

# Estudio de los Algoritmos Genéticos para el desarrollo de sistemas de control

Patricia Gómez Otero\*

---

## Resumen

*En este artículo se describen las principales aplicaciones de los Algoritmos Genéticos: la optimización de funciones, identificación de sistemas lineales y no lineales y el diseño de sistemas de control. Para evaluar las aplicaciones mencionadas se desarrollaron herramientas en Matlab y se compararon los resultados obtenidos con Algoritmos Genéticos con respecto a los obtenidos con otras herramientas. Estos experimentos demostraron que, en general, el tiempo de ejecución de los Algoritmos Genéticos es más lento que el de otras herramientas. En casos como la identificación no lineal y el diseño de sistemas de control es una herramienta muy útil que produce los resultados deseados en corto tiempo y por medio de una fácil implementación.*

**Palabras claves:** Algoritmo genético, optimización, identificación de sistemas, diseño de sistemas de control.

## Abstract

*This Document tries to describe the main applications of the Genetic Algorithms such as function optimization, identification of lineal and non-lineal systems, and control system design. To evaluate these applications, tools in Matlab were developed and the results obtained with Genetic Algorithms were compared with those obtained by using other kind of tools. This research has shown that the execution time of Genetic Algorithms is slower than that of other tools, but in the design of control systems, the Genetic Algorithms are a powerful tool that produces the desired results in short time and through an easier implementation.*

**Key words:** Genetic algorithm, optimization, identification systems, control system design.

Fecha de recepción: 10 de octubre del 2000

## 1. Introducción

En el siglo XIX el naturalista británico Charles Darwin introdujo lo que se conoce como la «Teoría de la Evolución»; en ella afirmaba que las especies naturales van evolucionando para adaptarse al medio que las rodea, con el criterio

---

\* Ingeniera Electricista egresada de la Universidad del Norte de Barranquilla (Colombia). Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes. Ingeniera del Departamento de Análisis y Gestión de Equipos de «Transelca S.A.» y docente catedrática del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Norte. (e-mail: pgomez@transelca.com.co)

de que aquellos individuos que mejor se adapten al entorno tendrán mayor probabilidad de sobrevivir hasta la edad adulta y procrear, con lo cual garantizan que sus genes pasen de generación en generación.

Tal como se puede apreciar, este proceso tiene una fuerte componente estocástica. Dicho de otro modo, si un individuo se adapta al entorno, lo más que podemos afirmar es que tendrá mayor probabilidad de conservar sus genes en la siguiente generación que los otros individuos, lo cual no pasa de ser una probabilidad, no es un hecho seguro. Siempre cabe la posibilidad de que a pesar de estar muy dotado, por alguna razón no consiga procrear. Lo que sí podemos afirmar es que la especie, como conjunto, se irá adaptando al medio.

Todo esto nos puede llevar a pensar que tal como la naturaleza es capaz de ir optimizando las características de un individuo, perfeccionando sus genes para adaptarse mejor al entorno, de igual manera podemos crear una población digital que se optimice para adaptarse mejor a una función objetivo que planteemos. Esta es la razón de ser de los Algoritmos Genéticos, y para llevar a cabo esta adaptación utiliza mecanismos similares a los utilizados por la naturaleza en la Teoría de la Evolución: selección, cruce, mutación.

A continuación se expondrá la teoría fundamental de los Algoritmos Genéticos y se buscará un método por medio del cual se pueda aplicar esta

importante teoría de optimización en el desarrollo de sistemas de control. Se abordará primero el tema de los Algoritmos Genéticos como herramienta de optimización, posteriormente se expondrá la utilidad que tienen en la identificación de sistemas lineales y no lineales, y por último se determinará cómo pueden ser útiles en el control de sistemas.

## 2. Conceptos básicos de los *Algoritmos Genéticos*

Los Algoritmos Genéticos son métodos de búsqueda basados en los mecanismos de selección natural (Teoría de la Evolución de Darwin). El principio sobre el cual se desarrollan los Algoritmos Genéticos es tomar, dentro de una población de individuos dada, los individuos que, según unos parámetros y condiciones preestablecidas, tengan una mayor «aptitud» para sobrevivir dentro de esa población, y así crear una nueva «generación mejorada» de individuos.

