



## **Diseño de vehículo autónomo seguidor de línea velocista para el fortalecimiento de la robótica educativa**

Proyecto de investigación

Diego Fernando Gómez Castro  
1096809534  
Danelly Gabriela Ulloa Diaz  
1096700179  
Angie Sofia Rivera López  
1099736774

### **UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**

Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías  
Tecnología en implementación de sistemas electrónicos industriales  
Bucaramanga 18 de junio del 2025



## **Diseño de vehículo autónomo seguidor de línea velocista para el fortalecimiento de la robótica educativa**

Proyecto de investigación

Diego Fernando Gómez Castro

1096809534

Danelly Gabriela Ulloa Diaz

1096700179

Angie Sofia Rivera López

1099736774

Trabajo de Grado para optar al título de  
Tecnólogo en Implementación de Sistemas Electrónicos Industriales

### **DIRECTOR**

Carlos Lizardo Corzo Ruiz

### **CODIRECTOR**

Ruth Mira Gonzales Neira

Jhon Alexander Hernández Amaya

Grupo de investigación – GICAV - BIOTTIC

## **UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**

Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías

Tecnología en implementación de sistemas electrónicos industriales

Bucaramanga 18 de junio del 2025

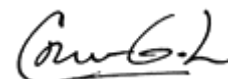
F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

### Nota de Aceptación

Este informe final de trabajo de grado, en modalidad proyecto de Investigación, fue APROBADO en cumplimiento de uno de los requisitos exigidos por las Unidades Tecnológicas de Santander para optar el título de Tecnólogo en Implementación de Sistemas Electrónicos Industriales, según acta No. 12 del 19 de junio del 2025, del Comité de Trabajo de Grado.



Cristhiam Jesid Gutiérrez Lozano  
Firma del evaluador



Carlos Lizardo Corzo Ruiz  
Firma del director

## DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a los jóvenes estudiantes que quieren ampliar sus conocimientos, tener otra visión en la vida, para aquellos que quizá no han tenido la oportunidad de acceder a conocimientos en el ámbito de la robótica, esta herramienta que les permite crecer junto con la tecnología ayudándolos a conocer y crear desde sus conocimientos adquiridos nuevos proyectos y avances tecnológicos.

A mis padres y familia, que han sido mi fuente de motivación durante todo mi desarrollo académico, siempre animándome a seguir adelante y hacer lo que realmente me gusta.

A mis amigos, los cuales han pasado momentos difíciles junto a mí, siempre trabajando en grupo para superar cualquier reto.

A los docentes, quienes con su experiencia y sabiduría nos han guiado por el camino del conocimiento abriendo puertas a la investigación.

Finalmente, agradecer a Dios quien permite que cada día podamos levantarnos y tener otra oportunidad de cumplir nuestros sueños, mi fuente de fortaleza en este viaje académico, a ti mi eterno agradecimiento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a Dios por la vida y los dones de sabiduría que nos ha regalado para hoy día ser quienes somos, quisiera agradecer a las Unidades Tecnológicas de Santander, en donde se nos ha brindado un espacio con todos los implementos necesarios para aprender, docentes excepcionales que día a día nos transmiten su experiencia y conocimiento para formarnos profesionalmente. Agradecer a mi familia y amigos quienes me han acompañado en este largo camino académico, quienes me han animado a seguir adelante y esforzarme para dar lo mejor de mí. Agradecer también a mi tutor de proyecto, quien es una persona que transmite todo su conocimiento y pasión en sus enseñanzas, quien nos motiva a indagar y conocer de lo que somos capaces y que nos ha acompañado y asesorado en esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>12</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	13
1.3. OBJETIVOS.....	14
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	14
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	15
<b>2. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>19</b>
2.1. MARCO TEÓRICO.....	19
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	20
<b>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....</b>	<b>23</b>
3.1. IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES .....	23
<b>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1. CARACTERIZAR LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA LFR MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE SUS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO CON LOS DE UN VEHÍCULO HABILITADO PARA PARTICIPAR EN COMPETENCIAS ROBOTRACER.....</b>	<b>25</b>
4.1.1. COMPONENTES UTILIZADOS .....	25
4.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOTORES.....	26
4.1.2.1. CONSTANTE ELÉCTRICA DE LOS MOTORES .....	26
4.1.2.2. PICO DE CORRIENTE EN LOS MOTORES .....	29
4.1.3. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.....	31
4.1.4. DIAGRAMA DE CONEXIONES.....	36
4.1.5. DRIVER DRV883 .....	37
4.1.6. PWM PHASE CORRECT .....	39
4.1.7. COMUNICACIÓN SERIAL DEL SISTEMA .....	40

4.1.7. ADC (ANALOG TO DIGITAL CONVERTER).....	43
4.1.8. CONTROL PD.....	44
4.1.9.APLICACIÓN DE PWM.....	47
4.1.10.PROGRAMACIÓN DEL VEHÍCULO.....	48
4.1.11.LECTURAS DE MARCAS .....	49
<b>4.2. IMPLEMENTAR UN LFR CON CARACTERÍSTICAS QUE LE HABILITEN SU PARTICIPACIÓN EN COMPETENCIAS ROBOTRACER PARA LA VALIDACIÓN DE SUS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.....</b>	<b>49</b>
4.2.1. DISTANCIA ENTRE LOS CENTROS DE LAS RUEDAS.....	50
4.2.2. DISTANCIA DE LOS MOTORES AL FINAL DEL CHASIS .....	51
4.2.3 TORQUE DE LOS MOTORES .....	52
4.2.4. VELOCIDAD MÁXIMA DEL ROBOT.....	52
4.2.5 DISTANCIA DE LOS SENSORES AL EJE DE LOS MOTORES .....	53
4.2.6 CENTRO DE MASA DEL VEHÍCULO .....	53
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
5.1. CONSTANTE ELÉCTRICA DE LOS MOTORES .....	55
5.2. CORRIENTE MÁXIMA DE ARRANQUE .....	56
5.3. CALIBRACIÓN DE SENSORES .....	56
5.4 DRIVER DRV8833 .....	57
5.5 PWM PHASE CORRECT .....	57
5.6. COMUNICACIÓN SERIAL.....	58
5.7. CONTROL PD.....	59
5.8. VALIDACIÓN.....	61
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta del motor <i>izquierdo</i> al impulso visualizada desde un osciloscopio .....	27
Figura 2. Respuesta del motor <i>derecho</i> al impulso visualizada desde un osciloscopio .....	28
Figura 3. <i>Respuesta del motor izquierdo al desenergizarse visualizada desde un osciloscopio</i> .....	29
Figura 4. <i>Respuesta del motor derecho al desenergizarse visualizada desde un osciloscopio</i> .....	29
Figura 5. Caracterización corriente de arranque. ....	30
Figura 6. <i>Conexiones de la regleta al vehículo</i> . ....	31
Figura 7. <i>Corriente de Colector normalizada vs. Distancia entre el dispositivo y el reflector</i> .....	32
Figura 8. <i>Diseño de la pieza 3D en Tinkercad</i> .....	33
Figura 9. <i>Toma de muestras parte oscura del escenario</i> . ....	35
Figura 10. <i>Toma de muestras parte clara del escenario</i> . ....	35
Figura 11. <i>Conexiones de componentes al Arduino</i> . ....	36
Figura 12. <i>Gráfica funcionamiento Fast Decay</i> . ....	38
Figura 13. <i>Gráfica funcionamiento Slow Decay</i> .....	38
Figura 14. <i>Conexiones del Driver</i> .....	39
Figura 15. <i>Conexión del módulo Bluetooth HC-06 al Arduino Nano</i> .....	41
Figura 16. <i>Valores de PWM de los motores y error del sistema</i> .....	42
Figura 17. <i>Ponderación de los sensores</i> . ....	46
Figura 18. <i>Diagrama de flujo de la calibración de los sensores y el control PD</i> . ...	47
Figura 19. <i>Funcionamiento del vehículo según programación</i> . ....	48
Figura 20. <i>Medidas de diseño del vehículo autónomo seguidor de línea</i> .....	50
Figura 21. <i>Diseño 3D del vehículo autónomo seguidor de línea</i> . ....	51
Figura 22. <i>Vista lateral del diseño del vehículo</i> . ....	51
Figura 23. <i>Distribución del centro de masa en el vehículo</i> .....	54
Figura 24. <i>Lectura de los sensores estandarizados</i> .....	56
Figura 25. <i>Señal de PWM de 8 ciclos del pin D9</i> .....	57
Figura 26. Comportamiento de los motores según el error.....	59
Figura 27. <i>Comparación de dimensiones de los vehículos</i> .....	63
Figura 28. Pista de Prueba.....	64



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Tabla de Componentes del vehículo.</i> .....	25
Tabla 2. <i>Recopilación de lecturas de la regleta QTR</i> <i>8A.</i> .....	33
Tabla 3. <i>Control PWM de la velocidad del motor.</i> .....	37
Tabla 4. Valores de Velocidad angular, Voltaje inducido y constante eléctrica de los motores. ....	55
Tabla 5. <i>Error según posición del LFR.</i> .....	59
Tabla 6. <i>Comparación de componentes.</i> .....	61
Tabla 7. <i>Comparación de tiempos y velocidades.</i> .....	64

## RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto se basa en el desarrollo de una plataforma programable junto con la documentación de los dispositivos empleados y su configuración para el funcionamiento eficiente de un vehículo seguidor de línea comercial, para la participación en competencias de tipo robotracer que pueda ser llevada a las instituciones de educación básica y así fomentar la robótica educativa para mejorar el bajo nivel que se presenta en los estudiantes del área metropolitana de Bucaramanga y en general del departamento de Santander en cuanto a habilidades en tecnologías como Electrónica, Robótica, IoT y sistemas de control para que los jóvenes obtengan mayores oportunidades de participar en competencias de tipo robotracer nacionales e internacionales de alto nivel.

**PALABRAS CLAVE.** Control, Educación, Robótica, Robotracer, Velocista.

## INTRODUCCIÓN

Debido a que las competencias digitales de los estudiantes de educación básica en el ámbito del departamento de Santander presentan debilidades con respecto a la integración práctica de los conocimientos adquiridos en referencia a la gestión de dispositivos digitales diferentes a los teléfonos celulares, el objetivo principal del proyecto es incentivar este aprendizaje en los estudiantes para promover el desarrollo de sus aptitudes en electrónica, programación y comunicaciones IoT, para formar ciudadanos competentes que puedan contribuir al avance tecnológico que se presenta en la actualidad y mediante el conocimiento adquirido y la innovación, puedan participar en competencias de tipo robotracer.

Este proyecto busca explicar los diferentes retos que se presentan en la elaboración de un seguidor de línea velocista y como resolverlos de manera teórica para despejar cualquier duda que pueda tener el estudiante mediante la caracterización de los dispositivos empleados en la que se hayan sus variantes, errores, tipos de respuesta, como predecir su comportamiento y forma de control. A esto se añade una programación de bajo nivel, también conocida como programación de bajo nivel de abstracción, la cual es óptima para el diseño de un sistema de control eficiente.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La baja disponibilidad de plataformas programables para la participación en competencias de tipo Robotracer que permitan a la población infantil y adolescente en los colegios del Área Metropolitana de Bucaramanga y en general en los colegios del Departamento de Santander, mejorar sus competencias en tecnologías como Electrónica, Robótica, IoT y sistemas de control, genera bajos indicadores de participación de estas comunidades en competencias nacionales e internacionales de alto nivel. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025))

Se ha identificado recientemente que los entes territoriales están interesados en fomentar este tipo de tecnologías en comunidades rurales que han impulsado la participación de niños campesinos en competencias internacionales y articulación entre productores agrícolas, industriales pequeños medianos y grandes y el estado para apoyar estas iniciativas. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025))

Se pretende con el estudio propuesto desarrollar una plataforma robótica educativa y recreativa para incentivar y preparar a la juventud de la región de Santander para que puedan desarrollar habilidades en tecnología y participar en competencias de alto nivel, lo que les permitirá acceder a oportunidades de crecimiento personal y profesional y contribuir al desarrollo económico y social de la región. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025))

Con base en lo expuesto se plantea la pregunta de investigación

¿Qué tipo de plataforma robótica podría diseñarse para el fortalecimiento de las competencias tecnológicas de robótica en los niños y adolescentes de la región rural y urbana del Departamento de Santander?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Las competencias digitales de los estudiantes de primaria y secundaria en el ámbito del Departamento de Santander presentan debilidades con respecto a la integración práctica de los conocimientos adquiridos en referencia a la gestión de dispositivos digitales diferentes a la telefonía móvil celular. Por eso, es necesaria la articulación entre la teoría y la práctica integrando estos conocimientos en plataformas, que permitan la mejora en la población estudiantil de primaria y secundaria de la región., G. (2025))

Colombia es un país en el que las falencias en competencias básicas tienen su origen en la baja calidad educativa durante los primeros años de aprendizaje. La ausencia de espacios y mecanismos periódicos de diálogo entre las empresas y las instituciones educativas, en especial a nivel regional, ha impedido que las primeras puedan participar activamente de los procesos de planeación educativa, generando una desconexión entre lo que el país está formando y el capital humano que realmente necesita para mejorar su productividad y competitividad internacional. (David F. Torres, Sebastián R. León, GAN Colombia)

Por eso la apropiación de las tecnologías de información y comunicación (TIC) como herramienta pedagógica es un recurso fundamental para el desarrollo e innovación de la educación y no puede pasar desapercibido en la enseñanza media. Por ello las TIC desarrollan diferentes estrategias didácticas de calidad, individualizar la

enseñanza y mejorar la atención de los estudiantes. Actualmente los procesos educativos exigen la incorporación de los procesos de aprendizaje mediante la Robótica Educativa, los cuales incluyen competencias digitales, entornos de programación, secuencias lógicas, programación gráfica y simulaciones, con lo cual los jóvenes podrán desenvolverse en una sociedad digital. (Oscar L. Pérez, Universidad Pontificia Bolivariana).

