

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Construcción de un prototipo de robot
velocista

Autor: Pelayo Gutiérrez Jiménez

Tutor: Federico Cuesta Rojo

**Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Construcción de un prototipo de robot velocista

Autor:

Pelayo Gutiérrez Jiménez

Tutor:

Federico Cuesta Rojo

Profesor Titular

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Construcción de un prototipo de robot velocista

Autor: Pelayo Gutiérrez Jiménez

Tutor: Federico Cuesta Rojo

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mis compañeros, amigos y familiares, por haber estado apoyando desde la retaguardia, con paseos largos, tirones de orejas y abrazos (no en los tiempos actuales de COVID-19). Especialmente a Ana por acompañarme en las incontables horas de verano y exámenes en las salas de estudio, y a Fede, mi tutor, por los ánimos y una paciencia incalculable.

Pelayo Gutiérrez Jiménez
Sevilla, 2020

Resumen

En este proyecto se ha realizado el diseño de una plataforma robótica móvil, sigue-líneas, sobre la que probar distintos sensores y actuadores, junto a un análisis en profundidad de dichos componentes. El objetivo de este trabajo es el de documentar dichas pruebas de los componentes y del prototipo de robot móvil en una serie de pruebas inspiradas en la robótica de competición.

Abstract

In this thesis, the design of a mobile robotic platform has been carried out, line follower, on which to test different sensors and actuators, together with an in-depth analysis of these components. The aim of this work is to document these tests of the components and the mobile robot prototype in a series of tests inspired by robotic competitions.

Prefacio

Este proyecto, fruto de un interés personal por la robótica de competición, nace en aras al desarrollo en las distintas capacidades de diseño, prototipado y programación. El objetivo ha sido diseñar y fabricar dos prototipos, una prueba de concepto y un segundo prototipo que actúe en calidad de plataforma de pruebas sobre la que poder instalar y adaptar distintos sensores y actuadores para los diversos requerimientos del robot. Asimismo, esto es algo que casa con los posibles fines formativos emanados en esta rama de la robótica móvil: desde la posibilidad de diseño e integración de nuevas funciones, hasta el ensayo con diversos algoritmos, a fin de fomentar distintas estrategias de control del robot en cuestión.

Los componentes para dicho prototipo serán seleccionado pensando en los requerimientos necesarios para las pruebas de la categoría de sigue-líneas y sus derivadas. Esta categoría como su nombre indica consiste en seguir una línea o un circuito cerrado, realizando el recorrido en el menor tiempo posible, y , constatándose, también, su capacidad para detectar obstáculos localizados en la trayectoria, evitándolos o parándose para evitar la colisión. Entre sus derivadas se pueden observar distintas variantes como la actual *Formula DCAR* de la *Liga nacional de robótica de competición* o la categoría de *Line Follower Enhanced* dentro de la *Robochallenge*, pruebas que se retomarán y analizarán más adelante.

Se prestará especial atención al estudio de distintos tipos de sensores y actuadores, realizando análisis y experimentos donde se puedan realizar pruebas comparativas y obtener un mejor entendimiento de estos componentes. El chasis del prototipo final, estará diseñado de forma que se puedan montar e intercambiar las distintas piezas, acomodar la placa de desarrollo seleccionado y con el sistema montado, poder realizar distintas pruebas que verifiquen la capacidad del hardware de realizar un seguimiento de línea básico.

De este modo, el prototipo se convierte en una herramienta versátil de cara a la organización de distintas prácticas y pruebas para los estudiantes, p.e., el seguimiento de línea, detección y evasión de obstáculos y competiciones de cronómetro; adaptación de distintos tipos de actuadores, sensores, sistemas de percepción, reconocimiento del trazado de pista; optimización del recorrido, evasiones de chicanes; localización en el trazado, etc. Esta versatilidad permite que esta plataforma se pudiese utilizar como una herramienta educacional y expandir sus capacidades con el tiempo.

Sevilla, 2020

Índice Abreviado

| | |
|--|-----------|
| <i>Resumen</i> | III |
| <i>Abstract</i> | V |
| <i>Prefacio</i> | VII |
| <i>Índice Abreviado</i> | IX |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Historia de la robótica móvil | 1 |
| 1.2 Competiciones robóticas | 2 |
| 1.3 Robots de guiado autónomo, estado del arte | 3 |
| 1.4 Objetivos y organización de la memoria | 4 |
| 2 Diseño de plataformas | 5 |
| 2.1 Requisitos | 5 |
| 2.2 Software utilizado | 7 |
| 2.3 Primer diseño | 10 |
| 2.4 Segundo diseño | 19 |
| 3 Pruebas de componentes | 29 |
| 3.1 Sensores de línea | 29 |
| 3.2 Sensores de distancia | 35 |
| 3.3 Prueba de motores en vacío | 38 |
| 4 Pruebas del robot | 43 |
| 4.1 Pruebas de aceleración | 43 |
| 4.2 Detección de obstáculos | 47 |
| 4.3 Pruebas de seguimiento de la línea | 48 |
| 5 Conclusiones | 51 |
| 5.1 Problemas y soluciones | 52 |
| 5.2 Trabajos futuros | 52 |
| Apéndice A Códigos principales | 53 |
| A.1 Prueba de aceleración | 53 |
| A.2 Seguimiento de línea | 55 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Apéndice B Piezas diseñadas | 59 |
| B.1 Archivos de diseño paramétrico | 59 |
| B.2 Modelos de malla en formato .stl | 60 |
| | |
| <i>Índice de Figuras</i> | 61 |
| <i>Bibliografía</i> | 63 |

Índice

| | |
|--|----------|
| <i>Resumen</i> | III |
| <i>Abstract</i> | V |
| <i>Prefacio</i> | VII |
| <i>Índice Abreviado</i> | IX |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Historia de la robótica móvil | 1 |
| 1.2 Competiciones robóticas | 2 |
| 1.3 Robots de guiado autónomo, estado del arte | 3 |
| 1.4 Objetivos y organización de la memoria | 4 |
| 2 Diseño de plataformas | 5 |
| 2.1 Requisitos | 5 |
| 2.2 Software utilizado | 7 |
| 2.2.1 FreeCAD | 7 |
| 2.2.2 KiCad EDA | 7 |
| 2.2.3 GrabCAD | 8 |
| 2.2.4 Code Composer Studio | 9 |
| 2.2.5 Tera Term | 9 |
| 2.3 Primer diseño | 10 |
| 2.3.1 Componentes | 10 |
| Alimentación | 10 |
| Microcontrolador | 10 |
| Sensor de Línea | 12 |
| Sensor de distancia | 13 |
| Motores DC | 13 |
| Encoders | 14 |
| Puente H | 14 |
| 2.3.2 Conexionado | 15 |
| 2.3.3 Estructura | 15 |
| 2.3.4 Resultados de la prueba | 16 |
| Control del primer diseño | 16 |
| Resultados y problemas | 17 |
| 2.4 Segundo diseño | 19 |
| 2.4.1 Componentes | 19 |

| | |
|--|-----------|
| Alimentación | 19 |
| Sensor de línea | 20 |
| Sensor de distancia | 21 |
| Encoder magnético | 22 |
| Motores N20 | 22 |
| Bluetooth | 24 |
| 2.4.2 Conexionado | 24 |
| 2.4.3 Estructura | 24 |
| Modelos 3D | 25 |
| Impresión y montaje | 26 |
| 3 Pruebas de componentes | 29 |
| 3.1 Sensores de línea | 29 |
| 3.1.1 QRT-8RC | 29 |
| Medida con los 6 primeros valores | 30 |
| Sensores a 3mm | 31 |
| Sensores a 8mm | 32 |
| 3.1.2 TCRT5000L | 33 |
| 3.2 Sensores de distancia | 35 |
| HC-SR04 | 36 |
| SHARP | 37 |
| Comparación | 37 |
| 3.3 Prueba de motores en vacío | 38 |
| 3.3.1 Motores TT | 39 |
| 3.3.2 Motores N20 | 40 |
| Reductora 100:1 | 41 |
| 3.3.3 Reductora 10:1 | 41 |
| 3.3.4 Comparación de motores | 41 |
| 4 Pruebas del robot | 43 |
| 4.1 Pruebas de aceleración | 43 |
| 4.1.1 Motor TT | 43 |
| Encoder magnético | 43 |
| 4.1.2 Motor N20 | 44 |
| Reductora 10:1 | 44 |
| Reductora 100:1 | 45 |
| Comparación | 46 |
| 4.2 Detección de obstáculos | 47 |
| 4.3 Pruebas de seguimiento de la línea | 48 |
| 5 Conclusiones | 51 |
| 5.1 Problemas y soluciones | 52 |
| 5.2 Trabajos futuros | 52 |
| Apéndice A Códigos principales | 53 |
| A.1 Prueba de aceleración | 53 |
| A.2 Seguimiento de línea | 55 |
| Apéndice B Piezas diseñadas | 59 |

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| B.1 | Archivos de diseño paramétrico | 59 |
| B.2 | Modelos de malla en formato .stl | 60 |
| | <i>Índice de Figuras</i> | 61 |
| | <i>Bibliografía</i> | 63 |

1 Introducción

La robótica es una rama tecnológica dedicada al estudio de los robots, en su diseño, construcción, programación y aplicación. Los robots, son sistemas mecatrónicos autónomos capaz de realizar una tarea concreta de acuerdo a su programación o software. Actualmente la robótica se encuentra en el día a día de todas las personas. Concretamente la robótica móvil, en la cual este proyecto se centra, está siendo objeto de gran estudio, debido a su integración actual en las calles y el futuro próximo en el que los vehículos sean completamente autónomos y los robots sociales se irán implantando en distintos hábitos de la experiencia cotidiana.

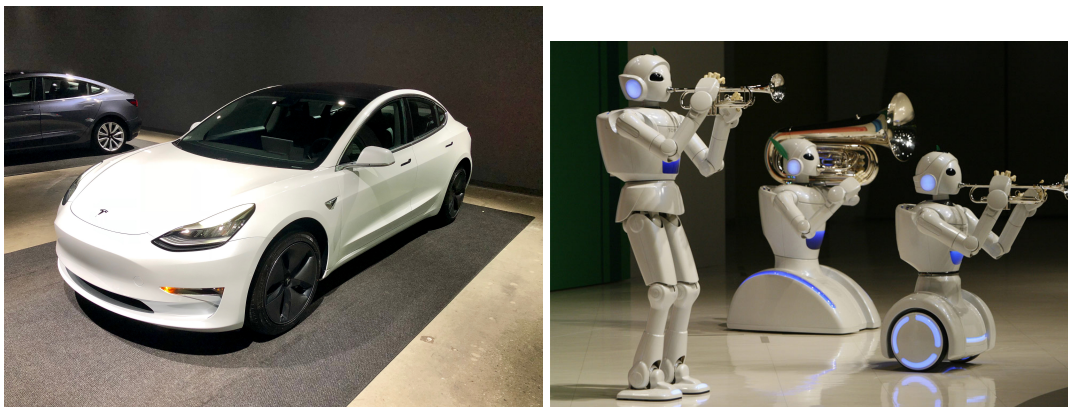


Figura 1.1 Ejemplo de vehículo autónomo y robot social.

1.1 Historia de la robótica móvil

Desde la concepción de la automática se han explorado las posibilidades de la robótica móvil, rama de la robótica que se remonta al año 1949, siendo ELMER y ELSIE considerados como los primeros robots autónomos. A partir de los años 60 se produjo un gran desarrollo en esta rama de la robótica con el desarrollo de Shakey, 1966, primera plataforma móvil de propósito general capaz de analizar y descomponer los comandos en un conjunto de tareas simples. Ese mismo año, también en la universidad de Stanford se comenzaron a realizar pruebas con The Stanford Cart, un rudimentario carro construido con ruedas de bicicletas, que es considerado el primer robot sigue-líneas, también utilizado para la simulación de retardos como los que existirían entre la luna y la tierra, en caso de controlar un robot de forma remota en la superficie del satélite terrestre. En los 90 empezaron a implementarse técnicas de visión artificial y actuación con los primeros coches semi-autónomos, siendo estos VaMP y VITA-2, llegando posteriormente a ALVINN, un coche con dirección autónoma, realizando pruebas como la conducción entre la costa atlántica y la pacífica de

estados unidos. En 1996 la NASA manda el Mars Pathifinder a Marte, siendo un robot controlado remotamente con la capacidad de evadir posibles obstáculos o peligros en un terreno desconocido, práctica que se ha seguido realizando, siendo el último miembro de la familia de robots móviles enviados a la superficie del planeta rojo, y todavía en camino a la hora de la realización de este escrito, Perseverance.

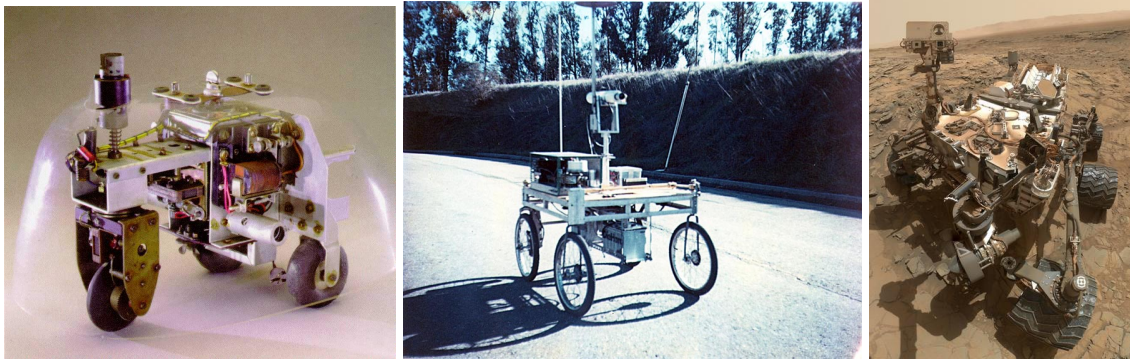


Figura 1.2 ELMER y ELSIE, The Stanford Cart y Curiosity Rover.

En 2002 se introdujo el primer robot móvil con éxito en el mercado doméstico de masas, el robot aspirador Roomba, de iRobot. En 2004 se realizó la primera competición de DARPA Grand Challenge, una competición anual de larga distancia en la que distintos coches autónomos competían entre ellos, en distintos terrenos. Actualmente la robótica ha tomado una presencia importante en la imagen pública, desde que en 2008 Boston Dynamics comenzó a publicar videos de sus robots cuadrúpedos por terrenos desnivelados y nevados, posteriormente con Atlas y Handler, un robot humanoide y otro balanceador respectivamente, robots de propósito general orientados a la colaboración con personas y el manejo de cargas pesadas.



Figura 1.3 Robot domestico roomba y robot de defensa Atlas.

1.2 Competiciones robóticas

Las competiciones robóticas han sido un constante desde los primeros pasos de esta rama. Son una fuente de desarrollo e innovación, con el fin de desarrollar un hardware y software para la realización de distintas pruebas con el objetivo de cumplirlas de la forma más eficiente posible. Algunos ejemplos de las primeras competiciones son la competición de Micromouse del IEEE en 1979 y All Japan Robot Sumo en 1990. En la década de 1990 fue cuando empezó el mayor desarrollo de la robótica de competición con el comienzo de un gran número de competiciones

todavía vigentes, como la RoboCup, competición de fútbol para robots; Trinity Fire Fighting Robot Competition, donde se buscan soluciones para la extinción de fuegos con robots autónomos, y Eurobot, una competición universitaria con distintas pruebas. Estos ejemplos nombrados tienen en común la presencia de distintas categorías para fomentar la innovación y la presencia de estudiantes universitarios en este campo tan extenso.

Este tipo de actividades se han ido desarrollando y expandiendo recientemente en todos los ámbitos y niveles de conocimiento, siendo bastante común la existencia de competiciones centradas en promocionar el campo de la robótica entre los más jóvenes, como podría ser las competiciones de LEGO®MINDSTORMS®. En el otro espectro de la competición existen competiciones como *DARPA Grand Challenge* o *Roborace*, competiciones de alto nivel y con una gran recompensa económica, cuya finalidad es avanzar el desarrollo de nuevas tecnologías de defensa y conducción autónoma, por nombrar algunos ejemplos.



Figura 1.4 Robot Lego y DARPA Grand Challenge.

En este proyecto nos centramos más concretamente en la categoría de robots *velocistas*, dedicada a la conducción autónoma a través de un circuito cerrado definido mediante una o varias líneas, compitiendo con otros robots de forma simultánea o mediante cronómetro. Esta categoría viene definida por la *Liga Nacional de Robótica de Competición* la cual ha ido evolucionando las restricciones y requerimientos hasta la actual categoría *DCAR* centrada en un circuito con dos carriles con un gradiente de grises en lugar de la línea negra tradicional, como es el caso en la competición de *ROBOCHALLENGE Line Follower* y *Line Follower Enhanced*. Respecto a estas dos categorías se hablará en el apartado de requisitos 2.1.

1.3 Robots de guiado autónomo, estado del arte

Los robots de guiado autónomo (AGV) son una familia de robots móviles caracterizados por tener un camino predefinido el cual siguen de forma plenamente autónoma. La forma de guiarse ha evolucionado en gran manera a lo largo de los años, desde cables enterrados, líneas pintadas en el suelo, con etiquetas RFID, o guiados mediante una estación remota. El prototipo que se pretende diseñar y analizar en este proyecto es un robot de guiado autónomo mediante algún tipo de guía óptica, sea una línea o un gradiente.

Los AGV se encuentran muy presentes en la industria, especialmente con la aparición de los almacenes autónomos de gran escala, donde resulta más fácil mover una estantería hacia la persona que desplazar la persona a la estantería; o en la industria automovilística, donde las piezas y herramientas necesarias son transportadas de forma automática al operario según las requiera. Actualmente los

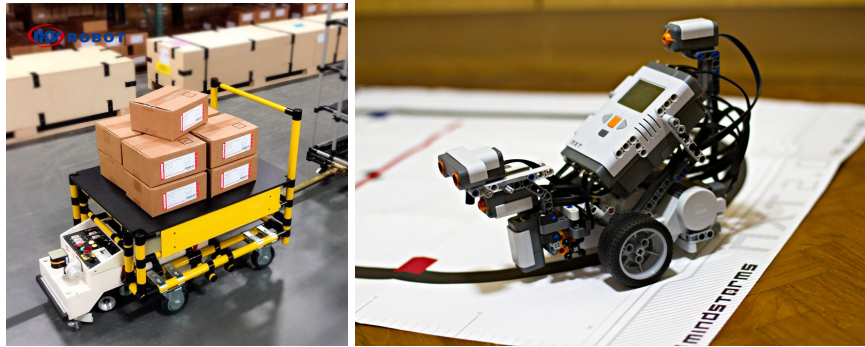


Figura 1.5 AGV industrial y sigue-líneas construido con Lego Mindstomrs.

AGV industriales trabajan en red y de forma cooperativa, trazando sus propios mapas y realizando guiados autónomos evitando colisiones, personal y otros AGVs que se encuentren en las mismas instalaciones [5]. De la misma forma también se están realizando estudios en los que se realiza un uso cooperativo de AGV para la realización de tareas que no son realizables con un único robot, como podría ser el guiado de objetos de mayor tamaño [1].

Actualmente a nivel de competición, gracias a la reducción del tamaño y coste de los componentes electrónicos de consumo, se está empezando a ver la integración de cámaras para la detección de líneas en robots de menor tamaño [6][2]. La detección de línea mediante una cámara se puede observar en las competiciones de sigue-líneas, como una tendencia que está sustituyendo a los métodos tradicionales de seguimiento de una línea con los sensores infrarrojos incluyendo en los ámbitos educativos [3], esto también se puede observar en el aumento de competiciones de AGV que no tienen una línea y a lo mejor se basan en un carril delimitado mediante dos márgenes o distintos colores, como es el caso de la *Formula Pi*. Junto a este aumento de herramientas también está surgiendo un nuevo método para el diseño de robots de competición, como son la simulación para mejorar las estrategias de control y como una forma más rápida para comprobar nuevos algoritmos [4] y la aplicación de técnicas de machine learning en vez de el tradicional controlador PID, permitiendo al modelo entrenado tener un control complejo del sistema sin ser necesario un modelo matemático completo[7].

1.4 Objetivos y organización de la memoria

En este proyecto se ha realizado el diseño de una plataforma robótica móvil, sigue-líneas, sobre la que probar distintos sensores y actuadores, junto a un análisis en profundidad de dichos componentes. El objetivo de este trabajo es el de documentar dichas pruebas de los componentes y del prototipo de robot móvil en una serie de pruebas inspiradas en la robótica de competición.

La memoria está organizada del siguiente modo. En el capítulo 2 se presentan los requisitos y diseño de las plataformas, primero una prueba de conceptos y posteriormente el prototipo final, con un primer análisis a las características de los componentes de ambas plataformas. En el capítulos 3 se realizarán una pruebas a los componentes presentados en el capítulo 2, analizando los resultados obtenidos y comparándolos entre si. En el capítulo 4, con el prototipo ensamblado, se realizarán unas pruebas para verificar el correcto funcionamiento del robot, y su capacidad para realizar las tareas básicas de un robot sigue-líneas. Y finalmente en el capítulo 5 se realizará un análisis general del proyecto, analizando que elementos han sido relevantes y que problemas se han encontrado durante la realización de este proyecto.

2 Diseño de plataformas

En este apartado se van a exponer los pasos tomados para realizar el diseño y la fabricación del prototipo de robot velocista. Para ello primero se explicarán los requisitos para este prototipo; el software con el que se han diseñado los distintos componentes; se mostrará una prueba de concepto desde la cual se ha partido, mejorando los problemas que se descubrieron en esta; y finalmente se expondrán las distintas piezas del robot, explicando el por qué de su diseño y su montaje. En la figura 2.1 se puede observar el conjunto del diseño que se va a analizar a continuación.

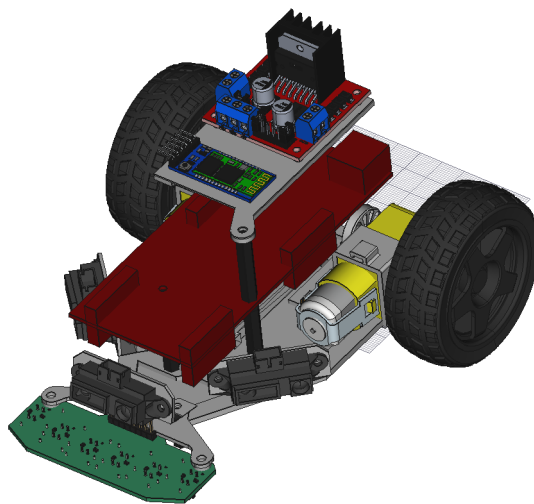


Figura 2.1 Modelo 3D del robot con motores tipo TT.

2.1 Requisitos

En este apartado se van a enumerar los distintos requisitos necesarios para la realización de un robot velocista para poder cumplir las pruebas de *Robo Challenge LF Enhanced* y la velocista de la *Inrc*.

