



# Control y movimiento de un robot insecto: Un enfoque práctico con controladores PID

## *Control and movement of an insect robot: A practical approach with PID controllers*

Roger Alexander Carbo Valenzuela<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Estatal Península de Santa Elena. Facultad de Sistemas y telecomunicaciones. Electrónica y Automatización Santa Elena - La Libertad. Ecuador

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4923-3983>

Correo: [roger1\\_carbo@hotmail.com](mailto:roger1_carbo@hotmail.com)

\*Autor para correspondencia: [roger1\\_carbo@hotmail.com](mailto:roger1_carbo@hotmail.com)

### Resumen

El presente estudio se centra en la evaluación y conceptualización de un robot con forma de insecto, con un enfoque particular en la aplicación de controladores PID. Se investiga la correlación entre los aspectos anatómicos y conductuales de los insectos, junto con la precisión y adaptabilidad de los controladores PID, con el propósito de permitir a estos robots insectos desplazarse con eficiencia en entornos desafiantes. Este enfoque de investigación implica la integración de principios bioinspirados y técnicas de control avanzado dentro del ámbito de la robótica. Se destaca la importancia de la percepción ambiental mediante el uso de sensores y la implementación en tiempo real del controlador PID como elementos fundamentales en esta tecnología. El controlador PID emerge como una herramienta de gran potencial para lograr movimientos estables y precisos en un robot insecto, y su aplicación efectiva puede significativamente elevar las capacidades y el rendimiento de estos dispositivos. Además, se lleva a cabo un análisis de estabilidad para evaluar el comportamiento del robot en diversas condiciones, y se presentan los resultados de pruebas de desplazamiento del robot en diferentes superficies, variando las configuraciones del controlador PID y utilizando diferentes tipos de baterías.

**Palabras claves:** controladores, correlación, tecnología, PID, resultados

### Abstract

*The present study focuses on the evaluation and conceptualization of an insect-like robot, with a particular focus on the application of PID controllers. The correlation between the anatomical and behavioral aspects of insects, along with the accuracy and adaptability of PID controllers, is investigated with the purpose of enabling these insect robots to move efficiently in challenging environments. This research approach involves the integration of bio-inspired principles and advanced control techniques within the field of robotics. It highlights the importance of environmental sensing using sensors and the real-time implementation of the PID controller as fundamental elements in this technology. The PID controller emerges as a tool with great potential to achieve stable and precise movements in an insect robot, and its effective application can significantly enhance the capabilities and performance of these devices. In addition, a stability analysis is carried out to evaluate the behavior of the robot under various conditions, and the results of robot displacement tests on different surfaces, varying the PID controller configurations and using different types of batteries are presented.*

**Keywords:** controllers, correlation, technology, PID, results



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons de tipo (CC-BY-NC-SA).

E-mail: [editorial@ecosur.gopsapp.com](mailto:editorial@ecosur.gopsapp.com)



## I. Introducción

La búsqueda de soluciones eficientes y precisas en el campo de la robótica ha llevado al desarrollo de una amplia variedad de diseños, desde robots inspirados en la naturaleza hasta máquinas altamente especializadas. Uno de los enfoques más intrigantes es el diseño de robots insecto, que imita las características y comportamientos de los insectos para lograr una movilidad única y versátil. Sin embargo, para que estos robots sean realmente funcionales y autónomos, es esencial implementar sistemas de control sofisticados. La robótica ha logrado un gran desarrollo durante los últimos veinte años, la robótica ha permitido que se articulen y aglutinen ciencias como la mecánica, programación y electrónica. Estas ciencias han aportado para la creación y mejora en la construcción de robots permitiendo un desarrollo en los prototipos [1].

En el transcurso del tiempo se han generado prototipos con características biológicas que tienen patas, los principales objetivos de estos robots móviles es facilitarnos la entrada a lugares de difícil acceso, los robots móviles han ganado un gran espacio por la adaptación para trabajar en diferentes entornos como: laboratorios de Universidades, en las bases militares buscando granadas e incluso dentro de la carrera espacial han sido muy solicitados [2].