Por tanto, el estudio propuesto tiene como finalidad el desarrollo de herramientas tecnológicas para impulsar a los niños y adolescentes a participar en competencias de tipo Robotracer, ya sean regionales, nacionales o internacionales. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025)).

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un vehículo autónomo seguidor de línea (Line Follower Robot – LFR) mediante la integración de sensores y actuadores para el logro de parámetros de desempeño comparables a los vehículos de competencia Robotracer.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar los componentes necesarios para el desarrollo de una plataforma LFR mediante la comparación de sus parámetros de desempeño con los de un vehículo habilitado para participar en competencias Robotracer.
- Implementar un LFR con características que le habiliten su participación en competencias Robotracer para la validación de sus parámetros de desempeño
- Implementar un LFR con características que le habiliten su participación en competencias Robotracer para la validación de sus parámetros de desempeño.

- Validar los parámetros de desempeño del vehículo desarrollado con una plataforma comercial, para determinar su viabilidad en competencias Robotracer. Escriba los objetivos específicos, de acuerdo con la instrucción anterior.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE

En el ámbito nacional, los robots seguidores de línea han ganado popularidad como herramientas educativas y proyectos de innovación tecnológica. En Colombia, instituciones educativas y programas de robótica han adoptado estos dispositivos para fomentar el aprendizaje práctico en áreas como la programación, la electrónica y el diseño de sistemas de control. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025))

En la universidad de Ibagué se desarrolló e implementó un robot seguidor de línea (LFR) que cumple con los estándares de competencias de robótica nacionales e internacionales. Se propuso y validó un modelo matemático considerando el voltaje aplicado a los motores, las velocidades angulares y la geometría del robot, utilizando una arquitectura diferencial en la que se evaluaron cuatro técnicas de control de ángulo: Controlador PD convencional, PD con garantía de control considerando las limitaciones de los actuadores, Controlador en cascada con lazos internos de velocidad y externo de ángulo, Controlador basado en aprendizaje por refuerzo. (Yeison Daniel T. Santa. (2019). Diseño de un robot seguidor de línea de competencia).

Adicionalmente en la Fundación Universidad De América se desarrolló un robot velocista en el que se destaca la importancia de la aerodinámica se ve reflejada en la aplicación de conceptos tales como el flujo de aire alrededor del vehículo, ya que esto ha mostrado una mejora en el rendimiento del prototipo. Esos principios, muy utilizados en la industria automotriz y de competición, se adaptaron con éxito en el

trabajo de grado, también la construcción y planificación detallada para el diseño aerodinámico del prototipo, incluyendo la PCB como chasis y la incorporación de una carrocería, permitieron mejorar el rendimiento del robot. (Miguel N. Suarez. (2024). Prototipo robot velocista dese un estudio aerodinámico).

El desarrollo mecatrónico del robot seguidor de línea realizado por los semilleros de investigación Electron-Volt y WTE pertenecientes a los grupos de investigación DavinciUNAD y GICMIL-ESCOM respectivamente, fue orientado bajo la metodología cuantitativa ya que se hizo la recolección y análisis de información disponible en fuentes académicas y en hojas de datos de los fabricantes de los dispositivos electrónicos como mecánicos. (William Alexander C. Carreo, Juan David C. Carreo. (2022). Desarrollo mecatrónico de un robot seguidor de línea).

De los laboratorios de la asignatura electrónica análoga, se propone implementar las competencias aprendidas en este para diseñar y desarrollar un carro seguidor de línea de competencias, como resultado los estudiantes de Ingeniería mecatrónica hicieron parte del primer torneo departamental de robótica con el fin de incentivar el aprendizaje de conceptos teóricos implementados en el desarrollo de una práctica emocionante. (Arizmendi, C. J. (2022). Seguidor de línea).

En el vehículo seguidor de línea presentado como proyecto final de la asignatura microcontroladores II de la universidad de investigación y desarrollo (UDI) integrando los conceptos comprendidos durante el semestre y determinando tres funciones fundamentales como lo son: la locomoción (nivel físico), la percepción (nivel sensorial) y la decisión (nivel de control). Se desarrolló un robot adecuado a la meta propuesta sin embargo no está habilitado para competencia solo capaz de seguir la línea. (Jeisson Saavedra. (2014). Informe carro seguidor de línea).



El equipo de Robótica del Programa de Ingeniería de Electrónica de la Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI, se coronó campeón y subcampeón del Torneo Internacional de Robótica “Robotic People Fest”, que se llevó a cabo en la capital Colombia, participó en las categorías: Robot Sumo Autónomo de tres kilogramos y Robot Sumo Radiocontrolado tres kilogramos, logrando los dos primeros puestos en las dos, por encima de las delegaciones de países como México, quienes ocuparon el tercer lugar en la competencia. (UDI GANADOR DEL CONCURSO INTERNACIONAL DE ROBÓTICA - Universidad de Investigación y Desarrollo-UDI.)

A nivel internacional, los carros seguidores de línea se han convertido en una herramienta fundamental en la enseñanza de robótica y automatización. En muchos países, estos dispositivos se utilizan como proyectos prácticos en instituciones educativas y competencias de robótica, como las Olimpiadas Mundiales de Robótica (WRO) o eventos de la RoboCup. (Rivera López, A, Gomez Castro, D Ulloa Diaz, G. (2025))

En la escuela superior politécnica de Chimborazo se realizó la implementación de un robot seguidor de línea para la comparación de un controlador de lógica difusa y un controlador PID. Su funcionamiento consiste en la programación y sintonización en el editor de código Arduino IDE, la sintonización se realizó con el método de prueba y error para un desplazamiento preciso en la pista y se obtienen valores de: error, posición, y velocidad de control y para el controlador PID el método de prueba y error consiste en dar valores aleatorios a las constantes proporcional y derivada, en cambio el controlador Fuzzy utiliza este método con etiquetas lingüísticas para establecer intervalos a los conjuntos difusos pertenecientes a las variables de entrada y salida.(Alex Fabricio C. Mullo, Ángel Adrián M. Ronquillo.(2021). Implementación de un robot seguidor de línea para la comparación de un controlador de lógica difusa y un controlador PID).

En el seguidor de línea la metodología a seguir será el control del robot mediante un control PD (control proporcional derivativo). Él 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, una rutina basada matemáticamente procesara los datos del sensor y lo usa para controlar la dirección y así mantenerlo en curso. (Pol. Con. (Edición núm. 70) Vol. 7, No 7 Julio 2022, pp. 1303-1319 ISSN: 2550 - 682X DOI: 10.23857/pc. v7i7)

Se usó un algoritmo de control PID para seguir la línea. Si ambos sensores detectan negro el robot seguirá avanzando, cuando los sensores de la derecha detectan blanco y los de la izquierda negro, el robot gira a la izquierda, y cuando ocurre el caso contrario girará a la derecha y si ambos sensores leen blanco el robot se detendrá. (Milagros del Carmen C. Barbarán, Patricia del Rocío C. Ysla. (2019). (Revista Científica Ingeniería Ciencia, Tecnología e Innovación, ISSN-e 2313-1926, Vol. 6, N.º. 1, 2019, págs. 28-32)

El análisis del estado del arte demuestra que los carros seguidores de línea han pasado de ser herramientas educativas a plataformas para la investigación avanzada en control y diseño de sistemas autónomos. A través de su desarrollo, han impulsado la formación técnica y la innovación, contribuyendo significativamente al avance de tecnologías emergentes.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

El micro motorreductor N20 10:1 de 3000rpm a 6V de funcionamiento nominal, posee un engranaje de CC GA12-N20 con alambre para las pruebas respectivas con el encoder. Este dispositivo es utilizado para el control de velocidad, he implementado en robots pequeños, tales como seguidores de línea, drones y vehículos velocistas. (*MICRO MOTORREDUCTOR N20 10:1 3000RPM 6V CON ENCODER GA12-N20 – Grupo ElectroStore, s. f.*)

El sensor QTR 8A es un arreglo de sensores reflectivos usados como sensor de línea, pero también puede usarse como sensor de proximidad. Este módulo, contiene 8 emisores IR y sus respectivos fototransistores espaciados a 9.525mm. (Sensor de Línea Digital QTR 8RC Marca Genérica - DynamoElectronics, 2024)

El sensor reflectivo QRD1114 consiste en un diodo de emisor infrarrojo y un fototransistor de silicio de tipo NPN ensamblado lado a lado en una carcasa plástica negra. La radiación en el eje del emisor y la respuesta en el eje del detector son perpendiculares a la emitida por el diodo solo cuando un objeto o superficie reflectante está en el campo de visión del detector. (*QRD1114 SENSOR INFRARROJO REFLECTIVO PARA SEGUIDOR DE LINEAS o SENSOR DE DISTANCIA, s. f.*)

El dispositivo Driver DRV8833 permite controlar dos motores DC o un motor paso a paso bipolar mediante señales PWM. Cuenta con protección contra sobre corriente, cortocircuito y sobrecalentamiento, bloqueo por subtensión y un modo de suspensión de bajo consumo. [3] Tiene un voltaje de entrada entre los 3V y 10V y una corriente máxima de salida de 1,5A por canal, los pines OUT1 y OUT2 son el

puente H de canal A controlado por IN1 e IN2, mientras que los pines OUT3 y OUT4 son el puente H de canal B controlado por IN3 e IN4. (Sigma Electrónica, 2025).

El Arduino Nano es una placa de desarrollo compacto, completa y compatible con protoboard, que hace uso del microcontrolador ATmega328P, consta de 14 pines de entrada/salida digital, 6 de estos se pueden utilizar para la elaboración de un PWM, además de 6 entradas analógicas, un cristal de 16MHz, conexiones Mini USB y un botón de reinicio. (*Arduino Nano V3 ATmega328 USB C + Regletas Sin Soldar Sin Cable - Electronilab*, 2025)

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

Un sistema de control automático es una interconexión de elementos que forman una configuración llamada sistema, de modo que el arreglo resultante puede controlarse por sí mismo. (Hernández Gaviño, R, 2010, p. 2). La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Otra combinación de controles es el control PD, que carece del control I del sistema PID. El control PD combina el control de avance y retroalimentación, ya que opera tanto con las condiciones actuales del proceso como con las condiciones previstas. En el control PD, la salida de control es una combinación lineal de la señal de error y su derivada. El control PD incluye la amortiguación de la fluctuación del control proporcional y la predicción del error del proceso del control derivativo. (Libretexts, 2023).

El objetivo del sistema de control de posición es actuar hasta reducir la señal de error  $e(t)$  a cero, lo que implica que la posición de la carga tendría el mismo valor que la señal de referencia. (Carakenio, 2023)

La cinemática es una rama de la mecánica clásica, encargada de estudiar y describir el movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo producen. Analiza variables como trayectoria, velocidad y aceleración en función del tiempo. (De Enciclopedia Significados, 2025b)

La robótica se dedica a la construcción de artefactos que intentan materializar el deseo humano de crear seres a su semejanza para responder a algunas de sus necesidades más complejas y, también, para liberarse de trabajos tediosos o peligrosos. La robótica está relacionada con la ingeniería, la construcción y la operación de robots. Es un sector con amplios y diversos usos de consumo. (Robótica - ferroviaria. 2021, 7 junio).

Los robots seguidores de línea son unos de los robots más ampliamente conocidos. Esto gracias a las competencias que se hacían en las escuelas y a nivel internacional. Sin embargo, este tipo de robots tienen otras áreas de aplicación diferentes a la educativa. Una de estas áreas de aplicación es la industria, donde se usan ampliamente. También, son utilizados en la investigación y en el entretenimiento. Es por esto, entre otras cosas, que este tipo de robots son un tema interesante para el público en general. (Araceli, s. f.)

La robótica educativa es una herramienta de aprendizaje que permite a los estudiantes desarrollar competencias científicas y tecnológicas. La estrategia aún tiene disciplinas y conocimientos que se transmiten transversalmente, estimulando el pensamiento lógico y computacional, la creatividad (sobre todo en lo que se

refiere a la capacidad de resolución de problemas) y otras habilidades. Esta rama de la tecnología educativa promueve el aprendizaje activo de las materias STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), suscitando el interés por ellas en los alumnos. (Telefónica, 2024)

### **3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 IDENTIFICACION DE NECESIDADES**

La pregunta que se busca responder en este trabajo de investigación es: ¿Qué tipo de plataforma robótica podría diseñarse para el fortalecimiento de las competencias tecnológicas de robótica en los niños y adolescentes de la región rural y urbana del Departamento de Santander?

Para este trabajo de investigación mediante el desarrollo de hardware y software se realizó una plataforma LFR la cual integra una gran variedad de conocimientos como: mecánicos, eléctricos, matemáticos, electrónicos, codificación y comunicaciones inalámbricas.

La metodología implementada fue realizar una investigación exploratoria y explicativa con enfoques cuantitativos y cualitativos para lograr mediante el método de observación y análisis caracterizar los dispositivos empleados como lo son, los motores, los sensores, el controlador de los motores y así predecir su comportamiento para poder controlar los dispositivos que forman parte del sistema. Para esto se dividió la investigación en 3 etapas.

La primera etapa es el primer objetivo específico el cual se enfoca en la caracterización de los dispositivos necesarios para el desarrollo de una plataforma LFR mediante la comparación de sus parámetros de desempeño con los de un vehículo habilitado para participar en competencias Robotracer.

En la segunda etapa se lleva a cabo el segundo objetivo específico que consiste en la implementación y ensamble del LFR con características que le habiliten su

participación en competencias Robotracer para la validación de sus parámetros de desempeño.

Para finalizar se realiza la validación de los parámetros de desempeño del vehículo desarrollado con una plataforma comercial, para determinar su viabilidad en competencias Robotracer.



