

Evaluación de desempeño de dos técnicas de optimización bio-inspiradas: Algoritmos Genéticos y Enjambre de Partículas

Performance evaluation of two bio-inspired optimization techniques: Genetic Algorithms and Particle Swarm

César R. López M.

Combustibles Ecológicos Mexicanos, S.A. de C.V. (México)
cesarlopezmora@hotmail.com

Este artículo se enfoca en la resolución de problemas de estimación e identificación de las constantes para la sintonización de controladores PID (proporcional, integral, derivativo). Se presentan dos técnicas de búsqueda bio-inspirada con la intención de evaluar su desempeño en el ajuste del bloque PID: Algoritmos Genéticos y Enjambre de Partículas. Ambas estructuras han probado ser capaces resolver de forma eficiente problemas de búsquedas no informadas en sistemas complejos, y es la intención de este trabajo compararlas sobre un esquema de control muy utilizado en la industria. El planteamiento inicial considera la evaluación sobre dos plantas (segundo y tercer orden) las cuales sirven de modelo para determinar el desempeño, incluso frente a técnicas de ajustes tradicionales.

Palabras clave: Control, optimización bio-inspirada, PID

This paper focuses on estimation problem solving and identification of the constants for tuning PID (proportional, integral, derivative) controllers. We present two techniques of bio-inspired search intending to evaluate their performance in adjusting the PID block: Genetic Algorithm and Particle Swarm. Both structures have proven capable of efficiently solving uninformed search problems in complex systems, and it is the intention of this work compare them over a control scheme widely used in the industry. The initial approach considers the evaluation of two systems (second and third order) which serve as a model to determine the performance, even against traditional adjustments techniques.

Keywords: Bio-Inspired optimization, control, PID

Introducción

El diseño y sintonización de los controles Proporcionales-Integrales-Derivativos o PIDs, desde el punto de vista teórico pueden verse conceptualmente muy intuitivo, pero su implementación real en la práctica puede

llegar a ser bastante compleja, en particular si el diseño incluye el acople de múltiples objetivos (normalmente en conflicto entre sí) tales como transitorios de corta duración, gran estabilidad y mínimo sobrepaso; o aun más si se trata de plantas de orden superior o no lineales. Por ésta razón, este tradicional esquema de control aún hoy en día es motivo de estudio y análisis dentro del campo de la investigación, en particular en lo que se refiere a métodos de sintonización (esquemas predictivos de los parámetros) (Ang, Chong, y Li, 2005; Luo, 2011; Moradi, 2003; Petrov, Ganchev, y Taneva, 2002).

Normalmente, los diseños iniciales obtenidos a través de todos los métodos existentes, necesitan ser ajustados de forma reiterativa a través de simulaciones por computador hasta que el desempeño del sistema en lazo cerrado cumpla el perfil de diseño deseado (Vásquez y Martínez, 2011). Esta estrategia generalizada de diseño ha estimulado el desarrollo de herramientas inteligentes que apoyen el trabajo de los ingenieros en la obtención del mejor

Fecha recepción del manuscrito: Enero 24, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Junio 9, 2014

César R. López M., Combustibles Ecológicos Mexicanos, S.A. de C.V. (México).

Esta investigación fue financiada por: Universidad Pedagógica Nacional.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: César Ricardo López. Email: cesarlopezmora@hotmail.com

esquema de control PID para todas las condiciones de las plantas. De igual forma, ha estimulado el desarrollo de investigaciones como la aquí presentada (Luo y Li, 2010; Maia, Vieira, Geraldo, y Yokoyama, 2005; Wei y Zhang, 2008; Xiao, 2010).

Dado que la sintonización de los parámetros del control PID es un problema de búsqueda no informada bajo el cumplimiento de algunos criterios de desempeño, es completamente válido el pensar utilizar herramientas bio-inspiradas que se ha comprobado que resuelven eficientemente este tipo de problemas, a fin de buscar algún nivel de optimización en el diseño de éste esquema de control.

Estas ideas no son nuevas, y han sido trabajadas por muchos investigadores en todo el mundo en años recientes. Trabajos en los que se evalúan plantas de orden superior, no lineales y con retardos con apoyo de estrategias genéticas (Y. Chen, 2011; Maia et al., 2005; Xiao, 2010; Xiao-Gen, Li-Qing, y Cheng-Chun, 2009), u optimizadas por medio de algoritmos colectivos (He et al., 2009; Luo y Li, 2010; Wei y Zhang, 2008; Zeng y Tan, 2007). Esta investigación tomó estos trabajos como punto de partida, y como referencia para la comparación de desempeño del esquema aquí propuesto.

Varios estudios han demostrado la efectividad que prestan los controladores PID en diferentes áreas. En (García Nieto, Chicano, y E., 2009) por ejemplo se puede observar cómo mediante la implementación de un esqueleto de algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*, optimización con enjambre de partículas) y AG, se resuelven dos problemas de carácter práctico a nivel industrial: la LA (*Location Area Management*) y el GOMAD (*Gene Ordering in Microarray Data*). En primer lugar, en el problema LA, el cual se centra en el campo de las telecomunicaciones y concretamente en la computación móvil (*mobile computing*), refiriéndose a la posición de los usuarios o gestión del área de localización, muestra cierta deficiencia en el momento de ubicar a los individuos, debido al alto costo que se implementa en el momento de reducir el campo de búsqueda. El segundo caso se refiere al problema GOMAD, el cual muestra los inconvenientes que tiene la comunidad científica, debido a la gran cantidad de información que ha sido generada por el proyecto del genoma Humano y por otras iniciativas relacionadas con la genética, las cuales suponen una interpretación de las relaciones funcionales entre los genes, de manera ágil.

