

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID DE NIVEL EN UN TANQUE USANDO ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

ANALYSIS AND COMPARISON OF PID LEVEL CONTROLLER TUNING IN A TANK USING OPTIMIZATION ALGORITHMS

Victor Joel Moreno Ramos¹, Martin Alonso Narváez Grijalba², Paul Oscar Ramirez Zamudio³, Juan Diego Sánchez Agreda⁴, Jasmell Henry Alva Alcántara⁵, Edgar André Manzano Ramos⁶

¹²³⁴Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Mecatrónica, Av. Juan Pablo II s.n., Trujillo, La libertad, Perú, vmoreno@unitru.edu.pe mnarvaez@unitru.edu.pe pramirez@unitru.edu.pe jsanchezag@unitru.edu.pe josalva@unitru.edu.pe emanzano@unitru.edu.pe

RESUMEN

Actualmente en las industrias, la búsqueda de optimizar controladores de nivel en depósitos o tanques es uno de los requisitos más buscados. Gran parte de los procesos industriales cuentan con estos sistemas, bien para el bombeo de líquidos o su almacenamiento en tanques, un claro ejemplo es en sistemas de prevención como el almacenamiento de agua para incendios o para fines reutilizables como el tratamiento de aguas residuales. Teniendo en cuenta lo mencionado se tomará como objeto de estudio el control de nivel de agua en un tanque en el entorno Factory IO. La planta tendrá dos válvulas para el control de caudal, una de flujo constante y la otra de flujo variable. Primero se planteó el objetivo de control, establecer la estructura de control, identificación y descripción de elementos, obtener el modelo de la planta y diseñar el controlador. Para el control PID se usó la sintonización Ziegler Nichols. También se planteó la optimización de los parámetros PID por medio de algoritmos genéticos (AG), algoritmo de colonia de abejas (ABC), algoritmo de enjambre de partículas (PSO) y algoritmo de evolución diferencial. Estos algoritmos nos permitieron comparar y analizar las diferentes respuestas del controlador en tiempos de establecimiento y sobreelongación para obtener los mejores resultados. Finalmente, los valores obtenidos para los algoritmos en tiempos de establecimiento: AG: 2.17seg, PSO: 8.04seg, ABC: 6.87seg, ED:7.69seg. Además, en términos de sobreelongación se obtuvo AG:1.24 %, PSO: 1.01, ABC: 6.87seg, ED:7.69seg.

Palabras clave: Algoritmos de optimización, establecimiento, PID, sintonización.

ABSTRACT

Currently, one of the most sought-after requirements in industries is optimizing level controllers in reservoirs or tanks. Most of the industrial processes have these systems, either for pumping liquids or their storage in tanks, a clear example is in prevention systems such as water storage for fire or reusable purposes such as wastewater treatment. Taking into account the above mentioned, the water level control in a tank in the Factory IO environment will be taken as the object of study. Our plant will have two valves for flow control, one with constant flow and the other with variable flow. The first step was to set the control objective, set the control structure, identify and describe the elements, obtain the plant model and design the controller. To perform the PID control was used Ziegler Nichols tuning. Also, we proposed the optimization of the PID parameters utilizing artificial intelligence, using genetic algorithms (GA), bee colony algorithm (ABC), particle swarm algorithm (PSO), and differential evolution algorithm. These algorithms allowed us to compare and analyze the differences between controllers of responses in settling and over-elongation times to obtain the best results. Finally, the values obtained in terms of establishment time were: AG: 2.17seg, PSO: 8.04seg, ABC: 6.87seg, ED:7.69seg. Besides, in terms of overshoot were AG:1.24 %, PSO: 1.01, ABC: 6.87seg, ED:7.69seg.

Keywords: Optimization algorithms, establishment, PID, tuning.

