

A continuación, se explica en qué consiste cada una de ellas.

II.2.1. TECNICA RECOMENDADA POR EL IEEE Std - 112.

El IEEE recomienda que las lecturas de voltaje, corriente, potencia eléctrica de entrada y resistencia de estator deben ser tomadas para una o más frecuencias, voltajes y/o cargas. Estos datos son conocidos como los datos de impedancia. Si la máquina que está siendo probada tiene un rotor bobinado, éste debe ser cortocircuitado para realizar la prueba.

Los datos de impedancia pueden ser determinados por medio de uno de los siguientes métodos:

- 1) La prueba de impedancia trifásica de rotor bloqueado a un 25% del valor nominal de frecuencia, y al valor nominal de corriente.
- 2) La prueba de impedancia trifásica de rotor bloqueado al valor nominal de frecuencia, a aproximadamente el 50% del valor de frecuencia nominal, y a un 25% del valor de frecuencia nominal. A partir de estos tres puntos, se construye una curva que se emplea para calcular los valores de la reactancia total y de la resistencia rotórica al valor de frecuencia reducida requerida.
- 3) Una prueba de impedancia sobre la velocidad del punto de ruptura a un deslizamiento aproximado al deseado a la frecuencia reducida de rotor. En este método el motor está girando desacoplado o acoplado a una carga reducida, y el voltaje debe ser reducido para obtener un valor de deslizamiento aproximado al valor de plena carga. El deslizamiento debe ser medido cuidadosamente.
- 4) Cuando ninguno de los métodos anteriores es práctico, se debe utilizar el siguiente procedimiento: una prueba de

impedancia trifásica de rotor bloqueado al valor nominal de corriente, una prueba de vacío a voltaje nominal y otra a deslizamiento de plena carga. Todas estas pruebas deben hacerse al valor nominal de frecuencia.

Todos los métodos consideran como conocido de antemano el valor de la resistencia de estator, razón por la cual ésta debe ser determinada por algún otro procedimiento. Se aconseja hacerlo por medio de la prueba del voltímetro-amperímetro.

De las cuatro técnicas que propone el IEEE, se escoge la cuarta opción, por cuanto ésta conserva una cierta semejanza con la técnica BASICA.

En cada una de las pruebas de laboratorio que requiere el método IEEE seleccionado, se deben tomar los datos de voltaje de línea, corriente de línea y potencia activa trifásica en los terminales de entrada a la máquina bajo prueba, y en las unidades fijadas por el Sistema Internacional. Adicionalmente, en la prueba de vacío a deslizamiento de plena carga, es necesario medir, con mucho cuidado, el valor de la velocidad del rotor de la máquina, para calcular el valor del deslizamiento.

Una vez que se han recogido todos estos datos, se sigue el procedimiento indicado en el numeral II.3, de este capítulo, para calcular los parámetros del circuito equivalente.

II.2.2. TECNICA TRADICIONAL O BASICA.

Para calcular los parámetros del circuito equivalente propuesto, esta técnica recomienda la realización de dos pruebas a la máquina de inducción: de vacío a voltaje nominal

y de rotor bloqueado a corriente nominal. En los dos casos, se toman los datos de voltaje de línea, corriente de línea y potencia activa trifásica en los terminales de entrada de la máquina bajo prueba, y en las unidades que establece el Sistema Internacional.

Una vez que se han obtenido estos datos, se aplica el procedimiento indicado en el numeral II.4 de este capítulo, para calcular los parámetros del circuito equivalente.

Como aclaración se indica que, los datos de la prueba de vacío a voltaje nominal permiten calcular los parámetros del ramal de magnetización de la máquina; en tanto que, los datos de la prueba de rotor bloqueado a corriente nominal, se utilizan para evaluar las resistencias y reactancias, tanto de estator como de rotor referidas al estator.

II.3. CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE, SEGUN LA RECOMENDACION DEL IEEE Std - 112.

Para calcular los valores de los diferentes parámetros del circuito equivalente del motor de inducción, se harán las siguientes consideraciones:

- No se consideran cambios en los valores de las resistencias y reactancias de la máquina de inducción por efecto de las variaciones de temperatura que tienen lugar durante su operación.
- No se consideran las pérdidas en el rotor por efecto de la fricción y la ventilación.
- Los valores de impedancia del rotor están referidos siempre al estator.

- Todas las impedancias, corrientes y voltajes son valores por fase en conexión Y, para los motores trifásicos. Las potencias y los volta-amperios son para el motor completo.
- El valor de la resistencia de estator se considera conocido, razón por la cual se la debe determinar por otro procedimiento. Es aconsejable determinarla por medio de la prueba de voltímetro-amperímetro, antes que utilizando un óhmetro, ya que éste introduce muchos errores.
- Los subíndices *a*, *b* y *d*, indican que esos valores corresponden a los datos de las pruebas de vacío a voltaje nominal, de rotor bloqueado a corriente nominal y de vacío a deslizamiento de plena carga, respectivamente.
- En todo el procedimiento, *P* se refiere a la potencia activa; *V* corresponde al voltaje, en tanto que, *I* se refiere a la corriente.

Los valores de X_1 , X_2 , X_m y r_{re} pueden ser determinados a partir de las pruebas de vacío y de rotor bloqueado, al valor nominal de frecuencia, siguiendo el procedimiento indicado en la Forma F-1 del IEEE Std - 112, 1991. Este procedimiento es el siguiente:

- 1) Escoger un valor para la relación que existe entre X_1 y X_2 ($X1_X2$), de acuerdo a lo que indica la norma NEMA MG-1, 1987, la cual establece lo siguiente:
 - $X1_X2 = 1.0$ Para motores tipo A, D y de rotor bobinado.
 - $X1_X2 = 0.67$ Para motores tipo B.

- $X1_X2 = 0.43$ Para motores tipo C.

- 2) Asumir valores iniciales para X_1 y para la relación que existe entre X_1 y X_m , ($X1_Xm$).
- 3) Calcular los valores de las potencias reactivas, tanto de vacío como de rotor bloqueado, aplicando la relación:

$$VAR = \sqrt{(3 \cdot V_1 \cdot I_1)^2 - P^2}$$

- 4) Calcular el valor de X_m , con los valores iniciales asumidos en (2), aplicando la siguiente relación:

$$X_m = \frac{3 \cdot V_{10}^2}{VAR_0 - 3 \cdot I_{10}^2 \cdot X_1} \cdot \left(\frac{1}{1 + X1_Xm} \right)^2$$

- 5) Calcular el valor de X_1 , usando el valor de $X1_Xm$ de (4) y aplicando la relación:

$$X_1 = \frac{VAR_b}{3 \cdot I_{10}^2 \cdot (1 + X1_X2 + X1_Xm)} \cdot (X1_X2 + X1_Xm)$$

- 6) Calcular el valor de X_m aplicando la fórmula indicada en (4), utilizando el valor de X_1 de (5) y la razón $X1_Xm$, obtenida al evaluar X_1/X_m , de (5) y (6).
- 7) Continuar la solución iterativa de (5) y (6) hasta que los valores de X_1 y X_m se estabilicen dentro de un 0.1%.
- 8) Evaluar X_2 por medio de la relación:

$$X_2 = \frac{X_1}{X1_X2}$$

- 9) Evaluar las pérdidas en el núcleo por medio de la ecuación:

$$P_{Fe0} = P_0 - 3 \cdot I_{10}^2 \cdot r_1$$

- 10) Calcular el valor de r_2 utilizando la siguiente ecuación:

$$r_{Fe} = \frac{3 \cdot V_{10}^2}{P_{Fe0} \cdot (1 + X_{1-Xm})^2}$$

El valor de r_2 , puede obtenerse a partir de las lecturas de voltaje, corriente, potencia y deslizamiento, tomados en la prueba de vacío a deslizamiento de plena carga. Después de que X_1 , X_2 y X_m han sido calculadas, a partir de las pruebas de vacío y de rotor bloqueado (a valores nominales de voltaje y corriente, respectivamente), el valor de r_2 se obtiene como sigue:

- 11) Calcular

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_d}{S_d} \right)$$

- 12) Calcular V_{2d} , usando la ecuación:

$$V_{2d} = \sqrt{(V_{1d} - I_{1d} \cdot Z_{11})^2 + (I_{1d} \cdot Z_{12})^2}$$

en donde Z_{11} y Z_{12} se definen como:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= X_1 \cdot \text{sen}\theta_1 + r_1 \cdot \text{cos}\theta_1 \\ Z_{12} &= X_1 \cdot \text{cos}\theta_1 - r_1 \cdot \text{sen}\theta_1 \end{aligned}$$

- 13) Calcular

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{I_{1d} \cdot Z_{12}}{V_{1d} - I_{1d} \cdot Z_{11}} \right)$$

- 14) Calcular el valor de I_{Fe_d} , con la ecuación:

$$I_{Fe_d} = \frac{P_{Fe_d}}{3 \cdot V_{2d}}$$

- 15) Calcular I_{e_d} , usando la ecuación:

$$I_{e_d} = \frac{V_{2d}}{X_m}$$

- 16) Evaluar I_{2d} , empleando la relación:

$$I_{2d} = \sqrt{I_{21}^2 + I_{22}^2}$$

en donde

$$I_{21} = I_{1d} \cdot \cos\theta_1 + I_{e_d} \cdot \sen\theta_2 - I_{Fe_d} \cdot \cos\theta_2$$

$$I_{22} = I_{1d} \cdot \sen\theta_1 - I_{e_d} \cdot \cos\theta_2 + I_{Fe_d} \cdot \sen\theta_2$$

- 17) Calcular el valor de la impedancia Z_2 , usando la ecuación:

$$Z_2 = \frac{V_{2d}}{I_{2d}}$$

- 18) Calcular:

$$\frac{r_2}{s} = \sqrt{Z_2^2 - X_2^2}$$

- 19) Para obtener el valor de r_2 , se debe multiplicar el valor obtenido en (18) por el valor medido del deslizamiento en valores por unidad.

II.4. CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE POR EL METODO BASICO.

Para calcular por este método, los valores de los parámetros del circuito equivalente propuesto de la máquina de inducción, se hacen las mismas consideraciones indicadas en el numeral II.3, modificando solamente aquella que tiene que ver con la resistencia de estator, ya que para aplicar este método se considera que el valor de esta resistencia es siempre igual al valor de la resistencia de rotor, referida al estator.

Una vez aceptadas estas consideraciones, a continuación se expone el procedimiento a seguirse:

- 1) Calcular la conductancia del núcleo, cuando el rotor gira a la velocidad de sincronismo, utilizando la relación

$$G_0 = \frac{P_0}{3 \cdot V_{10}^2}$$

- 2) Calcular la admitancia de entrada al motor, bajo la misma condición anterior, aplicando la ecuación

$$Y_0 = \frac{I_{10}}{V_{10}}$$

- 3) Obtener el valor de susceptancia del núcleo, para la misma condición en el rotor, por medio de la ecuación

$$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2}$$

- 4) Calcular el valor de la resistencia de pérdidas en el núcleo, aplicando la ecuación

$$r_{Fe} = \frac{1}{G_0}$$

- 5) Evaluar el valor de la reactancia de dispersión del núcleo, utilizando la relación

$$x_m = \frac{1}{B_0}$$

- 6) Obtener el valor de la impedancia de entrada a la máquina, cuando el rotor está bloqueado, por medio de la relación

$$z_b = \frac{V_{1b}}{I_{1b}}$$

- 7) Por medio de la relación indicada a continuación, calcular el valor de la parte resistiva de la impedancia de entrada, bajo la misma condición anterior,

$$R_b = \frac{P_b}{3 \cdot I_{1b}^2}$$

- 8) Evaluar la componente reactiva de la misma impedancia, bajo la misma condición del rotor, utilizando la ecuación

$$x_b = \sqrt{z_b^2 - R_b^2}$$

- 9) Calcular las resistencias de estator y de rotor, referida al estator, aplicando la relación

$$r_1 = r_2' = \frac{R_b}{2}$$

10) Escoger el valor de la relación que existe entre x_1 y x_2' , de acuerdo a lo que indica la norma NEMA MG-1, 1987, es decir:

- $x_1 = x_2'$, para motores tipo A, D y rotor devanado.
- $x_1 = 0.67 x_2'$, para motores tipo B.
- $x_1 = 0.43 x_2'$, para motores tipo C.

11) El valor seleccionado, reemplazar en la ecuación

$$x_1 + x_2' = X_b$$

para calcular los valores de las reactancias de estator y de rotor, referida al estator.

En el siguiente capítulo, se detalla la forma de implementar un programa computacional que permite calcular una población inicial de posibles parámetros del circuito equivalente propuesto para la máquina bajo prueba, siguiendo las técnicas aquí recomendadas.

CAPITULO III

CAPITULO III

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

III.1. ORGANIZACION GENERAL DEL PROGRAMA DE CALCULO.

El objetivo de este programa es la obtención de una población inicial de posibles parámetros del modelo de la máquina de inducción indicado en la Figura 2.1. Esta población inicial sirve como punto de partida para encontrar el grupo de parámetros óptimos de la máquina, por medio de un mecanismo de evolución artificial.

En el Capítulo II, se analizaron dos métodos con los cuales es posible calcular los parámetros del modelo considerado: el recomendado por el *IEEE Std-112* y el tradicional ó *BASICO*. Por lo tanto, es posible disponer de dos poblaciones iniciales diferentes, dependiendo del método seleccionado.

Cada uno de estos métodos requiere de los datos proporcionados por un grupo de pruebas de laboratorio, para calcular un grupo de parámetros del circuito equivalente de la máquina. Es decir que, para obtener una población inicial de un tamaño determinado, es necesario disponer de los datos obtenidos a partir de un número igual de grupos de pruebas de laboratorio.

La población así obtenida debe ser almacenada en un archivo, para utilizarla más tarde en el proceso de evolución artificial. En la Figura 3.1 se presenta un diagrama explicativo de este programa de cálculo.

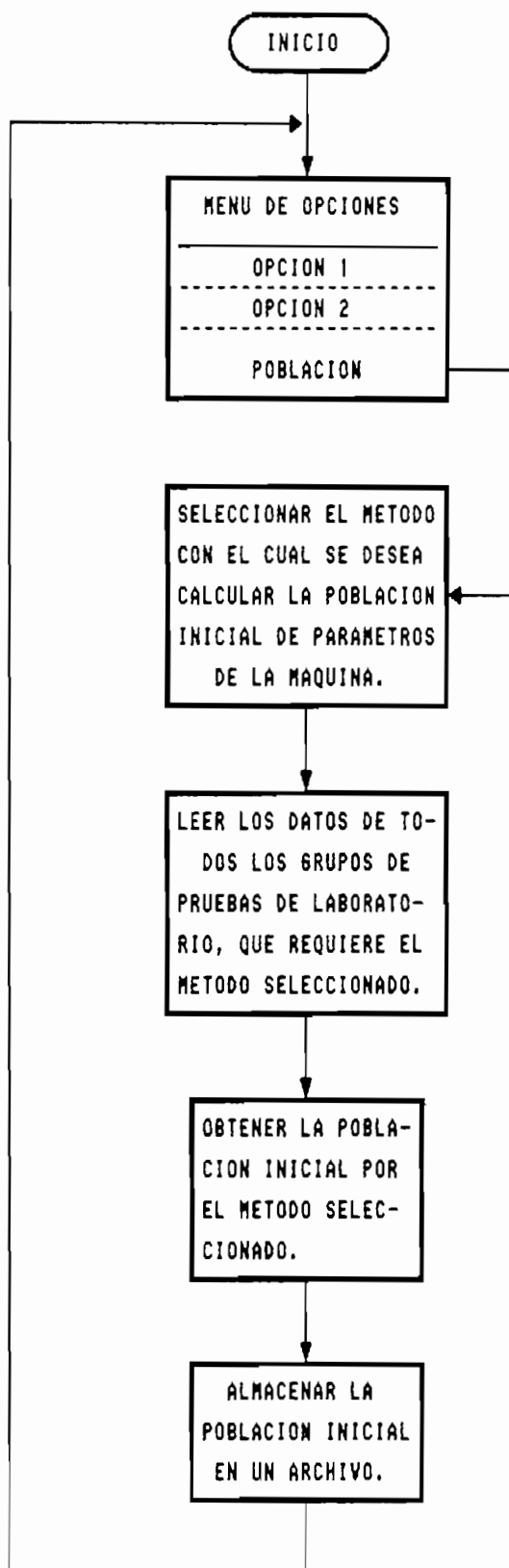


FIGURA 3.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROGRAMA DESARROLLADO PARA OBTENER LA POBLACION INICIAL DE POSIBLES GRUPOS DE PARAMETROS DE LA MAQUINA DE INDUCCION.

Para facilidad del usuario este programa se incluye como una opción de menú dentro del programa que ejecuta el proceso de evolución artificial.

Adicionalmente, para que este proceso entregue resultados satisfactorios, varios investigadores recomiendan que la población inicial contenga, por lo menos, 100 integrantes.

III.2. FUNCION PARA LA LECTURA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Como ya se dijo anteriormente, para calcular un grupo de parámetros de la máquina de inducción, miembro de la población inicial, se requiere de los datos obtenidos a partir de un grupo de pruebas de laboratorio, específico para cada método. En el caso del método *BASICO*, un grupo de estas pruebas está constituido por una prueba de vacío a voltaje nominal y una prueba de rotor bloqueado a corriente nominal. En cambio, en el método que recomienda el *IEEE*, un grupo de pruebas incluye, a más de aquellas que requiere el método básico, una prueba de vacío a deslizamiento de plena carga.

Como se recordará, el tamaño recomendado de la población inicial es de, por lo menos, 100 integrantes. Por esta razón, es necesario disponer de los datos obtenidos a partir de, por lo menos, 100 grupos de pruebas de laboratorio.

Los datos de estos grupos de pruebas, deben estar almacenados en un archivo tipo texto, desde el cual el programa los lee a un arreglo en la memoria llamado *dato_prueba*, para posteriormente calcular con ellos una población inicial, de posibles grupos de parámetros del circuito equivalente propuesto para la máquina de inducción, siguiendo el método correspondiente.

Para obtener la población inicial por el método *BASICO*, se requiere un archivo que contenga dos líneas por cada grupo de pruebas. La primera línea debe tener los valores medidos de voltaje, corriente y potencia para motor en vacío, a voltaje nominal. La segunda línea incluye a los valores de las mismas variables anteriores, pero cuando el motor tiene su rotor bloqueado, tal como se indica en la Tabla 3.1.

GRUPO No.	TIPO DE PRUEBA	DATOS DE MEDICIÓN EN EL ARCHIVO		
		VOLTAJE (volts)	CORRIENTE (amperes)	POTENCIA (watts)
1	Vacío a voltaje nominal.	220	7	400
	Rotor bloqueado a corriente nominal.	66	18	740
...
...
...
...
100	Vacío a voltaje nominal.	220	6.6	300
	Rotor bloqueado a corriente nominal.	66	18	740

Tabla 3.1. Organización interna del archivo de datos utilizado para obtener la población inicial por el método *BASICO*.

En cambio, si la población inicial se la desea obtener siguiendo la recomendación del *IEEE*, se necesita un archivo de datos con la misma estructura indicada anteriormente, pero agregando una línea adicional que corresponde a los valores de voltaje, corriente, potencia y velocidad del rotor cuando el motor trabaja en vacío al valor de deslizamiento de plena carga. La estructura de este archivo se indica en la Tabla 3.2.

En cualquier caso, los datos de voltaje de línea, corriente de línea y potencia activa trifásica, deben medirse en las unidades fijadas por el Sistema Internacional. En lo que respecta a la velocidad del rotor, ésta se debe medir en revoluciones por minuto (rpm).

GRUPO No.	TIPO DE PRUEBA	DATOS DE MEDICIÓN EN EL ARCHIVO			
		VOLTAJE (volts)	CORRIENTE (amperios)	POTENCIA (watts)	VELOCIDAD (rpm)
1	Vacio a voltaje nominal.	220	7	400	
	Rotor bloqueado a corriente nominal.	66	18	740	
	Vacio a desluzamiento de plena carga.	66	2.8	180	1740
...
...
...
...
100	Vacio a voltaje nominal.	220	8.8	360	
	Rotor bloqueado a corriente nominal.	66	18	740	
	Vacio a desluzamiento de plena carga.	66	2.8	160	1760

Tabla 3.2. Organización del archivo de datos que utiliza el método IEEE para obtener la población inicial.

En el caso particular de esta tesis, los dos métodos de cálculo propuestos trabajan correctamente con datos cuyos valores son mayores que cero. Por esta razón, el programa verifica que todos los datos experimentales cumplan con esta condición antes de iniciar cualquier proceso de cálculo, si esto no ocurre, da por terminada la ejecución del programa. Sin embargo, es responsabilidad del usuario el ingreso de datos que sean consistentes con las características de la máquina bajo prueba.

Adicionalmente, el programa requiere conocer de antemano el número de grupos de pruebas de laboratorio que se han realizado a la máquina, ya que no tiene forma de determinarlo automáticamente. Por la razón indicada, este valor debe ser ingresado utilizando el teclado.

En la Figura 3.2, se presenta un diagrama que permite comprender mejor este procedimiento de lectura de los datos experimentales.

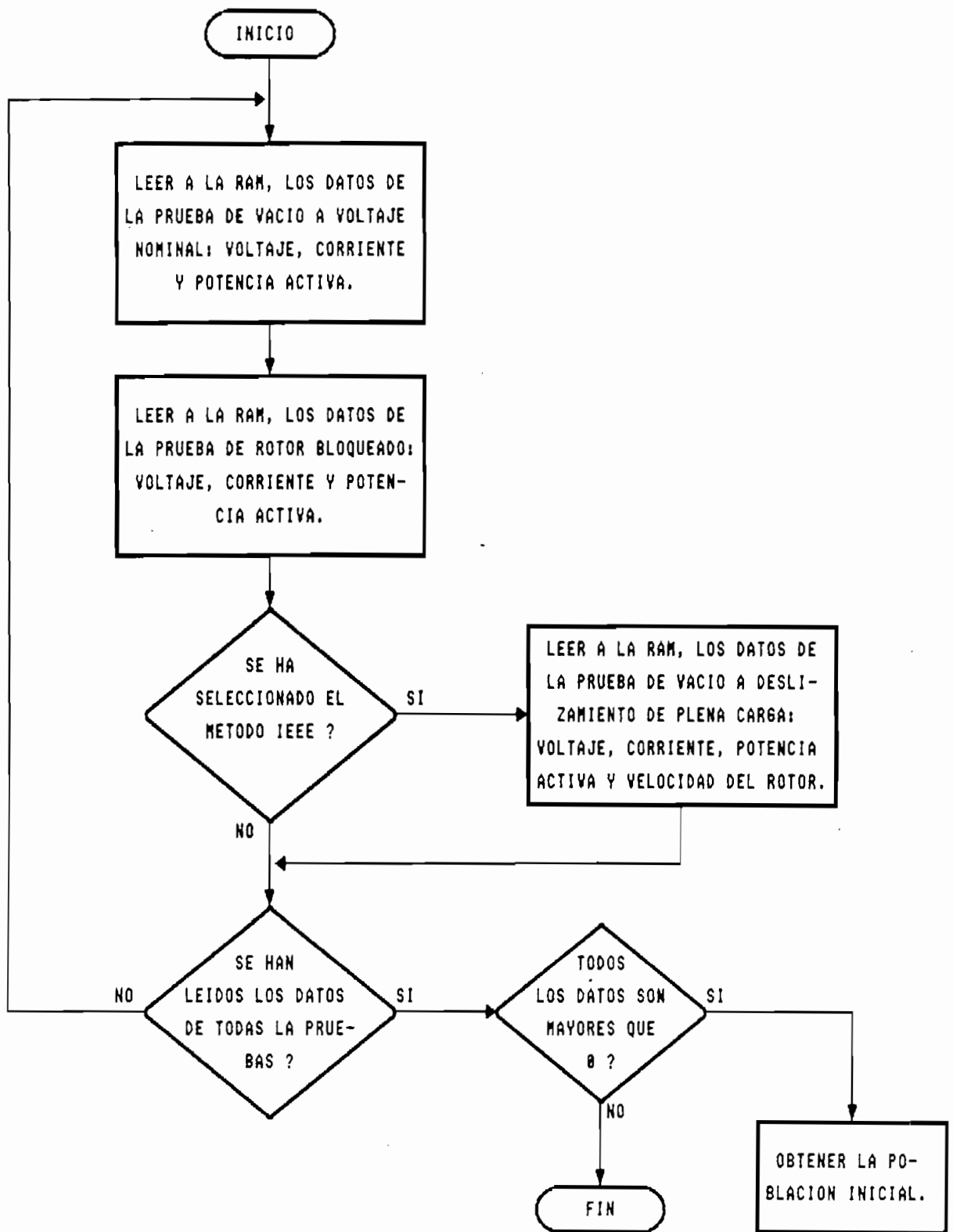


FIGURA 3.2. ESQUEMA DE LA FUNCION UTILIZADA PARA LA LECTURA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

III.3. FUNCIONES PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS.

Se han desarrollado dos funciones diferentes, para obtener la población inicial de posibles grupos de parámetros de la máquina bajo prueba, una por cada uno de los métodos de cálculo de parámetros propuestos en el capítulo anterior.

La estructura de estas funciones es idéntica. Primero se lee, desde el arreglo *dato_prueba* de la memoria, los datos obtenidos a partir de un grupo de pruebas de laboratorio. Estos datos se utilizan para calcular los parámetros del circuito equivalente, siguiendo un procedimiento específico. En el caso del método que recomienda el *IEEE*, dicho procedimiento se detalla en el numeral II.3 del Capítulo II; en tanto que, para el método *BASICO*, éste se explica en el numeral II.4, del mismo capítulo. Los resultados obtenidos se almacenan en la memoria en un arreglo auxiliar llamado *parametro*. Este proceso se repite para cada uno de los grupos de datos almacenados en el arreglo *dato_prueba*.

Debido a que, en el Capítulo II, se propuso un circuito equivalente *por fase*, para la máquina de inducción, es necesario que los datos obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio (que se refieren a la máquina en su conjunto), se conviertan a su equivalente monofásico, antes de calcular cualquier grupo de parámetros.

Cabe indicar que, en el método recomendado por el *IEEE*, se requiere, como dato adicional, el valor de la resistencia de estator. Este valor debe ser determinado una sola vez, al principio del programa, empleando cualquier otro método adicional, como por ejemplo el método del voltímetro-amperímetro.

III.4. FUNCION PARA LA SALIDA DE RESULTADOS.

Si bien es cierto que, son seis los parámetros que conforman el circuito equivalente propuesto para la máquina de inducción, en realidad las incógnitas son sólo cuatro: R_2 , X_1 , X_m y R_{fe} . Esto se explica al tomar en cuenta las restricciones establecidas en cada uno de los métodos de cálculo. Así se tiene que:

- 1) En el método *IEEE*, se considera R_1 como previamente conocida y, $X_1 = X_2'$. Esta última consideración se la hace siguiendo la recomendación de la Norma NEMA MG-1, para el caso de un motor de rotor devanado.
- 2) En el método *BASICO*, se considera $R_1 = R_2'$, y, por las mismas razones antes indicadas, $X_1 = X_2'$.

Por lo tanto, los métodos de cálculo propuestos evalúan, únicamente, los valores de los cuatro parámetros antes indicados, y sólo ellos son almacenados, conforme se los obtiene, en un arreglo en la memoria.

Una vez obtenida la población inicial de grupos de parámetros, ésta se copia desde el arreglo *parametro* en la memoria a un archivo tipo texto, el cual toma un nombre diferente, según el método empleado para calcular los parámetros. Por los requerimientos del programa, se consideró conveniente que estos archivos tengan un nombre propio, que no puede ser modificado. Así, la población obtenida por el método *IEEE*, se almacena en el archivo *M_IEEE.DAT*; en tanto que, la población obtenida por el método *BASICO*, se guarda en un archivo de nombre *M_BASICO.DAT*.