Los requisitos de un robot para que pueda ser homologado en la categoría velocista de la *LNRC* según la normativa 1.5.1 de Marzo de 2019 son los siguientes:

- El robot debe tener un máximo de 16 cm de ancho.
- El robot debe navegar por los laterales del circuito, no por el medio.
- Un robot no puede cambiar de carril más de 1 vez cada 1 segundo, programáticamente debe estar garantizado que el algoritmo de cambio de carril no se ejecuta hasta pasado ese tiempo,

- Un robot que encuentre un obstáculo delante y otro en el carril de al lado debe ir a la velocidad del obstáculo delantero sin cambiar de carril.

Los requisitos para las pruebas de LF y LF enhanced de *RoboChallenge* son los siguientes:

- Las dimensiones del robot deben ser inferiores a 30 x 30 cm (300mm x 300mm), y el peso máximo de 3 kg (3000g).
- No se permite el uso de sustancias pegajosas para aumentar la tracción de las ruedas. Los neumáticos y otras partes del robot que estén en contacto con la pista no deben ser capaces de sujetar un papel estandar A4 (80 g/m²) durante más de dos segundos.

De estas normativas para el diseño físico se tendrán en cuenta son las siguientes:

- El tamaño del robot debe ser inferior a 300x160x130mm.
- El peso del robot debe ser inferior a 3Kg.

Para la selección de hardware se tendrán en cuenta los siguientes requerimientos:

- Capacidad de medir escala de grises además de líneas blancas o negras.
- Capacidad de detectar obstáculos de frente y en el carril continuo.

Y finalmente para la programación del robot hay que tener en cuenta para las pruebas de la LNRC las siguientes normas:

- No se podrá permitir el cambio de carril con tiempos inferiores a 1s.
- En caso de encontrarse otro robot circulando a menor velocidad y el carril contiguo este ocupado se deberá circular a la misma velocidad que robot de delante.
- Ningún objeto u obstáculo externo al circuito se colocará a una distancia inferior a 40cm de la pista.
- El robot comenzará su movimiento una vez hayan pasado 5s desde la marca de inicio.

En las pruebas de LF Enhanced se encontrarán los siguientes obstáculos en la pista:

- La línea se interrumpe durante 10cm durante una recta.
- Un obstáculo de 25x12x65[mm] colocado sobre la línea, teniendo que rodearse.
- Un balancín de al menos 50cm, colocado sobre un poste de 12cm.

Un esquema básico de un robot sigue líneas como el que se pretende diseñar y construir sería el presente en la figura 2.2. En dicha figura las flechas azules representan las entradas del sistema mientras que las flechas rojas indican las señales de control de los actuadores. Las flechas naranjas sería la señal de control adaptada para la actuación de los motores. En este esquema hay elementos que no son necesarios para hacer un seguidor de líneas básico, en cuyo caso, los encoders y el sensor de distancia se podrían omitir, pero como la finalidad es la de diseñar una plataforma expansible sobre la que se puedan ampliar funciones y métodos de control.

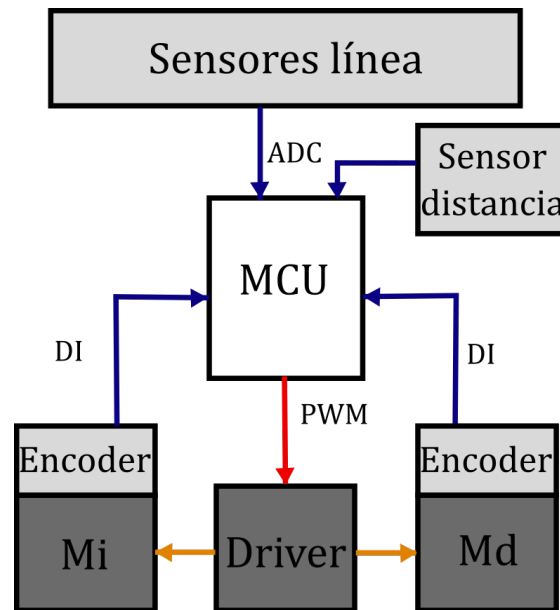


Figura 2.2 Esquema de los componentes que conforman un robot que sigue líneas avanzado.

2.2 Software utilizado

2.2.1 FreeCAD

Para el diseño de las piezas 3D que conforman el chasis y la estructura del robot se ha utilizado *FreeCAD*. Este es un programa de diseño asistido por ordenador (*Computer Aided Design, CAD*) libre de código abierto, con licencia *GNU LGPL v2+*, programado en *Python* y *C++*. Este programa está orientado al diseño 3D paramétrico principalmente para la ingeniería mecánica. A pesar de ello gracias a su modelo abierto existen espacios de trabajo que expanden las capacidades de dicha herramienta como *KiCadStepUp*, la cual se ha utilizado para importar modelos directamente de *KiCad*, programa que se comentará más adelante, e integrarlos en el entorno de diseño.

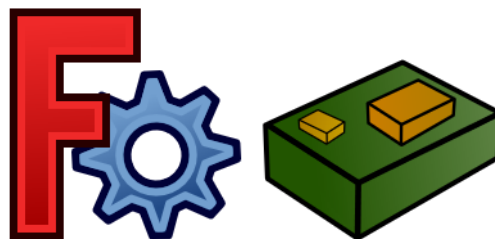


Figura 2.3 Logos de FreeCAD y el entorno KiCadStepUp.

La versión de *FreeCAD* utilizada es la 0.18, publicada el 12 de Marzo de 2019, siendo actualmente la última versión estable la 18.4 a Septiembre de 2020. La versión de *KiCadStepUp* se ha obtenido mediante el gestor de complementos, *Addon Manager*. Este se actualiza directamente desde el repositorio ubicado en *GitHub*, siendo su última actualización el 8 de Julio de 2020.

2.2.2 KiCad EDA

Para el del sensor de línea se ha diseñado un circuito impreso, para el cual se ha utilizado *KiCad Suite*. Este es un paquete de programas libres y de código abierto diseñado para automatizar el diseño electrónico (EDA, *Electronic Design Automation*) con licencia *GNU GPL v3+*. Este conjunto

de programas está orientado para agilizar el proceso de diseño de circuitos electrónicos, permitiendo una alta flexibilidad a la hora de la selección de componentes, su huella, su modelo, conexiones, lista de componentes, precios, llegando a la generación de los archivos necesarios para ordenar la fabricación de dicho diseño. Su primera versión fue publicada en 1992, desarrollada por Jean-Pierre Charras. Actualmente su desarrollo se realiza por un equipo de voluntarios y contribuidores remunerados mediante un sistema de donaciones presente en su página web.



Figura 2.4 Logo de KiCad.

Este paquete consta de distintos componentes:

- *KiCad*, programa principal que gestiona los distintos archivos que conforman un proyecto.
- *Eschema*, programa dedicado a el diseño del esquema del circuito. En este programa, los símbolos y las huellas de los componentes se encuentran separadas, siendo necesario elegir que huella se corresponde con que componente o tipo de componente.
- *Pcbnew*, programa de enrutado para el diseño del circuito impreso. Permite el uso de múltiples capas, personalización y creación de huellas para los componentes e incluye un visor en 3D en el que se pueden añadir y vincular nuevos modelos para los componentes a la amplia librería de modelos 3D que viene por defecto.

La versión de *KiCad* que se ha utilizado es la 5.1.6, publicada el 13 de Mayo de 2020, siendo actualmente la última versión estable.

2.2.3 GrabCAD

Para la obtención de modelos 3D de los componentes y electrónica que se han utilizado en el diseño del robot, tanto como para ciertos componentes utilizados en *KiCad*, se ha recurrido a *GrabCAD*. Una plataforma gratuita de colaboración basada en la nube, que permite, subir, gestionar y compartir archivos de CAD. Actualmente *GrabCAD Inc.* es propiedad de *Stratasys Ltd.*, fabricante de impresoras y sistemas de producción 3D.



Figura 2.5 Logo de GrabCAD.

Dentro de esta página se ha hecho uso también de *GrabCAD Workbench*, una herramienta que permite organizar y gestionar distintos archivos y modelos. Una de las características más interesantes es la posibilidad de abrir archivos con extensión *.SLPDRT* y *.SLDASM*. Estas extensiones

son el formato de archivo propietario de *SolidWorks*, herramienta profesional de CAD. Una vez abiertos, permite exportarlos como archivos *.step*, formato libre y estandarizado para herramientas de CAD.

2.2.4 Code Composer Studio

Para la programación del microcontrolador, se utilizará *Code Composer Studio*, un entorno de desarrollo integrado (IDE, *Integrates Development Enviroment*) de la empresa *Texas Instrument*, al igual que el micro controlador que se utilizará. Este IDE se basa en *Eclipse* otro IDE de código abierto, popularmente utilizado para el desarrollo de aplicaciones *Java*, pero con capacidades para desarrollar, compilar y depurar en otros muchos lenguajes. En este caso esta centrado en la programación de aplicaciones empotradas y desarrollo a bajo nivel, con un depurador basado en JTAG, para los microcontroladores y procesadores de *Texas Instruments*,



Figura 2.6 Logo de Code Composer estudio y eclipse.

La versión que se ha utilizado es *Code Composer Studio 10.1.0* que usa una versión sin modificar de *Eclipse* y *CDT* versión 19.12LTS. Actualmente esta es la última versión estable de *Code Composer Studio*. También junto a este se utilizará la librería de *TivaWare™ for C Series*, la cual consiste en una capa de abstracción para el uso de los periféricos de la placa de desarrollo *Tiva™ C Serie EK-TM4C1294XL*, la cual se utilizará como CPU del robot.

2.2.5 Tera Term

Tera Term se ha utilizado como emulador de terminal, para poder recibir la telemetría correspondiente por parte del robot. Este es un emulador de código abierto con capacidad de emular distintos tipos de terminales como pueden ser comunicaciones SSH, TCP/IP o UART. En el caso que incumbe a este proyecto se ha utilizado una conexión por puerto serie mediante bluetooth para poder mantener la comunicación de forma inalámbrica. Para la configuración del módulo bluetooth también se utilizó *Tera Term*.



Figura 2.7 Logo de Tera Term.

La versión de que se ha utilizado es *Tera Term 4.105*. Actualmente se encuentra mantenido por *Tera Term Project*, un grupo de desarrolladores japoneses con el objetivo de mantener y actualizar esta herramienta.

2.3 Primer diseño

Se realiza un primer diseño del prototipo del robot en el que se puede montar la placa de pruebas y un sensor delantero, utilizando sensores de los cuales ya se disponía. La utilidad de esta prueba fue observar ciertos problemas y poder construir de forma rápida una versión con la que pudiesen realizar prueba y observar fallos para evitarlos en el segundo prototipo posteriormente.

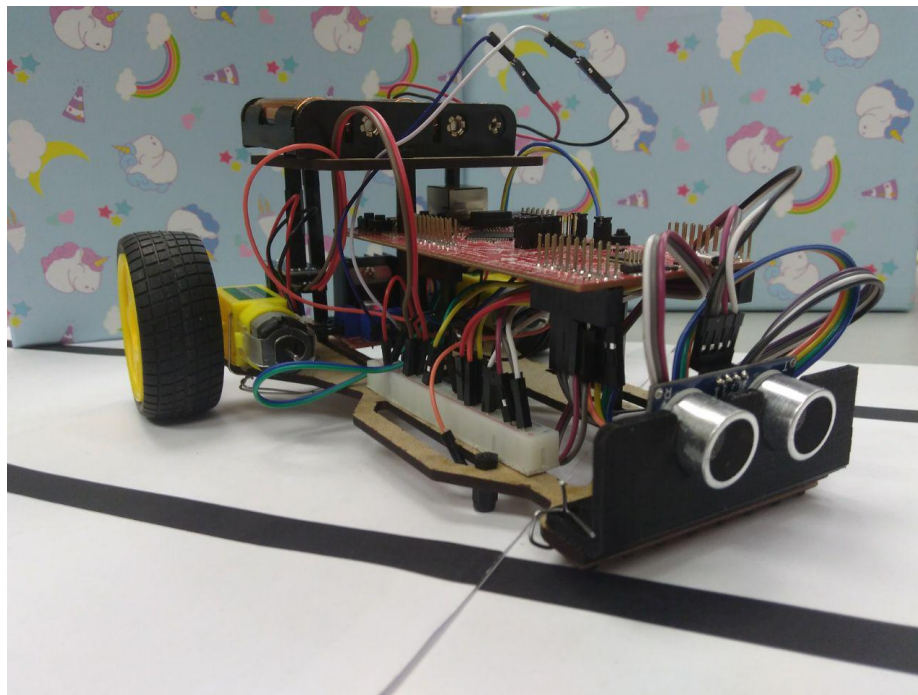


Figura 2.8 Prueba de concepto.

2.3.1 Componentes

A continuación se comentarán los componentes utilizados en este primer diseño, su funcionalidad y sus posibles problemas.

Alimentación

Para la alimentación del prototipo se ha utilizado un portapilas con cinco pilas alcalinas de tamaño AA. Esto proporciona una tensión de 7.5V. El mayor inconveniente es la capacidad de las baterías es bastante pequeña comparado con una batería de litio y su peso es muy superior. En funcionamiento tenía una autonomía aproximada de una hora.

A parte de los problemas anteriormente nombrados, la dificultad de cuadrar las pilas, que se venden en packs de 4 unidades con un portapilas de 5 unidades. Pero el coste de esta implementación a corto plazo es menor que la compra de baterías de litio y un cargador para estas.

Microcontrolador

El microcontrolador que se va a utilizar en este proyecto para la construcción del prototipo es el *TM4C1294NCPDT* de *Texas Instrument* dentro de la placa de desarrollo *TivaTMC Serie EK-TM4C1294XL*, como se ha comentado en el apartado 2.2.4. Esta familia de microcontroladores está orientada a el control de procesos automáticos y conectividad, con una gran cantidad de periféricos pensados para estas funciones.

La razón por la que se ha escogido esta placa de desarrollo es la familiaridad con las librerías y el manejo de registros por parte de *Texas Instruments* al haber sido utilizada anteriormente durante los



Figura 2.9 Portapilas de 5 pilas AA.

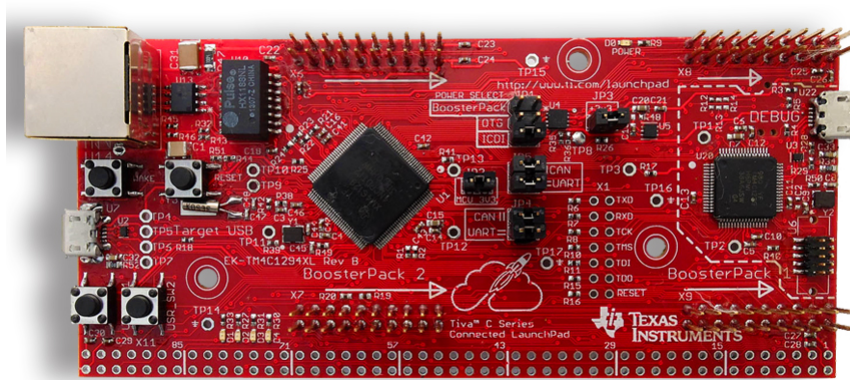


Figura 2.10 Placa de desarrollo EK-TM4C1294NCPDT.

estudios de grado y haber utilizado otras placas de desarrollo del mismo fabricante con anterioridad. El principal inconveniente de esta placa a la hora de realizar el diseño de la estructura es su gran tamaño, 12x5.5cm, el cual no es realmente necesario, habiendo un exceso de pines, en el mercado existen placas con características similares o superiores y menores dimensiones, a pesar de ello es una placa extremadamente flexible con una gran cantidad de periféricos. Por tanto debido a su familiaridad y disponibilidad, al tener una en posesión, ha sido seleccionada para ser utilizada en este proyecto.

Las características de esta placa de desarrollo son las siguientes:

- Microcontrolador de altas prestaciones TM4C1294NCPDT:
 - 120MHz 32-bit ARM Cortex-M4 CPU
 - 1MB Flash, 256KB SRAM, 6KB EEPROM
 - 8 temporizadores de 32-bit.
 - Dos 12-bit ADCs con 20 entradas conmutables.
 - 8 salidas PWM programables.
 - Hardware de protección de datos, Ethernet MAC+PHY.
 - Interfaces de comunicación serie USB H/D/O, Bus Cam, etc.
- TivaWare 2.1

- Interfaz integrada de depurado (ICDI)

Como se ve esta placa está en parte sobredimensionada a nivel de periféricos para este tipo de aplicación, pero por otro lado, un periférico que resulta muy interesante es la interfaz de encoder de cuadratura, del cual sólo dispone de uno, por lo que la medida de velocidad se realizará de forma manual mediante interrupciones.

Sensor de Línea

El sensor usado para la lectura de la línea es el *QTR-8RC* de *Pololu*. Esta placa está formada en un conjunto de 8 sensores SMD que consisten

en un LED infrarrojo y un foto-transistor acoplados a través de la reflexión de la luz sobre una superficie. La peculiaridad de este circuito es el montaje del foto-transistor en serie con un condensador como se puede ver en la figura 2.11.

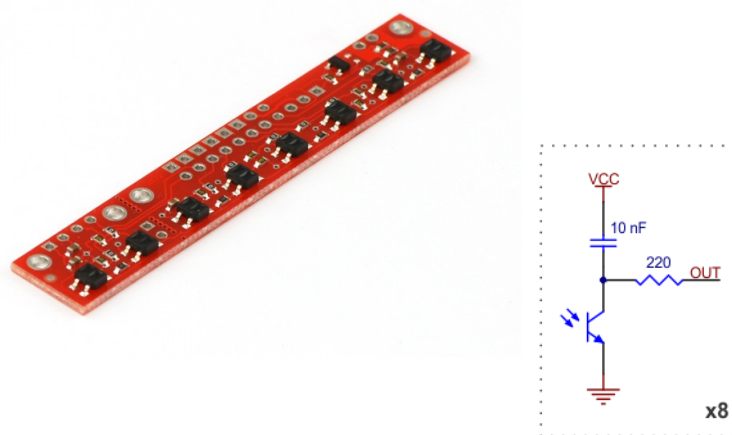


Figura 2.11 Sensor de línea QTR-8RC de Pololu y esquema del foto-transistor.

Este tipo de montaje ofrece la posibilidad de tener una medida dependiente de la reflexión de la luz sin la necesidad de recurrir a ADC. Esto se consigue midiendo el tiempo de descarga, un tiempo largo indica una baja reflexión y un tiempo corto indica una alta reflexión, esto nos permite diferenciar entre una línea negra y un fondo blanco o el contrario. Para obtener esta medida de tiempo es necesario seguir el siguiente proceso como se muestra en el *datasheet* y la *application note* de *Pololu*.

- Configurar el pin como salida y ponerlo a nivel alto.
- Esperar al menos $10\mu s$ para que aumente la tensión de la salida del sensor.
- Configurar el pin como entrada de alta impedancia.
- Medir el tiempo que tarda la tensión de salida del sensor en ponerse a nivel bajo.

El principal inconveniente de este formato de sensores es que la velocidad es variable, por lo que no tendríamos un tiempo de medida constante. Los tiempos que indica en la lectura del sensor si se está reflejando en una superficie negra es de 2.6ms a 3mm y de 10ms a 9.5mm. Este tiempo depende también del tipo de superficie, experimentalmente cambiaban los tiempos dependiendo de si la línea se encontraba impresa en papel normal o papel brillo. Se llegaron a tener tiempos del orden de 100ms para medir la línea en papel normal de fotocopiadora.

Sensor de distancia

El primer sensor de distancia que se utilizó es un sensor de ultrasonidos muy conocido y utilizado en la comunidad *maker* como es el *HC-SR04*, figura 2.12. La principal ventaja de este sensor es su manejo con dos pines digitales, y la relativa facilidad para conseguir una medida de la distancia:

$$d[cm] = \frac{t[ms] * v_s[cm/ms]}{2} \quad (2.1)$$



Figura 2.12 HC-SR04.

El mayor problema es el tiempo de medida, el cual es variable. lo cual puede significar generar un bloqueo durante otras funciones o que la medida llegue con retraso y ya no sea relevante, o en el peor de los casos, que llegue cuando ya es tarde. Por otro lado, a pesar de el tiempo de medida variable, si se implementase de una forma no bloqueante se podría medir de forma constante, lo cual supliría este problema.

Otro inconveniente es que su precisión depende de factores ambientales como la temperatura, presión y humedad ambiental. Por ello estas medidas no se deben tomar como absolutas, hecho que se reflejará en los experimentos. Para la velocidad del sonido se ha supuesto $340m/s$ o $34cm/ms$ la cual es la velocidad del sonido a $15^{\circ}C$, 1 atmósfera y 0% humedad. A pesar de dicho inconveniente, la función para lo que se va a utilizar es para detectar la presencia de obstáculos, no para medir con precisión la distancia a estos.

Motores DC

Para la actiuación de las ruedas se utilizan dos motores de corriente continua *DG01G-L*, con reductora 48:1, la L indica que el eje del rotor es largo, de forma que se puede añadir un encoder directamente en el eje del motor, y no exclusivamente en el de salida de la reductora. Estos motores también son conocidos como motores TT, pudiendo encontrarse con ese nombre con mucha facilidad y a un coste muy bajo.

Las características de dicho motor son las siguientes de acuerdo a la página oficial de dagurobot:

- Tensión de alimentación: 4.5 V
- Consumo de corriente: 190 mA (250 mA max.)
- Reductora: 48:1
- Velocidad de rotación: 140 ± 10 rpm
- Torque: 0.8 kg*cm (0,078 Nm)
- Diametro del eje: 5.4 mm

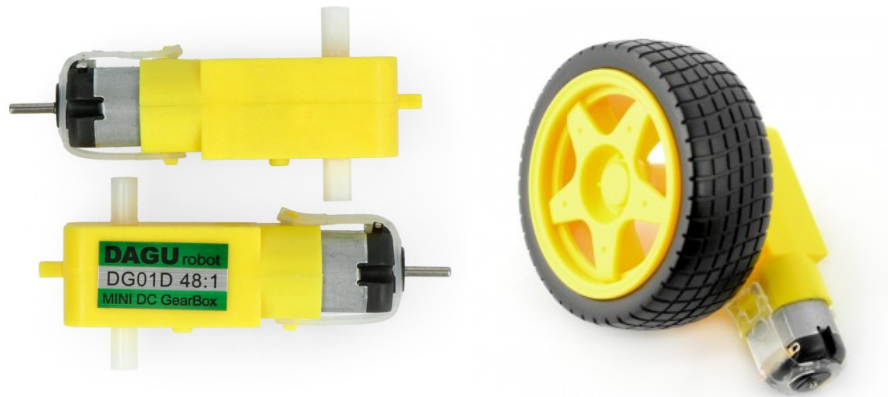


Figura 2.13 Motor DG01D 48:1 y rueda 65x26.

- Tipo de eje: eje doble de plástico con laterales aplanados.
- Peso del motor: 30 g

Los motores se alimentarán a 7.5V para aumentar el par de estos, a la salida de la reductora se les acoplará una rueda de 65x25mm como la que se puede observar en la figura 2.13.

