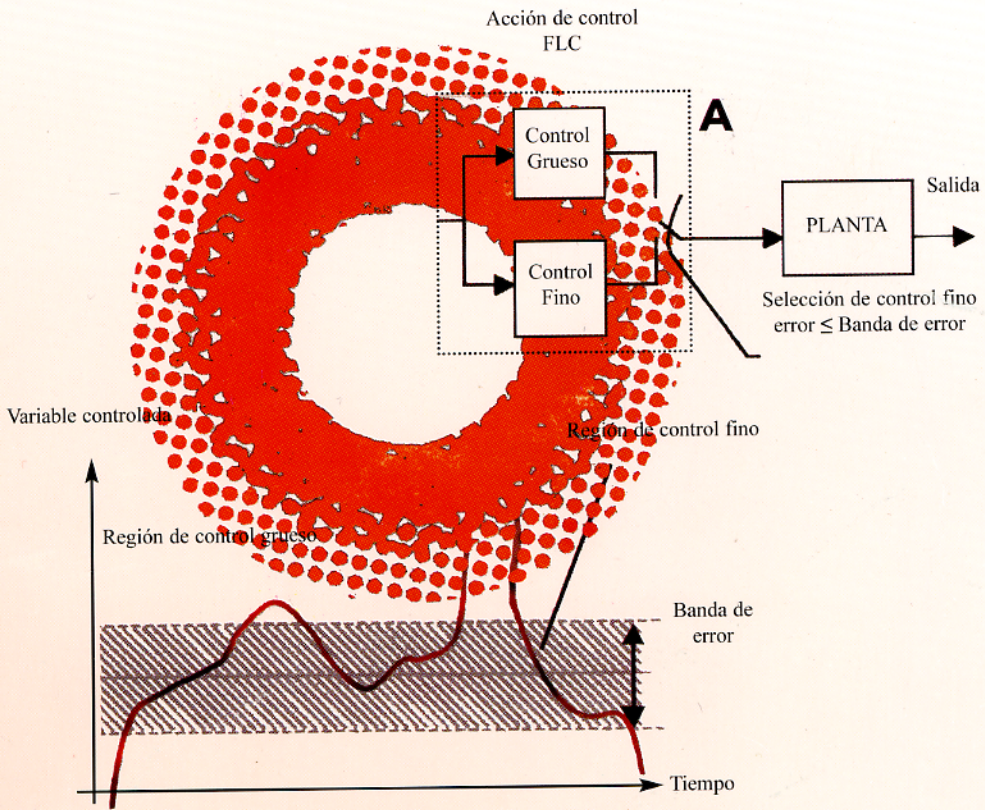


# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
Enero/Diciembre 1999 VOLUMEN 9 Nos. 1 y 2



# INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica  
Volumen 9, Enero/Diciembre 1999 Números 1 y 2

## DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

## CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

## CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica  
Apartado Postal 75  
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

## CANJES

Universidad de Costa Rica  
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información  
Unidad de Selección y Aquisiciones-CANJE  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

### Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 30,00

### Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 20,00



# AJUSTE DE CONTROLADORES DIFUSOS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Ismael Mazón G.<sup>1</sup>  
José A. Ramírez H.<sup>2</sup>

## Resumen

En este artículo se presenta una propuesta para el ajuste de controladores difusos (FLC) mediante algoritmos genéticos (AG). Además la codificación binaria de una estructura de un FLC para su sintonización mediante AG, y se incluyen criterios óptimos de control para realizar el ajuste. Las pruebas sobre un servomotor y un péndulo invertido demuestran un rendimiento satisfactorio del esquema de control planteado.

*Palabras claves*—control difuso, algoritmos genéticos, optimización adaptabilidad.

## Summary

This paper propose a method for tuning a Fuzzy Logic Controller (FLC) with Genetic Algorithms (GA). It present a binary codification for the controller structure for use in a GA and include optimal criteria for the FLC tuning. Tests in servomotor and inverted pendulum systems showed a satisfactory performance in the proposed frame work.

*Keywords*—fuzzy control, genetic algorithms, optimization, adaptability.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los controladores difusos o FLCs (*Fuzzy Logic Controllers*) se caracterizan generalmente por su independencia de los modelos matemáticos, de los sistemas o procesos a controlar. Su funcionamiento hace una emulación del comportamiento de un experto que controla el proceso.

La lógica difusa o *Fuzzy Logic* [1] fue presentada de manera formal por Lotfi Zadeh en la década de los sesentas, pero no es sino hasta los ochentas y noventas donde las aplicaciones de este tipo de lógica se empiezan a popularizar.

El principal problema en el diseño de un controlador difuso se presenta en la sintonización del mismo, en donde la información derivada del experto es casi imprescindible para el ajuste del control. Esto debido a que el FLC posee un conocimiento fundamentado en reglas y en la disposición de

los llamados conjuntos de entrada y salida difusa (parte medular del controlador).

Las metodologías convencionales para la sintonización de un FLC se fundamentan en la adquisición de información del experto y posteriores etapas de prueba y error para lograr un rendimiento aceptable.

Por su parte, los Algoritmos Genéticos (AG) [2] están inspirados en la mecánica de la evolución y genética de los seres vivos. Este tipo de algoritmos fue desarrollado por John Holland, sus alumnos y colegas, en la Universidad de Michigan durante la década de los sesentas y setentas.

