

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de Sistema Electrónico y de Control de un Robot  
Móvil de Secado de Café**

Trabajo de graduación presentado por Frank Jonathan Sáenz Paz para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de Sistema Electrónico y de Control de un Robot  
Móvil de Secado de Café**

Trabajo de graduación presentado por Frank Jonathan Sáenz Paz para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020





Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
Ing. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2020.



Este proyecto surge como solución a una necesidad por parte de la finca El Injerto, que es una empresa guatemalteca pionera en la producción y exportación de café de calidad, cuya fama trasciende la fronteras guatemaltecas. Se vio la oportunidad de automatizar el proceso de secado de café utilizando un robot móvil, logrando así un rayado del terreno de café más preciso y periódico, lo que a su vez logrará un secado más uniforme en todos los granos. Esta tesis no sería posible sin todo el apoyo y confianza por parte de la finca El Injerto.

Además, el diseño electrónico se ha hecho bajo la asesoría del Ing. Kurt Kellner, quien ha brindado sus conocimientos y experiencia. Así mismo, el Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala ha dado su apoyo constantemente al proyecto, ofreciendo soluciones para la continuación del proyecto durante el paro nacional debido a la pandemia de COVID-19.

Se reconoce la aportación valiosa de conocimiento de terceros como la ayuda en el tema del controlador no lineal por parte del Ing. Miguel Zea y del Ing. Gianni Moretto, quien apoyó grandemente desde Italia en la programación de los módulos DWM1001-DEV. También, mi familia apoyó anímicamente en todo tiempo, y sin la ayuda de Dios jamás se hubieran alcanzado los buenos resultados de este trabajo.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XV</b>
<b>Resumen</b>	<b>XVII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>11</b>
6.1. DWM1001-DEV . . . . .	11
6.2. Real Time Location System (RTLS) con DWM1001-DEV . . . . .	12
6.3. Modelo del unicycle . . . . .	13
6.4. Control no lineal de robots móviles . . . . .	15
6.5. Orientación robot móvil (IMU 9 GDL) . . . . .	17
6.6. Microcontrolador . . . . .	18
6.7. Control de motores . . . . .	19
6.8. Comunicación de radiofrecuencia . . . . .	20
6.9. Puente H . . . . .	20
6.10. Cálculo de batería . . . . .	22
6.11. Cálculo torque motor robot móvil . . . . .	22

<b>7. Descripción del problema y funcionamiento del robot</b>	<b>25</b>
<b>8. Prototipo 1</b>	<b>27</b>
8.1. Suministro energético y circuito regulador . . . . .	29
8.1.1. Batería . . . . .	29
8.1.2. Panel solar . . . . .	30
8.1.3. Circuito regulador . . . . .	30
8.2. Tracción . . . . .	31
8.3. Sistema de posicionamiento del robot móvil . . . . .	32
8.3.1. Sistema láser . . . . .	32
8.3.2. Sensores de distancia . . . . .	34
8.3.3. Microcontrolador . . . . .	35
8.4. Comunicación vía control remoto . . . . .	36
8.4.1. Funcionamiento . . . . .	36
8.4.2. Electrónica . . . . .	37
8.4.3. Módulo NRF24L01 . . . . .	40
<b>9. Discusión y resultados del Prototipo 1</b>	<b>43</b>
9.1. Sistema de tracción . . . . .	43
9.1.1. Pruebas y resultados . . . . .	43
9.1.2. Discusión y aprendizajes . . . . .	44
9.2. Suministro energético y circuito regulador . . . . .	44
9.2.1. Pruebas y resultados . . . . .	44
9.2.2. Discusión y aprendizaje . . . . .	45
9.3. Sistema de posicionamiento del robot móvil . . . . .	45
9.3.1. Módulo láser . . . . .	45
9.3.2. Módulos de distancia . . . . .	46
9.3.3. Microcontrolador . . . . .	47
9.4. Comunicación vía control remoto . . . . .	47
<b>10. Prototipo 2</b>	<b>49</b>
10.1. Sistema de posicionamiento en tiempo real . . . . .	50
10.1.1. Anchor . . . . .	52
10.1.2. Tag . . . . .	52
10.1.3. Discusión y resultados . . . . .	54
10.2. Odometría del robot . . . . .	55
10.3. Simulación WEBOTS . . . . .	58
10.4. Control no lineal . . . . .	61
10.5. Microcontrolador . . . . .	62
10.6. Tracción . . . . .	63
10.7. Suministro energético . . . . .	65
10.7.1. Batería . . . . .	65
10.7.2. Panel solar y circuito regulador . . . . .	66
10.7.3. Cableado . . . . .	67
10.8. Sistema electrónico para elevar las aspas . . . . .	68
10.9. Metodología para integración de sistemas electrónicos y fabricación de PCBs .	69
10.10 Listado de materiales electrónicos completo . . . . .	71

