

# Sintonización de Controladores PID para Control de Velocidad de Motores de Corriente Continua mediante Algoritmos Genéticos

## PID Controller Tuning for Speed Control of a Direct Current Motor using Genetic Algorithm

<sup>α</sup>Sofía Berrones, <sup>β</sup>Ronald Barcia, <sup>δ</sup>Oscar Miguel-Escrig, <sup>γ</sup>Julio-Ariel Romero-Pérez

<sup>α,β</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

<sup>γ,δ</sup>Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, España

<sup>α</sup>be\_sofiae@esPOCH.edu.ec, <sup>β</sup>ronald.barcia@esPOCH.edu.ec, <sup>γ</sup>romeroj@uji.es, <sup>δ</sup>omiguel@uji.es

**Resumen-** Este documento presenta el desarrollo de un algoritmo genético para optimización de ganancias de un controlador PID (proporcional, integral, derivativo) aplicado al control de velocidad de un motor de corriente directa. El algoritmo fue desarrollado en código Python. Produce un buen desempeño con pocas iteraciones debido a la generación de la población inicial a partir de las reglas de sintonización de Ziegler & Nichols. El controlador obtenido mediante la aplicación del algoritmo genético es comparado con los métodos convencionales de sintonización de Ziegler y Nichols, Cohen-Coon y AMIGO, en términos de tiempo de establecimiento, sobre oscilación máxima y robustez. Los resultados obtenidos permiten concluir que se minimiza la sobre oscilación máxima y el tiempo de establecimiento mediante el uso del controlador obtenido mediante el algoritmo genético, que a su vez presenta una mejor robustez en comparación con los controladores obtenidos con los otros métodos.

**Palabras Clave-** Algoritmo Genético, Control PID, Inteligencia Artificial, Control Óptimo.

**Abstract-** This document presents the development of a genetic algorithm for optimizing the gains of a PID (proportional, integral, derivative) controller applied to the speed control of a direct current motor. The algorithm was developed in Python code. It produces a good performance with few iterations due to the generation of the initial population based on the tuning rules of Ziegler & Nichols. The controller obtained through the application of the genetic algorithm is compared with the conventional tuning methods of Ziegler and Nichols, Cohen-Coon and AMIGO, in terms of establishment time, maximum overshoot and robustness. The obtained results allow to conclude that the maximum overshoot and the establishment time are minimized by using the controller obtained through the genetic algorithm, which in turn has a better robustness compared to the controllers obtained with the other methods.

**Keywords-** Genetic Algorithm, PID Control, Artificial Intelligence, Optimal Control.

### I. INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas de *Soft Computing* – como lógica difusa, redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos (AG) – en problemas de control automático es bien conocido en la actualidad. Los controladores difusos usualmente implementan una estrategia de control derivada de reglas lingüísticas, que se traducen en términos matemáticos a través de los conceptos de conjuntos difusos y lógica difusa [1]. Los controladores neuronales son capaces de aprender el comportamiento del sistema basado en información sobre su entrada y salida [2]. Ambas técnicas al combinarse resultan ser de gran utilidad en el control de sistemas complejos [3].

Los algoritmos genéticos están inspirados en la evolución natural y en los mecanismos de recombinación genética. Esta técnica es básicamente un procedimiento de búsqueda adaptativa y paralela para la solución de problemas complejos y se puede utilizar junto con otras técnicas inteligentes [4].

El uso de las técnicas antes mencionadas en problemas de control automático resulta de gran utilidad cuando se busca lograr un control óptimo en procesos cuya dinámica exhibe características complejas y cuando se busca garantizar requerimientos de respuesta deseados cuando las características del proceso varían. En ocasiones, estas técnicas son combinadas con esquemas de control clásico, como el control PID, para lograr una implementación más sencilla [5]–[10].

Los controladores PID tienen un gran número de aplicaciones y actualmente son los más empleados en la industria debido a su simplicidad y rendimiento en comparación con otros esquemas de control que, si bien presentan un mejor rendimiento, son más complicados en cuanto a su modelado, sintonización e implementación [11]. En la Fig. 1 se muestra un diagrama de un esquema de controlador PID en su forma paralela.

El controlador PID básicamente consiste en la combinación de tres acciones de control: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (D). En general, la acción de control P se utiliza para reducir el error de seguimiento detectado, independientemente del desplazamiento de fase entre la salida y la entrada; la acción de control I se aplica para reducir (o incluso eliminar) el error de seguimiento de estado estacionario; y el controlador D puede reducir la sobreoscilación máxima (pero puede retener un error de seguimiento en estado estable) [12]. Cada acción de control tiene cierto grado de influencia sobre el proceso que es regulado mediante una constante para cada acción:  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ , respectivamente. De forma optimista, se espera que una implementación de un controlador PID combine estas tres acciones para obtener una salida del sistema con un tiempo de subida y un tiempo de asentamiento rápidos, con poco o ningún exceso de sobreoscilación, y con un mínimo o nulo error de estado estacionario.