A nivel mundial la robótica se enfoca en el desarrollo de máquinas (robots) caminantes, dicho enfoque surge por la capacidad que poseen los robots de múltiples extremidades (patas) para adaptar su locomoción a terrenos con superficies regulares e irregulares, la locomoción se define como los métodos que posee o realiza un sistema para trasladarse de un punto a otro, esta acción se ha practicado desde hace mucho tiempo, debido a que las máquinas con locomoción por ruedas resultan rápidas y eficientes en terrenos con superficie planas; sin embargo, la dificultad de los robots con este tipo de locomoción es notoria al momento de atravesar terrenos con superficies obstruidas, con desniveles, irregulares, etc. lo que a menudo resulta en la inmovilización del robot [3].

En la actualidad la expansión del uso de robots se está convirtiendo en un área de investigación y desarrollo más atractiva, dicha expansión ha llevado al desarrollo y avance en maquinaria automatizada dirigida a diferentes aplicaciones en disciplinas como la informática, aplicaciones médicas, campos de la ingeniería y la automatización juegan un papel importante en los avances de la robótica [4].

En este tema, exploraremos cómo el controlador PID se aplica al control de un robot insecto, y cómo esta combinación de biología y tecnología está allanando el camino para una nueva generación de máquinas autónomas capaces de moverse con la gracia y agilidad de los insectos naturales.

## II. Materiales y métodos

El desarrollo del tema "Control de un robot insecto aplicando un controlador PID" implica explorar la fusión de conceptos bio-inspirados y técnicas de control avanzado en el ámbito de la robótica. Mediante la combinación de la anatomía y el comportamiento de los insectos con la precisión y la adaptabilidad del controlador PID, se logra una simbiosis única que permite a los robots insecto moverse con gracia y 2





eficiencia en entornos desafiantes. La aplicación de sensores para la percepción del entorno y la implementación del controlador PID para ajustar el movimiento en tiempo real forman la columna vertebral de esta tecnología, que tiene aplicaciones prometedoras en exploración, vigilancia y otros ámbitos adicionales.

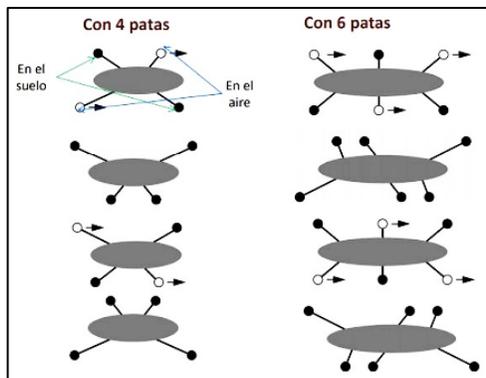


Figura 1. Movimiento según el número de patas

Se puede observar la cinemática de los robots con 4 y 6 patas, el prototipo robótico que se use debe mantener el equilibrio a diferentes adversidades que presente el terreno en el cual se encuentren, la distribución de las articulaciones es la base al momento de realizar el funcionamiento del prototipo.

Además, hay que mencionar que el punto de equilibrio está definido según las dimensiones de la estructura y el número de articulaciones. El equilibrio que debe mantener un prototipo robótico se clasifica en dos: el equilibrio estático y dinámico, en el estático el prototipo debe mantener el equilibrio en todo momento, el centro de gravedad debe mantenerse en la estructura de soporte del prototipo, en este estado el consumo energético del robot es bajo porque sus actuadores no entran en funcionamiento. Por otro lado, el equilibrio dinámico debe mantener un equilibrio estable mientras se realice la locomoción del prototipo. También se menciona que, si la distribución de las articulaciones no es eficiente, el prototipo puede caer mientras realiza el movimiento. También hay que mencionar que, si el movimiento es rápido o lento el equilibrio debe ser constante para ello el prototipo debe realizar una trípode de apoyo.