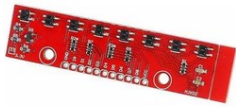


## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

### 4.1 CARACTERIZAR LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA LFR MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE SUS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO CON LOS DE UN VEHÍCULO HABILITADO PARA PARTICIPAR EN COMPETENCIAS ROBOTRACER.

#### 4.1.1 COMPONENTES UTILIZADOS.

En la tabla 1 se puede visualizar los dispositivos que conforman los sistemas que componente al vehículo seguidor de línea.

Tabla 1  
*Tabla de Componentes del vehículo.*

Sistema	Dispositivo	Especificaciones	Justificación
Sensorial	<p>Regleta QTR 8A</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltaje de funcionamiento: 3,3V – 5,0V.</li> <li>- Formato de salida: voltaje analógico.</li> <li>- Corriente suministro: 100mA</li> <li>- Distancia de detección 3mm</li> </ul>	Es un módulo de 8 pares de LED infrarrojo y fototransistor que funcionan como detectores para robots seguidores de línea. La conexión en serie de los sensores permite un menor consumo de corriente y cada uno de estos genera una salida de voltaje analógica separada.
	<p>CNY70</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longitud de onda del emisor: 950nm.</li> <li>- Corriente máxima: 50mA</li> <li>- Voltaje directo: 1,25V-1,6V</li> <li>- Distancia de detección: 0,3mm</li> </ul>	El sensor reflectivo de objetos es un diodo infrarrojo y un fototransistor NPN, es un dispositivo de escaneo y conmutación optoelectrónico. Posee una fuente de luz emisora y un detector dispuestos en la misma dirección con una longitud de onda de 950nm.
actuador	<p>micro motorreductor N20 10:1 de 3000rpm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltaje nominal: 6V.</li> <li>- Diámetro del eje: 0,118in.</li> <li>- Engranaje CC GA12-N20.</li> <li>- Encoder magnético.</li> </ul>	Los motorreductores DC se pueden alimentar en un rango de 3V-9V, ideales por sus dimensiones para el área de robótica, diseñados para el control de velocidad.

	<p>DRV8833</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad de controlar dos motores</li> <li>- Baja resistencia de encendido del MOSFET</li> <li>- Corriente de salida 1.5Arms</li> <li>- Voltaje de alimentación: 2,7V – 10,8V</li> </ul>	<p>Es un dispositivo que da solución al control de dos motores, ya que es de doble puente y sirve en aplicaciones como impresoras POS, máquinas de automatización, robótica y otras.</p>
Control	<p>ATmega328p</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 8 bits de compañía ATMEL.</li> <li>- Número de pines: 28/32.</li> <li>- ADC: 8 canales, resolución de bits.</li> <li>- Comparadores analógicos: 1.</li> <li>- Temperatura Rango: - 40° a 85°C</li> </ul>	<p>Microcontrolador AVR® 8 bits, es un dispositivo que tras basar su arquitectura RISC posee un alto rendimiento debido a la combinación de las capacidades de lectura y escritura y memoria 32KB ISP flash. Es de bajo rendimiento y bajo consumo.</p>
Alimentación	<p>Baterías de LIP1522</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De capacidad de almacenamiento hasta 4V</li> <li>- Corriente de almacenamiento de 1000mA</li> <li>- Encapsulado ligero.</li> </ul>	<p>Son dispositivos compatibles con variedad de elementos electrónicos para la alimentación gracias a su característica recargable por su material de polímero de Litio.</p>

Fuente: Los Autores.

#### 4.1.2 CARACTERIZACIÓN DE MOTORES.

##### 4.1.2.1 CONSTANTE ELÉCTRICA DE LOS MOTORES.

Como ejercicio de la caracterización de los motores se propuso hallar la constante eléctrica, esta es igual al par dividido entre la raíz cuadrada de las pérdidas de potencia resistivas. Encontrar dicha constante ayuda a mostrar la eficiencia del motor, ya que a mayor valor de la constante mayor eficiencia. (Collins, 2022b)

La ecuación 1 fue la que se utilizó para hallar la constante eléctrica.

$$K = \frac{V_{sf}}{w_f} \quad (1)$$

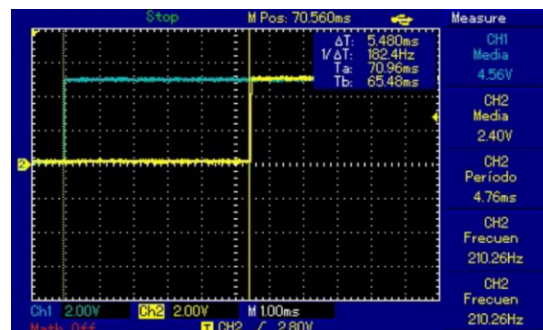
Donde  $V_{sf}$  es el valor de la tensión eléctrica o el voltaje inducido el cual se mide cuando el motor funciona como generador. Adicionalmente se encontró  $W_f$  que es la velocidad angular del motor medida en rad/s.

El ejercicio aplicado en el vehículo consistió en energizar el sistema con las baterías de 7,4V se alimenta al Arduino Nano quien por medio de la programación de un pin digital se enciende y este pin otorga el impulso al ir conectado al driver DVR8833 y se analiza en el osciloscopio el periodo entre el impulso y la respuesta de los encoder a este.

En la figura 1 se puede visualizar el comportamiento anteriormente mencionado analizado desde el osciloscopio en el motor izquierdo.

Figura 1

*Respuesta del motor izquierdo al impulso visualizada desde un osciloscopio.*



Fuente: Los autores

En donde la gráfica azul es el impulso aplicado después de accionar el switch que energiza al circuito y la gráfica amarilla es la respuesta del motor izquierdo ante este.

El periodo visualizado en el osciloscopio corresponde a ser de 5,3ms y con este valor se puede calcular  $Wf$  que corresponde a la ecuación 2.

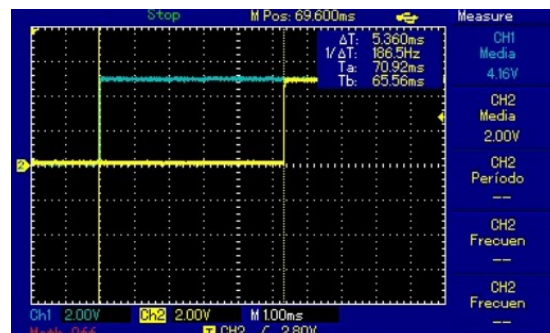
$$Wf = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Donde T corresponde al periodo registrado.

Mientras que en la figura 2 se observa el mismo comportamiento en el osciloscopio, pero para el motor derecho.

Figura 2

*Respuesta del motor derecho al impulso visualizada desde un osciloscopio*

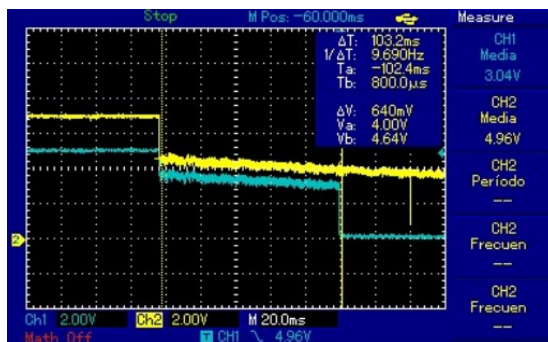


Fuente: Los autores.

Seguidamente se halló el  $V_{sf}$  al analizar la señal en un osciloscopio del comportamiento del motor tras desenergizar de golpe el circuito, de modo que se obtiene el voltaje inducido justo después de este momento. En la figura 3 se puede observar el funcionamiento descrito.

Figura 3

*Respuesta del motor izquierdo al desenergizarse visualizada desde un osciloscopio.*



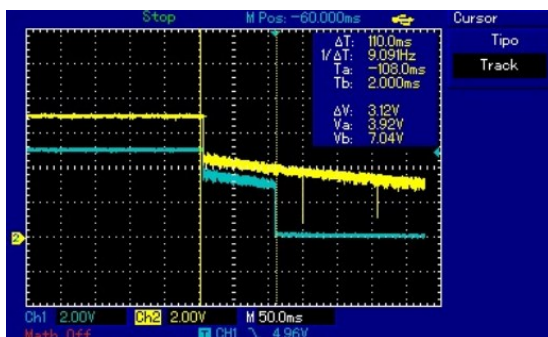
Fuente: Los autores

Lo visualizado en el osciloscopio consta de la gráfica amarilla como el impulso y la gráfica azul es la respuesta del motor, de modo que se obtiene un valor aproximado de 3,8V de  $V_{sf}$  después de cortar la alimentación.

En la figura 4 se observa el mismo comportamiento para el motor derecho.

Figura 4

*Respuesta del motor derecho al desenergizarse visualizada desde un osciloscopio.*



Fuente: Los Autores.

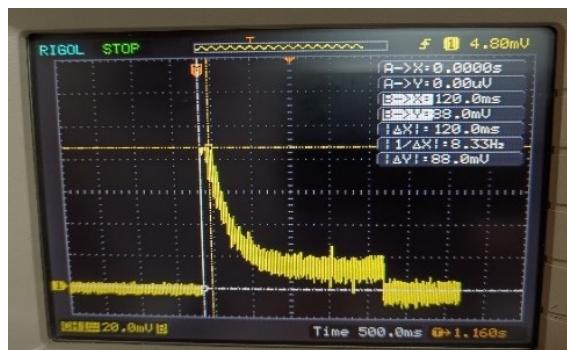
Donde  $V_{sf}$  es igual a 3,92V.

#### 4.1.2.2 PICO DE CORRIENTE EN LOS MOTORES.

Otro parámetro de los motores que se analizó fue el pico de corriente que consume el motor en encendido y la corriente máxima que este exige según esfuerzo del mismo, este análisis se realizó con una pinza amperimétrica y un osciloscopio, la necesidad de revisar este parámetro es la búsqueda de una optimización de la energía, para la elección de la corriente necesaria en las baterías ya que éstas deben ser lo más pequeñas y livianas posibles dado que en esta implementación del vehículo autónomo seguidor de línea se utilizan motores de 3000rpm los cuáles suelen tener un torque nominal entre 0.09 kg-cm y 0.2 kg-cm, entonces el peso del vehículo debe estar en este rango para su óptimo funcionamiento y alta velocidad. A continuación, en las figuras 5 se evidencia la toma de medidas y sus resultados.

Figura 5

*Caracterización corriente de arranque*



Fuente: Los Autores.

Como se observa en la figura 5 se tiene un voltaje pico el cual tiene el valor de 88mV, en la pinza amperimétrica empleada para la toma de medidas se tiene fija una escala que indica que por cada 200mV es 1A por lo cual con una regla de tres se puede calcular la corriente pico de arranque ( $I_{arr}$ ) de los motores y esta es de aproximadamente 440mA alimentado a 8v de las baterías. Con la ecuación 3 se pudo realizar la relación entre los datos obtenidos para hallar la máxima corriente.

...

$$\begin{array}{l} A \longrightarrow B (3) \\ C \longrightarrow X? \end{array}$$

$$X = \frac{C * B}{A}$$

Donde X es la corriente pico de arranque, A y B son los 200mV y 1A indicados por la escala de la pinza amperimétrica y C son los 88mV indicados por el osciloscopio

$$\begin{array}{l} 200mV \longrightarrow 1A \\ 88mV \longrightarrow A? \end{array}$$

$$I_{arr} = \frac{(88mV) * 1}{200mV} = 440mA$$

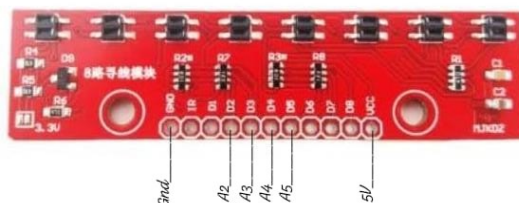
#### 4.1.3 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.

La lectura de los sensores y su normalización son fundamentales para conseguir un desarrollo completo y eficiente del vehículo seguidor de línea, por eso se optó por usar la regleta QTR 8A, ya que los 8 sensores que incluye ya están nivelados y solo hay que concentrarse en estandarizar los valores de lectura.

En la figura 6 se puede visualizar las conexiones de la regleta realizadas al Arduino.

Figura 6

*Conexiones de la regleta al vehículo.*



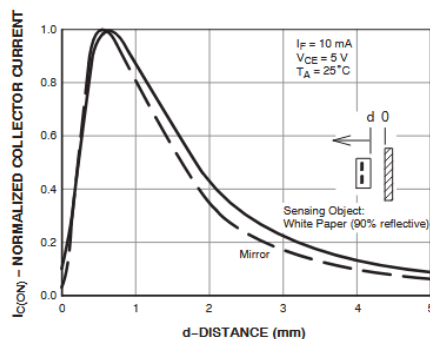
Fuente: Los autores.

En el desarrollo del LFR solo se utilizaron los 4 sensores D2, D3, D4 y D5 y la lectura respectiva se realizó con los pines analógicos del Arduino Nano, sin embargo, durante pruebas del vehículo se determinó que para estabilizar los valores tomados es preferible tener una estrategia de calibración, ya que los sensores indican la posición del vehículo en el escenario, siendo vital para el control del desarrollo.

Se descubrió que la distancia de los sensores al escenario debe ser de 3,5mm, por la sensibilidad de los qte1113, como se muestra en la figura 7, alcanza su punto máximo de eficiencia con un valor estimado de 0,5mm.

