



*Efectividad de Controladores PD, PI, PID en Seguidor de Línea Turbinado*

*Effectiveness of PD, PI, PID Controllers in Turbine Line Followers*

*Eficácia dos Controladores PD, PI, PID em Seguidores de Linha de Turbina*

Balseca Dahua Braulio <sup>I</sup>

[braulio.balseca@ieee.org](mailto:braulio.balseca@ieee.org)

<https://orcid.org/0000-0002-7111-7949>

Jacome Corrales Johnny Michael <sup>II</sup>

[jonny.michael.jacome.corrales@gmail.com](mailto:jonny.michael.jacome.corrales@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-3192-5084>

Diego Ramiro Ñacato Estrella <sup>III</sup>

[diego.nacato@esPOCH.edu.ec](mailto:diego.nacato@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-7233-9076>

Cristina Alejandra Orozco Cazco <sup>IV</sup>

[cristina.orozco@istcarloscisneros.edu.ec](mailto:cristina.orozco@istcarloscisneros.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-1896-1590>

Jenny Edith Sani Domínguez <sup>V</sup>

[jenny.sani@istcarloscisneros.edu.ec](mailto:jenny.sani@istcarloscisneros.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-9130-6464>

**Correspondencia:** [braulio.balseca@ieee.org](mailto:braulio.balseca@ieee.org)

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 23 de mayo de 2022 \* **Aceptado:** 12 de junio de 2022 \* **Publicado:** 20 de julio de 2022

- I. Investigador Independiente, Ecuador.
- II. Investigador Independiente, Ecuador.
- III. Docente Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Docente Instituto Superior tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador.
- V. Docente Instituto Superior tecnológico Carlos Cisneros, Ecuador.



## Resumen

El objetivo del presente artículo es analizar la efectividad de los controladores en el diseño de un robot seguidor de línea. Para ello se mostrará una descripción de los componentes físicos y del sistema de control que integran a un robot seguidor de línea de tipo velocista. Dentro de los componentes físicos se describen los principales elementos que forman parte del robot. Así también se emplearán diferentes algoritmos como sistemas de control en el robot. Estos hacen referencia a los controles, Proporcional Derivativo (PD), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID). Por medio de la implementación del prototipo del robot seguidor de línea junto con la programación del algoritmo con los distintos tipos de controladores PD, PI y PID, evaluando su efectividad a través de pruebas de campo, para lo cual se diseñó una pista de tipo elíptica sobre una superficie de 2.20m x 2.40m, obteniendo una efectividad del 90% con un controlador PID a diferencia del resto, manteniendo la misma velocidad de los motores y el nivel de la batería en su máxima capacidad en las cinco trayectorias realizadas en la pista.

**Palabras Clave:** Efectividad; proporcional; integral; derivativo; set point; controlador; SMD.

## Abstract

The objective of this article is to analyze the effectiveness of the controllers in the design of a line follower robot. To do this, a description of the physical components and the control system that make up a sprinter-type line follower robot will be shown. Within the physical components, the main elements that are part of the robot are described. Thus, different algorithms will also be used as control systems in the robot. These refer to the controls, Proportional Derivative (PD), Proportional Integral (PI), and Proportional Integral Derivative (PID). Through the implementation of the prototype of the line follower robot together with the programming of the algorithm with the different types of PD, PI and PID controllers, evaluating its effectiveness through field tests, for which an elliptical type track was designed. on a surface of 2.20m x 2.40m, obtaining an effectiveness of 90% with a PID controller unlike the rest, maintaining the same speed of the motors and the battery level at its maximum capacity in the five trajectories made on the track.

**Keywords:** Effectiveness; proportional; integral; derivative; set point; controller; SMD.

## Resumo

O objetivo deste artigo é analisar a eficácia dos controladores no projeto de um robô seguidor de linha. Para isso, será apresentada uma descrição dos componentes físicos e do sistema de controle que compõem um robô seguidor de linha do tipo sprinter. Dentro dos componentes físicos, são descritos os principais elementos que fazem parte do robô. Assim, diferentes algoritmos também serão utilizados como sistemas de controle no robô. Referem-se aos controles, Derivada Proporcional (PD), Integral Proporcional (PI) e Derivada Integral Proporcional (PID). Através da implementação do protótipo do robô seguidor de linha juntamente com a programação do algoritmo com os diferentes tipos de controladores PD, PI e PID, avaliando sua eficácia através de testes de campo, para os quais foi projetada uma pista do tipo elíptica. 2,20m x 2,40m, obtendo uma eficácia de 90% com um controlador PID diferente dos demais, mantendo a mesma velocidade dos motores e o nível da bateria na sua capacidade máxima nas cinco trajetórias feitas na pista.