Estos dos archivos tienen una misma estructura de datos, conforme a lo indicado en la Tabla 3.3.

GRUPO No.	PARAMETROS EN EL ARCHIVO			
	R2 (ohmios)	X1 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)
1	0.4818	0.8676	18.3628	121.0000
...
...
...
...
...
...
100	0.4818	0.8681	19.4453	134.4444

Tabla 3.3. Estructura de datos de los archivos M_IEEE.DAT y M_BASIC0.DAT.

El código fuente del programa desarrollado en este capítulo se incluye en el módulo POBINIC.C del Anexo C.

Finalmente, las poblaciones iniciales de posibles parámetros de la máquina obtenidas con este programa, pueden emplearse, indistintamente, en un proceso de evolución artificial que permita encontrar el grupo de parámetros óptimos de la máquina bajo prueba.

Los pormenores de la implementación computacional de este mecanismo de optimización y búsqueda, se explican en el siguiente capítulo.

CAPITULO IV

CAPITULO IV

PROGRAMA DE EVOLUCION ARTIFICIAL.

IV.1. ORGANIZACION GENERAL DEL PROGRAMA.

El programa de evolución artificial, empleado para obtener el grupo de parámetros óptimos de la máquina de inducción, ha sido desarrollado en base al esquema básico de uno de estos mecanismos, presentado anteriormente en la Figura 1.1.

Para aplicar este mecanismo, es necesario contar primero con una población inicial de posibles grupos de parámetros de la máquina en estudio. Una vez obtenida esta población, se procede a evaluar la *aptitud* (mejor dicho, la capacidad de sobrevivencia) de cada uno de estos grupos de parámetros. Luego de lo cual, se ejecuta el mecanismo de evolución artificial aplicando sobre la población los operadores genéticos de reproducción, cruce y mutación para obtener una nueva población, cuyos miembros deben reunir mejores características de aptitud que sus predecesores. Este mecanismo se repite las veces que sean necesarias para alcanzar una cierta condición de convergencia, o, en su defecto, hasta completar el número máximo de generaciones durante las cuales el usuario desea ejecutar el proceso de evolución artificial. En este caso, la condición de convergencia consiste en que, la aptitud de el mejor grupo de parámetros de la nueva población, sea mayor que 10000, es decir, que su error sea menor o igual que $1/10000=0.0001$, Por lo tanto, la población obtenida al final de este proceso incluirá entre sus miembros, un grupo de parámetros con las mejores características de aptitud, el cual se convierte en el grupo de parámetros óptimos de la máquina de inducción.

En la Figura 4.1, se presenta un diagrama explicativo del proceso antes indicado.



FIGURA 4.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROGRAMA DE EVOLUCION ARTIFICIAL.

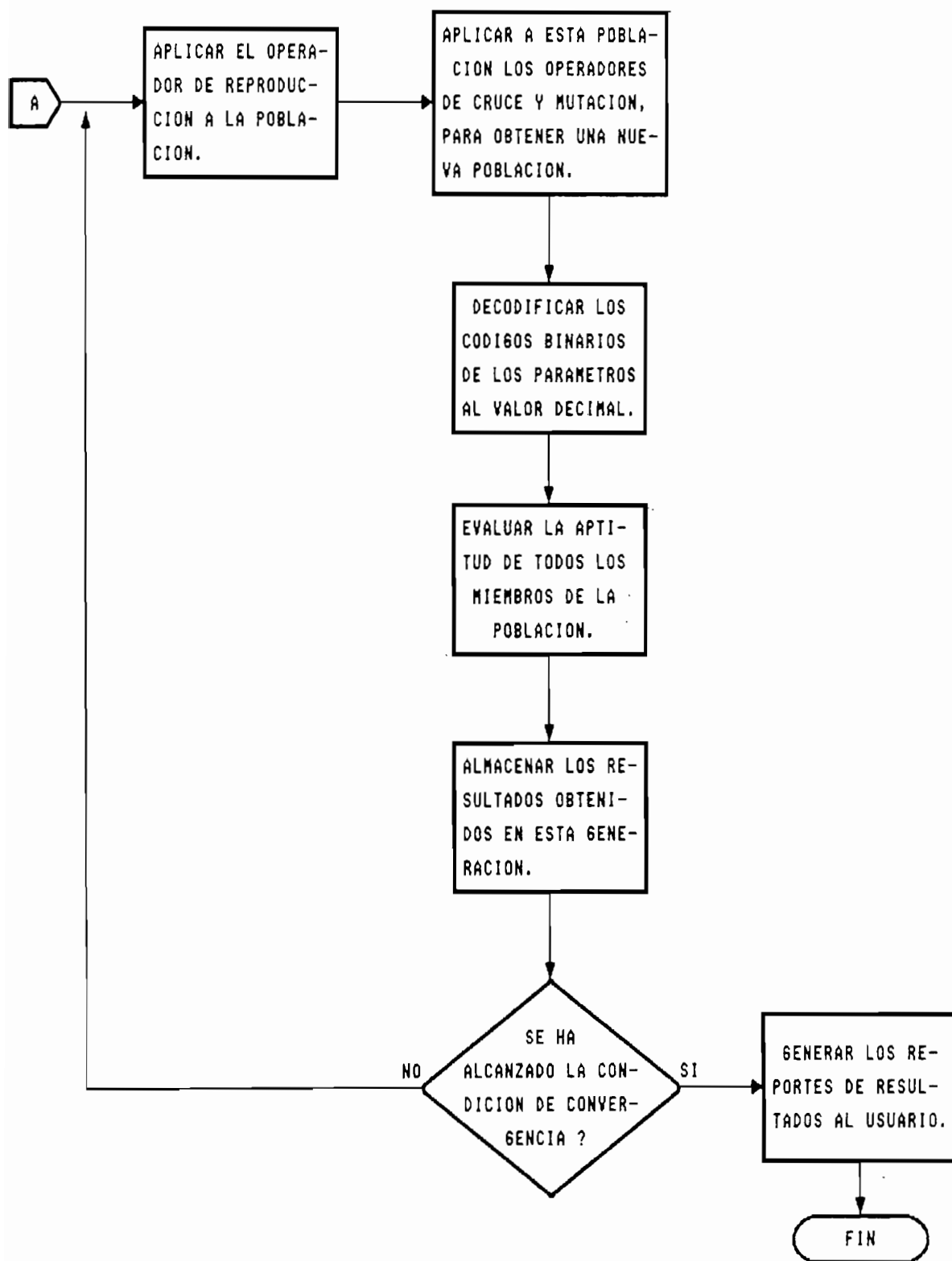


FIGURA 4.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROGRAMA DE EVOLUCION ARTIFICIAL (CONTINUACION).

Debido, principalmente, a que los operadores genéticos se aplican sobre cadenas binarias, aparece la necesidad de convertir los valores de cada uno de los parámetros de la máquina desde su código en punto flotante a un nuevo código binario, los cuales se unen para formar una sola cadena de bits. De la misma manera, la nueva población obtenida, después de aplicar estos operadores genéticos, está compuesta por cadenas binarias formadas a partir de subcadenas que representan a cada uno de los parámetros, las cuales requieren ser convertidas a su correspondiente valor en punto flotante para evaluar la aptitud de cada grupo.

Por lo tanto, se necesitan dos funciones auxiliares para realizar estos procesos de cambio de códigos. A la conversión del valor en punto flotante a su nuevo código binario se la ha denominado *codificación*, en tanto que, al proceso inverso, se lo ha llamado *decodificación*. En la Figura 4.2 se ilustra, gráficamente, la forma de realizar estas conversiones.

Como se puede observar, en los dos procesos de conversión se utiliza un valor entero intermedio, el cual solo puede variar entre X_{min} y X_{max} .

En la tesis del Sr. Julio Almeida [14], para una máquina con los mismos datos de placa que la empleada en esta tesis, se llegó a determinar que R_1 , R_2 , X_1 y X_2 pueden alcanzar un valor máximo de 10 ohmios; X_m puede llegar a los 50 ohmios como máximo; en tanto que, el límite máximo de R_{fe} se fija en los 500 ohmios. Como se puede ver, el valor máximo corresponde a R_{fe} , por lo tanto, para disponer de una resolución de por lo menos 0.5 ohmios para este parámetro, se concluye que cada parámetro debe ser codificado en una cadena binaria de 10 bits, ya que de esta manera es posible obtener valores comprendidos entre 0 (X_{min}) y 1023 (X_{max}). Adicionalmente, en el capítulo anterior se explicó que son solo cuatro las incógnitas del circuito equivalente considerado, por esta razón, al unir los códigos binarios de un grupo de parámetros se forma una cadena de 40 bits de longitud.

Sin embargo, es posible reajustar la resolución de trabajo con solo aumentar el número de bits de la cadena representativa de cada parámetro. Estos cambios deben realizarse en el archivo de encabezado del programa AGINCLUD.H, redefiniendo las constantes L_PARAMETRO y L_CROMOSOMA, teniendo en cuenta que L_CROMOSOMA es igual a cuatro veces L_PARAMETRO. También es necesario modificar los valores de Xmin y Xmax definidos en el módulo COD_DEC.C, de acuerdo al nuevo número de bits por parámetro.

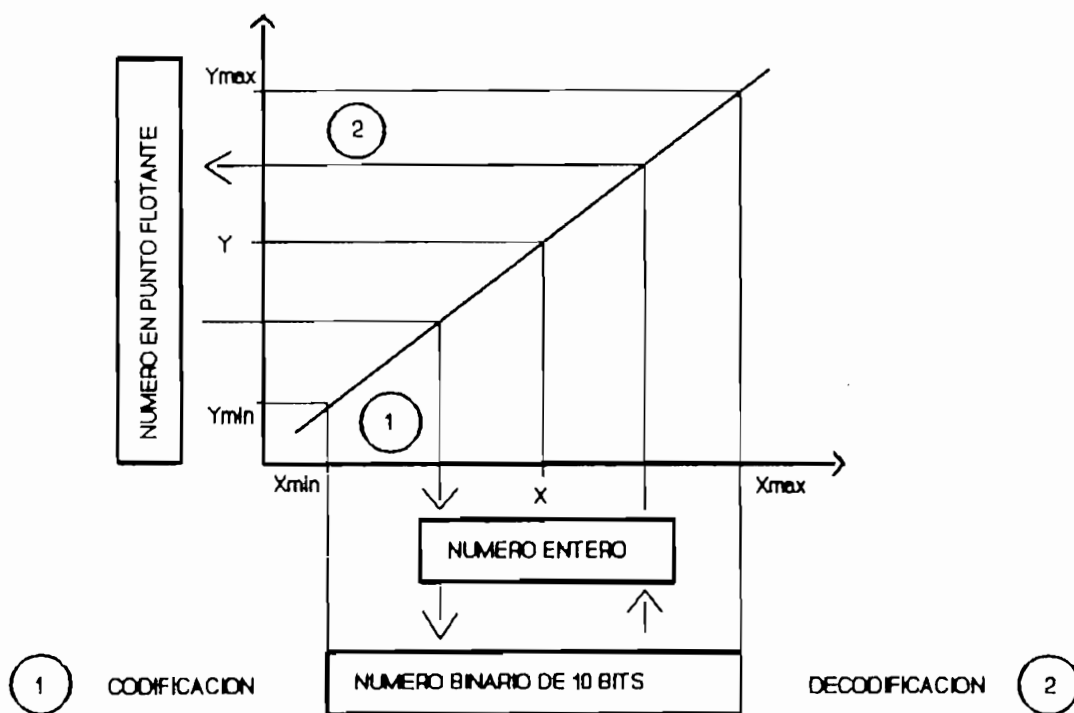


Figura 4.2. Mecanismo utilizado en el cambio de código de los parámetros de la máquina.

El proceso de *codificación* se lo realiza de la siguiente manera:

1) Leer el valor (Y) de un parámetro, miembro de un grupo, el cual está dado en punto flotante.

2) Por medio de la ecuación de la recta

$$X = \frac{X_{max} - X_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \cdot (Y - Y_{min}) + X_{min}$$

este valor se convierte en su correspondiente valor entero (X).

3) Aplicando el método de las divisiones sucesivas para 2, este valor entero se convierte en un número binario de 10 bits.

4) Una vez que se han codificado todos los parámetros de un grupo, sus códigos binarios se unen para formar una sola cadena de 40 bits de longitud, en el orden siguiente: R2, X1, Xm y Rfe, comenzando desde el bit menos significativo.

5) Este procedimiento se repite hasta codificar todos los grupos de parámetros miembros de una población.

En cambio, el proceso de *decodificación* se lo realiza como se indica a continuación:

1) Se toma una cadena binaria de 40 bits, miembro de la población.

2) Esta cadena se divide en cuatro grupos de 10 bits cada uno, según el orden indicado anteriormente.

3) Cada uno de estos grupos de bits, se convierten a su correspondiente valor entero (X), utilizando el método normal de conversión de base 2 a base 10.

4) Aplicando la ecuación de la recta

$$Y = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot (X - X_{min}) + Y_{min}$$

este valor entero X , se convierte en su correspondiente valor en punto flotante Y .

- 5) Este proceso se repite para todas las cadenas miembros de una población.

Como se puede observar, estos dos procedimientos requieren conocer previamente los valores de Y_{min} y Y_{max} , los mismos que no hacen sino definir el rango de variación propio de cada parámetro, en su código en punto flotante. En el siguiente numeral de este capítulo, se profundiza en el tema concerniente al rango de variación propio de cada parámetro.

IV.2. FUNCION PARA LA ADQUISICION DE DATOS.

Para ejecutar el proceso de evolución artificial, el programa necesita de cierta información proporcionada por el usuario.

El primer requisito es seleccionar la población inicial de posibles parámetros de la máquina de inducción con la cual se desea trabajar. Según lo explicado en el capítulo anterior, es posible seleccionar entre dos poblaciones iniciales diferentes: la obtenida por el método que recomienda el *IEEE* y la obtenida por el método *BASICO*, las mismas que están almacenadas en los archivos *M_IEEE.DAT* y *M_BASICO.DAT*, respectivamente. Adicionalmente, si se escoge trabajar con la población obtenida por el método que recomienda el *IEEE*, el programa requiere conocer el valor de la resistencia de estator.

Otro dato importante es el número máximo de generaciones durante las cuales se desea llevar a cabo el proceso de evolución artificial, en caso de que no sea posible converger a la condición fijada como requisito para detener este proceso. Como se indicó anteriormente, esta condición de convergencia se consigue cuando el mejor grupo de parámetros, miembro de una población, tiene una aptitud mayor que 10000, es decir, un error menor o igual que 0.0001.

El programa también necesita conocer las probabilidades de cruce y mutación, las cuales indican la frecuencia con que estos operadores genéticos afectan a los miembros de una población.

Para evaluar la aptitud, se requiere conocer las constantes características de la función de error definida en el numeral IV.6 de este capítulo, estas son: K_1 , K_2 , K_3 y m . Además, esta función utiliza como referencia los valores de impedancia de entrada y torque en el eje de la máquina, cuando en su eje existe una carga. El torque se mide directamente, en tanto que, la impedancia de entrada a la máquina se calcula a partir de los valores de voltaje de línea, corriente de línea y potencia activa trifásica. Estos valores deben medirse en las unidades fijadas para el efecto por el Sistema Internacional.

Para los procesos de codificación y decodificación de los parámetros, el programa necesita que el usuario defina el rango de posibles valores que puede tomar cada uno de ellos. Esto rangos son los siguientes:

- 1) $(R_{2_{\min}}, R_{2_{\max}})$, para la resistencia de rotor, referida al estator.
- 2) $(X_{1_{\min}}, X_{1_{\max}})$, para la reactancia de dispersión del rotor. Cabe recordar que el programa considera $X_1 = X_2'$, razón por la cual no es necesario definir un rango de variación para X_2' .

- 3) ($X_{m_{\min}}$, $X_{m_{\max}}$), para la reactancia de magnetización del núcleo.
- 4) ($R_{fe_{\min}}$, $R_{fe_{\max}}$), para la resistencia de pérdidas del núcleo.

Para la máquina utilizada en esta tesis, se ha determinado, de manera experimental, los valores idóneos para algunas de estas variables, los cuales se indican a continuación:

- Número máximo de generaciones, 300.
- Probabilidad de mutación, 0.01.
- Probabilidad de cruce, 1.00.
- $K1 = K2 = K3 = 1/3$.
- $m = 1$.
- Rango de variación de $R2$, (0.01, 5.00), ohmios.
- Rango de variación de $X1$, (0.01, 5.00), ohmios.
- Rango de variación de Xm , (5.00, 50.00), ohmios.
- Rango de variación de Rfe , (30.00, 300.00), ohmios.

Sin embargo, los valores antes indicados pueden ser modificados por medio del teclado.

IV.3. FUNCION PARA SUPERVISAR EL PROCESO DE REPRODUCCION.

Como paso previo para aplicar el proceso genético de reproducción en una población, se requiere evaluar la *aptitud* de cada uno de sus miembros y obtener así ciertos datos estadísticos de toda la población, como son: la aptitud mínima, promedio, máxima y su sumatorio. Con toda esta información se procede a calcular el número de veces que cada cadena de bits, representativa de un grupo de parámetros de la máquina, debe reproducirse. Esto se consigue al dividir la aptitud de cada miembro de la población para la aptitud promedio de toda la población, redondeando el número así obtenido al entero más próximo.

Luego de lo cual, cada una de estas cadenas de bits contribuye con el número de copias de ella misma, calculado anteriormente, a un depósito intermedio. Las cadenas contenidas en este depósito se utilizan, más tarde, en los procesos genéticos de cruce y mutación, para obtener una nueva población que reúna mejores características, en cuanto a su aptitud, que la anterior. En los dos literales siguientes se explica la forma en que se han implementado los operadores genéticos de cruce y mutación.

IV.4. FUNCION PARA SUPERVISAR EL PROCESO DE MUTACION.

La mutación es el operador más sencillo de implementar de todos aquellos involucrados en un proceso genético artificial. Esto debido a que, como se trabaja con cadenas binarias de 40 bits, no se trata sino de cambiar un 1 por un 0, y viceversa. Sin embargo, esta alteración debe hacerse con la frecuencia que el usuario haya escogido por medio de la probabilidad de mutación.

Por lo tanto, el programa necesita leer cada bit que conforma una cadena y analizar si debe o no ser alterado, para lo cual genera un número aleatorio, comprendido entre 0.0 y 1.0, y, si este número es menor que la probabilidad de mutación indicada, entonces modifica el bit, caso contrario lo mantiene sin ninguna alteración.

Debido a esta característica de ejecución, la mutación se aplica, generalmente, de manera simultánea con el proceso de cruce, cuya implementación computacional se explica a continuación.

IV.5. FUNCION PARA SUPERVISAR EL PROCESO DE CRUCE.

El primer paso en el proceso de cruce es la selección, al azar, de parejas de cadenas entre los miembros de una población, buscando siempre que cada una de ellas sea única. Esto impone, como restricción, que la población tenga siempre un número par de miembros.

A continuación, se leen las cadenas de bits correspondientes a una pareja, y se escoge al azar un *punto de cruce*. El siguiente paso consiste en analizar si estas cadenas deben intercambiar o no una porción de sus bits. Esto se consigue generando un número aleatorio, comprendido entre 0.0 y 1.0, y comparándolo con la probabilidad de cruce definida por el usuario. Si el número generado es menor que la probabilidad de cruce, entonces estas cadenas intercambian las porciones de bits comprendidas entre el punto de cruce seleccionado y el final de la cadena, ó, en su defecto, se copian las mismas cadenas, sin ninguna alteración. Es precisamente en este momento cuando se aplica, de manera simultánea, el operador genético de mutación.

Repitiendo este proceso para todas las parejas de cadenas miembros de la población, se obtiene como resultado final una nueva población, la cual, con toda seguridad, tendrá mejores características de aptitud que su predecesora.

IV.6. FUNCION PARA EVALUAR LA APTITUD DE LOS GRUPOS DE PARAMETROS.

Antes de calcular la *APTITUD* de un grupo de parámetros de una población, el programa evalúa con ellos una función de error. Como se sabe, el error de cualquier variable se calcula de la siguiente manera:

$$\text{error} = \text{valor de referencia} - \text{valor estimado}$$

En el caso particular de esta tesis, es necesario evaluar los errores que existen para el torque en el eje y para las componentes real e imaginaria de la impedancia de entrada a la máquina en estudio, cuando en su eje se aplica una carga mecánica. Los *valores de referencia* se obtienen a partir de una prueba experimental de carga efectuada a la máquina, en tanto que, los *valores estimados* se calculan con los grupos de parámetros del circuito equivalente, miembros de la población. Más adelante en este capítulo se explica la forma de determinar tanto los *valores de referencia* como los *valores estimados* de las variables consideradas.

A partir de los tres tipos de errores antes indicados, se calcula el error medio cuadrático, aplicando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{3} \cdot [\text{Re}(Z_r) - \text{Re}(Z_e)]^2 + \frac{1}{3} \cdot [\text{Im}(Z_r) - \text{Im}(Z_e)]^2 + \frac{1}{3} \cdot [T_r - T_e]^2$$

en donde:

- 1) E significa el error medio cuadrático.
- 2) Z se refiere a la impedancia compleja que se presenta en los terminales de entrada a la máquina bajo prueba.
- 3) T corresponde al torque en el eje de la máquina.
- 4) El subíndice r , corresponde a los valores tomados como referencia.
- 5) El subíndice e , se refiere a los valores obtenidos durante la ejecución del proceso de evolución artificial.
- 6) Re , corresponde a la parte real.
- 7) Im , corresponde a la parte imaginaria.

Sin embargo, el programa emplea una función de error más generalizada que permite al usuario determinar la contribución de cada uno de los errores de las variables involucradas al error total. Esta ecuación se indica a continuación:

$$E = K_1 \cdot [Re(Z_r) - Re(Z_e)]^{2 \cdot m} + K_2 \cdot [Im(Z_r) - Im(Z_e)]^{2 \cdot m} + K_3 \cdot [T_r - T_e]^{2 \cdot m}$$

en donde:

- 1) K_1, K_2 y K_3 determinan esa contribución. Sus valores deben escogerse de tal manera que su suma sea igual a 1.
- 2) m , se utiliza para profundizar el efecto de los errores más grandes y/o minimizar el de los errores más pequeños.

Al evaluar de esta manera el error, es posible identificar los grupos de parámetros con los cuales se obtienen valores de impedancia y torque más próximos a las condiciones de referencia. A estos grupos los podemos considerar como los más aptos dentro de la población. Visto de esta manera, la *aptitud* de un grupo de parámetros se puede definir como el inverso del error que se obtiene al evaluar con ellos la función de error.

Al calcular la aptitud de los grupos de parámetros de la máquina de inducción, miembros de una población, se consigue dos cosas muy importantes:

- 1) determinar los grupos de parámetros que reúnen las características necesarias para sobrevivir al proceso de reproducción, y
- 2) encontrar el grupo de parámetros óptimos de la máquina de inducción, al final del proceso de evolución artificial.

IV.6.1. DETERMINACION DE LOS VALORES REFERENCIALES.

Los valores referenciales de impedancia compleja de entrada y de torque en el eje, se calculan a partir de los datos experimentales obtenidos al realizar a la máquina una prueba de carga.

El valor referencial de torque en el eje se mide directamente, utilizando un medidor de torque conectado al eje de la máquina. El valor referencial de impedancia compleja de entrada a la máquina, se calcula a partir de los datos de voltaje (V) y corriente (I) por fase en conexión Y, y potencia activa trifásica (P), para el motor completo. Para ello se aplica el siguiente procedimiento:

1) Calcular

$$\phi = \arccos \left(\frac{P}{3 \cdot V \cdot I} \right)$$

2) Calcular el módulo de la impedancia de entrada a la máquina, aplicando la siguiente ecuación

$$|Z_r| = \frac{V}{I}$$

3) Obtener la parte real de la impedancia compleja, por medio de la ecuación

$$Re(Z_r) = |Z_r| \cdot \cos \phi$$

4) Por último, obtener la parte imaginaria de esta impedancia, utilizando la ecuación siguiente

$$Im(Z_r) = |Z_r| \cdot \sin \phi$$

Una vez que se han calculado los valores de referencia, éstos se convierten en una constante del programa durante el proceso de evolución artificial. Adicionalmente, el programa permite trabajar con diferentes valores de referencia, para encontrar el grupo de parámetros del circuito equivalente que más adapte a cada condición.

La forma de realizar la prueba experimental de carga en una máquina de inducción trifásica, se explica en las referencias [14] y [17] de la bibliografía de esta Tesis.

IV.6.2. ESTIMACION DE LOS VALORES DE IMPEDANCIA Y TORQUE DURANTE EL PROCESO DE EVOLUCION ARTIFICIAL.

La determinación de los valores estimados de impedancia de entrada a la máquina y torque en el eje, se la hace a partir del circuito equivalente, por fase, para la máquina de inducción, propuesto en el Capítulo II, empleando los parámetros de un grupo miembro de la población. Este modelo se reproduce nuevamente en la Figura 4.3.

Las componentes real e imaginaria de la impedancia de entrada se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} (Z_e) &= R_1 + c \cdot \left(b \cdot \frac{R_2}{s} - a \cdot X_2 \right) \\ \operatorname{Im} (Z_e) &= X_1 + c \cdot \left(a \cdot \frac{R_2}{s} + b \cdot X_2 \right) \end{aligned}$$

en donde:

$$a = R_{fe} \cdot \frac{R_2}{s} - X_2 \cdot X_m$$

$$b = R_{fe} \cdot (X_m + X_2) + X_m \cdot \frac{R_2}{s}$$

$$c = \frac{X_m \cdot R_{fe}}{a^2 + b^2}$$

En cambio, el valor del torque en el eje, se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

en donde:

- 1) V_1 corresponde al voltaje de fase que alimenta al motor, durante la prueba de carga.
- 2) s es el deslizamiento de la máquina, bajo las mismas condiciones anteriores.
- 3) ω_m es la velocidad de sincronismo de la máquina, expresada en radianes/segundo.

Adicionalmente, es necesario aclarar que las unidades de todas las variables involucradas se expresan en aquellas que han sido fijadas por el Sistema Internacional de Unidades.

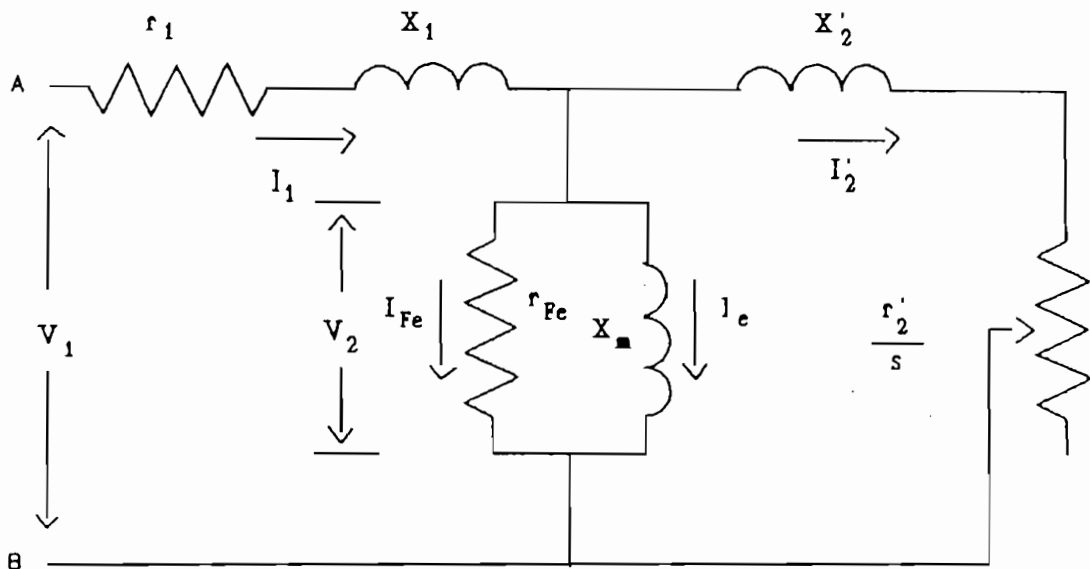


Figura 4.3. Circuito equivalente, por fase, propuesto para la máquina de inducción trifásica.