Figura 7

*Corriente de Colector normalizada vs. Distancia entre el dispositivo y el reflector.*



*Nota.* El gráfico representa el comportamiento del sensor óptico reflectivo QRE1113Adaptado de QRE1113. Tomado de QRE1113 *Miniature Reflective Object*



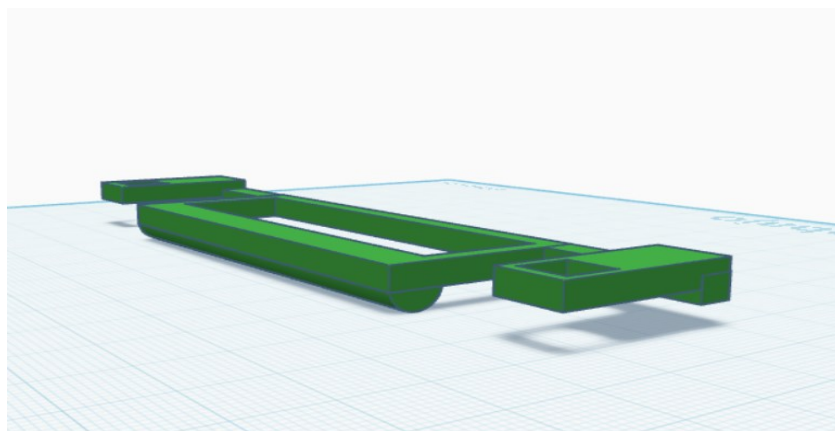
Sensor [Datasheet], por onsemi, 2021, <https://www.onsemi.com/download/datasheet/pdf/qre1113-d.pdf>.

A pesar de lo anterior, se decidió elevar la altura de los sensores porque, aunque se necesita cercanía a la pista, hubo daños en el dispositivo durante las pruebas por dicha proximidad, por lo que se añadió al LFR la estandarización de la lectura para guardar la integridad del vehículo y sus elementos.

Por los daños presentados en el periodo de pruebas, se decidió diseñar una pieza 3D que proteja los sensores y sirva de deslizador para estabilizar las medidas del vehículo. La pieza fue diseñada en Tinkercad la cual se puede evidenciar en la figura 8.

Figura 8

*Diseño de la pieza 3D en Tinkercad*



Fuente: Los autores

Durante las primeras tomas realizadas de lectura de los sensores se visualizó variaciones en los valores mostrados por el serial, esto dependía estrechamente por factores como la nivelación de los sensores entre el chasis y el escenario, la iluminación

ambiental y las irregularidades de la pista, en la tabla 2 se aprecia la recolección de datos por el serial de Arduino IDE.

TABLA 2

*Recopilación de lecturas de la regleta QTR 8A*

Tonalidad del escenario	Valores visualizados en el serial																																																																																																																																									
Negro mate	<div><div>COM3</div><table><tr><td>939</td><td>961</td><td>945</td><td>948</td><td>954</td><td>952</td><td>964</td><td>961</td></tr><tr><td>939</td><td>961</td><td>945</td><td>949</td><td>956</td><td>952</td><td>963</td><td>961</td></tr><tr><td>938</td><td>960</td><td>946</td><td>950</td><td>957</td><td>952</td><td>964</td><td>962</td></tr><tr><td>937</td><td>960</td><td>945</td><td>949</td><td>956</td><td>953</td><td>965</td><td>962</td></tr><tr><td>938</td><td>960</td><td>946</td><td>950</td><td>954</td><td>951</td><td>964</td><td>961</td></tr><tr><td>938</td><td>961</td><td>945</td><td>949</td><td>955</td><td>953</td><td>965</td><td>962</td></tr><tr><td>937</td><td>960</td><td>947</td><td>950</td><td>955</td><td>952</td><td>965</td><td>961</td></tr><tr><td>938</td><td>961</td><td>945</td><td>949</td><td>955</td><td>952</td><td>965</td><td>962</td></tr><tr><td>938</td><td>960</td><td>945</td><td>951</td><td>955</td><td>953</td><td>965</td><td>962</td></tr><tr><td>938</td><td>959</td><td>944</td><td>949</td><td>955</td><td>951</td><td>966</td><td>962</td></tr><tr><td>937</td><td>960</td><td>945</td><td>950</td><td>955</td><td>952</td><td>965</td><td>962</td></tr><tr><td>938</td><td>960</td><td>945</td><td>950</td><td>956</td><td>952</td><td>964</td><td>961</td></tr><tr><td>938</td><td>961</td><td>946</td><td>950</td><td>955</td><td>952</td><td>964</td><td>962</td></tr><tr><td>939</td><td>961</td><td>945</td><td>949</td><td>955</td><td>952</td><td>963</td><td>961</td></tr><tr><td>938</td><td>960</td><td>946</td><td>950</td><td>955</td><td>952</td><td>964</td><td>962</td></tr></table></div>	939	961	945	948	954	952	964	961	939	961	945	949	956	952	963	961	938	960	946	950	957	952	964	962	937	960	945	949	956	953	965	962	938	960	946	950	954	951	964	961	938	961	945	949	955	953	965	962	937	960	947	950	955	952	965	961	938	961	945	949	955	952	965	962	938	960	945	951	955	953	965	962	938	959	944	949	955	951	966	962	937	960	945	950	955	952	965	962	938	960	945	950	956	952	964	961	938	961	946	950	955	952	964	962	939	961	945	949	955	952	963	961	938	960	946	950	955	952	964	962																	
	939	961	945	948	954	952	964	961																																																																																																																																		
	939	961	945	949	956	952	963	961																																																																																																																																		
	938	960	946	950	957	952	964	962																																																																																																																																		
	937	960	945	949	956	953	965	962																																																																																																																																		
	938	960	946	950	954	951	964	961																																																																																																																																		
	938	961	945	949	955	953	965	962																																																																																																																																		
	937	960	947	950	955	952	965	961																																																																																																																																		
	938	961	945	949	955	952	965	962																																																																																																																																		
	938	960	945	951	955	953	965	962																																																																																																																																		
	938	959	944	949	955	951	966	962																																																																																																																																		
	937	960	945	950	955	952	965	962																																																																																																																																		
	938	960	945	950	956	952	964	961																																																																																																																																		
	938	961	946	950	955	952	964	962																																																																																																																																		
	939	961	945	949	955	952	963	961																																																																																																																																		
	938	960	946	950	955	952	964	962																																																																																																																																		
	Blanco mate	<div><div>COM3</div><table><tr><td>275</td><td>343</td><td>267</td><td>252</td><td>332</td><td>297</td><td>304</td><td>284</td></tr><tr><td>275</td><td>344</td><td>267</td><td>252</td><td>332</td><td>297</td><td>303</td><td>283</td></tr><tr><td>274</td><td>342</td><td>268</td><td>252</td><td>333</td><td>299</td><td>304</td><td>282</td></tr><tr><td>275</td><td>342</td><td>268</td><td>254</td><td>335</td><td>299</td><td>305</td><td>285</td></tr><tr><td>274</td><td>342</td><td>270</td><td>253</td><td>334</td><td>299</td><td>305</td><td>284</td></tr><tr><td>276</td><td>343</td><td>269</td><td>254</td><td>334</td><td>298</td><td>304</td><td>284</td></tr><tr><td>275</td><td>342</td><td>268</td><td>254</td><td>335</td><td>300</td><td>305</td><td>283</td></tr><tr><td>272</td><td>342</td><td>268</td><td>254</td><td>336</td><td>302</td><td>308</td><td>286</td></tr><tr><td>275</td><td>341</td><td>267</td><td>253</td><td>332</td><td>298</td><td>304</td><td>283</td></tr><tr><td>283</td><td>346</td><td>268</td><td>251</td><td>329</td><td>294</td><td>301</td><td>282</td></tr><tr><td>284</td><td>346</td><td>269</td><td>252</td><td>330</td><td>294</td><td>301</td><td>279</td></tr><tr><td>282</td><td>338</td><td>264</td><td>245</td><td>323</td><td>288</td><td>299</td><td>277</td></tr><tr><td>277</td><td>337</td><td>266</td><td>247</td><td>328</td><td>291</td><td>301</td><td>279</td></tr><tr><td>274</td><td>334</td><td>263</td><td>245</td><td>323</td><td>288</td><td>300</td><td>278</td></tr><tr><td>276</td><td>338</td><td>268</td><td>251</td><td>332</td><td>295</td><td>306</td><td>284</td></tr><tr><td>274</td><td>338</td><td>269</td><td>252</td><td>334</td><td>296</td><td>307</td><td>284</td></tr><tr><td>274</td><td>338</td><td>270</td><td>253</td><td>333</td><td>296</td><td>308</td><td>284</td></tr></table></div>	275	343	267	252	332	297	304	284	275	344	267	252	332	297	303	283	274	342	268	252	333	299	304	282	275	342	268	254	335	299	305	285	274	342	270	253	334	299	305	284	276	343	269	254	334	298	304	284	275	342	268	254	335	300	305	283	272	342	268	254	336	302	308	286	275	341	267	253	332	298	304	283	283	346	268	251	329	294	301	282	284	346	269	252	330	294	301	279	282	338	264	245	323	288	299	277	277	337	266	247	328	291	301	279	274	334	263	245	323	288	300	278	276	338	268	251	332	295	306	284	274	338	269	252	334	296	307	284	274	338	270	253	333	296	308	284
		275	343	267	252	332	297	304	284																																																																																																																																	
		275	344	267	252	332	297	303	283																																																																																																																																	
		274	342	268	252	333	299	304	282																																																																																																																																	
275		342	268	254	335	299	305	285																																																																																																																																		
274		342	270	253	334	299	305	284																																																																																																																																		
276		343	269	254	334	298	304	284																																																																																																																																		
275		342	268	254	335	300	305	283																																																																																																																																		
272		342	268	254	336	302	308	286																																																																																																																																		
275		341	267	253	332	298	304	283																																																																																																																																		
283		346	268	251	329	294	301	282																																																																																																																																		
284		346	269	252	330	294	301	279																																																																																																																																		
282		338	264	245	323	288	299	277																																																																																																																																		
277		337	266	247	328	291	301	279																																																																																																																																		
274		334	263	245	323	288	300	278																																																																																																																																		
276		338	268	251	332	295	306	284																																																																																																																																		
274		338	269	252	334	296	307	284																																																																																																																																		
274		338	270	253	333	296	308	284																																																																																																																																		

Fuente: Los autores.

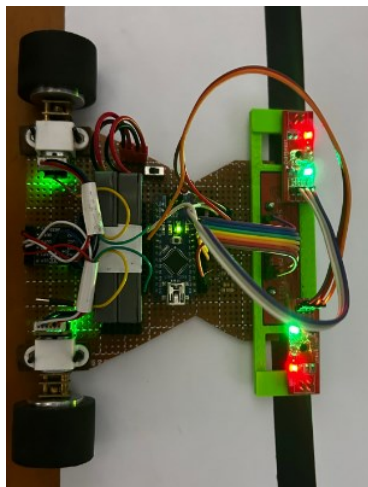
Por las variaciones apreciadas en el serial, se estandarizó los valores de los sensores para estabilizar la lectura al conocer la posición del vehículo sobre la pista y, posteriormente, calcular el error del dispositivo.

Para estandarizar los valores de la regleta se decidió como primer paso realizar la toma de 2000 muestras, por lo tanto, inicialmente se posiciona la regleta sobre la parte más oscura del escenario y tras accionarse el botón conectado al pin D8 del Arduino se toman las muestras durante 5 segundos, mientras se toman las lecturas el pin D13 del

Arduino que viene relacionado al led se apagará y una vez que termine la lectura se enciende como indicativo de que la tarea a finalizado, así como se muestra en la figura 9

Figura 9

*Toma de muestras parte oscura del escenario.*

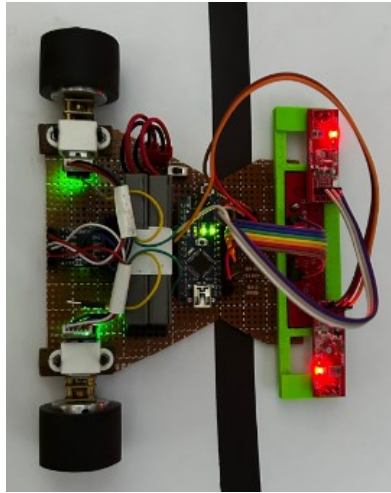


Fuente: Los autores.

Se repite la misma tarea para la toma de muestras de en la parte más clara del escenario, se toma 2000 muestras y el led conectado al pin D13 se enciende una vez la tarea finaliza, así como se evidencia en la figura 10.

Figura 10

Toma muestras parte clara del escenario.



Fuente: Los autores.

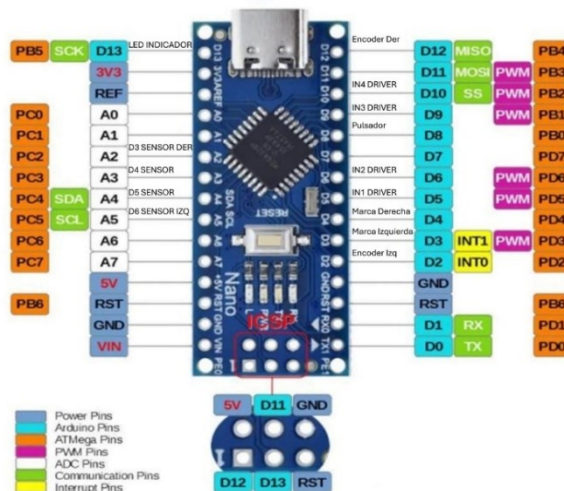
Las muestras tomadas se guardan en un array correspondiente a la tonalidad del escenario que se registró, este consta de 4 posiciones, una para cada sensor y se realiza un promedio de todas las muestras. Estas medidas son tomadas como los valores en los cuales vamos a normalizar las lecturas. Seguidamente, se utilizó la función *map* y se estandarizaron las muestras en valores entre 0 y 100 para conseguir una lectura de la pista de forma precisa y sin distorsión.

