



**Revista Aristas**  
**Ciencia Básica y Aplicada**

**VOL. 10**

**NÚMERO 18**

**AÑO 2023**



**ISSN-2007-9478**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

## Ajuste de reguladores lineales cuadráticos por medio de algoritmos evolutivos aplicados a un Innosat

Juan Fernando García-Mejía <sup>a</sup>, Juan Felipe Tabares-Hernández <sup>b</sup>, Allan Antonio Flores-Fuentes <sup>c</sup>, Everardo Efrén Granda-Gutiérrez <sup>d</sup>, Ricardo Arturo Vázquez-Robledo <sup>e</sup>, Rigoberto Reyes-Morales <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEMex Atlacomulco [fgarciam@uaemex.mx](mailto:fgarciam@uaemex.mx)

<sup>b</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEMex Atlacomulco [jtabaresh001@alumno.uaemex.mx](mailto:jtabaresh001@alumno.uaemex.mx)

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEMex Atlacomulco [aafloresf@alumno.uaemex.mx](mailto:aafloresf@alumno.uaemex.mx)

<sup>d</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEMex Atlacomulco [aafloresf@alumno.uaemex.mx](mailto:aafloresf@alumno.uaemex.mx)

<sup>e</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEMex Atlacomulco [eegrandag@alumno.uaemex.mx](mailto:eegrandag@alumno.uaemex.mx)

<sup>f</sup> Centro Regional de Desarrollo Espacial Atlacomulco [vazquez.ricardo@aem.mx](mailto:vazquez.ricardo@aem.mx)

<sup>f</sup> Centro Regional de Desarrollo Espacial Atlacomulco [reyes.rigoberto@aem.mx](mailto:reyes.rigoberto@aem.mx)

### Resumen

Una de las áreas de estudio de la ingeniería que se ha visto beneficiada por las técnicas de Inteligencia Artificial es el control automático, específicamente en esta propuesta de investigación, el diseño de un Regulador Lineal Cuadrático combinado con Algoritmos Evolutivos, en particular el Algoritmo Genético, disminuye el error cuadrático medio que presenta la regulación altitud de un satélite de investigación conocido como InnoSAT con respecto a una técnica clásica como el controlador Proporcional-Integral-Derivativo y un Regulador Lineal Cuadrático. Cabe destacar que el algoritmo propuesto es codificado mediante números reales. Como resultado, la metodología empleada garantiza la estabilidad, algo que no sucede con las técnicas clásicas

**Palabras clave**— Algoritmo Genético, Controlador de altitud, InnoSAT, Regulador Lineal Cuadrático, Codificación de números reales

### Abstract

*One of the areas of study of engineering that has benefited from Artificial Intelligence techniques is automatic control, specifically, in this research proposal, the design of a Quadratic Linear Regulator combined with Evolutionary Algorithms, in particular the Genetic Algorithm, decreases the mean square error presented by the altitude regulation of a research satellite known as InnoSAT with respect to a classic technique such as the controller Proportional-Integral-Derivative and a Quadratic Linear Regulator. It should be noted that the proposed algorithm is encoded by real numbers. As a result, the methodology used guarantees stability, something that does not happen with classical techniques.*

**Keywords**— Genetic Algorithm, Altitude Controller, InnoSAT, Quadratic Linear Regulator, Real Number Coding

## 1. INTRODUCCIÓN

Los satélites en miniatura se han convertido en un tema de interés para varias disciplinas debido a los costos reducidos que implican el diseño, desarrollo, puesta en órbita, consumo de energía, tamaño y reducción de masa. Existen dos tipos de estos diferenciables por peso y tamaño; los pico y los nanosatélites como el Innovative Satellite conocido como InnoSAT, desarrollado por la Agencia Malasia del Espacio (Agensi Angkasa Negara, en malayo o ANGKASA) como un medio de divulgación y desarrollo tecnológico [1].