*Autor para correspondencia: vmoreno@unitru.edu.pe

INTRODUCCIÓN

En las industrias una de las variables más comunes que se desea controlar y optimizar viene a ser el nivel en depósitos o tanques de recursos hídricos. Un claro ejemplo son los sistemas de prevención como el almacenamiento de agua para incendios o para fines reutilizables como el tratamiento de aguas residuales. Por tal motivo es necesario diseñar con un sistema de control que actúe de manera eficiente. Más de la mitad de los controladores industriales que se usan actualmente tienen esquemas de control PID. La sintonización de los mismos ha demostrado un control satisfactorio, sin embargo, ante situaciones específicas o sintonizaciones inadecuadas no aportan un control óptimo (Ogata 2010).

Entre las técnicas convencionales más usadas para sintonizar los controladores PID se encuentran los métodos de Ziegler -Nichols. Este proceso se encarga de encontrar los parámetros del controlador basando sus reglas que cumplan con especificaciones de comportamiento deseadas. Sin embargo, si la sintonización no resulta ser la adecuada la respuesta puede volverse inestable, presentar gran sobreelongación o que las características de su respuesta transitoria sean no deseadas (Ogata 2010).

Actualmente muchas investigaciones en búsqueda de mejorar los resultados que se obtienen con métodos tradicionales de

sintonización optan por usar técnicas de optimización obteniendo resultados más ajustados al comportamiento deseado, es decir una mejor respuesta transitoria. Algunos de estos algoritmos de optimización son algoritmos genéticos (AG), colonia de abejas (ABC), enjambre de partículas (PSO) y evolución diferencial (ED). Un claro ejemplo es el desarrollado por Balcázar donde utiliza algoritmos genéticos para mejorar el control de nivel de una planta previamente sintonizada por los métodos convencionales de Ziegler Nichols (Balcázar 2017).

Los AG se basan en el empleo de la evolución natural como un proceso de optimización que utiliza tres operaciones básicas: selección, cruzamiento y mutación. Por medio de un conjunto de interacciones se halla una solución aceptable al problema (Ponce 2011). Los ABC caracterizan el comportamiento que tienen las abejas en búsqueda de néctar. Como modelo heurístico basado en un modelo biológico consta de tres elementos: Fuente de alimento, abejas recolectoras empleadas y abejas recolectoras desempleadas (Aguilar 2014). Los algoritmos de PSO imitan a una bandada de peces o pájaros mientras buscan alimento. Partiendo de la premisa que cada individuo cuenta con conocimiento de la información de la mejor posición encontrada y de igual manera con la de su propia mejor posición para dirigir su búsqueda (Giraldo 2011). Mientras que los algoritmos ED utilizan métodos derivados de la biología como

serían la herencia, selección natural, recombinación y mutación para encontrar un conjunto de soluciones. La diferencia que existe con los AG es un menor costo computacional y una implementación más simple (Hernández 2013).

Por todo lo antes mencionado se realizará el análisis y comparación de estos algoritmos de optimización con los métodos clásicos Ziegler-Nichols, en la sintonización de los parámetros del controlador PID de un tanque de nivel, con el fin de obtener una buena respuesta transitoria en términos de tiempo de establecimiento y sobreelongación (Tejada 2020). De igual manera se buscará comparar los tiempos de optimización y convergencia de cada algoritmo (Zecua 2019).

MÉTODOS

Descripción de elementos

El tanque simulado en el entorno Factory IO cuenta con dos válvulas de control y un sensor de nivel capacitivo como se muestra en la Fig.1. Las válvulas de control se controlan mediante actuadores neumáticos (0-10V). En la tabla 1 se presentan las características generales [8].

Tabla 1. Características del tanque de nivel

Característica	Valor
Altura	3 m
Diámetro	2 m
Radio de la tubería de descarga	0.125 m
Max. Caudal de entrada	0.25 m ³ /s
Max. Caudal de salida	0.3543 m ³ /s



Figura 1. Tanque de Nivel.

Identificación de la planta

Al contar con la planta simulada en Factory IO podremos obtener datos experimentales de tal manera que se posibilita la identificación no paramétrica del sistema. Esto permitirá un modelamiento más cercano a la realidad y diseñar un mejor sistema de control.

