

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN REGULADOR PID DEL
FLUJO DE UN LEVITADOR NEUMÁTICO**Laura Colín Rivas¹Juan Fernando García Mejía²Allan Antonio Flores Fuentes³

Recibido: 01/10/2020

Aprobado: 30/10/2020

Resumen

Los algoritmos evolutivos son un área de las tecnologías de la información que permiten problemas de optimización, tanto combinatorios como numéricos. Un ejemplo de problema de optimización numérica es el ajuste de las ganancias de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo, el cual, en esta propuesta, es aplicado a la regulación de altura de un levitador neumático. Este es un dispositivo electromecánico que eleva de manera controlada un objeto a partir de las variaciones de un determinado flujo de aire. El algoritmo aplicado fue una Evolución Diferencial, que tiene como objetivo la minimización del error cuadrático medio del levitador a una entrada escalón. Esto permite obtener un controlador con mejores índices de desempeño que el obtenido por el criterio de Ziegler-Nichols.

Palabras-clave: Levitador neumático-Criterio de Ziegler-Nichols-Evolución Diferencial

Abstract

Evolutionary algorithms are an area of information technologies that allow optimization problems, both combinatorial and numerical. An example of a numerical optimization problem is the adjustment of the gains of a Proportional-Integral-Derivative controller, which, in this proposal, is applied to the height adjustment of a pneumatic levator. This is an electromechanical device that lifts an object in a controlled manner

¹ M. en Ciencias de la Computación. Universidad Autónoma del Estado de México.

icolinr@uaemex.mx

² Dr. en Proyectos. Universidad Autónoma del Estado de México. fgarciam@uaemex.mx

³ Dr. Ciencias de la Electrónica. Universidad Autónoma del Estado de México.

aafloresf@uaemex.mx

based on variations in a certain air flow. The applied algorithm was a Differential Evolution, which aims to minimize the mean square error of the levitator at a step input. This allows obtaining a controller with better performance indices than that obtained by the Ziegler-Nichols criterion.

Keywords: Pneumatic levator-Ziegler-Nichols Criterion-Differential Evolution

▪ Introducción

Los levitadores neumáticos son dispositivos electromecánicos que tiene como propósito elevar un objeto a partir de las variaciones de un determinado flujo de aire, suministrados por medio de un ventilador. Tienen aplicación en la industria alimenticia, en los sistemas de seguridad de algunos comercios en donde se realiza el traslado de valores de un punto a otro y como objeto de estudio de ingeniería de control, dado que tienen una construcción simple permiten el diseño, desarrollo y pruebas de nuevas estrategias de control. La Ilustración 1 muestra los bloques de un levitador neumático constituidos por un sensor de distancia, ya sea ultrasónico o laser, como objeto levitante una esfera de material ligero como el unicel, un tubo de acrílico transparente que permite visualizar la elevación del objeto y un ventilador (Chitoide, 2008).

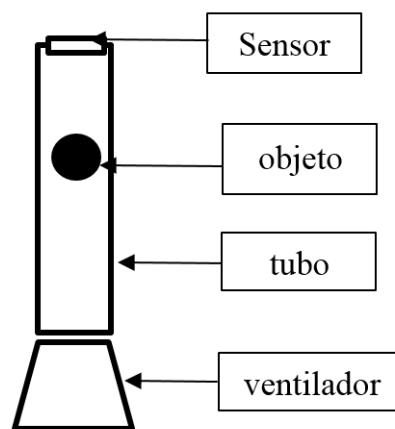


Ilustración 1. Diagrama esquemático de un levitador neumático constituido por un ventilador y un tubo de acrílico transparente

El comportamiento de los levitadores neumáticos pueden regularse por medio de sistemas de control que están formados por una combinación de componentes con interacciones en común, que tienen como objetivo lograr un funcionamiento y respuesta determinada, regulada con relación a una señal de entrada determinada, con el menor error, el cual se define como la diferencia entre la entrada y salida de un sistema a controlar (Duarte, 2007); un sistema de control formado por un elemento denominado

planta, que puede ser constituido por un elemento mecánico o eléctrico cuya respuesta es regulada por un dispositivo conocido como controlador que suele ser implementado mediante circuitos electrónicos. Una topología usada comúnmente es la mostrada en la Ilustración 2 y se conoce como PID.