IV.7. . FUNCION PARA LA PRESENTACION DE RESULTADOS AL USUARIO.

Una vez que termina el proceso de evolución artificial de la población de grupos parámetros de la máquina, el programa crea dos archivos tipo texto, siempre con los mismos nombres, estos son: *AGREPOR1.PRN* y *AGREPOR2.PRN*.

En el archivo *AGREPOR1.PRN*, se almacenan los valores de todas las variables indicadas en el numeral IV.2, así como los valores de los parámetros del mejor grupo disponible, tanto en la población inicial como en la resultante, incluidas algunas de sus características más importantes. Como es de suponer, el mejor grupo de parámetros de la población final, se convierte en el grupo de parámetros óptimos de la máquina.

En el archivo *AGREPOR2.PRN*, se almacena el mismo tipo de valores que en el archivo *AGREPOR1.PRN*, pero para cada una de las nuevas poblaciones obtenidas durante el proceso de evolución artificial. Estos datos indican la forma como ha evolucionado cada uno de los parámetros del circuito equivalente de la máquina hasta alcanzar sus valores óptimos.

Para facilidad del usuario, el programa muestra en pantalla los resultados obtenidos luego de finalizado el proceso de evolución artificial, y los compara con los valores iniciales. También es posible obtener una impresión en papel, de todo el contenido del archivo *AGREPOR1.PRN*.

Adicionalmente, el programa está en capacidad de graficar, en pantalla, la forma como ha evolucionado cada uno de los parámetros del circuito equivalente de la máquina, de generación en generación, hasta alcanzar sus valores óptimos.

El código fuente de este programa se lo ha dividido en los siguientes módulos:

- 1) AGEVOLUC.C, que incluye la función que realiza el proceso de evolución artificial.
- 2) COD_DEC.C, en el cual se incluyen las funciones para la codificación y decodificación de los parámetros.
- 3) GENERAC.C, que contiene las funciones de reproducción, cruce y mutación.
- 4) EVALUAR.C, que incluye la función utilizada para evaluar la aptitud de los grupos de parámetros.
- 5) REPORTE.C, en el cual se incluyen las funciones necesarias para la elaboración de los reportes de resultados.
- 6) GRAFICOS.C, que contiene las funciones que permiten visualizar en pantalla la forma como ha evolucionado la población.

Hasta aquí se ha explicado, con cierta profundidad, la forma como se implementó, computacionalmente, este mecanismo de evolución artificial. En el siguiente capítulo, se incluyen los resultados obtenidos con este programa.

CAPITULO V

CAPITULO V

RESULTADOS.

V.1. DATOS EXPERIMENTALES Y POBLACION INICIAL DE GRUPOS DE PARAMETROS.

V.1.1. CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA BAJO PRUEBA.

La máquina eléctrica, cuyo grupo de parámetros óptimos se desea encontrar, reúne las siguientes características:

- Clase : Motor de Inducción Trifásico.
- Marca : Cetel Bruxelles.
- Tipo : S611, No.3.
- Alimentación : Corriente alterna.
- Frecuencia : 60 Hz.
- Voltaje : 220 / 360 V.
- Corriente : 16.3 / 9.55 A.
- Potencia : 5.5 CV.
- Factor de potencia : 0.8.
- Velocidad : 1740 rpm.
- Número de polos : 4.
- Tipo de rotor : Bobinado.
- Conexión en el estator : Delta.
- Conexión en el rotor : Estrella.

V.1.2. DATOS EXPERIMENTALES NECESARIOS PARA LA OBTENCION DE LA POBLACION INICIAL DE GRUPOS DE PARAMETROS.

Para obtener la población inicial de posibles parámetros de esta máquina, tanto por el método BASICO como por el método

recomendado por el IEEE, se han tomado los datos de 100 grupos de pruebas de laboratorio. Cada uno de estos grupos consta de las siguientes pruebas: de vacío a voltaje nominal, de vacío a deslizamiento de plena carga y de rotor bloqueado a corriente nominal.

El equipo necesario para la realización de las pruebas antes indicadas es el siguiente:

- Un motor de inducción trifásico AC;
- Un vatímetro trifásico de bajo factor de potencia;
- Un amperímetro de AC, con escala de 0 - 20 A;
- Un voltímetro de AC, con escala de 0 - 260 V;
- Un variac trifásico;
- Tres transformadores de corriente 50 - 5 A;
- Un tacómetro.

En la Figura 5.1, se muestra el diagrama de conexiones de estos equipos. El procedimiento a seguirse, para la realización de estas pruebas, es el siguiente:

- 1) Implementar el circuito de la Figura 5.1.
- 2) Realizar la *prueba de vacío a voltaje nominal*, sin carga en el rotor o con una carga reducida; y, aplicando el voltaje trifásico nominal de entrada a la máquina bajo prueba, se miden los valores de corriente, potencia y deslizamiento.
- 3) Realizar la *prueba de vacío a deslizamiento de plena carga*, que consiste en reducir el voltaje de alimentación de la máquina hasta obtener, aproximadamente, el deslizamiento de plena carga, cuando la máquina está girando desacoplada o acoplada a una carga reducida. En estas condiciones se toman lecturas de voltaje, corriente, potencia y deslizamiento.

- 4) Realizar la *prueba de rotor bloqueado*, manteniendo fijo el rotor, sin dejarlo que gire libremente; aplicando un voltaje suficiente para que circule la corriente nominal, se mide voltaje y potencia.

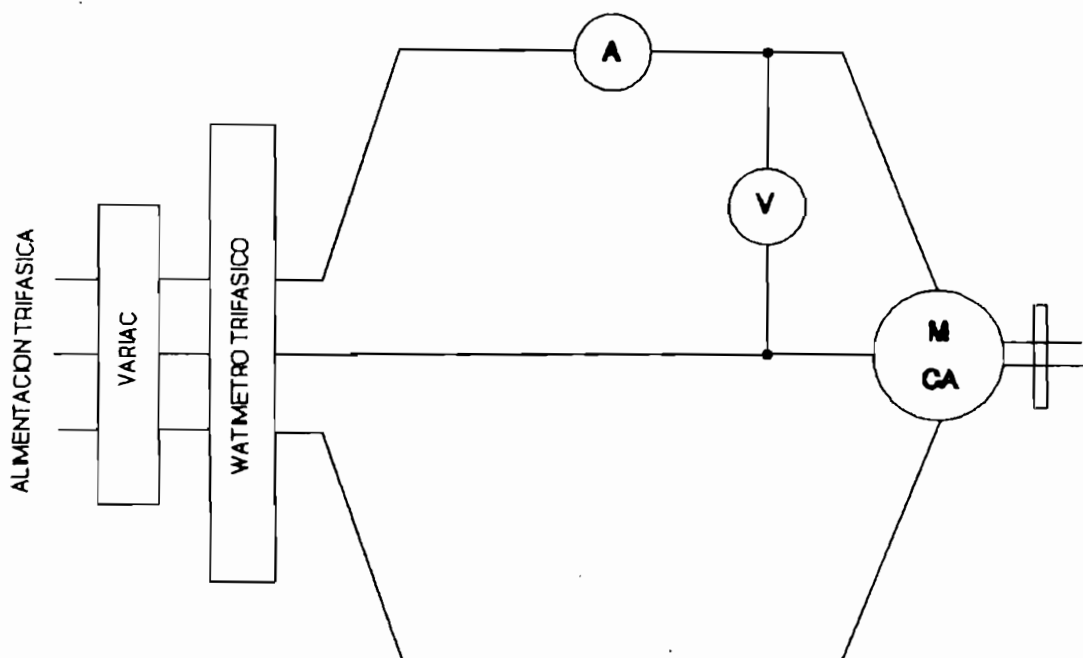


Figura 5.1. Diagrama de conexiones para realizar las pruebas de vacío y de rotor bloqueado en la máquina de inducción.

Los datos experimentales, obtenidos a partir de estos grupos de pruebas de laboratorio, se indican a continuación, en la Tabla 5.1.

DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES											
No.	PRUEBA DE VACIO A VOLTAJE NOMINAL				PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO			PRUEBA DE VACIO A DESLIZ DE PLENA CARGA			
	V Volt.	I Amp.	W Watt.	nr rpm	V Volt.	I Amp.	W Watt.	V Volt.	I Amp.	W Watt.	nr rpm
1	220	7.0	400	1800	55	18.0	740	58	2.6	180	1740
2	220	6.9	380	1790	57	16.3	760	52	2.6	160	1740
3	220	6.8	360	1780	55	18.5	720	58	2.7	180	1740
4	220	6.9	360	1800	56	16.5	720	54	2.6	160	1720
5	220	6.8	360	1790	54	18.0	720	54	2.6	160	1740
6	220	6.8	360	1780	54	18.0	720	58	2.6	180	1740
7	220	6.8	360	1780	54	18.0	680	58	2.6	160	1720
8	220	6.6	360	1790	54	18.0	700	59	2.5	180	1740
9	220	6.7	360	1780	56	16.5	760	60	2.5	160	1740
10	220	6.7	364	1790	54	18.2	680	58	2.6	160	1740
11	220	6.8	360	1780	54	18.0	700	58	2.5	164	1740
12	220	6.8	360	1790	54	18.6	720	58	2.6	160	1740
13	220	6.6	360	1795	54	16.0	700	56	2.5	160	1760
14	225	6.9	360	1795	53	15.8	660	50	2.6	160	1740
15	220	6.6	360	1795	54	16.0	700	54	2.6	160	1740
16	220	6.4	360	1800	55	18.0	700	58	2.5	160	1750
17	215	6.2	340	1795	56	16.5	720	50	2.5	160	1730
18	225	6.8	364	1800	55	18.0	720	54	2.4	160	1740
19	205	6.0	320	1795	58	16.5	728	58	2.5	160	1750
20	220	6.6	360	1795	56	18.0	740	58	2.6	160	1740
21	220	6.4	364	1798	56	16.5	740	60	2.2	160	1760
22	220	6.3	360	1790	54	18.0	700	58	2.2	160	1750
23	225	6.5	380	1790	54	18.0	680	58	2.3	160	1740
24	220	6.4	360	1795	58	18.0	720	60	2.2	160	1760
25	220	6.3	360	1790	57	18.5	760	54	2.1	180	1730
26	220	6.2	368	1790	54	15.5	700	58	2.2	160	1740
27	210	5.8	358	1790	58	18.5	780	54	2.2	160	1740
28	215	5.8	360	1790	55	18.0	720	54	2.2	160	1740
29	220	6.4	360	1780	57	18.5	780	58	2.1	160	1740
30	225	6.2	360	1795	55	18.0	720	55	2.1	160	1750
31	220	7.0	400	1800	56	18.0	720	54	2.1	140	1760
32	225	6.4	360	1800	54	15.5	700	55	2.1	160	1750
33	220	6.6	360	1795	58	18.0	720	58	2.3	160	1740
34	225	6.6	360	1800	57	18.5	780	52	2.1	158	1730
35	205	5.8	320	1790	50	15.0	640	48	2.2	120	1740

TABLA 5.1. DATOS EXPERIMENTALES NECESARIOS PARA OBTENER LAS POBLACIONES INICIALES.

DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES											
No.	PRUEBA DE VACIO A VOLTAJE NOMINAL				PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO			PRUEBA DE VACIO A DESLIZ DE PLENA CARGA			
	V Volt.	I Amp.	W Watt	nr rpm	V Volt.	I Amp.	W Watt	V Volt.	I Amp.	W Watt	nr rpm
36	230	6.8	360	1800	49	15.0	600	48	2.2	120	1740
37	225	6.5	380	1790	55	16.5	720	50	2.5	160	1750
38	220	6.2	360	1790	60	17.0	840	60	2.3	160	1750
39	220	6.0	360	1790	49	15.0	600	50	2.1	120	1760
40	225	6.9	360	1795	56	17.0	800	58	2.1	156	1740
41	220	6.1	360	1795	58	16.0	720	52	2.2	156	1740
42	220	6.2	360	1800	56	16.5	760	60	2.2	160	1750
43	220	6.1	380	1790	58	16.5	780	55	2.1	156	1740
44	225	6.2	360	1800	57	16.0	760	56	2.1	160	1740
45	215	5.8	356	1780	55	16.0	720	58	2.1	156	1740
46	220	6.2	360	1790	57	16.5	780	56	2.1	160	1740
47	220	6.0	360	1780	58	16.5	780	54	2.0	156	1730
48	220	6.1	360	1795	58	16.0	800	52	2.1	140	1730
49	220	6.2	360	1795	56	16.0	740	54	2.2	160	1740
50	225	6.5	360	1800	56	16.0	720	56	2.2	160	1740
51	215	5.8	356	1785	56	16.0	760	54	2.0	140	1740
52	220	6.0	360	1800	55	16.0	720	54	2.1	140	1740
53	220	6.0	360	1790	56	16.0	740	56	2.0	160	1740
54	215	6.0	340	1790	54	15.5	700	58	2.1	156	1740
55	220	6.2	360	1790	57	16.5	780	60	2.1	160	1750
56	220	6.0	360	1790	56	16.0	740	56	2.0	160	1740
57	220	6.2	360	1790	58	16.5	800	54	2.0	160	1740
58	215	5.8	360	1785	54	15.5	700	54	2.0	160	1740
59	210	5.6	320	1800	57	16.5	780	52	2.1	156	1730
60	220	6.2	360	1790	60	17.0	840	56	2.0	156	1740
61	220	6.0	360	1790	54	16.0	720	54	2.0	160	1750
62	220	6.4	340	1790	56	16.5	760	56	2.4	156	1750
63	220	6.5	340	1800	54	16.0	720	54	2.4	140	1750
64	225	6.6	360	1800	54	16.0	720	56	2.3	140	1750
65	220	6.8	360	1790	54	16.5	740	54	2.4	160	1740
66	225	7.0	360	1800	54	16.5	740	58	2.3	160	1750
67	200	5.8	320	1790	54	16.0	700	50	2.4	160	1740
68	220	6.8	356	1790	51	15.5	640	58	2.3	160	1750
69	215	6.6	340	1790	53	16.0	720	56	2.4	160	1740
70	225	7.0	360	1800	54	16.5	760	60	2.3	160	1750

TABLA 5.1. DATOS EXPERIMENTALES NECESARIOS PARA OBTENER LAS POBLACIONES INICIALES. (CONTINUACION)

DATOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES											
No.	PRUEBA DE VACIO A VOLTAJE NOMINAL				PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO			PRUEBA DE VACIO A DESLIZ DE PLENA CARGA.			
	V Volt.	I Amp.	W Watt.	nr rpm	V Volt.	I Amp.	W Watt.	V Volt.	I Amp.	W Watt.	nr rpm
71	220	6.3	320	1795	56	16.5	800	54	21	140	1760
72	225	6.5	360	1790	54	16.3	740	56	20	140	1760
73	220	6.2	340	1790	54	16.3	740	58	21	120	1760
74	220	6.3	340	1790	54	16.0	720	58	21	120	1760
75	220	6.2	340	1800	54	16.3	740	52	21	120	1750
76	225	6.4	360	1800	52	16.0	700	60	2.2	140	1760
77	220	6.2	340	1790	52	15.8	680	58	2.2	140	1760
78	220	6.4	360	1795	50	15.0	640	56	21	140	1760
79	225	6.5	360	1800	52	15.5	700	56	21	160	1760
80	200	5.5	300	1800	55	16.5	780	50	20	140	1760
81	220	6.3	340	1790	52	15.5	680	52	2.2	120	1750
82	220	6.2	340	1795	54	16.0	720	54	2.2	120	1760
83	230	6.8	360	1800	54	16.5	760	60	21	140	1760
84	225	6.6	360	1795	49	15.0	600	58	21	140	1760
85	220	6.2	340	1800	54	16.5	760	54	2.2	140	1760
86	215	6.0	320	1790	53	16.0	720	52	2.2	120	1750
87	200	5.4	300	1790	51	15.5	680	50	21	120	1760
88	205	5.6	320	1790	56	17.0	800	48	2.2	120	1740
89	210	5.8	320	1790	54	16.5	760	50	2.2	160	1740
90	215	6.6	340	1790	52	15.5	680	49	2.2	120	1740
91	210	5.8	320	1790	50	15.0	640	48	2.2	120	1740
92	195	5.4	280	1790	51	15.5	680	50	2.2	120	1740
93	200	5.8	340	1790	53	16.0	720	52	2.2	140	1740
94	215	6.0	320	1795	56	17.0	800	54	2.2	140	1760
95	220	6.4	340	1795	54	16.5	760	56	2.2	140	1760
96	225	6.7	340	1800	54	16.0	740	58	2.2	140	1760
97	230	7.0	360	1800	52	15.5	680	60	2.2	140	1770
98	225	6.7	360	1800	50	15.0	640	62	2.2	140	1770
99	220	6.4	340	1795	54	16.3	740	64	21	140	1760
100	215	6.0	320	1795	54	16.5	760	48	2.2	120	1740

TABLA 5.1. DATOS EXPERIMENTALES NECESARIOS PARA OBTENER LAS POBLACIONES INICIALES. (CONTINUACION)

V.1.3. DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL VALOR DE LA RESISTENCIA DE ESTATOR.

Para obtener la población inicial de posibles parámetros de la máquina, por el método recomendado por el IEEE Std-112, es necesario conocer, a más de los datos de las pruebas experimentales anteriores, el valor de la resistencia de estator. El valor de esta resistencia se obtuvo por medio de la prueba del voltímetro-amperímetro, la misma que consiste en aplicar un voltaje DC al estator de la máquina y medir la corriente que circula por este devanado, manteniendo abiertos los terminales del rotor. Una vez medidos estos valores de voltaje y corriente DC, se aplica la relación indicada a continuación, para calcular el valor de esta resistencia, cuando el estator está en conexión delta.

$$r_1 = 1.5 \left(\frac{V_{DC}}{I_{DC}} \right)$$

Para obtener un valor lo más exacto posible, se efectuaron 10 pruebas de este tipo. Estos datos, y los resultados obtenidos, se indican a continuación:

PRUEBA No.	VOLTAJE DC APLICADO (Volts)	CORRIENTE DC APLICADA (Amperios)	RESISTENCIA DE ESTATOR (ohms)
1	1.80	3.00	0.9000
2	4.00	7.00	0.8671
3	7.60	13.60	0.8382
4	4.00	8.60	0.8624
5	5.80	9.60	0.8678
6	9.10	15.00	0.9100
7	8.00	13.20	0.9091
8	8.20	10.10	0.9208
9	4.80	7.60	0.9231
10	4.60	7.60	0.9079
r1 promedio:			0.8938

Tabla 5.2. Datos para el cálculo de R1.

A continuación se presentan las dos poblaciones iniciales obtenidas con el procedimiento indicado en el Capítulo II.

V.1.4. POBLACION INICIAL DE GRUPOS DE PARAMETROS.

No.	POBLACION INICIAL							
	METODO BASICO				METODO IEEE			
	r1 = r2 (ohmios)	x1 = x2 (ohmios)	xm (ohmios)	rte (ohmios)	r2 (ohmios)	x1 = x2 (ohmios)	xm (ohmios)	rte (ohmios)
1	0.4818	0.8675	18.3528	121.0000	0.5320	0.8891	17.4844	163.1523
2	0.4767	0.8698	18.6036	127.3684	0.5138	0.9122	17.7109	173.4567
3	0.4408	0.8554	18.8619	134.4444	0.5252	0.8757	18.0033	186.4690
4	0.4408	0.8750	18.5833	134.4444	0.6727	0.8966	17.7036	188.6935
5	0.4688	0.8541	18.8619	134.4444	0.5097	0.8744	18.0048	186.4963
6	0.4688	0.8541	19.4453	134.4444	0.5157	0.8737	18.5898	181.5282
7	0.4427	0.8679	18.8619	134.4444	0.6724	0.8888	17.9904	186.1972
8	0.4557	0.8611	19.4453	134.4444	0.2065	0.8811	18.5826	181.3849
9	0.4653	0.8622	19.1481	134.4444	0.5195	0.8826	18.2843	183.7834
10	0.4318	0.8599	19.1534	132.9670	0.5058	0.8801	18.2915	180.8189
11	0.4557	0.8611	19.4453	134.4444	0.5436	0.8811	18.5826	181.3849
12	0.4355	0.8320	18.8619	134.4444	0.4995	0.8512	18.0274	186.9764
13	0.4557	0.8611	19.4453	134.4444	0.3568	0.8811	18.5826	181.3849
14	0.4520	0.8704	18.9977	140.6250	0.5071	0.8913	18.1223	197.9194
15	0.4557	0.8611	19.4453	134.4444	0.5220	0.8811	18.5826	181.3849
16	0.4557	0.8815	20.0663	134.4444	0.4528	0.9017	19.1847	176.4702
17	0.4408	0.8750	20.2417	135.9569	0.6869	0.8948	19.3668	178.2335
18	0.4688	0.8748	19.2863	139.0797	0.5598	0.8854	18.4079	191.7901
19	0.4457	0.8725	19.9525	131.3281	0.4556	0.8925	19.0808	171.6097
20	0.4818	0.8881	19.4453	134.4444	0.5120	0.9094	18.5549	180.8336
21	0.4530	0.8687	20.0712	132.9670	0.3951	0.8884	19.2032	173.9395
22	0.4557	0.8611	20.3920	134.4444	0.5152	0.8801	19.5323	174.7494
23	0.4427	0.8679	20.2139	133.2237	0.5852	0.8874	19.3471	173.5127
24	0.4688	0.9356	20.0663	134.4444	0.3961	0.9585	19.1292	175.4291
25	0.4653	0.8821	20.3920	134.4444	0.7616	0.9020	19.5109	174.3583
26	0.4856	0.8807	20.7398	131.5217	0.6291	0.9002	19.8622	167.1781
27	0.4775	1.0897	21.9891	123.8764	0.6875	1.1181	20.9073	146.1270
28	0.4688	0.8748	22.5040	128.4028	0.6940	0.8923	21.6398	154.5185
29	0.4653	0.8821	20.0663	134.4444	0.6285	0.9023	19.1841	176.4592
30	0.4688	0.8748	21.2163	133.2237	0.5580	0.8934	20.3458	167.7394
31	0.4688	0.8950	18.3528	121.0000	0.3647	0.9180	17.4562	162.6131
32	0.4856	0.8807	20.5123	140.6250	0.5408	0.9005	19.6309	184.9831
33	0.4688	0.9356	19.4453	134.4444	0.5676	0.9593	18.5060	179.8636
34	0.4775	0.8755	19.8781	140.6250	0.7482	0.8957	19.0001	189.8227
35	0.4741	0.8374	21.4143	131.3281	0.5685	0.8544	20.5830	164.2090

TABLA 5.3 POBLACIONES INICIALES DE PARAMETROS.

No.	POBLACION INICIAL							
	METODO BASICO				METODO IEEE			
	$r_1 = r_2$ (ohmios)	$x_1 = x_2$ (ohmios)	x_m (ohmios)	r_{fe} (ohmios)	r_2 (ohmios)	$x_1 = x_2$ (ohmios)	x_m (ohmios)	r_{fe} (ohmios)
36	0.4444	0.8317	19.7028	146.9444	0.5335	0.8500	18.8678	205.2078
37	0.4408	0.8554	20.2139	133.2237	0.4879	0.8743	19.3599	173.7475
38	0.4844	0.8963	20.7287	134.4444	0.4933	0.9166	19.8341	172.0904
39	0.4444	0.8317	21.4369	134.4444	0.3916	0.8485	20.6103	169.4483
40	0.4614	0.8315	18.9977	140.6250	0.5777	0.8506	18.1624	198.8096
41	0.4688	0.8950	21.0768	134.4444	0.6585	0.9149	20.1846	170.1981
42	0.4653	0.8622	20.7287	134.4444	0.5083	0.8609	19.8689	172.7088
43	0.4775	0.8954	21.1064	127.3684	0.6580	0.9152	20.2168	158.0692
44	0.4948	0.9016	21.2163	133.2237	0.6662	0.9216	20.3184	167.2764
45	0.4688	0.8746	21.6986	129.8455	0.6563	0.8930	20.8310	158.8944
46	0.4775	0.8755	20.7287	134.4444	0.6487	0.8948	19.8553	172.4682
47	0.4775	0.8954	21.4369	134.4444	0.8142	0.9149	20.5456	168.3595
48	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	0.7382	0.9281	20.1718	169.9766
49	0.4818	0.8681	20.7287	134.4444	0.6427	0.9080	19.8425	172.2394
50	0.4688	0.8950	20.2139	133.2237	0.6148	0.9158	18.3193	173.0038
51	0.4948	0.8609	21.6986	129.8455	0.6595	0.8996	20.8246	158.7939
52	0.4688	0.8746	21.4369	134.4444	0.6290	0.8932	20.5687	168.7142
53	0.4818	0.8681	21.4369	134.4444	0.6817	0.9073	20.5530	168.4837
54	0.4856	0.8607	20.9322	135.9559	0.6348	0.9001	20.0536	173.8637
55	0.4775	0.8755	20.7287	134.4444	0.5236	0.8948	19.8553	172.4682
56	0.4818	0.8681	21.4369	134.4444	0.6817	0.9073	20.5530	168.4837
57	0.4897	0.8687	20.7287	134.4444	0.6843	0.9086	19.8418	172.2281
58	0.4856	0.8607	21.7054	128.4028	0.7180	0.8993	20.8323	157.4331
59	0.4775	0.8755	21.9229	137.8125	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057
60	0.4844	0.8963	20.7287	134.4444	0.6592	0.9166	19.8341	172.0904
61	0.4688	0.8541	21.4369	134.4444	0.5686	0.8718	20.5878	169.0652
62	0.4653	0.8622	20.0422	142.3529	0.4665	0.8616	19.1779	192.1814
63	0.4688	0.8541	19.7278	142.3529	0.4364	0.8734	18.8710	194.9855
64	0.4688	0.8541	19.8781	140.6250	0.4519	0.8733	19.0221	190.2699
65	0.4530	0.8291	18.8619	134.4444	0.5470	0.8481	18.0304	187.0399
66	0.4530	0.8291	18.7214	140.6250	0.4549	0.8483	17.8879	201.8216
67	0.4557	0.8611	20.1660	125.0000	0.6112	0.8603	19.3090	159.2032
68	0.4440	0.8397	18.8578	135.9550	0.4581	0.8593	18.0149	190.0252
69	0.4688	0.8335	18.9902	135.9559	0.5424	0.8526	18.1541	188.9170
70	0.4653	0.8223	18.7214	140.6250	0.4505	0.8412	17.8949	201.9825

TABLA 5.3 POBLACIONES INICIALES DE PARAMETROS. (CONTINUACION)

No.	POBLACION INICIAL							
	METODO BASICO				METODO IEEE			
	r1 = r2 (ohmios)	x1 = x2 (ohmios)	xm (ohmios)	rfe (ohmios)	r2 (ohmios)	x1 = x2 (ohmios)	xm (ohmios)	rfe (ohmios)
71	0.4897	0.8486	20.3430	151.2500	0.3995	0.8670	19.4913	207.7031
72	0.4642	0.8361	20.1901	140.6250	0.4040	0.8542	19.3535	188.1989
73	0.4642	0.8361	20.7021	142.3529	0.3711	0.8537	19.8664	187.7767
74	0.4408	0.8356	20.3667	142.3529	0.3665	0.8535	19.5306	190.2048
75	0.4642	0.8361	20.7021	142.3529	0.4712	0.8537	19.8664	187.7767
76	0.4557	0.8201	20.5123	140.6250	0.3783	0.8372	19.6929	186.1772
77	0.4540	0.8346	20.7021	142.3529	0.3835	0.8521	19.8660	187.8072
78	0.4741	0.8374	20.0663	134.4444	0.3896	0.8556	19.2298	177.3193
79	0.4856	0.8379	20.1901	140.6250	0.4201	0.8561	19.3516	188.1628
80	0.4653	0.8423	21.2598	133.3333	0.4148	0.8597	20.4222	168.2628
81	0.4717	0.8458	20.3667	142.3529	0.4472	0.8641	19.5202	189.9983
82	0.4688	0.8541	20.7021	142.3529	0.3601	0.8725	19.8480	187.4226
83	0.4653	0.8223	19.7028	146.9444	0.3771	0.8402	18.8775	205.4225
84	0.4444	0.8317	19.8781	140.6250	0.3827	0.8499	19.0451	190.7382
85	0.4653	0.8223	20.7021	142.3529	0.3908	0.8393	19.8606	188.0501
86	0.4688	0.8335	20.9039	144.4531	0.4555	0.8508	20.0709	190.3518
87	0.4717	0.8244	21.6636	133.3333	0.3946	0.8407	20.8456	166.6099
88	0.4614	0.8315	21.4143	131.3281	0.5682	0.8483	20.5669	164.3062
89	0.4653	0.8223	21.1486	137.8125	0.6902	0.8389	20.3296	178.9838
90	0.4717	0.8458	18.9902	135.9559	0.5157	0.8655	18.1414	188.6483
91	0.4741	0.8374	21.1486	137.8125	0.5632	0.8546	20.3144	176.7098
92	0.4717	0.8244	21.0669	135.8036	0.5548	0.8412	20.2782	173.6939
93	0.4688	0.8335	20.2000	117.6471	0.5832	0.8514	19.3743	146.9201
94	0.4614	0.8315	20.9039	144.4531	0.3941	0.8487	20.0729	190.3904
95	0.4653	0.8223	20.0422	142.3529	0.3763	0.8399	19.2186	193.0188
96	0.4818	0.8468	19.5551	148.8970	0.3661	0.8660	18.7037	210.5245
97	0.4717	0.8458	19.1302	146.9444	0.2681	0.8654	18.2791	210.9231
98	0.4741	0.8374	19.5756	140.6250	0.2721	0.8561	18.7359	193.1806
99	0.4642	0.8361	20.0422	142.3529	0.1896	0.8543	19.2046	192.7280
100	0.4653	0.8223	20.9039	144.4531	0.5577	0.8391	20.0823	190.5734

TABLA 5.3. POBLACIONES INICIALES DE PARAMETROS. (CONTINUACION)

V.1.5. DATOS EXPERIMENTALES DE LA PRUEBA DE CARGA EFECTUADA AL MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION.