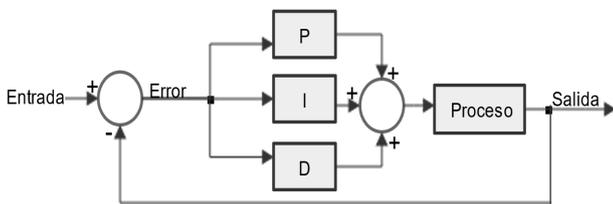


Fig. 1. Esquema de un controlador PID en paralelo.

El desempeño de los controladores PID depende de los valores que tomen las ganancias  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$ , lo que hace que el proceso de elegir estas ganancias sea crucial para el desempeño de todo el sistema de control en lazo cerrado.

Actualmente existe una gran cantidad de métodos de ajuste de controladores PID que responden a diferentes especificaciones de diseño, las cuales en general vienen dadas en términos de la respuesta temporal o de frecuencia del sistema (tiempo de establecimiento, sobreoscilación, ancho de banda, márgenes de robustez, etc.). Cuando se desea realizar el ajuste de un controlador PID con unos requerimientos específicos diferentes a los que son considerando en los métodos de ajuste existentes, es importante disponer de una metodología que permita obtener los valores más adecuados de los parámetros  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  del controlador. Una solución al problema de ajuste de controladores PID es la optimización mediante el uso de AG para obtener los parámetros del controlador que garanticen los requerimientos de respuesta del sistema.

Varios estudios realizados la aplicación de AG presenta mejores resultados en comparación con métodos clásicos de sintonización de controladores PID. En [13] Nagaraj y Vijayakumar aplican técnicas heurísticas, incluyendo AG, para lograr la sintonización óptima de un controlador PID aplicado al control de humedad de una máquina de papel donde se puede apreciar que el uso de AG comparado con un controlador de Ziegler y Nichols presenta un mejor rendimiento en términos de respuesta temporal excepto para la sobre oscilación máxima, lo que sugiere el uso de otra función de costo. En [14], Balarugan et al. Hacen uso de AG para la sintonización de un controlador PID en plantas de turbinas de gas para operación en paralelo, obteniendo una mejor estabilidad y mejores parámetros de respuesta temporal en comparación con un controlador de Ziegler &

Nichols. En [15]–[17] se llega a las misma conclusión que los trabajos citados anteriormente aplicados al control de otros procesos. En [18] Ohri y Singh consiguen mejorar la robustez ante variaciones de carga de un controlador PI aplicado a un restaurador dinámico de voltaje mediante su sintonización usando AG.

En este trabajo se evalúa el uso de AG en la sintonización de un controlador PID aplicado en el control de velocidad de un motor de corriente continua (CC), comparándolo con métodos de sintonización convencionales para lograr minimizar el tiempo de establecimiento y la sobre oscilación máxima, además de comparar su robustez.

## II. METODOLOGÍA

### A. Caso de Estudio

Para este estudio se ha considerado un motor de CC de excitación independiente cuyo esquema se muestra en la Fig. 2, donde tanto la armadura como el campo del motor cuentan con su propia fuente de excitación. En la Fig. 2,  $V_a$  es el voltaje aplicado a la armadura,  $I_a$  es la corriente de armadura,  $R_a$  es la Resistencia de Armadura,  $L_a$  es la Inductancia de Armadura,  $E_b$  es la fuerza contraelectromotriz,  $T_m$  es el par ejercido por el motor,  $\omega$  es la velocidad angular del rotor,  $J_m$  es el momento de inercia del eje del rotor,  $B_m$  es el coeficiente de amortiguamiento viscoso del eje del rotor,  $L_f$  es la inductancia del campo,  $R_f$  es la resistencia del campo,  $I_f$  es la corriente del campo y  $V_f$  es el voltaje aplicado al campo.

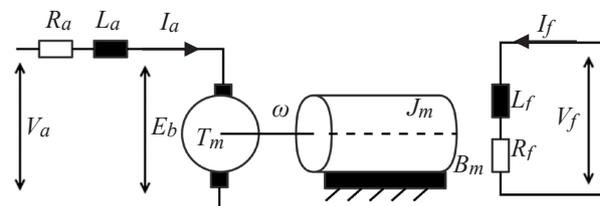


Fig. 2. Esquema de un motor de CC de excitación independiente.

