

Robótica educativa: diseño y construcción de un robot seguidor de línea

Educational robotics: a line - follower robot

Esmeralda Palmares Trejo¹, Francisco Sánchez Niño², Francisco J. de Anda Salazar³ y Carlos Soubervielle Montalvo⁴.

¹Estudiante de Ingeniería en Mecatrónica. ²Profesor del Departamento de Ingeniería Industrial, Mecatrónica y Tecnologías de la Información en Universidad Tangamanga (UTAN), Campus Industrias. ³Profesor–Investigador en el Laboratorio de cristales del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, IICO-UASLP. ⁴Jefe del Laboratorio de hardware avanzado, Facultad de Ingeniería, UASLP.



Recibido: noviembre 2020
Aceptado: enero 2021



Resumen

En este artículo se presenta el diseño y la construcción de un robot seguidor de línea que sirve como herramienta educativa complementaria para reforzar los conocimientos adquiridos en el área de la robótica aplicada. El objetivo es que dicha construcción sencilla garantice el uso de conocimientos básicos de electrónica analógica y digital, reforzando así el conocimiento y la aplicación de estas dos áreas fundamentales de la Mecatrónica. El robot desarrollado utiliza sensores ópticos, como fotodiodos y fotodetectores para detectar la trayectoria a seguir.

Palabras clave: robot seguidor de línea, sensores, electrónica digital, electrónica analógica.

Abstract

The design and construction of a line-follower robot, used as a complementary educational tool to reinforce the knowledge acquired in the area of applied robotics is presented. The line-follower robot is controlled by digital and analog electronic circuits, reinforcing the knowledge and application of these two fundamental areas in mechatronics. Optical sensors, such as photodiodes and photodetectors are used to detect the trajectory to be followed by the robot.

Keywords: line-follower robot, sensors, digital electronic, analog electronic.



Introducción

La robótica es una de las áreas del conocimiento que mayor impacto produce en los estudiantes de Mecatrónica y no es sólo en el salón de clases sino por la infinidad de aplicaciones de los robots, desde la robótica educativa, la automatización industrial, el control de procesos y la investigación, por mencionar algunos de los sectores donde se usa y aplica (Galeano, Torres y Álvarez, 2014).

Un robot seguidor de línea es clasificado como un dispositivo móvil (Carrillo, Cardona, Arvizo y Rodríguez, 2016) con la capacidad de desplazarse de un punto a otro a través de una trayectoria predefinida mediante una línea, por tanto, debe contar con las siguientes características fundamentales:

- Locomoción en su estructura que le permita desplazarse de un extremo a otro.
- Percepción del medio donde se desenvuelve proporcionada por los sensores incluidos en su diseño electrónico.
- Un sistema de control que tenga la capacidad de tomar decisiones en función del trabajo a realizar, respondiendo a las circunstancias que lo rodean.
- Una etapa de potencia que proporcione la energía necesaria a los diferentes actuadores que producen la energía mecánica.

La historia y el avance de la robótica están directamente ligados a la necesidad del hombre por realizar tareas cada vez más complejas, eficientes y a una mayor velocidad, con una precisión muy superior a las propias capacidades del ser humano (Ollero, 2005).

Dentro de la robótica se involucran diversas áreas del conocimiento, como la mecánica, la computación, la informática, la electrónica analógica, la electrónica digital, la instrumentación, los sistemas de control, entre otras.

Todas estas ramas del conocimiento brindan al robot diversas capacidades de las que dispone para realizar sus funciones y tareas requeridas de una forma óptima. Entre las posibles aplicaciones o funciones que se le pueden otorgar a un robot seguidor de línea están:

- Transporte de material industrial de gran tonelaje.
- Robots exploradores en minas y lugares de acceso difícil.
- Proyectos de aprendizaje utilizados en las escuelas.
- Aplicaciones en Centros de investigación y desarrollo tecnológico, permitiendo el desarrollo de nuevas técnicas de control y aprendizaje de sistemas autónomos.