La principal conclusión de esta investigación, es que la implementación de los algoritmos bio-inspirados de búsqueda en problemas de alta complejidad es eficaz, ya que responden positivamente encontrando buenas soluciones con relativa facilidad. Sin embargo, se debió acudir a un mecanismo de búsqueda local para aumentar la exploración durante la ejecución de los algoritmos, en cuanto el problema

principal, al reducir el tamaño de la población, proporciona una convergencia más rápida a soluciones más óptimas, disminuyendo de esta manera el costo de localización, mediante la utilización de algoritmos genéticos paralelos, los cuales utilizan más procesadores agilizando de manera considerable el resultado de soluciones óptimas, a pesar de los retardos causados por la comunicación entre procesos y la sincronización. Por último, esta investigación concluye que el esqueleto PSO resuelve el problema LA proporcionando buenos resultados en un tiempo razonable.

En cuanto al problema GOMAD, al ser un problema que trabaja con grandes instancias, este se evaluó mediante la paralelización del algoritmo en islas (sub poblaciones), que trabajan con sub cúmulos más pequeños que agiliza de manera considerable la ejecución de una interacción del algoritmo.

Otra investigación interesante es (Guerra y Crawford, 2006), en la cual se desarrolla un estudio experimental entre EP y AG para algunos problemas numéricos de optimización, demostrando que pueden ser utilizados en diversas funciones sin importar su complejidad. En la medida en que el número de iteraciones es mayor, observaron que es mejor el comportamiento del PSO, pero esto no garantiza que al aumentar el tamaño de la población se obtenga un óptimo resultado. Para el caso de los algoritmos genéticos, el hacer el diseño con una población grande no proporciona un mejoramiento en el algoritmo, por lo que este estudio recomienda utilizar una población de mediano tamaño, en donde es realmente efectivo este proceso.

En resumen, es posible concluir que EP es una metaheurística que parece ser eficaz y eficiente para optimizar una amplia gama de funciones. EP tiene semejanza con la computación evolutiva, y es altamente dependiente de procesos estocásticos. El ajuste de los parámetros de EP es conceptualmente similar a la operación de cruce utilizada por los AG, y utilizando también el concepto de retroalimentación.

En (Meng y Song, 2007) es utilizado el AG como método para sintonizar un PID, dejando claro que estos algoritmos pueden solucionar más de un sistema en comparación de los métodos corrientes que se dedican a uno solo. Esta investigación utiliza una comparación entre algoritmos simples y algoritmos genéticos, demostrando que los últimos son más rápidos, ya que la población converge más rápidamente y mejoran el funcionamiento del control, remediando los problemas de convergencia prematura, la mutación y el cruce. Por consiguiente, los algoritmos genéticos son mejor que los algoritmos simples, ya que son más rápidos y eficaces. En esta investigación se puede evidenciar que estos algoritmos, cifran de manera efectiva los parámetros K_p , K_i y K_d , permitiendo una sintonización más efectiva.

Finalmente, en (Pinto, 2009) el trabajo está centrado en el diseño y construcción de un sistema de simulación de control de motores eléctricos, el cual le permite a los estudiantes de licenciatura en electrónica poder estudiar el campo del diseño sobre una herramienta que permite analizar de manera adecuada los motores con los cuales se desea trabajar, o el estudio académico del mismo. En este trabajo se puede destacar la importancia de implementar herramientas para el estudio de control ya que es un campo ampliamente interesante y necesario en el área industrial.

En el caso particular de ésta investigación, los estudios de desempeño realizados a través de simulación, demuestran la eficacia de las estructuras de control propuestas. Los resultados alcanzados son comparados con soluciones PID convencionales y otras optimizadas y reportadas en investigaciones recientes (Maia et al., 2005).

El documento se encuentra organizado de la siguiente forma: el Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema bajo estudio. Se acota el problema y se proyecta su perfil a lo largo de los objetivos perseguidos y la justificación de solución. El Capítulo 2 introduce el tema a través de un breve marco referencial de antecedentes teóricos. En particular se hace énfasis en técnicas de control PID y algoritmos bio-inspirados. El Capítulo 3, denominado aspectos metodológicos, incluye la metodología de diseño, el diseño mismo, y la justificación del algoritmo de control seleccionado. El Capítulo 4 presenta los resultados alcanzados a través de la evaluación de desempeño realizada al prototipo, y finalmente, en la parte final se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo.

Planteamiento del problema

Al implementar controladores PID en aplicaciones reales de control, el gran reto para una respuesta óptima del sistema radica en la determinación de los valores adecuados de sus constantes (K_p, K_i, K_d). Para abordar este problema, existen documentados diferentes métodos tradicionales, como es el caso de la estrategia de Ziegler-Nichols y del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) entre otros. Estas estrategias tradicionales proporcionan herramientas de sintonización relativamente simples, con resultados bastante aceptables en condiciones normales, es decir, cuando se trabaja con plantas estables y de bajo orden.

Los problemas conocidos de desempeño de los controles PID nacen cuando se trata de implementar este esquema de control sobre plantas de orden superior o con problemas de estabilidad. Para mejorar el desempeño de estos controladores (inicialmente analizando sus características de sobrepaso y estabilización del sistema), se plantea la modificación de las estrategias de sintonización tradicionales utilizando herramientas bio-inspiradas. Estas herramientas hoy en día son muy utilizadas en problemas de optimización, dada su comprobada eficacia. En particular, se plantea el

uso de los Algoritmos Genéticos (AG) y del Enjambre de Partículas (PSO) como posibles herramientas de soporte en el diseño y sintonización de controles PID, propuesta que se evaluará sobre plantas tipo frente a las estrategias tradicionales, y otras estrategias planteadas y reportadas en la literatura especializada.