El comportamiento de un InnoSAT puede ser modificado y regulado a través de Ingeniería de Control por medio del análisis, diseño y aplicación de reguladores, los cuales deben de ser reactivos a cambios en el sistema y a perturbaciones externas. Esto se logra mediante la comparación con un estado de referencia deseado, la cual permite obtener información que se usa para calcular y aplicar una señal de control adecuada.

En la literatura especializada se han documentado resultados en el diseño de reguladores aplicados al control de altitud de nanosatélites. Usando control clásico [3][4][6][14], control robusto [5], control inteligente [2][7][8][9][10] y control moderno [1]

Los controladores clásicos se caracterizan por usar controladores de tipo PD, PID. Los robustos por el uso de un giroscopio de control de momento (CMG) y algoritmo de modo deslizante de alto orden. Mientras que los controladores difusos usan esquemas del tipo PD, PI, PID, PD+I, Control por modelo Interno (ICM) / Algoritmo de Propagación hacia atrás, y Perceptrón multicapa híbrido. Por otra parte las técnicas modernas usan variables de estado.

Es resaltante que el control PD es insuficiente para evitar por completo el error estable siendo una mejor opción un PID. El uso del control de modelo interno simple (SIMC) otorga un menor rendimiento en el control de errores en comparación con la intervención humana. Los algoritmos difusos usan: algoritmos RLS, Takagi-Sugeno. Mamdani. Mientras que las técnicas de control moderno usan observadores y controladores de estado de orden completo y reducido.

Del estado del arte es posible observar que las alternativas clásicas no consideran la inestabilidad de una de las funciones representativas de los ejes del InnoSAT, por lo tanto, se sugiere usar una técnica de control óptimo buscando no solo la estabilidad como en [1] sino la reducción del error cuadrático medio.

Una técnica de control óptimo es el Control Lineal Cuadrático (Linear Quadratic Regulator, LQR, por sus siglas en inglés) el cual tiene aplicación en sistemas que puedan ser modelados de forma lineal, con parámetros que pueden ser determinados con precisión.

Los LQR son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones de control, incluyendo la industria aeroespacial, la robótica, la ingeniería eléctrica y la mecánica. También se utilizan en sistemas de control de estabilidad, navegación y seguimiento de trayectorias.

El estado del arte documenta que los LQR se ven privilegiado por el uso de algoritmos evolutivos, específicamente los algoritmos genéticos con codificación binaria como en [1] donde se mejora la respuesta de este tipo de regulador.

Por lo tanto, en el proceso investigativo que se documenta en este trabajo se espera regular el comportamiento de los ejes correspondiente de la altitud de un InnoSAT a pesar de la condición de inestabilidad inherente a su dinámica de manera más eficiente que las técnicas clásicas con un regulador LQR con matrices de retroalimentación de estado calculado por un algoritmo genético con codificación real.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se muestra la información de carácter teórica que soporta la propuesta documentada en este proceso investigativo, está formada por la fundamentación de los LQR, las funciones de transferencia que modela la altitud de un InnoSAT y la fundamentación de los algoritmos genéticos.

### 2.1 Control Óptimo

Un LQR es un método de control óptimo con el cual se asegura la estabilidad de un sistema en lazo cerrado por medio de ganancias de realimentación. En el control óptimo se plantea la minimización de una función de costo, que se define como la suma de las desviaciones de los valores medidos respecto a los deseados, de tal forma que se propone la minimización de las desviaciones no deseadas por medio de la matriz de ganancias.

Para entender un regulador LQR, sea un sistema dinámico definido por variables de estado tal que el vector de estados  $\dot{x}$  se define por medio de la ecuación 1[1].