**Palavras-chave:** Eficácia; proporcional; integrante; derivado; ponto de ajuste; controlador; SMD.

## **Introducción**

La robótica es una de las aplicaciones más apasionantes de la electrónica. Un robot seguidor de línea se clasifica en el campo de la robótica móvil. La tarea fundamental de un robot seguidor de línea es el desplazamiento en una pista conocida o desconocida, por tanto, es necesario que posea tres funciones fundamentales, la locomoción (nivel físico), la percepción (nivel sensorial) y la decisión (nivel de control).

Partiendo de estos conceptos se tiene la captura de la posición de la línea con sensores ópticos montados en el extremo delantero del robot, empleando sensores foto transistores o también conocido como (reflectivos) dados por el sensor QTR8A. Por lo tanto, el proceso de detección de líneas requiere una alta resolución y alta robustez. Consiguiendo dirigir el robot paralelamente sobre la línea con cualquier mecanismo de dirección [1]. Generalmente se trata de una operación de motores DC con relación de transmisión 10 : 1. Esto requiere una compensación de fase para estabilizar el movimiento de seguimiento aplicando un filtro digital con diferentes tipos de controladores, PID o cualquier otro tipo de control para la velocidad según el estado del carril. La velocidad se limita al pasar por una curva debido a la fricción del neumático y el suelo. Los robots seguidores de línea son robots capaces de seguir una línea marcada en el suelo. Normalmente esta línea es de color negro sobre un fondo blanco [2].

Los controladores PID son el tipo de controlador más utilizado en las aplicaciones industriales. Son estructuralmente sencillos y presentan un rendimiento robusto en una amplia gama de condiciones de funcionamiento. En ausencia de un conocimiento completo del proceso, estos tipos de controladores son los más eficiente de las opciones [3]. Los tres parámetros principales que intervienen son Proporcional (P), Integral (I) y Derivada (D). La parte proporcional se encarga de seguir la consigna deseada, mientras que la integral y la derivativa se encargan de la acumulación de errores pasados y de la tasa de cambio de error en el proceso, respectivamente. La contribución de fase del controlador PD aumenta de  $0^\circ$  a bajas frecuencias a  $90^\circ$  a altas frecuencias. Por razones prácticas, se puede añadir un polo con una constante de tiempo corta,  $T_f$ , al controlador PD. El polo ayuda a limitar la ganancia del bucle a altas frecuencias, lo que es deseable para el rechazo de las perturbaciones [4].

El controlador PI añade así un polo en el origen (un integrador) y un cero finito al bucle de realimentación. La presencia del integrador en el bucle obliga a que el error a una entrada constante sea cero en estado estacionario; de ahí que el controlador PI se utilice habitualmente en el diseño de servomecanismos. El cero del controlador se sitúa normalmente cerca del origen en el plano complejo  $s$ . La presencia de un par polo cero añade un polo del sistema de lazo cerrado con una gran constante de tiempo. La ubicación del cero puede ajustarse para que la contribución del modo lento a la respuesta global del sistema sea pequeña.

Tomando en cuenta, los conceptos de los controladores, estos se los pueden adjudicar al funcionamiento de los motores para el cambio de velocidad y sentido de giro. Al integrar una turbina al seguidor de línea se logra tener una cierta absorción al suelo para poder brindar una estabilidad en el giro cuando el ángulo de la pista es cercano a los  $90^\circ$ , cabe mencionar que una turbina es un dispositivo que aprovecha la energía cinética de algún fluido -como el agua, el vapor, el aire o los gases de combustión- y la convierte en el movimiento de rotación del propio dispositivo. Las turbinas se utilizan generalmente en la generación eléctrica, los motores y los sistemas de propulsión. Las turbinas son máquinas (concretamente turbo máquinas) porque las turbinas transmiten y modifican la energía.