Esta investigación se enfoca en la resolución de problemas de estimación e identificación de las constantes para la sintonización de controladores PID (proporcional, integral, derivativo). Se presentan dos técnicas de búsqueda bio-inspirada con la intención de evaluar su desempeño en el ajuste del bloque PID: Algoritmos Genéticos y Enjambre de Partículas. Ambas estructuras han probado ser capaces resolver de forma eficiente problemas de búsquedas no informadas en sistemas complejos, y es la intención de este trabajo compararlas sobre un esquema de control muy utilizado en la industria. El planteamiento inicial considera la evaluación sobre dos plantas (segundo y tercer orden) las cuales servirán de modelo para determinar el desempeño, incluso frente a técnicas de ajustes tradicionales.

Aspectos metodológicos

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, la presente se desarrolló bajo la modalidad de medios de simulaciones, diseño, implementación y detección de fallos, con base en los conceptos y a las diferentes pruebas obtenidas, en el programa escogido para el desarrollo de esta investigación MATLAB. En primer lugar se desarrollarán los algoritmos propuestos (AG, PSO, ZN, LGR) para implementarlos en el controlador PID, realizando pruebas de acierto y error, para poder determinar de esta manera la funcionalidad de estos, y las medidas necesarias que se deberán tomar, como pueden ser ajustes o modificaciones en el código, para un mejor funcionamiento de la base de control. Luego de identificar los errores y de haber realizado los posibles ajustes, se podrá determinar y evaluar la estructura final de los algoritmos planteados, comprobando su efectividad mediante la utilización de dos plantas de segundo orden y dos de tercer orden, la cual guiará este proyecto de investigación hacia una respuesta adecuada a los objetivos planteados, reforzándose con la investigación teórica desarrollada con anterioridad.

Definición y selección de plantas

A modo de comparación se utilizaron las plantas que propone Vrancic (Maia et al., 2005). debido a que estas plantas presentan problemas en la sintonización de controladores PID. El primer caso es una planta de orden superior:

$$G_1 = \frac{5}{s^4 + 3s^3 + 7s^2 + 5s} \quad (1)$$

El segundo caso es una planta con tiempo de retraso largo:

$$G_2 = \frac{e^{-2t}}{(1+s)^3} \quad (2)$$

El tercer caso es una planta de segundo orden:

$$G_3 = \frac{1}{s^2 + 8s + s} \quad (3)$$

El cuarto caso es una planta de orden superior de fase no mínima:

$$G_4 = \frac{-10s + 1}{s^2 + 2s + s} \quad (4)$$

Características de las respuestas

Análisis de la respuesta transitoria . En el análisis y diseño de un sistema de control, es necesario tener una base de comparación del desempeño de diversos sistemas de control, esta base se configura especificando las señales de entrada de prueba y comparando las respuestas de varios sistemas a estas señales de entrada. Los valores de las constantes K_p, K_i, K_d son los que determinan el correcto funcionamiento del controlador PID, de esta manera existen parámetros que optimizan la labor del sistema en mejora de la producción y economía de energía.

Respuesta transitoria en estado estable . En un sistema de control la respuesta en el tiempo consta de dos partes, la respuesta transitoria que hace referencia a la que va del estado inicial al estado final y la respuesta en estado estable en la cual se comporta la salida del sistema conforme t tiende a infinito.

Estructura para el problema PID

Los algoritmos genéticos se han utilizado para resolver problemas complejos con funciones objetivo que no poseen buenas propiedades como diferenciabilidad y continuidad, destacando su búsqueda de mejores soluciones con la implementación de los individuos mejor adaptados en la manipulación de una población y ofreciéndonos una mayor exploración de regiones simultáneamente.

Al desarrollar el algoritmo genético se deben tener en cuenta ciertos aspectos los cuales son determinantes para obtener resultados satisfactorios. Los parámetros iniciales de diseño para desarrollar el algoritmo genético se pueden indicar como: los valores iniciales de entrada, elección de la señal de referencia, generación de población inicial, convertir a valor real los individuos de la población, evaluación de la función objetivo que representa evaluar el ITAE entre la señal de referencia y la salida de la planta en lazo cerrado a controlar, asignación de aptitudes dependiendo del valor de la evaluación de la función objetivo, seleccionar los individuos más aptos, cruce de individuos, mutación de los genes de la población de forma aleatoria, elitismo cumpliendo la labor de completar el tamaño de la población

con los mejores individuos de la población anterior y finalmente la convergencia que nos amplía el espacio de búsqueda en cada determinado número de iteraciones.

Diagrama de flujo del algoritmo genético en la sintonización de un PID.

A continuación se puede observar el diagrama de flujo utilizado para la sintonización de un controlador PID mediante un algoritmo genético.