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

Con salida y definida por medio de la ecuación 2

$$y = Cx \tag{2}$$

Donde  $x \in \mathbb{R}^n$  y  $u \in \mathbb{R}^m$ . A partir de esto, en la ecuación 3 se define una función de costo  $J$

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + Ru^T(t)]dt = Cx \tag{3}$$

En cuenta de lo anterior la ley de control que minimiza la función de costo determinada en la ecuación 3 se expresa mediante la ecuación 4 [1]

$$u(t) = -Kx(t) \tag{4}$$

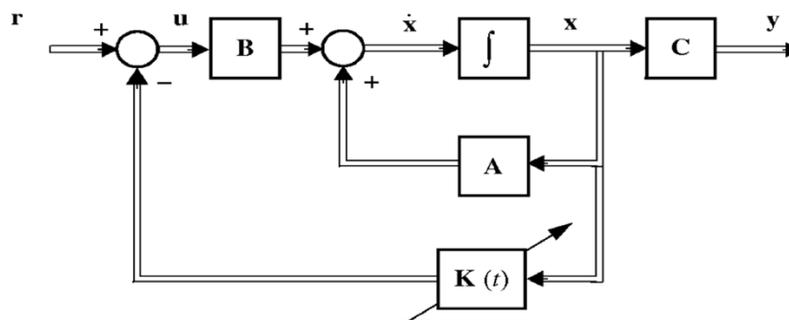
Donde  $K$  esta determinada por medio de la ecuación 5

$$K = R^{-1}B^T P \tag{5}$$

Donde  $P$  es la solución única definida positiva de la ecuación de Riccati [1]  $A^T P + AP - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$

Donde  $Q = Q^T \geq 0$  es una matriz real, simétrica, semidefinida positiva, mientras que  $R = R^T > 0$  es una matriz real simétrica y definida positiva. De tal forma que es posible definir el esquema de un LQR como se muestra en la Figura 1 [1].

Figura 1. Esquema de control [1]



### 2.2 Comportamiento de InnoSAT

Los nanosatélites son sistemas espaciales que pueden pesar entre 1 y 10 kg y pueden realizar misiones únicas tales como el monitoreo del clima, comunicaciones de almacenamiento y reenvío que actúan en grupos de nodos de sensores distribuidos o en agrupaciones de múltiples satélites que vuelan en formación [11].

El primer nano satélite fue lanzado en junio de 2013 por una filial rusa de Eurockot, una compañía privada dedicada a lanzamientos de naves espaciales. A partir de ellos y como una medida para desarrollar simulaciones y estudios en pequeña escala se diseñan los CANSAT o satélites enlatados, los cuales no tienen capacidad de orbitar, son lanzados por cohetes pequeños y globos aeroestáticos colocándolos a una altura de 1Km, con descenso por paracaídas [11].

Posteriormente, el éxito de las misiones ANSAT sustentaron el desarrollo de un nuevo tipo de nano satélite denominado Innovative Satellite (InnoSAT) [11].

La cinética y dinámica de un InnoSAT es susceptible a ser modelada por medio de ecuaciones conocidas como ecuaciones de Euler que pueden transformarse a un conjunto de ecuaciones escritas en términos de la variable compleja  $s$ . Esto se muestra en las ecuaciones 6,7,8 [2].