Encoders

Los encoders utilizados junto a estos motores están conformados por un disco con 12 perforaciones y un sensor de paso óptico que se pone a nivel bajo cuando se interrumpe el paso de la luz en el led y el fototransistor. Tiene un circuito de adaptación, por lo que se utiliza la salida digital de dicho circuito.

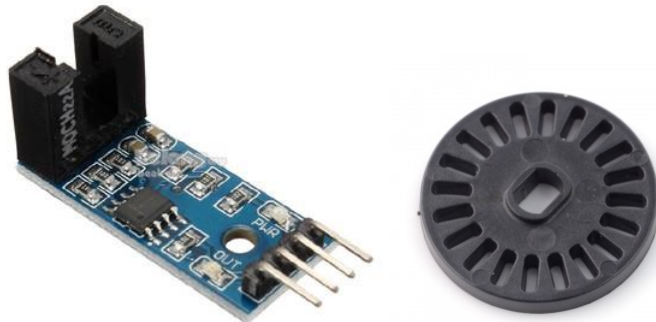


Figura 2.14 Sensor de paso óptico y disco de encoder incremental.

El disco utilizado tiene 12 huecos, es decir, permite 12 pulsos por vuelta en el eje de la rueda. Con esto podemos suponer que el tiempo máximo entre dos pulsos sería de 80ms a 1 vuelta por segundo.

Puente H

Para la adaptación de potencia y el control de los motores se ha utilizado el circuito integrado de puente completo *L298N*. Este circuito permite el control individual de dos motores. Este se encuentra en una placa su propia placa, la cual también incluye un regulador de 5V, el cual se utilizará para alimentar a la placa del MCU. El sentido de los motores se puede modificar con unos

pinos, pero por simplificar, se mantendrán siempre en sentido de avance, modificando únicamente el valor del PWM que regula la tensión aplicada a los motores.

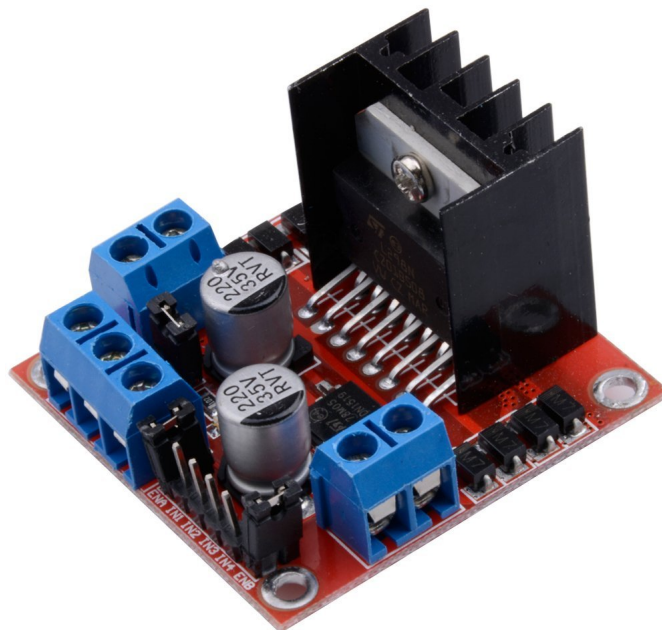


Figura 2.15 Puente completo L298N.

2.3.2 Conexionado

En la figura 2.16 se puede observar los componentes nombrados anteriormente y su conexionado en los distintos pines de la placa de desarrollo *TivaC™*. Para las conexiones a 5V se utilizará una tira de placa blanca para prototipado a la cual se conectarán los distintos pines de alimentación de los módulos, al igual que la alimentación de la placa controladora. Respecto a los pines de conexión, el sensor de línea y el sensor de ultrasonidos se conectará en los pines delanteros de la placa, mientras que los PWM de control de los motores y las entradas de los encoders se conectarán en los pines traseros, considerando la parte delantera siguiendo el sentido de las flechas marcadas en la placa de desarrollo.

2.3.3 Estructura

La estructura en la que se montó esta primera prueba fue un chasis muy sencillo, figura 2.17, en el cual simplemente se tuvo en cuenta que cupiesen los componentes, sin tener restricciones de tamaño, teniendo unas dimensiones de 190x120mm, añadiendo ambas ruedas las dimensiones totales eran de 204x173mm.

El chasis por simplicidad fue construido utilizando la cortadora laser de *FabLab Sevilla* en DM de 3mm. La otra pieza que era necesaria para este diseño era el soporte de ultrasonidos, el cual fue fabricado en PLA negro en una impresora 3D *ANET A8*.

Para el ensamblaje se utilizaron dos métodos distintos: tornillos y separadores de plástico para unir la placa controladora, el puente completo y los dos chasis, junto con dos pequeños soportes para separar el sensor de línea del suelo y no arrastrarlo; y alambre para sujetar los motores, el soporte del sensor de distancia y el sensor de línea al chasis, quedando este primer diseño como se observa en la figura 2.18.

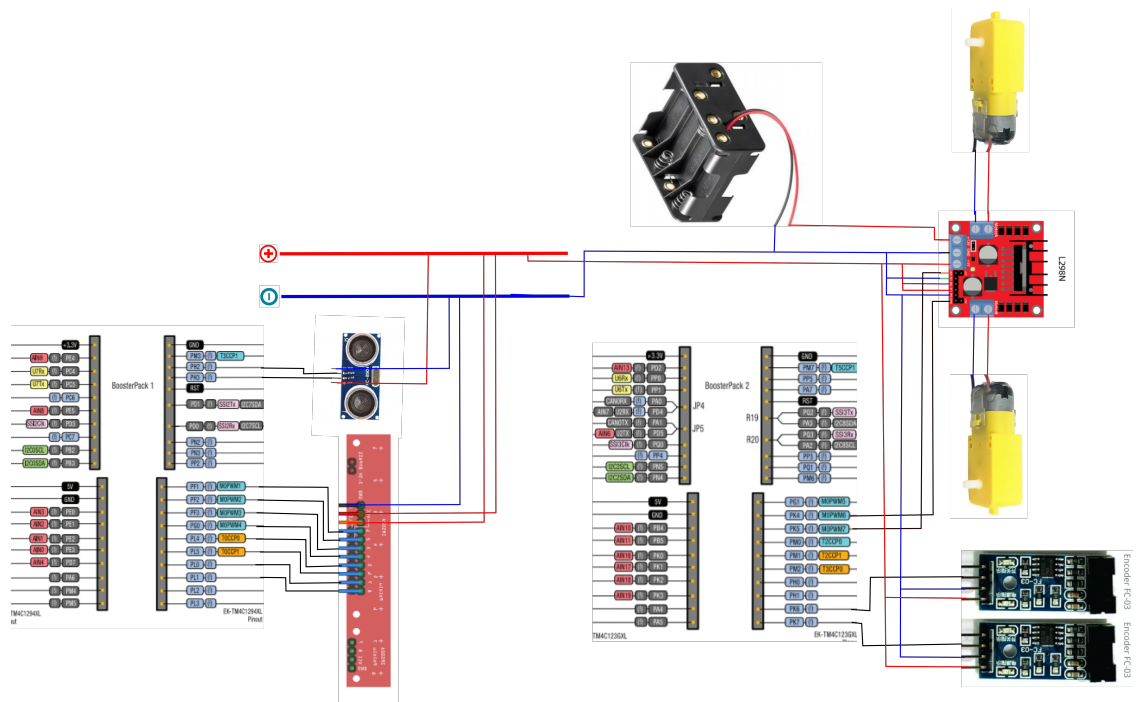


Figura 2.16 Conexión de los componentes a la placa de desarrollo.

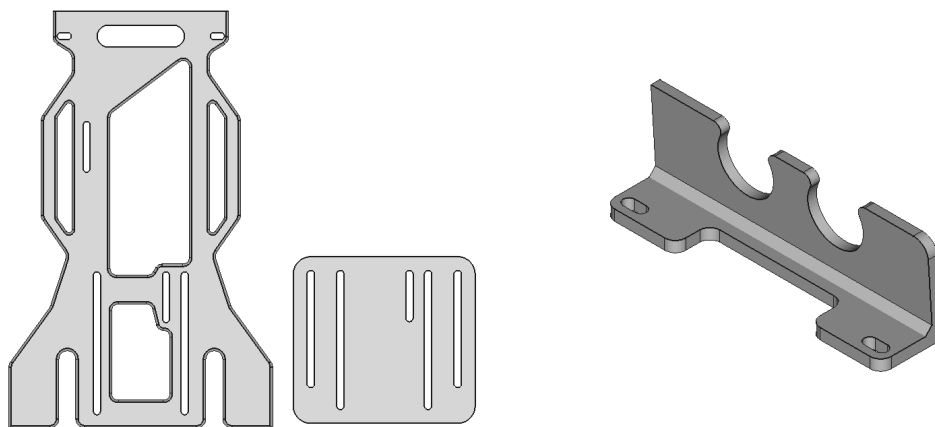


Figura 2.17 Modelo del chasis y soporte para sensor de distancia.

2.3.4 Resultados de la prueba

Control del primer diseño

La programación de esta prueba consiste en, un control de velocidad de los motores, la lectura de la línea a seguir y la medición de ultrasonidos. Todas estas medidas se encuentran temporizadas, ejecutándose cada tarea según los siguientes intervalos:

- 0.5ms control de velocidad.
- 100ms lectura de la línea y selección de las referencias de velocidad.
- 100ms lectura del sensor de distancia.

Estos tiempos se escogieron teniendo en cuenta la frecuencia de lectura de los sensores. Dichos flags se ejecutan con distintos temporizadores periódicos. El sensor que más problemas ha generado

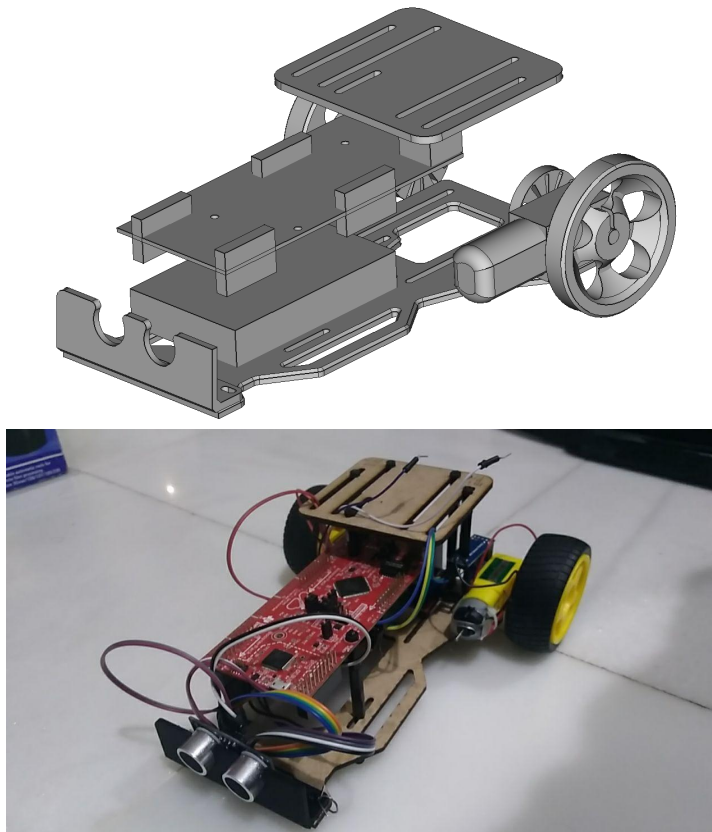


Figura 2.18 Diseño en FreeCAD frente a diseño ensamblado.

es el sensor de línea, el cual llegaba a tardar $100ms$ en leer la línea. Por otro lado, el sensor de ultrasonidos tarda aproximadamente $1ms$ en su lectura, por lo que no bloquea el control general de forma importante.

Debido a que de la función de lectura de la línea tarda tanto o más que el flag que la ejecuta, este flag se desactiva en caso de haberse activado durante la ejecución, aumentando los tiempos de lectura entre sí a $200ms$, pero dando posibilidad de ejecutar el resto de rutinas.

Resultados y problemas

Debido a las dificultades programando la línea y los tiempos de lectura obtenidos. Los tiempos se escogieron de forma experimental, tras la realización de varias pruebas se llegó a obtener una idea del tiempo en el que se realizaba la bajada de de tensión en la mayoría de los pines. Con esto, se programó la lectura de la línea con un tiempo suficiente de lectura de forma que sólo quedasen por ponerse a nivel bajo los sensores que se encontrasen sobre la línea negra, unos $100ms$. Esto genera un retardando el resto de tareas, ocasionando dificultades con el cambio de carril y el seguimiento de líneas durante las curvas.

Debido a esto se tuvo que reducir la velocidad del robot de forma que la velocidad de lectura de la línea fuese suficiente para reaccionar adecuadamente y seguir la línea en las curvas. En el diseño del prototipo este problema se buscará solventar con la implementación de un sensor de línea con salida analógica, de forma que se obtenga un tiempo de lectura constante e inferior, sin influencia de la luminosidad ambiente.

La alimentación de la placa también ha sido un problema. Debido al alto consumo de los motores, que en caso de ser alimentados con un porta-pilas la duración era inferior a una hora. Debido a esto se han realizado las pruebas con un adaptador de corriente de $7.5V$ y $1A$ para alimentar el puente completo L298N y de su rectificador obtener $5V$ con los que alimentar a la *TivaC™*.

A pesar de estos problemas, se ha conseguido realizar un seguimiento de línea, con una detección de obstáculos fiable, siendo la parte más difícil toda la relacionada con giros bruscos debido a la lenta lectura de la línea, en las figuras 2.19 y 2.20 se pueden observar capturas de algunos vídeos, con pérdida de la línea, seguimiento de la curva y cambio de carril. Los resultados de dichas pruebas se pueden observar de forma independiente en los vídeos presentes en los siguientes enlaces:

- Seguimiento de una curva cerrada
- Parada con obstáculo
- Cambio de carril de derecha a izquierda
- Cambio de carril de izquierda derecha

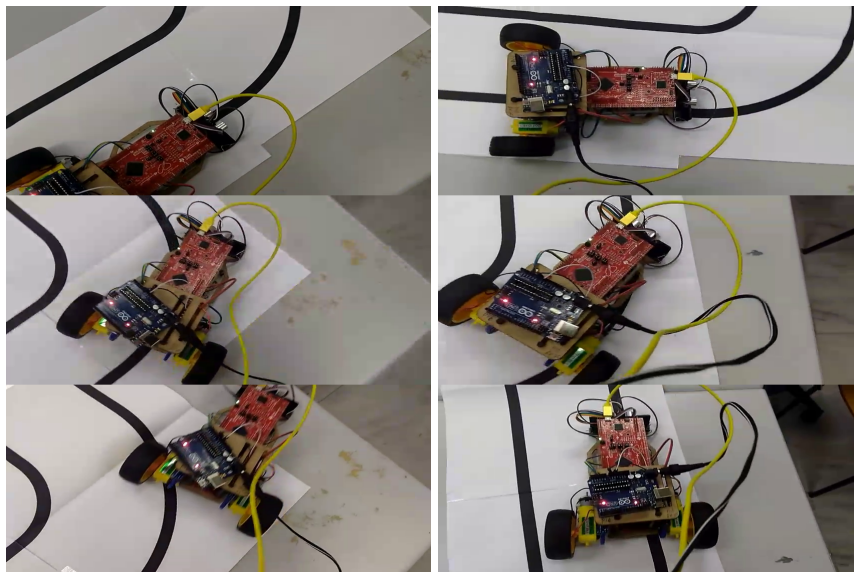


Figura 2.19 Capturas de los experimentos de seguimiento de la curva.

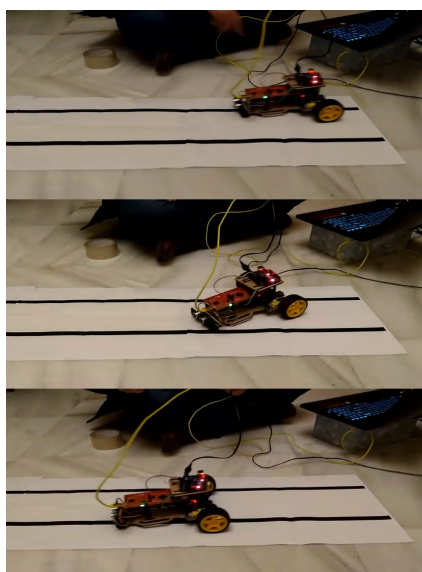


Figura 2.20 Capturas de la prueba de cambio de carril.

2.4 Segundo diseño

En este segundo diseño se van a implementar las restricciones dimensionales explicadas en el apartado 2.1, con el objetivo de comprimir las dimensiones del robot y aumentar la versatilidad de esta plataforma, permitiendo intercambiar en la estructura distintos actuadores y sensores a los utilizados en la prueba de conceptos y presentes en el apartado 2.3.1.

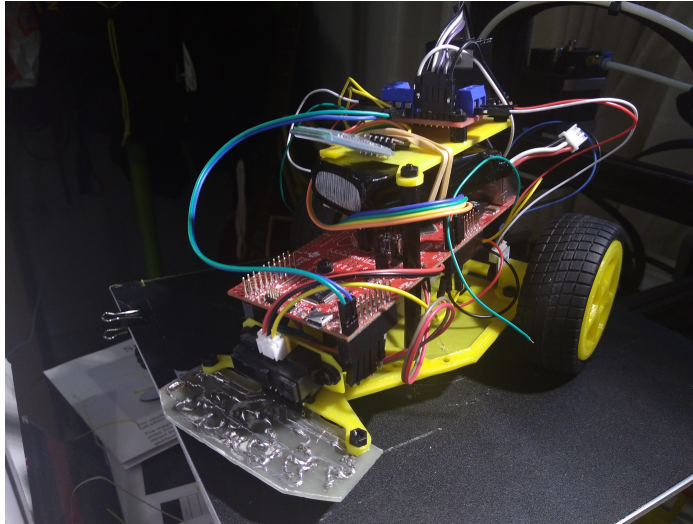


Figura 2.21 Segundo diseño montado con motores N20.

2.4.1 Componentes

A continuación se comentarán las modificaciones a la lista de componentes respecto al diseño anterior.

Alimentación

Para la alimentación de este segundo diseño se ha utilizado una batería LiPo (polímero de litio) de dos celdas, tensión nominal de 7.4V, máxima de 8.4V y 10800mAh. Para su carga se está utilizando un cargador balanceado B6 como el de la figura 2.22.



Figura 2.22 Batería LiPo y cargador balanceado.

La ventaja de este sistema para la alimentación del robot es su alta densidad energética, durante horas de funcionamiento el robot. También la cantidad de corriente entregada por la batería es muy superior, manteniendo una salida más constante que las pilas AA utilizadas en el primer diseño, apartado 2.3.1.

Sensor de línea

El sensor de línea que se ha elegido para esta segunda versión es el *TCRT5000* de *Vishay*, se puede observar en la figura 2.23. Este sensor se ha elegido por ser bastante común y utilizado en pequeñas placas de electrónica de muy bajo coste. El sensor consiste en un LED infrarrojo y un foto-transistor acoplados a través de una superficie. Este tipo de sensor se analiza en [8], donde se expone también un modelo para la simulación de un sensor de características similares. Al contrario que en el sensor del primer diseño, este se va a implementar de forma que la salida sea un valor analógico y no necesite ningún tipo de temporización.



Figura 2.23 TCRT5000L.

Debido a que sólo se tenía acceso al sensor y no a un montaje de ellos en una placa con el circuito de polarización, se procedió a diseñar una en la que el foto-transistor estuviese funcionando como un amplificador en emisor común. El circuito se ha diseñado utilizando *KiCAD*, explicado en el apartado 2.2.2. Primero se realizó una prueba en una placa preperforada para probar distintas resistencias, figura 2.24.

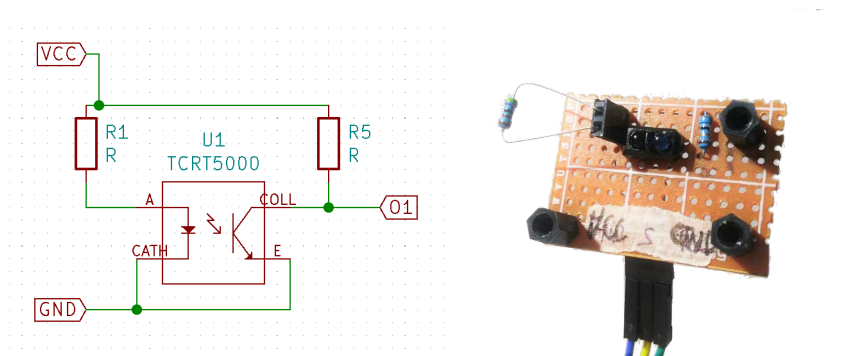


Figura 2.24 Prueba TCRT5000 y esquema del circuito.

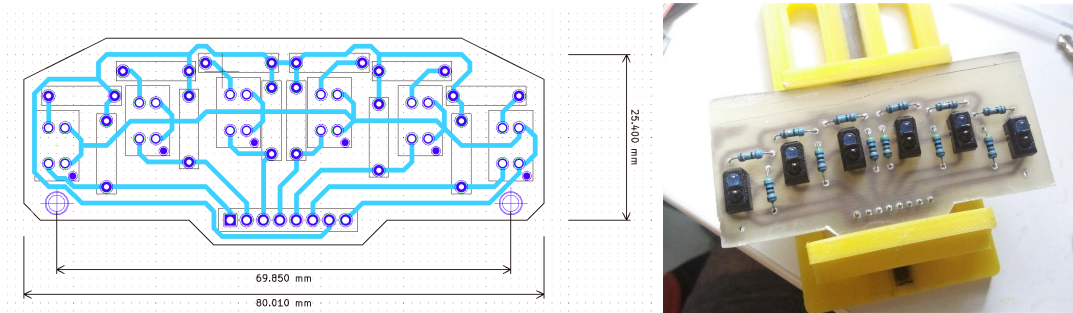
La resistencia que se escogió para el LED era de 82Ω debido a que la corriente deseada para este era de $20mA$ a $2V$, teniendo en cuenta la tensión del LED y una alimentación de $3.3V$. Para la salida se utilizó una resistencia de $3.3K\Omega$ la cual daba un buen rango de salida, siendo los valores de tensión $0.1V$ reflejando una superficie blanca y $2.2V$ una superficie negra a $2mm$ de separación. Los valores medidos sobre una superficie negra con el convertidor analógico digital de la placa y las resistencias probadas se pueden observar en la tabla 2.1. Experimentalmente al fabricar placa de sensores donde estos se encontraban en paralelo, los valores medidos oscilan entre los 200 y 3900.