El principal aporte de los AGs se encuentra en el área de la optimización partiendo de una función objetivo que se desca minimizar o maximizar. Se han comparado métodos convencionales de optimización contra los AGs y se han obtenido mejores desempeños y

<sup>1</sup> Ing., Prof., Esc. Ing. Mecánica, Depto. de Automática, Fac. Ing., Univ. de Costa Rica

<sup>2</sup> Ing., Prof., Esc. Ing. Mecánica, Depto. de Automática, Fac. Ing., Univ. de Costa Rica

menores tiempos de convergencia para los AG [3].

En un AG se parte de una "población" de individuos, cuyas características son esenciales en el funcionamiento del sistema y cuyo desempeño debe optimizarse. La población es un subconjunto de un espacio de búsqueda fijo o finito. Los individuos de la población consisten en la información codificada (p.e. binaria) de parámetros fundamentales del sistema. Estos son procesados aplicándoles operadores genéticos: reproducción, cruce, mutación, dominancia, etc. Este procesamiento produce nuevas generaciones que pueden o no llevar información "genética" de sus progenitores. La idea es obtener nuevas generaciones que sean cada vez mejores, es decir, que produzcan el mejor desempeño del sistema y que se eliminen por la misma mecánica evolutiva, aquellos individuos que sean débiles, lo que significa que producen un bajo rendimiento del sistema.

La combinación de estas dos herramientas (FLC y AG) es reciente y su interés va en aumento. Esto, debido a las características de los FLC, y a su desempeño frente a otras estrategias de control convencionales en ciertos problemas, además de los AGs los buenos resultados obtenidos en problemas de optimización en donde la relación entre las variables es compleja. Otro atractivo que se desprende de ambos es su independencia de complejos modelos matemáticos para su desarrollo. Los principales aportes se dirigen hacia el ajuste de las funciones de pertenencia del conjunto de salida del controlador [4], [5], [6], es decir, se realiza la optimización de una parte del controlador, y los criterios utilizados no derivan en aspectos de optimización de la respuesta global del controlador (p.e. energía invertida en la acción de control), se centra más en la minimización de errores. También, no toma en cuenta aspectos como la posibilidad de adaptación del sistema de control.

De esta manera el objetivo de este artículo es presentar una propuesta para la sintonización

de FLC mediante AGs, optimizando para ello las partes fundamentales de la estructura del FLC: sus conjuntos de salida y el conjunto de reglas difusas de decisión (generación de reglas).

Una justificación muy importante de la propuesta, es la gran cantidad de problemas de control que pueden ser retomados con un algoritmo de control robusto como lo es el control del difuso ajustado bajo criterios de calidad óptimos (aspecto que ha sido poco desarrollado hasta ahora). Especialmente aquellos problemas que involucran sistemas altamente no lineales donde las técnicas convencionales tienen poco éxito o son difíciles de implementar.

La estructura de este artículo es como sigue: La sección 2 presenta todos los aspectos relacionados a la codificación del controlador difuso para su ajuste con el AG. Luego, la sección 3 estudia la selección de la función objetivo para la optimización del controlador, con lo cual se establece la estructura del sistema de control. Posteriormente en la sección 4 se presentan resultados de laboratorio y de simulación realizadas sobre un servomotor y un péndulo invertido. Finalmente, las conclusiones.

## 2. CODIFICACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO PARA SU AJUSTE CON ALGORITMOS GENÉTICOS

Dadas las características de la estructura de un control difuso, se hace necesario obtener una adecuada codificación de esa estructura para llevarla a un contexto en el cual el AG pueda explotar y hallar aquellos controles que brinden el mejor rendimiento de acuerdo a la función de costo establecida. De esta forma es necesario establecer claramente la conformación del conjunto difuso de entrada, grupo de reglas de la base de conocimiento y el conjunto de salida del FLC.

En este caso se partirá de una conformación de conjuntos de entrada fijos. Esto, realizando una suposición válida, en el sentido de que el

diseñador conoce cual es el ámbito de variación de las entradas del FLC. Se procede entonces a realizar una codificación del conjunto de reglas de la base de conocimiento y de los conjuntos de salida. Se utiliza un alfabeto binario (símbolos: 1, 0) para la codificación de la estructura del controlador. A continuación se realiza un breve resumen de la estructura del controlador y su correspondiente codificación binaria.

## 2.1 CONJUNTOS DE ENTRADA

Los conjuntos de entrada se definen de acuerdo a los ámbitos de variación de las entradas al controlador. En este caso se supone su forma triangular, pero existen otras formas respecto a las funciones de pertenencia [7].

## 2.2 REGLAS DE DECISIÓN.

El número de reglas a utilizar será dependiente de la cantidad de entradas y funciones de pertenencias, número de etiquetas, de cada una de ellas. A su vez la codificación de las reglas también depende del número de funciones de pertenencia del (los) conjunto (s) difuso (s) de salida.

De esta manera se propone la siguiente codificación binaria para su utilización en un AG.

El primer paso consiste en la definición del número de reglas posibles, como:

$$NR_T = N_{E1} \cdot N_{E2} \cdot \dots \cdot N_{EK} \quad (1)$$

Donde:  $NR_T$ : el número de reglas total  $N_{E1}, \dots, N_{EK}$ : el número de etiquetas, correspondientes a cada una de las funciones de pertenencia, para las  $K$  entradas del controlador.