$$\phi(s) = \frac{s^2 + 0.3051s + 0.2040}{s^4 + 1.1050s^2 + 0.1650} \quad (6)$$

$$\theta(s) = \frac{1}{s^2 - 7.1138 \times 10^{-3}} \quad (7)$$

$$\psi(s) = \frac{s^2 - 0.3023s + 0.8088}{s^4 + 1.1050s^2 + 0.1650} \quad (8)$$

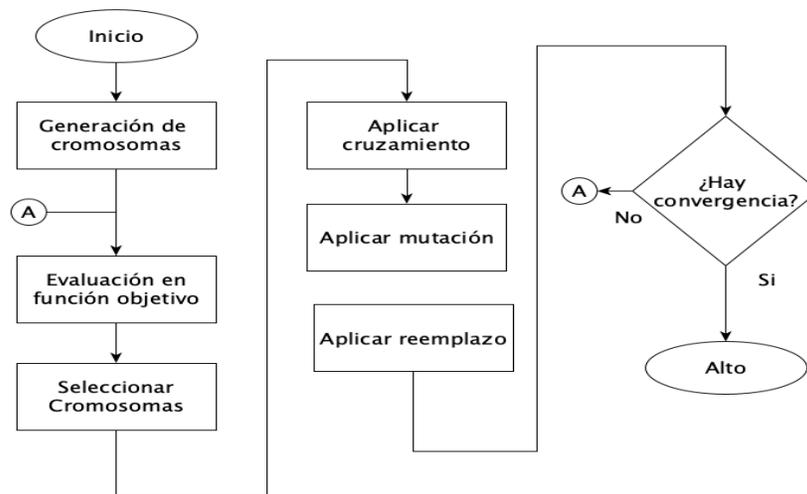
### 2.3 Algoritmos Evolutivos

Los algoritmos evolutivos (EA, por sus siglas en inglés), se definen como una colección de métodos heurísticos, es decir reglas obtenidas de un conocimiento previo de cierto dominio de un problema [12], tienen pasos definidos inspirados por procesos biológicos como la reproducción y mutación de los seres vivos, la recombinación y la selección biológica, los cuales fueron propuestos por Charles Darwin en el libro “El origen de las especies” Los trabajos de Mendel y Darwin

permitieron la formulación de las primeras técnicas computacionales tales como los Algoritmos Genéticos, propuestos por David Goldberg y John Holland y Estrategias Evolutivas propuestas por Ingo Rechenberg [12].

Los EA funcionan a partir de una colección de posibles individuos que pueden ser representados por medio del vector  $P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\}$  que se denominan población, cada elemento  $P(t)$  representa una posible solución factible a un problema de optimización numérica o combinatoria. Esta población se somete a operaciones de recombinación y transformación, posteriormente a un proceso de selección, que se realiza de manera iterativa después de un cierto número de iteraciones se espera que el mejor individuo (aquel que genere el valor más alto de la función de aptitud) converja a un determinado punto que será considerado la solución a un problema de optimización. John Holland de la Universidad de Michigan en la década de los 60's desarrollo el algoritmo evolutivo por excelencia, el Algoritmo Genético (Genetic Algorithm, GA, por sus siglas en inglés) con inspiración en los trabajos sobre la evolución de las especies desarrollados por Charles Darwin donde se estipulan las condiciones de supervivencia del individuo más apto en un entorno. Otro referente teórico en el desarrollo de los GA son las leyes de la herencia desarrolladas por Gregory Mendel. El diagrama de flujo de un Algoritmo Genético se muestra en la Figura 2 [12]. Cabe destacar que el operador de cruce y el de mutación son mostrados en la sección de metodología.

Figura 2. Algoritmo Genético



### 3. METODOLOGÍA

La Figura 3 muestra el esquema metodológico de la presente propuesta de investigación, donde se compara una técnica de control clásico (criterio de Zigler-Nichols) con respecto a esquemas óptimos un algoritmo genético.

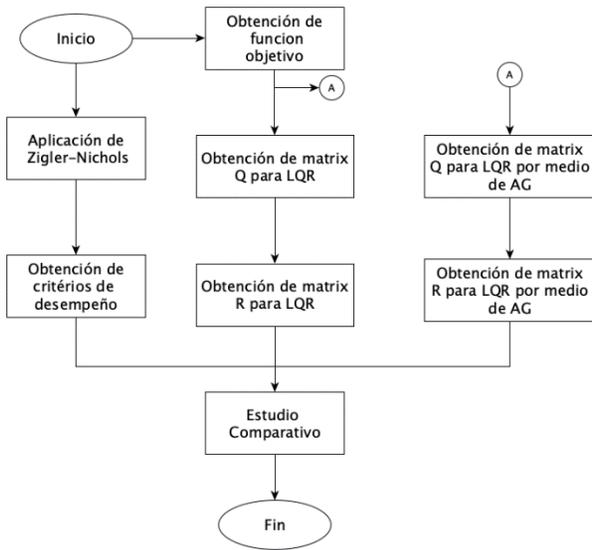
Esto es posible por medio de criterios de desempeño como tiempo de establecimiento y valor de sobre impulso. Es importante resaltar que el operador de cruce usado para el

algoritmo genético fue el cruce aritmético que se muestra en las ecuaciones 4 y 5 a partir de dos cromosomas progenitores  $C_n^1$  y  $C_n^2$  que generan dos cromosomas descendientes  $C_n^{H1}$ ,  $C_n^{H2}$ , donde  $n$  representa el gen o variable de decisión del problema [19].