En la tabla 1 se muestra la evolución de los robots seguidores de línea de acuerdo con su estructura y funcionalidad (McComb, 2018):



Primera generación	Móviles	Velocistas
<ul style="list-style-type: none"> Robots multifuncionales con un sistema de control relativamente simple que generalmente era manual, control de secuencia fija. 	<ul style="list-style-type: none"> Estos robots son autónomos, generalmente recorriendo una trayectoria específica reconocida por los sensores incorporados en su chasis o teleoperados mediante señales inalámbricas de radiofrecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Son sistemas robóticos móviles con un diseño muy ligero en su estructura mecánica, tal diseño hace énfasis en la versatilidad del movimiento, con sistemas de control optimizados en la búsqueda y la corrección de la trayectoria a realizar. Se comienzan a utilizar sistemas de control de lazo cerrado.

Tabla 1. Evolución de los tipos de robots seguidores de línea.

Desarrollo

La electrónica implementada en el robot seguidor de línea está conformada por dos etapas: de control y de potencia. La primera consiste en un dispositivo de electrónica digital de tipo secuencial que detecta la trayectoria seguida por el robot, actualizando su posición a través de dos sensores ópticos reflexivos. La segunda suministra la corriente y el voltaje necesarios, a los motores de corriente directa, mediante una configuración de puente H completo que activa en sentido horario y antihorario a las flechas de los motores.

El robot seguidor de línea consiste de un conjunto de componentes que trabajan en sincronía para generar un desplazamiento estable a lo largo de una trayectoria definida por una línea de color negro o blanco.

En la figura 1 se muestra el esquema de conexión de la electrónica de control y potencia del robot seguidor de línea diseñado.

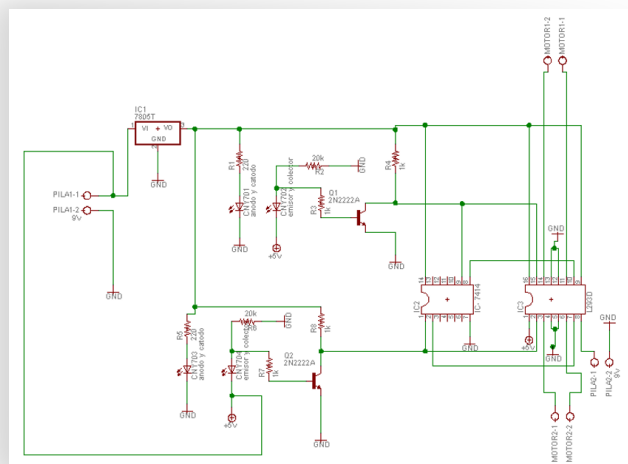


Figura 1. Diagrama del circuito de control y potencia del robot seguidor de línea implementado.



El funcionamiento del circuito de control consiste en dos fotodiodos y dos diodos emisores de luz (LED) que detectan la presencia o ausencia de la línea negra a seguir, enviando un cero cuando no se detecta línea y un uno cuando sí.

Para suprimir el ruido generado por los sensores, estos se conectan al circuito integrado 7414. El 7414 es un circuito Schmitt Trigger, un comparador con histéresis que genera pulsos cuando el voltaje de entrada está en el rango del comparador, de esta forma se elimina el ruido proveniente de las señales que generan los sensores ópticos. En su interior se tienen seis compuertas NOT Schmitt Trigger.

Los transistores están conectados en modo interruptor electrónico de alta velocidad, generan señales de corriente de suficiente valor para activar las entradas de control del circuito integrado L293D que entrega la potencia requerida para activar los motores del robot.

A continuación se enlistan los componentes utilizados en el diseño del robot seguidor de línea:

- 2 baterías alcalinas de 9V.
- 1 puente H L293D.
- 1 circuito integrado IC-7414.
- 2 motorreductores.
- 2 llantas.
- 1 regulador de voltaje LM7805.
- 2 transistores NPN 2N2222A.
- 2 resistencias de 220 Ω .
- 2 resistencias de 20K Ω .
- 4 resistencias de 1K Ω .
- 2 sensores ópticos CNY70.
- 1 base de 16 pines.
- 1 base de 14 pines.
- 6 borneras.
- 1 rueda loca.
- 2 porta pilas.
- Cable color negro, rojo, azul y amarillo.