También, se define el número total de etiquetas de la variable de salida como  $N_S$ .

De esta manera se puede definir el conjunto  $CR_T$  de todas las posibles reglas como:

$$CR_T = \{R_i, \quad i = 1, \dots, NR_T\} \quad (2)$$

donde:  $R_i$  representa la  $i$ -ésima regla conformada por las etiquetas de entrada y salida.

De esta manera es posible definir una codificación binaria para la optimización del conjunto  $CR_T$ .

La codificación sigue la siguiente estructura:

$$\begin{array}{ccccccc} \boxed{\text{nbits}} & | & \boxed{\text{nbits}} & | & \boxed{\text{nbits}} & | & \dots & | & \boxed{\text{nbits}} \\ R_1 & & R_2 & & R_3 & & & & R_i \end{array}$$

Donde:  $R_1, \dots, R_i$ , son las reglas pertenecientes al conjunto  $CR_T$ , y  $n$  es el número de bits utilizado en cada subcadena que codifica todas las posibles etiquetas -funciones de pertenencia- de salida para cada regla, que corresponden a su vez al consecuente de la regla  $i$ -ésima.

El tamaño, en bits, de la palabra utilizada para codificar toda una tabla de reglas será:

$$L_{\text{codigo}} = n \cdot NR_T \quad (3)$$

donde  $L_{\text{codigo}}$  representa el largo del código utilizado.

La decodificación de las reglas es sencilla. Cada regla  $R_i$  asociada corresponde a la intersección de dos o más etiquetas, esta intersección corresponde a la condición de disparo de la regla y su consecuente se halla codificado en la subcadena de  $n$  bits.

## 2.3 CONJUNTOS DE SALIDA

En este caso se supondrá la forma singleton para desarrollar una forma de codificación sencilla de los conjuntos de salida. Es necesario especificar un ámbito de variación de la salida y el número de funciones de

pertenencia o etiquetas de este conjunto. A mayor cantidad de funciones de pertenencia se tendrá en general una mejor acción de control; dado que se trabajará con conjuntos de salida tipo singleton la codificación se simplifica a especificar el ámbito de variación para cada

función de pertenencia dentro del universo de discurso de la variable de salida.

La figura No. 1 presenta la disposición de un conjunto de salida y sus funciones singleton.

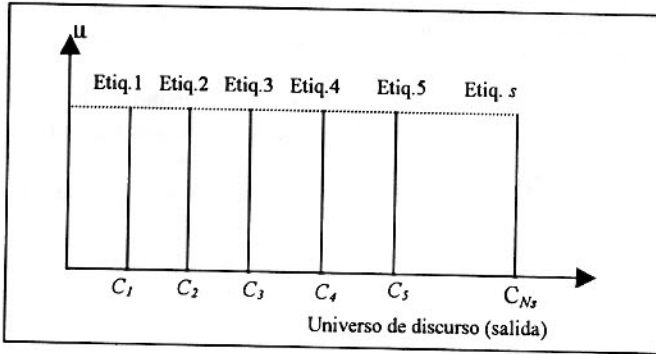


Figura No. 1: Conjuntos difusos de salida tipo singleton.

Como se muestra en la figura anterior la ubicación de cada función de pertenencia será  $C_1, C_2, \dots, C_{Ns}$ , respectivamente. Para efectos de codificación cada función de pertenencia tendrá su centro  $C_i$  codificado en binario con una resolución de  $p$  bits. El AG obtendrá la posición óptima o cercana a la óptima de los diferentes  $C_i$ . El diseñador debe proveer únicamente los límites superior e inferior del ámbito de variación.

De nuevo, en este caso, existe un compromiso entre la resolución (complejidad) y la capacidad de procesamiento (conforme aumenta el número de bits, crece la complejidad). Finalmente la estructura del código completo del conjunto de salida para su ajuste mediante AG es como sigue:

$$\boxed{p \text{ bits}} \quad \boxed{p \text{ bits}} \quad \boxed{p \text{ bits}} \quad \dots \quad \boxed{p \text{ bits}}$$

$$C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad \dots \quad C_{Ns}$$

Este mismo procedimiento se utiliza para la codificación de los conjuntos de salida para la acción de control fino.

### 2.4 BANDA DE ERROR PARA EL CONTROL FINO

Aparte de la codificación de las reglas y conjuntos de salida, se hace necesario realizar el ajuste de un parámetro denominado *constante de banda de error para el control fino*. Esta constante establece el valor de umbral para la acción de control fino en el FLC, es decir, una vez que el error sobre la consigna de control ingresa en esta banda se produce el acceso a la acción de control fino. La selección se establece como sigue:

$$\text{Acción de control} = \begin{cases} \text{Control fino si } |\text{abs}(\text{error})| \leq \text{Banda de error} \\ \text{Control grueso si } |\text{abs}(\text{error})| > \text{Banda de error} \end{cases}$$

Donde el error se define como:

$$\text{error} = \text{referencia} - \text{salida de la planta}$$

(4)

Las figuras No. 2 y No. 3 presentan de manera gráfica las regiones y selección del control fino-grueso del FLC.