En este equilibrio el consumo energético es alto por el funcionamiento de las articulaciones que posee el prototipo, en la imagen se menciona el análisis de la cinemática inversa que posee un robot hexápodo.

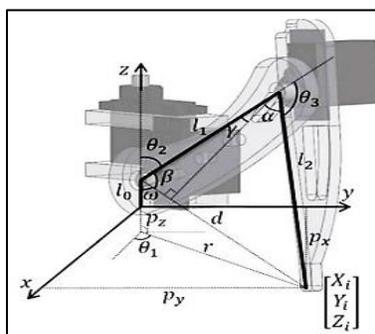


Figura 2. Ejes y variables de la cinemática inversa





Dónde: “X, Y y Z” permite examinar el comportamiento de la posición del extremo de la articulación del prototipo, este comportamiento se describe en las siguientes ecuaciones, y las otras variables se explican en cada ecuación, este análisis se lo hace mediante la aplicación de cinemática inversa. En este caso lo que se necesita encontrar son los ángulos del movimiento de los eslabones para llegar a un punto conocido.

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$r$  es la distancia la cual se mide desde el eje Z inicial al punto final de la articulación.

$$d^2 = r^2 + (p_z + 10)^2$$
$$d^2 = \left( \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \right)^2 + (p_z + 10)^2$$

$d$  es la distancia medida desde el punto final de la articulación al eje del servomotor 2.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{p_y}{p_x} \right)$$
$$\omega = \tan^{-1} \left( \frac{r}{l_0 + p_z} \right)$$
$$\beta = \cos^{-1}(r)$$

$\omega$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  son ángulos auxiliares para poder encontrar las incógnitas usando la cinemática inversa.

$$\theta_2 = \pi - \beta - \omega$$
$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta$$
$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{l_1 \sin \beta}{l_2} \right)$$
$$\theta_3 = \pi - \gamma - \alpha$$

### Dinámica del robot insecto:

Los diferentes prototipos robóticos que existen en la actualidad se los ha ido clasificando según el Instituto de Robótica de América (RIA), por el número de articulaciones y su nivel de estabilidad. Todos los prototipos han ido desde un inicio basados en diferentes formas de los seres que existen en el mundo, pero según su desempeño en superficies irregulares se ha determinado por el estudio de seres que poseen mayor a 4 articulaciones por su estabilidad y habilidades que muestran en dichas superficies, siendo así 4





los insectos, los seres que representan mayor desempeño y estabilidad.

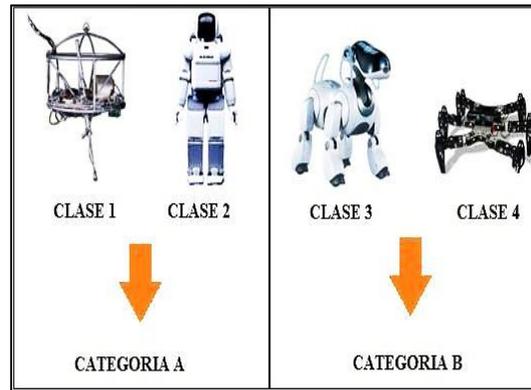


Figura 3. Tipos de robots con patas

### Tipos de control utilizados en robots insectos:

Al imitar el movimiento de los insectos o de cualquier animal en prototipos robóticos, el control es un elemento infalible en los mismos, su desarrollo y funcionalidad dependen del número de grados que posea cada articulación, por ende, el algoritmo para controlar estos grados de libertad es complejo, cuando se analiza insectos que atraviesan obstáculos se necesita de varios sensores para detectar el tipo de objeto que puede estar presente en la trayectoria.