<b>11. Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>12. Recomendaciones</b>	<b>77</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>79</b>
<b>14. Anexos</b>	<b>81</b>
14.1. Esquemáticos de los circuitos . . . . .	81
14.1.1. Circuito para DWM1001-DEV - <i>Anchor</i> . . . . .	81
14.1.2. Circuito Master del robot móvil . . . . .	82
14.1.3. Circuito de los Encoders . . . . .	82
14.1.4. Circuito del control remoto . . . . .	83
14.1.5. Circuito elevador de aspas . . . . .	83
14.2. PCBs . . . . .	84
14.2.1. PCB para DWM1001-DEV - <i>Anchor</i> . . . . .	84
14.2.2. PCB Master del robot móvil . . . . .	85
14.2.3. PCB Control Remoto . . . . .	86
14.2.4. PCB elevador de aspas . . . . .	88
14.2.5. PCB Encoders . . . . .	89
14.3. Detalles circuitos Prototipo 2 . . . . .	90
14.3.1. Circuitos de robot móvil . . . . .	90
14.3.2. Control remoto . . . . .	90
14.3.3. RTLS - Anchors y Tag . . . . .	91
14.3.4. Encoders . . . . .	91
<b>15. Glosario</b>	<b>93</b>



---

## Lista de figuras

---

1.	Terreno de Field Robot Event . . . . .	3
2.	Módulo DWM1001-DEV . . . . .	11
3.	Posicionamiento de Anchors y Tag en RTLS . . . . .	12
4.	Representación RTLS . . . . .	12
5.	Pose de unicycle . . . . .	13
6.	Movimiento del unicycle . . . . .	14
7.	. . . . .	14
8.	Control no lineal . . . . .	15
9.	Ángulos Roll, Pitch y Yaw [8] . . . . .	17
10.	Arduino DUE . . . . .	19
11.	. . . . .	19
12.	NRF24L01 . . . . .	20
13.	Circuito puente H . . . . .	21
14.	Circuito amplificador de voltaje . . . . .	21
15.	DCL rueda de robot móvil . . . . .	22
16.	Café en proceso de ser secado . . . . .	25
17.	Representación del recorrido del robot móvil . . . . .	26
18.	Imagen del Prototipo 1 . . . . .	27
19.	Representación del recorrido del Prototipo 1 . . . . .	28
20.	Diagrama de bloques Prototipo 1 . . . . .	28
21.	Componentes y circuitos electrónicos del Prototipo 1 . . . . .	29
22.	Componentes para el suministro energético del robot . . . . .	30
23.	Diagrama del suministro energético . . . . .	31
24.	Circuito Puente H . . . . .	32
25.	Imágenes torre láser . . . . .	33
26.	Módulo láser . . . . .	33
27.	Tubo para fotoresistencias . . . . .	34
28.	Módulo VL53L0X . . . . .	35
29.	Conexiones del ATMEGA328p . . . . .	36
30.	Mockup del control remoto . . . . .	36