Una representación de la función de transferencia puede ser obtenida despreciando los efectos de la histéresis, la caída de tensión en las escobillas y asumiendo que la corriente de campo es constante. Bajo estas consideraciones, las ecuaciones que gobiernan el motor de CC de excitación independiente de la Fig. 2 son las siguientes:

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b \quad (1)$$

$$E_b = K_b \omega I_f = K_e \omega \quad (2)$$

$$T_d = K_T I_f I_a = K_t I_a \quad (3)$$

$$T_d = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega \quad (4)$$

En las ecuaciones (2) y (3),  $K_t$  es la constante de Torque y  $K_e$  es la constante de fuerza contraelectromotriz. Ambas constantes relacionen variables mecánicas con variables eléctricas, permitiendo la transformación de una a otra.

A partir de las ecuaciones (1)-(4) se obtiene el modelo de función de transferencia de la ecuación (5), que relaciona la velocidad angular  $\Omega(s)$  con el voltaje de armadura  $V_a(s)$ , donde el significado de cada uno de sus términos es descrito en la Tabla I.

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J_m s^2 + (B_m L_a + R_a J_m) s + B_m R_a + K_t K_e} \quad (5)$$

Los parámetros escogidos para la función de transferencia son los que se usan en el estudio de control de velocidad de un motor de CC en [19]. Dichos parámetros se muestran en la Tabla I.

TABLA I  
PARÁMETROS DEL MOTOR DE CC DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

PARÁMETRO	VALOR
Constante de Torque $K_t$	1.88 Nm/A
Constante de Fuerza Contraelectromotriz $K_e$	$4.2 \cdot 10^{-4}$ V/rpm
Resistencia de Armadura $R_a$	6.4 $\Omega$
Inductancia de Armadura $L_a$	$3 \cdot 10^{-2}$ H
Inercia del eje del Rotor $J_m$	$28.46 \cdot 10^{-3}$ Kg $m^2$
Coefficiente de Amortiguamiento Viscoso $B_m$	0.776 Nms

Para sintonizar un controlador PID existen técnicas propuestas por varios autores (e.g., métodos de Ziegler & Nichols, Cohen-Coon, Sintonización Lambda entre otros) que hacen uso de las características de repuesta del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado, siendo las técnicas de Ziegler & Nichols una de las más conocidas [12]. Los parámetros calculados con dichas técnicas pueden servir como punto de partida para la aplicación del algoritmo genético para la sintonización óptima, logrando que se encuentren los mejores valores de las ganancias del controlador PID en un menor número de iteraciones del algoritmo, lo que se traduce en un menor costo computacional.

Al incorporar un AG para la sintonización del controlador PID, la estructura del sistema de control resulta ser la mostrada en la Fig. 3, donde la entrada es la velocidad angular deseada del motor y la salida es la velocidad angular actual. En el caso particular de este estudio, la población inicial del algoritmo genético viene dada por los parámetros de sintonización obtenidos mediante el método de lazo abierto de Ziegler y Nichols (Z&N) [20]. Los resultados obtenidos por el controlador sintonizado con el AG serán también comparados referencialmente con los entregados por controladores sintonizados con otros métodos convencionales reportados en literatura como Cohen-Coon [21], [22] y AMIGO [21], [23].

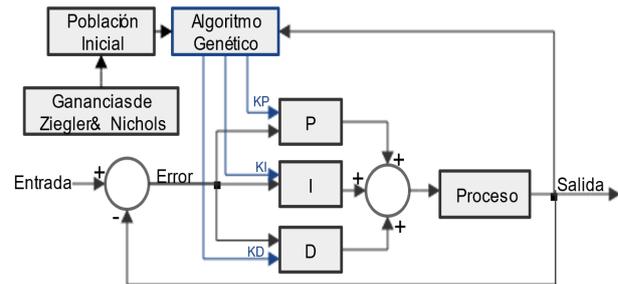


Fig. 3. Esquema del Controlador PID con Algoritmo Genético.

### B. Sintonización Inicial del PID usando Ziegler & Nichols

Se empleó el método de sintonización de controladores PID en lazo abierto de Ziegler & Nichols consiste en la aproximación de la respuesta del sistema a un modelo de primer orden con tiempo de retardo, lo cual es posible cuando el sistema no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados mostrando una respuesta subamortiguada, como muestra la Fig. 4. Posteriormente se obtuvo la medición de tres características de la respuesta del sistema en lazo abierto como son: el tiempo de retardo  $L$ , la constante de tiempo  $T$  y la ganancia del sistema  $K$ . Dichas características se usan para obtener los parámetros del controlador según los métodos de sintonización anteriormente mencionados.