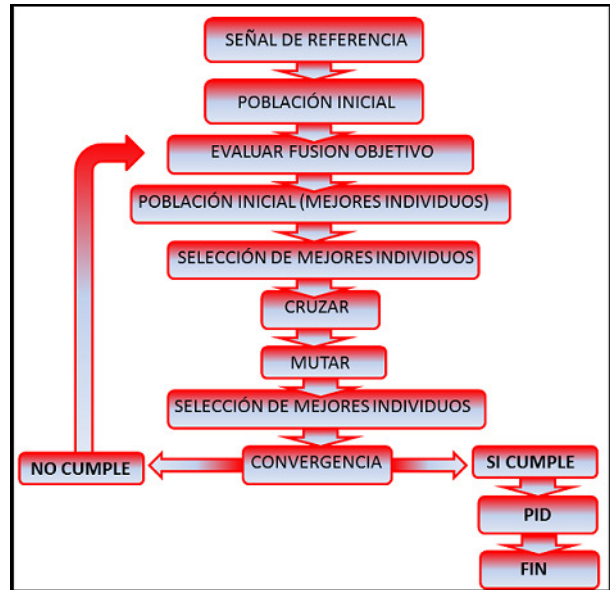


Figura 1. Diagrama de Flujo (AG).

Diagrama de flujo del algoritmo (PSO) en la sintonización de un PID.

A continuación se puede observar el diagrama de flujo utilizado para la sintonización de un controlador PID mediante la optimización por enjambre de partículas o Particle Swarm Optimization (PSO)

Evaluación de desempeño

Error

Como lo indica CHEN (C. Chen, 1993) cuando en un sistema de control la salida no coincide con la señal de referencia, que por lo general es la entrada el sistema presenta un error $e(t)$. Para una señal de entrada $r(t)$ y una señal de salida $y(t)$ el error está dado por:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5)$$

Y su función de transferencia es:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (6)$$

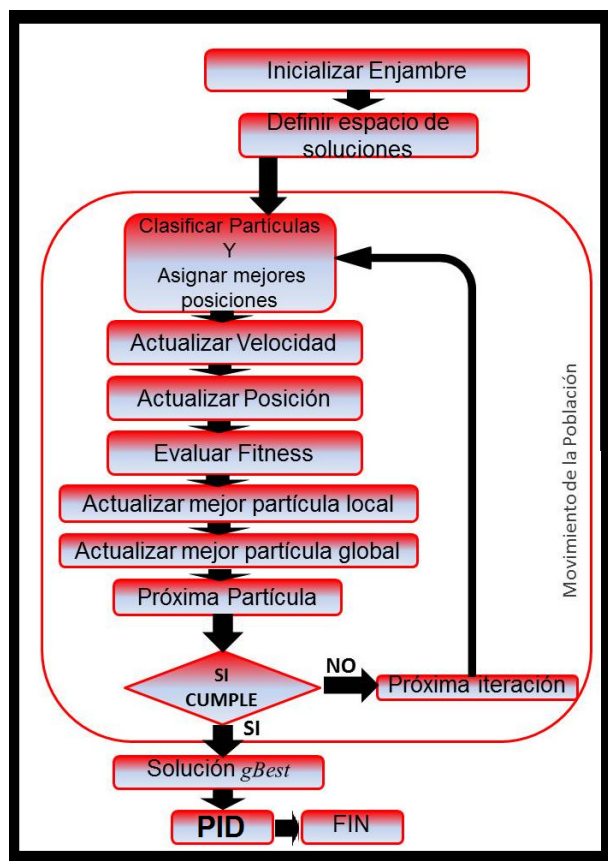


Figura 2. Diagrama de Flujo (PSO).

El error en estado estable ($e_{s,s}$) se halla de la siguiente forma:

$$E_{(s,s)} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s * E(s) \quad (7)$$

Para hacer el análisis del error en un periodo T , se elige alguno de los siguientes criterios de evaluación.

Integral del cuadrado del error: Penaliza los errores iniciales.

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (8)$$

Integral del valor absoluto del error: Muestra las características de respuesta entre las dos señales.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (9)$$

Integral del valor absoluto del error por el tiempo: Penaliza los errores en el tiempo.

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (10)$$

Análisis comparativo

Para los resultados obtenidos los algoritmos AG y PSO fueron ajustados con los parámetros mostrados en la tabla 1.

- K_s = valor de la constante del sensor.
- t_e = intervalo de tiempo en el que se evalúa la función objetivo.
- t_1 =intervalo de tiempo en que se evalúan todas las señales.

Análisis para G1. Los resultados obtenidos aplicando los métodos *LGR*, *ZN*, *AG* Y *PSO* en *G1* se pueden apreciar en las Fig 3 y 4y en la tabla 2.

Tabla 2

Resultados de la simulación de G1.

PARÁMETRO	ZN	AG	PSO
Peak Response	1.62	1.12	1.9
Settling Time(sec)	18.3	13.2	8.5
Rise Time	1.11	0.92	0.51
K_p	0.9098	0.0059	0.8387
K_i	0.3999	1.2413	0.4795
K_d	0.5175	0.9710	0.8444

Análisis para G2. Los resultados obtenidos aplicando los métodos *LGR*, *ZN*, *AG* Y *PSO* en *G2* se pueden apreciar en las Fig 5y6 y en la tabla 3.

Tabla 3

Resultados de la simulación de G2.

PARÁMETRO	ZN	AG	PSO
Peak Response	1.79	1.5	1.12
Settling Time(sec)	51.1	25.2	46.5
Rise Time	0.391	0.51	10
K_p	0.8285	0.2122	0.0873
K_i	0.1559	0.6627	0.3868
K_d	1.1004	0.4702	0.0731

Análisis para G3. Los resultados obtenidos aplicando los métodos *LGR*, *ZN*, *AG* Y *PSO* en *G3* se pueden apreciar en las Fig 7 y 8 y en la tabla 4.

Análisis para G4. Los resultados obtenidos aplicando los métodos *LGR*, *ZN*, *AG* Y *PSO* en *G4* se pueden apreciar en las Fig 9y10 y en la tabla 5.