#### 4.1.4 DIAGRAMA DE CONEXIONES.

Una vez se tiene definido los dispositivos se puede realizar el diagrama de conexiones pertinente para el desarrollo del LFR con un chasis mixto en donde se utiliza una PCB universal para las conexiones del circuito, por tanto, en la figura 11 se comprueba con el Arduino las conexiones con el Driver DRV8833, los motores, los encoder, los sensores, el switch de energización del sistema y el botón para la calibración de los sensores.

Figura 11

### Conexiones de componentes al Arduino.



Fuente: los autores.

#### 4.1.5 DRIVER DRV8833

Mediante la lectura de Texas Instruments (n.d.), el DRV se pudo determinar que con este dispositivo se puede manipular el PWM según las entradas, lo que se traduce un control de velocidad en los motores. Si se interrumpe la corriente de accionamiento en el embobinado del motor y este es controlado por PWM, la naturaleza inductiva del motor requiere que la corriente continúe circulando, como consecuencia existen diferentes modos de operación que este maneja, los cuales se pueden visualizar en la tabla 3.

Tabla 3.

*Control PWM de la velocidad del motor.*

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, Fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, Fast decay

PWM	1	Reverse PWM, slow decay
-----	---	-------------------------

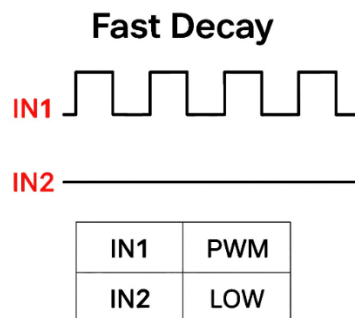
Nota. Tomado de DRV8833 Dual H- Bridge Motor Driver Datasheet, por Texas Instruments. (n.d.) <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/437529/TI1/DRV8833.html>

Se visualizan dos modos de operación, fast decay y slow decay. Por tanto, se definen de la siguiente manera:

- Fast decay: En el decaimiento rápido el puente H se desactiva y la corriente de recirculación fluye por medio de los diodos del dispositivo, su comportamiento se ve evidenciado en la figura 12.

Figura 12

*Gráfica funcionamiento Fast Decay*

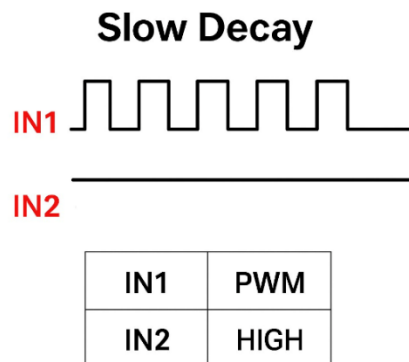


Fuente: Los autores

- Slow Decay: El decaimiento lento ocurre cuando el embobinado del motor se cortocircuita como resultado del comportamiento visualizado en la figura 13.

Figura 13

*Gráfica del funcionamiento del modo Slow Decay*

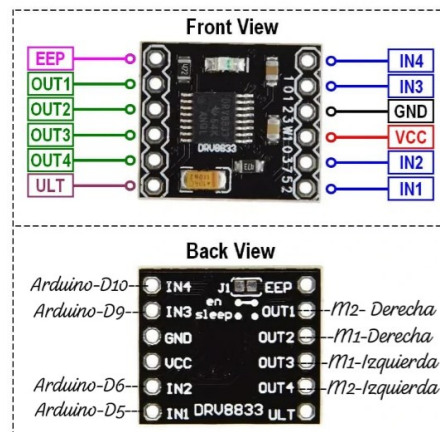


Fuente: Los Autores.

Una vez escogido el modo Fast Decay para manejo de los PWM se realiza la conexión de los pines del puente H en la figura 14.

Figura 14.

#### Conexiones del Driver



Fuente: Los autores.

#### 4.1.6 PWM PHASE CORRECT

Este modo de PWM proporciona una señal PWM de alta resolución y corrección de fase, debido a la doble pendiente del contador. Por su característica simétrica, el

modo de PWM de doble pendiente se prefiere para aplicaciones de control de motores. (Microchip Technology, n.d.)

Una vez hallada la constante eléctrica de los motores, se propuso un rango de 8 ciclos de PWM para el manejo de estos. Al usar 4 señales PWM por comodidad del usuario se eligió para el desarrollo del vehículo los Timer 0 y 1.

Al requerir las mismas señales en ambos motores, se realizó como primera medida una sintonización de frecuencia entre los canales de salida de los Timer 0 y 1; debido a limitaciones del Timer 0 al manejar dos canales PWM, la frecuencia se manipula únicamente en el prescaler y concluye en una frecuencia de 3,92KHz con un prescaler de 8, esto se obtuvo tras la aplicación de la ecuación 4.

$$Frecuencia\ fase\ corregida\ PWM = \frac{Frecuencia\ en\ el\ clock}{prescaler * 510} \quad (4)$$

$$Frecuencia\ fase\ corregida\ PWM = \frac{16 * 10^6}{8 * 510} = 3,92KHz$$

Al utilizar la misma configuración para el Timer 1, se eligió un Tick del sistema el cual albergue ciclos completos de esta señal para evitar ciclos erróneos o no deseados.

En la ecuación 5 se halló el periodo por ciclo de PWM.

$$Periodo\ de\ PWM = \frac{1}{Frecuencia} \quad (5)$$



$$\text{Periodo de PWM} = \frac{1}{3,92\text{KHz}} = 255\mu\text{s}$$

1. Para obtener la cantidad de tiempo de un Tick del sistema que albergue 8 ciclos completos se debe multiplicar el periodo por los respectivos 8 ciclos, así como se ve en la ecuación 6 para obtener el Tick del sistema seleccionado.

$$CTTS = (8)(\text{periodo de PWM}) \quad (6)$$

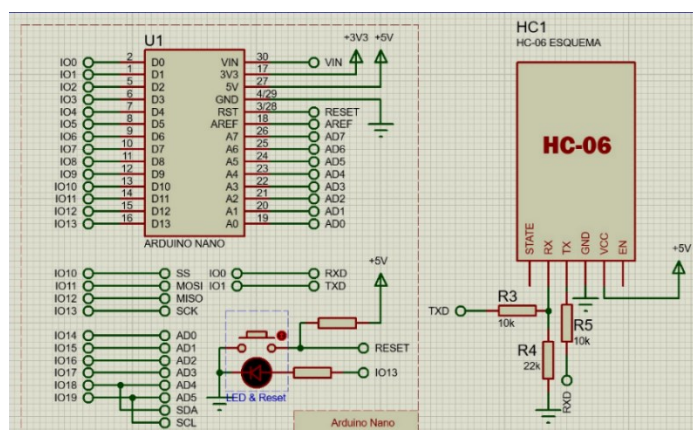
$$CTTS = 8 * 255\mu\text{s} = 2,04\text{ms}$$

#### 4.1.7 COMUNICACIÓN SERIAL DEL SISTEMA.

Se utilizó una velocidad de 115200 baudios aceptada por el transmisor Bluetooth HC-06, que se conectó con el siguiente arreglo visualizado en la figura 15.

Figura 15.

*Conexión del módulo Bluetooth HC-06 al Arduino Nano.*



Fuente: Los autores.

Esto se realizó con el fin de guardar la integridad del dispositivo y que su vida útil y funcionamiento sean óptimos.

Seguido a esto se investigó el tiempo que cada función toma para su desarrollo, y se determinó que la comunicación UART envía 10 bits por carácter, 1 de inicio, otro de final y 8 de datos (Arduino, n.d.).

Dada la ecuación 7 que halla el tiempo por carácter visualizada a continuación se deduce que:

$$tpc = \frac{\#bits * caracter}{velocidad de transmisión} \quad (7)$$

$$tpc = \frac{10}{115200} = 86,8\mu s \cong 87\mu s$$

Con el fin de transmitir el error, el PWM del motor izquierdo y PWM motor derecho, se utiliza 16 caracteres. De modo que, con la ecuación 8 se calcula el tiempo total por la cantidad de caracteres utilizados.

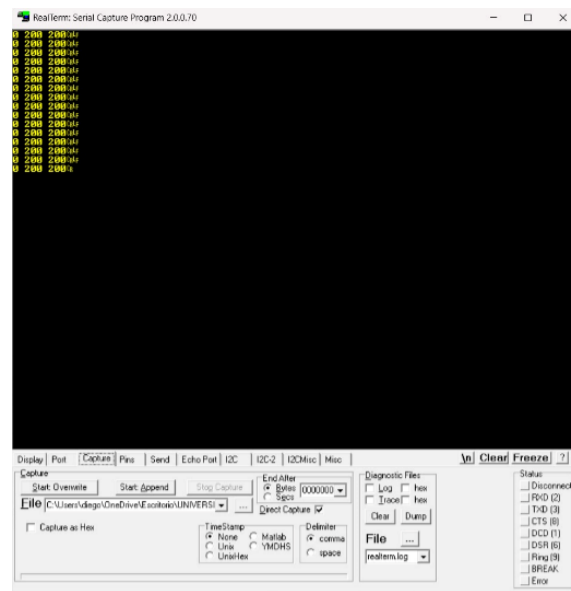
$$ttc = \#caracteres * tpc \quad (8)$$

$$ttc = (16)(87\mu s) = 1,392ms \cong 1,4ms$$

Por medio del uso del módulo HC-06 se pudo visualizar valores como el PWM aplicado en ambos motores y el error del control por medio de la plataforma Realterm, en la figura 16 que corrobora lo anterior.

Figura 16.

*Valores de PWM de los motores y error del sistema*



Fuente: Los autores.

Con los valores registrados se pudo visualizar el comportamiento de los motores según el error en KST2 para el posterior estudio del comportamiento del vehículo.

#### 4.1.8 ADC. (ANALOG TO DIGITAL CONVERTER)

Para este apartado fue necesario tener en cuenta los tiempos de las funciones del sistema, de modo que se tuvo en cuenta la comunicación serial por UART es altamente demandante y tiende a obstruir la ejecución de las funciones del sistema, en base a eso se eligió el prescaler de 64 y se obtuvo una frecuencia de 250KHz mediante la aplicación de la ecuación 9.

$$frecuencia\ clock\ ADC = \frac{frecuencia\ del\ Arduino}{prescaler} \quad (9)$$

$$frecuencia\ clock\ ADC = \frac{16 * 10^6 Hz}{64} = 250KHz$$

Según el datasheet del ATmega328P (Microchip Technology, comunicación personal s.f.), el circuito de aproximaciones sucesivas requiere una frecuencia de reloj de entrada entre 50KHz y 200KHz para obtener una máxima resolución, en caso de necesitar una mayor tasa de muestreo superior a 200KHz se necesita una resolución menor a 10 bits.

El Microchip Technology (n.d.), el ATmega328P indica que la primera conversión analógica después de inicializar el ADC toma 25 ciclos de reloj del mismo para activar el circuito analógico, mientras que una conversión normal toma 13 ciclos del reloj de ADC.

Una vez hallada la frecuencia del clock del ADC se calcula el tiempo que toma leer un solo canal por medio de la ecuación 10.

$$Tiempo\ primera\ conversión = \frac{25}{frecuencia\ clock\ del\ ADC} \quad (10)$$

$$Tiempo\ primera\ conversión = \frac{25}{250 * 10^3} = 100\mu s$$

En la ecuación 11 se puede visualizar el tiempo de conversión estándar del ADC.

$$Tiempo\ primera\ conversión = \frac{13}{frecuencia\ clock\ del\ ADC} \quad (11)$$

$$Tiempo\ conversión\ estandar = \frac{13}{250K} = 52\mu s$$

Con estos resultados se puede encontrar el máximo tiempo de conversión que

puede tomar nuestro sistema en leer los 4 canales analógicos con la ecuación 12.

$$tml = \text{tiempo primera conversión} + \text{tiempo conversión estandar} * 3 \quad (12)$$

$$tml = 100\mu s + 52\mu s * 3 = 256\mu s$$

Seguidamente se calcula el tiempo restante para las demás acciones del sistema, como se evidencia en la ecuación 13.

$$tdas = \text{tick del sistema} - ttc - tml \quad (13)$$

$$tdas = 2,04ms - 1,4ms - 256\mu s = 384\mu s$$

Con el tiempo restante hallado se tienen 384μs para las demás acciones del sistema como puede ser, cálculo del error, cálculo del control PD y aplicación de PWM

#### 4.1.9 CONTROL PD.

El Control PD, también conocido como control Proporcional derivativo, se encuentra definido por la ecuación 14 presentada a continuación.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

En el que la constante que designa el tiempo derivativo es nombrada  $T_d$ , quien, a pesar de provocar en el actuador amplificación de señales de ruido y saturaciones, se encarga de realizar la previsión del sistema, lo que permite la rápida acción de control, la cual al ser de carácter derivativo no se utiliza por sí sola, a causa de su eficacia en períodos transitorios (Puriel Gil, 2020).

El control PD se caracteriza por ser de alta sensibilidad, lo que se traduce a una rápida respuesta ante el cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande, esto ocurre como consecuencia de agregar un control derivativo a un controlador proporcional. Sin embargo, el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, sino que agrega amortiguamiento al sistema y como resultado se obtienen grandes valores de ganancia K, lo que aporta precisión en estado estable.

Convencionalmente, se conoce que un control PID permite realizar ajustes de alta precisión en los sistemas. Sin embargo, la componente integral en un sistemas de control de posición no es necesaria, ya que estos controles incorporan un comportamiento integrado, por tanto, agregarle un control integral ocasionaría sobre corrección lo que provocaría inestabilidad, y que el vehículo oscile o tenga un movimiento errático. (National Instruments, n.d.)