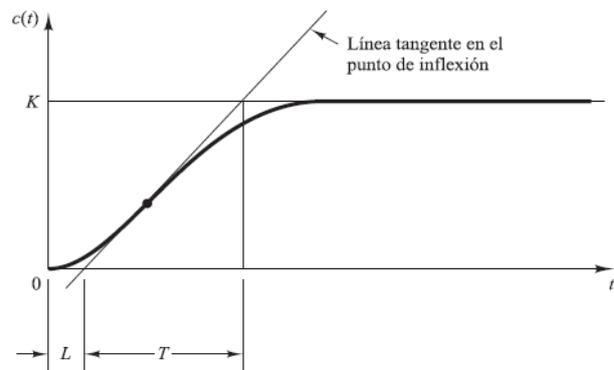


Fig. 4. Curva de respuesta en forma de S que presenta un sistema de primer orden con retardo de tiempo [20].

Las reglas de sintonización sugeridas por el método de sintonización de Z&N, junto con el resumen de reglas de los métodos de Cohen-Coon y AMIGO, para un controlador PID son resumidas en la Tabla II, donde  $T_I$  y  $T_D$  son los tiempos integrales y derivativos, respectivamente. Estos dos valores definen las ganancias  $K_I$  y  $K_D$ , siendo  $K_I = \frac{K_p}{T_I}$  y  $K_D = K_p T_D$ .

TABLA II

REGLAS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID DE ZIEGLER Y NICHOLS, COHEN-COON Y AMIGO BASADAS EN LA RESPUESTA ESCALÓN DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO[21].

Parámetros de Controlador PID	Ziegler & Nichols	Cohen-Coon	AMIGO
$K_P$	$1.2 \frac{T}{LK}$	$\frac{T}{LK} \left( \frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right)$	$\frac{1}{K} \left( 0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right)$
$T_I$	2L	$\frac{32 + 6 \frac{L}{T}}{13 + 8 \frac{L}{T}}$	$\frac{0.4L + 0.8T}{L + 0.1T} L$
$T_D$	0.5L	$\frac{4L}{11 + 2 \frac{L}{T}}$	$\frac{0.5LT}{0.3L + T}$

C. Estructura del Algoritmo Genético

Los algoritmos genéticos son un procedimiento computacional que imita el proceso natural de evolución. El objetivo de los algoritmos genéticos al emular los mecanismos biológicos de la evolución es derivar estrategias de optimización [24]. La estructura básica de un algoritmo genético se muestra en la Fig. 5. Los algoritmos genéticos funcionan mediante la evolución de una población de soluciones a lo largo de varias generaciones. Para cada generación, las mejores soluciones se seleccionan de la población con base en el valor de una función de costo. Esta optimización se logra mediante la implementación de los mecanismos naturales de la evolución, que en la literatura se conocen como operadores genéticos: selección, reproducción y mutación, generando una nueva población con mejores características que la anterior. Los algoritmos genéticos usan parámetros codificados en lugar de parámetros en sí mismos. Esta es la razón por la cual el primer paso de la aplicación del algoritmo genético es seleccionar el método de codificación más adecuado que represente mejor el espacio de solución del problema.

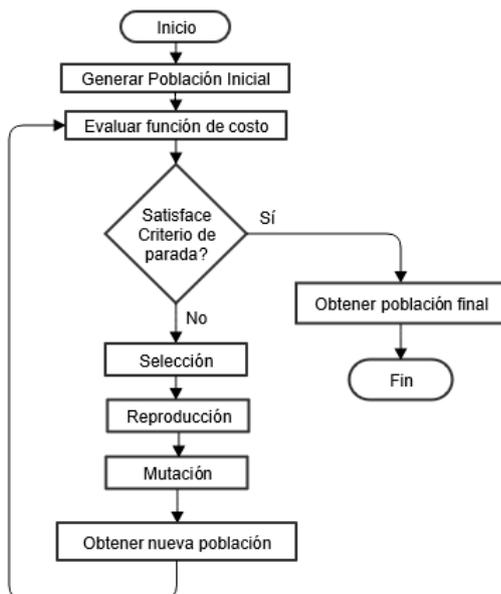


Fig. 5. Diagrama de Flujo de un Algoritmo Genético.

Considerando esto, en la Fig. 5 cada individuo de una población está representado por un vector de tres valores que representan las ganancias  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  del controlador PID.

Como se indicó anteriormente, la población inicial es generada a partir de los parámetros de ganancias obtenidas mediante el método de sintonización de Z&N (ver Tabla II), y multiplicándolos por un número pseudoaleatorio para alterar su valor.