En la figura 2 se muestra el diseño PCB del circuito electrónico de control del robot seguidor de línea:

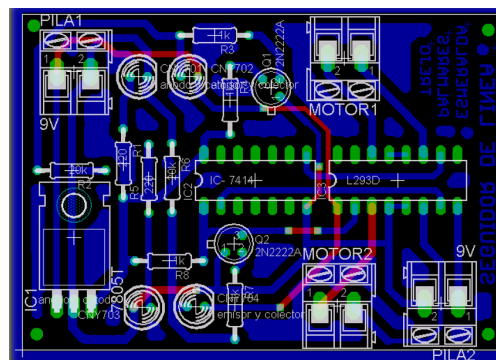


Figura 2. Diseño final de la tarjeta PCB de control del seguidor de línea.



La estructura mecánica del robot seguidor de línea consiste de un chasis de madera que le proporciona rigidez, estabilidad, versatilidad y ligereza, garantizando así los movimientos realizados por el robot móvil a lo largo de la trayectoria definida.

En la figura 3 se muestran imágenes del diseño de la estructura mecánica del robot seguidor de línea.



Figura 3. Imagen de la estructura mecánica del robot seguidor de línea con sus motores de corriente directa acoplados al chasis del móvil.

Algunas de las características del sistema robótico implementado son:

1. Corriente de salida de 500 mA por cada motorreductor.
2. Pines de habilitación.
3. Alta inmunidad al ruido por luz ambiente.
4. Señales de control y potencia aisladas.

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloque del funcionamiento y el diseño del robot seguidor de línea:

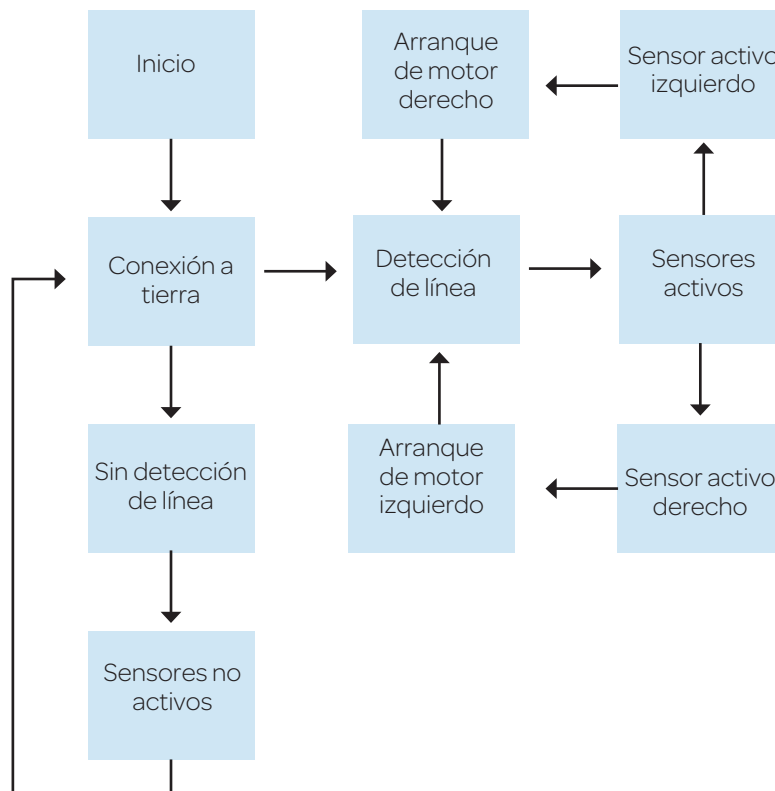


Figura 4. Diagrama de bloques del funcionamiento del robot seguidor de línea.