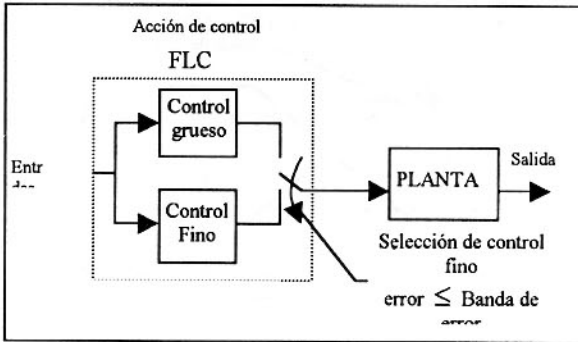


Figura No. 2: Diagrama de bloques del esquema de selección de control Fino-Grueso según la banda de error.

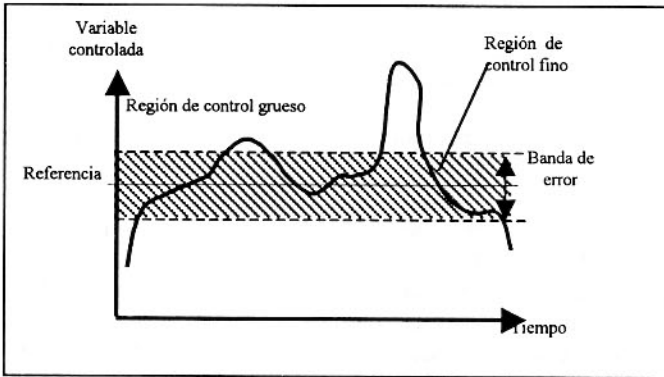


Figura No. 3: Regiones de acción de control Fino-Grueso del FLC

Este parámetro será llamado  $B_{error}$  y se codificará en  $q$  bits. De nuevo se dispondrá de límites superior e inferior en donde el AG deberá de optimizarlo.

### 2.5 CONSTANTE DE ESCALAMIENTO DE LOS CONJUNTOS DE ENTRADA PARA EL CONTROL FINO

Quando el FLC se encuentra en el modo de acción de control fino el controlador hará referencia a los conjuntos de entrada definidos para este modo de funcionamiento. Como es de esperarse las variaciones de las entradas serán menores, por lo tanto el universo de discurso de los conjuntos difusos de entrada deberán ser acordes con este nuevo universo

de discurso que se presenta dentro de la *banda de error*.

Para esto se propone la utilización de un *factor de escalamiento* denominado  $E_{CF}$  (escalamiento de Control Fino) de los conjuntos de entrada para generar los nuevos conjuntos de entrada en el modo de control fino. Esto es, a partir de los conjuntos originales de entrada se realizará un escalamiento de estos para ser utilizados en el modo de control fino. La figura No.4 ilustra este aspecto para el caso de un conjunto de entrada con tres funciones de pertenencia triangulares.

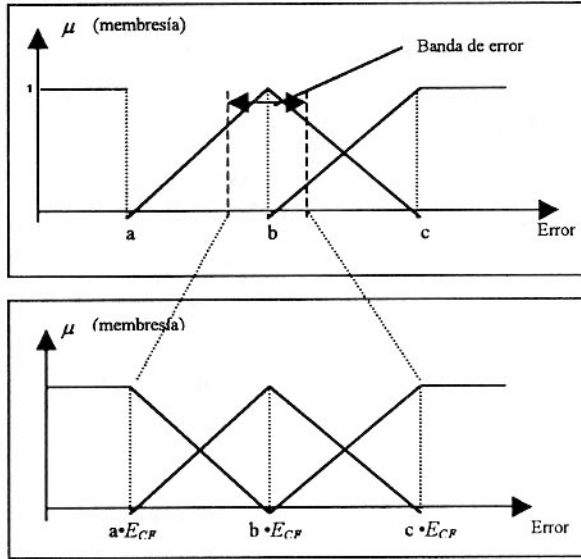


Figura No.4: Escalamiento de conjuntos de entrada para el modo de control fino

El factor  $E_{CF}$  será codificado en  $s$  bits. De nuevo deben establecerse los ámbitos de variación de este parámetro. El mismo conjunto de reglas utilizado para realizar el control grueso se utiliza para el control fino. La lógica de las reglas se mantiene a cualquier nivel en la estrategia de control difusa, solamente se hará un cambio en la intensidad de la acción de control.

**2.6 RESUMEN DE CODIFICACIÓN**

Una vez definidas cada una de las subestructuras del FLC corresponde unirlas para definir el "individuo" que representa una estructura determinada de un controlador.

Este individuo junto a otros formará una "población" en la cual se podrán reproducir, cruzar y mutar con el fin de obtener nuevas variedades de controles dentro de la población y que presenten, sobre todo, un mejor desempeño a la hora de resolver el problema de control que se plantea. Por lo tanto el AG realizará una búsqueda multiparamétrica, esto pues diferentes partes que conforman la estructura del control se están disponiendo para ser optimizadas y sintonizadas.

De acuerdo a lo presentado en las secciones anteriores la estructura completa del código se presenta en la figura No.5.

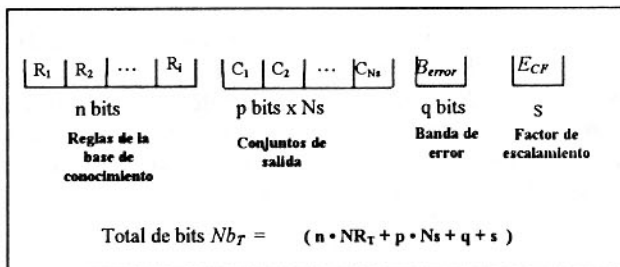


Figura No.5: Estructura del FLC codificada en binario.