Costos computacionales

Al desarrollar este tipo de algoritmos bio-inspirados se debe tener en cuenta el costo a nivel de software el cual es considerablemente grande, ya que al ser compilados estos algoritmos consumen gran cantidad de memoria en un equipo, Al ser algoritmos de carácter de búsqueda

Tabla 1

Parámetros de los algoritmos AG Y PSO.

PARÁMETRO	AG	PSO
Mp=Sobrepaso máximo	0.2	0.2
T1= Tiempo de estabilización	10	10
Señal de Referencia	Escalón Unitario	Escalón Unitario
Longitud	[24 24 24]	-
Limites	[0 0 0,10 10 10]	-
Base	[2 2 2]	-
ks	1	1
te	0:delta:t1;	0:delta:t1;
t1	60	60
Iteraciones	20	20
C1	-	0.12
C2	-	1.2
w	-	0.9
Rand1,Rand2	-	Aleatorio

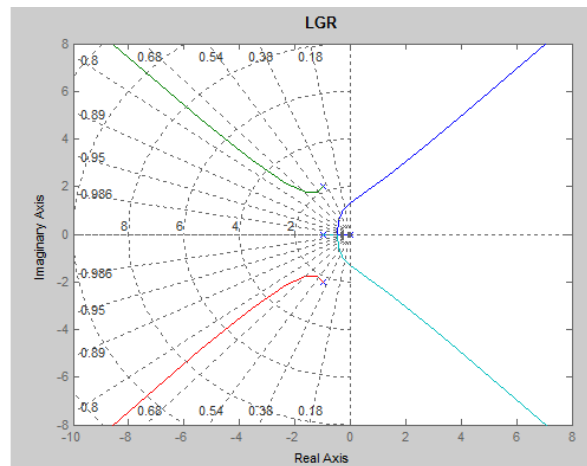
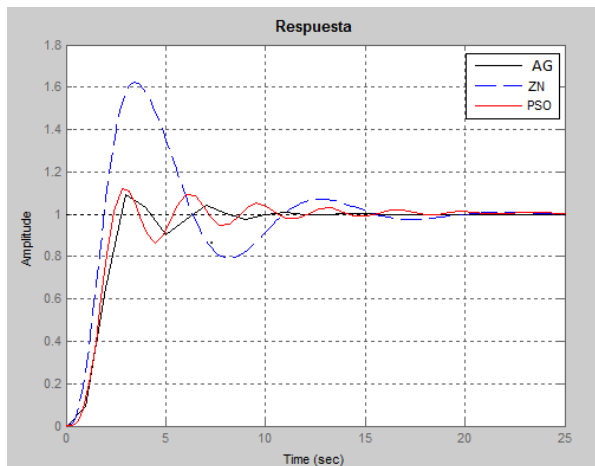


Figura 3. Respuesta LGR, ZN, AG, PSO.

Tabla 4

Resultados de la simulación de G3.

PARÁMETRO	ZN	AG	PSO
Peak Response	1.68	1.16	1.37
Settling Time(sec)	4.88	1.2	0.9
Rise Time	0.167	0.48	0.16
Kp	30.0376	5.8913	1.2043
Ki	20.2800	99.9937	992.0818
Kd	1.1206	2.0147	9.9775

Tabla 5

Resultados de la simulación de G4.

PARÁMETRO	ZN	AG	PSO
Peak Response	-1.83	-1.56	-0.56
Settling Time(sec)	472	57.5	42.56
Rise Time	210	23.61	9.85
Kp	0.0393	0.0852	0.0453
Ki	0.0060	0.1446	0.1090
Kd	0.0647	0.1544	0.0933

desarrollan gran cantidad procesos iterativos para poder encontrar el mejor individuo, ya sea de la población para el enjambre de partículas o el descendiente más apto en los

algoritmos genéticos, en ambos casos se utilizan tiempos considerables para realizar la búsqueda.

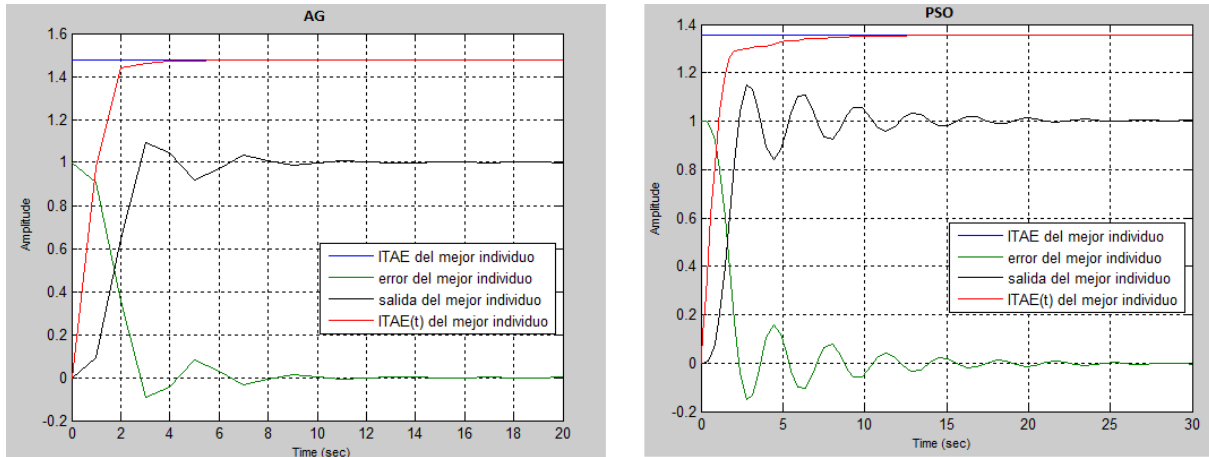


Figura 4. Señales que producen los mejores individuos de (AG) y (PSO).