Primero definiremos un tiempo de muestreo de 0.07612s en el cual se recolectarán la data. Para ello trabajaremos bajo ciertas condiciones de operación a fin de determinar los rangos de operación en el cual el sistema se comporta adecuadamente.

Se eligió el rango de [3-6] V en los cuales la altura máxima y el voltaje tienen un comportamiento lineal. Se realizan las mediciones con los sets points de alimentación de la válvula: [3, 6, 10] V dejando que el sistema llegue a su altura de saturación y procediendo a variar el set point de acuerdo a lo mencionado hasta completar el

vaciado del tanque. Por tanto, el área de trabajo encontrado es desde 300 hasta 100 cm de altura.

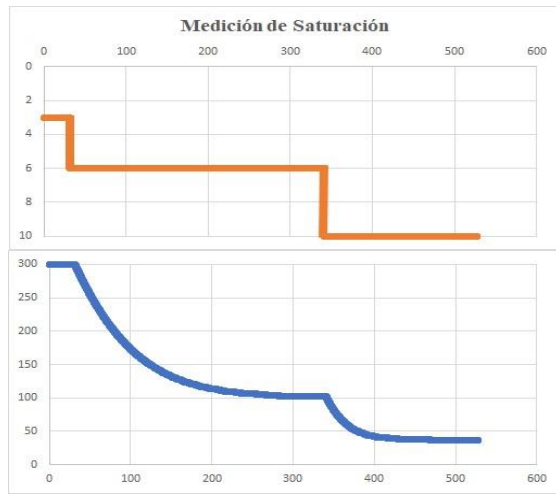


Figura 2. Relación entrada-salida del flujo.

Una vez determinado el rango de operación y acotar los datos se procedió a realizar la identificación y el uso del toolbox de Matlab.

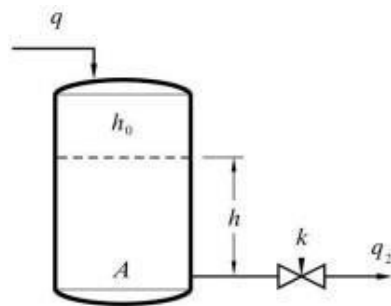


Figura 3. Esquema del tanque de Nivel [3].

Primero se desarrolló un análisis matemático de la figura 3 del cual se encuentran las siguientes ecuaciones:

$$q - q_2(t) = A \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$q_2(t) = A \sqrt{2gh(t)} \quad (2)$$

Al resolver las ecuaciones se obtiene que el comportamiento de la planta a identificar utilizando transformada de Laplace, presentando dos polos y dos ceros para una entrada escalón teniendo la forma como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{H(s)}{u(s)} = \frac{k_1 s^2 + k_6 s + k_7}{k_8 s^2 + k_9 s + k_{10}} \quad (3)$$

Donde $H(s)$ representa el nivel del líquido y $u(s)$ una entrada escalón y las constantes k_i , esto se comprueba a partir del ajuste de 99,44% que se obtiene en la identificación, sin embargo, para el desarrollo del control se asemejara el comportamiento de la planta a un sistema de primer orden con retraso, para así poder realizar el control por sintonización de Ziegler Nichols, para la cual se obtiene un ajuste semejante del 97.72% dentro del rango de $\pm 5\%$ como se aprecia en la figura 4.