### 3. FUNCIÓN OBJETIVO Y PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO

Un aspecto de suma importancia dentro del esquema planteado de sintonización de controles difusos con AG, y en general en la utilización de AG, es la definición de una adecuada función objetivo que logre extraer la información necesaria acerca del desempeño del sistema que está siendo optimizado o sintonizado como en este caso.

En el caso concreto de un sistema de control, cualquiera que este sea, el error representa sin duda el aspecto fundamental. Junto a este aspecto se pueden también considerar la energía invertida para llevar el proceso a la referencia deseada. Un sistema óptimo debe realizar esta tarea con el mínimo costo de energía posible. Un requerimiento final sería realizarlo en el menor tiempo posible.

De esta forma la función de costo propuesta se presenta a continuación:

$$J = \frac{1}{2N} \cdot \sum_{k=1}^N |e(k)| \cdot k \cdot T + \frac{\alpha}{2N} \sum_{k=1}^N (u(k))^2 \quad J \geq 0 \quad (5)$$

La expresión presentada en (5) consta de dos partes: una, fundamentada en el criterio de calidad de control ITAE [8], [9] (integral del valor absoluto por el tiempo), que corresponde a una ponderación promedio del valor absoluto del error de control  $e(k)$  ( $e(k) = \text{referencia}(k) - \text{salida}(k)$ ) multiplicado por el tiempo ( $kT$ ). Además  $N$  es el número total de muestras realizadas para la evaluación de  $J$ . Se realizan adquisiciones de datos en una ventana de  $N$  muestras sobre las cuales se estudia el desempeño del sistema.

La segunda parte de la función de costo corresponde a una ponderación cuadrática media de la acción de control  $u(k)$ , que a su vez es pesada por un factor constante  $\alpha$  ( $\alpha \in \mathfrak{R}$ ). Este factor de peso es dispuesto por el diseñador y su objetivo es graduar la importancia que se da a la minimización de la energía invertida en los actuadores.

Por otro lado, el AG establece que un individuo con alta fortaleza será un individuo con mayores probabilidades de sobrevivir y heredar sus características genéticas a las próximas generaciones. Esto sugiere, dentro del problema específico de control, que un individuo cuyo valor de  $J$  se acerca a cero hará que su fortaleza tienda hacia valor máximo.

De esta forma se hace necesario un mapeo de la función de costo  $J$  hacia una función objetivo  $f(J)$  que será utilizada por el AG para establecer que aquellos individuos con una alta fortaleza serán aquellos que minimicen el valor de  $J$  y maximicen el valor de  $f(J)$ .

Se propone entonces la utilización de la siguiente función objetivo  $f(J)$ :

$$f(J) = e^{-\frac{J^2}{\beta}} \quad \beta \in \mathfrak{R}^+ \quad (6)$$

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN

Se realizaron dos pruebas de control utilizando un FLC ajustado mediante un AG. Para ello se plantea el esquema de control presentado en la figura No. 6.

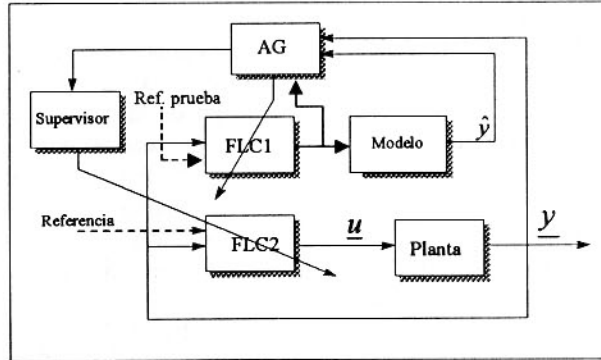


Figura No. 6: Esquema de control difuso autosintonizado utilizando AG

El sistema consiste en tres partes fundamentales, un AG del tipo estándar, es decir, con los tres operadores básicos: reproducción, cruzamiento y mutación. Un FLC que puede ser variado en su estructura según lo estudiado en las secciones anteriores. Además se utiliza un modelo del sistema a controlar, por lo tanto un proceso de identificación se hace necesario para obtener la sintonización del controlador.

El modelo no tiene restricciones de tipo matemática, sólo es requerida una buena calidad en la estimación. Esto facilita la incorporación de técnicas de identificación como las redes neuronales para este tipo de esquemas, y donde además se puede realizar el control de sistemas no lineales. Existirá, además, un sistema supervisor encargado de transferir las estructuras de control que alcancen un desempeño adecuado (fortalezas de los individuos o controles) para realizar el control directo sobre la planta. Para esto el AG realiza la optimización de la estructura del controlador introduciendo secuencias de prueba en la referencia del FLC y verificando el desempeño del control con el modelo del sistema. A partir de esta información se generan nuevas generaciones de controles bajo la mecánica del AG. Cuando una generación determinada logra alcanzar un desempeño adecuado, el sistema supervisor realiza la transferencia de la estructura hacia FLC2

(figura No. 6) para realizar la acción de control final.

#### 4.2 CONTROL DE UN SERVOMOTOR

El servomotor utilizado en esta primera prueba corresponde a un modelo de laboratorio ES 130 de Feedback Ltd. [10].