Con los valores de las resistencias definidos se procedió al diseño de el circuito impreso y a su fabricación. Se realizó un circuito en el que hubiese 6 circuitos idénticos al anterior en paralelo,

Tabla 2.1 Resistencias y valores de tensión experimentales.

| Resistencia[Ω] | Valor mínimo ADC | Valor máximo ADV |
|-------------------------|------------------|------------------|
| 2.2K | 4031 | 4074 |
| 3.3K | 4000 | 4060 |
| 4.7K | 3971 | 4049 |

quedando el enrutado como se puede observar en la figura 2.25. Debido a la situación actual, la pandemia COVID-19, la fabricación de la placa se ha realizado utilizando medios caseros, transfiriendo una impresión de una impresora de laser sobre papel brillo con las pistas del circuito impreso a una placa virgen de cobre de una cara, siendo transferidas mediante la utilización de una plancha de la ropa. Posteriormente se corroe el cobre no protegido con una mezcla de agua oxigenada y ácido clorhídrico (sulfuman). Tras esto se soldaron los componentes quedando la placa lista para ser probada e instalada en el robot.

**Figura 2.25** Diseño y PCB soldada.

Sensor de distancia

Este segundo sensor de distancia que se va a utilizar es el *SHARP GP2Y0A21YK*, figura 2.26. Este sensor se basa en un sistema de medición infrarrojo el cual mediante una salida analógica te da un valor de tensión inversamente proporcional a la distancia.

**Figura 2.26** SHARP GP2Y0A21YK.

Para la lectura de estos sensores, al ser analógica su tiempo de lectura es ínfimo comparado con el del ultrasonido y aproximadamente constante. Pero al ser una señal procesada los tiempos de lectura que indica el datasheet son de $38.3ms \pm 9.6ms$, por lo que el tiempo de muestreo de la distancia debería de estar en el orden de $38ms$, en vez de tener la posibilidad de que fuese continuo.

Para obtener la medida de la distancia en función de la salida se ha aproximado una línea en función de la información presente en el datasheet, concretamente en las gráficas que se pueden observar en la figura 2.27. el proceso que se ha seguido para linealizar la grafica de la derecha, entre un rango que nos vaya a ser de utilidad. El rango que se ha decidido es el comprendido entre 7 y 60 centímetros, teniendo valores de salida de 3 y 0.5V respectivamente. quedando la formula de la siguiente forma:

$$d = \frac{(3 - 0.5) * 2^{12} / 5}{ADC \frac{60-7}{60*7} - C} \quad (2.2)$$

Averiguamos la constante valorando la ecuación en $d = 60$ y $ADC = 0.5 * 2^{12}$ obteniendo que:

$$C = \frac{2.5 * 2^{12}}{d} - ADC * \frac{60 - 7}{60 * 7} = \frac{2.5 * 2^{12}}{60} - 0.5 * 2^{12} * \frac{60 - 7}{60 * 7} = 139 \quad (2.3)$$

Con eso simplificamos y vemos que la ecuación final es:

$$d = \frac{16229}{ADC - 139} \quad (2.4)$$

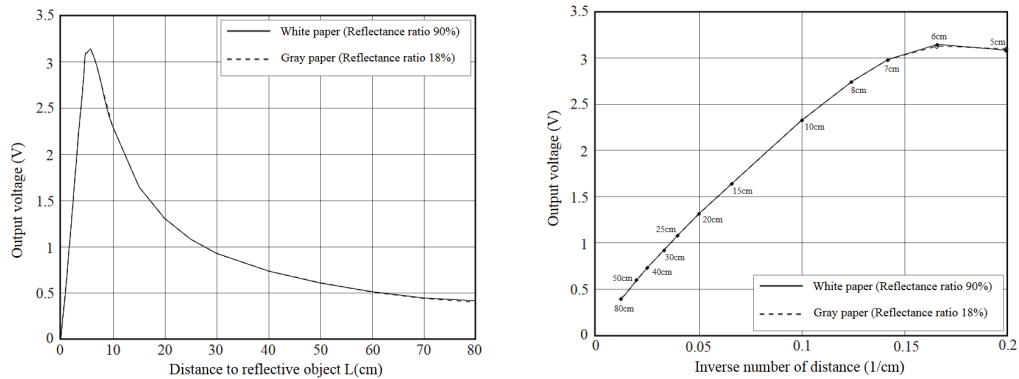


Figura 2.27 salida en funcion de la distancia y su inversa.

Experimentalmente se ha observado un problema con la alimentación. Este problema lo que origina es que para la misma distancia y material en el que se está reflejando la luz del diodo el valor de salida es distinto. Esto se puede observar al cambiar la alimentación entre el regulador interno del L298N y el puerto USB de depuración. Esto se analizará con más profundidad en el apartado de experimentos, para solucionar levemente este problema se ajustan los valores del numerador y la constante de la ecuación para ajustar la lectura de distancia a valores más cercanos a la realidad.

Encoder magnético

Para los motores TT anteriores se ha añadido un disco magnético y un sensor de efecto Hall el cual se puede instalar en el eje de la rueda con un tornillo o directamente en el eje del motor.

El disco tiene 8 polos magnéticos, generando 4 pulsos por rotación. Esto significa que cada rotación de la rueda genera 192 pulsos, frente a los 12 anteriores. Esto permite un menor tiempo entre los distintos pulsos y una mayor resolución en la lectura de la velocidad.

Motores N20

Se ha realizado este segundo diseño de forma que se pueda intercambiar entre los motores anteriores y este nuevo tipo, *Motores N20*, también conocidos como *Micro Metal Gearmotors*. Este formato es bastante común y existen una gran cantidad de fabricantes como *Pololu* que realizan motores en este formato. Existe un gran abanico de velocidades y reductoras

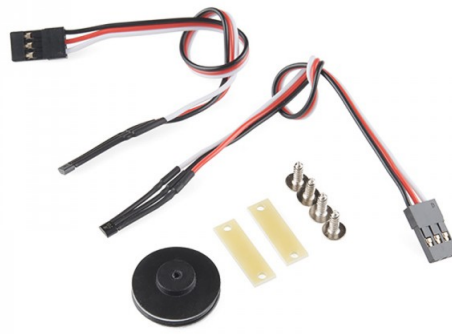
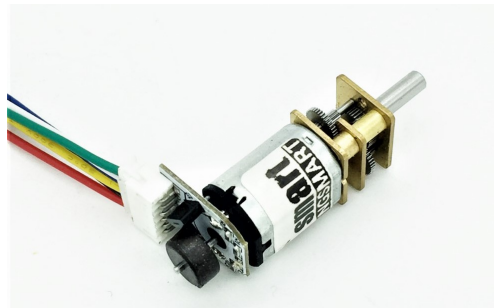


Figura 2.28 Disco magnético y sensor Hall.



| JGA12-N20 | | Parameter | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|-----------|---------|---------|-------------------|---------|--------|-------|--------|---------|--------------|---------|
| Model | Voltage | | No load | | At Max.Efficiency | | | | Stall | | Speedreducer | |
| | Using | Rated | Speed | Current | Speed | Current | Torque | Power | Torque | Current | Redctio | (L)Size |
| | Range | V | r/min | ma | r/min | ma | kg.cm | W | kg.cm | A | Ratio | mm |
| JGA12-N20-10 | 3-12V | 6V | 1500 | 40 | 1050 | 160 | 0.027 | 0.35 | 0.135 | 0.55 | 10 | 9 |
| JGA12-N20-30 | 3-12V | 6V | 500 | 40 | 375 | 160 | 0.081 | 0.35 | 0.4 | 0.55 | 30 | 9 |
| JGA12-N20-50 | 3-12V | 6V | 300 | 40 | 225 | 155 | 0.14 | 0.35 | 0.7 | 0.55 | 50 | 9 |
| JGA12-N20-100 | 3-12V | 6V | 150 | 40 | 120 | 155 | 0.35 | 0.35 | 1.75 | 0.55 | 100 | 9 |
| JGA12-N20-150 | 3-12V | 6V | 100 | 40 | 80 | 150 | 0.55 | 0.35 | 2.75 | 0.55 | 150 | 9 |
| JGA12-N20-210 | 3-12V | 6V | 71 | 40 | 56 | 140 | 0.8 | 0.35 | 4 | 0.55 | 210 | 9 |
| JGA12-N20-298 | 3-12V | 6V | 50 | 40 | 40 | 140 | 1.1 | 0.35 | 5.5 | 0.55 | 298 | 9 |
| JGA12-N20-380 | 3-12V | 6V | 39 | 40 | 32 | 130 | 1.5 | 0.35 | 7.5 | 0.55 | 380 | 9 |

Figura 2.29 Motor N20 con tabla de reductoras.

Los motores que se han obtenido son de la marca *Bring smart* de los cuales se pueden ver en la figura 2.29 la tabla con las distintas reductoras disponibles. Estos motores vienen con un encoder de cuadratura en el eje del motor. Este encoder de cuadratura genera 7 pulsos por cada rotación del motor.

Se han escogido dos reductoras muy distintas con las que se realizarán pruebas, una de 10:1 y otra de 100:1, generando 68 y 1050 pulsaciones respectivamente por cada vuelta el de la rueda. Para motores con tan poca reducción como el 10:1, debido a la falta de par sería conveniente escoger ruedas de un diámetro menor a las ruedas utilizadas en los motores TT que se mostraron en la el apartado 2.3.1. Pero por disponibilidad se han utilizado estos neumáticos, diseñando una llanta compatible con el eje de estos motores. Experimentalmente se ha verificado el verdadero valor de

las reductoras, siendo la reductora de 10:1 realmente de 6.5:1 y la de 100:1 siendo 68:1, de igual forma se hará referencia a ellas según la reducción con la que venían anunciadas, siendo posible que en este documento también se haga referencia al mismo motor con el valor de la reductora real.

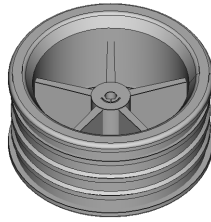


Figura 2.30 Llanta para neumático de 65x25, eje de motor N20.

Bluetooth

Se ha añadido un módulo bluetooth para la transferencia de telemetría. El módulo elegido es el *HC-05*, módulo muy popular y sencillo de usar. Para su configuración es necesario conectarse mediante un puerto serie y ejecutarlo en modo AT, el cual mandando unos sencillos comandos permite cambiar el nombre del dispositivo, velocidad de la comunicación serie, bits de parada, bits de paridad, etc.

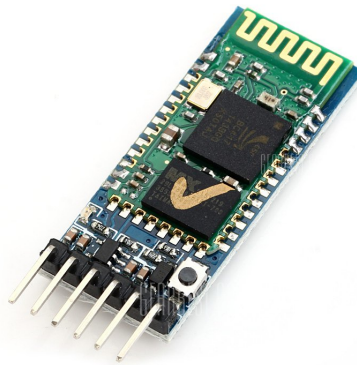


Figura 2.31 Módulo HC-05.

2.4.2 Conexión

El conexionado de este segundo diseño se puede observar en la figura 2.32. En este esquema se observa la adición del módulo bluetooth y el cambio de los sensores de línea y distancia a los puertos analógicos de la *TivaC™*. También añadir que en el esquema no se observan la alimentación de los encoders de los motores, la cual se realiza a 5V. También entre el terminal de 5V y la referencia se ha incluido un condensador de $100\mu F$.

2.4.3 Estructura

A continuación se mostrará el diseño de la estructura y que elementos se han tenido en cuenta a la hora de diseñarla. Como objetivos principales este diseño tiene reducir el tamaño del robot desde las dimensiones del primer diseño a un tamaño inferior a un A5, 148x210mm, como se indica en la apartado 2.1. También añadir la posibilidad de tener múltiples sensores de distancia y poder elegir entre distintos diseños de motores y encoders.

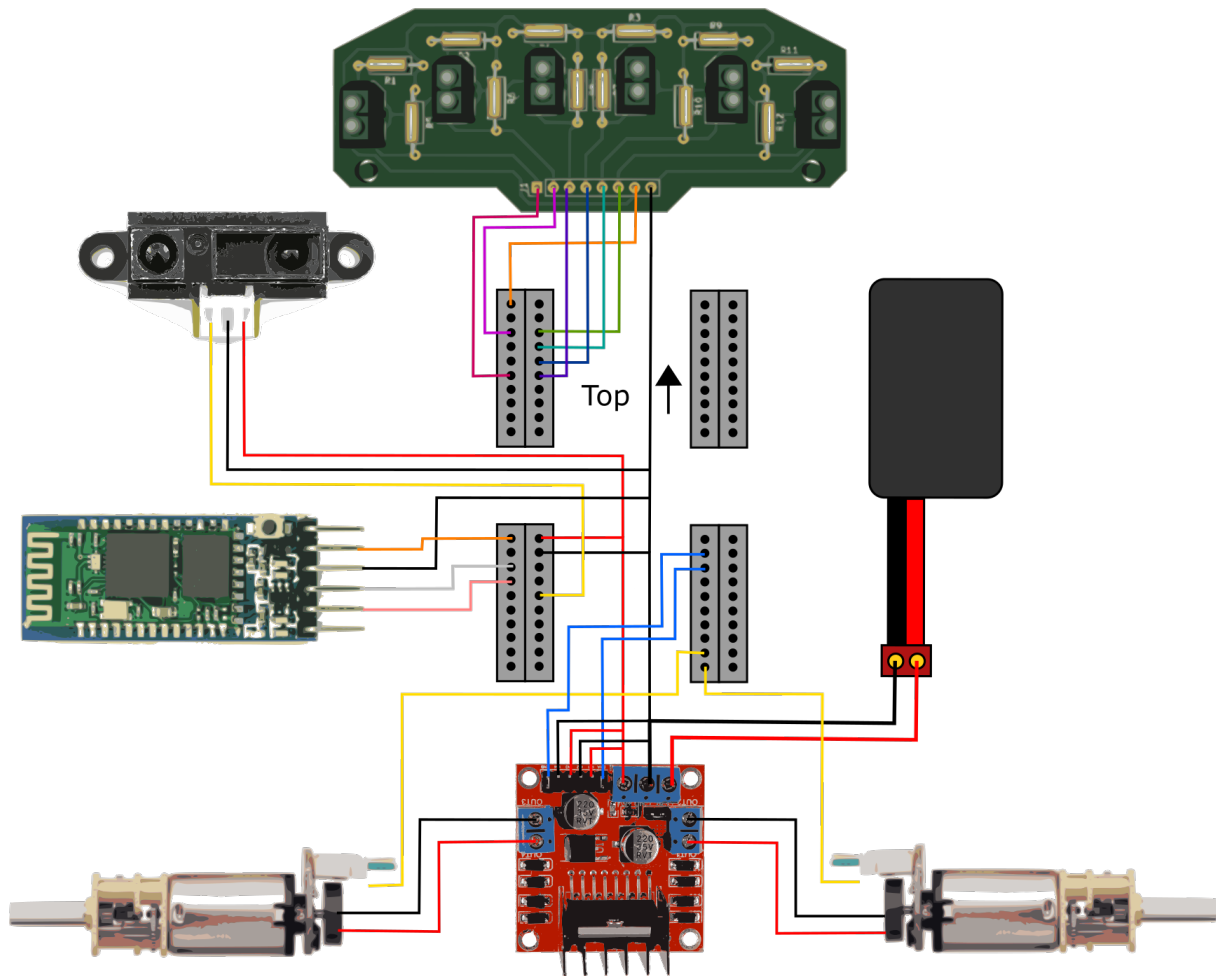


Figura 2.32 Esquema de conexión del segundo diseño con un sólo sensor de distancia..

Modelos 3D

La estructura del prototipo se divide en dos piezas unidas mediante separadores, un chasis inferior y una superior. A estas piezas se les unen los soportes de los distintos componentes. La conexión de estos componentes al chasis inferior, a excepción de la pieza de soporte de los motores TT, se realiza mediante dos tornillos m3 separados 20mm, esto se puede observar en la figura 2.33.

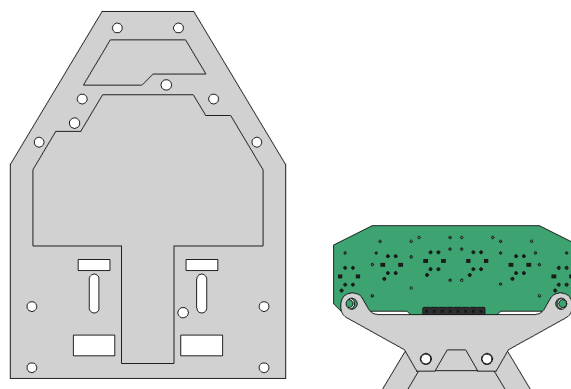


Figura 2.33 Estructura inferior y soporte de línea.

También a parte de los puntos de conexión nombrados anteriormente se pueden observar los

agujeros donde se sujeta la placa controladora y los encajes para los motores TT y su encoder óptico en la figura 2.34. Se ha creado un nuevo disco para el encoder optico con un diámetro menos, para poder colocar el encoder por debajo del chasis.

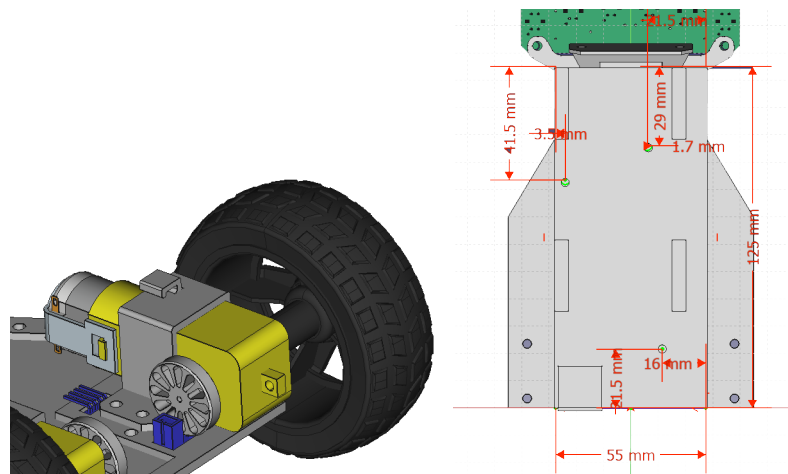


Figura 2.34 Montaje de los motores TT y la TivaC™.

El chasis inferior montado entero con motores N20, tres sensores de presencia y el sensor de línea se muestra en la figura junto al montaje de los motores N20, figura 2.35. Este tipo de motores son los que dejan más espacio libre, haciendo más fácil el montaje del robot al tratarse de un chasis compacto 120x90mm.

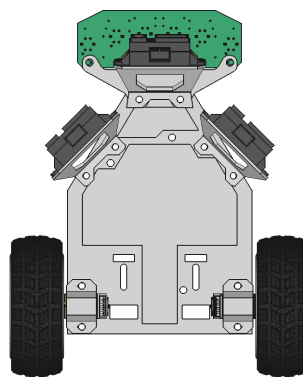


Figura 2.35 Chasis inferior con todos los periféricos..

En el chasis superior se sujeta con dos separadores los cuales sujetan también la *TivaC™*. En esta pieza se atornillan el puente completo que maneja los motores y se sujeta el módulo bluetooth. Este montaje se puede observar en la figura 2.36.

La estructura completa se puede observar en la figura 2.37, también se muestra la diferencia de altura en el chasis entre los dos motores. Para solucionar esto y ajustar más el robot al suelo sería necesario utilizar unas ruedas distintas con los motores N20, que levantan más la parte trasera de la estructura. Finalmente con las ruedas montadas el robot completo llega a tener unas dimensiones de 175x145mm, quedando dentro de la superficie de un A5.

Impresión y montaje

Para la fabricación de las piezas se ha utilizado una impresora 3D, modelo *Ender 3*, figura 2.38.

El material utilizado para la fabricación de las piezas impresas en 3D ha sido *PLA igneo amarillo* de *Leon3D*. Las piezas se han impreso con los siguientes parámetros: temperaturas de 210C en el

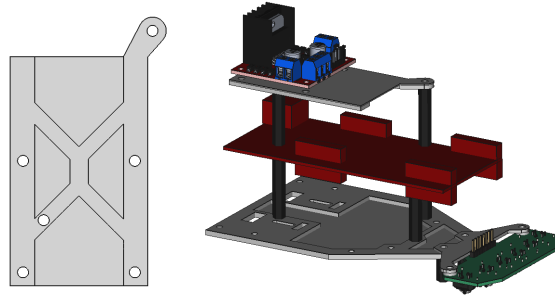


Figura 2.36 Chasis superior y montaje del chasis superior e inferior.

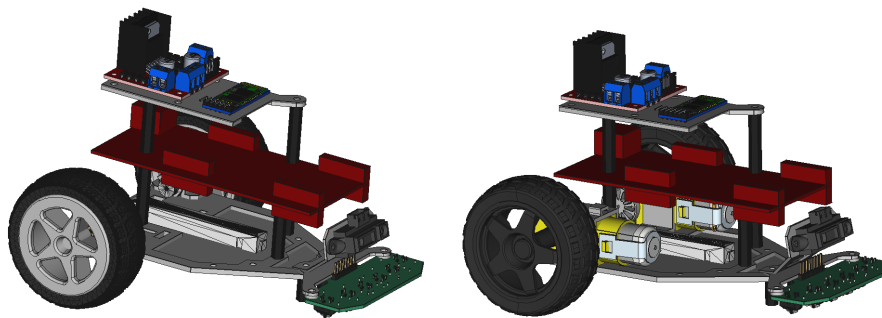


Figura 2.37 Comparación del montaje con los dos tipos de motores.



Figura 2.38 Impresora Ender 3.

extrusor y 60C en la cama, altura de capa 0.28mm, relleno a 10% y 4 capas en los laterales, capas inferiores y superiores. Esto nos da lugar a unas piezas bastante ligeras, pesando el robot completo con los componentes y sin batería 250g. Los tiempos que tardan las piezas son los siguientes, de

acuerdo a la estimación de Cura:

Tabla 2.2 Tiempos de impresión.

| Pieza | Duración de la impresión |
|--------------------------|---------------------------------|
| Chasis inferior | 1h 44min |
| Chasis superior | 41min |
| Soporte Línea | 12min |
| Soporte frontal SHARP | 20min |
| Soporte lateral SHARP x2 | 21min |
| Soporte N20 x2 | 20min |
| Llanta N20 x2 | 4h 2min |
| Soporte TT x2 | 40min |
| Disco Encoder 12 x2 | 24min |

Para el ensamblaje de la estructura se han utilizado tornillos y separadores de de nailon con rosca M3. Debido a que de la función de lectura de la línea tarda tanto o más que el flag que la ejecuta, este flag se desactiva en caso de haberse activado durante la ejecución, aumentando los tiempos de lectura entre sí a 200ms, pero dando posibilidad de ejecutar el resto de rutinas.

3 Pruebas de componentes

En este capítulo se explicarán las pruebas realizadas con los componentes anteriormente expuestos, analizando los resultados obtenidos con la finalidad de poner entender con mayor coherencia la implementación posterior que se realizará de estos en el robot como conjunto.

Primero se analizarán los sensores de pista, basados en la reflectancia de esta, pero realizando la medida de dos formas distintas. Posteriormente los sensores de distancia, uno basado en ultrasonidos, y el otro en un láser infrarrojo. Y finalmente comparando los dos formatos distintos de motores y sus codificadores.