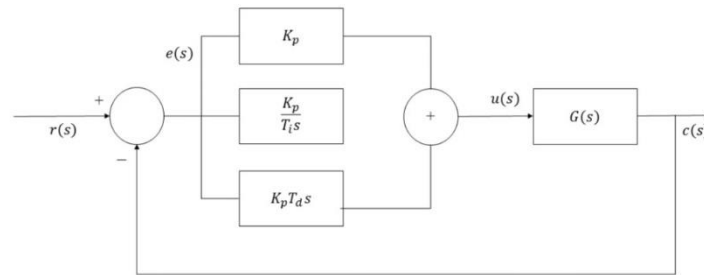


Ilustración 2. Esquema clásico de un regulador tipo PID analógico donde $u(s)$ es la salida del regulador $r(s)$ la referencia y $c(s)$ la salida regulada

La expresión matemática muestra que la salida $u(s)$ es una combinación de las acciones antes descritas, de tal forma que tiene componentes de los errores acumulados y el gradiente de los errores actuales y pasados (Du y Swamy, 2016).

$$u(s) = e(s) * K_p + \frac{K_p}{T_i s} e(s) + e(s) * K_p T_d s$$

Factorizando la expresión anterior se obtiene

$$u(s) = e(s) * K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Este controlador al combinar estas acciones permite que la salida $C(s)$ tenga un error en estado estable tendiente a cero, mientras que el tiempo de establecimiento se disminuye con respecto al lazo abierto. La ecuación 2 muestra que el problema de diseño es el cálculo de los parámetros proporcional K_p , integral T_i y derivativo T_d . Esto es conocido como sintonización del controlador. Para el ajuste de las ganancias de un controlador PID, el más común es el ajuste de Ziegler-Nichols. Una alternativa a este es el uso de técnicas de optimización numérica, en específico han mostrado ser de especial interés para la literatura especializada los algoritmos evolutivos.

Una forma de diseñar controladores clásicos y óptimos tanto en dominio continuo o discreto, así como de funciones de membresía de reguladores difusos es por medio de

la optimización, la cual se puede definir como una de las áreas de la ingeniería. Es un conjunto de ideas que encuentran el mejor resultado posible o la óptima solución bajo la presencia o ausencia de ciertas consideraciones denominadas restricciones (García, Colín, Torres, Pérez y García, 2016) de problemas de la vida cotidiana en entornos económicos, sociales y naturales si y solo si estos son modelables a través de funciones matemáticas del formato $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, lo que permite que estas puedan ser maximizadas o minimizadas a través de un vector $x^{\vec{}} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ (Lovay, Peretti y Romero, 2017).

Matemáticamente se puede formular un problema P de optimización sin restricciones como una terna $P = (f, SS, F)$, definida como lo muestra la ecuación (Muñoz, 2007)

$$P = \begin{cases} \text{opt: } f(x), \\ \text{s. a.} \\ x \in F \subset SS \end{cases}$$

donde f es la función para optimizar (se desea encontrar su máximo o mínimo), F el conjunto de soluciones factibles y SS el espacio de soluciones.

La optimización combinatoria es aquella que permite encontrar el valor x máximo o mínimo para determinada función f , sobre un conjunto F de posibilidades finitas de soluciones. Dicha $x \in Z$ puede establecerse como un número entero Z , una permutación o una estructura de grafo (o subgrafo). Por otra parte, la optimización numérica encuentra un valor x máximo o mínimo para determinada función f , sobre un conjunto de posibilidades infinitas F . Dicha $x \in Z$ puede establecerse como un Z real que puede representarse en forma de vector. La optimización numérica o continua se define como el conjunto de técnicas que tienen como finalidad maximizar o minimizar una o más funciones con un número finito de variables, las cuales pueden estar sujetas a determinadas restricciones. La condición para emplear técnicas de optimización numérica es que se cumpla $x^{\vec{}} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \forall x \in Z$ (Novoa, Pavel, Cruz y Pelta, 2014). Una forma de resolver problemas de optimización, tanto determinísticos como estocásticos es mediante el uso de algoritmos computacionales, por lo tanto, es posible aseverar que optimización es una de las áreas de aplicación de las tecnologías de la información.

Un ejemplo de algoritmo evolutivo es la Evolución Diferencial (Differential Evolution, DE, por sus siglas en inglés) que surgió como una técnica de optimización numérica, desarrollado en 1994 por Kenneth Price y Rainer Storn profesores de Berkeley

California. La DE utiliza un operador de mutación simple que se basa en la diferencia de pares de soluciones (llamadas vectores), que permite determinar una dirección de búsqueda con base en el conjunto de vectores que se denomina población (Ogata, 2014).