Para la determinación del grupo de parámetros óptimos de la máquina bajo prueba, el programa computacional desarrollado en esta Tesis, toma como referencia los valores de impedancia compleja de entrada a la máquina bajo prueba y el torque en su eje. Estos valores se calculan con los datos obtenidos a partir de una prueba de carga. El equipo necesario para realizar esta prueba es el siguiente:

- Un grupo motor trifásico de inducción - dinamofreno DC;
- Un vatímetro trifásico de bajo factor de potencia;
- Un amperímetro de AC, con escala de 0 - 20 A;
- Un voltímetro de AC, con escala de 0 - 260 V;
- Un voltímetro de DC, con escala de 0 - 120 V;
- Un variac trifásico;
- Tres transformadores de corriente 50 - 5 A;
- Dos resistencias variables;
- Dos sets de cargas resistivas.
- Un tacómetro.
- Un medidor de torque.

Para realizar esta prueba se requiere implementar el circuito indicado en la Figura 5.2. Luego se arranca el motor de inducción trifásico, y, se controla que el voltaje generado por el dinamofreno sea constante, mientras se procede a cargar el eje de la máquina de inducción paso a paso, desde vacío hasta llegar a la plena carga. Se toman los valores de voltaje AC, de corriente AC, de potencia activa, de deslizamiento y del torque del eje. Es necesario verificar la correcta generación del dinamofreno para evitar cualquier daño en él o en el motor de inducción. La prueba se debe realizar con valores que vayan desde los de vacío hasta los de plena carga.

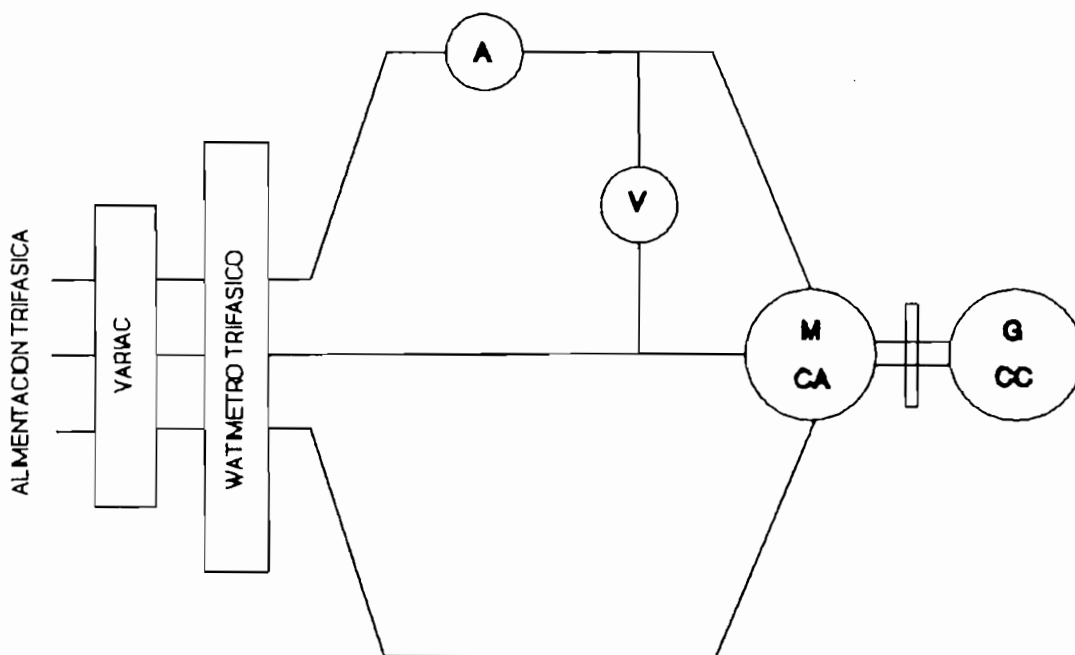


Figura 5.2. Diagrama de conexiones para realizar la prueba de carga.

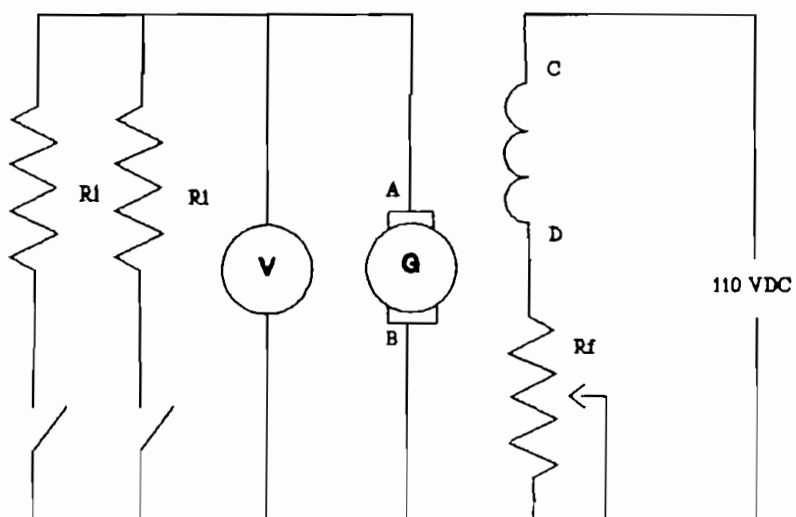


Figura 5.3. Diagrama de conexiones del generador de corriente continua.

La máquina de corriente continua debe conectarse como generador en conexión independiente, según se indica en la Figura 5.3. Las resistencias R_l son los sets de resistencias de carga, en tanto que R_f es una resistencia variable entre 0 y 300 Ω .

En la Tabla 5.4, se presentan los datos obtenidos en las pruebas de carga, efectuadas a la máquina en estudio.

PRUEBA No.	DESILIZ (pu)	TORQUE (N-m)	VOLTAJE (voltios)	CORRIENTE (Amperios)	POTENCIA (Watts)
1	0.0838	24.000	205.0	16.5	5500.0
2	0.0668	21.975	205.0	14.0	4300.0
3	0.0611	17.750	205.0	11.8	3550.0
4	0.0500	13.375	205.0	10.0	2900.0
5	0.0444	9.625	205.0	8.4	2200.0
6	0.0358	5.750	206.0	7.1	1600.0
7	0.0333	4.750	207.5	6.6	1400.0
8	0.0277	3.750	205.0	6.4	1300.0
9	0.0222	1.875	207.5	6.0	900.0

Tabla 5.4. Datos obtenidos con las pruebas de carga efectuadas al motor de inducción trifásico.

A partir de los datos presentados en la Tabla 5.4, el programa calcula los valores de impedancia compleja de entrada a la máquina y de torque en el eje, que sirven como referencia a la función de error en la búsqueda de el grupo de parámetros óptimos de la máquina, para lo cual se aplica el procedimiento detallado en el numeral IV.6.1 del Capítulo IV. Estos valores se indican en la Tabla 5.5. El usuario puede escoger cualquier grupo de valores de esta tabla y tomarlos como referencia para la identificación de los parámetros óptimos de la máquina bajo prueba.

En el numeral siguiente de este capítulo, se exponen dos ejemplo demostrativos de los resultados que entrega el programa desarrollado en esta Tesis.

PRUEBA No.	IMPEDANCIA DE ENTRADA		TORQUE EN EL EJE (N-m)
	REAL (ohms)	IMAGINARIA (ohms)	
1	8.4891	3.0670	24.00
2	7.3129	4.2417	21.38
3	8.4985	5.3274	17.75
4	9.6667	6.8293	13.37
5	10.3930	9.6140	9.63
6	10.6799	12.9873	6.75
7	10.0923	14.4405	4.75
8	10.6794	15.1683	3.75
9	8.3333	18.1445	1.88

Tabla 5.5. Impedancias de entrada y torque en el eje, utilizados como referencia en la búsqueda de los parámetros óptimos.

V.2. PROCESO DE EVOLUCION DE LA POBLACION INICIAL.

Para efectos de comparación, se presentan dos ejemplos de la ejecución del programa de evolución artificial que, a partir de la población inicial obtenida por el método BASICO, buscan el grupo de parámetros de la máquina bajo prueba que mejor se adapte a las condiciones de impedancia de entrada y torque en el eje indicadas en la Tabla 5.5 para los valores de la prueba de carga No.1, tomados como referencia.

La función de error, empleada en ambos casos, se completa con los valores de sus constantes características indicadas a continuación:

- $K_1 = K_2 = K_3 = 0.3333.$

- Exponente $m = 1.$

Los rangos de valores permitidos para cada parámetro del circuito equivalente de la máquina, son los mismos indicados en el numeral IV.2 del Capítulo IV.

V.2.1. EJEMPLO No. 1.

En este ejemplo, el programa considera que las parejas, miembros de la población, se aparean con una probabilidad de 1.0, en tanto que la mutación ocurre con una probabilidad de 0.01.

Luego de 100 generaciones, se obtienen los resultados indicados en la Tabla 5.6. En la misma tabla, se incluyen además, las características correspondientes al grupo de parámetros de la población inicial, que mejor se adapta a las condiciones de impedancia y torque tomadas como referencia.

PARAMETRO	CONDICION INICIAL	RESULTANTE
APTITUD MINIMA	0.0321	0.0053
APTITUD PROMEDIO	0.0558	809.9890
APTITUD MAXIMA	0.1531	888.8470
SUMA DE APTITUDES	5.5759	60936.3000
ERROR MINIMO	6.5329	0.0012
R1 (ohmioe)	0.5208	0.6051
R2 (ohmioe)	0.5208	0.6051
X1 = X2 (ohmioe)	0.9076	1.1858
Xm (ohmioe)	21.0768	38.7830
Rte (ohmioe)	134.4444	49.2869
IMPEDANCIA REAL (ohmioe)	5.6727	6.5184
IMPEDANCIA IMAG. (ohmioe)	3.1113	3.0114
TORQUE EN EL EJE (N-m)	28.35	23.98
No. DE MUTACIONES	0	4007
No. DE CRUCES	0	5000

Tabla 5.6. Resultados obtenidos en este ejemplo, luego del proceso de evolución artificial.

Como se puede observar, el mejor grupo de parámetros de la última población obtenida, se adapta muy bien a las condiciones de impedancia y torque tomadas como referencia. Sin embargo, tiene una aptitud de 868.647, valor mucho menor que el fijado como condición de convergencia en la búsqueda de los parámetros óptimos del circuito equivalente de la máquina, el mismo que, para efectos de esta Tesis, se ha fijado en 10000.

En las figuras 5.4 a la 5.7, se muestra el proceso de evolución de cada parámetro del circuito equivalente hasta llegar a los valores resultantes indicados en la Tabla 5.6. En la misma forma, en la Figura 5.8, se indica como ha variado el logaritmo natural de la aptitud del referido mejor grupo de parámetros existente en cada generación.

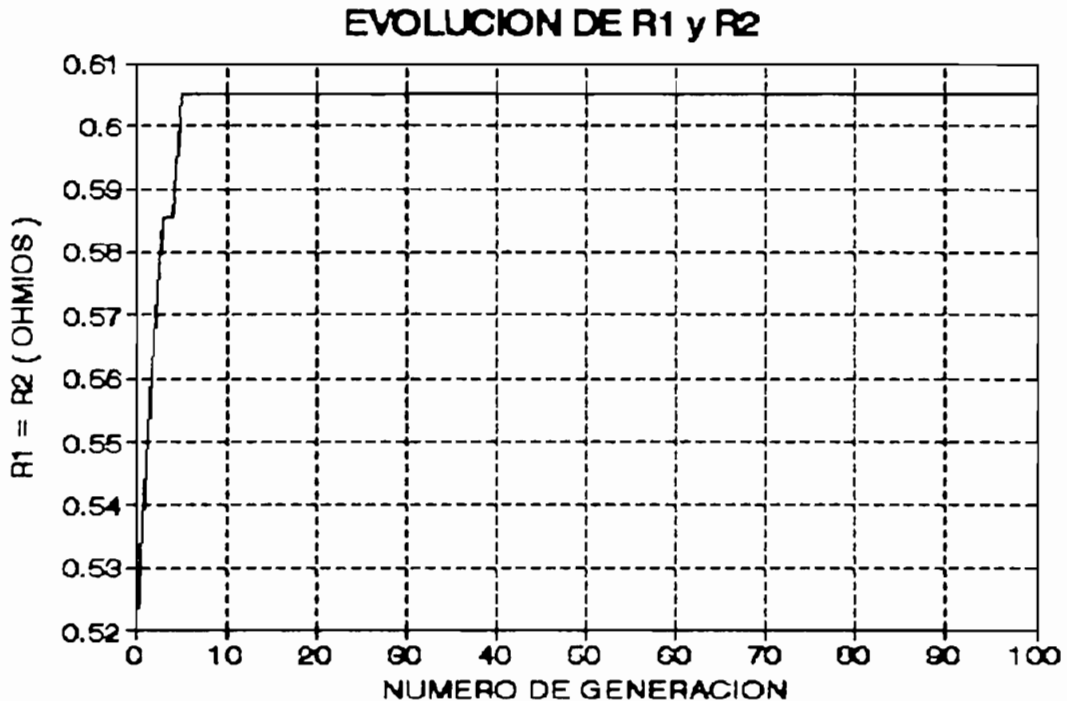


Figura 5.4. Forma en que han evolucionado R1 y R2, durante las 100 generaciones efectuadas por el programa de evolución artificial.

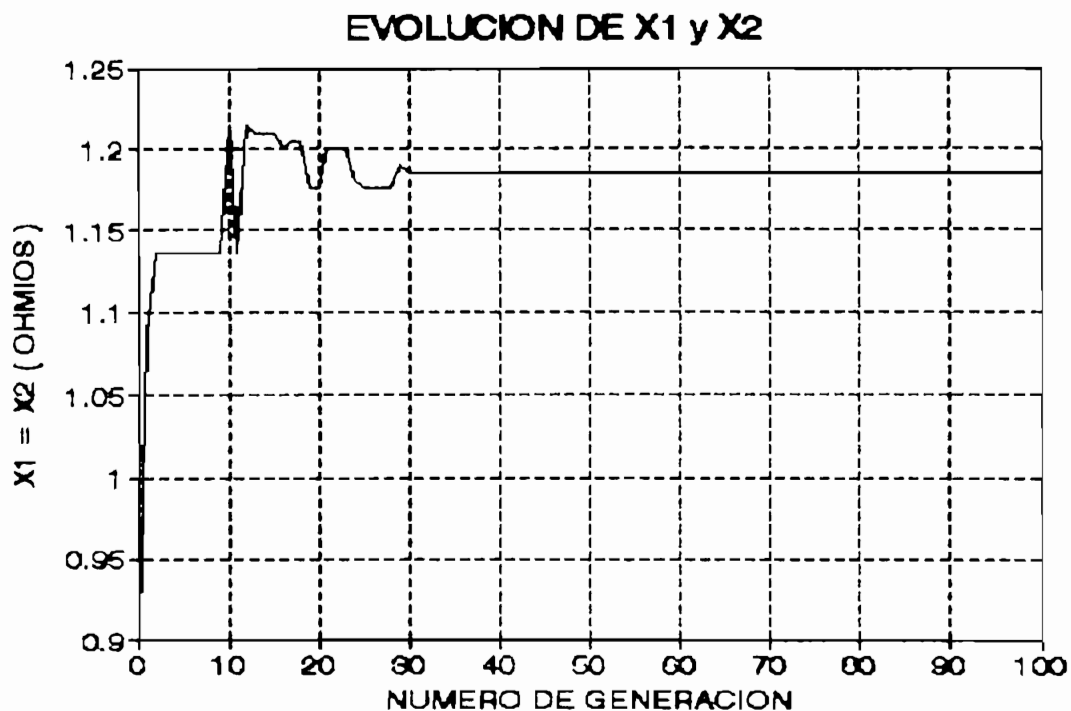


Figura 5.5. Forma en que han evolucionado X1 y X2.

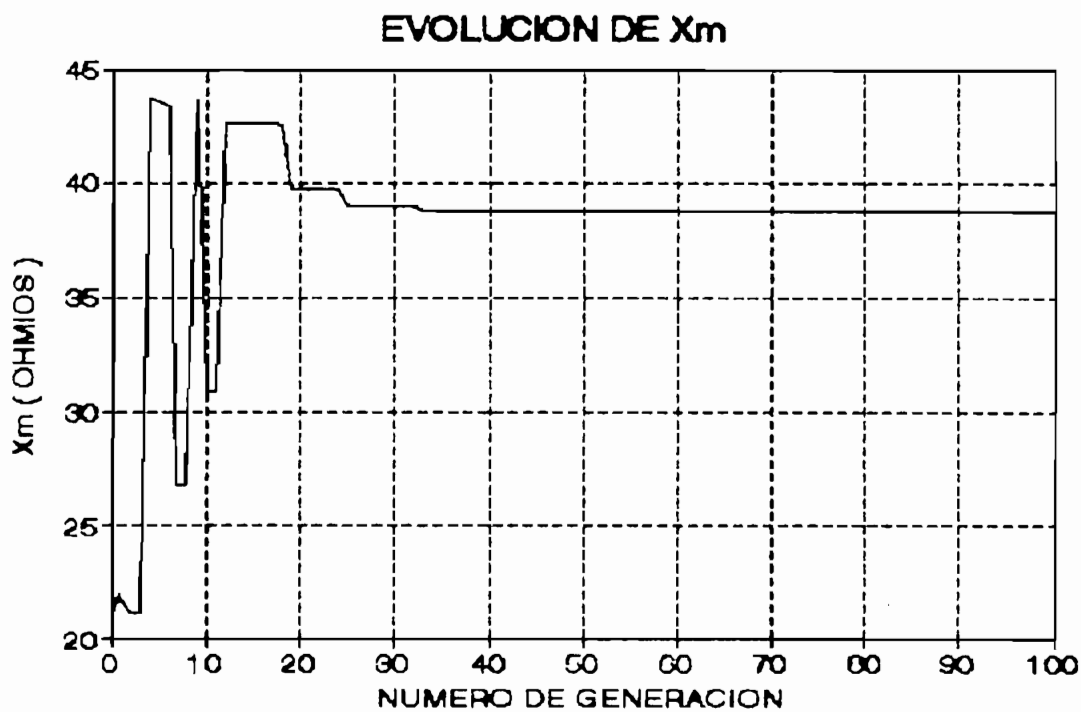


Figura 5.6. Forma en que ha evolucionado Xm.

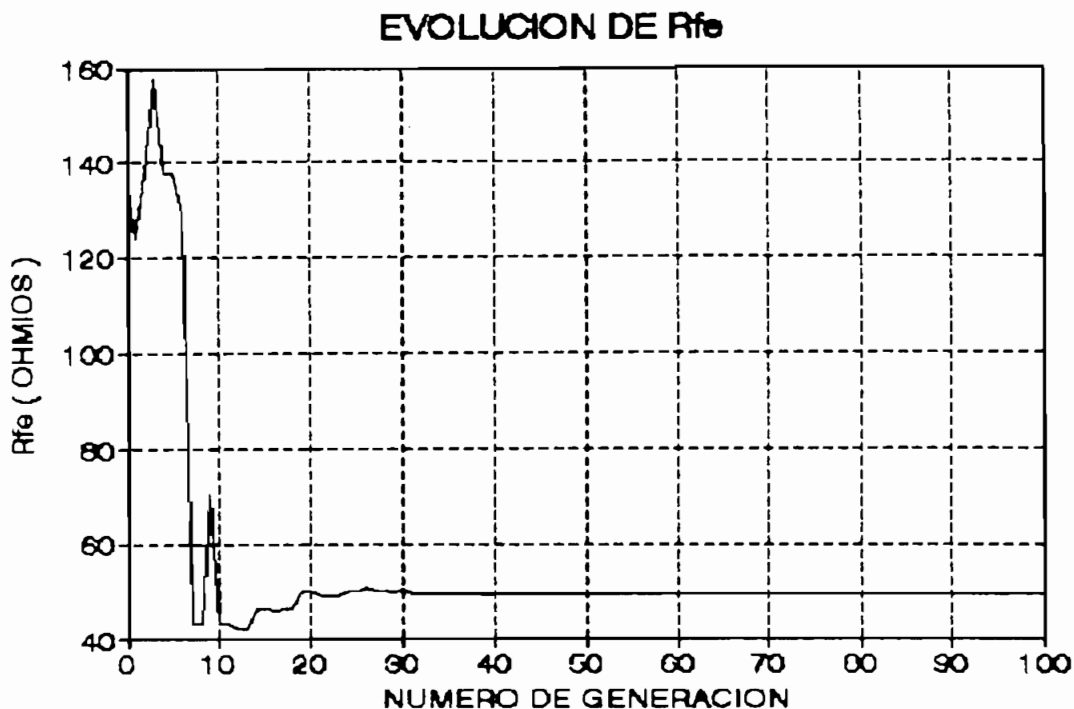


Figura 5.7. Forma de evolución de Rfe.

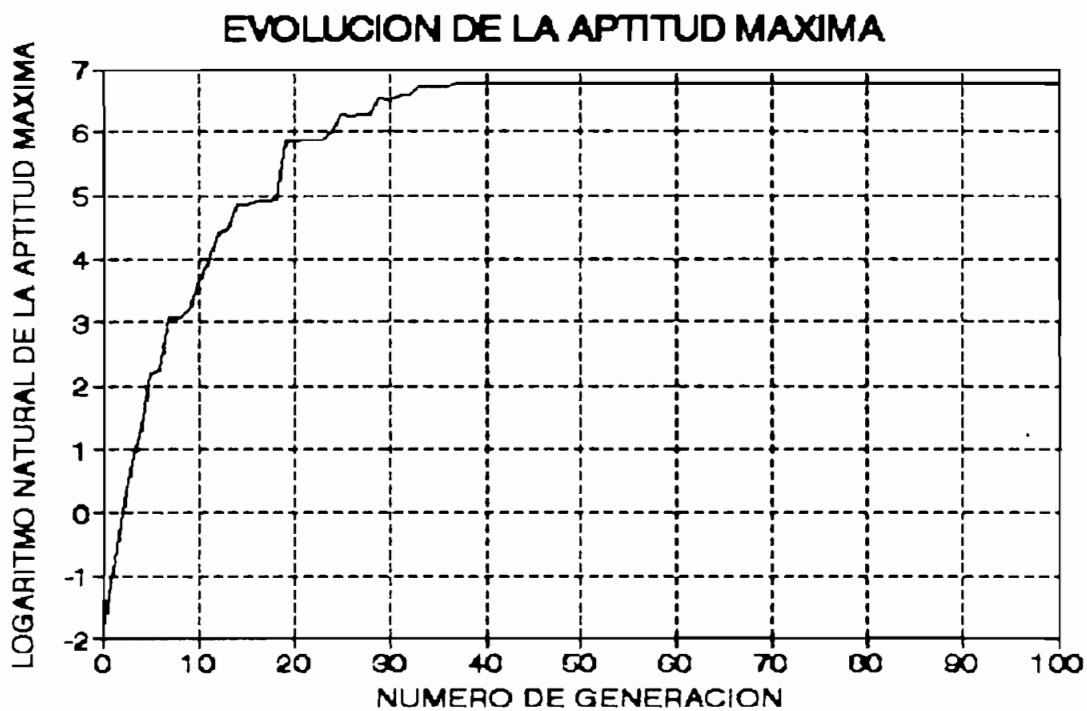


Figura 5.8. Logaritmo natural de la aptitud que presenta el mejor grupo de parámetros de cada población.

Como se puede apreciar en estos gráficos, el proceso de evolución de cada uno de los parámetros, para este caso en particular, se detiene después de la generación 40, aproximadamente. Esto puede tener su origen en la forma en que han ocurrido los procesos de cruce y mutación, en las primeras generaciones del proceso de evolución artificial. Es decir, estos procesos genéticos han actuado de una manera tal, que no es posible encontrar un grupo de parámetros que se adapte mejor a las condiciones referenciales de impedancia y torque.

Sin embargo, es posible que al repetir nuevamente el proceso de búsqueda, bajo las mismas condiciones de este ejemplo, se obtenga un mejor grupo de parámetros. Esto debido a que el cruce y la mutación, no siempre afectan en la misma forma a los miembros de la población.

V.2.2. EJEMPLO No. 2.

Para este ejemplo, se ha considerado que: el cruce entre parejas ocurre con una probabilidad de 1.0, y, la mutación de bits con una probabilidad de 0.4.

En la tabla 5.7, se presentan las principales características del mejor grupo de parámetros que existe, tanto en la población inicial como en la población obtenida luego de 100 generaciones.

Como se puede observar en la tabla indicada, el grupo de parámetros resultante de ninguna manera puede considerarse como el óptimo, porque su aptitud de 2.89 es muchísimo menor que el valor de 10000, aceptado como condición de convergencia.

En las figuras 5.9 a 5.13, se muestra el proceso de evolución de cada parámetro, miembro del mejor grupo de la población, así como el logaritmo natural de su aptitud.