El principio esencial de la selección es, generalmente, "el mejor sobrevive". El objetivo de la selección es aumentar el número de individuos con mejores valores de aptitud o características que sus padres. De esta manera se garantiza que los individuos más aptos de la población sean los productores de la siguiente generación al permitir únicamente la reproducción de estos y descartando a los individuos menos aptos de la misma población. El criterio de aptitud para determinar todo esto está dado por una función de costo *ITSE* (Integral of Time per Squared Error – Integral del tiempo por el cuadrado del error), que es la función que se desea optimizar. En este caso, la función de costo es la que se muestra en la ecuación (2):

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e_r^2(t) dt \quad (2)$$

donde,  $e_r^2(t)$  representa el cuadrado del error. Al minimizar el valor de *ITSE* se minimiza la sobreoscilación (OS) y el tiempo de establecimiento ( $t_{ss}$ ) [12], [16]. De esta manera, el objetivo del algoritmo genético consiste en minimizar el valor de *ITSE* donde las variables de decisión son las ganancias  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ .

La operación de reproducción se puede describir como el intercambio de dos cromosomas de individuos elegidos como padres de manera aleatoria a partir de los mejores individuos escogidos por el operador de selección [24]. El método de reproducción implementado en este trabajo consiste en la selección del individuo con el menor valor de *ITSE* del conjunto de individuos obtenido. Luego de aplicar el operador de selección se escogió al más apto (padre) y se escoge a otro individuo de los más aptos aleatoriamente (madre). Posteriormente, de acuerdo con un número aleatorio  $p$  entre 0 y 1, se escogió una de tres maneras en las que el hijo heredará las características de los padres. Así, si  $0 < p \leq 1/3$  entonces el hijo hereda  $K_P$  del padre y el resto de las ganancias de la madre; si  $1/3 < p \leq 2/3$  entonces el hijo hereda  $K_I$  del padre y las otras ganancias de la madre; y, si  $2/3 < p \leq 1$  entonces el hijo hereda  $K_D$  de la madre y el resto de las ganancias del padre. Luego se agregaron los hijos a la población anterior (la obtenida mediante la selección) para ocupar el lugar de los individuos anteriormente descartados (que no sobrevivieron).

La mutación es la transformación de uno o más genes en una población que crea la descendencia. La operación de mutación realiza modificaciones a un individuo seleccionado según una probabilidad de mutación ( $M_p$ ) modificando uno o más genes de un individuo. En la implementación del algoritmo genético de este trabajo se cambió de forma aleatoria una ganancia de cada solución, dependiendo de si un número aleatorio es mayor a la probabilidad de mutación, esto solamente cuando la mejor solución no logra un tiempo de asentamiento menor al tiempo de asentamiento logrado por la respuesta en lazo cerrado con los parámetros de Ziegler & Nichols. Esta operación permitirá explorar nuevas direcciones

de solución a la minimización del índice  $ITSE$  por parte del AG.

#### D. Comparación de Parámetros con los Controladores Convencionales

El modelo de función de transferencia del motor de CC de la ecuación (1) y la estructura de control de la Fig. 3 fueron implementados usando código Python, al igual que el algoritmo genético, usando la librería Python Control [25] para obtener la respuesta del sistema en cada iteración del AG. Además, la sintonización del controlador PID utilizando los métodos convencionales de Z&N, Cohen-Coon y AMIGO para controlar el motor CC fue realizada en Matlab. Finalmente, se realizó el análisis de la robustez de cada uno de los controladores obtenidos siguiendo el criterio estandarizado de sensibilidad ( $M_S$ ) basado en el diagrama de Nyquist de la respuesta en frecuencia de lazo abierto  $C(j\omega)P(j\omega)$ , que se indica en la ecuación (3), el cual establece que valores pequeños de  $M_S$  se relacionan con una robustez más elevada del controlador [26], donde  $C(j\omega)$  representa la respuesta en frecuencia del controlador y  $P(j\omega)$  representa la respuesta en frecuencia del proceso.

$$M_S = \max_{\omega} \left\{ \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \right\} \quad (3)$$

### III. RESULTADOS

La evaluación de los parámetros de la respuesta del sistema en lazo abierto para la sintonización con los métodos convencionales, descrito en la sección II se muestra en la Fig. 6 donde se puede apreciar que los valores obtenidos para el caso de estudio son  $T = 0.04969s$ ,  $L = 0.00282s$  y  $K = 0.37848$ , obteniendo así los valores de partida de la población inicial  $K_P = 55.84702$ ,  $K_I = 9897.74102$  y  $K_D = 0.07878$ , de acuerdo con los parámetros de Z&N de la tabla II.