31.	Diagrama de bloques control remoto . . . . .	38
32.	Batería y su portador para el control remoto . . . . .	38
33.	Circuito matriz de pulsadores . . . . .	39
34.	Conexiones del ATMEGA328p para el Control Remoto . . . . .	39
35.	Circuito electrónico físico del control remoto . . . . .	40
36.	Foto de la interconexión del suministro energético . . . . .	45
37.	Trayectoria del Prototipo 2 . . . . .	50
38.	Diagrama de bloques Prototipo 2 . . . . .	51
39.	RTLS con DWM1001-DEV . . . . .	51
40.	Circuito Anchor . . . . .	52
41.	Circuito del Tag . . . . .	52
42.	Fotografía Circuito Arduino DUE y DWM1001-DEV (Tag) . . . . .	53
43.	Prueba de RTLS en interior . . . . .	54
44.	Resultado prueba RTLS . . . . .	54
45.	IMU . . . . .	56
46.	Lectura de la pose de la IMU . . . . .	56
47.	Lectura de un <i>Encoder</i> . . . . .	57
48.	Robot móvil simulado en WEBOTS . . . . .	58
49.	Simulación del campo de trabajo en WEBOTS . . . . .	59
50.	Trayectoria del robot móvil en la simulación . . . . .	60
51.	Simulación del sistema elevador de aspas en WEBOTS . . . . .	61
52.	Funcionamiento TXS0108E . . . . .	62
53.	Pines DUPONT . . . . .	63
54.	Componentes de la tracción del Prototipo 2 . . . . .	63
55.	Prueba corriente y torque Motor . . . . .	65
56.	Conexión suministro energético Prototipo 2 . . . . .	67
57.	Desconexión tipo XT60 . . . . .	68
58.	Sistema elevador de aspas . . . . .	68
59.	Robot a escala . . . . .	70
60.	Esquemático circuito Anchor . . . . .	81
61.	Esquemático circuito Master del robot móvil . . . . .	82
62.	Esquemático circuito Encoders . . . . .	82
63.	Esquemático circuito control remoto . . . . .	83
64.	Esquemático circuito elevador aspas . . . . .	83
65.	Diseño PCB circuito Anchor . . . . .	84
66.	Representación 3D del circuito Anchor . . . . .	84
67.	PCB circuito Anchor . . . . .	85
68.	Diseño PCB Master del robot Móvil . . . . .	85
69.	Representación 3D del circuito Master del robot móvil . . . . .	86
70.	Diseño PCB control remoto . . . . .	86
71.	Representación 3D del circuito control remoto . . . . .	87
72.	PCB circuito control remoto . . . . .	87
73.	Diseño PCB elevador de aspas . . . . .	88
74.	Representación 3D del circuito elevador aspas . . . . .	88
75.	PCB elevador de aspas . . . . .	89

76.	Diseño PCB Encoder . . . . .	89
77.	Representación 3D del circuito Encoder . . . . .	89
78.	Fotografía circuitos en robot móvil . . . . .	90
79.	Fotografía circuito control remoto (Protoboard) . . . . .	90
80.	Circuito de los cuatro Anchors (Protoboard) y un Tag . . . . .	91
81.	Fotografía del Encoder leyendo la velocidad del motor. . . . .	91



---

## Lista de cuadros

---

1.	Bytes enviados por el control remoto . . . . .	40
2.	Bytes enviados por el robot móvil . . . . .	41
3.	Conexión UART y DWM1001-DEV (Tag) . . . . .	53
4.	Resultados (corriente y torque) de la prueba del motor . . . . .	64
5.	Características del cableado . . . . .	67
6.	Voltaje de suministro - Sensores y componentes electrónicos . . . . .	68
7.	BOM completo del Prototipo 2 (Parte 1). . . . .	72
8.	BOM completo del Prototipo 2 (Parte 2). . . . .	73
9.	Cotización manufactura placas PCB . . . . .	73



Este proyecto consiste en el diseño de la electrónica y el control de un robot móvil autónomo para el secado de café guatemalteco de calidad. Se realizaron dos prototipos para el robot móvil. El primero presentó problemas en la tracción, puesto que el torque de los motores no es el suficiente que se requiere para el trabajo de campo. Por otro lado, los sensores utilizados para controlar la trayectoria del robot móvil dentro del terreno de trabajo resultaron no ser los adecuados, ya que las condiciones del terreno afectan las mediciones considerablemente y afectan la trayectoria del robot. Es por esto que se decidió realizar una nueva iteración del prototipo, que corrige todos estos problemas.