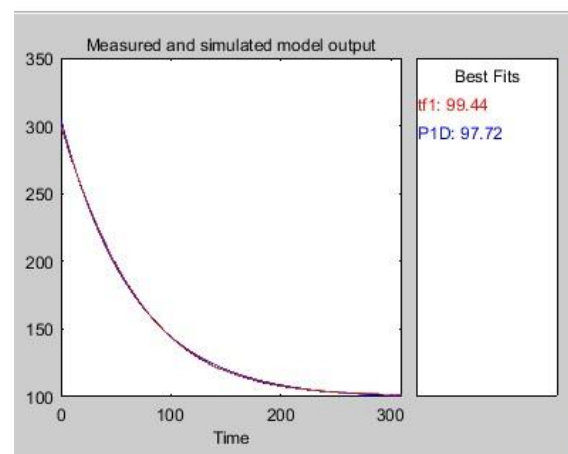


Figura 4. Curvas de ajuste de la Identificación.

$$G_P(s) = \frac{16.4167e^{-0.1131s}}{1+66.5658s} \quad (4)$$

Diseño del controlador clásico

Una vez obtenido el modelo de la planta utilizaremos el método de sintonización Ziegler Nichols de lazo abierto, para ello usáramos Matlab para obtener los valores de K_p , K_i y K_d usados en los distintos controladores P, PI y PID. Obtenemos los parámetros necesarios del sistema como se muestra en la figura 5.

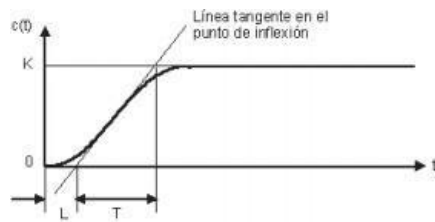


Figura 5. Parámetros a evaluar [1]

Donde:

Tabla 2. Valores T, K, L

	K	T	L
Valores	16.4167	66.5658	0.1131

Posteriormente hallamos las ganancias K_p , K_i y K_d usando la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de sintonización ZN.

	K_p	T_i	T_d
P	$T/(KL)$	-	-
PI	$0.9T/(KL)$	$3.33L$	-
PID	$1.2T/(KL)$	$2L$	$0.5L$

El controlador tendrá el siguiente diagrama de bloques:

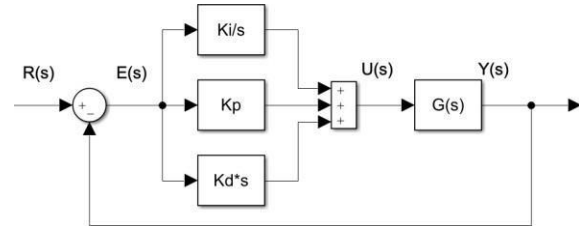


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador PID.

Reemplazando los valores en la Tabla 4 se obtienen las ganancias de cada bloque.

Tabla 4. Valores de las ganancias.

	K_p	K_i	K_d
P	35.85	-	-
PI	32.27	85.67	-
PID	43.021	190.19	2.433

Optimización de parámetros PID

El tiempo de retardo se obtuvo en la identificación de la planta y este fue necesario para realizar la sintonización Ziegler Nichols. Sin embargo, no lo consideraremos en el desarrollo de los algoritmos de optimización debido a que no influye en el comportamiento dinámico que puede ayudar al control PID.

Para poder obtener los parámetros más adecuados de K_p , K_i y K_d en los diferentes algoritmos de optimización se usará el error cuadrático medio (ECM) de la salida como parámetro de evaluación. El error cuadrático medio (ECM) es de la siguiente forma:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - 1)^2 \quad (5)$$

Donde:

- n = número de medidas totales
- Y_i = salida del sistema en el instante i
- $(Y_i - 1)^2$ = error cuadrático de la salida en el instante i con respecto al escalón de entrada.

Algoritmo genético (AG)

Los algoritmos genéticos son basados en los mecanismos de selección natural y genética, parten de la premisa de emplear la evolución natural como un procedimiento de optimización que se caracteriza por tener operaciones básicas que son:

- Selección
- Cruzamiento
- Mutación

Para nuestro estudio en la Tabla 5 se definirán los parámetros para desarrollar el algoritmo, dichos valores se tomaron como referencia del trabajo [8].

Tabla 5. Parámetros del AG.