Para el control del vehículo seguidor de línea es importante tener en cuenta la calibración de los sensores, ya que esta es la que permite posicionar al vehículo en el escenario. Esto se realizó del siguiente modo:

Con los 4 sensores de la regleta de seleccionados, se les asignó un valor de posición, de modo que se ponderó cada uno de ellos en un rango de 0 a 3, como se visualiza en la figura 17.

Figura 17.

*Ponderación de los sensores.*

D2	→	0
D3	→	1
D4	→	2
D5	→	3

Fuente: Los autores.

De modo que los valores leídos por los sensores después de ser ponderados por los valores asignados se suman e ingresan en la ecuación 15 para calcular el centro del escenario

$$centro = \frac{suma\ ponderada * 1000}{suma\ total} \quad (15)$$

Donde la suma total es la suma de las medidas normalizadas por la estandarización de los sensores realizada previamente y 1000 será el valor de base fijo para lograr una precisión entera.

Finalmente, se calcula el error con la ecuación 16.

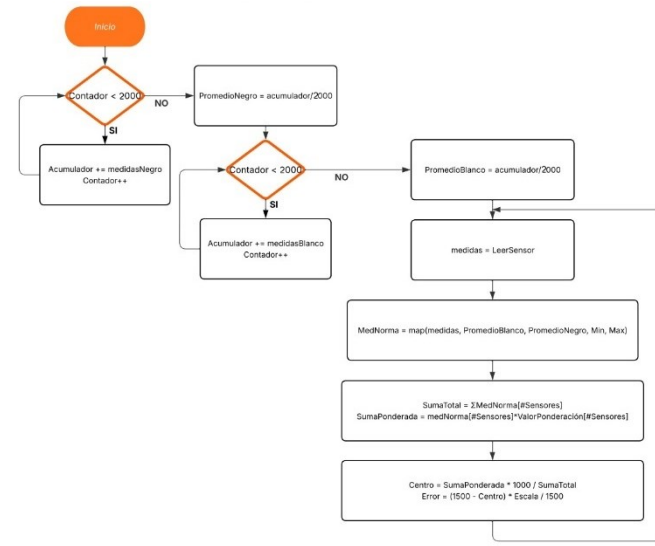
$$error = \frac{(1500 - centro)(500)}{1500} \quad (16)$$

Donde 1500 será el centro ideal del escenario y al multiplicar por 500 los valores resultantes del error irán de -500 a 500, por tanto, el valor de error que se detectará cuando el vehículo salga por la derecha será de 0 a -500, por el contrario, si se desvía por la izquierda el error variará entre 0 y 500.

Para finalizar se incluye un diagrama de flujo donde se incluye la calibración de los sensores y el control PD.

Figura 18

*Diagrama de flujo de la calibración de los sensores y el control PD*



Fuente: los autores.

#### 4.1.10 APLICACIÓN DE PWM.

Inicialmente, se estableció un PWM base, el cual representa la velocidad estándar del vehículo cuando el error sea cero (0). Adicionalmente se le agrega un ajuste con signos contrarios, dependiendo del sentido de orientación del LFR, establecido por control PD. Este ajuste genera un PWM simbólico que posee valores positivos y negativos y estos por medio de una configuración se les asigna a las entradas del Driver DVR8833 para generar un sentido de giro y permitir al motor girar avanzar o retroceder según la necesidad del usuario.

#### 4.1.11 PROGRAMACIÓN DEL VEHÍCULO.

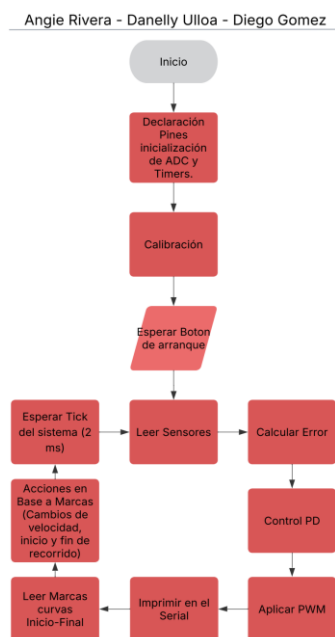
Para la programación del vehículo seguidor de línea se utilizó el microcontrolador ATmega328P, con ayuda de programación de registros orientada por eventos se



consiguió un manejo del LFR preciso y estable durante su recorrido por el escenario. En la figura 19 se puede visualizar a grandes rasgos un diagrama de flujo que explica el código implementado.

Figura 19

*Funcionamiento del vehículo según programación.*



Fuente: Los autores.

Este inicia con la declaración de entradas y salidas del sistema, así como la configuración de todos los periféricos e interrupciones que son utilizados al momento de seguir la línea como son los timer y la configuración del sistema ADC, seguido a esto se realiza la calibración de los sensores que leen la línea para entrar en modo “arranque”, en este modo el seguidor de línea se mantiene estático en el centro de la línea, en caso de algún estímulo el volverá a centrarse mientras espera la señalización de inicio por medio del botón de arranque. Al momento de iniciar el recorrido por la activación y desactivación banderas, el vehículo lee los sensores, calcula error, aplica el control PD y según este se aplica el PWM a los motores para

darle orientación al vehículo. Seguidamente se imprime la señal para visualizarse en Realterm, y se leen las marcas o señalizaciones del escenario, es decir en base a estas lecturas el vehículo se detiene, aumenta o disminuye su velocidad, todo esto de la mano del tick del sistema previamente implementado para el desarrollo del LFR.

#### 4.1.12 LECTURAS DE MARCAS.

Una vez el LFR sigue la pista es necesario hablar sobre la modulación de velocidad de este dado los tramos rectos y curvos del escenario. Por ello, con el fin de gestionar la velocidad del vehículo se dispuso una serie de marcas a 10cm antes y después de cada curva. Esto permite aprovechar los trayectos rectos y llevar el vehículo a la mayor velocidad posible, de modo que fue necesario implementar para la lectura de dichas marcas los sensores CNY70, quienes tras recibir la lectura de la marca al ingresar en una curva la velocidad del vehículo disminuye en su PWM a 180, mientras que en los tramos rectos el PWM se establece en 215.

Adicionalmente se incluyeron marcas para inicio y final del recorrido en donde el vehículo tras detectar el final del recorrido apaga todos los PWM en funcionamiento y frenar el vehículo entre el espacio indicado por el escenario.

#### **4.2 IMPLEMENTAR UN LFR CON CARACTERÍSTICAS QUE LE HABILITEN SU PARTICIPACIÓN EN COMPETENCIAS ROBOTRACER PARA LA VALIDACIÓN DE SUS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.**

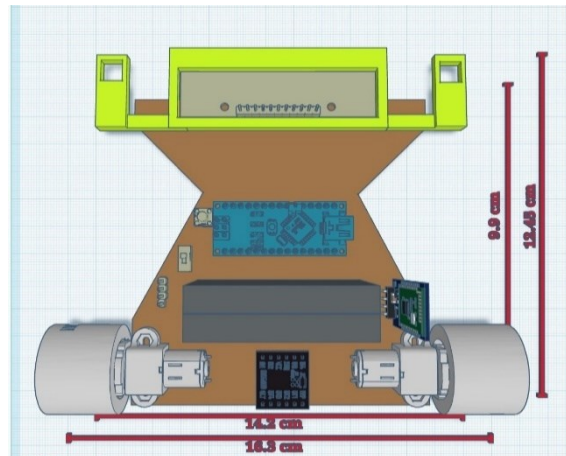
Las características desarrolladas son comparadas con las características en el reglamento de la competencia de categoría Robotracer.

Según el reglamento de la competencia robotracer, el tamaño del robot tiene un límite, este no debe superar los 25cm de largo, 25cm de ancho, ni 20cm de alto. Por

consecuente se definen las dimensiones del vehículo como se muestra en la figura 20.

Figura 20.

Medidas de diseño del vehículo autónomo seguidor de línea.



Fuente: Los autores.

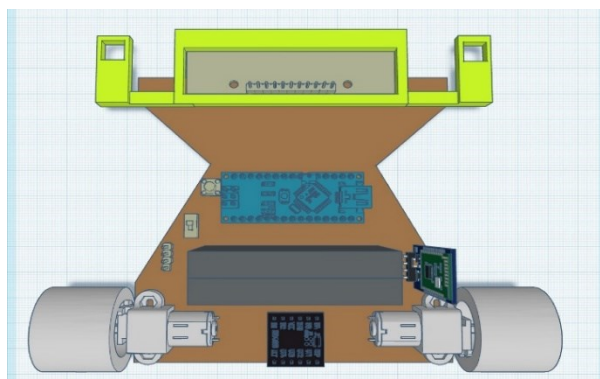
#### 4.2.1 DISTANCIA ENTRE LOS CENTROS DE LAS RUEDAS

La distancia entre los centros de las ruedas nos queda de 142mm, por lo que teóricamente el robot podrá tomar un radio mínimo de curvatura de 71mm.

El prototipo de LFR realizado se puede visualizar a continuación en la figura 22.

Figura 21.

Diseño 3D del vehículo autónomo seguidor de línea.



Fuente: Los autores.

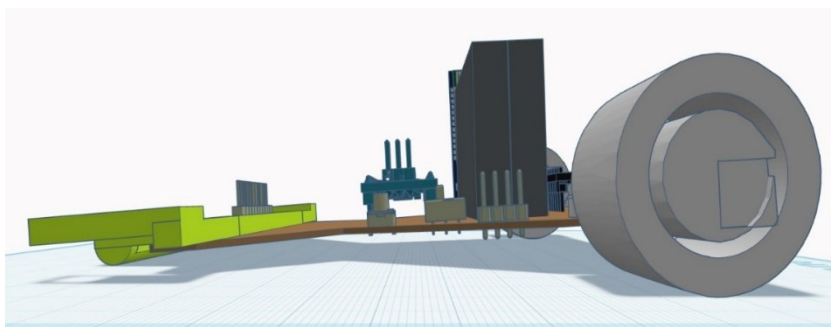
Como se muestra en la imagen tenemos un largo de 12.45cm, un ancho de 16.3cm y de alto 4.5cm lo cual está dentro del reglamento.

#### 4.2.2 DISTANCIA DE LOS MOTORES AL FINAL DEL CHASIS

La distancia de los motores al final del chasis es importante a la hora de transitar por puentes y cambios de inclinación en la pista, por lo cual es habitual ubicar las ruedas de tal manera que la goma sobresalga de la parte de atrás del chasis para evitar roses como se aprecia en la figura 22.

Figura 22.

Vista lateral del diseño del vehículo.



**Fuente: Los autores.**

#### 4.2.3. TORQUE DE LOS MOTORES

En este caso los motores a utilizar son los disponibles en el mercado, estos son los motorreductores de 3000 rpm 6V y unas ruedas de goma con 30mm de diámetro. Para calcular el torque necesario del motor se necesitan los siguientes datos: masa total del robot, radio de la rueda, aceleración deseada, el ángulo de la pista y la fuerza de gravedad. Estos valores serán reemplazados en la ecuación 17.

$$T = m \cdot (a + (g \cdot \sin\varphi)) \cdot r \quad (17)$$

Donde:

T = Torque del motor [Nm].

m = masa total del robot [Kg].

a = aceleración deseada [m/s<sup>2</sup>].

g = fuerza de gravedad [m/s<sup>2</sup>].

φ = ángulo del plano.

r = radio de la goma [m].

Según el fabricante de los motores estos tienen un torque nominal a 6v de 0.2kg/cm por lo cual la variable que se tiene es la aceleración, para conocerla se utilizará la ecuación 17 y se despejará de esta como se visualiza en la ecuación 18.

$$a = \frac{T}{(m \cdot r)} - (g \cdot \sin\varphi) \quad (18)$$

$$a = 6.5m/s^2$$

Teóricamente, con un torque de 0.2Kg/cm y una masa de 0.2Kg el robot actualmente se puede lograr una aceleración máxima de 6.5m/s<sup>2</sup>

#### 4.2.4. VELOCIDAD MAXIMA DEL ROBOT

En este apartado se analizará teóricamente la velocidad máxima del robot, para esto se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: la velocidad de los motores cuando reciben un PWM de 255 y el diámetro de la rueda. Para el cálculo teórico de la velocidad se tiene la ecuación 19 a continuación.

$$v = \frac{vRPM}{(60)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad (19)$$

Con un radio de 0.015m y RPM de 3720 se da una velocidad teórica máxima de 5.84m/s<sup>2</sup>

#### 4.2.5 DISTANCIA DE LOS SENSORES AL EJE DE LOS MOTORES

En este caso se utilizó una regleta con distribución lineal de 8 sensores, la distancia entre estos y el eje de los motores es crucial a la hora de controlar su comportamiento y ver con anticipación la curva ya que, si la distancia es muy grande, el robot tendrá problemas a la hora de tomar curvas cerradas y si las curvas son amplias convendría una distancia mayor recordando que la distancia limite según el reglamento de la competencia es de 25cm de largo.

Para que el vehículo sea capaz de rendir tanto en curvas amplias como angostas se eligió una distancia de 9.9cm la cual le da la esta flexibilidad.

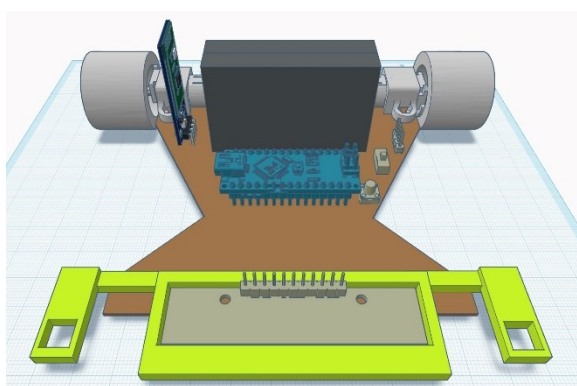
#### 4.2.6 CENTRO DE MASA DEL VEHÍCULO

En este caso el vehículo utiliza como chasis la PCB con el fin de quitar peso a los motores por lo que el centro de masa consiste en 3 componentes del vehículo, como

lo son: las baterías, el módulo Arduino nano y el controlador de los motores.  
Luego la ubicación de estos está orientada hacia el eje de tracción para no afectar el rendimiento del vehículo como se aprecia en la Figura 23.