Para el segundo prototipo se utilizaron motores con más torque que a su vez exigieron el rediseño del suministro energético y el circuito de potencia debido al alto consumo de corriente. Por otro lado, se implementó un controlador no lineal para asegurar el seguimiento de la trayectoria dentro del campo de trabajo. Se implementó un sistema de posicionamiento en tiempo real mediante los módulos DWM1001-DEV, una Unidad de Medición Inercial y un par de encoders para los motores. Estos nuevos sensores son utilizados por el controlador no lineal para conocer tanto la posición actual como la odometría del robot móvil.

Se realizó la simulación del sistema completo en WEBOTS, lo que incluye tanto el robot en sí con sus sensores como el seguimiento de la trayectoria, realizado por el controlador no lineal. Además, se realizaron pruebas de cada uno de los sensores y todos dieron buenos resultados.



This project consists on the design of the electronics and the control system of a movil robot that will be used in the drying of quality coffee in Guatemala. Two movil robot prototypes were made. The fist one had traction issues, because the motor torque was not enough for the translation of the robot on the field. Futhermore, the sensors used to control the trayectory of the movil robot on the work field were not the apropiate, beacuse the same field conditions affect the sensor's measurements considerably and this also affects the trayectory of the robot. There was, therefore, the need to carry out a new iteration of the prototype, that takes into account the issues in the las one.

In the second iteration new motors, wich have more torque, were implemented. The great torque requieres more current consumption, hence a redesign of the power supply and the power circuit was carried out. In addition, it was implemented a non-linear controller to ensure the trayectory tracking in the work field. It was incorporated a real time location system -provided by the DWM1001-DEV modules-, an Inertial Measurement Unity, and a pair of rotary motor encoders. The data provided by these sensors are used by the non-linear controller to determine the actual position of the movil robot in the fiel and his odometry.

A simulation of the whole system was made in WEBOTS, this includes the trayectory tracking and the robot itself with the sensors. In addition, tests were performed on each sensors and all gave good results.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

Este proyecto nació como respuesta a la necesidad de automatizar el proceso de secado de café de calidad en una finca de Guatemala. El objetivo de este es el diseño de la electrónica y del sistema de control de un robot móvil que efectúe el proceso del secado de café. Es decir, se diseñan todos los circuitos electrónicos utilizados en el proyecto, así como sus PCBs y sus modelos 3D. La parte electrónica se subdivide en cinco circuitos: el circuito del robot móvil, el de los módulos DWM1001-DEV (*Anchor*) que se colocan a las esquinas de terreno del café, el circuito que eleva y baja las aspas, el circuito del control remoto y el del encoder en cada rueda. En este documento se presenta detalladamente el proceso de diseño de cada circuito y el resultado final de los mismos.

Además, se implementa un controlador no lineal para robots móvil para garantizar el seguimiento correcto dentro del terreno de trabajo. Para ello se utilizan tres sensores: una Unidad de Medición Inercial, un par de encoders y un juego de módulos DWM1001-DEV. Estos sensores son utilizados por el controlador para conocer tanto la posición actual del robot móvil dentro del terreno de trabajo -los módulos DWM1001-DEV son los encargados de esta tarea-, como la orientación del robot -Unidad de Medición Inercial- y encoders para conocer la velocidad actual de cada rueda. Por lo tanto, este proyecto se enfoque en la manipulación de estos sensores y en la extracción de la data necesaria para utilizarla en el controlador. Se desea crear una simulación en el programa de WEBOTS tanto del reobot móvil con sus sensores como del seguimiento de la trayectoria dominada por el controlador no lineal. En este documento se muestra, entonces, cómo se extrajeron los datos de estos sensores y sus resultados. Además, se muestra el funcionamiento de la simulación tanto del control no lineal como del robot en sí.

Se realiza, además, una red con cinco módulos DWM1001-DEV (cuatro estacionarios y uno dentro del robot), con los cuales se monitorea la posición en tiempo real del robot móvil con respecto a los estacionarios. Se muestra en este artículo el proceso de la implementación de los módulos DWM1001-DEV y la lectura de los datos al haber creado la red. Se muestran los resultados de las pruebas realizadas.

Adicionalmente, se muestra el diseño del sistema para la elevación de las aspas que

también forman parte del funcionamiento requerido del robot. Se diseña, también, el circuito del control remoto, que es la forma en que el usuario puede tomar control del robot móvil cuando no desea que trabaje de forma autónoma.