Parámetro	Valor
Tamaño de población	20
Tasa de cruce	0.7
Tasa de mutación	0.1
Número de generaciones	300
Variables	3
Kp	[0-127]
Ki	[0-127]
Kd	[0-127]

El siguiente diagrama de flujo muestra las diferentes etapas de ejecución del AG:

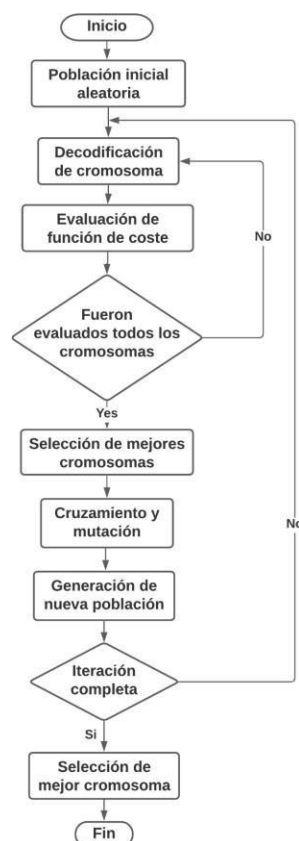


Figura 7. Secuencia de ejecución de un AG.

Algoritmo enjambre de partículas (PSO)

Algoritmo basado en técnicas de evolución computacional. Se desarrolló a partir de la investigación de enjambres, agregando parámetros de peso de inercia para mejorar el rendimiento; este peso de inercia irá disminuyendo linealmente durante las iteraciones. Este algoritmo evoluciona mediante la cooperación y la competencia entre ellos a través de generaciones. Cada partícula representa una posible solución a un problema. Cada una ajusta su vuelo de acuerdo con la propia experiencia y la experiencia global.

La posición se ajusta mediante la ecuación:

- $x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1)$ (6)

- $x_i(t + 1)$: Posición de partícula al paso t+1

- $x_i(t)$: Posición de partícula en el paso t

- $v_i(t + 1)$: Velocidad de partícula

La velocidad se ajusta mediante:

$$v_i(t + 1) = \omega(t) + c_1(t) * \text{rand}_1 * (pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2(t) \text{rand}_2 * (g \text{ best}(t) - x_i(t)) \quad (7)$$

Donde:

- c_1 :Componente local
- $pbest$: Partícula de mejor posición
- c_2 :Componente global
- $g \text{ best}$: Partícula de mejor posición global

Para obtener adecuadamente el algoritmo de PSO se debe ajustar los parámetros de la Tabla 3. Estos valores están basados en los trabajos [12].

Tabla 6. Parámetros del PSO.

Parámetro	Valor
Peso Inercial	0.729
Componente Local	1.494
Componente Social	1.494
Tamaño de enjambre	20
Iteraciones	300

El siguiente diagrama de flujo muestra las diferentes etapas de ejecución del PSO.

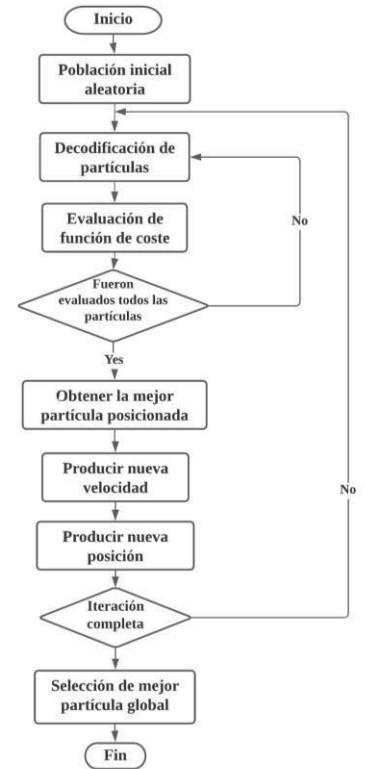


Figura 8. Secuencia de un algoritmo PSO.