Una turbina simple esta compuesta por una serie de álabes -actualmente el acero es uno de los materiales más utilizados- y permite que el fluido entre en la turbina, empujando los álabes. Estos álabes giran mientras el fluido fluye a través de ellos, capturando parte de la energía como

movimiento de rotación. El fluido que pasa por una turbina pierde energía cinética y sale de ella con menos energía de la que tenía al principio.

### **Microcontrolador baby orangután**

El Baby Orangután B-328 es un controlador de robot muy compacto pero completo, que incluye un microcontrolador AVR ATmega328P de alto rendimiento (con 32 KB de memoria de programa y 2 KB de RAM) y dos canales de unidad motriz en el mismo formato de 24 pines unidades competitivas que incluyen solo un microcontrolador. Puede conectar su batería, sensores y motores directamente a este pequeño modulo para hacer un robot en miniatura, o puede usar el Baby Orangután como un controlador auxiliar en robots más grandes [5].

### **Metodología**

En el seguidor de línea la metodología a seguir será el control del robot mediante un control PD (control proporcional derivativo). El es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener set point o punto de consigna, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. En el caso del robot velocista el controlador PD que es una rutina basada matemáticamente procesara los datos del sensor y lo utiliza para controlar la dirección y de esta forma mantenerlo en curso.

### **Error**

Llamamos a la diferencia entre la posición objetivo y la posición medida del error que tan lejos del punto de consigna se encuentra el sensor en nuestro caso el objetivo es tener los sensores centrados.

### **Set point**

Cuando el error es 0 en el caso del robot velocista es 3500, el objetivo es siempre mantenerlo en la línea o lo que es el caso de los sensores mantenerlo centrado y así no se llegue a salir de la línea.

### **Parámetros**

- **PROPORCIONAL:** Es la respuesta al error que se tiene que entregar de manera inmediata, es decir, si nos encontramos en el centro de la línea, los motores, tendrán en respuesta una velocidad de igual valor si nos alejamos del centro, uno de los motores reducirá su velocidad y el otro aumentará [6].

$$\text{Proporcional} = (\text{posición}) - \text{punto consigna} \quad (1)$$

- **DERIVATIVO:** Es la derivada del error, su función es mantener el error al mínimo, corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce, de esta manera evita que el error se incremente, en otra palabra, anticipara la acción evitando así las oscilaciones excesivas.

$$\text{Derivativo} = \text{proporcional} - \text{proporcional pasado} \quad (2)$$

### Constantes

- **FACTOR (KP):** Es un valor constante utilizado para aumentar o reducir el impacto de Proporcional. Si el valor es excesivo, el robot tendera responder inestablemente, oscilando excesivamente. Si el valor es muy pequeño, el robot responderá muy lentamente, tendiendo a salirse de las curvas [7].

- **FACTOR (KD):** Es un valor constante utilizado para aumentar o reducir el impacto de la Derivada. Un valor excesivo provocara una sobre amortiguación. Provocando inestabilidad.