PARAMETRO	CONDICION INICIAL	RESULTANTE
APTITUD MINIMA	0.0321	0.0001
APTITUD PROMEDIO	0.0558	0.0550
APTITUD MAXIMA	0.1531	2.8908
SUMA DE APTITUDES	5.5759	5.4960
ERROR MINIMO	6.5329	0.3459
R1 (ohmios)	0.5208	0.6197
R2 (ohmios)	0.5208	0.6197
X1 = X2 (ohmios)	0.9076	1.0929
Xm (ohmios)	21.0768	20.5718
Rfe (ohmios)	134.4444	260.4106
IMPEDANCIA REAL (ohmios)	5.6727	6.5194
IMPEDANCIA IMAG. (ohmios)	3.1113	4.0528
TORQUE EN EL EJE (N-m)	28.95	23.79
No. DE MUTACIONES	0	160896
No. DE CRUCES	0	5000

Tabla 5.7. Resultados obtenidos en este ejemplo, luego del proceso de evolución artificial.

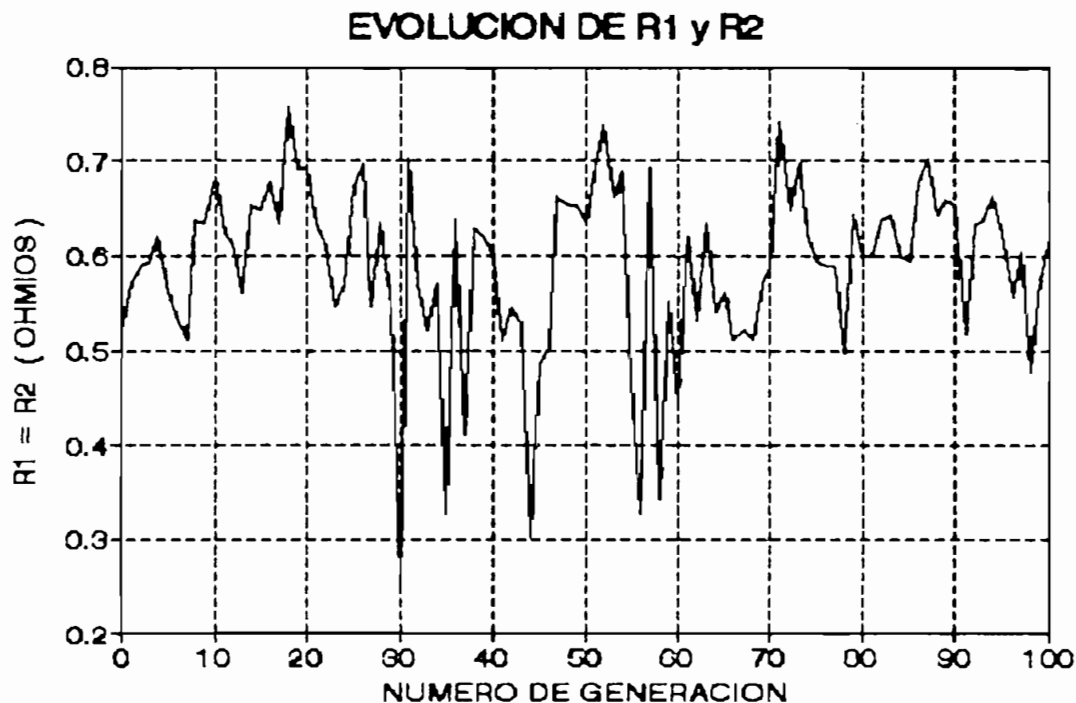
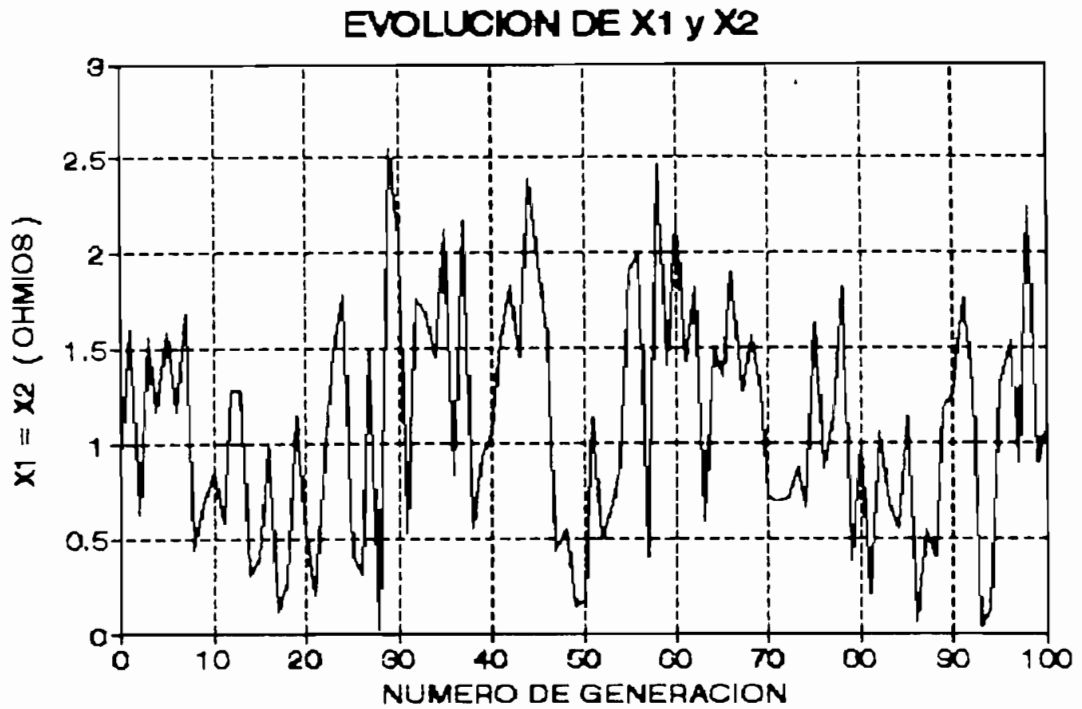
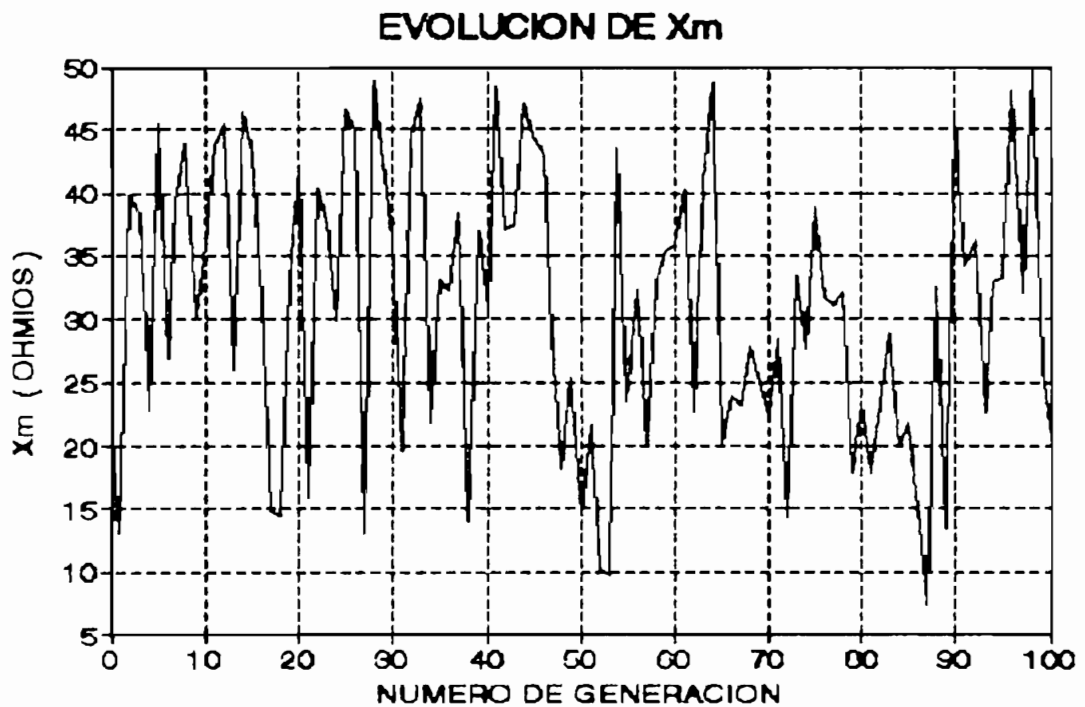


Figura 5.9. Evolución de R1 y R2, durante 100 generaciones.

Figura 5.10. Proceso de evolución de X_1 y X_2 .Figura 5.11. Proceso de evolución de X_m .

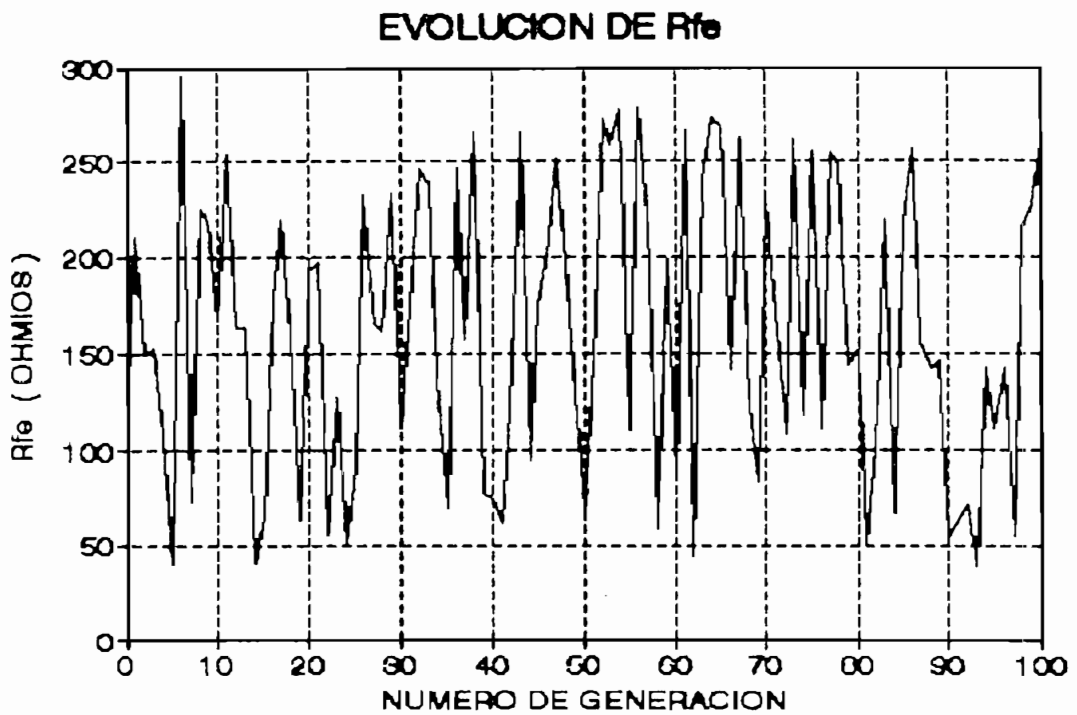


Figura 5.12. Proceso de evolución de R_{fe} .

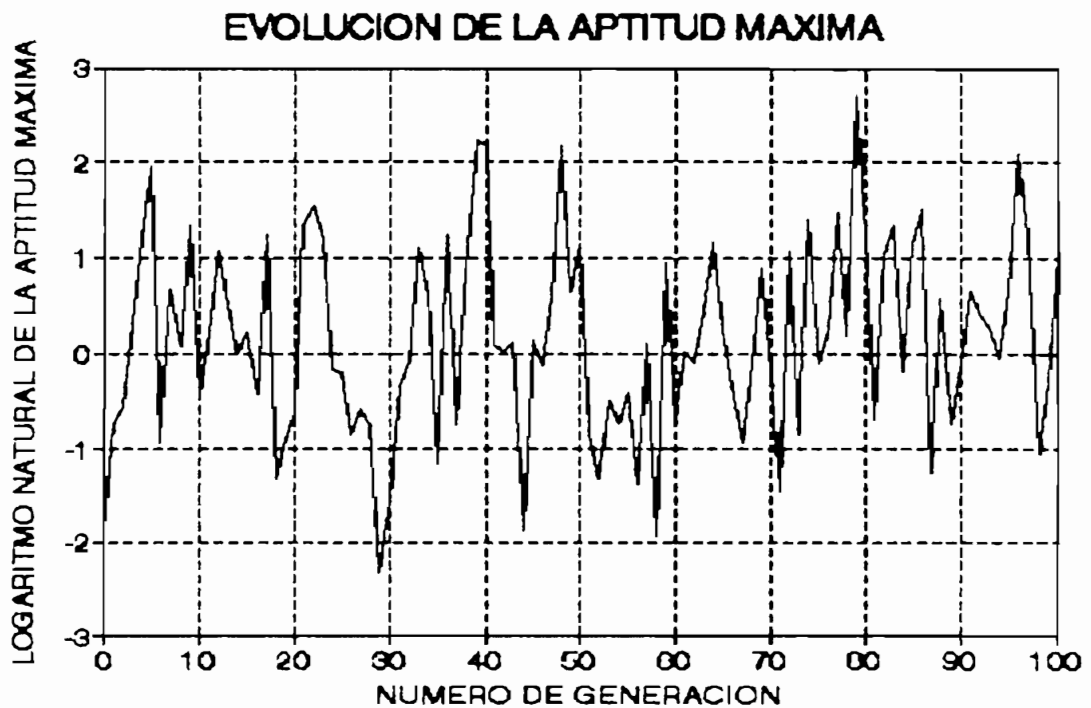


Figura 5.13. Variación de la aptitud del mejor grupo de parámetros de cada población generada.

En las figuras anteriores, se observa una oscilación en los valores de los parámetros y en la aptitud del grupo. Esto se debe a la alta probabilidad con que la mutación afecta a las poblaciones generadas durante el proceso de evolución artificial.

Este efecto se explica mejor al considerar que una probabilidad de mutación de 0.4 (40%) implica que, por lo menos, se modificarán 4 de cada 10 bits de la cadena representativa del grupo de parámetros. De tal manera, que es fácil que un grupo de parámetros con una buena aptitud, en la siguiente generación cambie negativamente, o viceversa.

V.3. RESULTADOS FINALES.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos luego de ejecutado el proceso de evolución artificial, a partir de las poblaciones iniciales disponibles, para cada una de las condiciones de impedancia y torque indicadas en la Tabla 5.5.

En primera instancia, se presentan el mejor grupo de parámetros de la población inicial calculada con el método IEEE y el grupo óptimo de parámetros de la máquina de inducción, identificado por medio del algoritmo genético de optimización implementado computacionalmente en esta Tesis.

Posteriormente, esta circunstancia se repite, pero para el caso de la población inicial obtenida con el método BASICO.

V.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA POBLACION INICIAL CALCULADA CON EL METODO IEEE.

PRUEBA No.	MEJOR GRUPO DE PARAMETROS, MIEMBRO DE LA POBLACION INICIAL						IMPEDANCIA DE ENTRADA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO	PROBAB. DE CRUCE	PROBAB. DE MUTACION
	R1 (ohmios)	R2 (ohmios)	X1 = X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)	REAL (ohmios)	IMAG (ohmios)					
1	0.8836	0.5832	0.8514	19.3743	146.9201	6.4624	3.4453	23.83	0.0521	1.000	0.010	
2	0.8836	0.5408	0.9005	19.6309	184.9831	7.1540	4.0751	21.43	0.0188	1.000	0.010	
3	0.8836	0.6348	0.9001	20.0536	173.8837	8.3196	5.1630	17.74	0.0197	1.000	0.020	
4	0.8836	0.7180	0.8993	20.8323	157.4331	9.8298	7.0771	13.57	0.0429	1.000	0.020	
5	0.8836	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057	10.7359	9.1934	10.81	0.5364	1.000	0.010	
6	0.8836	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057	11.0891	11.7362	8.41	2.8583	1.000	0.020	
7	0.8836	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057	11.0891	11.7362	8.53	7.5281	1.000	0.010	
8	0.8836	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057	10.9770	13.3453	7.02	4.7163	1.000	0.010	
9	0.8836	0.8270	0.8937	21.0520	172.0057	10.5412	15.1232	5.84	9.8943	1.000	0.100	

TABLA 5.8. CARACTERISTICAS DEL MEJOR GRUPO DE PARAMETROS, MIEMBRO DE LA POBLACION INICIAL GENERADA POR EL METODO IEEE.

PRUEBA No.	PARAMETROS OPTIMOS DEL MOTOR DE INDUCCION, PARA EL CIRCUITO EQUIVALENTE PROPUESTO							IMPEDANCIA DE ENTRADA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO	No. DE GENERAC.	No. DE MUTAC.	No. DE CRUCES
	R1 (ohmios)	R2 (ohmios)	X1 = X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)	REAL (ohmios)	IMAG (ohmios)							
1	0.8936	0.5856	0.7904	21.4956	75.9238	6.4828	3.0573	24.01	4.43E-05	11	437	550		
2	0.8936	0.5466	0.8343	19.1202	916.5500	7.3060	4.2362	21.38	3.64E-05	18	722	900		
3	0.8936	0.6344	0.8978	20.3959	402.6354	8.4950	5.3380	17.76	5.21E-05	7	529	350		
4	0.8936	0.7319	0.8831	20.4839	99.1496	9.6660	6.8239	13.36	7.46E-05	13	1061	650		
5	0.8936	0.9417	0.8295	19.7801	97.5660	10.3976	9.5160	9.63	1.55E-05	26	1027	1300		
6	0.8936	1.2392	0.9319	20.0880	73.2845	10.5692	12.9852	5.76	5.08E-05	81	6429	4050		
7	0.8936	1.5416	0.4685	20.1320	88.8563	10.1001	14.4499	4.75	5.27E-05	35	14344	1750		
8	0.8936	1.5807	3.2440	20.1760	42.4047	10.5727	15.1846	3.74	4.83E-05	55	22104	2750		
9	0.8936	2.6635	1.0490	20.3519	76.7155	8.3184	18.1484	1.88	7.56E-05	34	13723	1700		

TABLA 5.9. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA POBLACION INICIAL GENERADA POR EL METODO IEEE.

V.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA POBLACION INICIAL CALCULADA CON EL METODO BASICO.

PRUEBA No.	MEJOR GRUPO DE PARAMETROS, MIEMBRO DE LA POBLACION INICIAL						IMPEDANCIA DE ENTRADA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO	PROBAB. DE CRUCE	PROBAB. DE MUTACION
	R1 (ohmios)	R2 (ohmios)	X1 = X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)	REAL (ohmios)	IMAG (ohmios)					
1	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	5.6727	3.1113	28.35	6.5329	1.000	0.010	
2	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	6.6757	3.7677	23.93	2.3753	1.000	0.010	
3	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	7.0821	5.3306	17.75	8.1794	1.000	0.020	
4	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	8.0410	4.9889	18.89	12.1822	1.000	0.010	
5	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	8.5971	5.6388	17.05	24.4629	1.000	0.100	
6	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	9.7870	7.5670	13.31	29.0731	1.000	0.020	
7	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	9.7870	7.5670	13.51	41.3483	1.000	0.020	
8	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	10.3406	9.0241	11.13	30.7521	1.000	0.100	
9	0.5208	0.5208	0.9076	21.0768	134.4444	10.7040	10.9057	9.27	37.5436	1.000	0.100	

TABLA 5.10. CARACTERISTICAS DEL MEJOR GRUPO DE PARAMETROS, MIEMBRO DE LA POBLACION INICIAL GENERADA POR EL METODO BASICO.

TABLA 5.10.

PRUEBA No.	PARAMETROS OPTIMOS DEL MOTOR DE INDUCCION, PARA EL CIRCUITO EQUIVALENTE PROPUESTO						IMPEDANCIA DE ENTRADA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO	No. DE GENERAC.	No. DE MUTAC.	No. DE CRUCES
	R1 (ohmios)	R2 (ohmios)	X1 = X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)	REAL (ohmios)	IMAG (ohmios)						
1	0.6295	0.6295	0.8929	25.1466	51.3783	6.5021	3.0539	24.00	5.99E-05	14	605	700	
2	0.5905	0.5905	0.8636	20.4399	145.6012	7.3126	4.2535	21.39	9.15E-05	27	1032	1350	
3	0.5856	0.5856	2.0587	42.9619	121.0557	8.4907	5.3306	17.75	2.47E-05	21	1622	1050	
4	0.6246	0.6246	3.0001	46.4370	55.3372	9.6681	6.8305	13.39	9.81E-05	40	1565	2000	
5	0.9319	0.9319	1.1368	20.0440	84.8643	10.3916	9.5074	9.63	4.76E-05	82	33227	4100	
6	1.2197	1.2197	0.2734	19.6921	97.5660	10.5849	12.9895	5.76	2.03E-05	48	3869	2400	
7	1.4977	1.4977	0.6344	19.2522	97.5660	10.0775	14.4385	4.75	7.79E-05	33	2535	1650	
8	1.5611	1.5611	1.0051	20.0440	70.1173	10.5886	15.1690	3.74	5.49E-05	20	7948	1000	
9	2.5855	2.5855	2.2684	18.0205	86.7449	8.3275	18.1601	1.87	9.16E-05	15	6054	750	

TABLA 5.11. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA POBLACION INICIAL GENERADA POR EL METODO BASICO.

CAPITULO VI

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

VI.1. DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA POBLACION INICIAL.

La población inicial de parámetros, de esta máquina en particular, calculada por el método BASICO y que se detalla en la Tabla 5.3, presenta las características indicadas en la Tabla 6.1, obtenidas como resultado de un análisis estadístico de todos sus miembros.

ESTADISTICAS	R1=R2 (ohmios)	X1=X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rfe (ohmios)
MINIMO	0.4318	0.8201	18.9528	117.6471
MEDIO	0.4667	0.8621	20.2412	136.0536
MAXIMO	0.5208	1.0897	22.5040	151.2500
VARIANZA	0.0002	0.0012	0.8959	33.2874
DESVIACION TIPICA	0.0148	0.0344	0.9462	5.7695
COEF. VARIACION (%)	3.17	3.99	4.87	4.24

Tabla 6.1. Análisis estadístico de la población inicial obtenida por el método BASICO.

Si consideramos que los coeficientes de variación de todos los parámetros del circuito equivalente son menores al 5%, entonces se puede decir que sus valores medios representan plenamente a toda la población inicial obtenida por este método.

Siguiendo el procedimiento indicado en el literal IV.6.2 del Capítulo IV, se han utilizado estos valores medios para calcular la impedancia de entrada y el torque en el eje, para cada una de las condiciones de funcionamiento de la máquina bajo prueba indicadas en la Tabla 5.4. Para calcular los respectivos errores se han tomado como referencias los valores de impedancia y torque indicados en la Tabla 5.5. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.2.

PRUEBA No.	IMPEDANCIA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO
	REAL (ohmios)	IMAG. (ohmios)		
1	5.146	2.825	31.977	18.758
2	6.085	3.395	26.554	9.684
3	6.469	3.674	24.801	18.858
4	7.389	4.471	21.015	23.011
5	7.934	5.052	18.977	37.776
6	9.139	6.808	14.835	40.927
7	9.139	6.808	15.051	55.092
8	9.738	6.167	12.406	41.551
9	10.183	9.960	10.332	47.281

Tabla 6.2. Valores de impedancia y torque, obtenidos a partir de los valores medios de los parámetros indicados en la Tabla 6.1.

Como se puede observar, los errores obtenidos, para cada una de las condiciones de funcionamiento de la máquina tomadas como referencia, son bastante altos. Esta situación permite concluir que los valores medios de los parámetros del circuito equivalente de la población inicial obtenida por el método BASICO, no pueden considerarse como los óptimos.

Para la población inicial calculada por el método IEEE, la misma que se detalla en la Tabla 5.3, se han obtenido las características indicadas en la Tabla 6.3, como resultado de un análisis estadístico de todos sus miembros.

ESTADISTICAS	R2 (ohmios)	X1-X2 (ohmios)	Xm (ohmios)	Rte (ohmios)
MINIMO	0.1886	0.8572	17.4562	146.1270
MEDIO	0.5244	0.8813	19.3797	179.6664
MAXIMO	0.8270	1.1181	21.6398	210.9231
VARIANZA	0.0166	0.0013	0.8888	174.2787
DESVIACION TIPICA	0.1290	0.0358	0.9428	13.2015
COEF. VARIACION (%)	24.6	4.07	4.86	7.35

Tabla 6.3. Análisis estadístico de la población inicial obtenida por el método IEEE.

Como se puede observar, los parámetros del circuito equivalente de esta población inicial de la máquina bajo prueba presentan coeficientes de variación aceptables, a excepción de la resistencia de rotor que tiene un valor bastante alto. Sin embargo, los valores medios de estos parámetros se considerarán como los más representativos de la población inicial obtenida por este método.

Con los valores medios de los parámetros del circuito equivalente indicados en la tabla anterior, se han calculado los valores de impedancia de entrada y torque en el eje para cada una de las condiciones de referencia indicadas en las Tablas 5.4 y 5.5, siguiendo el mismo procedimiento utilizado anteriormente para el caso de la población inicial obtenida por el método BASICO. Los resultados así obtenidos se presentan en la Tabla 6.4.

En este caso, los errores obtenidos para cada una de las condiciones de referencia consideradas son algo menores que aquellos calculados para los valores medios de los parámetros de la población inicial obtenida por el método BASICO. Sin embargo, tampoco estos valores pueden considerarse como los óptimos, por cuanto los errores obtenidos siguen siendo altos.

PRUEBA No.	IMPEDANCIA		TORQUE EN EL EJE (N-m)	ERROR OBTENIDO
	REAL (ohmios)	IMAG. (ohmios)		
1	6.028	3.217	25.618	0.952
2	6.995	3.939	21.950	0.173
3	7.380	4.286	20.596	3.478
4	8.267	5.262	17.628	7.487
5	8.782	5.955	16.007	18.662
6	9.741	7.966	12.660	24.555
7	9.741	7.966	12.845	35.858
8	10.118	9.437	10.655	26.911
9	10.244	11.274	8.992	33.525

Tabla 6.4. Valores de impedancia y torque, calculados a partir de los valores medios de los parámetros indicados en la Tabla 6.3.

Hasta ahora se han considerado únicamente los valores medios de los parámetros de cada una de las poblaciones iniciales disponibles. Sin embargo, es posible que dentro de cada población inicial existan diferentes grupos de parámetros que se adapten mejor que los demás a las condiciones de referencia indicadas en las Tablas 5.4 y 5.5.

En base a esta consideración, se procedió a identificar los valores de los grupos de parámetros de las dos poblaciones iniciales que más se adaptan a las diferentes condiciones de carga de la máquina bajo prueba tomadas como referencia. Estos resultados ya se presentaron anteriormente en las Tablas 5.8 y 5.10 del Capítulo V.

En la Tabla 6.5 se hace un resumen de los errores obtenidos con los mejores grupos de parámetros de estas poblaciones iniciales, para cada una de las condiciones de referencia indicadas en la Tabla 5.5.

ERROR OBTENIDO		
PRUEBA No.	METODO BASICO	METODO IEEE
1	6.5329	0.0621
2	2.3763	0.0166
3	8.1794	0.0197
4	12.1822	0.0429
5	24.4629	0.5364
6	29.0731	2.9693
7	41.3483	7.5261
8	30.7521	4.7163
9	37.5436	9.8943

Tabla 6.5. Resumen de los errores cometidos con los mejores grupos de parámetros de las dos poblaciones iniciales.

Como se puede observar, los errores obtenidos con los mejores grupos de parámetros de la población inicial calculada por el método recomendado por el IEEE, es bastante aceptable para las cuatro primeras condiciones de referencia, por lo que a estos grupos de parámetros se los podría considerar como los más idóneos para estas condiciones, siempre que no se utilice un algoritmo genético en la búsqueda de los parámetros óptimos. Sin embargo, para las condiciones de referencia de las pruebas de carga No.5 a No.9, estos errores son bastante altos, por lo que de ninguna manera se los puede considerar como los más adecuados.

En la Tabla 5.10 se advierte que, para esta máquina en particular, un solo grupo de parámetros de la población inicial obtenida por el método BASICO, es el que mejor se

adapta a las diferentes condiciones de carga tomadas como referencia, sin embargo, los errores que se obtienen son bastante altos y casi se equiparan a los obtenidos con los valores medios de su población. Por lo tanto, a este grupo de parámetros tampoco se lo puede considerar como el más idóneo.