Algoritmo colonia de abejas (ABC)

En este algoritmo se trata de emular el comportamiento de las abejas. Considerando como característica principal la búsqueda en un área local y en un área aleatoria en torno a una vecindad predeterminada.

A continuación, utilizaremos los parámetros en la

Parámetro	Valor	Tabla 7 para
Tamaño de población	20	
Número de generaciones	400	
Variables	3	
Kp	[0-100]	
Ki	[0-100]	

implementar nuestro algoritmo ABC.

Tabla 8. Parámetros del ABC

El siguiente diagrama de flujo muestra las diferentes etapas de ejecución del ABC.

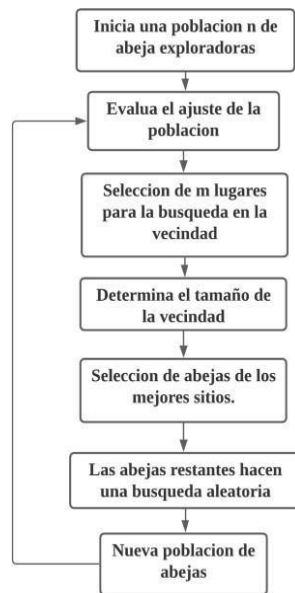


Figura 9. Secuencia de un algoritmo ABC. Es un proceso de búsqueda donde se generan nuevos vectores que tratan de reemplazar a la población anterior utilizando la evolución diferencial. Este algoritmo se basa en la optimización estocástica para problemas numéricos relacionados con la búsqueda poblacional [9].

Este proceso tiene una etapa de inicialización, etapa demutación y una etapa de cruce. Los parámetros a considerar serán los siguientes:

- Lb: Límite superior.
- Lu: Límite inferior.

- D: Número de dimensiones.
- Np: Tamaño de la población.
- Pc: Probabilidad de cruce.
- F: Peso aplicado al vector mutado
- T: Número de interacciones.

Para nuestro estudio en la Tabla 8 se definirán losparámetros del trabajo [12].

Tabla 8. Parámetros del AG.

Parámetro	Valor
Tamaño de población	20
Tasa de cruce	0.9
Tasa de mutación	0.1
Número de generaciones	100
Variables	3
Kp	[0-100]
Ki	[0-100]
Kd	[0-100]

El siguiente diagrama de flujo muestra las diferentes etapas de ejecución Algoritmo ED.

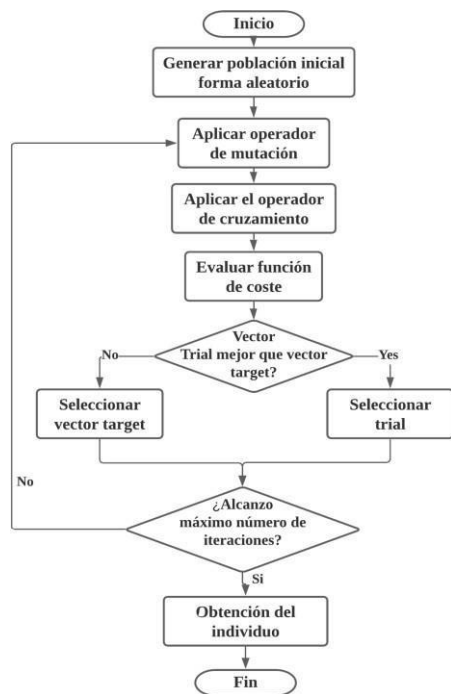


Figura 10. Secuencia de un algoritmo ED.

RESUTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado obtuvimos los valores de las ganancias obtenidas para cada algoritmo de optimización y mediante la sintonización de Ziegler Nichols. Además, con las gráficas de respuesta escalón de cada sintonización PID como se ve en la Figura 11 se obtienen los tiempos de establecimiento: ‘ts’, tiempo pico: ‘tp’, y el porcentaje de máxima sobreelongación: ‘%Mp’. Estos resultados serán plasmados en la Tabla 9.