$$C_n^{H1} = \beta * C_n^1 + (1 - \beta) * C_n^2 \quad (9)$$

$$C_n^{H2} = \beta * C_n^2 + (1 - \beta) * C_n^1 \quad (10)$$

Figura 3. Esquema metodológico



Donde el valor de  $\beta \in [0,1]$  manteniéndose constante durante toda la ejecución. Por otra parte la mutación se realiza por medio del operador de mutación uniforme donde se reemplaza un gen  $g$  (variable) elegido al azar cambiando su valor por otro determinado por el promedio en un intervalo determinado.

Por otra parte, la representación en variables de estado de los ejes del InnoSAT esta dada por la Tabla 1. De tal forma que las matrices  $Q$  y  $R$  tienen el formato mostrado en la Tabla 2. Siendo  $Q_{n,n} \wedge R_{1,1}$  los genes a codificar para los cromosomas del algoritmo genético.

Tabla 1. Matrices de estados

Matrices \ Angulos	A	B	C	D
$\psi$	$\begin{bmatrix} 0 & -1.105 & 0 & -0.1650 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[0 \ 1 \ -0.3023 \ 0.8088]$	$[0]$
$\theta$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.0071 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[0 \ 1]$	$[0]$
$\phi$	$\begin{bmatrix} 0 & -1.105 & 0 & -0.1650 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$[0 \ 1 \ 0.3051 \ 0.2040]$	$[0]$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Formato de matrices Q y R

Matrices \ Angulos	Q	R
$\psi$	$\begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}$	$[r_{11}]$
$\theta$	$\begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix}$	$[r_{11}]$
$\phi$	$\begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}$	$[r_{11}]$

#### 4. RESULTADOS

De acuerdo con la función de transferencia,  $\psi$  tiene un comportamiento marginalmente estable, por lo tanto, se debe descartar la comparación de los LQR con respecto a técnicas de control clásico, las respuestas se muestran en las Figuras 4, 5 y 6 para los ángulos  $\phi$ ,  $\Psi$  y  $\theta$  respectivamente.

Se observa que las respuestas con menor valor RMS son las obtenidas para  $\phi$ . Es importante destacar que los valores en estado estable son mejores con un regulador LQR con ganancias calculadas por medio del método evolutivo como el algoritmo genético propuesto en esta trabajo

Tabla 3. Comparación con criterios de desempeño

Parámetro	Criterios de desempeño método analítico			Criterios de desempeño con matrices ajustadas por Algoritmo Genético		
	$t_s$	$M_p$	$e_{rms}$	$t_s$	$M_p$	$e_{rms}$
$\theta$	10	1.0422	0.2533	10	1.0422	0.2533
$\Psi$	20	1.2720	0.1880	16	1.124	0.2011
$\phi$	14	0.9933	0.2533	14	1.0490	0.1412