Los sensores infrarrojos ubicados en la parte inferior de la estructura mecánica del robot detectan la trayectoria a realizar. El sistema está calibrado para detectar líneas de color negro. Cuando el CNY70 emite el haz de luz infrarroja, ésta es absorbida por la superficie oscura, provocando la presencia de un cero a la salida del sensor, mientras que al detectar alguna superficie de otra tonalidad, la luz se refleja hacia el detector en el CNY70, generando un uno en la salida del sensor.

El circuito de detección formado por los transistores y los circuitos entregados 7414 detectan las diferentes combinaciones de ceros y unos que generan los dos sensores CNY70. Se hace uso de la técnica de diseño electrónico llamada suma de productos para obtener las ecuaciones de control del sistema de activación de los motores.

Las ecuaciones obtenidas que gobiernan el accionamiento de los motores de corriente directa se muestran a continuación:

- 1) $X_1 = A * B'$
- 2) $X_2 = A' * B$

Las ecuaciones generan los siguientes movimientos en los motores según las combinaciones de ceros y unos que envían los sensores (ver tabla 2):

A	B	X_1	X_2
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	0

Tabla 2. Valores generados por las ecuaciones hacia los motores del robot seguidor de línea. X_1 y X_2 representan los motores; A y B las señales generadas por los sensores CNY70.

En la figura 5 se muestra el esquema lógico equivalente de los transistores y el circuito integrado 7414 utilizados en la etapa de control.

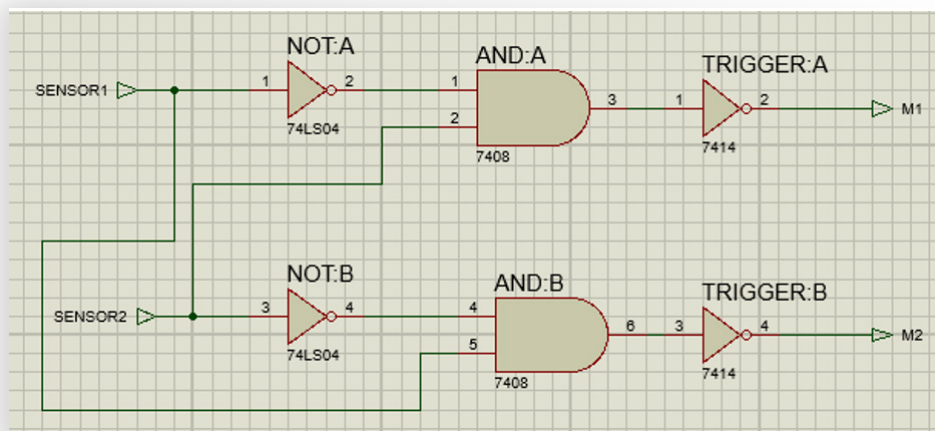


Figura 5. Se muestra el diagrama de control general del robot seguidor de línea.



Las señales generadas por las etapas de control mandan los pulsos de activación hacia la etapa de potencia que está constituida por el circuito integrado L293D, el cual es un componente que en su interior cuenta con dos configuraciones de puente H. Se pueden conectar dos motores de corriente directa y controlar su giro e inversión de giro. En la figura 6 se muestra el integrado mencionado.

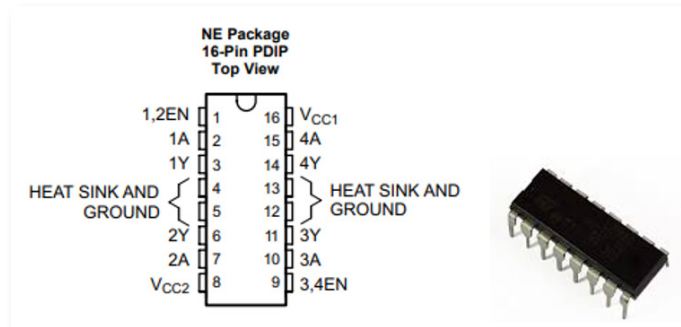


Figura 6. Dispositivo utilizado como elemento de potencia para energizar los motores de corriente directa del robot seguidor de línea.