Otra de los objetivos de este proyecto es el diseño de un sistema de alimentación energética que le permita al móvil operar por 7 horas. Esta es la cantidad de horas que dura el proceso de secado de café. Se detallan los componentes y los circuitos de potencia involucrados en alcanzar dicho tiempo.

Por último, se muestra el BOM completo de todos los componentes electrónicos que conforman el robot móvil. Este incluye el precio de cada componente y el precio final.

La utilización de robots móviles en la agricultura es algo que se ha estado estudiando por varias universidades a nivel internacional. Las universidades europeas son de las pioneras en esta área. Cada año se realiza en Alemania una competencia de robots móviles de agricultura, en dónde participan universidades o instituciones y es patrocinado por las empresas más grandes de tecnología y agricultura de Europa. Para conocer más de esta competencia puede visitar [1].

La competición consisten en que el robot móvil autónomo debe circular entre los cultivos y a su vez tiene que ir recogiendo unos artefactos de plástico que están esparcidos en la tierra. En la Figura (1) se muestra el terreno de cultivos por el que debe pasar el robot autónomo. El robot móvil de este trabajo debe hacer exactamente el mismo recorrido solo que en vez de recoger objetos de plástico durante su recorrido, mueve granos de café mientras pasa.

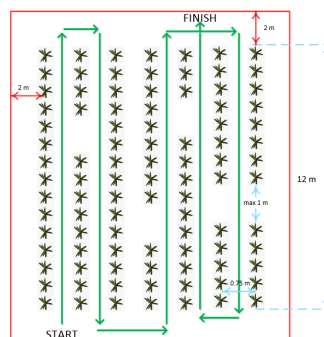


Figura 1: Terreno de Field Robot Event

Los robots móviles creados por las universidades tienen características similares al de este trabajo. Si se observa en [2] en su mayoría cuentan con una IMU de 9 GDL para conocer su orientación y cuentan con encoders en los motores. Además, los motores utilizados son similares a muchos de los robots de la competencia. La diferencia está en el uso de cámara y visión por computadora para saber hacia dónde debe ir el robot y divisar los objetos que

debe agarrar; en este caso se usó un módulo posicionamiento en tiempo real ya que no se necesita agarrar objetos. Aparte, en su mayoría usan baterías de menos capacidad que la de este proyecto, ya que se tiempo de operación en mucho menor.

Por otro lado, el control no lineal en robots móviles es uno de los más empleados por su ventaja de ser utilizado en trayectorias preestablecidas en un espacio de trabajo. Este es controlador utilizado en *Turtlebot-2*. Este es un robot móvil de dos ruedas autónomo -similar al de este investigación-. Con el controlador no lineal el robot pudo seguir con éxito trayectorias rectas, circulares y en forma de infinito, tal como se muestra en [3].

El módulo electrónico *DWM1001-DEV* es otra opción para el posicionamiento real de un objeto móvil aparte de los módulos GPS convencionales. La diferencia es que el DWM1001 se utiliza para aplicaciones de distancias menores ya que el margen de error para distancias menores de 150m es de  $<10\text{cm}$ . Por esto se ha utilizado en aplicaciones de robots que ayudan a gente con problemas de ceguera a encontrar la salida de un lugar, en aplicaciones para rastrear personas en ciertos lugares o en robots móviles autónomos, por ejemplo. Aplicaciones como estas se muestran en [4].

El café es uno de los productos principales de Guatemala. Este es uno de los productos por los que el país se distingue en el extranjero. Se exporta a muchos países y su sabor y calidad son reconocidos a nivel mundial. Varias fincas productoras de café en Guatemala se dedican a elaborar café de calidad para exportación. De hecho la exportación de café representó un total de US\$ 663.62 millones en el 2019 y el 7.32% de las exportaciones totales del país en ese año fueron de café según [5]. Precisamente, la finca El Injerto es uno de los grandes productores de café guatemalteco de calidad. Cuentan con varias hectáreas en Huehuetenango para la producción de café y lo exportan varios países tales como Corea del Sur, USA, Alemania, Islandia, entre muchos otros.