La recombinación y la mutación son los operadores de variación usados para generar nuevas soluciones y un mecanismo de reemplazo provee la capacidad de mantener un tamaño en la población. La estrategia de reemplazo se basa en la competencia realizada entre los vectores descendientes del proceso de recombinación (hijos) con los de la población original, la cual es generada por medio de una distribución de probabilidad normal. La mutación tiene como objetivo generar variaciones que desplacen a los vectores solución en la dirección y magnitud correcta y en su forma más simple se encuentra representado en la ecuación [9].

$$\vec{v}_G = \vec{x}_{r3,G} + F(\vec{x}_{r1,G} - \vec{x}_{r2,G})$$

donde

$F \in [0,1]$ es un factor de escala que controla la diferencia vectorial que se describe en $\vec{x}_{r1,G} - \vec{x}_{r2,G}$

G generación actual

$r1 \neq r2 \neq r3$ representan los índices de los vectores usados en el operador de mutación

Por otra parte, la recombinación permite el intercambio de información entre el vector padre y del vector mutante generando un descendiente \vec{u} , donde cada uno de los elementos del hijo puede ser tomado del vector padre o del vector de mutación con una probabilidad determinada por el parámetro CR el cual se encuentra dentro del intervalo $[0,1]$. Este operador se describe en la ecuación

$$\vec{u}_{i,G} = \begin{cases} \vec{u}_{i,G} & \forall rand [0,1] < CR \\ \vec{x}_{i,G} & \text{para otro caso} \end{cases}$$

En la Ilustración 3 se muestra el diagrama de flujo de un algoritmo de Evolución Diferencial.

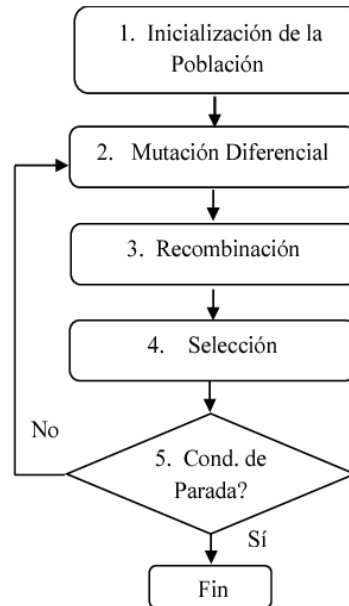


Ilustración 3. Diagrama esquemático de un algoritmo de Evolución Diferencial canónico o simple para una función

▪ **Metodología**

Para el desarrollo de esta propuesta se usó el levitador neumático implementado en [Laura] el cual se muestra en la Ilustración 4. Tiene como características un tubo de acrílico de 0.9 metros de altura con un diámetro de 50.8 mm, una esfera de unicel de 40 gramos de peso y un ventilador de 6000 rpm, estos elementos se han colocado en una estructura de madera.

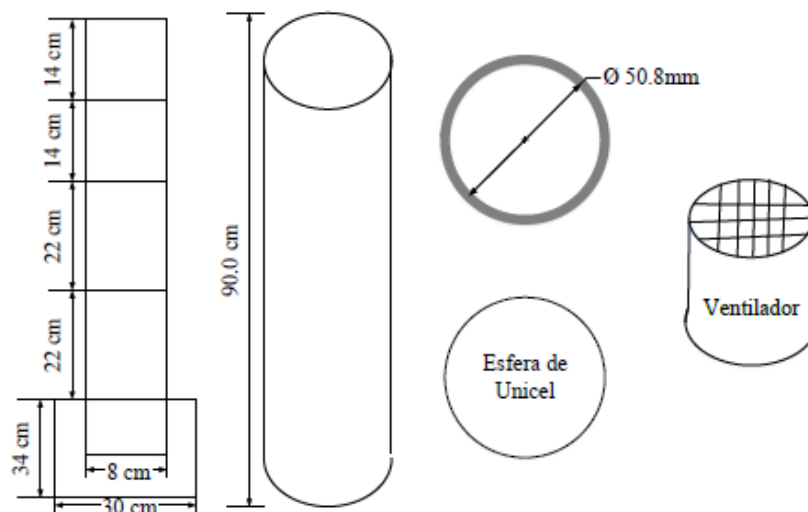


Ilustración 4. Dimensiones y elementos del levitador neumático usado para esta propuesta