$$\text{Salida pwm} = (\text{prop.} * Kp) + (\text{deri.} * Kd) \quad (3)$$

- *prop.* : Proporcional

- *deri.* : Derivativo

### Arquitectura

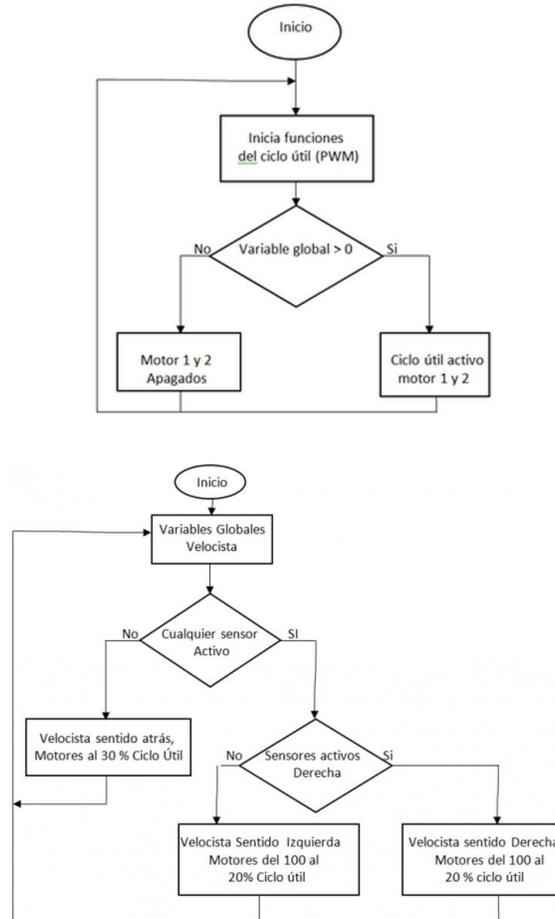


Fig. 1 Arquitectura del embebido

## Diagrama de bloques

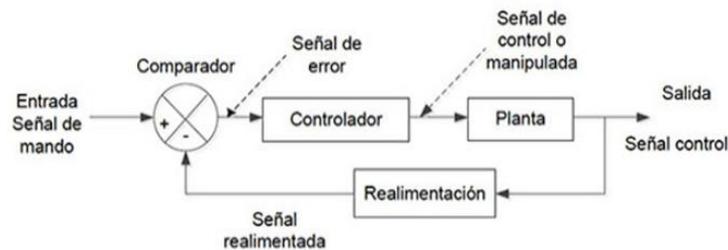


Fig. 2 Diagrama de bloques del embebido.

Entrada de mando: Vendría a ser el punto de referencia en donde se quiere fijar al robot “Set point”, el objetivo es que el robot no salga de la línea, por lo tanto, lo deseado es que siempre se mantenga centrado en el centro el setpoint será el valor de 3500.

- **Controlador:** En este caso el controlador es el encargado de corregir y mantener en marcha al robot, su objetivo es que no se salga del punto de referencia o que al menos logre tenerlo dentro de los rangos permitidos, lo ideal es que mantenga al robot fijado en el centro, pero en la realidad ocurrirá que el mundo externo provoque muchas perturbaciones haciendo que el robot oscile o se salga del punto de referencia por lo que tendrá que corregir continuamente la marcha. Si este controlador es el PD que para este caso sería un algoritmo programado en una placa de desarrollo [8].
- **Planta:** La planta está relacionada con las condiciones físicas del robot, peso, longitud, tracción de los motores, velocidad, rozamiento, inercia. Como se ve el diagrama de bloques, el controlador modifica el comportamiento de la planta es decir el comportamiento del robot [9].
- **Salida o señal de control:** Es la respuesta producida por el control aplicado en el robot, en este caso la salida de control se envía al driver de motor y luego a los motores para que puedan corregir la marcha constantemente. la medición de esta salida es justamente la señal es la posición actual del robot medido.
- **Realimentación:** Esta compuesta de la adquisición de datos que son los sensores del robot que va a leer la posición relativa actual del robot la procesa y manda nuevamente a compararas con la referencia que es el setpoint, esta comparación traerá un resultado llamado error que nuevamente es entregado al controlador para que pueda procesarla y enviar una señal de corrección, la realimentación es la comparación de la salida con respecto a la entrada [10].

## **Materiales**

- 1 - Microcontrolador Baby orangután
- 1 - Regleta QRT 8A
- 2 - Motores Pololu HPCB -10:1
- 2 - Soportes Motores Pololu
- 1 - Batería 2 C.0 - celdas 300mA- 7.4V
- Rines y Llantas
- Espadines Macho y hembra
- Pulsador
- Swich

- 20 Cables arduino (hembra-macho)
- 1 - Baquelita
- Regulador de 5V
- 3 - Leds smd
- Cargador de Baterias Lipo
- Programador AVR Pololu
- Turbina EDF 27
- ESC 10 A

## Componentes

El robot seguidor de línea posee los siguientes elementos para su construcción:

- Microcontrolador Baby Orangután por la razón de que esta placa tiene integrado un puente h el cual permite el control de los motores y además trabaja a una frecuencia de 16Hz.