A pesar de la robustez de de la producción de café de esta empresa, hay algunos procesos que aún se pueden eficientizar más. Tal es el caso del secado de café. Se riega el café en un patio grande para que le pegue el sol a los granos. Se necesita que este sea movido constantemente para que el sol llegue a cada grano. Actualmente se hace con rastrillos. No obstante, este proceso se puede automatizar, de manera que movimiento del café sea más uniforme, más constante y así el sol secará mejor el café.

El robot móvil cubrirá esta necesidad, pues este se encarga del constante movimiento del café durante todo el día. Automatizar este procesos con el robot móvil garantizará la calidad del grano de café a los estándares internacionales, permaneciendo así su buena fama en el extranjero.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar el sistema electrónico y de control de un robot móvil para secado de café.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar los circuitos electrónicos y los PCBs de:
  - Circuito máster del robot móvil.
  - Circuito para los módulos DWM1001-DEV tipo *Anchor*.
  - Circuito para el motor elevador de las aspas.
  - Circuito del control remoto.
- Simular la trayectoria del robot móvil dentro del terreno de trabajo utilizando un controlador no lineal.
- Realizar un sistema de ubicación en tiempo real (RTLS) creado por los módulos DWM1001-DEV.
- Diseñar un sistema de alimentación de energía capaz de operar durante 7 horas.
- Implementar un sistema electrónico para levantar y bajar las aspas.
- Añadir un control remoto de tal manera que el usuario sea capaz de manipular al robot móvil a gusto y cuando él desee.
- Integrar los diferentes módulos en un solo sistema.
- Hacer un listado completo de los componentes electrónicos utilizados para conocer el costo completo del robot (incluyendo el costo de fabricación de los PCBs).



El trabajo realizado en este proyecto consistió en el diseño y la construcción en protoboard de todos los circuitos electrónicos mencionados en los objetivos específicos, además de sus respectivas pruebas en simulaciones digitales. Debido a la problemática relacionada con la pandemia COVID-19 el alcance de este proyecto tuvo un cambio, pero se propone una metodología para realizar las pruebas que hacen falta, es decir la integración de todos los sistemas dentro del robot móvil, y realizar la fabricación de los PCBs.

Básicamente, se utiliza una Unidad de Medición Inercial para obtener la orientación del robot móvil. También se utilizan unos sensores tipo *encoders* para determinar la velocidad de las ruedas, evitando así deslizamientos que afecten la trayectoria del robot. Se le añade una red con cinco módulos DWM1001-DEV, que indican el posicionamiento en tiempo real del robot dentro del terreno de trabajo. Todos estos sensores son conectados a un microcontrolador que procesa toda la información. todos estos sensores fueron probados con el microcontrolador y los resultados se muestran en este documento.

Por otra parte, se implementa un sistema de tracción capaz de movilizar al robot, esto incluye la selección de los motores y su driver. El proceso de selección y los cálculos se muestran en más adelante. Además, se diseñó el sistema electrónico capaz de levantar y bajar las aspas del móvil. Los circuitos que se han mencionado hasta ahora se construyeron en un protoboard que simula el PCB del robot móvil.

Externo a este, se construyó un circuito para el control remoto del robot, que es capaz de enviar y recibir información hacia y desde el móvil. El control remoto tiene le permite al usuario comandar el robot a su gusto. La descripción completa del control remoto y su proceso de diseño se redacta en las páginas por venir.

Otro circuito externo es el del módulo DWM1001-DEV que conforma la red de posicionamiento en tiempo real. Son cuatro módulo -con su propio circuito cada uno- externos al del robot móvil. Dichos circuitos fueron implementados también en protoboard como se detalla en su sección específica.

El proyecto incluye la utilización de un controlador no lineal para robots móvil capaz de seguir la trayectoria deseada. Se detalla el pseudocódigo de la programación y su proceso de diseño. El controlador fue probado en digital, específicamente con el software WEBOTS. En esta simulación se recreó el escenario del trabajo que debe realizar el robot, se diseñó el mismo robot con sus sensores y se le programó el controlador no lineal. Se muestra el resultado de la simulación. Por último, se realizó un BOM completo de la parte electrónica con sus costes.