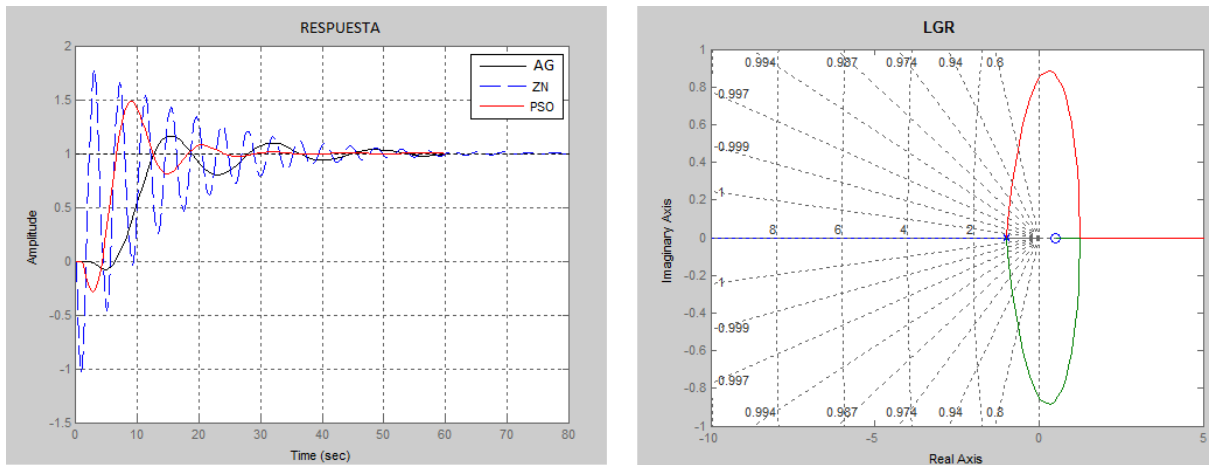


Figura 5. Respuesta LGR, ZN, AG, PSO.

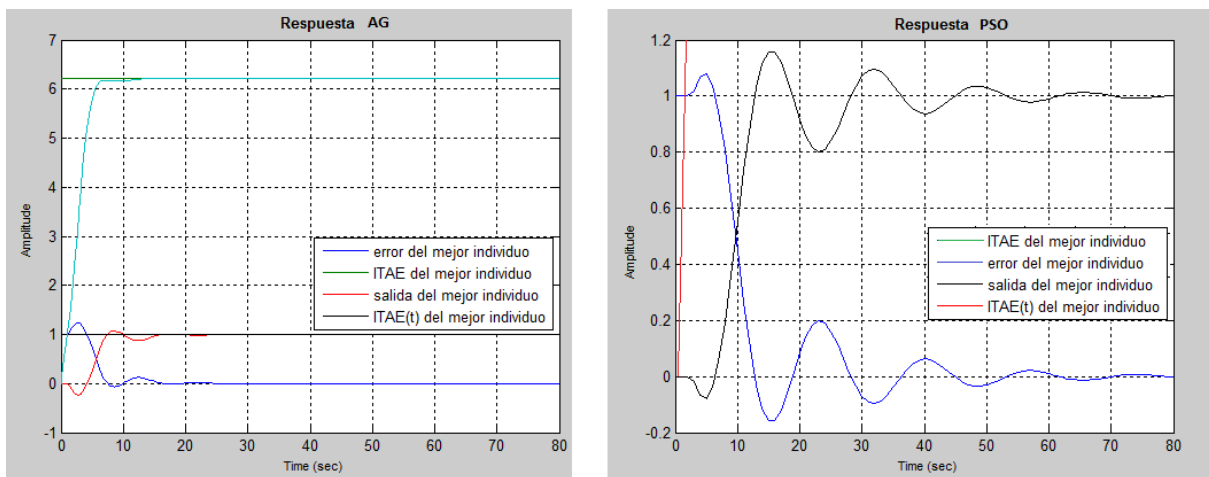


Figura 6. Señales que producen los mejores individuos de (AG) y (PSO).

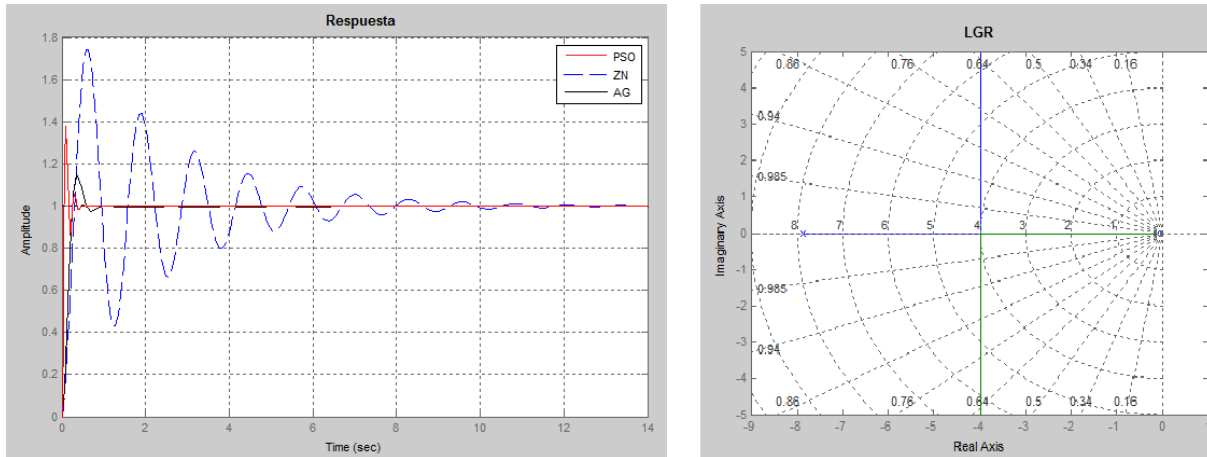


Figura 7. Respuesta LGR, ZN, AG, PSO.