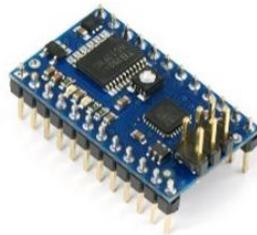


Fig. 3 Baby Orangutan.

Motores utilizados son los HPCB pololu 10:1 que son de larga duración y son de alto rendimiento y alcanzan hasta 3000 RPM.



Fig. 4 Motor Pololu

- Regleta de sensores QTR8A analógica ya que permite detectar mediante sus 8 sensores la posición en la que se encuentre el robot.



**Fig. 5** Regleta QTR 8A.

- Batería de litio de 2 celdas Turnigy de 45-90C 7.4 V 300mA ya que es suficiente para alimentar todo el circuito del seguidor y además tiene una buena tasa de descarga y son recargables.



**Fig. 6** Batería Turnigy

- Rines con llantas de goma ya que tienen una buena adherencia con lo cual se reduce el derrape de las mismas.



**Fig. 7** Llantas de goma

- Se usará una turbina EDF27 para mantener las llantas con más fricción en la pista y evitar derrapes.



**Fig. 8** Turbina EDF27

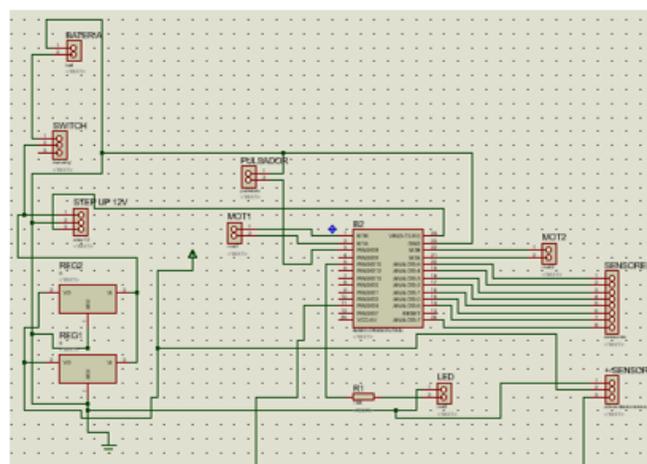
- El controlador de la turbina es un ESC de 10A con el cual se controlara la velocidad de succión según sea el requerimiento.



**Fig. 9** ESC 10 A

## Diseño electrónico

En la Fig. 10 se muestra el esquema completo del seguidor de línea con la barra de sensores representada por pines y con el controlador principal, lo cual permite el control de la barra de sensores y control de los motores.



**Fig. 10** Diseño electrónico

## Esquema PCB

En la figura se observa el PCB del seguidor.

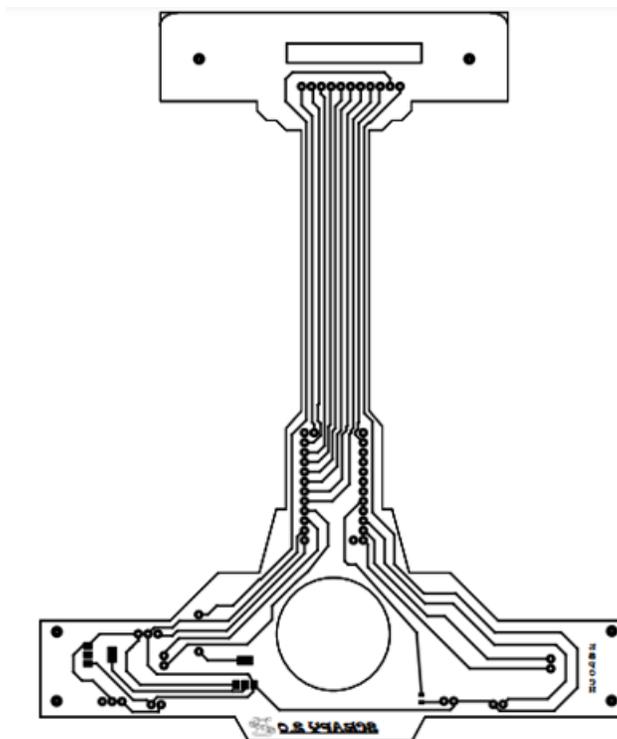


Fig. 11 Diseño PCB

## Vista 3D Seguidor de línea

En la figura se observa el seguidor en 3d de la placa PCB la cual esta con todos los componentes antes enlistado.