## 6.1. DWM1001-DEV

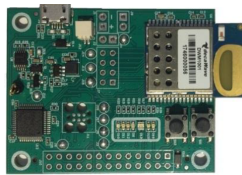


Figura 2: Módulo DWM1001-DEV

El módulo DWm1001-DEV (Figura (2)) tiene como función principal el generar un sistema coordinado 3D para determinar la posición exacta de un objeto que se mueve en dicho espacio. Básicamente es similar a un moduló GPS, con la diferencia que el DWM1001-DEV permite crear un único sistema coordinado. Además, posee dos grandes ventajas frente a un módulo que precisamente este proyecto fueron determinantes para su implementación. La primera ventaja es que posee un rango de precisión de 10 cm contra los 2.5 metros de los módulos GPS y la segunda ventaja es que actualiza la posición del objeto a cada 100 mili-segundos, lo que es mejor que los casi 1 segundos de los mejores módulos GPS. [6]

Entre otras características importantes se menciona que puede medir distancia de hasta 150 metros para espacios cerrados y casi 60 metros para espacios abiertos. Los módulos se comunican entre sí por medio de banda ultraancha (6.5 GHz). El módulo cuenta con pines de entrada y salida compatibles con una Raspberry Pi.

Para acceder a la información de estos módulos, se pueden utilizar varias vías. La primera es bluetooth que sirve perfectamente con la aplicación para Android creada por la empresa desarrolladora (DecaWave). También cuenta con entrada USB para conectarlo directamente a una PC comunicarse con él en el puerto serial. Otra forma es directamente con un microcontrolador a través de sus pines, específicamente vía SPI o UART. Aparte, cuenta con la opción de programar directamente el módulo y no utilizar ningún medio externo (que sirve

para aplicaciones básicas).

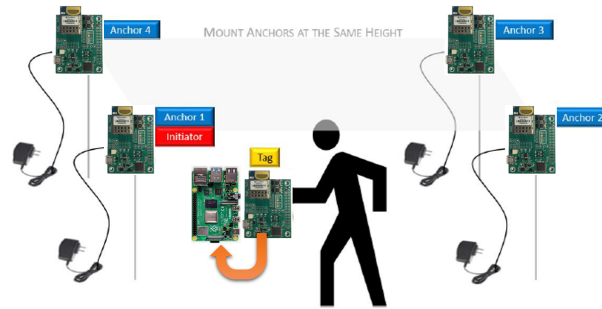


Figura 3: Posicionamiento de Anchors y Tag en RTLS

## 6.2. Real Time Location System (RTLS) con DWM1001-DEV

Un sistema de posicionamiento en tiempo real -Real Time Location System en inglés- permite conocer la posición de un objeto en tiempo real con base a ciertos puntos de referencia. El Módulo electrónico: DWM1001-DEV permite generar un RTLS. En este sistema se tienen módulos que funcionan como Anchor, Anchor Initiator y Tag. Los Anchor son DWM1001 que están fijos y no se mueven y estos son los puntos de referencia del sistema. El Anchor Initiator funciona como el origen con coordenada (0,0). El es el que se está moviendo en el tiempo y al que se le desea conocer su posición con respecto a los de referencia (Anchors).

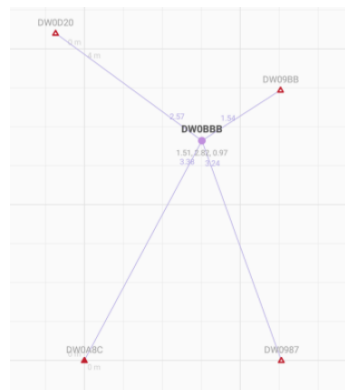


Figura 4: Representación RTLS

El sistema RTLS proporciona la posición del Tag con respecto a los Anchors, tanto las distancias en línea recta como la coordenada. Estos datos se puede leer con un microcontrolador conectado al Tag. En la Figura (3) se observa una animación del posicionamiento de los Anchors y del Tag en un RTLS. En la imagen se observa una Raspberry Pi como controlador que lee los datos del Tag, pero en este trabajo se usa un Arduino DUE.