3.1 Sensores de línea

A continuación se mostrará una comparativa entre los dos sensores de líneas de los que se ha hablado con anterioridad, explorando sus diferentes formas de indicar la reflectancia de la superficie.

El QRT-8RC cuya medida de la reflectancia se basa en el tiempo de descarga de un condensador, menor tiempo mayor reflectancia. Y el TCRT-5000 con un divisor resistivo cuya tensión de salida es inversamente proporcional a la reflectancia de la superficie.

3.1.1 QRT-8RC

La programación en el primer prototipo se realizó configurando las entradas de los pines como una entrada de alta impedancia con una leve resistencia *pull-up*, con esta configuración el tiempo de lectura de este sensor es del orden de 100ms sobre una superficie negra, de forma que se consideró que los 6 primeros sensores en caer estaban midiendo blanco y los otros dos estaban sobre la línea negra. Con esto se realizaba una medición binaria, la cual simplifica la realización de un control para seguir la línea. Para mejorar el desempeño se ha modificado la configuración de estos pines a alta intensidad, reduciendo de esta forma los tiempos de lectura a unos 20ms. Se han realizado pruebas a dos distancias distintas, para observar la diferencia de los valores entre ambas y el tiempo de ejecución. El tiempo que aparece en los siguientes datos son décimas de milisegundo. Cada 20ms se ejecuta la lectura y posteriormente la escritura de los datos, por lo que para saber los tiempos de lectura, se utilizará el módulo de 200 del valor escrito por terminal.

Primero se realizará la lectura binaria, midiendo exclusivamente los primeros seis sensores en bajar de nivel, a una distancia de 3mm de la superficie, asignándoles un 1 y un 0 a los dos últimos. Posteriormente se realizarán las mediciones de tiempo de bajada del sensor a 3mm y a 8mm de la superficie. En la figura 3.1 se puede ver como se ha realizado el experimento y la separación de 3mm, se han colocado dos arandelas, que en total miden 2.4mm para tener una referencia del espacio entre el sensor y la superficie.

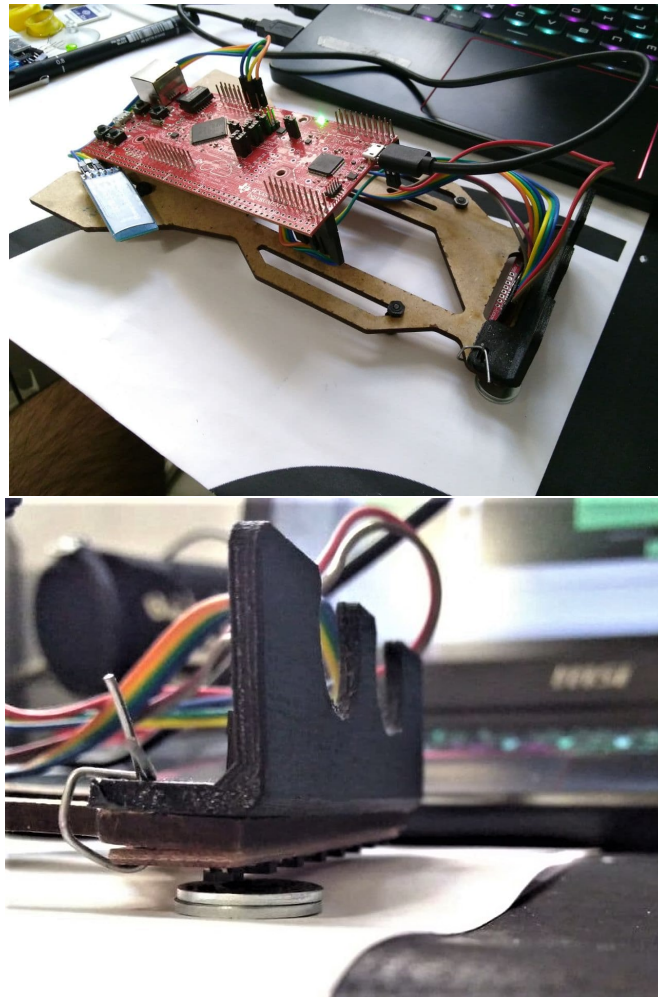


Figura 3.1 Prueba de los sensores de líneas y separación de 3mm.

Medida con los 6 primeros valores

Blanco

| | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 8201, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 8401, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 8601, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 8801, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 9001, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 9201, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 9401, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |

Negro

| | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 95626, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0, | 1, | 1, | 0 |
| 95827, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0, | 1, | 1, | 0 |
| 96027, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 96227, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0, | 1, | 1, | 0 |
| 96427, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 96625, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |
| 96827, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 0 |

Los resultados de la lectura del sensor midiendo todo blanco o todo negro no son constantes, debido a que todos los sensores se encuentran ante una superficie relativamente homogénea, esto podría generar confusión al encontrarse con una línea desgastada o un segmento que faltase de esta. La mayor diferencia que existe son los tiempo de lectura, siendo el tiempo de lectura de la superficie blanca de 0.1ms y la de la superficie negra de 2.7ms.

Línea negra

| | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 31602, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 31802, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 32002, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 32202, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 32402, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 32602, | 1, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1 |
| 32802, | 1, | 1, | 1, | 0, | 0, | 1, | 1, | 1 |

Los resultados al leer la línea son muy constantes, con un tiempo de lectura de 0.2ms, levemente superior al tiempo de lectura de la superficie blanca y muy alejado de los tiempos de lectura de la superficie negra. Esto verifica el funcionamiento del sensor e indica que en caso de ser una línea blanca sobre un fondo oscuro, los tiempos de lectura serían cercanos a los 2.7ms de la superficie negra.

Sensores a 3mm

Al encontrarse el sensor de medida a 3mm los tiempos de lectura serán más cortos que los que observaremos cuando el sensor se encuentre a una distancia de 8mm. Los valores asignados a cada sensor son el número de ciclos que han pasado desde que los pines se configuran como entradas digitales, hasta que es detectado que se encuentra a nivel bajo.

Blanco

| | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 21400, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |
| 21600, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |
| 21800, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |
| 22000, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |
| 22200, | 4054, | 4205, | 4356, | 4507, | 4658, | 3648, | 5266, | 4956 |
| 22400, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |
| 22600, | 3043, | 4140, | 4291, | 4442, | 4593, | 3678, | 5374, | 3950 |

Negro

| | | | | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 55812, | 109993, | 113308, | 128045, | 126541, | 129866, | 106043, | 142472, | 116051 |
| 56012, | 109993, | 113308, | 128047, | 127043, | 129467, | 106043, | 142978, | 115357 |
| 56212, | 109996, | 113311, | 128047, | 126543, | 129868, | 106046, | 142473, | 116054 |
| 56412, | 109996, | 113311, | 128692, | 127138, | 129671, | 106046, | 142576, | 116054 |
| 56612, | 109993, | 113308, | 127452, | 126448, | 129278, | 106043, | 142185, | 115357 |
| 56812, | 109992, | 113307, | 128043, | 126539, | 129463, | 106042, | 142672, | 116050 |
| 57012, | 109996, | 113311, | 128692, | 127138, | 129671, | 106046, | 142576, | 116054 |

Se puede observar la amplia diferencia de valores entre la superficie blanca y la superficie negra, lo cual da un amplio rango para poder realizar una linealización con valores máximos y mínimos y aproximar que nivel de gris tenemos bajo el sensor. Asumiendo que el cambio en la escala de grises generase un cambio lineal en el valor del tiempo, el tiempo de medida oscila desde tiempos menores a una décima de milisegundo, cuando se encuentra sobre una superficie completamente blanca,

hasta a 1.2ms, que tarda en leerse los valores del sensor cuando la superficie es completamente negra.

Línea Negra

```
90607, 3043, 3194, 4164, 9508, 81819, 3708, 5210, 4704
90807, 3043, 3194, 4164, 9508, 81819, 3708, 5210, 4704
91007, 3043, 3194, 4164, 9508, 81810, 3708, 5210, 4704
91207, 3043, 3194, 4164, 9507, 81818, 3708, 5210, 4704
91407, 3043, 3194, 4164, 9507, 81818, 3708, 5210, 4704
91607, 3043, 3194, 4164, 9508, 81517, 3708, 5210, 4704
91807, 3043, 3194, 4164, 9508, 81810, 3708, 5210, 4704
```

En la lectura de la línea se puede observar como hay una diferencia notable entre los valores que se encuentran sobre la línea frente a los que se encuentran sobre blanco. El tiempo de medida en este caso se encuentra en torno a los 0.7ms.

Sensores a 8mm

Al alejarse el sensor considerablemente de la superficie veremos un incremento tanto en los valores de medida como en el tiempo de lectura del sensor.

Blanco

```
17202, 18394, 15981, 16132, 16283, 17658, 15454, 17178, 24818
17402, 18402, 15989, 16140, 16291, 17666, 15462, 17186, 24827
17602, 18402, 15989, 16140, 16291, 17666, 15462, 17186, 24523
17802, 18404, 15991, 16142, 16293, 17668, 15464, 17188, 24834
18002, 18501, 15991, 16142, 16293, 17638, 15464, 17815, 24922
18202, 18501, 15991, 16142, 16293, 17638, 15464, 17815, 24922
18402, 18003, 15991, 16142, 16293, 17668, 15464, 17188, 24729
```

Negro

```
53633, 332132, 306474, 318070, 307537, 333566, 279284, 313445, 399350
53833, 332352, 306664, 316275, 307727, 333786, 281246, 312249, 399876
54033, 331895, 306664, 316874, 307727, 334180, 281246, 312249, 399361
54233, 332618, 307550, 317058, 308655, 334455, 281246, 312433, 398723
54433, 332326, 307550, 317754, 308655, 334566, 281246, 313129, 401576
54633, 331173, 306749, 317147, 307812, 334267, 282213, 313720, 402497
54834, 338763, 313015, 322801, 310759, 338027, 284213, 316940, 407118
```

Comparando los resultados obtenidos en el experimento anterior, con los obtenidos en este, se puede observar como el tiempo de lectura ha aumentado considerablemente, siendo ahora en esta nueva configuración un tiempo contenido entre 0.2 y 3.4 ms. Esto se puede observar en como el rango de valores entre blanco y negro ha aumentado considerablemente, aumentando también el ruido en la medida en los dígitos menos significativos. Cabe destacar que en el momento en el que el sensor se despegaba del suelo o se salía de la mesa en la que se han probado apuntando al suelo, los tiempos de lectura aumentaban hasta ser superiores a 20 milisegundos, esto indica que en caso de utilizarse sería conveniente programar un tiempo máximo de lectura, aplicando un valor por defecto a los sensores que no hayan medido en caso de llegarse a tal situación.

Línea negra

| |
|---|
| 97606, 18481, 16962, 30203, 68289, 25530, 16435, 17502, 25074 |
| 97806, 18480, 16961, 30202, 68288, 25529, 16434, 17501, 25073 |
| 98006, 18480, 16961, 30202, 67939, 25529, 16434, 17501, 25073 |
| 98206, 18480, 16961, 30202, 68288, 25529, 16434, 17501, 25073 |
| 98406, 18491, 16972, 30222, 68306, 25549, 16445, 17512, 25093 |
| 98606, 18481, 16962, 30203, 68289, 25530, 16435, 17502, 25074 |
| 98806, 18491, 16972, 30222, 68306, 25549, 16445, 17512, 25093 |

Al realizar la medida de la línea, al haberse alejado más de esta, el gradiente entre la línea negra y el fondo blanco no es tan drástico como en el anterior, a pesar de ello, sigue siendo notable la diferencia entre los valores.

3.1.2 TCRT5000L

Primero se observará la medida directa del ADC. De esta forma se puede ver como cada sensor obtiene valores distintos, esto se debe a errores de fabricación tanto en la PCB donde se han montado como en las tolerancias de los propios sensores. Como se puede observar en los siguientes experimentos, durante el montaje de la placa, uno de los sensores se ha estropeado, quedando siempre en un nivel de tensión bajo.

Blanco

| |
|--------------------------------------|
| 195570, 683, 647, 647, 663, 586, 522 |
| 195780, 651, 621, 613, 625, 579, 478 |
| 195990, 621, 591, 590, 602, 578, 448 |
| 196200, 606, 577, 565, 583, 575, 440 |
| 196410, 600, 568, 557, 576, 573, 424 |
| 196620, 600, 570, 566, 569, 573, 427 |
| 196830, 602, 574, 561, 573, 574, 430 |

Negro

| |
|---|
| 100230, 3064, 2151, 2027, 2360, 1992, 448 |
| 100440, 3061, 2151, 2031, 2363, 1990, 445 |
| 100650, 3052, 2141, 2018, 2355, 1986, 436 |
| 100860, 3053, 2145, 2024, 2363, 1979, 437 |
| 101070, 3045, 2141, 2011, 2354, 1966, 432 |
| 101280, 3055, 2149, 2018, 2358, 1964, 429 |
| 101490, 3143, 2275, 2154, 2484, 2022, 583 |

Línea negra

| |
|---------------------------------------|
| 249540, 614, 581, 2053, 597, 586, 456 |
| 249750, 634, 606, 2048, 612, 583, 468 |
| 249960, 628, 597, 2036, 608, 578, 458 |
| 250170, 613, 668, 2149, 681, 608, 538 |
| 250380, 774, 743, 2234, 757, 737, 614 |
| 250590, 717, 689, 2127, 702, 674, 541 |
| 250800, 698, 670, 1889, 681, 655, 530 |

Debido a las diferencias que puede haber entre los sensores se realiza una adaptación del rango. Para esto se ha implementado una rutina de calibración, en la que se miden veinte veces la salida de

los sensores sobre una superficie blanca y sobre una superficie negra. Con estos se valores hace una media se ajusta el valor medido de la salida suponiendo que el valor medio sobre blanco es 0, y el valor medio sobre negro es 100 siguiendo la siguiente forma:

$$Valor_{Linea} = \frac{Valor_{ADC} - Valor_{min}}{Valor_{max} - Valor_{min}} * 100 \quad (3.1)$$

Siguiendo este método explicado se obtienen los siguientes resultados al colocar el robot sobre un papel blanco, uno negro y sobre la línea. En los resultados de la línea, se puede observar como se puede observar los valores se normalizan entre 0 y 100 incluyendo el sensor de la derecha, el cual midiendo directamente la salida del ADC funcionaba en otro rango de valores completamente distintos.

Blanco

| | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|---|
| 101340, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 101550, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 101760, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 101970, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 102180, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 102390, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 102600, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |

Negro

| | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|---|
| 65430, | 104, | 110, | 110, | 108, | 118, | 0 |
| 65640, | 100, | 103, | 104, | 103, | 108, | 0 |
| 65850, | 101, | 103, | 104, | 103, | 108, | 0 |
| 66060, | 100, | 102, | 102, | 102, | 106, | 0 |
| 66270, | 101, | 102, | 103, | 103, | 107, | 0 |
| 66480, | 99, | 99, | 99, | 100, | 100, | 0 |
| 66690, | 100, | 102, | 102, | 102, | 105, | 0 |

Para la lectura de la línea podemos ver como cuando la línea se encuentra entre los dos sensores de la izquierda, esta se detecta parcialmente, siendo detectado exclusivamente en uno de ellos. Esto se debe a la distancia de los sensores a la línea y la distancia entre los sensores que es de 15mm, el mismo ancho que la línea. En caso de encontrarse los sensores más cercanos a la línea esta se detectaría de forma parcial en ambos y lo mismo pasaría si la línea fuese más gruesa.

Línea negra

| | | | | | | |
|---------|----|----|-----|----|----|---|
| 116460, | 0, | 0, | 86, | 0, | 0, | 0 |
| 116670, | 0, | 0, | 87, | 0, | 0, | 0 |
| 116880, | 0, | 0, | 86, | 0, | 0, | 0 |
| 117090, | 0, | 0, | 85, | 0, | 0, | 0 |
| 117300, | 0, | 0, | 84, | 0, | 0, | 0 |
| 117510, | 0, | 0, | 81, | 0, | 0, | 0 |
| 117720, | 0, | 0, | 79, | 0, | 0, | 0 |

Para realizar una diferenciación booleana entre blanco y negro, se pone un valor mínimo en la medida normalizada, de forma que los valores superiores a 10 se considerarán negro y los inferiores blanco. Estos valores dependiendo de la superficie y el contraste entre la línea y el fondo podrían ser necesarios cambiarse, debido a que puede ocasionar fluctuaciones esporádicas en algunos valores,

como es el caso del sensor derecho. Requiere de una calibración y prueba manual para ajustar el valor límite a partir del cual se considera que el sensor se encuentra sobre una superficie negra

Blanco

| | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|---|
| 190110, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 190320, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 190530, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 190740, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 1 |
| 190950, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |
| 191160, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 1 |
| 191370, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0, | 0 |

Negro

| | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|---|
| 150840, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 151050, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 151260, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 151470, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 151680, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 151890, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |
| 152100, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1, | 1 |

Línea negra

| | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|---|
| 255210, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 0 |
| 255420, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 0 |
| 255630, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 1 |
| 255840, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 1 |
| 256050, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 0 |
| 256260, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 0 |
| 256470, | 0, | 0, | 1, | 0, | 0, | 0 |

Con ese último método la implementación de un seguimiento de línea negra o blanca es muy fácil de implementarse, siendo reservado el uso de los valores normalizados para cuando fuese necesario la lectura de un gradiente de grises.

3.2 Sensores de distancia

El experimento que se ha realizado para medir la precisión de los sensores de distancia y ajustar la medida obtenida es el siguiente:

- Se acopla el sensor al eje z de una impresora 3D, figura 3.2. Con $z=75\text{mm}$.
- Se manda a la impresora el comando G1 Z250 F5i000, desplazarse a $z=250\text{mm}$ a una velocidad de 5000mm/min .
- Se manda el comando G1 Z75 F5000 para volver a la posición inicial.

Para la obtención de los datos se hace uso de una comunicación serie mediante el módulo bluetooth HC-05. todas las medidas se han tomado cada 50ms y a continuación serán comparadas unas frente a otras.

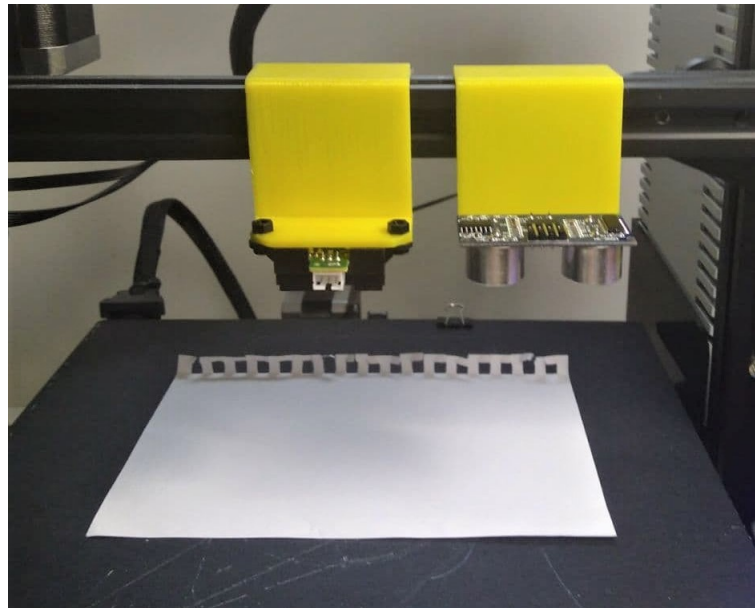


Figura 3.2 Montaje de los sensores de distancia en una impresora 3D.

HC-SR04

La medida del sensor de ultrasonidos se basa en el tiempo de rebote de una onda para obtener la medida de la distancia, por ello el tiempo de medida aumenta proporcionalmente con la distancia a medir. En este experimento no se ha utilizado ningún tiempo máximo de espera, lo cual genera que el tiempo de medida, a pesar de realizarse cada 50ms varíe de forma notable, como se puede observar en la gráfica derecha de la figura 3.3, donde el tiempo máximo ha sido de 20ms, pero en caso de no encontrar ningún obstáculo el tiempo de lectura puede llegar a los cientos de ms, siendo necesario en caso de utilizarse, utilizar un tiempo máximo de lectura y realizar una función no bloqueante, la cual se ejecute al menos un tiempo máximo programado antes de que sea necesario la información de la distancia. A la izquierda se puede observar la distancia medida, la cual se obtiene de la siguiendo la ecuación 3.2, donde "d" es la distancia medida en centímetros, "t" es el tiempo de retorno en milisegundos y "1.2" es la mitad de la velocidad del sonido en centímetros por milisegundo.

$$d(cm) = t(ms) * 1.2(cm/ms) \quad (3.2)$$

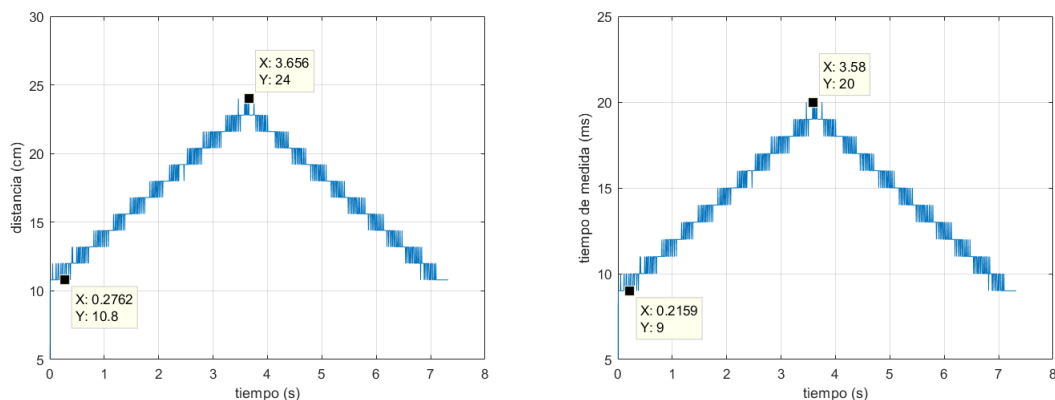


Figura 3.3 Medida de la distancia con el sensor HC-SR04 y tiempo de lectura del sensor.

SHARP

El sensor SHARP al basarse en una señal analógica, su tiempo de lectura es constante, tardando del orden de 0.5ms la medida de la distancia, de forma que no interferiría o bloquearía otras tareas dentro del sistema. Los resultados obtenidos varían en función de si la alimentación de la placa se realiza mediante un puerto USB conectado al ordenador, o mediante el rectificador de 5V presente en la placa del puente H, apartado 2.3.1. En ambos casos se encuentra un condensador de $100\mu F$ entre los terminales positivo y negativo. Para el cálculo de la distancia se puede observar en la ecuación 2.4 en el apartado 2.4.1. Los valores de salida cambian en ambos métodos de alimentación aumentando la distancia medida de 25 a 27cm en la alimentación por batería. Junto a este cambio también se observa un cambio en el ruido de la medida, este ruido no parece que afecte en gran manera para el uso que va a recibir el sensor, que es un indicador de presencia, no una medida de distancia. La hipótesis del origen de este ruido a la que se ha llegado, es que el rectificador de 5V presente en el puente H produce una tensión con un rizado mayor que la tensión de alimentación obtenida a través del puerto USB del ordenador.