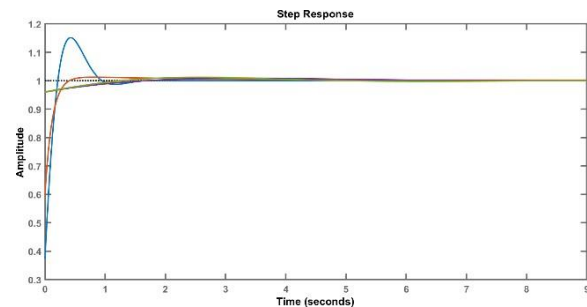


Figura 11. Respuesta con entrada escalón unitario.

La Figura 11 obtenida mediante la simulación en Matlab nos muestra un comportamiento correcto respecto al tiempo de establecimiento y sobreelongación de los diferentes algoritmos. Sin embargo, se puede observar un salto al inicio del sistema, por lo cual se podría suponer que la sintonización no está funcionando correctamente, por lo cual se procederá a realizar las pruebas respectivas en la planta de Factory I/O.

Tabla 9. Resultados finales del sistema controlado.

	Kp	Ki	Kd	ts(s)	tp(s)	%Mp
Z-N	43.02	190.19	2.43	1.23	0.43	15.1
AG	86	29	6	2.17	0.808	1.24
PSO	90.66	87.7	95.35	8.04	2.62	1.01
ABC	93.34	50.68	99.33	6.87	3.26	0.88
ED	99.99	99.99	99.99	7.69	2.49	1.17

Finalmente, en la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación de la planta y el control PID en el software Factory I/O, donde se observa el vaciado del tanque desde su punto máximo en un tiempo 0, para 300cm de nivel del líquido hasta un setpoint del 50% del nivel del tanque dentro del área de trabajo.

Además, se observa que la respuesta de la planta tiene una evolución esperada ante las distintas sintonizaciones obtenidas de los algoritmos, por lo que se ha de suponer que el comportamiento mostrado para los valores iniciales en la simulación de Matlab pueda deberse a la estructura de la función de transferencia final del sistema.

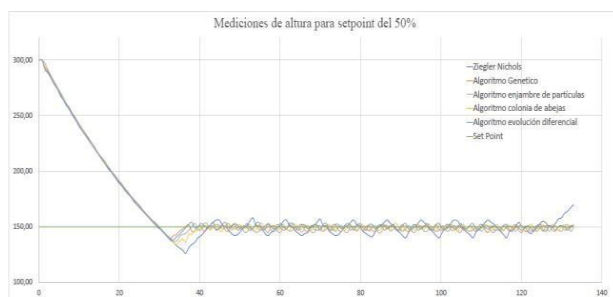


Figura 12. Resultados de simulación en Factory IO.

Con respecto a los algoritmos de optimización se evaluó sus tiempos de convergencia y su función de evaluación (Error cuadrático medio) estos resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros obtenidos de los algoritmos

	Tiempo de convergencia	Error Cuadrático Medio
AG	61.26	0.0179
PSO	62.25	6.577e-4
ABC	118.34	6.6136e-4
ED	32.47	5.7628e-4

CONCLUSIONES

El comportamiento de la planta se identificó a partir de la toma de datos del nivel de altura del

tanque para una determinada zona de trabajo [300 cm - 100 cm], las mediciones se realizaron con ayuda del software Tia Portal V 14 y el software de simulación Factory I/O. Para establecer el orden la función de transferencia de la planta se analizó el esquema del tanque de nivel, y se asemejó a una función de orden uno con retraso, obteniendo un ajuste en la identificación del 97,72 % con ayuda del toolbox de Matlab. Se realiza la sintonización con el método de Ziegler Nichols para realizar la contrastación con los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativos que se obtendrán a partir de la elaboración de los algoritmos de optimización: algoritmo genético (AG), algoritmo de optimización (PSO), algoritmo artificial de colonia de abejas (ABC) y algoritmo de evolución diferencial (ED). Finalmente se puede observar que en términos de sobreelongación el algoritmo que obtiene menor porcentaje es ABC con 0,88 %, mientras que en tiempos de establecimiento la sintonización por Ziegler Nichols obtiene mejor resultados, sin embargo, debido a su elevada sobreelongación es que se prefiere catalogar como óptimo a AG con 2,17seg. Además, en parámetros computacionales quien fue más eficiente en términos de tiempo de convergencia y error cuadrático medio fue el algoritmo ED con un tiempo de 32.47seg y error de 5.7268 e-4.