Se realizaron diversas pruebas del robot antes de ser completamente ensamblado: pruebas de funcionamiento de los circuitos electrónicos de control, desplazamiento y fiabilidad en la trayectoria realizada por el robot seguidor de línea.

A continuación se definen algunos de estos resultados. Hay que señalar que varias de las pruebas involucraron el uso de circuitos electrónicos implementados en la tarjeta de prototipos, como se muestra en las figuras 7 y 8.

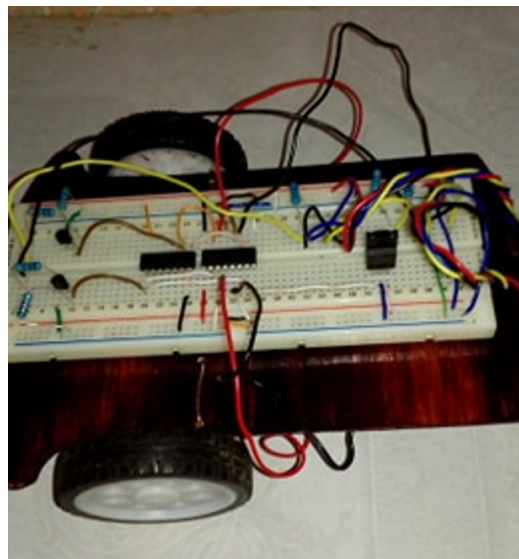


Figura 7. Prueba de funcionamiento del circuito electrónico de control del robot seguidor de línea. Las etapas de control y potencia se implementan en la tarjeta de prototipos.



El diseño final del robot seguidor de línea tiene un peso inferior a 500 gramos, brindándole la agilidad y el soporte necesarios para realizar sus funciones y tareas asignadas. La velocidad promedio alcanzada por el robot al desplazarse en un trayectoria con carga en las baterías al 100% fue de aproximadamente 53.6 cm/s. El tiempo promedio aproximado para que el robot recuperara la línea una vez que perdía la trayectoria fue de alrededor de 0.5 segundos.

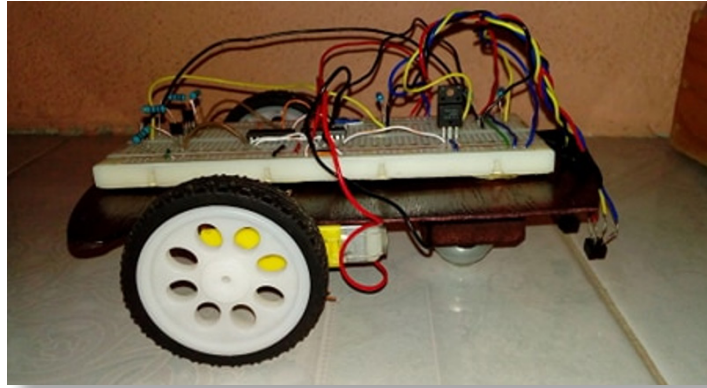


Figura 8. Otra perspectiva del prototipo obtenido al diseñar el robot seguidor de línea.

Se realizaron diversas pruebas de funcionamiento del robot móvil, el tiempo promedio del recorrido de la pista fue de dos minutos con tres segundos aproximadamente. Se presentaron ciertas oscilaciones en el desplazamiento al tratar de seguir el camino marcado por la línea oscura; esto se pudo corregir disminuyendo la distancia entre los sensores así como la altura a la cual se encontraban respecto a la pista, mejorando así la detección de la línea.

En las figuras 9 y 10 se muestran los modelos finales del esquema, el PCB y el modelo 2D de las tarjetas de electrónica de control y de potencia del robot seguidor de línea.