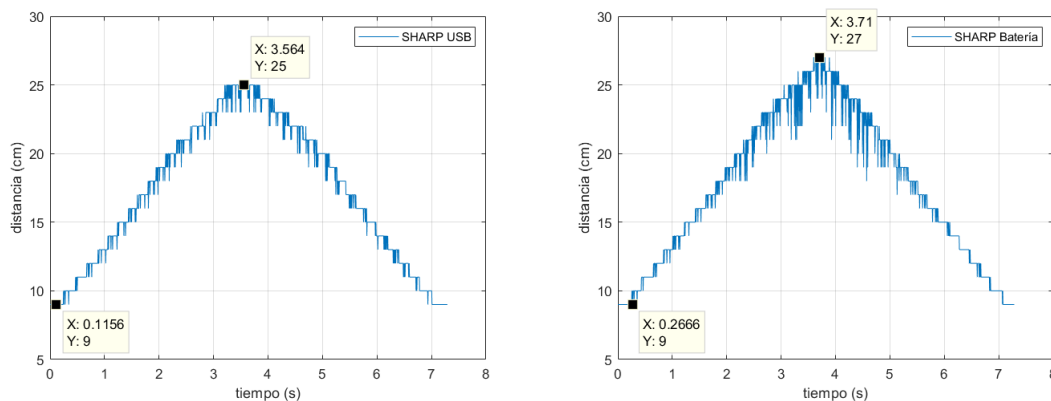


Figura 3.4 Medida de la distancia con el sensor SHARP.

Comparación

En la figura 3.5 se pueden observar los resultados de los distintos sensores de distancia de forma comparativa, el HC-SR04 y el sensor SHARP. Con estos podemos ver como el sensor de distancia SHARP es más exacto que el sensor de ultrasonidos, pues este cuando hay 7cm mide 10.8 y cuando hay 25 mide 24, por el contrario el sensor SHARP mide 9cm en el primer momento y 25 o 27 dependiendo de la alimentación. Respecto a la incertidumbre de la medida, el sensor de ultrasonido tiene muy poca, simplemente oscilando cuando se encuentra entre dos medidas, mientras que el sensor láser tiene una incertidumbre de hasta 5cm cuando es alimentado mediante la batería. En ese caso se observa un aumento considerable del ruido en la medida. Este efecto se ve reforzado al observar el valor de distancia cuando el sensor apunta al aire, en este caso una pared a 3m de distancia. Estos resultados se pueden observar en la figura 3.6. En este caso las oscilaciones son de 20cm cuando se alimenta por USB y de 10cm al alimentarse mediante batería.

Al observar los valores de distancia medidos al aire se puede elegir un valor de distancia límite, bajo el cual se considerará la presencia de un obstáculo. Para el sensor de ultrasonidos cualquier valor por debajo de un metro que se adaptase a nuestras necesidades sería válido, por otro lado en el sensor láser, al alimentarse con una batería se limita el rango a distancias inferiores a 25cm.

Esta distancia medida cuando apunta al aire no indica la distancia máxima medida, pudiendo medirse cuando hay un obstáculo, en el que el láser se refleje, distancia superiores a 40cm.

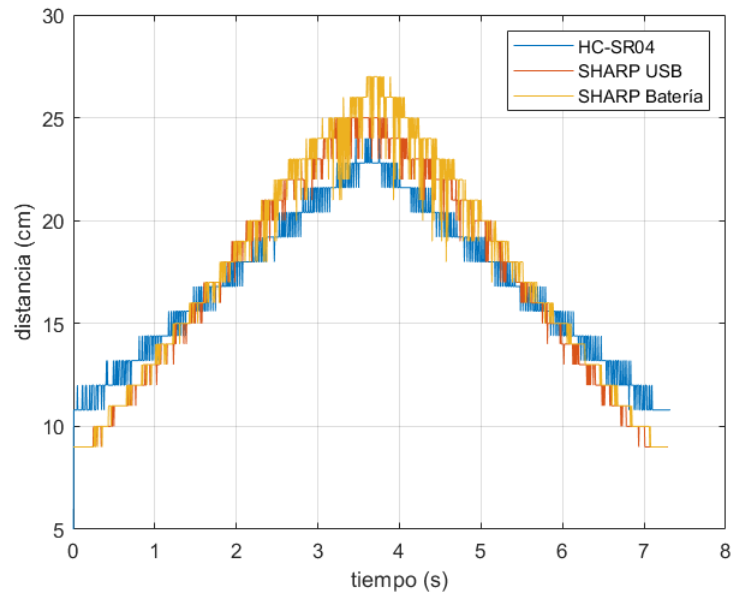


Figura 3.5 Comparación de resultados en el test de distancias.

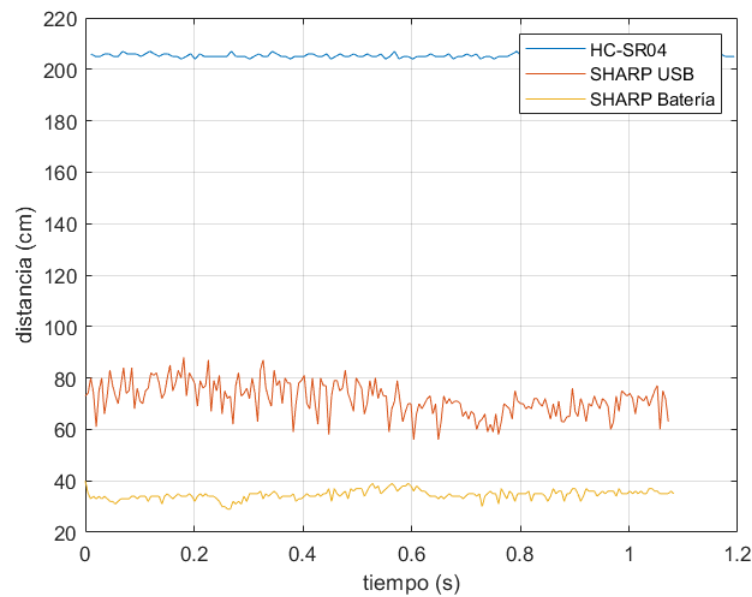


Figura 3.6 Comparación en la medida al aire.

3.3 Prueba de motores en vacío

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos al probar los distintos tipos de motores funcionando sin carga. Con esto se pretende obtener la curva de velocidad frente a tensión de los motores, y con ello conociendo la velocidad máxima en vacío del motor. El experimento realizado consiste en ir cada segundo aumentando en un 10% el valor de ancho de pulso de la alimentación mientras se mide la velocidad con un encoder en vueltas por segundo.

Para ello se ha creado una pieza en la que poder colocar y sujetar de forma ordenada las placas, motores y encoders, pudiendo realizar los experimentos con mayor comodidad y facilidad. Se realizara esta prueba con los motores TT y los motores N20. Los primeros comparando los dos

tipos de encoder distintos, un óptico y otro magnético; y el segundo con dos reductoras distintas, una 100:1 y otra 10:1.

3.3.1 Motores TT

En la figura 3.7, se puede observar el motor TT montado en el soporte para realizar los experimentos del motor, concretamente utilizando el codificador de disco magnético. Este encoder genera 192 pulsos por vuelta, frente a los 12 pulsos por vuelta que genera el encoder óptico. Las características de estos motores se describieron en el apartado 2.3.1.

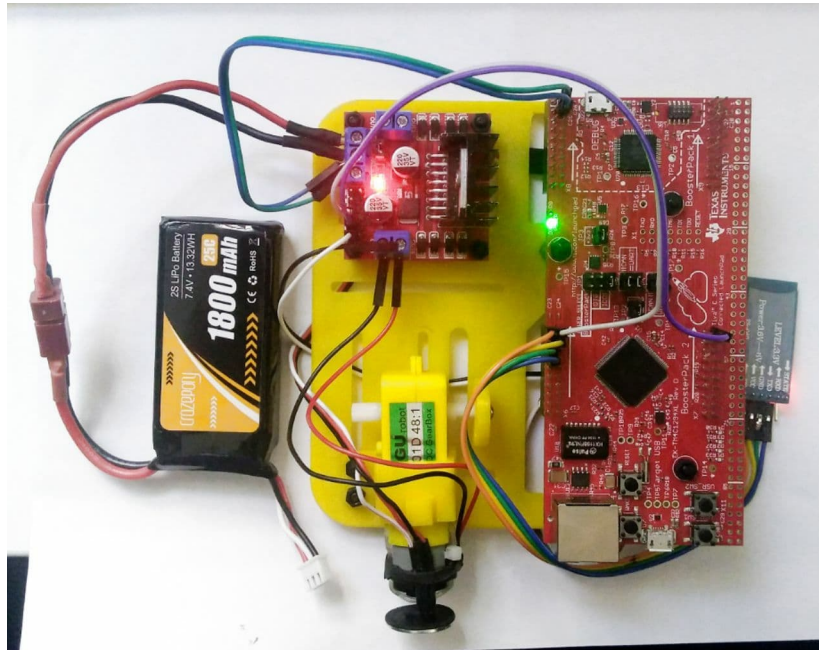


Figura 3.7 Plataforma de pruebas con el motor TT.

A continuación se observarán los resultados del experimento con el encoder de disco óptico y el disco magnético. Se puede observar como el encoder óptico en la figura 3.8, gráfica de la izquierda, tiene una salida con una oscilación superior comparándolo con la velocidad obtenida usando el disco magnético, gráfica de la derecha. En el resultado del encoder magnético se pueden observar las velocidades obtenidas en los distintos niveles de tensión. Estos valores se han utilizado posteriormente para obtener las curvas de la característica estática de cada motor sin carga.

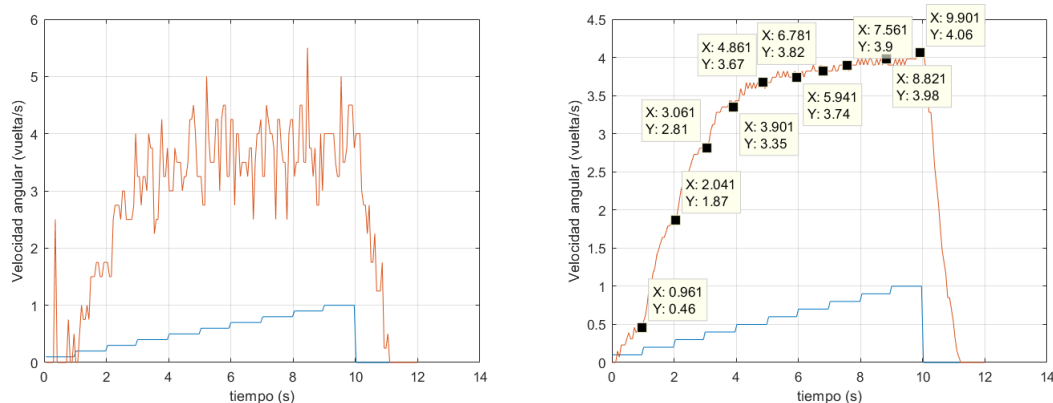


Figura 3.8 Experimento con los motores TT con encoder óptico y magnético.

Analizando, la velocidad máxima obtenida en vacío es de 4.06 revoluciones por segundo con una tensión en la batería de 7.3V, lo cual equivale a una velocidad máxima en vacío de 240rpm. Se puede observar también como a partir del 50 % la la variación de velocidad se reduce bastante. Llegando a la zona de saturación del motor, esto se observa mejor en la figura 3.9. La velocidad máxima obtenida significaría una velocidad de desplazamiento del robot de 82 cm/s.

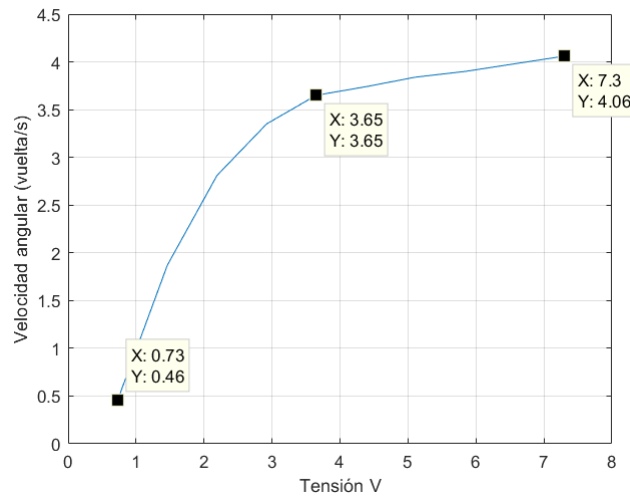


Figura 3.9 Característica estática de los motores TT .

3.3.2 Motores N20

En la figura 3.10 se puede observar un motor de tipo N20 montado en el soporte para realizar la prueba de los motores. Se han probado dos motores distintos de tipo N20, a ambos extremos de lo que podría considerarse en los extremos de las reductoras útiles para un robot móvil. Una reductora 10:1, con una alta velocidad y un bajo par, y una reductora de 100:1, con un par muy alto y una baja velocidad. A continuación se probarán ambas reductoras y se comentarán los resultados, finalmente comparando las características estáticas de estos dos motores con el motor TT probado anteriormente. Las características de estos motores se pueden observar en el apartado 2.4.1.

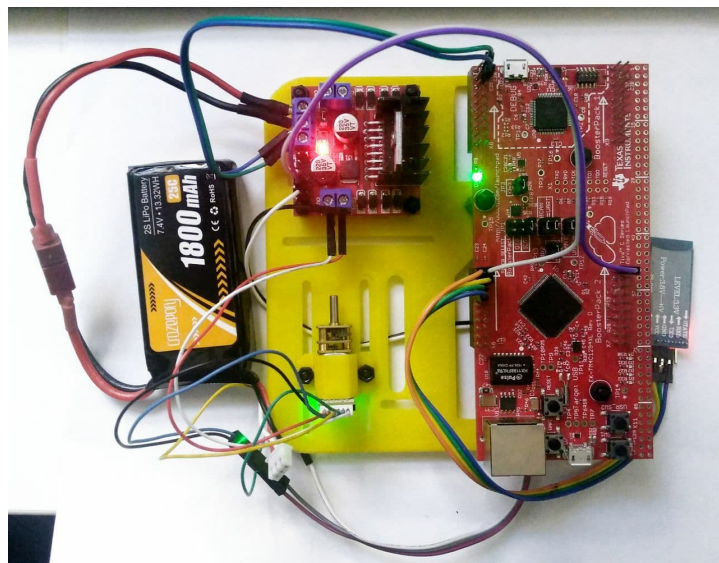


Figura 3.10 Plataforma de pruebas con el motor N20.

Reductora 100:1

Este motor tiene una baja velocidad y un par muy grande, comparado con el motor probado anteriormente y la otra reductora seleccionada, esto se puede observar en la tabla de características presente en la figura 2.29.

Los resultados del experimento se pueden observar en la figura 3.11, la gráfica de la izquierda. Al igual que en el experimento anterior, se han marcado todas las velocidades medidas en los distintos niveles de tensión. La velocidad máxima obtenida es de 1.6 revoluciones por segundo, lo cual equivale a 96rpm. Esta velocidad con la rueda de 65mm implicaría una velocidad en línea recta de 32 cm/s. La saturación no es tan pronunciada como en el motor TT, empezando la zona de saturación en torno al 80% de tensión, lo que serían 5.8V, como se puede ver en la gráfica de la derecha de la figura 3.11.

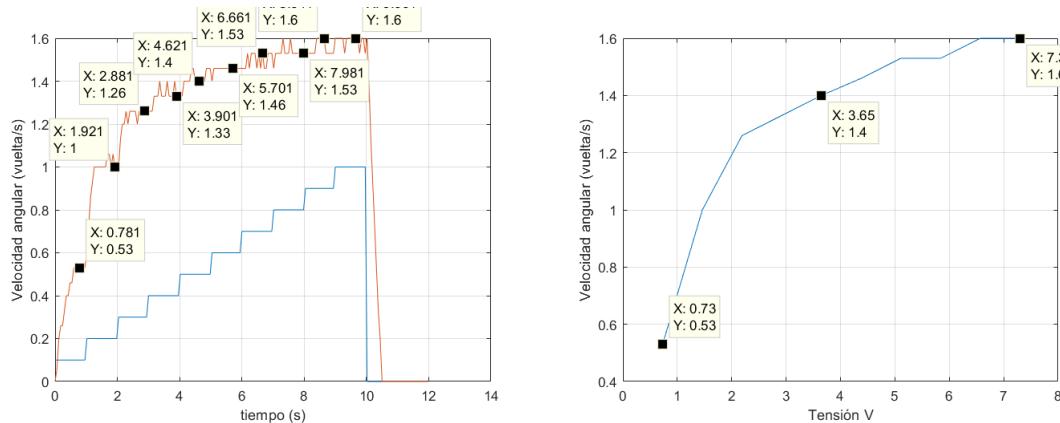


Figura 3.11 Experimento con los motores N20 100:1 y característica estática.

3.3.3 Reductora 10:1

La reductora 10:1 es lo opuesto a la reductora anterior, tiene velocidades muy altas a las expensas de tener un par muy inferior. Esto se puede analizar en la tabla del datasheet donde se comparan las distintas configuraciones, figura 2.29. La velocidad máxima que se puede observar en la primera gráfica de la figura 3.12 es de 25 revoluciones por segundo, lo cual equivale a 1500rpm, y implicando una velocidad lineal de 5m/s en el robot. El problema principal es que su bajo par generará una aceleración inferior a los otros motores, porque en caso de ser posible sería ventajoso utilizar unas ruedas de menor diámetro. Como en el experimento anterior, la saturación se empieza a observar a partir del 80%, en la característica estática, segunda gráfica de la figura 3.12, no se ve una saturación tan acentuada como en los casos anteriores.

3.3.4 Comparación de motores

En la figura 3.13 se pueden observar y comparar las distintas características estáticas de los motores, pudiendo observarse sus rangos de velocidad. En la gráfica de la izquierda se encuentran las velocidades frente a la tensión de alimentación, en esta figura están señaladas las velocidades a tensión nominal de acuerdo a los datasheet de los distintos motores, siendo 6V la tensión nominal. Al comparar los distintos motores, se pueden observar las zonas de saturación son distintas a las que se veían cuando simplemente se observaba cada uno de forma independiente y como las distintas reductoras aplanan las curvas a mayor tensión cuando menor es la reductora. En la gráfica de la derecha se encuentran marcados los rangos que podríamos considerar útiles de los motores, donde un cambio de tensión implica un cambio significativo en la velocidad del motor, coincidiendo estos con las zonas de no saturación.

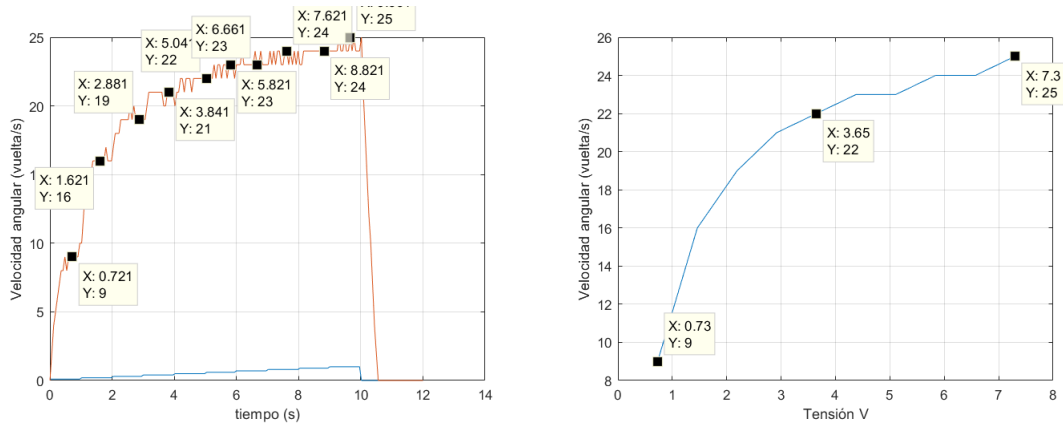


Figura 3.12 Experimento con los motores N20 10:1 y característica estática.

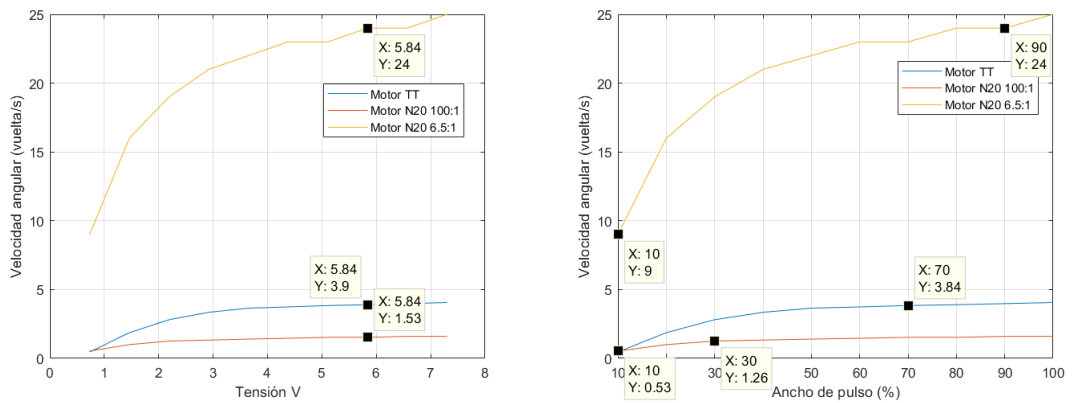


Figura 3.13 Comparación característica estática respecto a tensión y ancho de pulso.

Estos experimentos están realizados con los motores en vacío, por lo que al añadir la carga del robot el comportamiento de los motores será distinto. De igual forma se puede ver el orden de magnitud de velocidades que se obtendrán con los distintos motores. Para realizar las pruebas con el robot ensamblado la tensión se aumentará hasta 8.4V, máxima tensión de carga de la batería, para compensar parte de la carga añadida y poder obtener el mayor par posible.

4 Pruebas del robot

En este capítulo se mostrarán los distintos experimentos realizados con el robot completamente ensamblado, explicando los resultados obtenidos y analizando estos. Se van a realizar distintas pruebas con las que se irá obteniendo información necesaria para después poder desarrollar un primer control de este prototipo. Estas pruebas serán:

- Prueba de aceleración con las distintas configuraciones de motores, para observar los rangos de velocidad útiles.
- Prueba de detección de obstáculos, con el cual se pretende observar la reacción a obstáculos para obtener una distancia segura a la que considerar la detección y evitar la colisión.
- Prueba de detección y seguimiento de línea.
- Prueba de detección y seguimiento de degradado.

Con estas distintas pruebas se irá desarrollando paso a paso el control del prototipo y conociendo las capacidades del hardware, pudiendo obtener información para posibles mejoras a desarrollar en una versión futura.