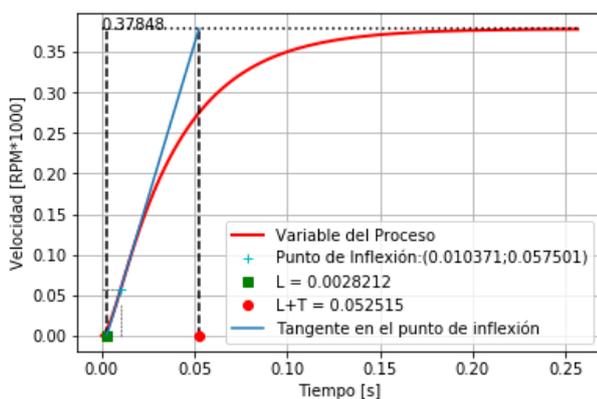


Fig. 6. Respuesta del sistema en lazo abierto para determinar el tiempo de retardo  $L$ , la constante de tiempo  $T$  y la ganancia  $K$  del modelo de motor de CC.

TABLA III  
PARÁMETROS DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID

Parámetro	Valor
Generaciones	15
Individuos por generación	30
Probabilidad de Mutación	0.10
$K_P$ de partida	55.84702
$K_I$ de partida	9897.74102
$K_D$ de partida	0.07878

El algoritmo genético fue ejecutado bajo las condiciones que se indican en la Tabla III. La Fig. 7 muestra la evolución de las soluciones para el controlador PID donde se muestra la variación de la función de costo conforme transcurren las generaciones. Puede apreciarse como disminuye drásticamente el valor del índice  $ITSE$  al cabo de la segunda generación quedándose casi constante en las generaciones restantes, logrando un valor mínimo de  $6.95736 \times 10^{-6}$ .

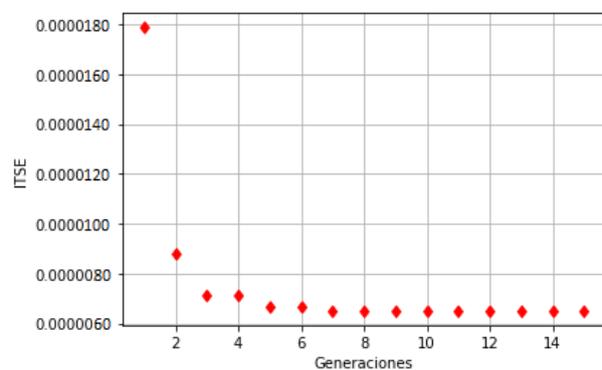


Fig. 7: Variación del  $ITSE$  con el paso de las generaciones.

En la Fig. 8, se muestran los resultados alcanzados en las respuestas a escalón unitario de las soluciones de optimización del controlador PID obtenidas en la generación 1, 9 y 15. Como se puede apreciar, la respuesta de la solución de optimización del PID de la generación 15 presenta la mayor disminución de la sobre oscilación máxima y el tiempo de establecimiento ( $t_{ss}$ ) en comparación con los logrados por las generaciones precedentes.

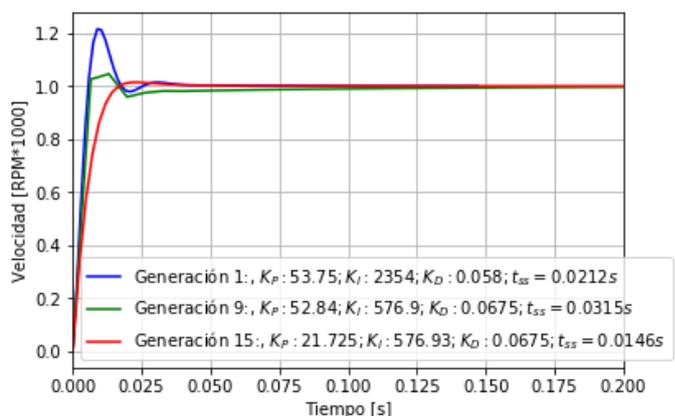


Fig. 8: Respuestas al escalón unitario alcanzadas en algunas generaciones del algoritmo genético.

Una comparación completa entre las respuestas al escalón en lazo cerrado con los controladores obtenidos por todos los métodos de sintonización mencionados en este trabajo fue realizada utilizando Matlab y se presenta en la Fig. 9. Se puede notar como la respuesta del controlador sintonizado con el AG (línea naranja) consigue mayor disminución en el tiempo de establecimiento  $t_{ss}$  y mejora las características de sobre oscilación del sistema respecto a las curvas obtenidas por los demás métodos.