La función de transferencia del levitador a lazo abierto se muestra en la ecuación y su respuesta a un escalón de 4.5 volts de entrada se muestra en la Ilustración 5

$$G(s) = \frac{16.1742 e^{(-3.4945s)}}{(1 + 4.0512 * s)(1 + 4.6443 * s)(1 + 4.7953 * s)}$$

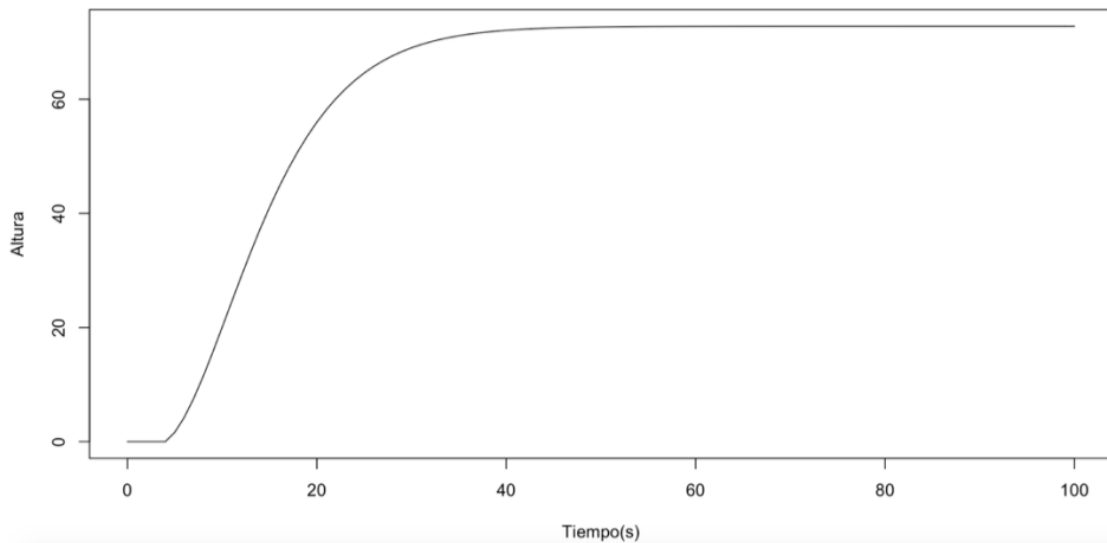


Ilustración 5. Respuesta a lazo abierto de un levitador neumático con un escalón de entrada de 4.5volts

A partir de la función de transferencia a lazo abierto y los conceptos desarrollados en la sección de introducción es posible definir la siguiente función de transferencia a lazo cerrado.

$$G(s) = c(s) = \frac{PID(s) * G(s)}{1 + PID_n(s)C_n(s)} * r(s)$$

Para ajustar las ganancias de un regulador PID se propone como problema de optimización maximizar el inverso del error cuadrático medio por su simplicidad de interpretación analítica en relación con otros criterios de desempeño. Esto supondría una mejora en resultados obtenidos de la sintonización con respecto a técnicas analíticas como el método de Ziegler-Nichols; de tal forma que se puede escribir una función objetivo en términos de la minimización del error cuadrático medio expresado en términos de las ganancias del controlador.

$$f_{obj}(k_p, k_i, k_d) = \max \left(\frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e(k_p, k_i, k_d)^2}} \right)$$

La tabla 1 muestra las características del algoritmo de Evolución Diferencial implementado. Cabe mencionar que las soluciones se expresan en forma de un vector $sol=[k_p, k_i, k_d]$

Característica	Valor
Número de soluciones	100
Factor de escala (F)	Random [0,1]
Probabilidad de recombinación	Random [0,1]

Tabla 1. Características del algoritmo de evolución diferencial propuesto

▪ Análisis de los resultados

Como lo muestra el esquema metodológico de la Ilustración 3 debe de aplicar el test de Lilliefors con la finalidad de determinar la normalidad de los datos. En este caso el p-valor del test es de 0.5505, mayor al valor de significancia 0.05. Como lo muestra el esquema metodológico propuesto el siguiente paso es el cálculo de los valores promedio, máximo y mínimo, así como del coeficiente de variabilidad.