Adicionalmente, en todos los casos a los que se ha hecho referencia en esta discusión, se observa que el error aumenta conforme la máquina se acerca a las condiciones de vacío. Esto puede tener su origen en las consideraciones que hacen cada uno de los métodos utilizados para obtener las poblaciones iniciales de parámetros del circuito equivalente.

Si bien es cierto que, los métodos de cálculo de los parámetros del circuito equivalente que se han utilizado en esta tesis son aproximados, muchos de los errores se introducen durante la toma de datos de las pruebas de laboratorio, ya que los equipos empleados son bastante antiguos y no están adecuadamente calibrados. Especial atención merece el medidor de torque conectado al eje de la máquina bajo prueba, ya que antes de empezar a tomar los datos de las pruebas de carga fue necesario calibrarlo, pero como no se disponía de un equipo adecuado se lo hizo de una manera muy rudimentaria. Otra fuente importante de errores radica en la medición indirecta de los valores de deslizamiento de la máquina para las diferentes condiciones de funcionamiento de la máquina tomados como referencia.

En definitiva, todo lo dicho en esta discusión justifica plenamente la utilización de un algoritmo genético de optimización en la identificación de un grupo de parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción que se adapte óptimamente a una cierta condición de funcionamiento de la máquina la cual se toma como referencia.

VI.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROCESO GENETICO.

Los resultados obtenidos luego de realizado el proceso de evolución artificial de las dos poblaciones iniciales calculadas por los métodos IEEE y BASICO, se muestran en las Tablas 5.9 y 5.11 del capítulo anterior, respectivamente. En la Tabla 6.6 se presenta un resumen de las tablas antes indicadas, en lo concerniente a las columnas del error obtenido.

ERROR OBTENIDO		
PRUEBA No.	METODO BASICO	METODO IEEE
1	5.99E-05	4.43E-05
2	9.15E-05	3.64E-05
3	2.47E-05	5.21E-05
4	9.81E-05	7.45E-05
5	4.76E-05	1.66E-05
6	2.03E-05	5.06E-05
7	7.79E-05	6.27E-05
8	6.49E-05	4.83E-05
9	9.16E-05	7.66E-05

Tabla 6.6. Resumen de los errores obtenidos luego de realizado el proceso de evolución artificial.

Como se puede observar, en los dos casos el proceso de evolución artificial permite encontrar los grupos de parámetros del circuito equivalente considerado, que mejor se

adaptan a las diferentes condiciones de referencia, minimizando el error obtenido hasta valores que se encuentran en el orden de 10^{-3} . Esto significa que estos grupos de parámetros son los óptimos para cada una de estas condiciones de carga de la máquina bajo prueba.

Tal como se pensaba, el algoritmo genético debe trabajar más en la identificación de los parámetros óptimos conforme el funcionamiento de la máquina se acerca a la condición de vacío, lo que se corrobora al observar en las Tablas 5.9 y 5.11 que, para estos casos, se requiere de un mayor número de cruces y mutaciones durante el proceso de evolución artificial para converger a las condiciones de carga indicadas en la Tabla 5.5 tomadas como referencia.

Según lo indicado en la Tabla 6.6, el proceso de evolución artificial entrega mejores resultados cuando utiliza la población inicial calculada por el método BASICO. Esto tiene su razón de ser en el hecho de que este método considera iguales a los valores de las resistencias de estator y de rotor, lo que implica que R_1 puede variar libremente. Lo cual no ocurre en el método IEEE, en donde el valor de R_1 se lo considera como conocido de antemano y, por tanto, no puede ser alterado durante el proceso de evolución artificial.

El efecto de estas consideraciones se observa claramente en los resultados obtenidos para las condiciones de referencia de las pruebas de carga No.2 y No.3, en lo que respecta al valor de la resistencia de pérdidas en el núcleo. Así, cuando se emplea la población inicial obtenida por el método IEEE, R_{fe} alcanza un valor de 916.55 ohmios para la prueba No.2, y 402.63 ohmios para la prueba de carga No.3. En cambio, en el caso del método BASICO, R_{fe} alcanza los valores de 145.6 y 121.05 ohmios, para las condiciones de referencia No.2 y No.3, respectivamente. Como se puede apreciar en este último caso, R_{fe} no necesitó ser modificada tan ampliamente para encontrar el grupo de parámetros óptimos de la máquina que converja a las condiciones de referencia expuestas en las pruebas de carga No.2 y No.3.

analizar el efecto que tiene un ~~error~~ referenciales con un cierto margen de error en la identificación de los parámetros óptimos de la máquina bajo prueba, se ha considerado variaciones de $\pm 5\%$ en los valores de deslizamiento, torque, voltaje, corriente y potencia, correspondientes a cada una de las pruebas de carga indicadas en la Tabla 5.4. Cabe destacar que cuando se ha alterado uno de estos valores los demás deben permanecer sin ninguna modificación.

En el Capítulo IV, en su literal IV.6.1 se presentaron las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los valores referenciales de impedancia compleja de entrada a la máquina. Allí se observa que el deslizamiento no

torque. Adicionalmente, debido a que el valor referencial de torque se mide directamente en el eje de la máquina bajo prueba, cualquier error cometido durante su medición se refleja en la referencia en la misma proporción.

En la Tabla 6.7 se presentan los nuevos valores referenciales de impedancia de entrada a la máquina, considerando una variación de $\pm 5\%$ en los valores de voltaje, corriente y potencia indicados en la Tabla 5.4. También se incluye el porcentaje de variación de estos nuevos valores con respecto a aquellos presentados en la Tabla 5.5 y que sirvieron como base para este trabajo.

Como se puede apreciar en esta tabla, errores de $\pm 5\%$ en la medición del voltaje, corriente o potencia, ocasionan variaciones en el orden de $\pm 20\%$ en el valor referencial de impedancia de entrada a la máquina. También se puede ver que estas variaciones disminuyen conforme el funcionamiento de la máquina se acerca a la condición de vacío.

Sin embargo, en la realidad los errores cometidos en la medición de voltaje, corriente o potencia son bastante bajos, y se estima que pueden alcanzar un 2% como máximo, debido principalmente a la precisión con que trabajan los aparatos de medida. Desde este punto de vista, es más factible que se cometan errores durante la estimación del deslizamiento y del torque en el eje, ya que para ello se han utilizado un tacómetro y un medidor mecánico de torque, respectivamente.

Una vez analizados los efectos de estas variaciones en los valores referenciales de impedancia de entrada y torque en el eje de la máquina bajo prueba, se realizó una serie de corridas del programa de evolución para encontrar el grupo de parámetros que más se adapte a cada una de estas nuevas condiciones de referencia. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 6.8 a 6.16, en donde se incluyen las variaciones porcentuales que presentan los nuevos parámetros obtenidos con respecto a aquellos presentados en las Tablas 5.9 y 5.11.

CONDICION	PRUEBA No.1						PRUEBA No.2						PRUEBA No.3					
	IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA			
	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)		
V + 5%	6.4891	0.00	3.8236	26.06	7.3129	0.00	6.0317	18.62	8.4886	0.00	6.2204	16.78	8.4886	0.00	6.2204	16.78		
V - 5%	6.4891	0.00	2.0806	-31.94	7.3129	0.00	6.0317	7.60	8.4886	0.00	4.3096	-19.11	8.4886	0.00	4.3096	-19.11		
I + 5%	5.8892	-9.30	3.4001	13.38	6.6330	-9.30	4.6639	7.60	7.7084	-9.30	6.6421	6.91	7.7084	-9.30	6.6421	6.91		
I - 5%	7.1866	10.80	2.3116	-24.38	7.1030	10.80	3.6789	-13.27	9.4186	10.80	4.7761	-10.37	9.4186	10.80	4.7761	-10.37		
P + 5%	6.8136	5.00	2.2426	-28.64	7.6786	5.00	3.6370	-16.61	8.9234	5.00	4.6802	-14.03	8.9234	5.00	4.6802	-14.03		
P - 5%	6.1647	-5.00	3.6675	19.97	6.9473	-5.00	4.8173	13.67	8.0736	-5.00	5.9617	11.72	8.0736	-5.00	5.9617	11.72		

TABLA 6.7. RESPUESTA DE LOS VALORES DE REFERENCIA A CAMBIOS EN LOS VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA.

CONDICION	PRUEBA No.4						PRUEBA No.5						PRUEBA No.6					
	IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA			
	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)		
V + 5%	9.6667	0.00	7.8101	14.36	10.3930	0.00	10.5282	10.67	10.6799	0.00	10.6799	0.00	10.6799	0.00	14.0611	8.19		
V - 5%	9.6667	0.00	6.7429	-15.91	10.3930	0.00	8.4366	-11.33	10.6799	0.00	10.6799	0.00	10.6799	0.00	11.8875	-8.47		
I + 5%	8.6780	-10.23	7.0840	3.73	9.4268	-9.30	9.5503	0.38	9.5963	-9.30	9.5963	-9.30	9.5963	-9.30	12.7448	-1.87		
I - 5%	10.7110	10.80	6.3633	-6.82	11.5168	10.80	9.3469	-1.76	11.7229	10.80	11.7229	10.80	11.7229	10.80	13.1717	1.42		
P + 5%	10.1600	5.00	6.0878	-10.86	10.9127	5.00	8.9131	6.32	11.1089	5.00	11.1089	5.00	11.1089	5.00	12.6379	-3.46		
P - 5%	9.1833	-5.00	7.4696	9.33	9.8734	-5.00	10.0522	5.96	10.0509	-5.00	10.0509	-5.00	10.0509	-5.00	13.4009	3.18		

TABLA 6.7. RESPUESTA DE LOS VALORES DE REFERENCIA A CAMBIOS EN LOS VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA. (CONTINUACION)

CONDICION	PRUEBA No.7						PRUEBA No.8						PRUEBA No.9					
	IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA		IMPEDANCIA REAL		IMPEDANCIA IMAGINARIA			
	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)	VALOR (ohmios)	VARIACION (%)		
V + 5%	10.0623	0.00	15.5035	7.36	10.5794	0.00	16.2628	7.35	8.3333	0.00	19.2382	6.03	8.3333	0.00	17.0403	-6.09		
V - 5%	10.0623	0.00	13.3622	-7.54	10.5794	0.00	14.0261	-7.53	8.3333	0.00	17.0403	-6.09	8.3333	0.00	17.0403	-6.09		
I + 5%	9.1540	-9.30	14.0617	-2.02	9.5659	-9.30	14.7690	-2.63	7.5586	-9.30	17.4491	-3.83	7.5586	-9.30	17.4491	-3.83		
I - 5%	11.1826	10.80	14.7941	2.45	11.7224	10.80	15.5414	2.46	9.2336	10.80	18.8906	4.06	9.2336	10.80	18.8906	4.06		
P + 5%	10.5699	5.00	14.0744	-2.54	11.1084	5.00	14.7853	-2.53	8.7500	5.00	17.9473	-1.09	8.7500	5.00	17.9473	-1.09		
P - 5%	9.5877	-5.00	14.7804	2.36	10.0505	-5.00	15.5238	2.34	7.9167	-5.00	18.3302	1.02	7.9167	-5.00	18.3302	1.02		

TABLA 6.7. RESPUESTA DE LOS VALORES DE REFERENCIA A CAMBIOS EN LOS VALORES DE VOLTAJE, CORRIENTE Y POTENCIA. (CONTINUACION)

CONDICION	METODO BASICO												METODO IEEE																
	R1=R2				X1=X2				Xm				R2				X1=X2				Xm				R2				
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	
S + 5%	0.6246	-0.78	1.2296	37.70	40.1026	59.48	51.3783	0.00	0.6100	4.17	0.8638	8.03	22.8152	6.14	74.3402	-2.09													
S - 5%	0.6061	-3.88	0.8638	-4.37	24.1348	-4.02	49.5308	-3.80	0.5514	-5.84	0.8480	7.41	22.7273	5.73	74.8680	-1.39													
T + 5%	0.5963	-5.43	0.9076	1.84	26.8182	6.66	82.7858	61.13	0.5563	-5.00	0.8638	-18.04	20.0880	-6.55	355.5132	368.26													
T - 5%	0.6246	-0.78	1.3563	51.90	44.6774	77.67	35.7888	-30.35	0.6296	7.50	0.7856	-0.61	20.4839	-4.71	44.4873	-41.43													
V + 5%	0.6100	-3.10	1.7387	94.50	43.8416	74.34	46.2757	-9.93	0.6587	12.48	0.9368	18.62	17.1848	-20.06	60.3519	-20.51													
V - 5%	0.5961	-10.07	0.8343	-6.56	62.1983	147.34	60.6158	17.98	0.5075	-13.34	0.7514	-4.93	49.0762	128.31	135.3079	78.22													
I + 5%	0.6296	0.00	0.8929	0.00	16.8328	-33.06	43.4508	-15.43	0.5709	-2.51	0.9563	20.99	16.5689	-22.92	60.8798	-19.81													
I - 5%	0.6296	0.00	0.8929	0.00	61.6412	145.13	64.9951	26.50	0.5906	0.84	0.7270	-8.02	42.6989	98.64	100.9871	33.02													
P + 5%	0.6246	-0.78	0.9663	7.10	64.1482	155.10	42.3167	-17.64	0.5758	-1.67	0.9026	14.20	56.3485	162.14	54.8094	-27.81													
P - 5%	0.6197	-1.56	1.0197	14.20	19.2996	-23.26	67.4780	31.34	0.6709	-2.51	0.9514	20.37	17.4426	-18.86	150.3519	98.03													

TABLA 6.8. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERNAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.1

CONDICION	METODO BASICO												METODO IEEE													
	R1=R2				X1=X2				Xm				R2				X1=X2				Xm				R2	
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)
S + 5%	0.5905	0.00	1.2636	46.32	26.3783	29.06	115.2483	-20.85	0.5709	4.46	0.8783	5.27	19.6481	2.76	925.0636	0.93										
S - 5%	0.5661	-4.13	0.8441	-2.26	20.3519	-0.43	137.1554	-5.80	0.5173	-5.36	0.8685	4.10	19.5161	2.07	869.1409	-5.17										
T + 5%	0.5563	-5.79	0.9417	9.04	22.1904	8.61	824.6764	406.33	0.4978	-9.93	1.0929	31.00	22.7713	19.10	809.4055	-11.09										
T - 5%	0.6246	5.77	0.8539	-1.12	19.7361	-3.44	74.5646	-48.79	0.5856	7.14	0.8197	-1.75	18.5044	-3.22	118.1809	-87.11										
V + 5%	0.5368	-9.09	2.1660	150.81	46.6012	123.10	104.9094	-27.95	0.6197	13.37	0.8636	3.51	16.3050	-14.72	316.3509	-65.48										
V - 5%	0.5319	-9.92	0.7856	-9.03	27.4780	34.43	194.0354	33.26	0.4783	-12.50	0.8100	-2.91	26.6422	39.34	894.7418	-2.38										
I + 5%	0.5807	-1.88	1.0539	22.04	17.2287	-15.71	95.4245	-34.46	0.5270	-3.59	1.1124	33.33	16.7889	-12.19	234.8073	-74.98										
I - 5%	0.5709	-3.32	1.2002	38.98	42.5680	108.25	180.2427	30.88	0.5563	1.77	0.6734	-19.29	25.1466	31.52	993.3527	8.38										
P + 5%	0.5905	0.00	0.8539	-1.12	27.4780	34.43	88.7873	-39.02	0.5466	0.00	0.8392	0.59	26.1584	36.81	147.5745	-83.90										
P - 5%	0.5075	-14.06	1.8294	111.83	30.0293	46.92	218.6882	50.20	0.4344	-20.53	1.8684	123.95	34.1842	78.68	693.7273	-24.31										

TABLA 6.9. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.2

CONDICION	METODO BASICO												METODO IEEE																				
	R1=R2				X1=X2				Xm				R2				X1=X2				Xm				R2								
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)					
S + 5%	0.6100	4.17	2.0684	0.47	43.6657	1.04	6.98	128.5016	6.98	0.6686	5.38	0.8667	-4.36	20.1780	-1.08	428.2364	6.36	0.6246	6.66	1.1904	-42.18	23.7830	-44.64	133.3518	10.16	0.6061	-4.62	0.8686	-3.28	20.2639	-0.66	413.0656	2.59
T + 5%	0.6247	6.68	1.0734	-47.96	23.3333	-46.69	462.80	668.2019	462.80	0.5819	-8.28	1.2246	36.40	24.1935	18.62	984.1644	144.43	0.7083	20.95	0.7076	-66.63	19.5406	-54.62	108.6773	-9.40	0.6753	6.45	0.9222	2.72	20.2053	-0.93	117.5951	-70.79
V + 5%	0.7395	26.28	0.8246	-59.95	18.2111	-57.61	79.26	217.0076	79.26	0.7064	11.35	1.1173	24.45	19.0323	-6.69	202.0617	-49.82	0.5663	-3.30	1.4410	-30.00	41.6716	-3.00	168.9436	31.30	0.5547	-12.56	0.9368	4.34	26.6960	30.89	983.8317	146.83
I + 5%	0.6100	4.17	1.8148	-11.85	24.2326	-43.60	-31.36	83.0082	-31.36	0.6197	-2.32	1.1856	32.06	17.8983	-12.25	175.0718	-56.62	0.6246	6.66	1.6392	-20.38	48.2406	12.29	185.5018	53.24	0.6344	0.00	0.8978	0.00	27.7908	36.26	582.2716	47.10
P + 5%	0.6295	7.50	1.5758	-23.46	41.6325	-3.09	-29.01	85.9427	-29.01	0.6441	1.53	0.6539	-27.17	23.0596	13.06	168.4345	-58.17	0.6706	-2.51	2.1806	6.92	33.6168	-21.75	204.4656	68.90	0.6197	-2.32	1.2197	35.95	19.1496	-6.11	988.6116	146.54

TABLA 6.10. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.3

CONDICION	METODO BASICO										METODO IEEE									
	R1=R2		X1=X2		Xm		Rb		Rz		X1=X2		Xm		Rb		Rz			
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)		
S + 5%	0.7807	24.99	0.8686	-71.06	20.7862	-55.24	93.8710	69.63	0.7758	6.00	0.4685	-46.95	19.2087	-6.24	140.3228	41.53	0.7758	6.00		
S - 5%	0.6514	-11.72	3.3806	12.68	76.2193	64.13	60.3519	9.06	0.6831	-6.67	1.2441	40.88	21.8696	6.91	82.7659	-16.50	0.6831	-6.67		
T + 5%	0.7124	14.06	0.7612	-74.63	20.7862	-55.24	153.2551	178.95	0.6929	-5.33	0.8148	-7.73	20.4138	-0.34	176.0997	77.61	0.6929	-5.33		
T - 5%	0.6906	-6.46	3.6537	21.79	96.9973	106.73	47.9179	-13.41	0.7758	6.00	0.8636	-2.21	20.2261	-1.25	73.1867	-26.19	0.7758	6.00		
V + 5%	0.7856	26.78	2.0343	-32.19	23.0352	-50.39	60.0880	8.59	0.8100	10.67	1.1904	34.80	19.8827	-2.93	88.6563	-10.38	0.8100	10.67		
V - 5%	0.6953	-4.69	2.3856	-20.49	50.7478	9.28	62.1994	12.40	0.6539	-10.66	0.6490	-26.51	21.8622	6.73	111.5543	12.51	0.6539	-10.66		
I + 5%	0.7417	18.75	1.0490	-65.03	18.1232	-60.97	80.1466	44.83	0.6539	-10.66	2.3891	170.54	23.6217	15.32	50.6746	-48.89	0.6539	-10.66		
I - 5%	0.7417	18.75	1.0564	-64.79	27.1408	-41.56	89.7263	62.14	0.7417	1.34	0.0743	-91.59	21.7888	6.37	207.3412	109.12	0.7417	1.34		
P + 5%	0.6296	0.78	2.9649	-1.17	74.6746	60.59	51.1339	-7.60	0.7319	0.00	0.7875	-10.83	23.3284	13.89	76.4639	-23.87	0.7319	0.00		
P - 5%	0.7466	19.52	0.8686	-71.06	18.6364	-59.87	148.5337	168.42	0.7319	0.00	0.8225	-6.86	18.1965	-11.17	188.9638	90.58	0.7319	0.00		

TABLA 6.11. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.4

CONDICION	METODO BASICO										METODO IEEE									
	R1=R2		X1=X2		Xm		Rb		R2		X1=X2		Xm		Rb					
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)				
S + 5%	0.9807	5.24	0.8197	-27.89	19.5797	-2.32	100.9971	19.01	0.9953	5.69	0.0295	-96.44	19.0323	-3.78	170.4108	74.66				
S - 5%	0.8929	-4.18	1.0636	-6.44	20.0489	0.02	86.2170	1.59	0.8880	-5.70	1.1904	43.51	20.2053	2.15	82.2581	-15.69				
T + 5%	0.8587	-7.85	2.1367	87.96	22.1603	10.56	69.0616	-18.62	0.8880	-5.70	1.0782	29.98	20.1662	1.95	112.0821	14.88				
T - 5%	0.9904	6.28	0.4636	-59.22	19.1496	-4.46	95.9824	13.10	0.9904	5.17	1.1514	38.81	20.0489	1.36	68.7977	-29.49				
V + 5%	1.0343	10.99	0.7612	-33.04	19.2278	-4.07	120.7918	42.34	1.0539	11.91	0.0734	-91.15	19.1496	-3.19	183.3431	87.92				
V - 5%	0.8441	-9.42	0.9553	-15.88	20.7527	3.54	80.1466	-5.55	0.8392	-10.88	0.9856	18.82	20.6745	4.52	80.6745	-17.31				
I + 5%	0.9417	1.05	0.3319	-70.80	17.2336	-14.02	142.9619	68.48	0.9417	0.00	0.7807	-5.88	17.5655	-11.09	101.5249	4.06				
I - 5%	0.9417	1.05	0.2197	-80.67	21.6129	7.83	141.3783	66.59	0.9417	0.00	0.7514	-9.42	22.5122	13.81	101.5249	4.06				
P + 5%	0.9417	1.05	0.3173	-72.09	20.4399	1.96	95.9824	13.10	0.9417	0.00	0.9319	12.34	21.4655	8.48	71.4370	-26.78				
P - 5%	0.9398	0.53	0.8197	-27.89	18.4848	-7.78	147.5690	73.86	0.9405	0.51	0.1856	-77.63	18.1720	-8.13	282.9619	190.02				

TABLA 6.12. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.6

CONDICION	METODO BASICO										METODO IEEE									
	R1=R2		X1=X2		Xm		Rle		R2		X1=X2		Xm		Rle					
	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmio)	VARIAC. (%)				
S + 5%	1.2538	2.80	2.6709	8.40.34	19.4721	-1.12	50.0587	-48.69	1.22.46	-1.18	4.6.466	387.87	21.0567	4.82	32.6393	-55.46				
S - 5%	1.1612	-4.80	0.8051	194.48	19.6921	0.00	79.8827	-18.12	1.1758	-5.12	1.22.46	31.41	20.0880	0.00	67.2141	-8.28				
T + 5%	1.1612	-4.80	0.2441	-10.72	19.7801	0.45	112.8739	15.69	1.1807	-4.72	0.0880	-90.66	20.2199	0.66	110.7625	51.14				
T - 5%	1.2343	1.20	3.9074	1329.19	19.7361	0.22	35.2786	-63.84	1.2638	1.18	3.9659	326.57	20.5279	2.19	34.4868	-62.94				
V + 5%	1.3.466	10.40	0.22.46	-17.86	20.0440	1.79	116.7380	18.63	1.3514	9.05	2.9172	213.04	20.2639	0.88	50.2542	-31.43				
V - 5%	1.0680	-10.80	1.8831	688.77	19.6481	-0.22	51.6716	-47.04	1.1124	-10.23	0.6829	-25.66	19.8240	-1.31	70.0878	-4.35				
I + 5%	1.2197	0.00	0.3027	10.72	18.1626	-7.82	100.4301	2.94	1.1026	-11.02	5.9122	534.42	19.7801	-1.53	23.8905	-67.40				
I - 5%	1.2197	0.00	0.2734	0.00	21.5396	9.38	93.6266	-4.04	1.2441	0.40	0.0382	-95.79	22.1114	10.07	93.9101	28.14				
P + 5%	1.2002	-1.60	2.3709	767.19	20.6718	4.47	46.5689	-52.27	1.2441	0.40	0.0480	-94.74	20.8368	3.72	80.0186	9.19				
P - 5%	1.2197	0.00	0.3027	10.72	19.1202	-2.90	123.6766	26.78	1.2382	0.00	0.9758	4.71	19.4282	-3.28	86.5396	18.09				

TABLA 6.13. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.6

CONDICION	METODO BASICO										METODO IEEE									
	R1=R2		X1=X2		Xm		R%e		R2		X1=X2		Xm		R%e					
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)				
S + 5%	1.5709	4.89	1.2686	99.96	18.9003	-1.83	80.8700	-17.11	1.6246	5.38	0.1856	-60.38	20.2199	0.44	96.1779	8.24				
S - 5%	1.4246	-4.88	0.4002	-36.92	19.4721	1.14	103.6484	6.13	1.2638	-18.67	8.0877	1626.30	21.7506	8.08	20.2063	-77.26				
T + 5%	1.4294	-4.56	0.5856	-7.69	19.3942	0.69	109.7949	12.52	1.4687	-5.38	1.2296	162.43	19.8690	-1.31	78.6021	-11.54				
T - 5%	1.5907	5.54	0.2639	-59.98	19.3402	0.46	98.5797	2.06	1.6294	5.70	0.1076	-77.03	20.2639	0.66	88.8074	-0.06				
V + 5%	1.6538	10.42	0.2832	-55.36	19.9560	3.66	129.9120	33.15	1.6928	9.81	2.0687	339.42	20.0440	-0.44	66.4126	-26.26				
V - 5%	1.2343	-17.59	5.8634	824.24	19.4282	0.91	26.3079	-74.06	1.0978	-28.79	8.4974	1713.76	26.6422	32.34	17.6540	-80.13				
I + 5%	1.5026	0.33	0.3807	-39.99	18.0206	-6.40	110.9189	13.69	1.2099	-21.62	9.5610	1938.63	22.6363	12.46	14.8182	-63.32				
I - 5%	1.4977	0.00	0.2639	-59.98	21.0657	9.37	106.2463	7.87	1.6368	-0.31	1.4636	212.40	21.5836	7.21	68.3969	-23.03				
P + 5%	1.4929	-0.32	1.1709	84.67	19.5601	1.60	70.3812	-27.86	1.6124	-1.89	3.3074	606.96	20.1920	0.00	41.1828	-53.66				
P - 5%	1.4977	0.00	1.1417	79.97	18.6364	-3.20	100.9971	3.52	1.6416	0.00	0.6929	47.90	19.5601	-2.84	98.7282	11.11				