Elaboración propia

Figura 4. Respuesta del ángulo  $\phi$

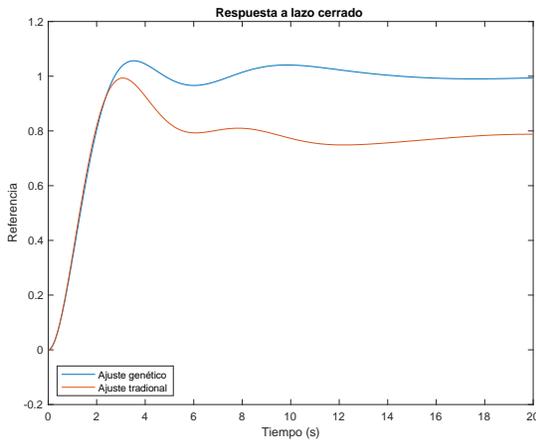


Figura 6. Respuesta del ángulo  $\theta$

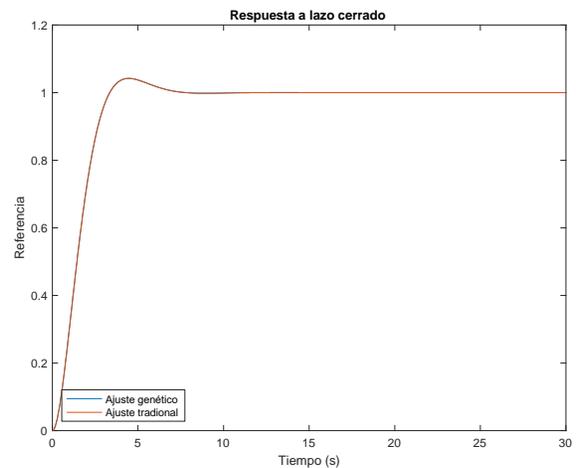
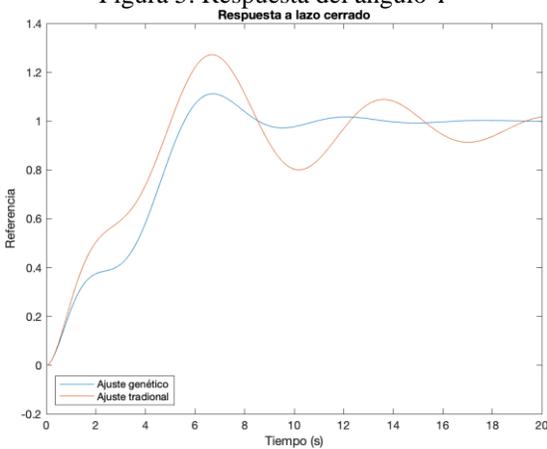


Figura 5. Respuesta del ángulo  $\Psi$



#### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se observa en la Tabla comparativa 3 y en las Figuras 4,5, 6 existen diferencias significativas en los ángulos  $\phi$  y  $\Psi$  mientras que para  $\theta$  no existe una diferencia entre las ganancias obtenidas por las matrices  $Q$  y  $R$ . Por otra parte, se observa que los controladores clásicos no son una buena opción dado la condición de estabilidad de la función de transferencia  $\Psi$ , que se caracteriza por tener polos sobre el eje imaginario.

Se puede observar por los resultados obtenidos que el uso de los algoritmos evolutivos mejora los tiempos de establecimiento y los errores en estado estacionarios. De acuerdo con la literatura especializada se observa que la codificación real propuesta facilita la aplicación de los algoritmos evolutivos. Es posible, como trabajo a futuro, usar algunas heurísticas diferentes como los inmunológicos, los enjambres de partículas y los sistemas inmunes por citar algunos métodos evolutivos.

Es importante destacar, que esta propuesta comprueba que, previo a la aplicación de alguna otra técnica de control los reguladores LQR estabilizan plantas cuyos polos se encuentren en el semiplano derecho. En esta propuesta se prueba que un método de cálculo alternativo de las ganancias, un algoritmo evolutivo, por ejemplo, estabiliza la planta y minimizan los criterios de desempeño tales como las valoraciones de barrio.