Parámetro estadístico	Valor
Media	22.97891
Desviación Estándar	0.658852
Valor Máximo	24.53605
Valor Mínimo	21.70608
Coefficiente de variación	2.867204%

Tabla 2. Estudio estadístico aplicado a los resultados obtenido con la evolución diferencial

Otro parámetro importante para valorar el desempeño de un algoritmo evolutivo es la convergencia, que puede representarse en forma gráfica como lo muestra la Ilustración 6 donde se observa que la convergencia de una ejecución del algoritmo es alrededor de la ejecución 100; de tal forma que los valores del controlador PID determinados por el algoritmo evolutivo y por el criterio de Zigler-Nichols es mostrado en la tabla 3.

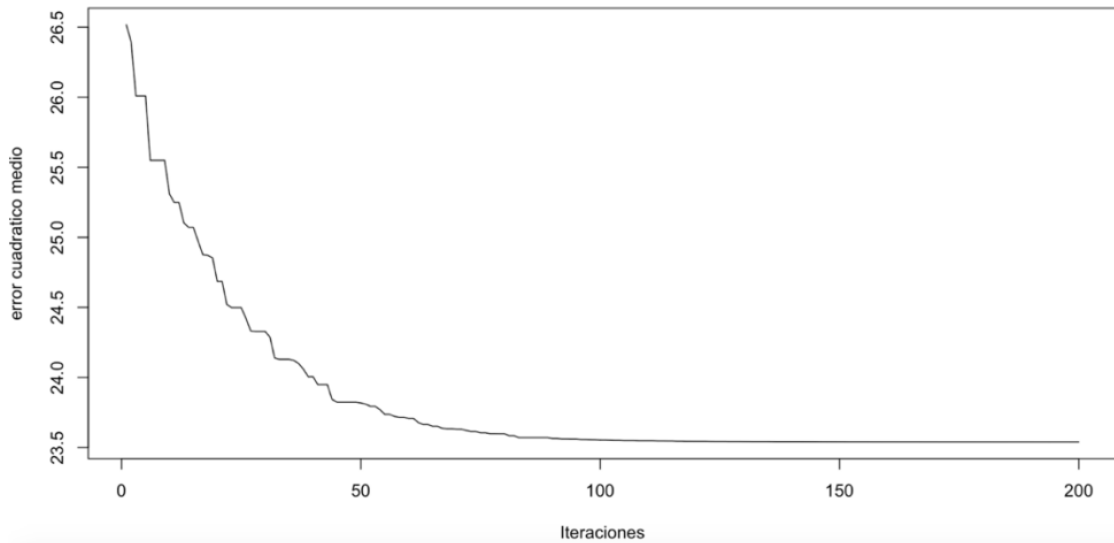


Ilustración 6. Convergencia del Algoritmo de Evolución Diferencial

Método	kp	ki	kd
Algoritmo Evolutivo	0.07128612	0.006703178	0.1772441
Criterio de Zigler-Nichols	0.021	0.0042	0.0525

Tabla 3. Valores de los controladores propuestos por el criterio de Zigler-Nichols y por el Algoritmo de Evolución diferencial

Después de hacer la evaluación del algoritmo de Evolución Diferencial y haber determinado las ganancias del controlador PID por medio del algoritmo propuesto y del criterio de Zigler-Nichols es necesario realizar la valoración de los criterios de desempeño del sistema de control. En primer termino se muestra en la Ilustración 7 la gráfica de respuesta, donde el color rojo corresponde a la respuesta de la regulación de altura con un PID ajustado por la ED y con negro la correspondiente al criterio de Zigler Nichols.