- **Controlador proporcional:** Este tipo de control posee una acción proporcional, en el que la relación existente entra la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t) = r(t) - y(t)$  se describe en las Ecuaciones a su vez se puede usar cantidades transformadas haciendo uso del método de Laplace como se describe en la Ecuación de igual manera en la Figura se muestra el diagrama de bloques de un controlador proporcional. En este tipo de control “ $Kp$ ” es considerada como una ganancia proporcional, deduciendo que el controlador proporcional es un amplificador que trabaja con una ganancia ajustable ( $Kp$ ).

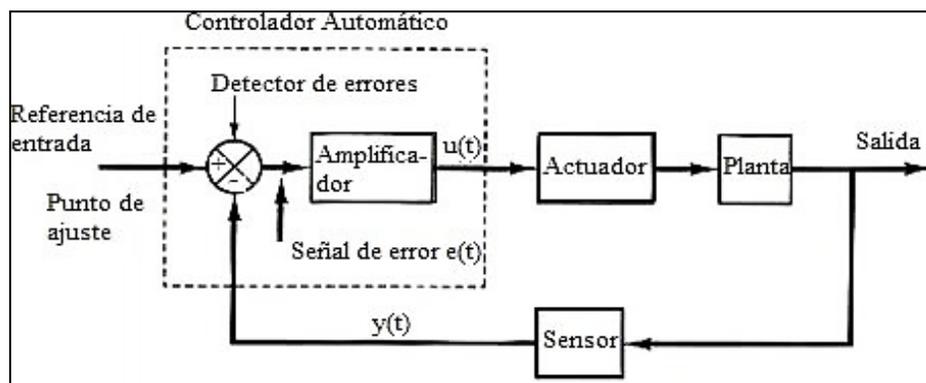


Figura 4. Diagrama de bloques de un controlador proporcional

- **Control Integral:** Se le conoce como controlador integral cuando cambiamos el valor de una señal de salida de un controlador  $u(t)$  por una razón, la cual es proporcional a la señal de error





$e(t)$ . El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

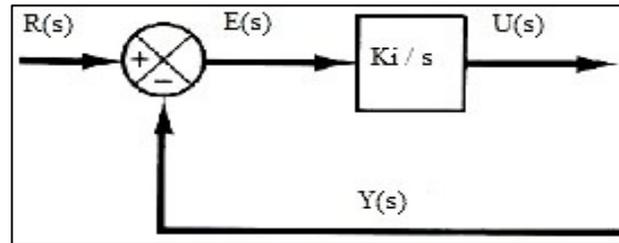


Figura 5. Diagrama de bloques de un controlador integral

**Controlador Proporcional- Integral-Derivativo (PID):** El control PID, que significa Proporcional, Integral y Derivativo, es un método ampliamente utilizado para regular y estabilizar sistemas dinámicos. En el caso de un robot insecto, el control PID puede ser implementado para lograr una locomoción precisa y estable. El control PID se basa en la retroalimentación constante del estado del sistema y ajusta los parámetros de control en función de los errores entre la referencia deseada y la salida real. Para un robot insecto, estos errores pueden estar relacionados con la posición, la orientación o la velocidad. La componente proporcional del control PID permite una respuesta rápida a los cambios en el entorno, mientras que la integral corrige los errores acumulados a lo largo del tiempo, evitando desviaciones persistentes. Además, la componente derivativa proporciona una respuesta rápida a cambios bruscos y ayuda a estabilizar el sistema.

Implementar un control PID en un robot insecto requiere un modelado adecuado del sistema, una sintonización cuidadosa de los parámetros del controlador y la integración con los actuadores y sensores del robot. Además, es importante considerar las características específicas de un robot insecto, como su tamaño y estructura, para garantizar una locomoción eficiente y precisa.