TABLA 6.14. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.7

CONDICION	METODO BASICO												METODO IEEE																			
	R1=R2				X1=X2				Xm				R2				X1=X2				Xm				R2							
	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmios)	VARIAC. (%)				
S + 5%	1.6246	4.07	2.0684	106.79	19.4721	-2.86	56.4607	-19.43	1.6392	3.70	4.2342	30.52	20.0440	-0.65	36.0802	-14.91	1.5124	-4.32	0.1076	-96.68	21.3196	5.67	78.0352	84.02	1.6392	3.70	4.2342	30.52	20.0440	-0.65	36.0802	-14.91
S - 5%	1.4880	-4.68	0.9173	-8.74	20.1760	0.66	70.6647	0.78	1.5124	-4.32	0.1076	-96.68	21.3196	5.67	78.0352	84.02	1.5124	-4.32	0.1076	-96.68	21.3196	5.67	78.0352	84.02	1.5124	-4.32	0.1076	-96.68	21.3196	5.67	78.0352	84.02
T + 5%	1.4782	-5.31	1.7855	77.64	19.8240	-1.10	62.4438	-10.94	1.5124	-4.32	1.3076	-69.69	20.8368	3.27	64.1447	51.27	1.5124	-4.32	1.3076	-69.69	20.8368	3.27	64.1447	51.27	1.5124	-4.32	1.3076	-69.69	20.8368	3.27	64.1447	51.27
T - 5%	1.6441	5.32	0.0480	-95.12	20.3959	1.78	82.5709	17.76	1.5638	4.62	4.0976	26.31	20.0000	-0.87	35.5132	-16.26	1.5638	4.62	4.0976	26.31	20.0000	-0.87	35.5132	-16.26	1.5638	4.62	4.0976	26.31	20.0000	-0.87	35.5132	-16.26
V + 5%	1.7124	9.69	1.1026	9.70	20.4639	2.19	80.0196	14.12	1.7026	7.71	5.6878	76.33	20.0440	-0.65	32.3949	-23.61	1.7026	7.71	5.6878	76.33	20.0440	-0.65	32.3949	-23.61	1.7026	7.71	5.6878	76.33	20.0440	-0.65	32.3949	-23.61
V - 5%	1.4002	-10.31	0.8490	-15.53	19.6921	-1.76	63.2942	-9.73	1.4392	-8.96	0.3612	-88.87	20.5718	1.96	65.5621	54.61	1.4392	-8.96	0.3612	-88.87	20.5718	1.96	65.5621	54.61	1.4392	-8.96	0.3612	-88.87	20.5718	1.96	65.5621	54.61
I + 5%	1.5611	0.00	0.1076	-89.29	19.0762	-4.83	91.0753	29.89	1.3953	-11.73	9.5217	193.52	21.1877	5.01	15.3861	-63.72	1.3953	-11.73	9.5217	193.52	21.1877	5.01	15.3861	-63.72	1.3953	-11.73	9.5217	193.52	21.1877	5.01	15.3861	-63.72
I - 5%	1.5563	-0.31	0.9661	-3.88	21.8036	8.78	69.5308	-0.84	1.5953	0.92	0.9270	-71.42	22.7713	12.86	64.9861	63.27	1.5953	0.92	0.9270	-71.42	22.7713	12.86	64.9861	63.27	1.5953	0.92	0.9270	-71.42	22.7713	12.86	64.9861	63.27
P + 5%	1.5221	-2.50	4.4976	347.48	19.7801	-1.32	32.9619	-52.99	1.5953	0.92	1.2685	-60.90	21.4076	6.10	54.7898	29.21	1.5953	0.92	1.2685	-60.90	21.4076	6.10	54.7898	29.21	1.5953	0.92	1.2685	-60.90	21.4076	6.10	54.7898	29.21
P - 5%	1.5563	-0.31	0.1496	-95.41	20.0680	0.22	102.9614	46.87	1.5904	0.61	1.8050	-44.36	20.0440	-0.65	61.3098	44.58	1.5904	0.61	1.8050	-44.36	20.0440	-0.65	61.3098	44.58	1.5904	0.61	1.8050	-44.36	20.0440	-0.65	61.3098	44.58

TABLA 6.15 IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.8

CONDICION	METODO BASICO												METODO IEEE																		
	R1=P2				X1=X2				Xm				R2				X1=X2				Xm				R2						
	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)	VALOR (ohmioe)	VARIAC. (%)			
S + 5%	2.7123	4.90	0.3612	-94.08	19.5781	8.64	52.33	2.7855	4.58	0.4683	-52.50	20.7852	2.13	83.8416	9.28	2.7855	4.58	0.4683	-52.50	20.7852	2.13	83.8416	9.28	2.7855	4.58	0.4683	-52.50	20.7852	2.13	83.8416	9.28
S - 5%	2.4768	-4.20	1.3230	-41.68	18.9003	4.88	15.82	2.5489	-4.27	1.5176	44.67	20.0000	-1.73	70.6462	-7.91	2.5489	-4.27	1.5176	44.67	20.0000	-1.73	70.6462	-7.91	2.5489	-4.27	1.5176	44.67	20.0000	-1.73	70.6462	-7.91
T + 5%	2.4505	-5.22	0.1150	-94.93	19.9560	10.74	57.81	2.5324	-4.92	0.2901	-72.35	20.9677	3.03	89.6481	16.85	2.5324	-4.92	0.2901	-72.35	20.9677	3.03	89.6481	16.85	2.5324	-4.92	0.2901	-72.35	20.9677	3.03	89.6481	16.85
T - 5%	2.7318	5.66	0.0100	-99.55	19.8680	10.25	55.68	2.7952	4.94	0.1306	-87.55	21.0997	3.67	85.9531	12.04	2.7952	4.94	0.1306	-87.55	21.0997	3.67	85.9531	12.04	2.7952	4.94	0.1306	-87.55	21.0997	3.67	85.9531	12.04
V + 5%	2.8489	10.19	1.3425	-40.82	19.6041	8.79	46.25	2.9299	9.89	1.0382	56.17	20.7918	2.16	78.0352	1.72	2.9299	9.89	1.0382	56.17	20.7918	2.16	78.0352	1.72	2.9299	9.89	1.0382	56.17	20.7918	2.16	78.0352	1.72
V - 5%	2.3416	-9.43	0.4010	-82.32	18.8123	4.39	19.47	2.3652	-10.07	0.4438	-57.69	19.9550	-1.95	75.6598	-1.38	2.3652	-10.07	0.4438	-57.69	19.9550	-1.95	75.6598	-1.38	2.3652	-10.07	0.4438	-57.69	19.9550	-1.95	75.6598	-1.38
I + 5%	2.5952	0.38	0.2935	-87.05	18.5824	3.17	64.20	2.6684	0.18	1.1294	7.66	19.0762	-5.27	76.1877	-0.89	2.6684	0.18	1.1294	7.66	19.0762	-5.27	76.1877	-0.89	2.6684	0.18	1.1294	7.66	19.0762	-5.27	76.1877	-0.89
I - 5%	2.5904	0.19	0.8371	-63.10	20.5279	13.91	22.82	2.6782	0.55	1.0154	-3.20	21.8035	7.13	75.9238	-1.03	2.6782	0.55	1.0154	-3.20	21.8035	7.13	75.9238	-1.03	2.6782	0.55	1.0154	-3.20	21.8035	7.13	75.9238	-1.03
P + 5%	2.5952	0.38	0.9453	-58.33	19.2522	6.83	12.47	2.6684	0.18	0.7465	-28.55	20.7918	2.16	73.2845	-4.47	2.6684	0.18	0.7465	-28.55	20.7918	2.16	73.2845	-4.47	2.6684	0.18	0.7465	-28.55	20.7918	2.16	73.2845	-4.47
P - 5%	2.6001	0.56	0.9482	-58.20	19.0323	5.61	52.94	2.6830	0.73	0.2351	-77.59	20.8358	2.38	96.5103	25.90	2.6830	0.73	0.2351	-77.59	20.8358	2.38	96.5103	25.90	2.6830	0.73	0.2351	-77.59	20.8358	2.38	96.5103	25.90

TABLA 6.16. IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CUANDO SE ALTERAN LOS VALORES DE LA PRUEBA DE CARGA No.9

Analizando los resultados presentados en las tablas anteriores, se observa que los nuevos grupos de parámetros que han sido identificados por el algoritmo genético como los óptimos para cada una de las nuevas condiciones de referencia, presentan mayores variaciones cuando se parte de la población inicial obtenida por el método BASICO que cuando se utiliza la población inicial obtenida por el método IEEE. Sin embargo, las variaciones encontradas son bastante altas, principalmente para la reactancia de dispersión del núcleo y para la resistencia de pérdidas en el núcleo.

Estas variaciones en los valores de los parámetros pueden considerarse como normales, por cuanto el algoritmo genético siempre busca el grupo de parámetros que más se adapte a las condiciones de referencia que el usuario ha ingresado como dato del programa, de ahí la necesidad de que estos valores referenciales deban ser medidos lo más exactamente posible.

VI.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como producto de un análisis de los resultados obtenidos en esta tesis, se han llegado a establecer las conclusiones y recomendaciones que a continuación se indican.

VI.3.1. CONCLUSIONES.

- 1) Ninguno de los dos métodos de cálculo utilizados para obtener la población inicial de posibles parámetros de la máquina bajo prueba, permite encontrar, por sí solo, un grupo de parámetros que se adapte, con suficiente precisión, a cada una de las condiciones de funcionamiento de la máquina comprendidas entre vacío y la plena carga. Sin embargo, para calcular los parámetros del circuito equivalente considerado de la máquina de inducción, sin emplear un algoritmo genético de optimización, es mejor utilizar el método que recomienda el IEEE en su Std-112 de 1991 antes que el método BASICO, ya que este último introduce más errores para las diferentes condiciones de carga en el eje de la máquina tomadas como referencia.
- 2) Los algoritmos genéticos de optimización constituyen una alternativa válida para la identificación de los parámetros óptimos de la máquina de inducción, siempre que las condiciones de funcionamiento de la máquina tomadas como referencia sean medidas con suficiente exactitud.
- 3) Uno de los puntos más críticos en la implementación de los algoritmos genéticos, es la identificación de una función objetivo que mejor se adapte a los requerimientos del problema. De preferencia, esta función debe incluir el mayor número posible de condiciones de referencia con el objeto de que la búsqueda de los parámetros óptimos nos conduzca siempre a los mismos valores.
- 4) Los algoritmos genéticos pueden ser utilizados para encontrar un único grupo de parámetros de la máquina bajo

prueba que se adapte a todas las condiciones de funcionamiento de la máquina desde vacío a la plena carga, únicamente modificando la función de error que se emplea para calcular la aptitud. Esta nueva función de error debe tomar en cuenta, al mismo tiempo, los errores que se cometen en, por lo menos, tres condiciones de referencia. Por ejemplo, estas condiciones pueden ser: de plena carga, de media carga y de vacío. Sin embargo, dada las diferencias observadas en la Tablas 5.9 y 5.11, para los valores de los grupos de parámetros de la máquina que mejor se adaptan a cada una de estas condiciones, se puede adelantar que el error mínimo que se puede cometer será bastante alto.

- 5) Los procesos genéticos artificiales de cruce y mutación, al afectar a los miembros de una población de una manera aleatoria, ocasionan que no siempre se pueda converger a un mismo grupo de parámetros que se adapte a la condición de carga tomada como referencia, en el mismo número de generaciones en intentos sucesivos.

- 6) Si la mutación afecta a las cadenas de bits miembros de una población con una frecuencia muy elevada, se puede ocasionar una oscilación de los valores de los parámetros del circuito equivalente alrededor de un punto medio durante el proceso de evolución artificial, sin llegar a identificar los valores óptimos. En cambio, si la probabilidad de ocurrencia de la mutación es muy baja, la identificación de los parámetros óptimos puede tomar muchas generaciones, e incluso puede que no sea posible obtenerlos. Experimentalmente se ha encontrado que el valor más adecuado para la probabilidad de mutación está en el orden de 1 bit en 100, sin embargo, el límite máximo puede ubicarse en el 10 %.

- 8) En lo referente al cruce, éste debe ocurrir con una probabilidad muy alta, preferiblemente entre 90 y 100%, para obtener buenos resultados con el proceso de evolución artificial. Si el cruce ocurre con una frecuencia más pequeña, el mecanismo de evolución artificial tardará más en converger a los valores óptimos de los parámetros ya que el intercambio de información entre las cadenas se realiza, así mismo, muy lentamente, lo que puede ocasionar la pérdida de alguna información potencialmente importante en generaciones sucesivas.
- 9) Debido a que los operadores genéticos de reproducción, cruce y mutación trabajan con un código de los parámetros y no con los parámetros mismos, es posible utilizar las respectivas funciones desarrolladas en esta tesis en la identificación de los parámetros óptimos de otros tipos de máquinas, como pueden ser las máquinas sincrónicas y los transformadores.

Para cumplir con este cometido, es necesario primero escoger un modelo de la máquina con su correspondiente técnica para calcular una población inicial de posibles parámetros. Posteriormente, debe encontrarse una función de error y seleccionar, al mismo tiempo, la condición de convergencia para la búsqueda de los parámetros óptimos, que mejor se adapte a las condiciones específicas de cada máquina. Lo indicado hasta aquí, implica la construcción de una nueva función que permita calcular la población inicial y, otra adicional, para evaluar la aptitud de los miembros de la población.

Una vez desarrolladas estas nuevas funciones, entonces sí se pueden aplicar los operadores genéticos artificiales a la identificación de los parámetros óptimos de la máquina en estudio, siguiendo el mismo esquema del mecanismo de evolución artificial utilizado en esta tesis.

Naturalmente, para cada tipo de máquina se deben desarrollar funciones apropiadas para el ingreso de datos y la presentación de los resultados obtenidos al usuario.

- 10) Otro aspecto importante en este tipo de algoritmos es la resolución con la cual se desarrollan los procesos de conversión de los valores de los parámetros desde su código decimal a uno binario, y viceversa. Es mejor trabajar con una resolución lo más pequeña posible (0.1 a 0.5 ohmios), para así cubrir todo o la mayor parte del espectro de posibles valores y facilitar la identificación del grupo óptimo.

VI.3.2. . RECOMENDACIONES.

- 1) Profundizar en el estudio de los algoritmos genéticos, para así comprender mejor sus características de funcionamiento, lo que permitirá desarrollar nuevas aplicaciones orientadas a los sistemas de control.
- 2) Modificar la función utilizada en esta tesis para desarrollar el proceso de cruce de las cadenas, con el objeto de eliminar la restricción que existe actualmente y que consiste en que la población debe tener un par de miembros. Esto se puede conseguir, al dejar en libertad a las cadenas para que puedan tener una o más parejas, y no una sola como sucede actualmente.
- 3) Mejorar la rutina desarrollada en esta tesis para la impresión en papel de los resultados obtenidos luego de realizado el proceso de evolución artificial. Las mejoras deben ir dirigidas a lograr que el programa

detecte automáticamente que la impresora está lista para recibir la información, es decir: que está encendida, puesta en línea y con papel en el rodillo.

- 4) Actualmente el número máximo de generaciones que puede lograr el programa se ha limitado a 300. Esta limitación tiene su razón de ser en que el compilador utilizado emite un mensaje de "overflow en el stack" cuando se sobrepasa el valor indicado. Se recomienda buscar un nuevo compilador con el cual sea posible fijar un límite más alto que el logrado en esta Tesis.

- 5) En el momento de tomar los datos experimentales, necesarios para calcular tanto la población inicial como para obtener las condiciones de referencia, se recomienda utilizar equipos que tengan una correcta calibración, con el fin de minimizar los errores que se introducen por efecto de la utilización de equipos defectuosos o mal calibrados.

En resumen, en esta tesis se ha implementado, y probado, un algoritmo genético que permite identificar los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción trifásico, tomando como referencia la impedancia de entrada y el torque en el eje, correspondientes a una determinada condición de funcionamiento de la máquina bajo prueba. Los resultados obtenidos indican que los algoritmos genéticos sí pueden ser usados para este propósito. La experiencia con el algoritmo ha permitido comprobar su robustez y su capacidad para encontrar los resultados bajo condiciones de ruido e inconsistencia de los datos de la prueba de carga.

ANEXO A

ANEXO A
BIBLIOGRAFIA.

- [1].- Grefenstette J. - Baker J., "How Genetic Algorithms Work: A Critical Look at Implicit Parellelism", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.

- [2].- Yuval Davidor, "Genetic Algorithms and Robotics, A Heuristic Strategy for Optimization", World Scientific Publishing, 1991.

- [3].- Goldberg David, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison - Wesley Publishing Co., 1989.

- [4].- Goldberg D. - Wilson S., "A Critical Review of Classifier Systems", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.

- [5].- Goldberg David, "Sizing Populations for Serial and Parallel Genetic Algorithms", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.

- [6].- McAulay A. - Jae Chan Oh, "Image Learning Classifier System Using Genetic Algorithms", IEEE, 1989.

- [7].- Grefenstette John, "A System for Learning Control Strategies with Genetic Algorithms", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.

- [8].- Harp S. - Samad T., "Towards the Genetic Synthesis of Neural Networks", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.
- [9].- Caudell T. - Dolan C., "Parametric Connectivity: Training of Constrained Networks Using Genetic Algorithms", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.
- [10].- Todd P. - Hedge S., "Designing Neural Networks Using Genetic Algorithms", Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, June 1989, Morgan Kaufmann Publishers.
- [11].- Bishop Richard, "Identifying Induction Machine Parameters Using a Genetic Optimization Algorithm", Proceedings IEEE, 1990, Southeaston.
- [12].- Kosow Irving, "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Ed. Reverté, Barcelona, 1977.
- [13].- Fitzgerald - Kingsley - Kusko, "Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas", Ed. Hispano - Europea, Barcelona, 1975.
- [14].- Almeida Dominguez Julio Cesar, "Métodos para Determinar los Parámetros del Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción Polifásica", Tesis de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, 1980, Quito - Ecuador.
- [15].- Ortega Plana - Ramirez Vasquez, "Máquinas de Corriente Alterna", Enciclopedia CEAC de Electricidad, Barcelona, 1982.

- [16].- IEEE Standar Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Std.-112, 1991.
- [17].- Hojas Guías de Laboratorio de Máquinas Eléctricas I y II, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia, Quito - Ecuador.
- [18].- Umans S. - Hess H., "Modeling and Analysis of the Wanslass Three Phase Induction Motor Configuration", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.9, September 1983.
- [19].- Turbo C++ v. 1.0, Programmer's Guide, Borland International Inc.
- [20].- Turbo C++ v. 1.0, Library Reference, Borland International Inc.
- [21].- Banda H. - Folkes D. - Stewart B. , "Programming in C", The Microcomputer Centre, Department of Mathematics and Computer Science, University of Dundee U.K., 1991.
- [22].- Kelley A. - Pohl I., "Lenguaje C, Introducción a la Programación", Addison - Wesley Iberoamericana.
- [23].- Mosich D. - Shamma N. - Flamig B., "Advanced Turbo C, Programmer's Guide", John Wiley & Sons, 1988.
- [24].- Kernighan - Ritchie, "El Lenguaje de Programación C", Prentice- Hall Hispanoamericana, 1991.

ANEXO B

ANEXO B MANUAL DE USO DEL PROGRAMA.

B.1. REQUERIMIENTOS DE EJECUCION DEL PROGRAMA.

La configuración ideal que debe tener un computador, en el cual se desee ejecutar el programa desarrollado en esta Tesis, es la siguiente:

- Computador IBM PC-AT ó Compatible.
- Procesador INTEL 80386, 33 Mhz.
- Coprocesador matemático INTEL 80387.
- 640 KB de RAM básica, como mínimo.
- Monitor VGA Color.

Para una correcta operación del programa, se requiere que todos los archivos involucrados se encuentren en el mismo drive y/o directorio. Estos archivos son los siguientes:

- AG.EXE, archivo principal del programa.
- M_IEEE.DAT, archivo que contiene la población inicial de parámetros de la máquina de inducción, obtenidos mediante la recomendación del IEEE.
- M_BASICO.DAT, archivo en el cual se encuentra almacenada la población inicial de parámetros de la máquina de inducción, obtenida mediante el método BASICO.
- Un archivo con los datos de las pruebas experimentales que requiere el método recomendado por el IEEE, para obtener la población inicial de parámetros. Por defecto se lo ha nombrado como M_IEEDAT.DAT, sin embargo, puede tomar cualquier nombre.
- Un archivo que contenga los datos de las pruebas experimentales que requiere el método BASICO para obtener la población inicial de parámetros. Por defecto se lo ha nombrado como M_BASDAT.DAT, pero puede tomar cualquier otro nombre.

Al presionar la tecla ENTER, se ingresa en una nueva pantalla, como la indicada en la Figura B.2. Esta pantalla consta de: un área en la cual se especifican las condiciones de ejecución del programa (área de datos), una barra de menú de opciones y una barra explicativa sobre la acción que se lleva a cabo con cada una de ellas.

PROCESO DE EVOLUCION ARTIFICIAL																											
Datos de Entrada																											
METODO : I BASICO IEEE r1 = 0.8938 ohmios		Rangos de Parametros R2 max = 5.00 ohm R2 min = 0.01 ohm X1 max = 5.00 ohm X1 min = 0.01 ohm Xm max = 50.00 ohm Xm min = 5.00 ohm Rfe max = 300.00 ohm Rfe min = 30.00 ohm																									
Numero de generaciones : 100 Probabilidad de Mutacion : 0.010 Probabilidad de Cruce : 1.000		Función de Error K1 = 0.3333 K2 = 0.3333 K3 = 0.3333 m = 1																									
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Prueba de Carga</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 30%;">Deslizamiento :</td> <td style="width: 30%;">0.0833</td> <td style="width: 10%;">pu</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td>Torque en el eje :</td> <td>24.00</td> <td>Nm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Voltaje de Fase :</td> <td>205.00</td> <td>V</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Corriente de Fase :</td> <td>16.50</td> <td>A</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Potencia Activa 3f :</td> <td>5300.0</td> <td>W</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Prueba de Carga				Deslizamiento :	0.0833	pu		Torque en el eje :	24.00	Nm		Voltaje de Fase :	205.00	V		Corriente de Fase :	16.50	A		Potencia Activa 3f :	5300.0	W	
Prueba de Carga																											
Deslizamiento :	0.0833	pu																									
Torque en el eje :	24.00	Nm																									
Voltaje de Fase :	205.00	V																									
Corriente de Fase :	16.50	A																									
Potencia Activa 3f :	5300.0	W																									
Continuar		Modificar																									
Iniciar el proceso de Evolucion Artificial.		Poblacion																									
		ESC Salir																									

Figura B.2. Pantalla principal del programa de Evolución Artificial, en la cual se indican los datos de ejecución.

El área de datos está dividido en cinco secciones:

- 1) La primera sección, indica el método con el cual se obtuvo la población inicial de parámetros de la máquina de inducción. Una letra I, después de **METODO :**, significa que se ha seleccionado el método recomendado por el IEEE; en cambio, la letra B aparece cuando se ha escogido el método BASICO. Si el método seleccionado es el recomendado por el IEEE, aparece también el valor de la resistencia de estator de la máquina bajo prueba, el

cual debe conocerse de antemano.

- 2) En la segunda sección se incluye: el número máximo de generaciones durante las cuales se va a realizar el proceso de evolución artificial de la población inicial de parámetros de la máquina bajo estudio, y las probabilidades de que la Mutación y el Cruce afecten a los miembros de dicha población. El número de generaciones debe ser un entero, en tanto que las probabilidades de Mutación y Cruce **NO** deben ser ingresadas en forma de porcentajes.
- 3) En la tercera sección se incluyen los valores experimentales de la Prueba de Carga de la máquina de inducción. Los valores de voltaje, corriente, potencia y deslizamiento se utilizan para calcular la impedancia de entrada a la máquina. Estos valores de impedancia de entrada y de torque en el eje de la máquina bajo prueba, se convierten en los valores a obtenerse una vez que se ha encontrado el grupo de parámetros óptimos del circuito equivalente de la máquina.
- 4) En la cuarta sección se definen los rangos de valores entre los cuales pueden variar los diferentes parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción, durante el proceso de evolución de la población.
- 5) La quinta sección, presenta los valores de las constantes características de la **Función de Error**, la cual se emplea en la búsqueda del grupo de parámetros óptimos de la máquina.

En la barra de menú se dispone de las cuatro opciones siguientes:

- 1) **Continuar**, para iniciar el proceso de Evolución Artificial, con las condiciones indicadas en la parte superior de la pantalla.
- 2) **Modificar**, para cambiar los valores de las variables indicadas en la parte superior de la pantalla.
- 3) **Población**, para obtener la población inicial de grupos de parámetros de la máquina de inducción, ya sea empleando el método BASICO ó el recomendado por el IEEE.

4) **Salir**, para terminar la ejecución del programa.

La opción **Salir**, puede seleccionarse con solo presionar la tecla **ESC**. En cambio, las restantes tres opciones se escogen al presionar la tecla **ENTER**, una vez que se ha posicionado sobre cualquiera de ellas con la tecla **TAB**. A continuación se detallan estas opciones.

B.3. OPCION " CONTINUAR ".

Al seleccionar esta opción, aparece una ventana en el centro de la pantalla, como la indicada en la Figura B.3., en la cual se detallan las acciones que ejecuta el programa, durante el proceso de evolución artificial de la población.

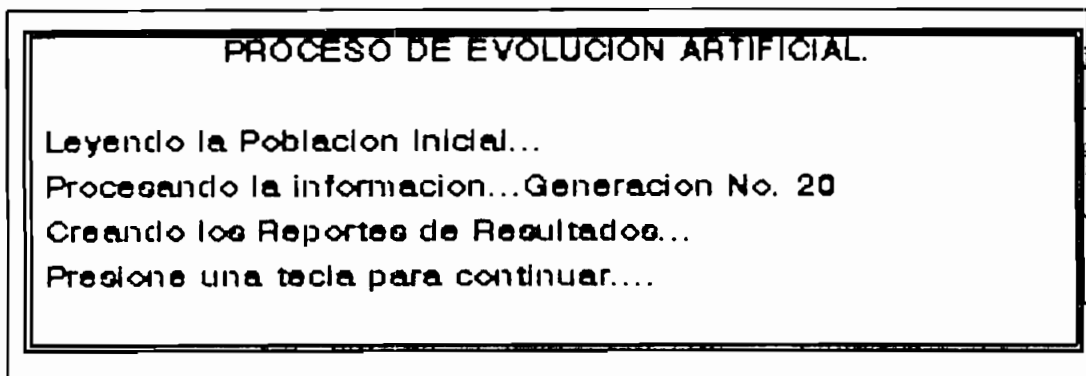


Figura B.3. Ventana en la cual se indica la acción que está realizando el programa.

Los mensajes que aparecen en esta ventana, durante una ejecución normal del programa, son los siguientes:

1) **Leyendo Población Inicial...**, este mensaje indica que el programa está leyendo la población inicial de parámetros de la máquina de inducción. Esta lectura la realiza desde el archivo **M_IEEE.DAT** ó desde **M_BASIC0.DAT**, dependiendo del método seleccionado.

IMPORTANTE : Si durante el proceso de lectura ocurre algún tipo de error, aparece un mensaje indicativo en la línea siguiente, y luego se pide presionar cualquier tecla para terminar la ejecución del programa.

- 2) **Procesando la información...Generación No. #**, este mensaje aparece en el momento en que se procesa la población inicial, leída anteriormente. Adicionalmente se indica el número de generaciones durante las cuales se ha procesado dicha información hasta ese momento.
- 3) **Creando los Reportes de Resultados...**, este mensaje aparece una vez que ha terminado el proceso de evolución artificial de la población de parámetros, y , se crean dos archivos de resultados: **AGREPOR1.PRN** y **AGREPOR2.PRN**.
En el archivo **AGREPOR1.PRN** se almacenan los datos de entrada del programa y los resultados obtenidos. Estos resultados abarcan las condiciones tanto de la población inicial como de la resultante, e incluyen el mejor grupo de parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción en la población inicial, y el grupo de parámetros óptimos resultante.
En el archivo **AGREPOR2.PRN**, se almacenan las características del mejor grupo de parámetros de cada población obtenida durante el proceso de evolución artificial.
Estos archivos se pueden imprimir desde el DOS, de la manera siguiente: **C:\AG>TYPE nombre del archivo > PRN**.
Igualmente, pueden ser importados por cualquier hoja electrónica, por ejemplo **LOTUS 123**.
Un ejemplo de cada uno de estos archivos se incluye al final de este anexo.
IMPORTANTE : Si en el momento de crear estos archivos ocurre algún error, aparece en pantalla un mensaje indicativo y la petición de presionar una tecla para dar por terminada la ejecución del programa. Adicionalmente, es necesario indicar que estos archivos de reporte se graban siempre con el mismo nombre, por lo tanto, cada vez que se realiza el proceso de evolución artificial se pierde la información anterior.
- 4) **Presione una tecla para continuar...**, este mensaje aparece una vez que las acciones anteriores fueron desarrolladas con éxito. Al presionar una tecla, aparece una nueva pantalla, cuyas características se indican a continuación.