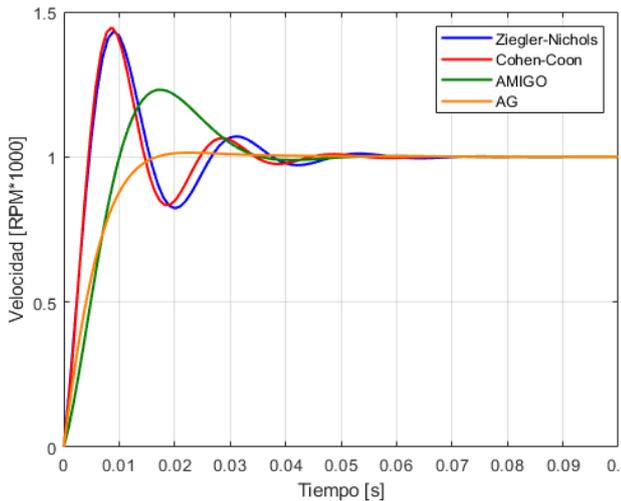


Fig. 9: Respuesta escalón final alcanzada por el algoritmo genético comparada con los demás controladores.

TABLA IV  
COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN, TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO ( $t_{ss}$ ), SOBRE OSCILACIÓN MÁXIMA (OS), ÍNDICES DE RENDIMIENTO (ITSE) Y DE ROBUSTEZ (MS) DE LOS CONTROLADORES PID

Parámetros	Métodos de Sintonización			
	Ziegler y Nichols	Cohen - Coon	AMIGO	Algoritmo Genético
$K_p$	55.84702	62.71275	21.47105	21.72525
$K_i/1000$	9.89774	9.24763	1.45025	0.57693
$K_d*100$	7.87778	6.36791	2.97799	6.75206
$t_{ss}$ [s]	0.04507	0.04066	0.03258	0.01457
OS [%]	43.22286	44.64349	23.16101	1.44364
ITSE*10000	0.15612	0.15612	0.18435	0.06957
$M_s$	1.77617	1.84720	1.28563	1.00027

Finalmente, en la Tabla IV se presenta un resumen de los resultados obtenidos por los controladores PID sintonizados con métodos convencionales Ziegler y Nichols, Cohen-Coon y AMIGO, comparados con el controlador optimizado por la técnica de computación evolutiva analizada en este estudio. Entre los datos más importantes resaltan el menor valor de tiempo de establecimiento (0.01457s) y sobre oscilación máxima (1.44364%) aplicando el controlador propuesto por el AG, mejorando así las características de respuesta transitoria en comparación con los demás controladores. Es importante mencionar que el menor valor de función de costo fue alcanzado por el controlador sintonizado con el AG (ITSE =  $6.957 \times 10^{-6}$ ), mostrando que su rendimiento es mucho que el resto de los controladores en términos de dicho índice. Además, este mismo controlador obtuvo el menor valor para el índice de sensibilidad  $M_s=1.00027$ , lo que indica el controlador presenta una mayor robustez en comparación con los demás analizados en este estudio.

#### IV. CONCLUSIONES

El algoritmo muestra una disminución drástica del tiempo de establecimiento y de la sobreoscilación máxima en pocas generaciones, esto debido a que se eligen los parámetros de Ziegler & Nichols como punto de partida, lo cual implica poco tiempo para hallar una solución más optimizada con el algoritmo genético. Esto se verifica observando que a partir de la segunda generación el algoritmo presenta una disminución notable en la sobreoscilación máxima y en el tiempo de establecimiento, disminuyendo más en la última generación.

Además de mejorar las características de respuesta transitoria, el controlador sintonizado por el algoritmo genético presenta mejor robustez en comparación con los demás métodos evaluados en este estudio. Cabe destacar la mejora en robustez en comparación con el método AMIGO, pues este método fue diseñado enfocándose en la robustez (aunque comprometiendo el rendimiento). Esta particularidad hace que el controlador sintonizado por el algoritmo genético presente un desempeño adecuado aún si se presentan perturbaciones en los parámetros del proceso.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Jantzen, *Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach*. New York, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013.
- [2] I. M. Mujtaba y M. A. Hussain, *Application of Neural Networks and Other Learning Technologies in Process Engineering*. Singapore, SINGAPORE: Imperial College Press, 2001.
- [3] C. R. Alavala, *Fuzzy Logic and Neural Networks: Basic Concepts & Application*. Daryaganj, INDIA: New Age International, 2008.
- [4] J. Ghaboussi, *Soft Computing in Engineering*. Milton, UNITED KINGDOM: Chapman and Hall/CRC, 2018.
- [5] P. Chou, T. Hwang, y T. Chang, "Use of Soft Computing Components to Improve Transient/Steady-State of Control Systems", en *Advances in Communication Systems and Electrical Engineering*, X. Huang, Y.-S. Chen, y S.-I. Ao, Eds. Boston, MA: Springer US, 2008, pp. 375–391.
- [6] A. K. Singh, R. Singh, y R. K. Arya, "Approximation of Optimized Fuzzy Logic Controller for Shunt Active Power Filter", en *Complex System Modelling and Control Through Intelligent Soft Computations*, Q. Zhu y A. T. Azar, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 571–595.
- [7] N. Bounar, A. Boukroune, y F. Boudjema, "Fuzzy Adaptive Controller for a DFI-Motor", en *Complex System Modelling and Control Through Intelligent Soft Computations*, Q. Zhu y A. T. Azar, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 87–110.
- [8] S. Bouallègue, F. Toumi, J. Haggège, y P. Siarry, "Advanced Metaheuristics-Based Approach for Fuzzy Control Systems Tuning", en *Complex System Modelling and Control Through Intelligent Soft Computations*, Q. Zhu y A. T. Azar, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 627–653.
- [9] M. Andalib Sahnehsaraei, M. J. Mahmoodabadi, M. Taherkhorsandi, K. K. Castillo-Villar, y S. M. Mortazavi