4.1 Pruebas de aceleración

Se han realizado unas pruebas de aceleraciones en las cuales se hacen distintas aceleraciones durante 2s con distintos anchos de pulsos del pwm. Estas pruebas se han realizado con los distintos motores. Las pruebas tienen las siguientes partes:

- Primero 400ms de reposo.
- Posteriormente 2s en los que a ambos motores se les da un ancho de pulso concreto.
- Finalmente un tiempo de frenada en la que el ancho de pulso es 0 y se deja avanzar el coche con su propia inercia.

A continuación se mostrarán y comentarán los resultados con los dos tipos de motores distintos. Atendiendo a la aceleración del vehículo, velocidad máxima y rango de velocidades. Las gráficas mostrarán las velocidades de ambas ruedas y los valores del ancho de pulso que se han utilizado. Esto nos ayudará también para ver diferencias entre ambos motores.

4.1.1 Motor TT

Encoder magnético

Primero se han utilizado los motores de tipo TT, los cuales tienen una reductora de 48:1. Estos motores tienen una velocidad punta con el robot montado de 4.3 vueltas por segundo, lo cual

equivale a una velocidad de avance de 1m/s con las ruedas de 65mm. Estas velocidades se pueden alcanzar con un ancho de pulso del 80%. Un fallo que se ha llegado a detectar es que al ser dos los encoders que están interrumpiendo dentro del mismo periférico de GPIO, el programa se bloquea cuando estas llegan a ser 2000 interrupciones en el mismo periférico y manejador, una posible solución que podría solucionar este problema es la separación de los pines de interrupción para los distintos encoders en dos periféricos distintos y con dos rutinas de interrupción distintas, utilizando una tercera para el temporizador que realiza la cuenta de los pulsos cada vez. Estos nos limitará los anchos de pulso que podamos utilizar de forma repetible y medible, en este caso concreto, en la figura 4.1, se puede observar como se pueden utilizar velocidades entre 0 y 60% midiendo las velocidades de ambas ruedas, pero como al aumentar hasta el 80% la medida de las ruedas sólo sucede en el caso de desconectarse una de las ruedas, limitando las velocidades máximas y los anchos de pulsos con las que se realicen los experimentos.

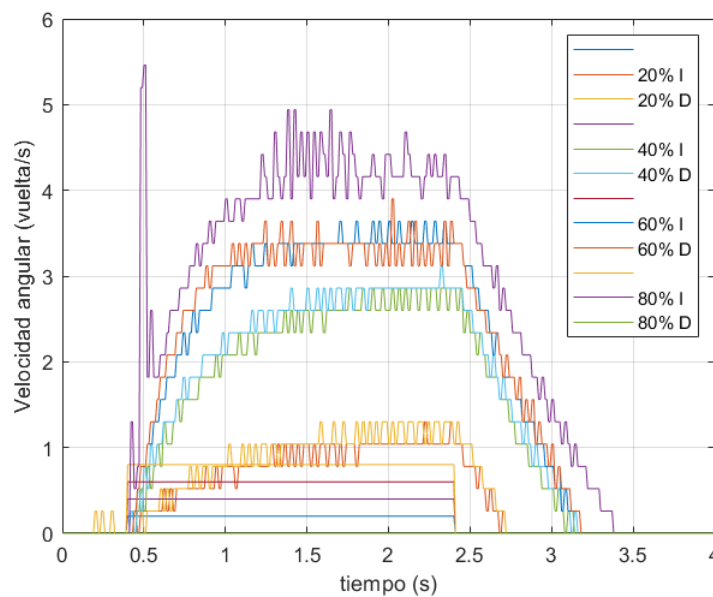


Figura 4.1 Experimento de aceleración con motores TT y encoder magnético.

El rango de velocidades que se obtiene con estos motores es de 0.2-0.7m/s, siendo el ancho de pulso mínimo para iniciar el movimiento de un 20% y el máximo antes del bloqueo del programa es el 60%.

4.1.2 Motor N20

Reductora 10:1

Este motor como se ha nombrado reiteradamente con anterioridad, tiene un par bajo y una velocidad alta. Esto significa que necesita niveles más altos de tensión para poder iniciar el movimiento, como se puede observar en la figura 4.2, y que la fuerza contraelectromotriz al reducir la tensión no es suficiente para frenar el robot de forma rápida, quedando este rodando con poca resistencia. Por otro lado, las velocidades que se obtienen sin que se bloquee el programa es de 11 revoluciones por segundo, 2.24m/s al 100% de ancho de pulso, en la prueba de aceleración de dos segundos.

Las velocidades alcanzables con este motor son entre 0.6-2.2m/s, siendo el rango de ancho de pulso hábil entre 50 y el 100%.

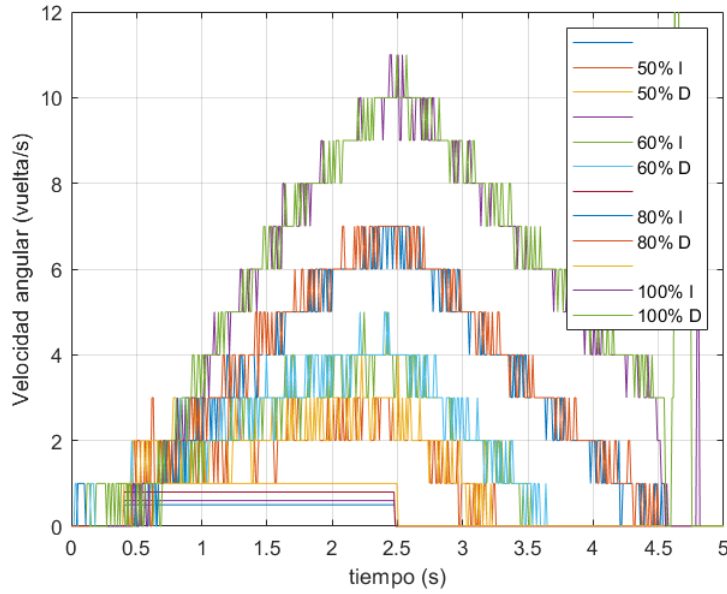


Figura 4.2 Caption.

Reductora 100:1

Al tener una reductora tan larga, la velocidad es mucho menor, pero por otro lado la aceleración y deceleración es muy superior gracias al gran par otorgado por los motores. También genera mas pulsos en el encoger por revolución de la rueda, lo cual otorga más resolución en la velocidad angular.

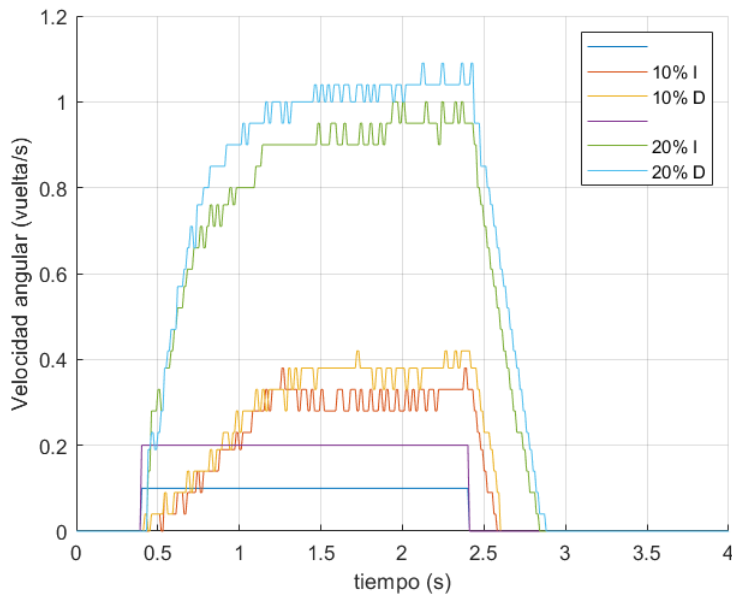


Figura 4.3 Experimento de aceleración.

La velocidad máxima que se puede observar es de 1.1 vuelta por segundo a un pwm del 20%, 66rpm, o con las ruedas de 65mm, una velocidad de 22cm/s. Mientras que con un ancho de pulso del 10% obtenemos una velocidad de de 0.4 vueltas por segundo. Estas velocidades bastante reducidas

son bastante adecuadas para hacer pruebas en un espacio de 2x1.2m, lugar donde se realizarán las pruebas.

Comparación

En la tabla 4.1 se pueden observar los distintos rangos de velocidades útiles con los distintos motores y el rango de ancho de pulso con el que se obtienen. Estos datos son especialmente interesantes cuando se comparan las velocidades alcanzadas en cada prueba de aceleración con la característica estática obtenida en el experimento de vacío. Analizando el comportamiento general, se puede ver como todos los motores han aumentado la zona lineal reduciendo su pendiente, especialmente el motor con la reductora de 10:1 con la que, debido a su reducido par, se ha visto una caída muy notable en la velocidad, figura 4.4. Las velocidades de los otros motores no han sufrido un descenso tan notable, por lo que se podría entender que sus reductoras están bien dimensionadas, o en el caso de la reductora 100:1, sobredimensionada. Con esto se podría concluir que un motor de tipo N20 sería conveniente con reductoras más intermedias, como podría ser una reductora 30:1, de forma que se obtendría un mayor control sobre la velocidad con un rango más adecuado. Un parámetro que también habría que tener en cuenta sería un cambio en las dimensiones de la rueda, la cual en caso de reducirse sería beneficioso para el motor con menor reducción y contraproducente a los que tienen mayor reducción.

Tabla 4.1 Pruebas de aceleración.

| Motor | Velocidades angulares[r/s] | Velocidades lineales[m/s] | Ancho de pulso[%] |
|-----------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| Motor TT | 1-4.3 | 0.2-0.7 | 20-60 |
| Motor N20 10:1 | 3-11 | 0.6-2.2 | 50-100 |
| Motor N20 100:1 | 0.4-1 | 0.08-0.2 | 10-20 |

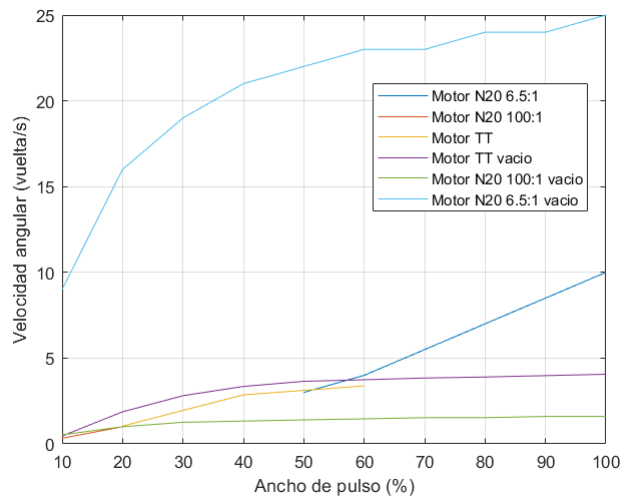


Figura 4.4 Comparación de las velocidades en vacío frente a en carga.

Para los experimentos de seguimiento de línea y detección de obstáculos como se ha comentado en el experimento anterior se utilizará el motor N20 con la reductora de 100:1 debido a el espacio reducido en el que se está realizando la prueba. Este motor permite mantener un buen control sobre el movimiento del robot gracias a la larga reductora y baja velocidad, ideal para realizar pruebas en un espacio reducido.

4.2 Detección de obstáculos

La prueba de detección de obstáculos consiste en la detección de un obstáculo frente al robot, en este experimento se van a utilizar dos cajas. Primero una colocada a 80 cm de la posición inicial, y una 40 cm detrás de ésta, siendo el objetivo del experimento comprobar si realiza una parada y al desaparecer el obstáculo reanuda la marcha.



Figura 4.5 Caption.

Los resultados de los datos medidos y la actuación en los motores se pueden observar en la figura 4.6. Aquí se puede observar como cada vez que la lectura de la medida era inferior a los 17cm puestos como límite se cortaba la potencia en los motores.

Cabe destacar, que con el motor confirmado el robot al encontrarse con un obstáculo estático evita la colisión, mientras que con los otros motores simplemente se dejaría de acelerar, dejando que la resistencia de los motores frenase el robot, reduciendo la velocidad y evitando un fuerte impacto. Para solucionar esto se podría controlar el sentido de la tensión en los motores y forzar una frenada, pero no se ha considerado necesario con los motores con los que se ha probado y no se ha implementado.

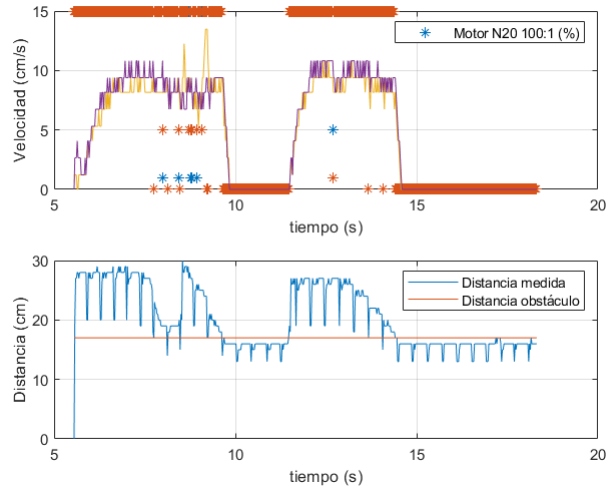


Figura 4.6 Telemetría de la detección de obstáculos.

4.3 Pruebas de seguimiento de la línea

La prueba de línea que se han realizado han sido relativas a la detección y seguimiento de línea en curva y recta.

Para las pruebas del primer prototipo se realizaron unos tramos de pista impresos en papel. El grueso de la línea es de 15mm, y los dos carriles se encuentran separados a 15cm. Por otro lado la curva exterior tiene un radio de 23cm. Estos tramos se pueden observar en la figura 4.7. Los distintos segmentos impresos se unieron con cinta adhesiva.

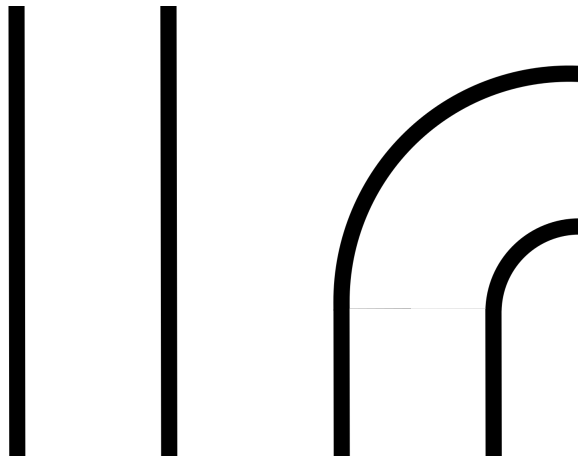


Figura 4.7 Recta y curva del circuito.

Tras unas breves pruebas con el primer prototipo se llegó a la conclusión de que la curva interior con un radio de 7cm es muy brusca, por lo que se diseñó unos segmentos nuevos para el prototipo, figura 4.8, en el que además se varía el ancho de la línea en recta y se hace discontinua, no más de 10cm. Uniendo las pistas anteriores y las nuevas ahora se poseen dos curvaturas distintas, una de 23 y otra de 25cm de radio, al igual que nos anchos de línea distintos. Para las pruebas se ha desactivado la medida de la velocidad, debido a que ocasionaba errores de forma esporádica y controlándose estos en bucle abierto. También, debido a la presencia de un sensor de la línea dañado, las curvas se realizarán a izquierdas, considerando en caso de no haber sucedido este contratiempo, que el comportamiento con curvas a derecha sería análogo.

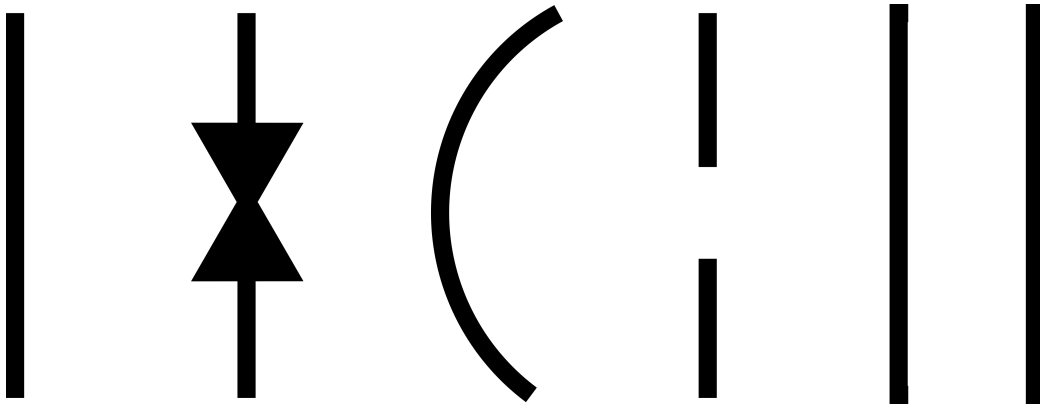


Figura 4.8 Nuevos segmentos de pruebas para el prototipo.

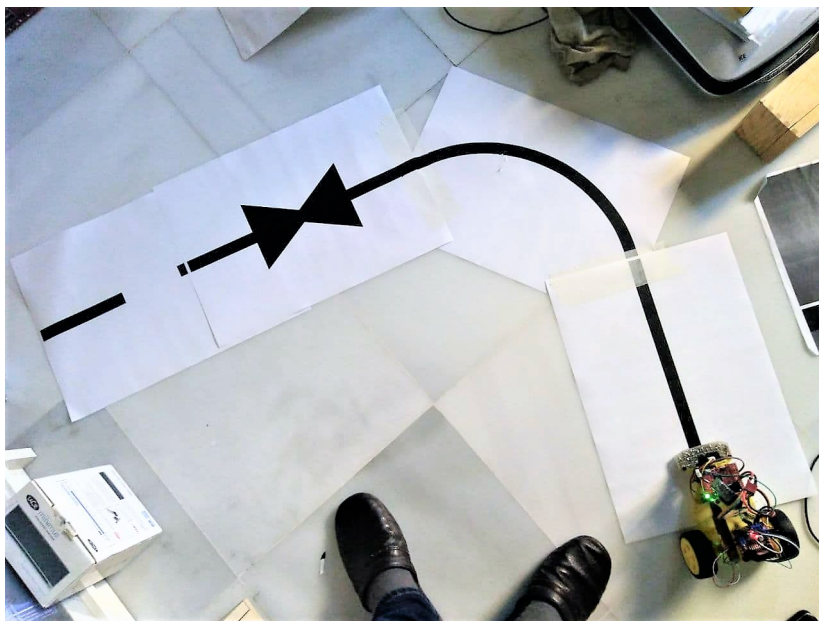


Figura 4.9 Circuito construido con los segmentos.

El mapa completo se puede ver en la figura 4.9. Este circuito consta de 4 segmentos, el problema ser páginas impresas en A3 es que las uniones han de hacerse con cinta adhesiva, o en este caso cinta de carroceros, siendo estos puntos elementos de fricción extra en los que el robot suele atascarse, debido a los soportes sobre los que se apoya el sensor de línea. En la figura 4.10 se pueden observar capturas del vídeo donde se completa el circuito nombrado anteriormente. Este circuito consisten en una primera recta seguido de un giro superior a 90° con un radio de 25cm, seguido de una sección en la que la línea cambia de sección posteriormente siendo interrumpida durante 10cm. Como nota cabe decir que el robot en el vídeo de la prueba se ha atascado dos veces, la primera en una transición entre dos hojas de papel, y la segunda con un trozo de plástico que se encontraba debajo de la hoja.

La telemetría de este experimento se puede observar en la figura 4.11. En está gráfica en la parte superior se pueden observar los valores de los sensores durante la prueba, indicándose en amarillo dónde se ha detectado la línea, mientras que en la gráfica inferior se pueden observar las actuaciones ejercidas sobre los motores. Ambas gráficas estan alineadas, de forma que en el momento en el que el robot se encuentra en la curva se puede observar como la línea es detectada en los primeros sensores, a la izquierda, y por tanto se reduce la actuación sobre la rueda izquierda.

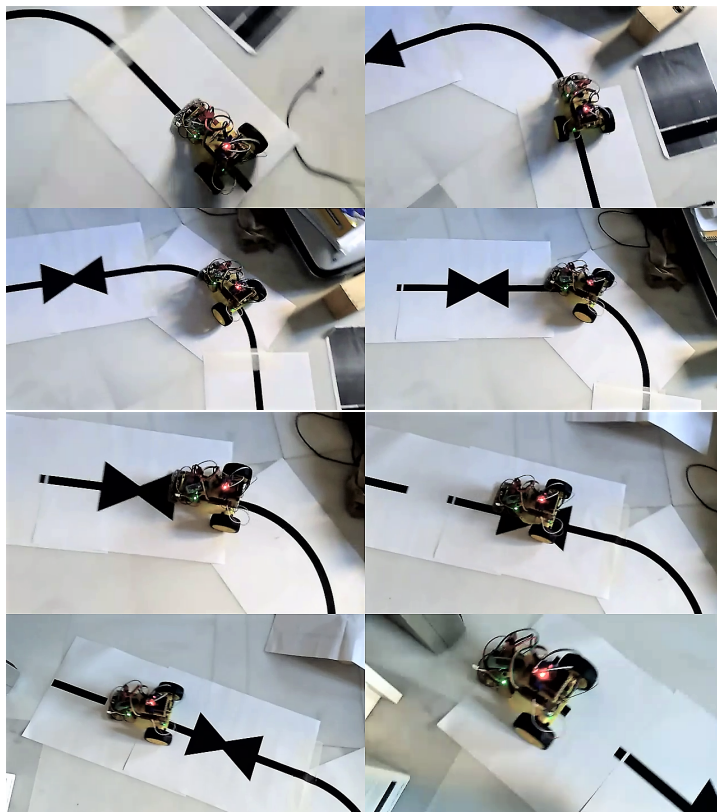


Figura 4.10 Capturas de la prueba de seguimiento de línea.

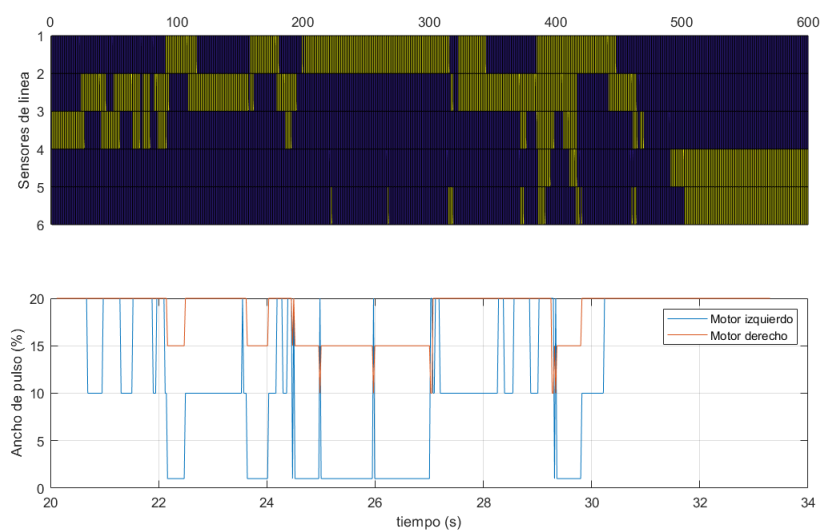


Figura 4.11 Telemetría de la prueba de seguimiento de línea.