La función de transferencia del sistema es la siguiente:

$$\frac{\Theta_m(s)}{Va(s)} = \frac{K_m}{s(s\tau_m + 1)} \quad (7)$$

donde  $\Theta_m(s)$  es la salida o posición en radianes,  $Va(s)$  es el voltaje de entrada al servomotor en voltios,  $K_m$  es la ganancia del servo y  $\tau_m$  es la constante de tiempo. Los valores nominales de estos parámetros son:  $K_m = 9.89$  rad/voltios y  $\tau_m = 0.15$  seg. Se introduce una secuencia escalonada en la referencia (de 0 a 0.5 radianes) para realizar el ajuste del controlador. Los parámetros del AG son los siguientes: una población de 50 individuos, una probabilidad de mutación  $P_m = 0.001$  y una probabilidad de cruzamiento  $P_c = 0.6$ . Las entradas del controlador se definen como el error y derivada de la misma sobre la referencia de control. Se utilizan siete funciones de pertenencia para el conjunto de salida correspondiente a la acción de control: negativo grande NG, negativo mediano NM,

negativo pequeño NP, cero negativo ZEN y cero positivo ZEP (se utilizan igual número para los conjuntos de salida de control fino). En este caso se utilizará un total de 75 bits ( $n \cdot NR_T$ ) para las reglas, 64 ( $p \cdot N_s$ , 4 bytes para el control fino y 4 para el control grueso) para los conjuntos de salida, se aprovecha la simetría de los conjuntos de salida para realizar solamente el ajuste sobre la mitad del universo de discurso, donde los límites de la acción de control se fijan entre  $\pm 5$  voltios (saturación). Además, 8 bits para la banda de error ( $q$ ) y 8 para el factor de escalamiento ( $s$ ), lo que resultan en un total de 155 bits ( $n \cdot NR_T + p \cdot N_s + q + s$ ) por individuo (figura No.5). La banda de error se ajustó, mediante el AG, dentro de ámbito de 0 a 15°, lo mismo para el

factor de escalamiento, en un ámbito de 0 a 5% de la escala nominal de los conjuntos de entrada originales.

Para la función de costo se tiene  $\alpha=1$  y  $\beta=0.1$ , lo que significa que se va a tratar de minimizar todo lo posible el esfuerzo sobre los actuadores. La figura No.7 presenta un esquema del sistema experimental. En la figura No.8 se puede observar la evolución de un controlador en cuanto a la calidad de control, a mayor número de generaciones el desempeño mejora. La prueba se presenta para la secuencia escalonada en la referencia de 0 a 0.5 radianes.

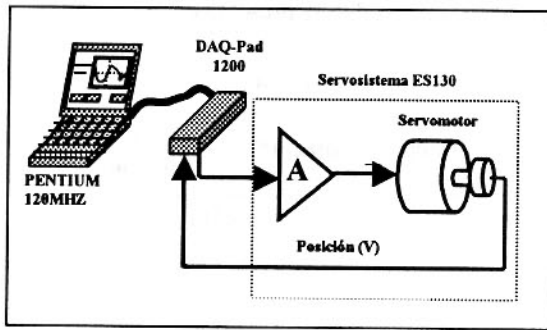


Figura No. 7: Sistema experimental, servomotor y sistema de adquisición de datos y control

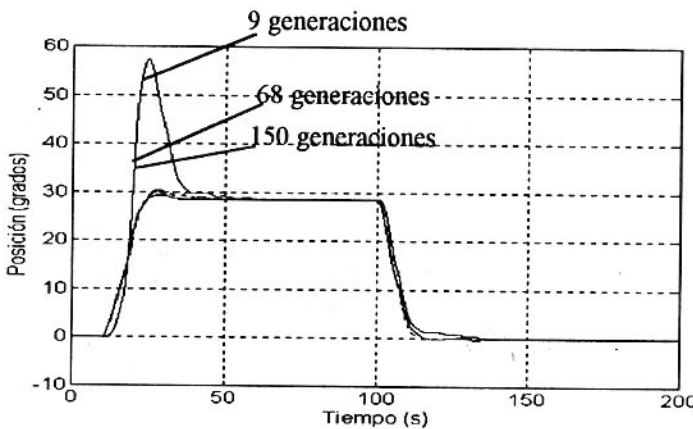


Figura No. 8: Evolución de un FLC para diferentes generaciones.

La figura No.9 muestra la salida del proceso ante otra secuencia de cambios en la referencia, además se introdujeron ruido de medición y perturbaciones en la entrada de la planta.

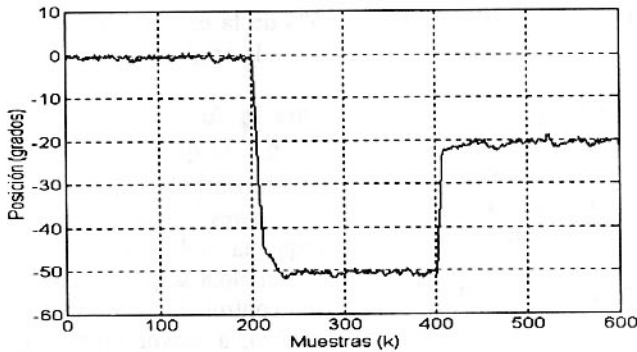


Figura No.9: Salida de la planta con ruido de medición y perturbaciones.