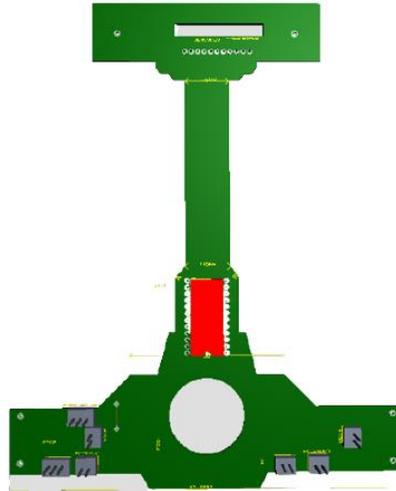


Fig. 12 Diseño 3d PCB

## Implementación

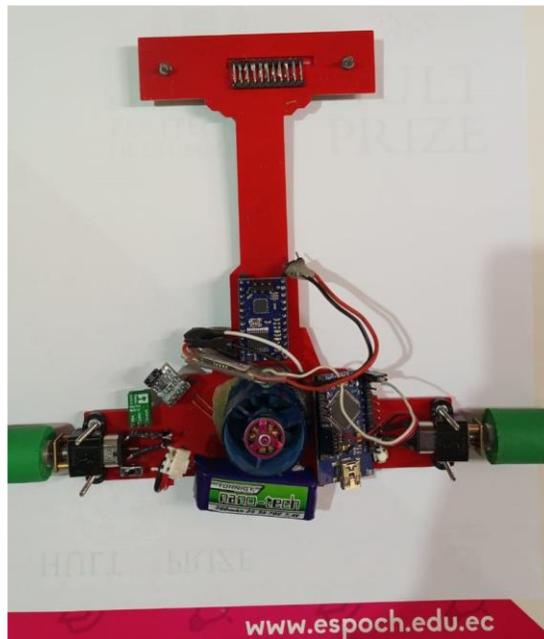
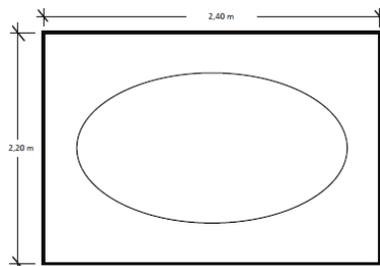


Fig. 13 Seguidor de Línea Implementado.

## Resultados

Para validar el tipo de control a utilizar se pone en funcionamiento todo el sistema del seguidor, tanto la parte de hardware y software del robot. Para ello se efectúan varias pruebas de cada uno de los controladores en una pista para así, proceder a calcular la efectividad que tiene cada tipo de

control aplicado. Para sacar la efectividad del robot se realizó en una pista como se observa en la Fig. 14, se toma cinco repeticiones con recorrido en sentido horario.



**Fig. 14** Pista para pruebas del seguidor de línea

Prueba Control PD				
Número de Prueba	Tiempo (seg)	Velocidad (rpm)	Desviación de Trayectoria	Trayectoria Completa
1	7	1500	NO	100%
2	5	1500	SI	70%
3	6	1500	SI	80%
4	7	1500	NO	100%
5	6	1500	NO	90%
Tiempo Promedio: 6,20				

**Tab. 1** Resultados Control Proporcional Derivativo (PD) en pista sentido horario

Prueba Control PI				
Número de Prueba	Tiempo (seg)	Velocidad (rpm)	Desviación de Trayectoria	Trayectoria Completa
1	6	1500	SI	40%
2	8	1500	NO	100%
3	4	1500	SI	30%
4	6	1500	SI	30%
5	8	1500	SI	60%
Tiempo Promedio: 6,40				

**Tab. 2** Resultados Control Proporcional Integral (PI) en pista sentido horario

De la Tab. 2 aplicando un control PI se demuestra una efectividad del 52% para terminar de recorrer toda la pista con un tiempo promedio de 6,40 seg. a una velocidad de 1500 Rpm.