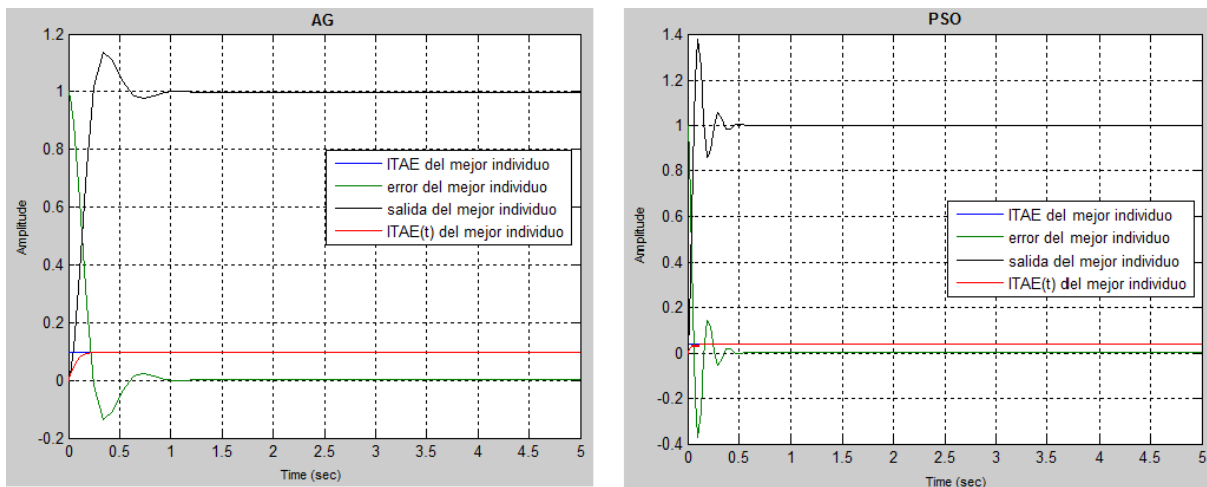


Figura 8. Señales que producen los mejores individuos de (AG) y (PSO).

Conclusiones

Se desarrollaron dos algoritmos bio-inspirados con los cuales se realizaron diversas pruebas de sintonización de bloques de control PID, en las cuales se implementaron plantas de ordenes diferentes e igualmente de diversas complejidades obteniendo resultados con desempeños superior en tiempos de estabilización, sobrepaso en las señales y error en el tiempo estacionario, frente a los métodos tradicionales reportados en investigaciones similares. Se pudo comprobar que los algoritmos genéticos son métodos con estructuras simples que implementan operadores genéticos desarrollando una búsqueda del mejor individuo, implementando un mecanismo de adaptación de resolución de problemas de manera que si el problema cambia este puede seguir solucionándolo de manera rápida y eficaz. Los dos algoritmos son bastante efectivos para la solución tanto de sistemas complejos, lineales y no

lineales destacando que la efectividad radica en una adecuada función objetivo ya que la eficiencia depende de esta. Los algoritmos bio-inspirados implementados en esta investigación obtuvieron mejores resultados en comparación a los métodos tradicionales de sintonización de controladores PID. Destacando su efectividad en plantas con retardos y de orden superior.

Referencias

- Ang, K. H., Chong, G., y Li, Y. (2005, June). Pid control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576. (ISSN 1063-6536)
- Chen, C. (1993). *Analog and digital control system desing transfer function state space and algebraic methods* (I. edition, Ed.). Int edition.

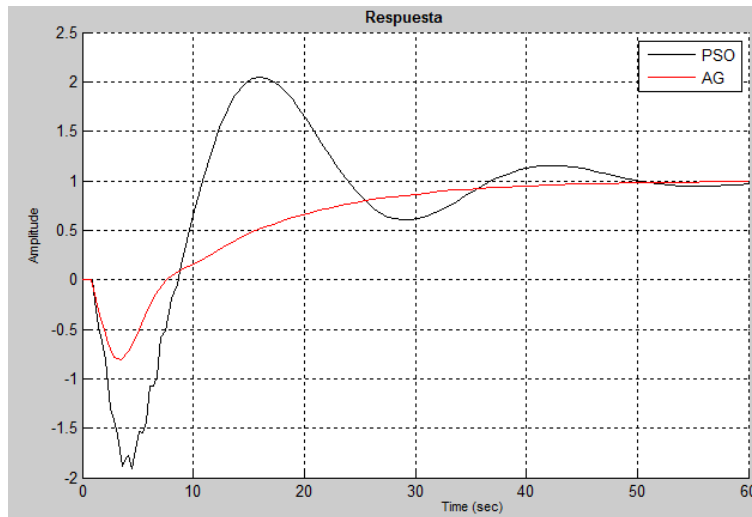


Figura 9. Respuesta AG, PSO.