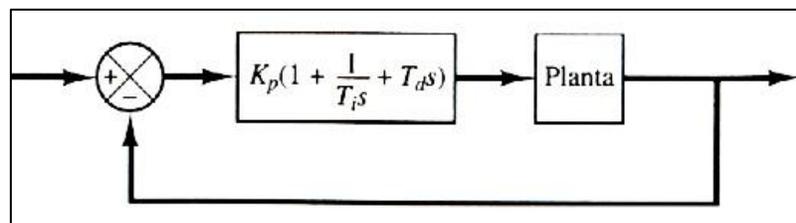


Figura 6. Diagrama de bloques de un controlador PID

### III. Resultados

Estos cálculos fueron hechos con la suposición de que al menos uno de los robots lleva consigo un material que se mencione a continuación: Pruebas de desplazamiento del robot en una pared de color blanca, para obtener los tiempos que se demora en una distancia de 1.20m en diferentes calibraciones del controlador PID con una batería de 7.4V, 550mAh con un peso de 38 gramos.





<b>Distancia</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>
1.20	20	0.06
1.20	18	0.067
1.20	18	0.067
1.20	16	0.075

*Tabla 1. Prueba 1*

Pruebas de desplazamiento del robot en una pared de color café, para obtener los tiempos que se demora en una distancia de 1.20m en diferentes calibraciones del controlador PID con una batería de 7.4V, 550mAh con un peso de 38 gramos.

<b>Distancia</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad</b>
1.20	20	0.06
1.20	23	0.05
1.20	17	0.07
1.20	17	0.07

*Tabla 2. Prueba 2*

Pruebas de desplazamiento del robot en una pared de color blanca, para obtener los tiempos que se demora en una distancia de 1.20m en diferentes calibraciones del controlador PID con una batería de 7.4V, 1500mAh con un peso de 93 gramos.

Distancia	Tiempo	Velocidad
1.20	20	0.06
1.20	18	0.067
1.20	18	0.067
1.20	16	0.075

*Tabla 3. Prueba 3*

Pruebas de desplazamiento del robot en una pared de color café, para obtener los tiempos que se demora en una distancia de 1.20m en diferentes calibraciones del controlador PID con una batería de 7.4V, 1500mAh con un peso de 93 gramos.





Distancia	Tiempo	Velocidad
1.20	21	0.057
1.20	20	0.06
1.20	20	0.06
1.20	18	0.066

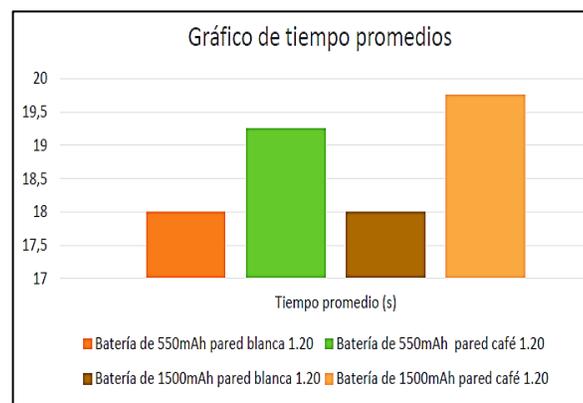
*Tabla 4. Prueba 4*

Para el análisis del comportamiento se elabora una tabla con los tiempos y velocidades promedio en cada una de las pruebas como se muestra a continuación:

Tipo de prueba	Distancia	Tiempo promedio	Velocidad promedio(m/s)
Batería de 550mAh en pared blanca	1.20	18	0,0666
Batería de 550mAh en pared café	1.20	19.25	0,0623
Batería de 1500mAh en pared blanca	1.20	18	0,0666
Batería de 1500mAh en pared café	1.20	19.75	0,0607

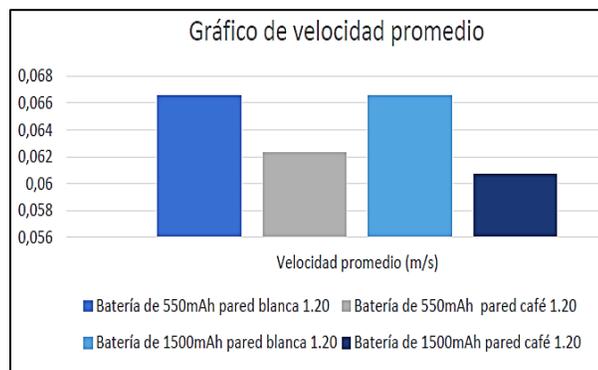
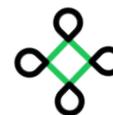
*Tabla 5. Análisis de tiempo y velocidades del robot*