También se puede observar el resultado de pasar por encima de las flechas en el sensor de línea, como hay un momento en el que de repente todos los sensores se activan y se van reduciendo, hasta posteriormente ampliarse la detección en los sensores hasta desaparecer y volver al estado anterior, con la línea en el lado izquierdo, donde intenta centrar el coche durante el espacio sin línea sobre-compensando y terminando la detección en el lado derecho.

Para ver el vídeo completo se puede hacer en el siguiente enlace: <https://youtu.be/IoeVS9t8Nc8>

5 Conclusiones

Con este trabajo se ha obtenido un conocimiento más profundo de los distintos sensores y actuadores típicamente utilizados en los sigue-líneas de competición, especialmente de los distintos usos en los que su aplicación puede ser conveniente.

Concretamente los análisis realizados con los distintos tipos de sensores de línea, muestran como cada tipo de sensor tiene su ventaja. Un ejemplo de esto es poder utilizar el sensor de línea temporizado en microcontroladores de menor capacidad, donde no se dispone de una abundancia en convertidores analógicos digitales. En caso de disponer de estos recursos, el utilizar los foto-transistores en un divisor resistivo genera una lectura estable en la que el tiempo de medida es constante. Esto es una gran ventaja para coordinar las distintas tareas y los tiempos que estas han de tener para realizar el seguimiento de línea.

Por otro lado, al realizar las pruebas de los sensores de distancia, se repite una situación similar. El sensor de ultrasonidos sólo utiliza señales digitales y es variable en el tiempo, mientras que el sensor láser utiliza una señal analógica. En este caso, el sensor de ultrasonidos tiene un rango de medida muy superior, siendo el límite el tiempo que se decida esperar el eco. Pero para esta aplicación concreta, la cual se basa en detectar un obstáculo en las inmediaciones, a una distancia corta, el tiempo de medida es como mucho de 20ms. De forma que se podría poner una limitación de tiempo de medida y realizar una planificación de tareas con ese tiempo máximo. Por otro lado, el sensor láser, para detectar la presencia de un obstáculo a una distancia de 20cm o inferior, tarda el tiempo de lectura de la señal analógica, muy inferior. El único inconveniente es que sería recomendable tener una fuente de alimentación o un rectificador aislado para reducir el ruido en la medida y aumentar la tensión obtenida cuando el sensor se encuentra midiendo fuera de rango.

Las pruebas con los motores han resultado ser bastante interesantes, especialmente al comparar sus características estáticas entre el experimento de vacío y el experimento de aceleración del robot. Aquí se puede ver la necesidad de buscar un motor mejor dimensionado, al igual que unas ruedas de dimensiones adecuadas. También una información importante y a tener en cuenta, son las distintas frenadas que aporta cada motor. Los motores con una menor reductora originan una frenada importante, deteniendo el vehículo en una distancia reducida, mientras que el motor con la reductora de 10:1 su frenada era muy leve, lo cual se beneficiaría de una frenada activa cambiando la polaridad del motor.

De las pruebas experimentales con el robot ensamblado se ha obtenido una verificación del funcionamiento básico necesario para las pruebas, realizando un seguimiento de línea y detección de obstáculos, siendo capaz de superar anomalías en la línea. Estos son parte importante de los requisitos básicos para poder participar en las competiciones actualmente, pero a pesar de ello el robot se encuentra todavía lejos del actual nivel de la competición. Sería necesario para alcanzar este nivel modificaciones principalmente en el diseño físico del robot: una reducción de peso,

dimensionamiento correcto de ruedas y motores, y una mejor integración de los componentes de forma que se puedan evitar problemas de desconexiones esporádicas al tratarse de cables dupont.

Con la finalización de este trabajo se ha obtenido una base sobre la que poder expandir e ir explorando distintas posibilidades en el mundo de la robótica de competición. Este prototipo está lejos de los 5m/s que alcanzan muchos de los robots que se ven en las competiciones internacionales. A pesar de ello, es un paso en la dirección correcta y una plataforma sobre la que poder seguir expandiendo en conocimiento y pruebas sobre los robots móviles de competición.

5.1 Problemas y soluciones

Aquí se hablará de problemas importantes que han limitado el funcionamiento del prototipo en algún aspecto, siendo estos distintos de los inconvenientes y limitaciones que se han ido analizando al realizar los experimentos de los sensores y las pruebas del robot.

Debido a la fabricación casera realizada por la situación de confinamiento, el error de fabricación en el circuito del sensor de línea ha generado que uno de los sensores no esté funcionando de forma correcta, impidiendo así realizar las pruebas de detección de gradiente. Para ello habría que sustituir el sensor entero, si no, el foto-transistor del par LED foto-transistor. Con esto se conseguiría el funcionamiento de la línea entera, requerimiento necesario para realizar experimentos de detección y seguimiento de carril. Esto son experimentos análogos al seguimiento de la línea que se ha realizado, pero con un mapa de gradientes.

Otro problema que se ha detectado ha sido el asociado al bloqueo del programa cuando se usaban los encoders a altas velocidades, como se comenta en el experimento de aceleración y deceleración. El problema se cree originado por la llegada simultánea de dos interrupciones a la rutina desde el mismo periférico de pines de ambas ruedas y desde el temporizador que realiza la medida. La posible solución que se plantea consiste en cambiar los periféricos de entrada de los encoders junto a las rutinas de interrupción, utilizando recursos distintos para cada rueda a la vez que otra distinta para la interrupción del temporizador que cuenta los pulsos y reinicia su valor. En caso de que esta solución no arreglase el problema sería conveniente mirar alternativas a la placa controladora, lo cual permitiría explorar otras, a ser posible, de menor tamaño, reduciendo así el peso y dimensiones de la plataforma.

5.2 Trabajos futuros

Como se ha dicho con anterioridad, el desarrollo de este prototipo es un primer paso para poder explorar el mundo de la robótica de competición, y personalmente tengo un gran interés en continuar expandiendo y aprendiendo a partir de los resultados obtenidos en este proyecto. El primer paso será probar las soluciones planteadas para los problemas anteriormente comentados, así pudiendo realizar la detección de gradientes nombrada múltiples veces a lo largo del proyecto, e intentar encontrar una forma mejor de poder realizar las pruebas, un espacio más grande y a ser posible, una pista plana y nivelada. Esto al igual que el tiempo, ha sido un limitador importante a la hora de poder seguir documentando los experimentos que se realizarán posteriormente a la presentación de este proyecto.

Apéndice A

Códigos principales

Aquí se adjuntarán los códigos utilizados para las pruebas a las que se ha sometido el prototipo de robot sigue-líneas

A.1 Prueba de aceleración

Código utilizado para realizar las distintas pruebas de aceleración, en las que el robot se encuentra durante 2 segundos aplicando un ancho de pulso concreto a ambos motores.

```
/**
 * main.c
 */
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#include "driverlib2.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "utils/uartstdio.h"
#include "config_pines.h"
//#include "motor.h"

#define MSEC 40000

uint32_t RELOJ, time;
double v_ml = 0, v_mr = 0;
uint32_t pulse_ml = 0, pulse_mr = 0;
uint32_t cycle, potencia = 1;
int f_mili = 0;

void mili (void){
    f_mili=1;
    TimerIntClear(TIMERO_BASE, TIMER_A);
}

void tick (void){
```

```

    time++;
}

int main(void)
{
    time = 0;
    //  e_l=0;
    //  e1_l=0;
    //  ei_l=0;
    //  e_r=0;
    //  e1_r=0;
    //  ei_r=0;

    RELOJ=SysCtlClockFreqSet((SYSCTL_XTAL_25MHZ | SYSCTL_OSC_MAIN |
        SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_CFG_VCO_480), 120000000);

    motor_config();
    encoder_config();

    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_TIMER0);
    TimerClockSourceSet(TIMER0_BASE, TIMER_CLOCK_SYSTEM);
    TimerConfigure(TIMER0_BASE, TIMER_CFG_PERIODIC);
    TimerLoadSet(TIMER0_BASE, TIMER_A, 120000); // timer de 1ms
    TimerIntRegister(TIMER0_BASE, TIMER_A, mili); //f_control
    IntEnable(INT_TIMER0A);
    TimerIntEnable(TIMER0_BASE, TIMER_TIMA_TIMEOUT);
    TimerEnable(TIMER0_BASE, TIMER_A);

    // Inicializar UART 6 bluetooth.
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOP);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART6);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PPO_U6RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PP1_U6TX);
    GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTP_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
    UARTStdioConfig(6, 115200, RELOJ);

    time=0;
    SysTickPeriodSet(12000);
    SysTickIntRegister(tick);
    SysTickIntEnable();
    SysTickEnable();

    IntMasterEnable();
    int count=0;
    potencia = 0;
    while(1){
        while(!f_mili);
        f_mili=0;
        if (count>2400) {
            potencia=0;

```

```

        cycle=2;
        PWMPulseWidthSet(MOTOR_PWM_BASE, LM_PWM_0, cycle-1);
        PWMPulseWidthSet(MOTOR_PWM_BASE, RM_PWM_0, cycle-1);
    }
    else if (count==400) {
        potencia=70; //Incrementa el periodo, saturando
        cycle=PWM_PERIOD*potencia/100;
        PWMPulseWidthSet(MOTOR_PWM_BASE, LM_PWM_0, cycle-1);
        PWMPulseWidthSet(MOTOR_PWM_BASE, RM_PWM_0, cycle-1);
    }
    if (count%10==0) UARTprintf("%d, %d, %d, %d\n", time, potencia,
        (int)(v_ml*100), (int)(v_mr*100));
    count++;

}
return 0;
}

```

A.2 Seguimiento de línea

Código *main* utilizado para resolver el experimento de seguimiento de línea y la detección de obstáculos.

```

/**
 * main.c
 */
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#include "driverlib2.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "utils/uartstdio.h"
#include "config_pines.h"
#include "linea.h"
#include "motor.h"
#include "distancia.h"

#define MSEC 40000

#define line
#define sigue_lin
#define vel_med
#define distancia

uint32_t RELOJ, time;
double v_ml = 0, v_mr = 0;

```

```

uint32_t pulse_ml = 0, pulse_mr = 0;
extern uint32_t p_l, p_r;
int f_mili = 0, f_dist = 0;
int dist;

uint32_t linea[6], line_min[6], line_max[6];

int e_l, e_r, e1_l, e1_r;
double ei_l, ei_r;

void m_control(int ref_ml, int ref_mr, int *pot_l, int *pot_r){

    *pot_l = ref_ml*300;//
    *pot_r = ref_mr*300;//

}

void mili (void){
    f_mili=1;
    TimerIntClear(TIMERO_BASE, TIMER_A);
}

void tick (void){
    time++;
}

int main(void)
{
    time = 0;

    RELOJ=SysCtlClockFreqSet((SYSCTL_XTAL_25MHZ | SYSCTL_OSC_MAIN |
        SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_CFG_VCO_480), 120000000);

    motor_config();
#ifdef vel_med
    encoder_config();
#endif
    dist_config();
    linea_init();

    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_TIMER0);
    TimerClockSourceSet(TIMERO_BASE, TIMER_CLOCK_SYSTEM);
    TimerConfigure(TIMERO_BASE, TIMER_CFG_PERIODIC);
    TimerLoadSet(TIMERO_BASE, TIMER_A, RELOJ/1000-1); // timer de 1ms
    TimerIntRegister(TIMERO_BASE, TIMER_A, mili); //temporizador
    IntEnable(INT_TIMER0A);
    TimerIntEnable(TIMERO_BASE, TIMER_TIMA_TIMEOUT);
    TimerEnable(TIMERO_BASE, TIMER_A);

    // Inicializar UART 6 bluetooth.

```



```

SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART6);
GPIOPinConfigure(GPIO_PP0_U6RX);
GPIOPinConfigure(GPIO_PP1_U6TX);
GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTP_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
UARTStdioConfig(6, 115200, RELOJ);

time=0;
SysTickPeriodSet(12000);
SysTickIntRegister(tick);
SysTickIntEnable();
SysTickEnable();

IntMasterEnable();
calibra_lin(&line_min, &line_max);
int count=0, i;
p_l = 0;
p_r = 0;
while(1){
    while(!f_mili);
    f_mili=0;
#ifdef distancia
    if ((count+5)%20==0){
        mide_dist(&dist);
        if (dist<18) {
            f_dist=1;
        }
        else f_dist=0;
    }
#endif
#ifdef line
    if ((count+1)%20==0) {
        lee_linea( &linea);
#ifdef ADC_Lin_Base
        for (i=0; i<6; i++) {
            int wn=(linea[i]-line_min[i])*100/(line_max[i]-line_min[i]);
#ifdef b_line
            if (wn<10 | wn >1000) linea[i]=0;
            else {
                linea[i]=1;
            }
#else
            if (wn<0 | wn >1000) linea[i]=0;
            else {
                linea[i]=wn;
            }
#endif
        }
#endif
    }
}
#endif

```

```
        UARTprintf("%d, %4d, %4d, %4d, %4d, %4d, %4d\n", time,
                   linea[0],linea[1],linea[2],linea[3],linea[4],linea[5]);
    }
#endif
#ifdef sigue_lin
    if (count%20==0) {
        if(!f_dist) {
            if (linea[2] | linea[3]) avanza();
            else if (linea[1]) giro_izq();
            else if (linea[4]) giro_der();
            else if (linea[0]) rot_izq();
            else if (linea[5]) rot_der();
            else avanza();
        }
        else para();
        UARTprintf("%d, %2d, %4d, %4d, ", time, dist, p_l, p_r);
        UARTprintf("%d, %d\n", (int)(v_ml*100), (int)(v_mr*100));
    }
#endif
    count++;
}
return 0;
}
```

Apéndice B

Piezas diseñadas

Aquí se contendrán los enlaces desde donde se podrán descargar los ficheros de diseño de FreeCAD y los modelos 3D en formato malla, listos para ser impresos. Estos archivos se encuentran almacenados en Github

B.1 Archivos de diseño paramétrico

- Modelos para la realización de las pruebas de los componentes
 - *pruebas_motor2.FCStd* Enlace a [GitHub](#).
 - *Soporte_distancia.FCStd* Contiene soportes para los dos tipos de sensores. Enlace a [GitHub](#).
- Modelos de la prueba de conceptos
 - *chasi.FCStd* Conjunto con las tres piezas necesarias para montar la prueba de conceptos. Enlace a [GitHub](#).
- Modelos del prototipo
 - *chasis_v3.FCStd* Conjunto de las dos piezas que forman la estructura del chasis y del soporte del sensor de línea. Enlace a [GitHub](#).
 - *montura_motor.FCStd* Montura para el motor TT. Enlace a [GitHub](#).
 - *montura_motor_N20.FCStd* Montura para el motor N20. Enlace a [GitHub](#).
 - *llantas.FCStd* Llantas para las ruedas de 65mm y el motor N20. Enlace a [GitHub](#).
 - *soporte_SHARP.FCStd* Soporte del sensor de distancia frontal. Enlace a [GitHub](#).
 - *soporte_SHARP2.FCStd* Soporte de los sensores de distancia laterales. Enlace a [GitHub](#).

B.2 Modelos de malla en formato .stl

- Modelos para la realización de las pruebas de los componentes
 - *pruebas MOTOR.stl* Enlace a GitHub.
 - *prueba_SHARP.stl* Enlace a GitHub.
 - *prueba_US.stl* Enlace a GitHub.
- Modelos de la prueba de conceptos
 - *chasis_v2.stl* Enlace a GitHub.
 - *chasis2_v2.stl* Enlace a GitHub.
 - *Soporte_US.stl* Enlace a GitHub.
- Modelos del prototipo
 - *chasis1_v3.stl* Pieza inferior del chasis. Enlace a GitHub.
 - *chasis2_v3.stl* Pieza superior del chasis. Enlace a GitHub.
 - *montura_motor.stl* Montura para el motor TT, deben imprimirse dos, una de ellas espejada. Enlace a GitHub.
 - *montura_N20.stl* Montura para el motor N20. Enlace a GitHub.
 - *rueda_N20_v2.stl* Llantas para las ruedas de 65mm y el motor N20. Enlace a GitHub.
 - *soporte_SHARP.stl* Soporte del sensor de distancia frontal. Enlace a GitHub.
 - *soporte_SHARP_lat.stl* Soporte de los sensores de distancia laterales. Enlace a GitHub.
 - *soporte_linea.stl* Soporte para el sensor de línea. Enlace a GitHub.

Índice de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Ejemplo de vehículo autónomo y robot social | 1 |
| 1.2 | ELMER y ELSIE, The Stanford Cart y Curiosity Rover | 2 |
| 1.3 | Robot domestico roomba y robot de defensa Atlas | 2 |
| 1.4 | Robot Lego y DARPA Grand Challenge | 3 |
| 1.5 | AGV industrial y sigue-líneas construido con Lego Mindstomrs | 4 |
| 2.1 | Modelo 3D del robot con motores tipo TT | 5 |
| 2.2 | Esquema de los componentes que conforman un robot sigue líneas avanzado | 7 |
| 2.3 | Logos de FreeCAD y el entorno KiCadStepUp | 7 |
| 2.4 | Logo de KiCad | 8 |
| 2.5 | Logo de GrabCAD | 8 |
| 2.6 | Logo de Code Composer estudio y eclipse | 9 |
| 2.7 | Logo de Tera Term | 9 |
| 2.8 | Prueba de concepto | 10 |
| 2.9 | Portapilas de 5 pilas AA | 11 |
| 2.10 | Placa de desarrollo EK-TM4C1294NCPDT | 11 |
| 2.11 | Sensor de línea QRT-8RC de Pololu y esquema del foto-transistor | 12 |
| 2.12 | HC-SR04 | 13 |
| 2.13 | Motor DG01D 48:1 y rueda 65x26 | 14 |
| 2.14 | Sensor de paso óptico y disco de encoder incremental | 14 |
| 2.15 | Puente completo L298N | 15 |
| 2.16 | Conexionado de los componentes a la placa de desarrollo | 16 |
| 2.17 | Modelo del chasis y soporte para sensor de distancia | 16 |
| 2.18 | Diseño en FreeCAD frente a diseño ensamblado | 17 |
| 2.19 | Capturas de los experimentos de seguimiento de la curva | 18 |
| 2.20 | Capturas de la prueba de cambio de carril | 18 |
| 2.21 | Segundo diseño montado con motores N20 | 19 |
| 2.22 | Batería LiPo y cargador balanceado | 19 |
| 2.23 | TCRT5000L | 20 |
| 2.24 | Prueba TCRT5000 y esquema del circuito | 20 |
| 2.25 | Diseño y PCB soldada | 21 |
| 2.26 | SHARP GP2Y0A21YK | 21 |
| 2.27 | salida en funcion de la distancia y su inversa | 22 |
| 2.28 | Disco magnético y sensor Hall | 23 |
| 2.29 | Motor N20 con tabla de reductoras | 23 |
| 2.30 | Llanta para neumatico de 65x25, eje de motor N20 | 24 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.31 | Modulo HC-05 | 24 |
| 2.32 | Esquema de conexión del segundo diseño con un sólo sensor de distancia. | 25 |
| 2.33 | Estructura inferior y soporte de línea | 25 |
| 2.34 | Montaje de los motores TT y la TivaC™ | 26 |
| 2.35 | Chasis inferior con todos los periféricos. | 26 |
| 2.36 | Chasis superior y montaje del chasis superior e inferior | 27 |
| 2.37 | Comparación del montaje con los dos tipos de motores | 27 |
| 2.38 | Impresora Ender 3 | 27 |
| | | |
| 3.1 | Prueba de los sensores de líneas y separación de 3mm | 30 |
| 3.2 | Montaje de los sensores de distancia en una impresora 3D | 36 |
| 3.3 | Medida de la distancia con el sensor HC-SR04 y tiempo de lectura del sensor | 36 |
| 3.4 | Medida de la distancia con el sensor SHARP | 37 |
| 3.5 | Comparación de resultados en el test de distancias | 38 |
| 3.6 | Comparación en la medida al aire | 38 |
| 3.7 | Plataforma de pruebas con el motor TT | 39 |
| 3.8 | Experimento con los motores TT con encoder óptico y magnético | 39 |
| 3.9 | Característica estática de los motores TT | 40 |
| 3.10 | Plataforma de pruebas con el motor N20 | 40 |
| 3.11 | Experimento con los motores N20 100:1 y característica estática | 41 |
| 3.12 | Experimento con los motores N20 10:1 y característica estática | 42 |
| 3.13 | Comparación característica estática respecto a tensión y ancho de pulso | 42 |
| | | |
| 4.1 | Experimento de aceleración con motores TT y encoder magnético | 44 |
| 4.2 | Caption | 45 |
| 4.3 | Experimento de aceleración | 45 |
| 4.4 | Comparación de las velocidades en vacío frente a en carga | 46 |
| 4.5 | Caption | 47 |
| 4.6 | Telemetría de la detección de obstáculos | 48 |
| 4.7 | Recta y curva del circuito | 48 |
| 4.8 | Nuevos segmentos de pruebas para el prototipo | 49 |
| 4.9 | Circuito construido con los segmentos | 49 |
| 4.10 | Capturas de la prueba de seguimiento de línea | 50 |
| 4.11 | Telemetría de la prueba de seguimiento de línea | 50 |

Bibliografía

- [1] Jesus Enrique Sierra Garcia, Felipe Espinosa, and Carlos Santos, *Transporte multi-AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada*, **0**, no. 0, Number: 0.
- [2] M. V. Gomes, L. A. Bássora, O. Morandin, and K. C. T. Vivaldini, *PID control applied on a line-follower AGV using a RGB camera*, 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), ISSN: 2153-0017, pp. 194–198.
- [3] J. Gonçalves, V. H. Pinto, and P. Costa, *A line follower educational mobile robot performance robustness increase using a competition as benchmark*, 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), ISSN: 2576-3555, pp. 934–939.
- [4] M. Santos Pessoa de Melo, J. Gomes da Silva Neto, P. Jorge Lima da Silva, J. M. X. Natario Teixeira, and V. Teichrieb, *Analysis and comparison of robotics 3d simulators*, 2019 21st Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), pp. 242–251.
- [5] Sergio Alejandro Madrigal Moreno and Nelson David Muñoz Ceballos, *Vehículos de guiado autónomo (AGV) en aplicaciones industriales: una revisión*, **15**, no. 28, 117–137, Number: 28.
- [6] Diogo Puppim de Oliveira, Wallace Pereira Neves dos Reis, and Orides Morandin Junior, *A qualitative analysis of a USB camera for AGV control*, **19**, no. 19, 4111, Number: 19 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [7] S. Saadatmand, S. Azizi, M. Kavousi, and D. Wunsch, *Autonomous control of a line follower robot using a q-learning controller*, 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), pp. 0556–0561.
- [8] Van N. Tran, *Modeling phototransistor optocouplers using pspice simulation software*, 10 2005.