Figura 23.

Distribución del centro de masa en el vehículo



Fuente: Los autores

Con la implementación de este diseño el robot pesará 0.14kg y medidas dentro de la norma que lo habilitan para una competencia Robotracer.

## 5. RESULTADOS

Recopilación de resultados físicos del vehículo.

### 5.1. CONSTANTE ELÉCTRICA DE LOS MOTORES.

Tras encontrar la velocidad angular y el voltaje inducido de los motores se halló la constante eléctrica de estos con la ecuación 1, a continuación, en la tabla 4 se puede visualizar los cálculos correspondientes de ambos motores.

Tabla 4

Valores de Velocidad angular, Voltaje inducido y constante eléctrica de los motores.

Motor	Wf	Vsf	Km
izquierdo	$Wfi = \frac{2\pi}{4,76 * 10^{-3}}$ $= 1319,9 \text{ rad/s}$	Vsfi = 3,8V	$Kmi = \frac{3,8V}{1319,9 \text{ rad/s}}$ $= 2,879 \text{ mV/rad}$
derecho	$Wfd = \frac{2\pi}{5,36 * 10^{-3}}$ $= 1172,2 \text{ rad/s}$	Vsfd = 3,93V	$Kmd = \frac{3,93V}{1172,2 \text{ rad/s}}$ $= 3,35 \text{ mV/rad}$

Fuente: Los autores.

La constante eléctrica de los motores nos permite completar la caracterización de los componentes del vehículo, adicionalmente, el hallazgo de este valor permite calcular el tick del sistema al conocer la reacción del motor ante un estímulo.



## 5.2. CORRIENTE MÁXIMA DE ARRANQUE.

Se determinó que la corriente máxima en un alto esfuerzo del motor es de 500mA, por tanto, se escogieron dos baterías tipo LIP1522 a 3,7V y 1000mA/h de almacenamiento, esto hace sentido si se tiene en cuenta que con la implementación de dos motores las baterías deben superar el doble de la corriente máxima de arranque.

## 5.3. CALIBRACIÓN DE SENSORES.

Tras normalizar los valores de las lecturas del vehículo en pista, se observó mejoría en las muestras realizadas y se pudo establecer un rango para el cálculo del error del dispositivo. En la figura 24 se aprecia la lectura en el monitor serial de los sensores al estar posicionados los dos sensores centrales (D3 y D4) sobre la línea negra del escenario y los demás sensores por fuera de la misma.

Figura 24

*Lectura de los sensores estandarizados.*

Salida Monitor Serie x									
Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'Arduino Nano' a 'COM3')									
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0
0	0	0	98	98	0	0	0	0	0

Fuente: Los autores.

La toma anterior demuestra que el vehículo se encuentra posicionado en medio en la pista y eso se comprueba con el error en su valor de 0 en la última fila de la derecha de la imagen, hecho que comprueba que la caracterización de los sensores es clave el funcionamiento adecuado del vehículo.

#### 5.4. Driver DRV8833.

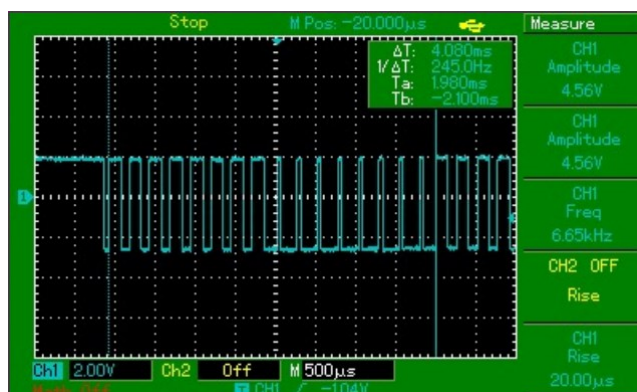
Posterior al análisis realizado al Driver DRV8833, se concluyó que el modo más adecuado para la implementación de la etapa de potencia del vehículo es el modo Fast Decay, debido a que el modo Slow Decay posee un mayor consumo de corriente debido a la combinación de dos niveles altos en sus entradas, lo que se traduce al freno activo del Driver y esto no es conveniente si se requiere manejar la mayor velocidad posible en el vehículo. Para conseguir el desarrollo exitoso del modo Fast Decay, fue necesario implementar 4 señales PWM con el fin de tener libertad de giro en ambas direcciones.

#### 5.5. PWM PHASE CORRECT.

Después de obtener el tiempo del Tick, es decir, el tiempo que representa una unidad básica de control en el temporizador del microcontrolador, siendo este de un sistema que albergue 8 ciclos completos con un valor de 2,04ms, se analizó con un osciloscopio la señal de salida del PWM en el pin D9 aplicada la corrección de fase correspondiente. A continuación, en la figura 25 se visualiza la señal.

Figura 25

*Señal de PWM de 8 ciclos del pin D9*



Fuente: Los autores.

En la imagen anterior se puede apreciar un tren de pulsos que posee un tiempo total de 4,08ms, el cual equivale al doble del Tick calculado de 2,04ms, lo que se traduce a que por cada decisión que se tome en el sistema se aprecian los 8 ciclos del PWM.

El comportamiento anteriormente descrito evidencia que a pesar de representar el tiempo de ejecución por decisión lógica del sistema, la señal PWM de salida física del pin D9 refleja dos veces este tiempo. Esto ocurre como consecuencia de que el sistema requiere completar un ciclo de subida y bajada del contador.

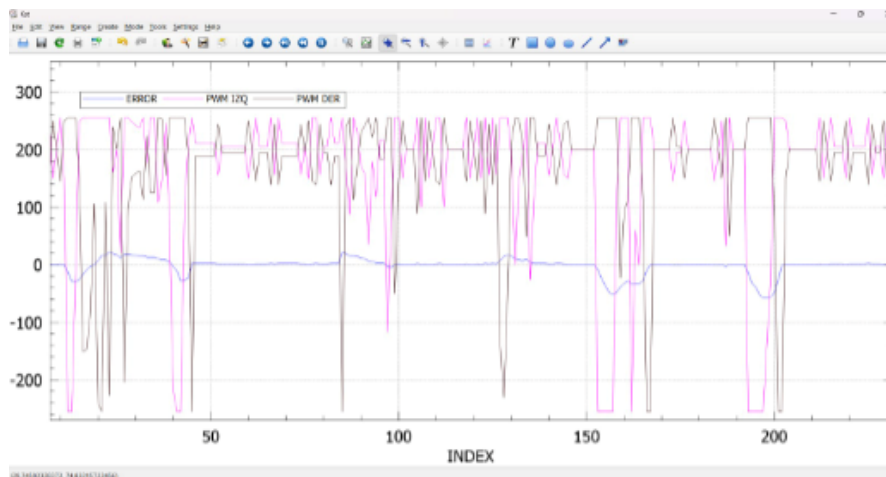
## 5.6. COMUNICACIÓN SERIAL.

Tras la obtención del tiempo total por caracteres utilizados de 1,4ms, se puede concluir que la comunicación serial es la función con un mayor consumo de tiempo en todo el sistema, en consecuencia, limita las demás acciones del sistema a 640µs con el fin de mantener un tick del sistema de 2,04ms.

Con los valores registrados por la comunicación serial con ayuda de la plataforma RealTerm, se pudo visualizar el comportamiento de los motores según el error en KST2 en la figura 26.

Figura 26.

*Comportamiento de los motores según el error*



Fuente: los autores.

Donde la gráfica rosada es el PWM del motor izquierdo, la gráfica morada es el PWM del motor derecho y la gráfica azul es el error. Se aprecia que el valor de PWM aumenta respecto al error en tramos específicos de la pista, como las curvas del escenario e irregularidades de este al no realizar pruebas sobre una pista profesional, por ende, el PWM aumenta por la compensación del control para volver a posicionar al vehículo en el centro de la línea y seguir su recorrido.

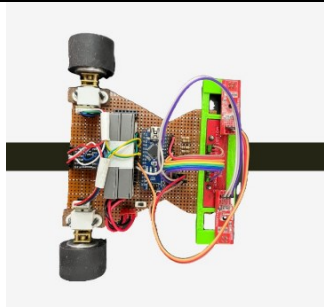
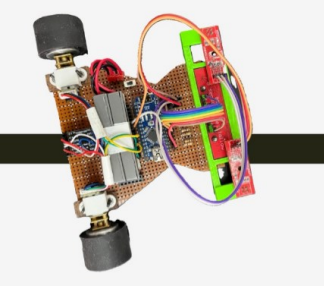
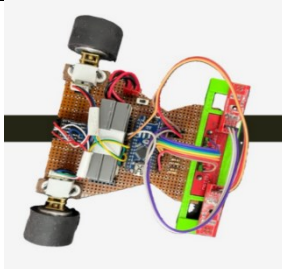
### 5.7. CONTROL PD.

Como resultado del control PD, en la tabla 5 se puede visualizar el error según la posición del LFR

Tabla 5.

*Error según posición del LFR*

error	posición
-------	----------

0	
1 a 500	
-1 a -500	

Fuente: Los autores.

Con el método de inspección se determinó el valor de K y P para controlar el vehículo, seguido de pruebas realizadas para estudiar el comportamiento del LFR, y en la ecuación 20 se visualiza la ecuación aplicada.

$$u(t) = K_p \cdot error + K_d \cdot \Delta error \quad (20)$$


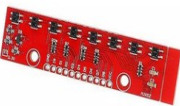




Donde  $K_p$  es la constante proporcional,  $K_d$  la constante derivativa y delta error es la resta entre el error actual y el error anterior registrado.

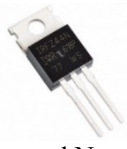





## 5.8. VALIDACION

Para hacer la validación de los parámetros primero se hará una comparación con otro vehículo que fue desarrollado como proyecto de aula del curso Microprocesadores II de materiales empleados para el desarrollo de los vehículos en la tabla 6.

Tabla 6.

*Comparación de componentes.*

Sistema	Otro vehículo de competencia	Vehículo del proyecto
Sensorial	Modulo sensor TCRT 5000: 3 leen la línea 	Regleta QTR 8A  <ul style="list-style-type: none"><li>- Formato de salida: voltaje analógico.</li><li>- Distancia de detección 3mm.</li><li>- 4 leen la línea.</li></ul>
	CNY70  <ul style="list-style-type: none"><li>- Distancia de detección recomendada: 0,5cm.</li></ul>	CNY70  <ul style="list-style-type: none"><li>- Distancia de detección recomendada: 0,5cm.</li></ul>
actuador	Motorreductor Amarillo Doble Eje / 3 A  <ul style="list-style-type: none"><li>-Voltaje nominal 6 voltios</li><li>-Diámetro del eje 5mm</li><li>-300rpm</li></ul>	micro motorreductor N20 10:1 de 3000rpm  <ul style="list-style-type: none"><li>- Voltaje nominal: 6V.</li><li>- Diámetro del eje: 3mm.</li><li>- 3000rpm</li></ul>

	<p>Etapa de potencia para control de motores</p>  <p>MOSFET de canal N. Conmutación rápida.</p>	<p>Driver dual para motores DRV8833</p>  <p>Corriente de salida máxima 1.5A por motor</p>
Control	<p>ATmega328p</p>  <p>Número de pines: 28/32. - ADC: 8 canales, resolución de bits.</p>	<p>ATmega328p</p>  <p>Número de pines: 28/32. - ADC: 8 canales, resolución de bits.</p>
Alimentación	<p>Baterías LIPO</p>  <p>-Voltaje 7.4v -Corriente de almacenamiento de 1200mA</p>	<p>2 baterías de LIP1522</p>  <p>- De capacidad de almacenamiento hasta 4V - Corriente de almacenamiento de 1000mA</p>

Fuente: Los autores

Tras revisar los dispositivos empleados en cada vehículo se observan las grandes diferencias entre los vehículos, la principal diferencia son los motores, el proyecto de aula usa motorreductores amarillos de 300 rpm, mientras que el desarrollado en este proyecto de investigación emplea micro motorreductores de 3000 rpm a un voltaje nominal de 6V.

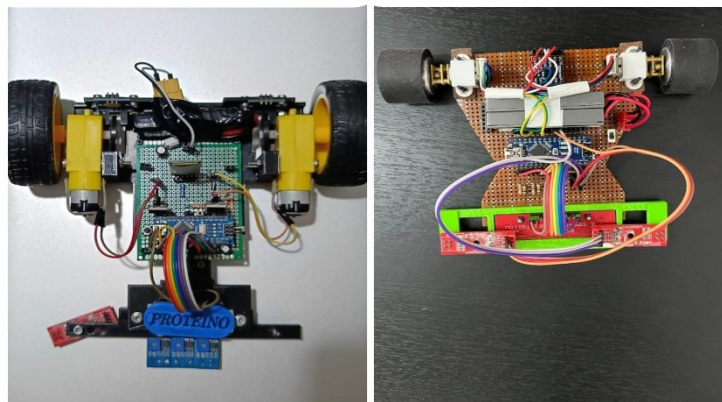
Otra de las diferencias es que en el vehículo que se desarrolló como proyecto de aula utiliza una etapa de potencia con un transistor MOSFET de conmutación rápida en lugar de un controlador de motores como es el caso del vehículo desarrollado en esta investigación.

Ahora en cuanto a diferencias de la estructura de los prototipos, las dimensiones de los vehículos son de gran relevancia y se analizarán a continuación en la figura 27.

Figura 27.