IMPORTANTE: El proceso de evolución artificial se realiza hasta que el mejor grupo de parámetros de una población tenga una aptitud mayor que 10000, ó, en su defecto, hasta alcanzar el número máximo de generaciones definidas por el usuario.

RESULTADOS DEL PROCESO DE EVOLUCIÓN ARTIFICIAL		
PARAMETROS	COND. INICIALES	RESULTADOS
Aptitud Mínima	0.0123402	0.00653496
Aptitud Promedio	1.66981	12080.6
Aptitud Máxima	19.1975	16682.5
Suma de Aptitudes	166.981	1208060
Error Mínimo	0.052901	5.9943E-05
R1 [ohmios]	0.8936	0.8936
R2 [ohmios]	0.5832	0.5856
X1 = X2 [ohmios]	0.8514	0.8002
Xm [ohmios]	19.3743	21.7155
Rfe [ohmios]	146.92	75.13
Impedancia Real [ohmios]	6.4624	6.4873
Impedancia Imaginaria [ohmios]	3.4459	3.0573
Torque en el eje [N-m]	23.9309	23.9867
Numero de Mutaciones	0	792
Numero de Cruces	0	1000
Resultados esperados :		Z Real medida [ohmios] = 6.489
Torque medido [N-m] = 24.00		Z Imag medida [ohmios] = 3.057
Imprimir	Graficar	ESC Menu Previo
Imprimir el reporte indicado en pantalla.		

Figura B.4. Pantalla en la cual se indican los resultados del proceso de evolución artificial.

Esta pantalla está dividida en cuatro áreas: una área de resultados, el área en la cual se indican los resultados esperados de impedancia de entrada y torque en el eje de la máquina (calculados a partir de los datos de la prueba de carga), una barra de menú de opciones y una barra indicativa de la acción que realiza cada una de ellas.

El área de resultados está formado por tres columnas:

- 1) La columna **PARAMETROS**, en la cual se indican los nombres de las variables de interés.
- 2) La columna **COND. INICIALES**, en la cual se incluyen los valores que toman estas variables en la población inicial.
- 3) La columna **RESULTADOS**, se presentan los valores de estas mismas variables, pero para la población resultante.

Adicionalmente, esta área de resultados se divide, horizontalmente, en las cuatro secciones siguientes:

- 1) La primera sección abarca a las siguientes variables: aptitud mínima, aptitud promedio, aptitud máxima, suma de aptitudes y error mínimo. Estos valores se obtienen al hacer un análisis estadístico entre todos los miembros de la población correspondiente.
- 2) La segunda sección incluye a los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción, es decir: R_1 , R_2 , $X_1 = X_2$, X_m y R_{fe} . Estos valores corresponden al mejor grupo de parámetros que existe tanto en la población inicial como en la resultante.
Los valores de estos parámetros presentados en la columna **RESULTADOS**, vienen a ser los parámetros óptimos de la máquina de inducción.
- 3) La tercera sección está compuesta por la impedancia de entrada a la máquina y por el torque en el eje. Estos valores se calculan con los valores de los parámetros indicados en la sección anterior.
- 4) La cuarta sección incluye al número de cruces y al número de mutaciones que han tenido lugar durante el proceso de evolución artificial.

En la barra de menú se disponen de tres opciones:

- 1) **Imprimir**, esta opción permite imprimir en papel los resultados obtenidos al término del proceso de evolución artificial.
- 2) **Graficar**, con esta opción se puede observar, gráficamente, la forma en que han evolucionado los

parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción.

- 3) **Menú Previo**, al seleccionar esta opción se regresa a la pantalla inmediata anterior.

La opción **Menú Previo**, puede seleccionarse con solo presionar la tecla ESC. En cambio, las dos opciones restantes se escogen al presionar la tecla ENTER, una vez que se ha posicionado sobre cualquiera de ellas con la tecla TAB. A continuación se detallan estas opciones.

B.3.1. OPCION " IMPRIMIR " .

Al seleccionar esta opción aparece una ventana, como la indicada en la Figura B.5, en la cual se detallan las acciones que lleva a cabo el programa.

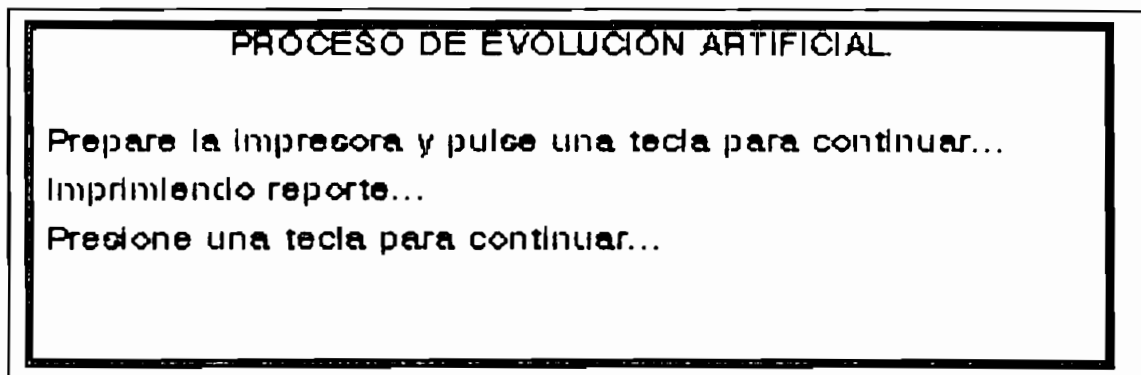


Figura B.5. Ventana en la cual se detallan las acciones que efectúa el programa cuando se selecciona la opción IMPRIMIR.

Antes de imprimir el reporte, el programa pide que se prepare la impresora, y que se presione una tecla para continuar con la impresión. Una vez impreso el reporte, se pide presionar cualquier tecla para dar por terminado este proceso. Hecho esto, desaparece esta ventana y queda activo nuevamente el menú.

El programa se limita a imprimir el contenido del archivo AGREPOR1.PRN, el cual tiene almacenados los datos con los cuales se realizó el proceso de evolución artificial y los resultados obtenidos al final del mismo. Es decir, en este archivo se incluye el área de datos de la pantalla indicada en la Figura B.2 y el área de resultados de la pantalla indicada en la Figura B.4.

IMPORTANTE : El programa no tiene forma de verificar si la impresora está lista para imprimir, por lo tanto, se recomienda encender la impresora, colocar el papel y poner en línea la impresora antes de seleccionar esta opción. El incumplimiento de esta recomendación puede ocasionar el deterioro del contenido de la pantalla, al aparecer mensajes del sistema operativo.

B.3.2. OPCION " GRAFICAR ".

Al seleccionar esta opción, aparece una nueva pantalla en la cual se puede observar, graficamente, la forma en que ha evolucionado cada uno de los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción. Un ejemplo de esta pantalla se indica en la Figura B.6.

Al final de esta pantalla aparece una línea de estado, en la cual se indican dos opciones:

- Al presionar la tecla ESC, se borra esta pantalla, y aparece nuevamente la pantalla indicada en la Figura B.4.
- Si presiona cualquier otra tecla, se presenta una nueva pantalla, como la indicada en la Figura B.7, en la cual se grafica el logaritmo natural de la aptitud máxima de la población en cada generación.

En la línea de estado de esta pantalla, se presentan las mismas dos opciones anteriores, con la diferencia de que al presionar cualquier otra tecla, que no sea ESC, aparece la pantalla indicada en la Figura B.6.

Para poder presentar estos gráficos, el programa cambia la configuración de la pantalla del modo de texto al modo gráfico. Para hacer este cambio, el programa detecta, automáticamente, el tipo de monitor y si éste tiene capacidades gráficas. Luego de lo cual carga en memoria el manejador de pantalla correspondiente al monitor que se está utilizando (por ejemplo, el archivo EGAVGA.BGI para un monitor VGA o EGA), y después inicializa el modo gráfico.

IMPORTANTE : Si el monitor no tiene capacidades gráficas, o no se encuentra el archivo .BGI correspondiente, se presenta una ventana en el centro de la pantalla, en la cual se indica el tipo de error que ha ocurrido. Luego, al presionar cualquier tecla, desaparece esta ventana y se restituye la pantalla anterior. Es decir, únicamente no se puede observar, en forma gráfica, la manera en que han evolucionado los parámetros del circuito equivalente.

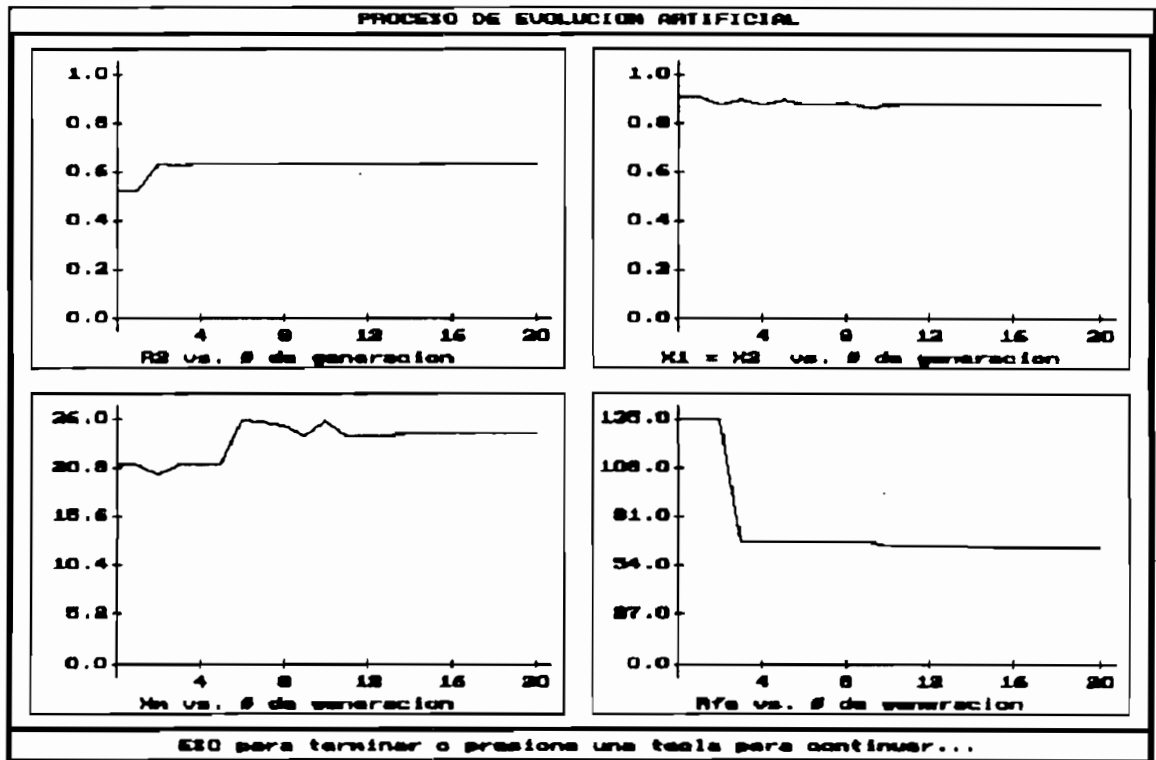


Figura B.6. Ejemplo de la pantalla en la cual se indica, graficamente, la forma en que han evolucionado los parámetros del circuito equivalente.

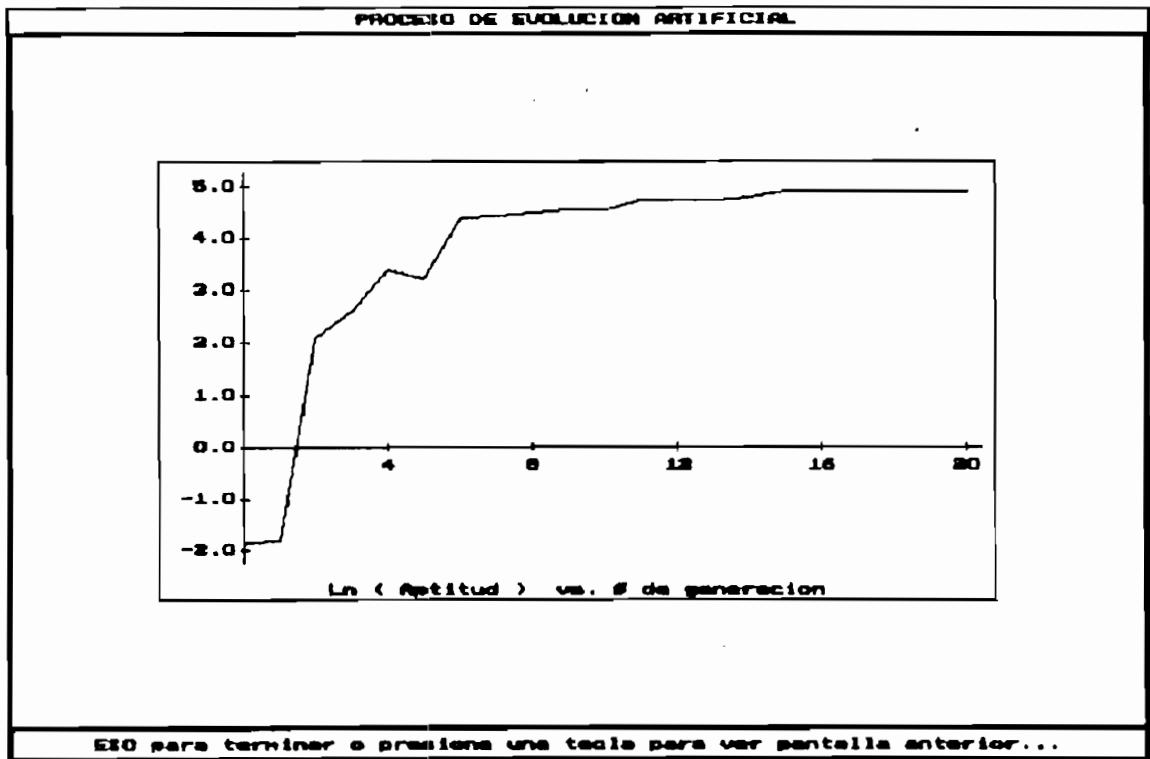


Figura B.7. Pantalla en la cual se grafica el logaritmo natural de la aptitud máxima de la población, durante el proceso de evolución artificial.

B.4. OPCION " MODIFICAR ".

Al seleccionar esta opción, se procede a modificar los datos de entrada al programa, indicados en la pantalla presentada en la Figura B.2. Es importante aclarar el hecho de que si se decide alterar solo uno de estos valores, es necesario ingresar todos los demás, ya que se leen uno a continuación de otro, empezando por la parte superior izquierda del área de datos. Sin embargo, existe la opción de mantener los valores anteriores de las variables que no se deseen modificar, con solo presionar la tecla ENTER, el momento en el que el cursor se posicione en cada una de estas variables.

Se empieza por seleccionar el método con el cual se obtuvo la población inicial de parámetros; para hacerlo se debe presionar **BASICO** ó **IEEE**, no se admiten otras teclas. Si el método seleccionado es el **IEEE**, en la línea siguiente se pide ingresar el valor de la resistencia de rotor de la máquina (r_1). Para este valor y los siguientes, se admiten, únicamente, valores numéricos comprendidos dentro de un cierto rango propio de cada variable.

Si se ingresa un valor fuera de dicho rango, aparece una ventana de error en la parte superior de la pantalla, en la cual se indica el rango permitido y el valor ingresado. Un ejemplo de esta ventana se indica en la Figura B.8. Para aceptar este error se debe presionar cualquier tecla, luego de lo cual desaparece esta ventana y se permite ingresar un nuevo valor para esa variable.

Para aceptar el valor ingresado se debe presionar la tecla **ENTER** al final del número, ó, en su defecto, ingresar un valor numérico que tenga una cantidad de caracteres igual al tamaño del campo de cada variable.

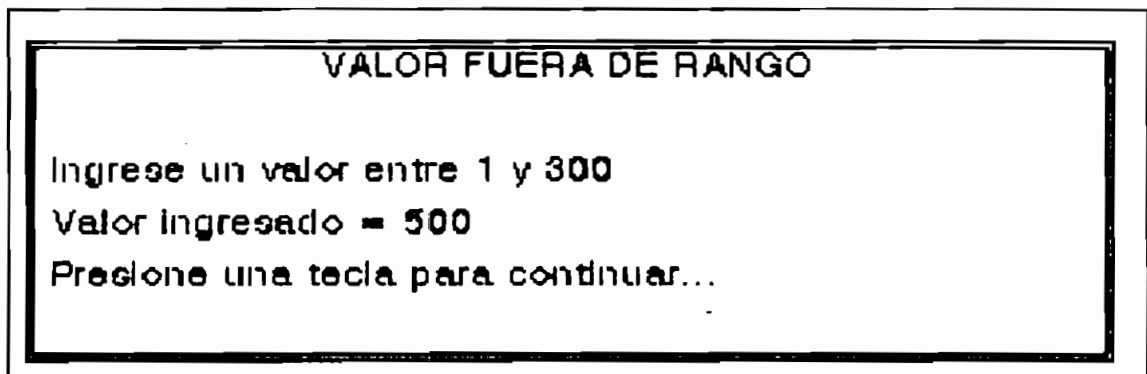


Figura B.8. Ejemplo de una ventana de una ventana indicativa de un error en el ingreso de un valor numérico.

Una vez que se han ingresado los valores de todas las variables, aparece el siguiente mensaje **ACEPTAR (S/N) ?**. Al presionar la tecla **S**, se aceptan los cambios realizados y se activa nuevamente el menú inferior. En cambio, si se presiona

la tecla **N**, se repite nuevamente el proceso de lectura de los valores de todas las variables involucradas.

B.5. OPCION " POBLACION ".

Esta opción permite obtener la población inicial de grupos de parámetros de la máquina de inducción, ya sea empleando la recomendación del IEEE o por el método BASICO.

Al seleccionar esta opción, aparece una nueva pantalla, como la indicada en la Figura B.9. Esta pantalla está dividida en tres áreas: el área de datos, la barra de menú de opciones y una barra en la cual aparecen mensajes indicativos sobre la acción que se ejecuta con cada una de ellas.

OBTENCION DE LA POBLACION INICIAL DE GRUPOS DE PARAMETROS DE LA MAQUINA DE INDUCCION TRIFASICA.		
Datos del Programa		
METODO : 1 BASICO IEEE # de Grupos de Pruebas : 100 R1 = 0.8936 ohmios ARCHIVO DE ENTRADA : M_IEEDAT.DAT ARCHIVO DE SALIDA : M_IEEE.DAT		
Calcular	Modificar	ESC Menu Previo
Evaluar la poblacion inicial de parametros.		

Figura B.9. Pantalla que aparece al seleccionar la opción POBLACION.

En el área de datos del programa, se selecciona el método con el cual se desea obtener la población inicial, el número

de grupos de pruebas de laboratorio realizadas, el archivo en el cual se han guardado esos datos y el nombre del archivo de resultados.

En la barra de menú se dispone de tres opciones:

- 1) **Calcular**, que permite obtener la población inicial con los datos indicados en pantalla.
- 2) **Modificar**, empleada para modificar los datos del programa.
- 3) **Menú Previo**, con esta opción se regresa a la pantalla inmediata anterior.

La opción **Menú Previo**, puede seleccionarse con solo presionar la tecla ESC. En cambio, las dos opciones restantes se escogen al presionar la tecla ENTER, una vez que se ha posicionado sobre cualquiera de ellas con la tecla TAB. A continuación se detallan estas opciones.

B.5.1. OPCION " CALCULAR ".

Como ya se dijo anteriormente, esta opción se utiliza para obtener la población inicial de grupos de parámetros de la máquina de inducción, con los datos indicados en pantalla. Inmediatamente después de seleccionar esta opción, aparece una ventana en el centro de la pantalla.

En esta ventana el programa presenta mensajes que informan al usuario la acción que se realiza en ese momento. Un ejemplo de esta ventana se presenta en la Figura B.10.

Para obtener esta población inicial, el programa primero lee los datos almacenados en el archivo de entrada, luego calcula los grupos de parámetros miembros de la población inicial (de acuerdo al método especificado), posteriormente, almacena esta población en el archivo de salida para su uso futuro, y finalmente, pide se presione una tecla para eliminar

esa ventana y activar nuevamente el menú.

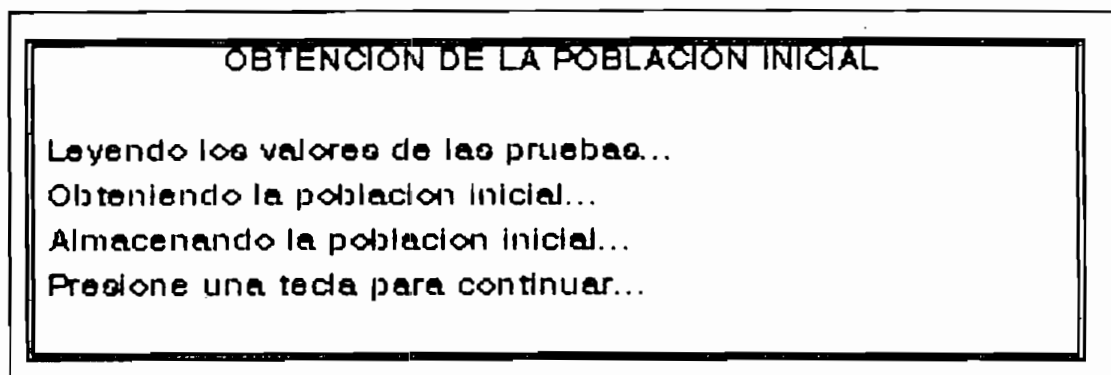


Figura B.10. Ejemplo de una ventana en la cual se informa la acción que se realiza.

IMPORTANTE : Si ocurriese algún tipo de error, durante la apertura de los archivos de entrada y/o de salida, el programa imprime en pantalla un mensaje indicando el tipo de error. Para aceptar este mensaje se presiona cualquier tecla, con lo cual se da por terminada la ejecución del programa.

B.5.2. OPCION " MODIFICAR ".

Al seleccionar esta opción, se procede a modificar los datos indicados en pantalla. Es importante aclarar el hecho de que si se decide alterar solo uno de estos valores, es necesario ingresar todos los demás, ya que se leen uno a continuación de otro, empezando por la parte superior. Sin embargo, existe la opción de mantener los valores anteriores de las variables que no se deseen modificar, con solo presionar la tecla ENTER, el momento en el que el cursor se posiciona en cada una de estas variables. Para aceptar el dato ingresado se debe presionar la tecla ENTER al final del mismo, ó, en su defecto, ingresar un dato que tenga una cantidad de caracteres igual al tamaño del campo de cada variable.

Se empieza por seleccionar el método con el cual se desea obtener la población inicial de parámetros; para hacerlo se debe presionar BASICO ó IEEE, no se admiten otras teclas. Luego, se debe ingresar el número de grupos de pruebas de laboratorio que se efectuaron para obtener la población inicial, según los requerimientos del método seleccionado. Es necesario aclarar que, este valor representa el tamaño de la población que se obtiene como resultado de este proceso. Adicionalmente, se recomienda que sea un número par, debido principalmente a requerimientos del proceso de cruce durante la evolución artificial de esta población.

Si el método seleccionado es el IEEE, en la línea siguiente se pide ingresar el valor de la resistencia de rotor de la máquina (r_1). Este valor debe conocerse de antemano.

A continuación se pide ingresar el nombre del archivo en el cual se han almacenado los datos de las pruebas de laboratorio que requiere el método seleccionado. Este archivo puede tomar cualquier nombre, sin embargo, por defecto, se lo ha nombrado como: M_IEEDAT.DAT en el caso del método recomendado por el IEEE; y, M_BASDAT.DAT, para el método BASICO.

En el caso del método BASICO, un grupo de pruebas está compuesto de la siguiente manera:

- Datos de la prueba de vacío a voltaje nominal, en el orden siguiente: voltaje, corriente y potencia.
- Datos de la prueba de rotor bolqueado, en el orden siguiente: voltaje, corriente y potencia.

En el caso del método IEEE, un grupo de pruebas está formado por las pruebas que requiere el método BASICO, más lo siguiente:

- Datos de la prueba de vacío a deslizamiento de plena carga, en el orden siguiente: voltaje, corriente, potencia y velocidad del rotor.

Todos estos datos deben ser ingresados en el archivo respectivo, uno a continuación de otro, en el orden indicado, hasta completar el total de grupos de pruebas de laboratorio realizadas.

Una vez ingresado el nombre del archivo de entrada, inmediatamente aparece el nombre del archivo de salida. Este nombre no puede ser modificado por el usuario. Su nombre depende del método seleccionado, así se tiene que para el método BASICO se lo ha llamado M_BASICO.DAT; en cambio, para el método recomendado por el IEEE, se lo ha denominado como M_IEEE.DAT.

Finalmente, una vez concluido todo este proceso de modificación, se devuelve el control del programa a la barra de menú de opciones.

B.6. EJEMPLO DE UN ARCHIVO " AGREPOR1.PRN ".

pag. 1 de 2

PROCESO DE EVOLUCION ARTIFICIAL REPORTE DE RESULTADOS

ELABORACION : Wed Feb 02 19:02:22 1994

----- CONDICIONES DE EJECUCION -----

METODO UTILIZADO : BASICO

NUMERO DE GENERACIONES : 20
 PROBABILIDAD DE CRUCE : 1.000
 PROBABILIDAD DE MUTACION : 0.010

PRUEBA DE CARGA

 DESLIZAMIENTO = 0.0833 (pu)
 TORQUE EN EL EJE = 24.00 (Nm)
 VOLTAJE DE FASE = 205.00 (V)
 CORRIENTE DE FASE = 16.50 (A)
 POTENCIA ACTIVA 3f = 5300.0 (W)

CARACTERISTICAS DE COMPARACION

IMPEDANCIA REAL = 6.4891 (ohmios)
 IMPEDANCIA IMAG = 3.0570 (ohmios)
 TORQUE EN EL EJE = 24.0000 (Nm)

RANGO PERMITIDO DE VARIACION DE LOS PARAMETROS

R2 max = 5.00 (ohmios)
 R2 min = 0.01 (ohmios)
 X1 max = 5.00 (ohmios)
 X1 min = 0.01 (ohmios)
 Xm max = 50.00 (ohmios)
 Xm min = 5.00 (ohmios)
 Rfe max = 300.00 (ohmios)
 Rfe min = 30.00 (ohmios)

CONSTANTES CARACTERISTICAS DE LA FUNCION DE ERROR

K1 = 0.3333
 K2 = 0.3333
 K3 = 0.3333
 Exponente = 1

pag. 2 de 2

----- RESULTADOS -----

PARAMETRO	COND. INICIAL	RESULTANTE
APTITUD MINIMA =	0.0320899	0.00569983
APTITUD PROMEDIO =	0.0557593	84.2513
APTITUD MAXIMA =	0.153071	132.444
SUMA DE APTITUDES =	5.57593	8425.13
ERROR MINIMO =	6.53291	0.00755037
R1 (ohmios) =	0.5208	0.6295
R2 (ohmios) =	0.5208	0.6295
X1=X2 (ohmios) =	0.9076	0.8734
Xm (ohmios) =	21.0768	24.4428
Rfe (ohmios) =	134.4444	63.7830
IMPEDANCIA REAL (ohmios) =	5.6727	6.5922
IMPEDANCIA IMAG (ohmios) =	3.1113	3.1565
TORQUE EN EL EJE (Nm) =	28.35	24.05
NUMERO DE MUTACIONES =	0	735
NUMERO DE CRUCES =	0	1000

FIN DEL REPORTE.