- Yazdi, "A Hybrid Global Optimization Algorithm: Particle Swarm Optimization in Association with a Genetic Algorithm", en *Complex System Modelling and Control Through Intelligent Soft Computations*, Q. Zhu y A. T. Azar, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 45–86.
- [10] A. Aguado y A. Cipriano, "Identificación en lazo cerrado y ajuste de reguladores mediante algoritmos genéticos", *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. RIAI*, vol. 6, núm. 1, pp. 20–30, ene. 2009.
- [11] G. K. McMillan, *Tuning and Control Loop Performance*, Cuarta Edición. New York, UNITED STATES: Momentum Press, 2014.
- [12] M. King, *Process Control: a Practical Approach*, 2da Edición. New York, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016.
- [13] B. Nagaraj y P. Vijayakumar, "Tuning of a PID Controller using Soft Computing Methodologies Applied to Moisture Control in Paper Machine", *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 18, núm. 4, pp. 399–411, ene. 2012.
- [14] S. Balamurugan, R. J. Xavier, y A. E. Jeyakumar, "Control of Heavy-duty Gas Turbine Plants for Parallel Operation Using Soft Computing Techniques", *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 37, núm. 11, pp. 1275–1287, oct. 2009.
- [15] S. K. Suman, "Improvement of Control System Responses Using GAs PID Controller", *Int. J. Ind. Manuf. Syst. Eng.*, vol. 2, núm. 2, p. 11, abr. 2017.
- [16] O. Y. Mahmood Al-Rawi, "Enhancing Control Systems Response Using Genetic PID Controllers", *Genet. Algorithms Appl.*, mar. 2012.
- [17] N. P. Adhikari y A. Gupta, "PID Controller Tuning Using Soft Computing Techniques", en *Proceedings of All India Seminar on Biomedical Engineering 2012 (AISOB 2012)*, 2013, pp. 277–284.
- [18] N. Kassarwani, J. Ohri, y A. Singh, "Design and performance of dynamic voltage restorer using genetic algorithm", *Int. J. Electron.*, vol. 105, núm. 1, pp. 88–103, ene. 2018.
- [19] S. Umme Hani, K. Hassan, R. Hazari, y M. Abdul Mannan, "Speed Control of Separately Excited DC Motor with Efficiency Maximization Propensity", *Am. Int. Univ. - Bangladesh J. Sci. Eng.*, vol. 14, núm. 1, ago. 2015.
- [20] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 5ta Edición. Madrid: Pearson Educación, S. A., 2010.
- [21] K. J. Åström y T. Häggglund, *Control PID Avanzado*. Pearson Educación, 2009.
- [22] A. A. Azman, M. H. F. Rahiman, N. N. Mohammad, M. H. Marzaki, M. N. Taib, y M. F. Ali, "Modeling and comparative study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) tuning method for Multi-tube aluminum sulphate water filter (MTAS)", en *2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 2017, pp. 25–30.
- [23] F. Padula y A. Visioli, "Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers", *J. Process Control*, vol. 21, núm. 1, pp. 69–81, ene. 2011.
- [24] P. P. Cruz, *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. México: Alfaomega Grupo Editor, S. A., 2011.
- [25] python-control.org, "Python Control Systems Library — Python Control Systems Library dev documentation", 22-dic-2018. [En línea]. Disponible en: <https://python-control.readthedocs.io/en/latest/>. [Consultado: 28-ene-2019].
- [26] R. Vilanova y V. M. Alfaro, "Control PID robusto: Una visión panorámica", *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. RIAI*, vol. 8, núm. 3, pp. 141–158, jul. 2011.