*Comparación de dimensiones de los vehículos.*

*Proyecto de aula   Proyecto de grado*



Fuente: los autores

Como se aprecia en la figura 25, el proyecto de aula emplea chasis mixto, es decir la PCB esta soportada sobre un material liviano para la elaboración del chasis, mientras que en el vehículo desarrollado tiene un chasis completo de PCB en el cual se fijan los motores.

Ahora bien, el proyecto de aula posee mayores dimensiones, tiene 20cm de largo, 21cm de ancho y 7cm de alto, en relación a esto la distancia de los sensores al eje de tracción del vehículo es aproximadamente de 17cm, esta al ser una distancia significativa, crea desventajas en el momento que el vehículo toma curvas cerradas.



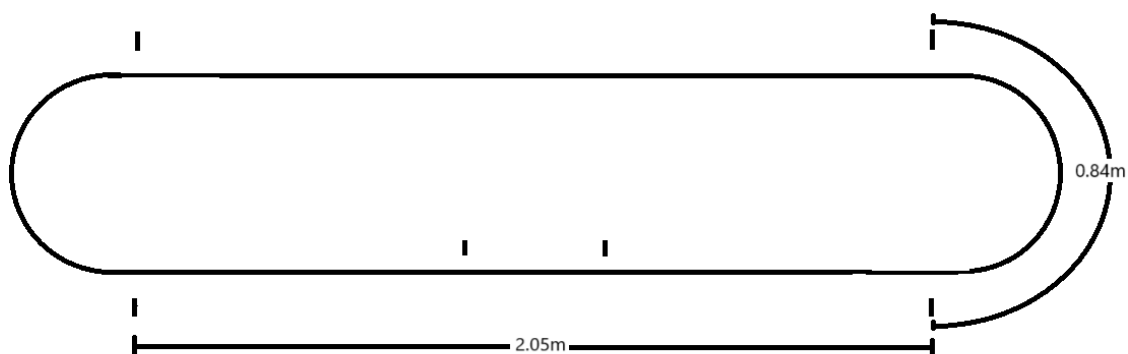
En el vehículo que fue desarrollado en el proyecto de grado se observan menores dimensiones de prototipo, como se ha mencionado anteriormente el vehículo tiene un largo de 12.45cm, ancho de 16.3cm y de alto 4.5cm. la distancia que hay de los sensores al eje de tracción del vehículo es de 9.9cm, siendo esta una distancia media para que el vehículo sea capaz de tomar curvas cerradas y abiertas.

Para la verificación de estos parámetros se realizaron pruebas en el mismo escenario para los 2 vehículos, la cual consistió en tomar tiempos para una misma distancia y observar las diferencias de velocidad para trayectos de curva y trayectos de recta.

Para las pruebas realizadas se tomaron 2 trayectos, una recta de 2.05m y una curva de 0.84m como se aprecia en la figura 28.

Figura 28.

*Pista de pruebas*

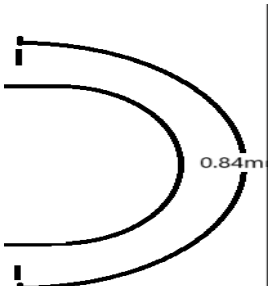
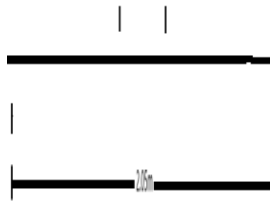
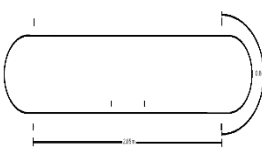


Fuente: Los autores.

Los tiempos y velocidades de cada uno de los vehículos fueron registrados en la tabla 7.

Tabla 7.

*Comparación de tiempos y velocidades.*

TRAYECTO	DISTANCIAS	PROYECTO DE AULA	PROYECTO DE GRADO
<p>CURVA</p> 	<p>Esta curva comprende una distancia de 0.84m.</p>	<p>Obtuvo un tiempo de 1.26 segundos, lo que le da una velocidad de 0.66m/s en curva.</p>	<p>El vehículo desarrollado obtuvo un tiempo de 1.1 segundos y una velocidad de 0.76m/s en curva.</p>
<p>RECTA</p> 	<p>La trayectoria recta de la pista que fue utilizada para la prueba comprende una distancia de 2.05m.</p>	<p>Para la trayectoria recta obtuvo un tiempo de 2.63 segundos y velocidad de 0.77m/s en recta.</p>	<p>E la trayectoria recta se obtuvo un tiempo de 1.54 segundos y una velocidad de 1.33m/s en recta.</p>
<p>PISTA COMPLETA</p> 	<p>El recorrido total de la pista es de 5.78m en total.</p>	<p>El tiempo de recorrido total fue de 9. segundos y velocidad promedio de recorrido de 0.64m/s.</p>	<p>El tiempo de recorrido total fue de 5.33 segundos y una velocidad promedio de recorrido de 1.08m/s.</p>

Fuente: Los autores.

En las pruebas se evidencia que el vehículo desarrollado en este proyecto de grado cuenta con un diseño en el prototipo y selección de materiales lo cual le brinda un mejor desempeño en la comparación de parámetros de funcionamiento.

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló la documentación del proceso a seguir para el desarrollo de una plataforma de vehículo seguidor de línea de categoría robotracer para fortalecer el nivel competitivo de niños y adolescentes en el área tecnológica de robótica, se eligió esta plataforma ya que los vehículos seguidores de línea poseen una escalabilidad educativa debido a su adaptación progresiva a distintos niveles de complejidad y a su vez demostró ser viable en las regiones rurales y urbanas del departamento de Santander, debido a la facilidad de acceso a los elementos requeridos para el desarrollo de la plataforma.

Para la construcción de un vehículo autónomo seguidor de línea velocista que este habilitado para competencias de tipo Robotracer es importante que el primer paso sea identificar las necesidades del robot, en este caso se requiere velocidad y precisión por lo que la elección de los materiales es crucial ya que la alta precisión de los sensores y el tiempo de reacción de los motores son importantes para el desarrollo de un sistema de control optimizado que sea capaz de reaccionar a cualquier estímulo en el sistema en el menor tiempo posible y así tener un sistema eficiente.

Para todo proyecto de robótica que se desee hacer es importante hacer una caracterización y estudio previo de los componentes ya que de esta manera se genera una forma de predecir su comportamiento y se obtiene mejor control sobre estos a la hora de incluirlos en un sistema.

A la hora de diseñar estos vehículos es importante tener en cuenta el reglamento ya que las competencias generalmente tienen un límite de tamaño para los

vehículos y dispositivos específicos, esto influye en la toma de decisiones tanto en la elaboración del chasis, distancias de los dispositivos y elección de componentes.

## **7. RECOMENDACIONES**

En la plataforma desarrollada el peso es crucial ya que al haber elegido motores de 3000rpm estos tienen menos torque y al sobre pasar o acercarse al peso máximo que pueden mover estos motores disminuye la velocidad alcanzada por el vehículo, una recomendación tomando este proyecto como base puede ser, disminuir el peso cambiado una de las baterías por un chip elevador de voltaje para mantener la potencia del vehículo y mejorar la velocidad de este.

Una buena calibración y normalización de las lecturas de los sensores permiten un correcto posicionamiento del vehículo con respecto al escenario, lo cual está estrechamente ligado al control del vehículo durante el recorrido. Si hay una correcta calibración el error es más preciso lo que se traduce a un vehículo con óptimas condiciones para una competencia.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alex Fabricio C. Mullo, Ángel Adrián M. Ronquillo. (2021). Implementación de un robot seguidor de línea para la comparación de un controlador de lógica difusa y un controlador PID.  
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4585507>
- Anón. 2021. «Robótica - Ferrovial». *Ferrovial*. <https://www.ferrovial.com/es-la/innovacion/tecnologias/robotica/>
- Araceli. s. f.-b. «Robots Seguidores de Línea: Generalidades». <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/813-cyt-numero-72/1677-robots-seguidores-de-linea-generalidades>
- Arduino Nano V3 ATmega328 USB C + Regletas sin Soldar Sin Cable - Electronilab. (2025, 6 junio). Electronilab. <https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-usb-c-regletas-sin-soldar-sin-cable/>
- Arduino. (n.d.). UART communication. Arduino Documentation <https://docs.arduino.cc/learn/communication/uart/>
- Arizmendi, C. J. (2022). Seguidor de línea. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/16576?show=full&locale-attribute=en>
- Carakenio. 2023. «Sistema de control de posición – Servomotores». Dademuchconnection. <https://dademuchconnection.wordpress.com/2018/05/24/servomotores-sistema-de-control-de-posicion/>
- Collins, D. (2022b, octubre 17). *FAQ: What's the difference between torque constant, back EMF constant, and motor constant?* Motion Control Tips.

<https://www.motioncontroltips.com/faq-difference-between-torque-back-emf-motor-constant/>

David F. Torres, Sebastián R. León, GAN Colombia.  
[https://www.andi.com.co/uploads/gan\\_habilidadesdigitales\\_col\\_v8.pdf](https://www.andi.com.co/uploads/gan_habilidadesdigitales_col_v8.pdf)

De Enciclopedia Significados, Equipo. 2025c. «Cinemática (Física): Qué Es, Principios y Tipos de Movimiento». Enciclopedia Significados.  
<https://www.significados.com/cinematica/>

Hernández Gaviño, R. (2010). Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB. Pearson Educación.

Jeisson Saavedra. (2014). Informe carro seguidor de línea.  
<https://www.slideshare.net/slideshow/report-cart-line-follower/37846292>

Libretexts. (2023, 11 marzo). 9.2:  $P$ ,  $I$ ,  $D$ ,  $PI$ ,  $PD$ , and  $PID$  control. Engineering LibreTexts.

[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-IntegralDerivative\\_\(PID\)\\_Control/9.02%3A\\_P\\_I\\_D\\_PI\\_PD\\_and\\_PID\\_control](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-IntegralDerivative_(PID)_Control/9.02%3A_P_I_D_PI_PD_and_PID_control)

Microchip Technology. (n.d.): ATmega328P: 8-bit AVR microcontroller with 4/8/16/32K bytes in-system programmable flas [Datasheet].  
[file:///C:/Users/GABRIELA/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/2J85KZEK/ATMEGA48A\[1\].PDF](file:///C:/Users/GABRIELA/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/2J85KZEK/ATMEGA48A[1].PDF)

MICRO MOTORREDUCTOR N20 10:1 3000RPM 6V CON ENCODER GA12-N20  
GrupoElectroStore(s.f.).<https://grupoelectrostore.com/shop/motores/micromotores/micro-motorreductor-n20-101-3000rpm-6v-con-encoder-ga12-n20/>

Miguel Ángel N. Suarez. (2024). Prototipo robot velocista dese un estudio aerodinámico. <https://repository.uamerica.edu.co/items/d47f7d52-19eb-4631-88a6-ffb0227336>



F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

Milagros del Carmen C. Barbarán, Patricia del Rocio C. Ysla.(2019). (Revista Científica Ingeniería Ciencia, Tecnología e Innovación, ISSN-e 2313-1926, Vol. 6, N.º. 1, 2019, págs. 28-32.

Oscar L. Pérez, Universidad Pontificia Bolivariana  
[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/9176/286\\_1%20%281%29.pdf?sequence=1&form=MG0AV3](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/9176/286_1%20%281%29.pdf?sequence=1&form=MG0AV3)

National Instruments (n.d.). PID Theory explained.  
[https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html?srsId=AfmBOoqwCbEnFfOytzZ5LprJf5-mey3XChXKcmCix0Kqlt8qpOxh7k9b&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html?srsId=AfmBOoqwCbEnFfOytzZ5LprJf5-mey3XChXKcmCix0Kqlt8qpOxh7k9b&utm_source=chatgpt.com)

Pol. Con. (Edición núm. 70) Vol. 7, No 7 Julio 2022, pp. 1303-1319 ISSN: 2550 - 682X DOI: 10.23857/pc.v7i7.  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9042958.pdf>

Puriel Gil, G. (2020). Control PD / PID de robots manipuladores y sistemas electromecánicas usando como compensación de términos dinámicos el aprendizaje por reforzamiento [Tesis doctoral, Cnetro de Investigación y de Estudios Avanzados] <https://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/DoTesGuil.pdf>

QRD1114 SENSOR INFRARROJO REFLECTIVO PARA SEGUIDOR DE LINEAS  
o SENSOR DE DISTANCIA. (s. f.). Zamux Electrónica.  
<https://www.zamux.co/sensor-grd114>

Rivera Lopez, A, Gomez Castro, D, Ulloa Diaz, G. (2025). Velocista seguidor de línea autónomo [Trabajo de grado inédito]. Unidades tecnológicas de Santander.

Sensor de linea digital QTR 8RC marca Genérica - DynamoElectronics. (2024, 15 septiembre).DynamoElectronics.<https://www.dynamoelectronics.com/tienda/sensor-de-linea-digital-qtr-8rc-generica/>

Sigma Electrónica. (2025, 4 junio). *TARJETA DRV8833* - *Sigma Electrónica*.

<https://www.sigmaelectronica.net/producto/tarjeta-drv8833/>

Telefónica. 2024. «Robótica educativa: qué es, tipos y ventajas». Telefónica.

<https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/robotica-educativa-tipos-y-ventajas/>

UDI GANADOR DEL CONCURSO INTERNACIONAL DE ROBÓTICA - Universidad de Investigación y Desarrollo - UDI. (s.f.). Universidad de Investigación y Desarrollo - UDI. <https://www.udi.edu.co/8-destacadas-principal/1674-udi-ganador-concurso-internacional>

William Alexander C. Carreo, Juan David C. Carreo. (2022). Desarrollo mecatrónico de un robot seguidor de línea.

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/view/6689?articlesBySameAuthorPage=1>

Yeison Daniel T. Santa. (2019). Diseño de un robot seguidor de línea de competencia.

<https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1297/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>