#### 4.2. CONTROL DE UN PÉNDULO INVERTIDO

Una prueba de control simulada se realizó sobre un péndulo invertido (planta no lineal) descrito por el modelo de las ecuaciones (8) a (10) [11], y que se presenta en la figura No. 10.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$x_2 = \frac{g \cdot \sin(x_1) + \cos(x_1) \cdot \left[ \frac{-F - mlx_2^2 \sin(x_1)}{m_c + m} \right]}{l \cdot \left[ \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m_c + m} \right]} \quad (8)$$

donde:

$$x_1(t) = \theta(t) \quad (9)$$

$$x_2(t) = \dot{x}_1(t) = \dot{\theta}(t) \quad (10)$$

con  $x_1$  representando la posición del péndulo y  $\dot{x}_1 = x_2$  la velocidad angular. Además:  $g = 9.8 \frac{m}{s^2}$ ,  $m = 0.1 \text{ kg}$ ,  $m_c = 1.0 \text{ kg}$  y  $l = 1.0 \text{ m}$ .

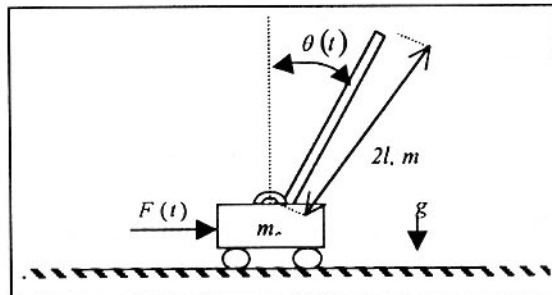


Figura No.10: Péndulo invertido.

Para este experimento se conservó la misma estructura del controlador utilizado en la prueba sobre el servomotor. Solamente se modificó el ámbito de variación de los conjuntos de salida, pasando de voltios a unidades de fuerza ( $F(t)$ ), en este caso newtons, dado que la salida del controlador será una fuerza aplicada al carro para lograr el equilibrio del péndulo. Se aprovecha también la simetría de los conjuntos de salida al igual que en el caso del servomotor. Se utilizó, también,  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0.1$ .

El AG logra la sintonización de la estructura del controlador, originando una tabla de reglas, ajuste de los factores de escalamiento, banda

de error y conjuntos de salida tanto para control grueso como control fino. Los resultados se presentan en las figuras No.11, No.12 y No.13, donde se realizan pruebas de control para diferentes condiciones iniciales. En cada una de las pruebas realizadas se comprobó un rendimiento satisfactorio del ajuste del controlador por parte del AG, resultado de ello se muestra en las pruebas bajo condiciones críticas en el punto de partida, como por ejemplo, ángulos iniciales de hasta  $70^\circ$  y perturbaciones del orden de 50 N cuando el sistema esta en estado permanente.

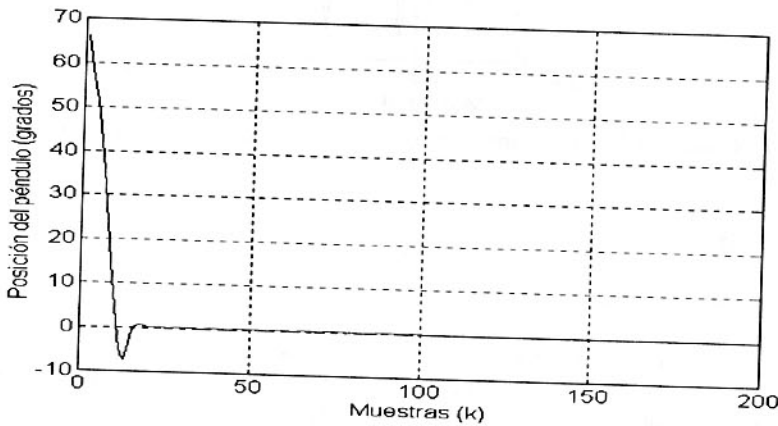


Figura No.11: prueba de control difuso del péndulo invertido con condiciones  $\theta_0 = 30^\circ$ ,  $\dot{\theta}_0 = -30^\circ / s$ .

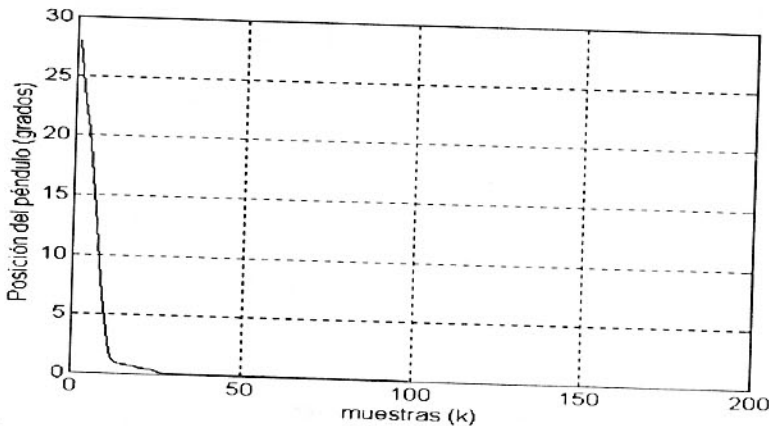


Figura No.12: prueba de control difuso del péndulo invertido con condiciones  $\theta_0 = 70^\circ$ ,  $\dot{\theta}_0 = -70^\circ / s$ .