Los pasos que se deben seguir para la elaboración de un algoritmo genético son los siguientes:

- a. **Definición de la función objetivo.** De acuerdo con el problema que se desea desarrollar, se debe definir la forma matemática de la función que debemos mejorar (ya sea maximizar o minimizar), la cual se denomina «función objetivo», y es el mecanismo de evaluación de las cadenas (generaciones). La función de ajuste se usa para normalizar la función



objetivo en un rango entre 0 y 1, y este último valor es el utilizado para evaluar las cadenas de la población.

b. **Definición del tamaño de la población.** Usualmente, la población varía entre 20 y 300 individuos. Se debe escoger la población de manera que sea manejable para el desarrollo y solución del problema. El tamaño de la población no variará durante el desarrollo del algoritmo genético, ya que se volvería inmanejable el proceso de búsqueda.

c. **Definición de la codificación de las posibles soluciones.** Se necesita desarrollar un mecanismo de codificación para representar las variables del problema de optimización, y depende de la naturaleza de dichas variables. Para el proceso de codificación se debe utilizar el alfabeto más pequeño posible para representar los parámetros, por lo cual, generalmente, se utilizan los números binarios como codificación de las variables y posibles soluciones; cuando se trabaja con funciones localmente monótonas con respecto a algunas de sus variables, el código Gray ha demostrado ser un mejor método de codificación para explorar la monotonía de las variables.

d. **Definición del mecanismo de selección.** Con el mecanismo de selección se busca escoger el o los individuos mejor adaptados de la población, los cuales «sobrevivirán», mientras que los peor adaptados desaparecerán.

Su meta es dar más oportunidades de selección a los miembros más aptos de la población. Existen varios mecanismos de selección, entre los cuales se cuentan: la «ruleta proporcional» (se toman los individuos de la población inicial y, según la evaluación de la función de ajuste, se les da mayor «peso» a los mejor adaptados); «selección estocástica del restante» (se toman los valores arrojados de la función de ajuste por cada uno de los individuos y se redondean los valores hasta obtener los individuos de la población); «selección del gestor» (la selección se deja a criterio de la persona que está desarrollando el algoritmo genético), y «selección por comparación o torneo» (se baraja la población y se hace «competir» a los individuos, es decir, se sacan dos elementos cualesquiera de la población y se comparan; el mejor individuo pasa a ser candidato a padre, mientras que el otro sale).

e. **Escogencia de los parámetros de control.** Existen dos parámetros de control que se deben definir antes de iniciar el desarrollo del algoritmo genético: Tasa de cruce y tasa de mutación.

- **Tasa de cruce.** Indica el porcentaje de la población que se va a cruzar. Los valores típicos de la tasa de cruce varían entre 0.5 y 1<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> COELLO COELLO, Carlos. *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. Universidad de Tulane, Nueva Orleans (E.U.), 1996.

- *Tasa de mutación.* La mutación se encarga de modificar en forma aleatoria uno o más genes del cromosoma de un descendiente. De esta manera, la tasa de mutación indica el porcentaje de «bits» que se deben mutar (cambiar de 0 a 1 o viceversa en el caso binario). Los valores típicos de la tasa de mutación varían entre 0.001 y 0.05.

- f. **Definición de la tasa de convergencia.** Se debe definir en qué momento debemos detener la búsqueda. Debe tenerse en cuenta que un algoritmo genético busca una solución cercana al óptimo, por lo cual se debe definir el «sesgo» que tiene la población, es decir, la medida de homogeneidad o concordancia en la población; usualmente el sesgo toma valores entre 50 y 100%.

El procedimiento de desarrollo de los Algoritmos Genéticos se presenta en la figura 1.

### 3. Los Algoritmos Genéticos como Herramienta de Optimización

Para evaluar los Algoritmos Genéticos en la optimización de funciones, se desarrolló un programa en Matlab, que se basa en una subrutina denominada «alggen.m», en el cual está el algoritmo básico con el que se trabaja y cuya estructura se muestra en la figura 2. El programa principal se denomina «optigene.m», y sirve como «interface» entre el usuario y el algoritmo genético, ya que en este programa se pide la información básica para que el algoritmo pueda encontrar el óptimo de la función. El usuario introduce la función que se va a optimizar en un archivo aparte, el cual será llamado por la subrutina «alggen»; luego se hace el llamado del programa «optigene», en el cual el usuario introduce los valores máximos y mínimos que pueden tomar las variables que intervienen en la función objetivo, y los valores de las tasas de cruce, mutación y el tamaño de la población. En caso de