#### 4. REFERENCIAS

- [1] Hashim, F., Mashor, M. Y., & Sharun, S. M. (2015). FULL-AND REDUCED- ORDER COMPENSATOR FOR INNOSAT ATTITUDE CONTROL. *Jurnal Teknologi*, 76(12). <https://doi.org/10.11113/jt.v76.5883>
- [2] M. W. Foley, R. H. Julien, and B. R. Copeland, "A Comparison of PID Controller Tuning Methods," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 83, no. 4, pp. 712–722, 2008
- [3] Adaptive fuzzy logic controller with direct action type structures for InnoSAT attitude control system, F. Bakri, M. Mashor, S. Mashor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 152, 2016, DOI: 10.1088/1757-899X/152/1/012032
- [4] Performance of Manual and Auto-Tuning PID Controller for Unstable Plant - Nano Satellite Attitude Control System, H. Hani, M. Hani, *The 6th International Conference on Cyber and IT Service Management*, 2018, DOI: 10.1109/CITSM.2018.8674375
- [5] Hao, Ting & Matunaga, Saburo. (2014). Robust attitude control of nano-satellite using control moment gyros based on higher order sliding modes. *International Journal of Space Science and Engineering*. 2. 259. 10.1504/IJSPACESE.2014.064200.
- [6] R. Rakesh et al., "Dynamics and control system design of a polar low-earth orbit nano-satellite 'Parikshit'," 2015 *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2015, pp. 607-613, doi: 10.1109/ICACCI.2015.7275676.
- [7] M. N. Norhayati, M. Y. Mashor, S. M. Sharun, A. A. Azamimi and Wan Nur Hadani, "Internal Model Control for InnoSAT attitude control," *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, 2011, pp. 451-456, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953924.
- [8] Bakri, F & Mashor, Mohd & Sharun, Siti & Sarpinah, Bibi & Abu Bakar, Zahari. (2016). Adaptive fuzzy logic controller with direct action type structures for InnoSAT attitude control system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 152. 012032. 10.1088/1757-899X/152/1/012032.
- [9] H. H. A., M. Y. Mashor and M. C. Mahdi, "Performance of Manual and Auto-Tuning PID Controller for Unstable Plant - Nano Satellite Attitude Control System," 2018 6th *International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CITSM.2018.8674375.
- [10] S. M. Sharun, M. Y. Mashor, M. N. Norhayati, S. Yaacob, M. Yaakob and W. N. W. Jaafar, "Adaptive Neuro-controller based on HMLP network for InnoSAT attitude control," *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, 2011, pp. 355-360, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953906.
- [11] *Laser Microprocessing for Nanosatellite Microthruster Applications*, H. Helvajian, P. Fuqua, J. Focused Laser Precision Microfabrication, 32, 2001
- [12] Kramer, O. (2017). *Genetic Algorithm Essentials (Studies in Computational Intelligence Book 679) (English Edition) (1st ed. 2017 ed.)*. Springer.



Universidad Autónoma de Baja California  
ISSN 2007-9478

## Legal

REVISTA ARISTAS CIENCIA BÁSICA Y APLICADA es una publicación semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Baja California, Ave. Álvaro Obregón sin número, Col. Nueva, Mexicali, Baja California, México. C.P. 21100. Teléfono Directo: (686) 553-44-61, (686) 553-46-42, Conmutador: (686) 551-82-22, Fax: (686) 551-82-22 ext. 33005, <http://revistaaristas.tij.uabc.mx>

Editor responsable: Juan Andrés López Barreras. Reservas de Derechos al uso Exclusivo No. 04-2021-121313470100-203, ISSN 2007-9478, ambas otorgadas por el Instituto Nacion del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Juan Andrés López Barreras, Coordinación de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, fecha de última actualización: 8 de diciembre del 2022.

La reproducción total o parcial está autorizada siempre y cuando se cite la fuente.

### ACERCA

[Plan estratégico](#)

[Historia](#)

[Objetivos](#)

[Índices](#)

### INFORMACIÓN IMPORTANTE

[Legal](#)

[Política Editorial](#)

[Directorio](#)

### DIRECTORIO

[Consejo Editorial](#)

[Comité Editorial](#)

[Comité Revisor](#)  
[Áreas de la Revista](#)

## **DESCARGAS**

[Autores](#)

[Revisores](#)

Copyright © 2012-2015 Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Todos los derechos reservados  
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Campus Tijuana UABC Calzada Universidad #14418  
Parque Industrial Internacional Tijuana Tel. + 52 (664) 979 7500  
Preguntas y/o Comentarios: [jalopez@uabc.edu.mx](mailto:jalopez@uabc.edu.mx)