RECOMENDACIONES

Para la realización de trabajos futuros se recomienda trabajar a detalle con los parámetros

de los algoritmos con el fin de buscar una convergencia más rápida y una mayor precisión a una solución óptima. Para poder corregir el error de salto que genera Matlab al simular el sistema en su parte inicial usando las diferentes sintonizaciones, se sugiere realizar una investigación más enfocada en ese punto o

realizar una revisión bibliográfica más profunda para conocer la naturaleza del comportamiento. Se recomienda realizar variaciones a los parámetros de los diferentes algoritmos de tal forma que mediante que se pueda lograr obtener mejores resultados que los vistos en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Aguilar Justo, A. (2014). Un algoritmo basado en la colonia artificial de abejas con búsqueda local para resolver problemas de optimización con restricciones. Universidad Veracruzana <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/46834>
- Balcázar Llanos, J. (2017). Uso de Algoritmos genéticos para la sintonización de un controlador PID aplicado al control de nivel utilizando el entrenador de control de procesos 'DL 2314' del Instituto Superior Tecnológico Publico Nueva Esperanza. Universidad Nacional de Trujillo <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9482>
- Giraldo Fernandez, G. (2011). Método del Enjambre de partículas y evolución diferencial para el diseño de peso mínimo de un panel naval reforzado. Universidad Tecnológica de Bolívar <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0062054.pdf>
- Hernandez Torres, R., Irizar Mesa, M., Llanes Santiago, O., Camara, L., da Silva, A., & Zumalacarregui de Cardenas, L. (2013). Comparación de diferentes algoritmos metaheurísticos en la estimación de. Ingeniare, 14- 25 https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052014000100003
- IO, F. (s.f.). Docs Factory IO. Obtenido de <https://docs.factoryio.com>
- Iwan S., Mahmud, Fook T., Lee, Leap k., Moey. (2011). Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO). International Scientific Conference 2011 https://www.researchgate.net/publication/251442573_Tuning_of_PID_Controller_Using_Particle_Swarm_Optimization_PSO

- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson Educación
[https://www.academia.edu/9814191/Ingenieria de Control Moderna Ogata 5ed](https://www.academia.edu/9814191/Ingenieria_de_Control_Moderna_Ogata_5ed)
- Ponce Cruz, P. (2011). Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería. México: AlfaOmega
<https://lelinopontes.files.wordpress.com/2014/09/inteligencia-artificial-con-aplicaciones-a-la-ingenierc3ada.pdf>
- Roca A. (2014) Control Automático de procesos industriales. Ediciones Diaz de Santos
<https://www.editdiazdesantos.com/libros/roca-cusido-alfredo-control-automatico-de-procesos-industriales-L27007800401.html>
- Saad, M. S., Jamaluddin, H., & Darus, I. Z. M. (2012). Implementation of PID controller tuning using differential evolution and genetic algorithms. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 7761-7779 <http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf>
- Tejada Muñoz, G. (2020). Controlador PID con algoritmos genéticos de números reales. Industrial Data <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/16489>
- Zecua, M. Y. M., Vázquez, L. A. S., Pulido, L. F., Flores, E. A. P., & Arroyo, A. O. (2019). Evolución diferencial para la optimización global de procesos de ingeniería química https://rcs.cic.ipn.mx/2019_148_8/Evolucion%20diferencial%20para%20la%20optimizacion%20global%20de%20procesos%20de%20ingenieria%20quimica.pdf