Figura 1. Desarrollo del Algoritmo Genético

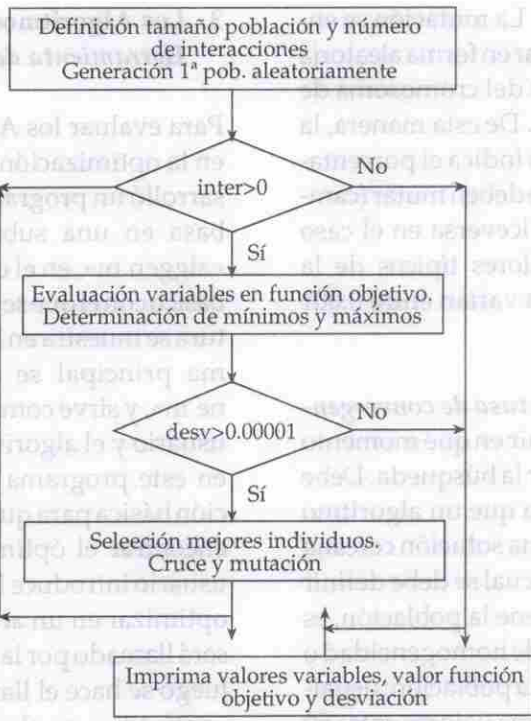


Figura 2. Estructura de la *subrutina algen*

qué el usuario no sepa qué valores tomar para los tres últimos datos, el programa asumirá los valores de 1, 0.05 y 30, respectivamente.

Al correr el programa para diferentes funciones objetivo, el algoritmo arroja valores muy cercanos al óptimo, y en algunos casos iguales. Esta característica de los resultados obtenidos se debe a la naturaleza del algoritmo genético, cuyo procedimiento de búsqueda no garantiza encontrar el óptimo exacto. Además, el usuario debe correr el programa varias veces, con el fin de encontrar el mejor resultado, debido a la naturaleza aleatoria del algoritmo.

#### 4. Los Algoritmos Genéticos en la Identificación de Sistemas de Control

Al igual que en el caso de optimización de funciones, el programa de identificación, denominado «idegen.m», se basa en el programa «algen.m» desarrollado sobre Matlab.

Como en el caso de la optimización de funciones, el usuario debe digitar en un programa aparte la función de transferencia que supone pertenece al sistema que va a identificar. Este archivo es llamado desde la subrutina «algen» para la evaluación de los coeficientes



identificados por el algoritmo. De igual manera, el usuario debe introducir los valores máximos y mínimos de los coeficientes, las tasas de cruce y mutación y el tamaño de la población. Como dato adicional, el usuario debe introducir la matriz que contiene las entradas y la salida del sistema, dada en la siguiente forma:

$$Z=[y \ u1 \ u2 \ \dots \ um]$$

donde  $y$  es la salida del sistema y  $u1, u2 \dots um$  son las entradas.

Como ejemplo se presenta un sistema lineal (figura 3) que se utilizó en la evaluación del Algoritmo Genético como herramienta de identificación de sistemas lineales. Los resultados obtenidos utilizando los Algoritmos Genéticos y comparando estos últimos con el ARX como herramienta de identificación fueron los siguientes:

Identificación utilizando	
<b>ARX</b>	<b>Algoritmo Genético</b>
Sistema: $\frac{1.2048}{z+0.4557}$	Sistema: $\frac{1.0587}{z+0.4780}$
Error coeficientes	Error coeficientes
0.0439	0.0039

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede determinar que el método de identificación con Algoritmos Genéticos arroja resultados importantes, con el inconveniente para el usuario de que tiene que hacer varias iteraciones para estar seguro de agotar todas las posibilidades y haber encontrado los valores más cercanos al óptimo, ya que así como puede encontrar la solución en la primera iteración, dependiendo de qué tan bien escogido ha sido el intervalo de iteración, puede demorar varias corridas del programa. Para poder saber qué tan cerca del óptimo se encuentra, el algoritmo arroja el error que existe entre la salida real del sistema y la del sistema identificado.