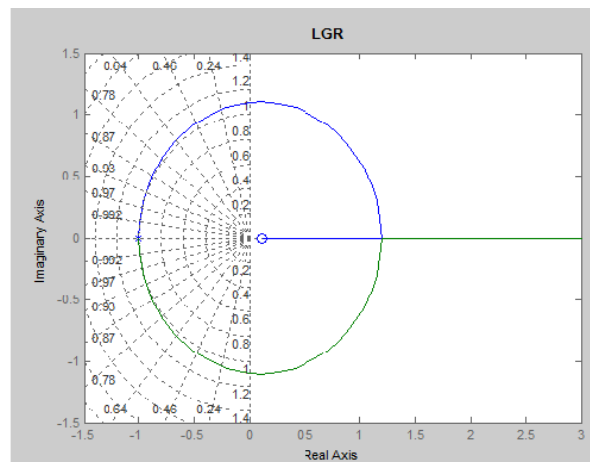
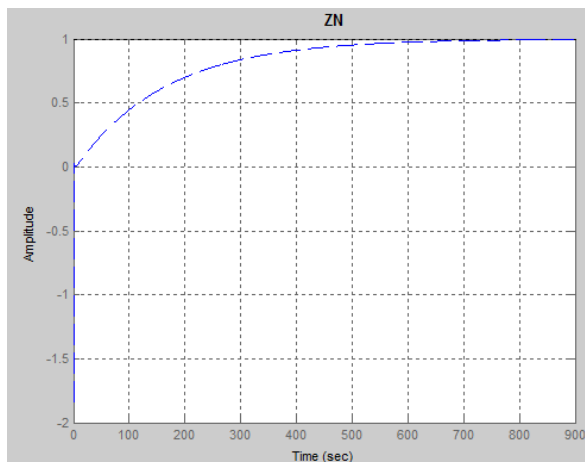


Figura 10. Respuesta ZN, LGR.

- Chen, Y. (2011, July). Design and implementation of pid controller based on fpga and genetic algorithm. En *2011 international conference on electronics and optoelectronics iceoe* (Vol. 4, p. 308-311). (ISBN 978-1-61284-275-2)
- Garcia Nieto, J., Chicano, F., y E., A. (2009). *Optimization techniques for solving complex problems* (E. Alba, C. Blum, P. Asasi, C. Leon, y J. Gomez, Eds.). Wiley & Sons. (ISBN: 978-0-470-29332-4)
- Guerra, N., y Crawford, B. (2006, August). Optimización de funciones a través de optimización por enjambre de partículas y algoritmos genéticos. *32a Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI2006*, 2, 17. Retrieved from pitagoras.usach.cl/~gfelipe/clei/sesiones/sesion_6/Pdf_6/254.pdf

- He, H., Liu, F., Li, L., Yang, J., Su, L., y Wu, Y. (2009, August). Study of pid control system for ant colony algorithm. En *Wri global congress on intelligent systems gcis '09* (Vol. 1, p. 204-207). (ISBN 978-0-7695-3571-5)
- Luo, Y. (2011, June). Synthesis of robust pid controllers design with complete information on pre-specifications for the foptd systems. En *2011 american control conference acc* (p. 5013-5018).
- Luo, Y., y Li, L. (2010, January). Tuning pid control parameters on hydraulic servo control system based on chaos quantum-behaved particle swarm optimization algorithm. En *2010 international conference on logistics systems and intelligent management* (Vol. 3, p. 1861-1864). (ISBN 978-1-4244-7331-1)

- Maia, G., Vieira, V., Geraldo, E., y Yokoyama, R. (2005). Application of genetic programming for fine tuning pid controller parameters designed through ziegler-nichols technique. *Springer, 1*, 60.
- Meng, X., y Song, B. (2007). Fast genetic algorithms used for pid parameter optimization. *International conference on automation and logistics, 1*, 28.
- Moradi, M. H. (2003, June). New techniques for pid controller design. En *Proceedings of 2003 ieee conference on control applications cca 2003* (Vol. 2, p. 903-908). (ISBN 0-7803-7729-X)
- Petrov, M., Ganchev, I., y Taneva, A. (2002, December). Fuzzy pid control of nonlinear plants. En *Proceedings 2002 first international ieee symposium intelligent systems* (Vol. 1, p. 30-35). (ISBN 0-7803-7134-8)
- Pinto, P. (2009). Diseño y construcción de un sistema de simulación de control de motores eléctricos (s2cme). *Universidad Pedagógica Nacional, Departamento de Tecnología, 1*, 30.
- Vásquez, M., y Martínez, F. (2011). Diseño y construcción de control híbrido difuso-deslizante para convertidor dcdc tipo boost. *Revista Tekhnê, 8*, 31-40.
- Wei, T., y Zhang, S. (2008, January). Active queue management based on particle swarm optimization pid algorithm. En *11th ieee singapore international conference on communication systems iccs 2008* (p. 523-526). (ISBN 978-1-4244-2423-8)
- Xiao, L. (2010, July). Hybrid genetic algorithm and application to pid controllers. En *2010 chinese control and decision conference ccdc* (p. 586-590). (ISBN 978-1-4244-5181-4)
- Xiao-Gen, S., Li-Qing, X., y Cheng-Chun, H. (2009, June). Optimization of pid parameters based on genetic algorithm and interval algorithm. En *Chinese 2009 control and decision conference ccdc '09* (p. 741-745). (ISBN 978-1-4244-2722-2)
- Zeng, Q., y Tan, G. (2007, November). Optimal design of pid controller using modified ant colony system algorithm. En *Third international conference on natural computation icnc 2007* (Vol. 5, p. 436-440). (ISBN 978-0-7695-2875-5)