Prueba Control PID				
Número de Prueba	Tiempo (seg)	Velocidad (rpm)	Desviación de Trayectoria	Trayectoria Completa
1	5	1500	NO	100%
2	2	1500	SI	50%
3	4	1500	NO	100%
4	4	1500	NO	100%
5	4	1500	NO	100%
Tiempo Promedio: 3,80				

**Tab. 3** Resultados de Control Proporcional Integral (PID) en pista sentido horario

De la Tab. 3 aplicando un control PID se demuestra una efectividad del 90% para terminar de recorrer toda la pista con un tiempo promedio de 3,80 seg. a una velocidad de 1500 Rpm.

Comparación de Controladores		
Tipo de Control	Velocidad	Efectividad
PD	1500 Rpm	88%
PI	1500 Rpm	52%
PID	1500 Rpm	90%

**Tab. 4** Resultado de incorporación de Controladores.

De la Tab. 4 se determinó que el seguidor de línea responde de mejor manera con un control PID ya que tiene una efectividad del 90% en recorrer toda la pista.

## Conclusiones

- El control PD es efectivo, pero tarda más tiempo recorrer toda la pista.
- El controlador PID mejora notablemente el tiempo de respuesta para el seguidor de línea
- El controlador PI posee una efectividad baja lo cual no lo hace útil para ser implementado en seguidores de línea de velocidad.
- Se debe tener en cuenta que para la construcción del seguidor de línea las cargas que consume cada elemento son representativas al momento de escoger una batería ideal, para ello es necesario revisar individualmente el consumo de cada uno de los elementos, para el presente caso se requiere una batería que supla un consumo de 7.4V, lo que indica que la batería debe ser de 2 celdas, esto nos brinda una duración aproximada de 25 segundos a plena carga, lo que requiere una alta demanda de trabajo.

- Al rutear la placa esta debe de seguir la normativa técnica que indica la IPC Standards on PCB, puesto que el ancho de cada pista se encuentra directamente relacionado con la cantidad de corriente que circula por ella, en el caso de la salida a los motores, esta debe tener un ancho de 2mm para corrientes mayores a 1A y menores a los 2A, al no considerar la normativa para ruteo teniendo en cuenta el desgaste lineal al ser sometida a CNC o Laser para su respectivo ruteo, esta puede presentar anomalías en el momento de ejecución por la sobrecarga en las pistas.
- Para tener una mejor tracción o adherencia en las pistas se recomienda emplear una turbina, haciendo que el giro tome un sentido horario, esto le brinda un cierto centro de gravedad que hace que los giros de ángulo recto lo pueda hacer sin salirse del centro de la pista a seguir, asegurando su funcionamiento a altas revoluciones.

## Referencias

1. M. Pakdaman, M. M. Sanaatiyan, and M. Rezaei, “A line follower robot from design to implementation: Technical issues and problems,” pp. 5 – 9, 03 2010.
2. R. Mariano, C. Jorge, G. Gabriel, and R. Francisco, “Sistema de control y arquitectura de un robot seguidor de línea,” vol. 02, pp. 115 – 128, 07 2016.
3. J. Yoon and J. Doh, “Optimal pid control for hovering stabilization of quadcopter using long short term memory,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 53, p. 101679, 2022.
4. P. Dupont, “Avoiding stick-slip through pd control,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 5, pp. 1094–1097, 1994.
5. R. de Robots, “Robótica. que es la robótica y para que sirve,” pp. 1 – 3, 2021.
6. “Seguidor de línea: El nuevo robot de la industria retail,”
7. E, “Controlador de robot pololu baby orangutan b- 328,” in *ElectroStore*, vol. 1, 2019.
8. SHERLIN, “¿que es un microcontrolador?,” 02 2019.
9. “Regleta sensores de linea qtr 8a pololu qtr-8a original,” Demoss.
10. Tecnonautas, “www.tecnonautas.net,” 22 de Agosto de 2018.
11. Mazzone, V. (2012). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes, 12. <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

12. Ogata, K. (2018). Ingeniería de control moderna. In *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún* (5a ed., Vol. 5, Issue 10). <https://doi.org/10.29057/ess.v5i10.3323>
13. Hernandez, R. (2010). Introducción a los sistemas de control

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).