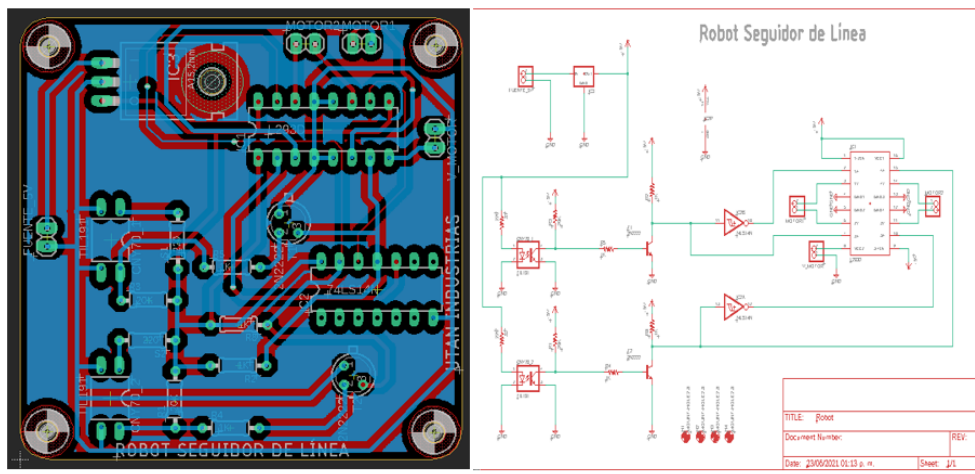


Figura 9. Esquema y PCB final de la electrónica de control desarrollada para el robot seguidor de línea.

El funcionamiento general del robot seguidor de línea fue el esperado. Hay que mencionar que se puede optimizar su funcionamiento. El siguiente paso sería reemplazar la electrónica de control por un microcontrolador de propósito general que permita implementar un sistema de control de lazo cerrado,



por ejemplo, un control proporcional integro diferencial (PID) que permita realizar la trayectoria de forma más eficiente y en menos tiempo, aumentando su velocidad y fiabilidad.

Con el sistema de control de lazo cerrado se podría, incluso, disminuir la inferencia en el funcionamiento del vehículo debido a la variación de la intensidad de la luz ambiente donde trabaja el robot seguidor de línea.

En las figuras 11 y 12 se presentan los modelos 3D del diseño electrónico final implementado en el control del robot seguidor de línea.

Figura 11. Diseño 3D de la electrónica de control desarrollada para el robot seguidor de línea.

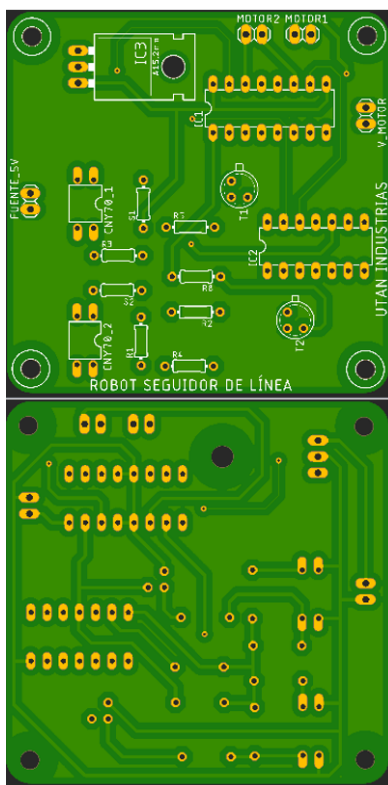
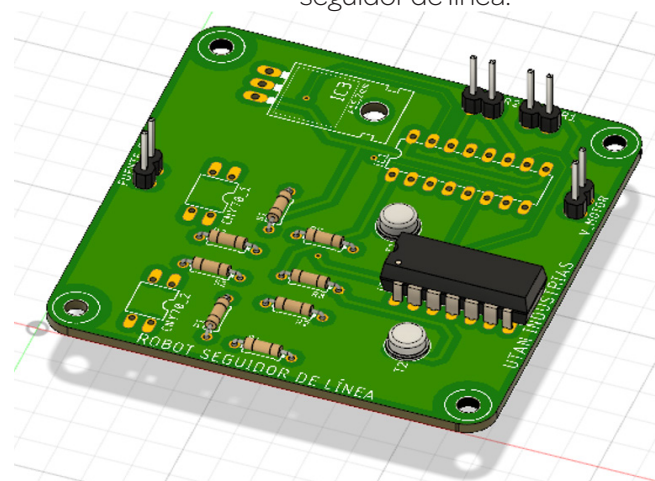


Figura 10. Diseño 2D de la electrónica de control desarrollada para el robot seguidor de línea.