Esto comprueba, además, que el índice de desempeño o función de costo utilizada puede conducir a resultados cercanos óptimos mediante la utilización del AG.

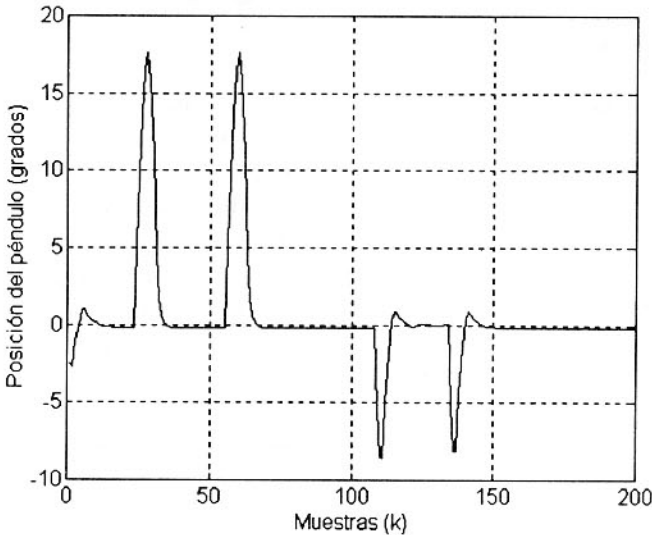


Figura No.13:Control del péndulo invertido ante perturbaciones en la entrada de +/- 50N.

## 5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una propuesta para la codificación de una estructura de controlador difuso, para su sintonización utilizando un algoritmo genético estándar. Además se utilizaron criterios óptimos de control para realizar la sintonización. Aspectos como la minimización de la energía invertida en la acción de control y minimización del error sobre la consigna de control fueron incluidos dentro de la propuesta.

En las pruebas de control realizadas sobre un servomotor y un péndulo invertido se pudo comprobar un rendimiento satisfactorio de la estructura de control planteada, sin importar las características matemáticas del modelo del sistema que se controla.

Un aspecto que resulta interesante es la inclusión de un modelo del sistema a controlar dentro del sistema de control para la sintonización del controlador difuso. Aunque el modelo del sistema es obligatorio (al igual

que en otros algoritmos de control) dentro del esquema no interesan las características o naturaleza del modelo. Esto produce una mayor flexibilidad sobre la forma de modelar el sistema pudiéndose utilizar técnicas convencionales como filtro de Kalman [12], [13] o redes neuronales en el caso de sistemas no lineales [14].

La información derivada del ajuste de un controlador difuso en esta forma produce una serie de información que mejoran la comprensión acerca del funcionamiento tanto del sistema de control como de la planta misma. La leyes de control difuso o leyes de tipo lingüísticas son un ejemplo de esto.

Finalmente, este trabajo pretende ser un punto de partida hacia estructuras de control con un alto grado de autonomía, en donde tanto la identificación como el proceso de ajuste del controlador puedan ser realizadas bajo un mismo esquema utilizando los AG. Se propone en este caso el modelado de sistemas mediante sistemas difusos[15]. La propuesta debe ser guiada hacia aquellos problemas de

control donde las técnicas convencionales tienen un bajo rendimiento y en donde aspectos como la adaptabilidad al entorno de funcionamiento pueden resultar de importancia.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Zadeh, L.A.. *Fuzzy Sets, Inform. Contr.*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2]. Holland, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, USA, 1975.
- [3]. Goldberg, D.E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learnig*. Adison Wesley, USA, 1989.
- [4]. Karr, Charles L. *Fuzzy Control of pH sing Genetic Algorithms, in IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.1, no.1, February, 1993.
- [5]. Del Castillo, Dolores. *Genetic processing of the sensorial information, in Sensors and Actuators*, pp.255-259, 1993.
- [6]. Barczak, Czeslau L. *Experiments in Fuzzy Control using Genetic Algorithms*, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.
- [7]. Terano, Toshiro. *Fuzzy Systems Theory and it's Applications*. Academic Press Inc., United States of America, 1992.
- [8]. Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice-Hall, México., 1993.
- [9]. Kwakernaak, H., Sivan, R. *Linear Optimal Control Systems*. Wiley Interscience, Londres, 1972.
- [10]. Feedback Ltd.. *DC servo system type ES130*. London., 1972.
- [11]. Zeigler, Bernard P. *Designing Fuzzy Net Controllers Using Genetic Algorithms, in IEEE Control Systems Magazine*, pp.66-72, vol.15, no.3, June, 1995.
- [12]. Ramírez H., José A. *Control autosintonizado de mínima varianza generalizada con red neuronal para la estimación de parámetros*. Tesis de licenciatura en ingeniería eléctrica, Universidad de Costa Rica, junio, 1997.
- [13]. Mazón, I. *Identificación de sistemas con parámetros variantes en el tiempo*. Tesis de maestría en ingeniería eléctrica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 1983.
- [14]. Narendra, K. S. & Parthasarathy, K.. *Identification and control of dynamical systems using neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks*, vol.1, no.1, pp.4-27, 1990.
- [15]. Ramírez H., José A. *Ajuste de controladores difusos mediante algoritmos genéticos*. Tesis de Maestría en ingeniería eléctrica, Universidad de Costa Rica, enero, 1999.

Correo Electrónico:  
 imazon@pacuare.eic.ucr.ac.cr  
 josear@cariari.ucr.ac.cr