### Gráficos de tiempos promedios y velocidad promedio:



*Figura 7. Tiempos promedios*





*Figura 8. Velocidades promedias*

#### IV. Conclusiones

La implementación de un sistema de control y movimiento para un robot insecto utilizando controladores PID ofrece numerosos beneficios prácticos. A lo largo de este artículo, hemos explorado cómo los controladores proporcionan una forma efectiva de lograr un control preciso y estable de las acciones del robot, replicando de manera eficaz el comportamiento de un insecto. Hemos demostrado que los controladores PID son una herramienta valiosa para controlar el movimiento de un robot insecto. Su simplicidad y versatilidad permiten una implementación práctica en una amplia variedad de aplicaciones robóticas. Al aprovechar la retroalimentación en tiempo real y los ajustes adecuados de los parámetros del controlador, hemos logrado un control de movimiento preciso y adaptable. Exploramos una amplia variedad de factores que impactan en el funcionamiento de un robot, específicamente en su capacidad de movimiento y control. Dentro de la investigación existen tres variables clave: el tipo de batería, el terreno y las configuraciones de los controladores PID. Estos elementos interconectados han demostrado tener un impacto significativo en el rendimiento del robot en diversas situaciones, este artículo demuestra la complejidad y la interdependencia de factores como el tipo de batería, el terreno y las configuraciones de los controladores PID en el rendimiento de un robot. La elección adecuada de estos elementos y su ajuste preciso son cruciales para lograr un funcionamiento eficiente y confiable en una variedad de situaciones. Esta comprensión profunda de los factores que influyen en el rendimiento de los robots es esencial a medida que avanzamos hacia aplicaciones robóticas más diversas y exigentes en el mundo real. Cada proyecto requerirá un enfoque personalizado y una atención cuidadosa a estos factores para lograr los resultados deseados.

#### Referencias

- [1] N. Delcomyn, «Architectures for a biomimetic hexapod robot. Robotics and Autonomous Systems,» 2000.
- [2] N. Fernandez, « Robot Hexápodo,» 2003.
- [3] S. Desai, «Analysis of a new single degree-of-freedom eight link leg mechanism for walking machine,» 2019.
- [4] T. Tefere, «Review and synthesis of a walking machine (Robot) leg mechanism,» 2019.
- [5] K. Pearson, «The control of Walking,» 1976.
- [6] K. Ogata, «Ingeniería de Control Moderna,» 1998.
- [7] K. Ogata, «Sistemas de Control en Tiempo Discreto,» 1996.
- [8] O. Johansson, «Diseño y construcción de un mecanismo andante,» 2019.
- [9] N. Fernandez, «Robot Hexápodo. Catalunya: Universitat Politècnica,» 2003.
- [10] W. Aymacaña, «Diseño y construcción de un robot hexápodo con sistema de articulaciones de apéndice flexible»<sup>9</sup>





diseñado para lugares de difícil,» 2009.

- [11] A. García, «Diseño y construcción de un robot hexápodo con sistema de articulaciones de apéndice flexible diseñado para lugares de difícil,» 2016.
- [12] E. Aldas, «Diseño y construcción de un robot hexápodo con sistema de articulaciones de apéndice flexible diseñado para lugares de difícil,» 2017.
- [13] I. Moreno, «Diseño y construcción de un robot hexápodo con sistema de articulaciones de apéndice flexible diseñado para lugares de difícil,» 2012.
- [14] L. Espinoza, «Cinemática y Control de un Robot Insecto: Análisis y Diseño con Enfoque en Controladores PID,» 2022.