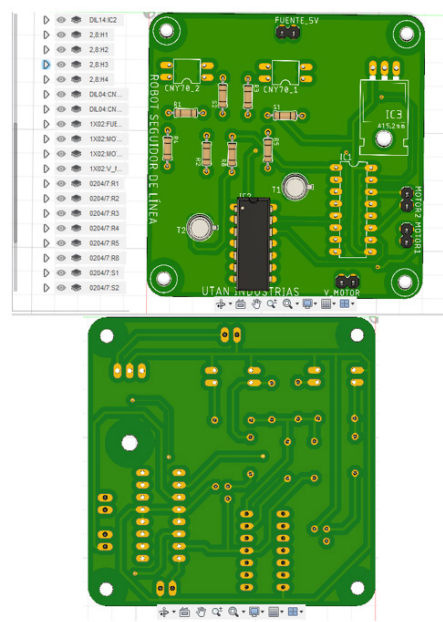


Figura 12. Vista superior e inferior del modelo 3D de la electrónica de control desarrollada para el robot seguidor de línea.



Conclusiones

Se diseñó el sistema de control de un robot seguidor de línea basado en electrónica digital básica, aplicando los conocimientos teórico-prácticos que aporta la técnica de diseño electrónico llamada suma de productos, la cual proporciona la tabla de verdad, las ecuaciones booleanas y el diagrama booleano que gobernarán el funcionamiento de la planta, que para este proyecto consistió en el robot seguidor de línea.

La etapa de potencia que se encarga de proporcionar la energía suficiente a los actuadores del robot se implementó a través del circuito integrado L293D que nos muestra una aplicación práctica de la configuración de transistores llamada puente H.

Se pudieron observar las ventajas de movilidad que ofrecen los robots móviles respecto a los robots estacionarios, además de resultar una excelente herramienta para complementar y poner en práctica los conocimientos adquiridos en materias como electrónica analógica, electrónica digital, sensores, robótica y teoría de control.

El comportamiento del robot resulta adecuado para seguir la trayectoria marcada por una línea oscura, pero durante el proceso se pudo observar que el diseño puede detectar tanto línea negra como línea blanca, esto se logra recalibrando la etapa de control.

Como trabajo a futuro se puede implementar un circuito de control electrónico basado en un microcontrolador, en el cual se implemente un algoritmo basado en la técnica del controlador proporcional integro diferencial, ampliamente utilizado en el control de procesos industriales.

Bibliografía y referencias

- Boylestad, R. L. y Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. México: Prentice Hall.
- Delgado, A. y Esparza, C. H. (2014). Robot seguidor de línea, modo solucionador laberinto. *Ingeniería electrónica*, 51(11): 23-27.
- Galeano, P. A., Torres, I. D. y Álvarez, J. F. (2014). Un robot móvil autónomo seguidor de línea. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 2(1): 1-7.
- McComb, G. (2018). *Robot Builder's Bonanza*. New York: McGraw Hill.
- Ollero, A. (2005). *Robótica, Manipuladores y Robots Móviles*. España: Marcombo.
- Romero, M. C., Cardona, J. A. y Arvizo, G. A. (2016). Sistema de control y arquitectura de un robot seguidor de línea. *Cultura Científica y Tecnológica*, 59(13): 1-14.
- Sánchez, F., Rodríguez, G. y Castillo, E. G. (2015). Manipulator Controlled Since a Smartphone by Bluetooth. *Journal of Physics: Conference Series*, 582(1): 1-5.
- Tocci, R. J., Widmer, N. y Moss, G. (2007). *Sistemas Digitales: Principios y Aplicaciones*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