Para evaluar los Algoritmos Genéticos en la identificación de sistemas no lineales, se utilizó como proceso el helicóptero a escala HUMUSOFT adquirido por la Universidad de los Andes. Se empleó el procedimiento de identificación sugerido por el fabricante pero con los Algoritmos Genéticos como herramienta de identificación. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

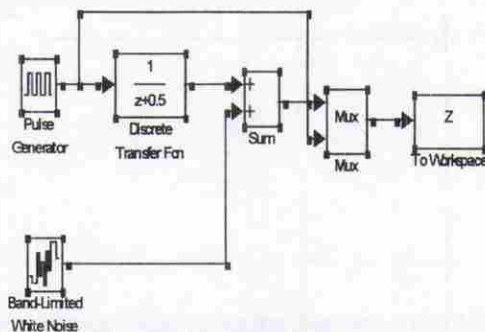


Figura 3. Ejemplo en la identificación de sistemas lineales

a	b	Error
0.9365	0.0466	0.0880
0.9746	0.0473	0.0878
1.0301	0.0162	0.0869
1.0522	0.0012	0.0868
1.1051	0.0024	0.0867
1.0939	0.0014	0.0866
1.0923	0.0011	0.0866
1.0928	0.0012	0.0866
1.06	0.0093	0.0867

Dados los resultados obtenidos, se puede observar que los menores valores de error corresponden a un valor de  $a$   $\text{CE}$  (1.06, 1.0928)  $\text{N.m/MU}^2$  y un valor de  $b$   $\text{CE}$  (0.0011, 0.0093)  $\text{N.m/MU}$ . Estos valores corresponden a los coeficientes del modelo discreto del helicóptero trabajado.

De acuerdo con el manual que proporciona HUMUSOFT, fabricante del modelo trabajado, los valores característicos para los coeficientes identificados son de  $a$  y  $b$  1.05  $\text{N.m/MU}^2$  y 0.00936

$\text{N.m/MU}$ , respectivamente, lo cual confirma que el resultado obtenido utilizando Algoritmos Genéticos para las variables mencionadas es el correcto.

### 5. Los Algoritmos Genéticos en el Control de Sistemas no Lineales

Para determinar las ventajas o desventajas de los Algoritmos Genéticos aplicados al control de sistemas, se procedió a utilizar como proceso el sistema no lineal dado por el helicóptero a escala que posee la Universidad. Como punto de referencia se aplicó el control óptimo a este sistema, para después realizar la comparación entre este tipo de control y el dado por los Algoritmos Genéticos.

Se determinó que la salida deseada era de 1 rad en elevación y 0 rad en azimut. Las respuestas obtenidas se muestran en las figuras 4 y 5.

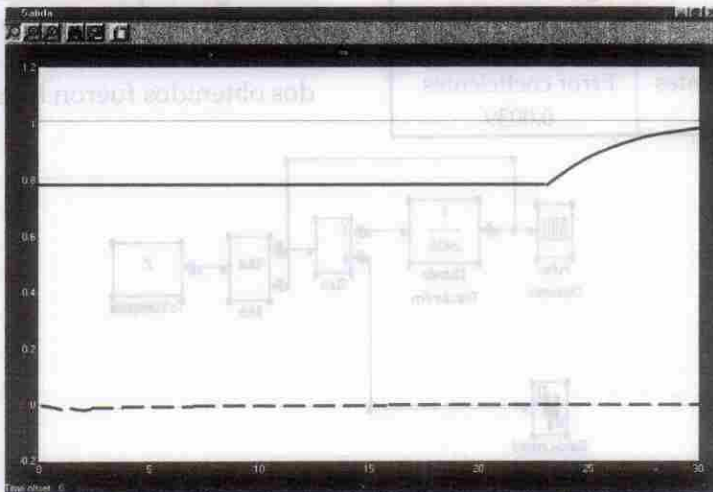
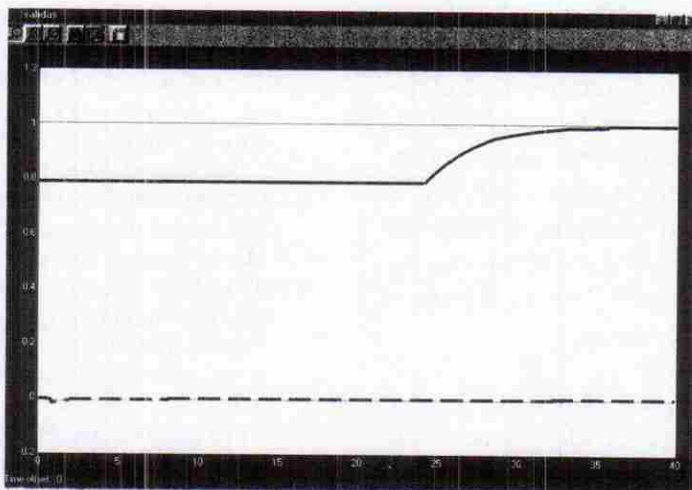