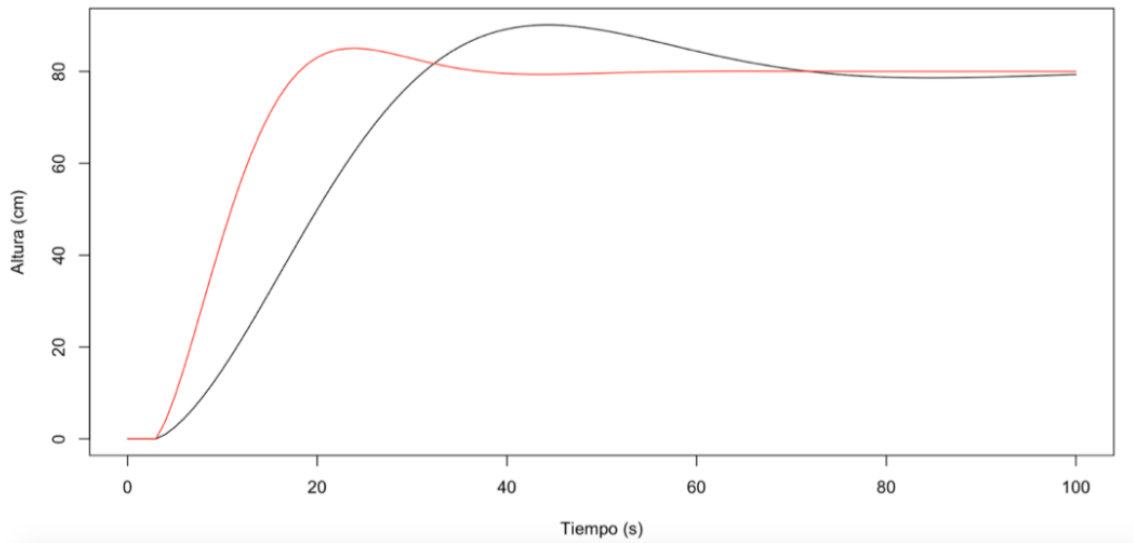


Ilustración 7. Respuesta a lazo cerrado de los sistemas de control, en color rojo ajuste por medio del Algoritmo de Evolución Diferencial y en negro criterio de Zigler-Nichols

A partir de la Ilustración 7 es posible construir la tabla 4 con los criterios de desempeño para ambos sistemas de control

Método	Error cuadrático medio	Tiempo de establecimiento	Sobreimpulso	Tiempo de Sobreimpulso	Error en estado estable
Algoritmo Evolutivo	22.97891	39s	85.06458	25	0.0004713059%
Criterio de Zigler-Nichols	29.76889	75s	90.12731	45	0.8960436%

Tabla 4. Criterio de desempeño de los controladores obtenidos

▪ Conclusiones

A partir de los resultados expuestos en la tabla 4 se observa que los valores de los criterios de desempeño para el controlador propuesto por el algoritmo de Evolución Diferencial son menores que el propuesto por Zigler-Nichols. La convergencia es un área de oportunidad, dado que es factible trabajar en la reducción de este parámetro, a partir de la variación de los operadores de la Evolución Diferencial. Una segunda alternativa puede ser el uso de micro heurísticas como lo propone Chitode (2008) pero aplicada a la ED. Una tercera alternativa radica en pruebas con otras heurísticas basadas en ruta. Es destacable como aportación a la optimización de controladores el uso de prueba estadísticas que tiene como finalidad determinar el comportamiento del algoritmo, en este caso se usa el test de Lilliefors una alternativa mas robusta al test de Kolmogorov Smirnov

que garantiza la determinación de la normalidad de los resultados reportados por un algoritmo evolutivo, esto es la diferencia fundamental con el trabajo desarrollado en Chitode (2008) donde no existe una comprobación estadística que garantiza el funcionamiento del algoritmo.

▪ Referencias

- Chitode, J. S. (2008). Numerical Techniques. Pune, India: Technical Publications Pune.
- Du, K.-L., y M.N., Swamy (2016). Search and Optimization by Metaheuristics: Techniques and Algorithms Inspired by Nature. Suiza: Springer.
- Duarte Muñoz, A. (2007). Metaheurísticas. Madrid, España: Universidad Rey Juan Carlos Servicio de Publicaciones.
- García Mejía, J.F., Colín Rivas, L., Torres Reyes, C.E., Pérez Martínez, J.A. y García Mejía, J.A. (2016). “Control de Levitador Neumático con base en un PID y micro algoritmos genéticos” Journal CIM. Vol.4, Num. 1
- Lovay, M., Peretti, G., & Romero, E. (2017). Aplicación del algoritmo evolución diferencial en un método de dimensionamiento para filtros cuadráticos. Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO)
- Muñoz, G. (2007). Entorno para la optimización de problemas científicos. En Tecnologías del Software: Seminario de Investigación e Innovación en Teconolgías del Software (págs. 141-149). Madrid, España: Universidad Rey Juan Carlos Servicio de Publicaciones.
- Novoa-Hernández, P., Cruz Corona, C., & Pelta, D. (2014). Un estudio comparativo sobre evolución diferencial auto-adaptativa en ambientes dinámicos. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 8(4), 86-99 [9]
- Ogata, K. (2014). Ingeniería de control moderna. Madrid, España: Pearson Johnson, M. A., y M. H., Moradi (2005). PID Control: New Identification and Design Methods. Londres, Reino Unido: Springer.