Figura 4. Salidas obtenidas utilizando control óptimo



**Figura 5.** Salidas obtenidas utilizando *Algoritmos Genéticos*

Como se puede observar, la respuesta obtenida con los Algoritmos Genéticos (figura 5) es un poco más rápida que la obtenida con el control óptimo (figura 4), bajo las mismas condiciones, con lo cual podemos establecer una característica importante de los Algoritmos Genéticos: una vez se tiene el programa base, que en este caso es «alggen.m», la utilización de los Algoritmos Genéticos es de fácil implementación en el diseño de sistemas de control de sistemas. Para el caso del helicóptero se montó la matriz de realimentación y el integrador para obtener error cero, y se corrió el programa. En este caso, la evaluación de las variables necesarias para montar la matriz de realimentación se realizó simulando en cada iteración el modelo del helicóptero y tomando como datos para el programa las entradas y las salidas del helicóptero.

## CONCLUSIONES

Dadas las aplicaciones desarrolladas para evaluar las características de los Algoritmos Genéticos, se puede establecer que esta herramienta es muy útil en los campos de optimización e identificación de funciones y sistemas; sin embargo, donde podemos encontrar un campo de aplicación muy amplio es en el control de sistemas, especialmente en los sistemas no lineales, donde los procesos utilizados son, en algunos casos, engorrosos, matemáticamente hablando y, por consiguiente, procesos largos y tediosos. Se ha comprobado que a pesar de que el tiempo de ejecución de un Algoritmo Genético es relativamente lento, se pueden lograr mejores resultados aplicándolos en la Identificación de Sistemas y en Control de Procesos.



Otro punto que debe tenerse en cuenta es que en este trabajo se ha implementado un programa que trabaja con números reales, solventando el hecho de que los Algoritmos Genéticos como tales trabajan con números enteros, lo cual es una gran ventaja en el momento de implementar el algoritmo como herramienta de identificación o para el control de procesos.

Los Algoritmos Genéticos pueden ser utilizados en la identificación de sistemas en los cuales hay presente ruido, lo cual da incluso mejores resultados que otros métodos de identificación.

Se debe tener en cuenta que los Algoritmos Genéticos son muy sensibles al intervalo que se escoja para la búsqueda de la solución óptima. Mientras más grande sea el intervalo, más grande será el error generado por el algoritmo.

Por ser un proceso completamente estocástico, se deben realizar varias pruebas utilizando el algoritmo hasta encontrar el óptimo. Así como se puede encontrar la solución en la primera iteración, ésta también puede demorar en obtenerse varias iteraciones. Efectivamente, esto depende del intervalo escogido para encontrar el óptimo.

## Bibliografía

- ZALZALA, A.M.S. and FLEMING, P.J. «Genetic Algorithms : Principles and Applications in Engineering Systems». In: *Neural Network World* 5/96 803-820.
- GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Massachusetts : Addison-Wesley, 1989.
- CHIPPERFIELD, Andrew and FLEMING, Peter. «Evolutionary Algorithms for Control Engineering». In: *13<sup>th</sup> Triennial World Congress*. San Francisco (Estados Unidos), 1996, p. 181-186.
- FLEMING, Peter J. And FONSECA, Carlos M. «An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization». In: *Evolutionary Computation*, Vol. 3, Number 1. Massachusetts, Institute of Technology, 1995, p. 1-16.
- DUQUE, Mauricio. «Identificación de Sistemas». Compendio de clases dictadas en la asignatura Control Discreto. Universidad de los Andes, 1998, p. 17-23.