En la Figura (4) se observa una representación de los datos que se obtienen del Tag. En este caso el Tag está obteniendo las distancias lineales hacia los Anchors y así se obtiene su

posición actual en el espacio. Si se desea conocer más acerca de este módulo se recomienda visitar [4].

### 6.3. Modelo del unicycle

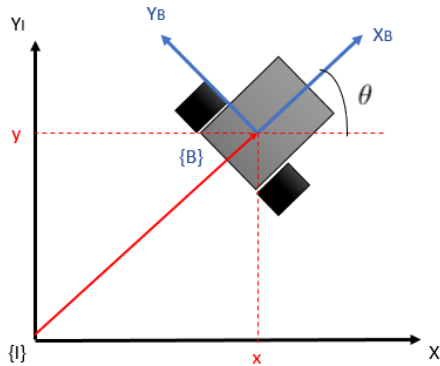


Figura 5: Pose de unicycle

Para poder controlar a un Robot móvil: primero se debe conocer la expresión matemática que describe su movimiento. En robótica a este se le conoce como el modelo del unicycle. Un unicycle es el robot móvil más sencillo que puede haber, pues es puntual y cuenta con solo dos ruedas; una en cada lado. No obstante, este modelo es capaz de representar a la mayoría de robots que tienen la capacidad de desplazarse en una superficie, aún vehículos más grandes se podrían describir con este modelo, como barcos, autos, tanques, etc. El robot secador de café se puede describir completamente con este modelo, ya que cuenta precisamente con dos ruedas (dos ruedas con tracción y solo una rueda loca para estabilización).

La configuración de un robot representa las variables que representan la posición completa del robot en el espacio en cierto tiempo. En el caso del unicycle se necesita conocer sus coordenadas  $(x, y)$  y su orientación  $\theta$ , tal como se muestra en la Figura (5). Entonces la configuración se define como

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = {}^I\xi$$

No obstante se desea conocer no solo la pose sino que su cinemática. La cinemática diferencial es entonces,

$${}^I\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

El modelo del unicycle nos da la ventaja que es fácil encontrar su cinemática, pues se conocen las restricciones de sus velocidad, tal como se observa en la Figura (6). Tiene una

velocidad  $v$  en dirección vertical  $X_B$ , horizontalmente no cuenta con velocidad por lo que  $\dot{y} = 0$  y su velocidad angular es  $\dot{\theta} = \omega$ . Entonces su Cinemática: esta dada por

$${}^B \dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

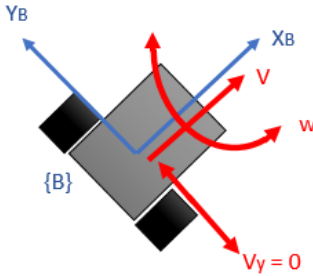


Figura 6: Movimiento del unicycle

Nótese que esta expresión de la cinemática del robot móvil está expresada con respecto al Marco de referencia: del mismo robot  $\{B\}$ . Para convertirlo al Marco de referencia inercial:  $\{I\}$  se le debe multiplicar la matriz de rotación al vector de velocidad, es decir

$${}^I \mathbf{v} = ({}^I \mathbf{R}_B) ({}^B \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La velocidad angular es la misma en ambos marcos de referencia:  ${}^I \dot{\theta} = {}^B \dot{\theta} = \omega$ . Si unimos esta información con la de la Ecuación (2) se obtiene el **modelo del unicycle**:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \quad (3)$$

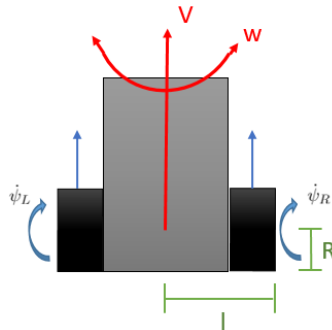


Figura 7

Si se desea obtener la velocidad lineal  $v$  y angular  $\omega$  del unicycle se pueden utilizar las Ecuaciones (4). En donde  $\dot{\psi}_R$  y  $\dot{\psi}_L$  representan las velocidades angulares de las ruedas derechas e izquierdas, respectivamente, como se muestra en la Figura (7).

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{2}R(\dot{\psi}_R + \dot{\psi}_L) \\ \omega &= \frac{R}{2l}(\dot{\psi}_R - \dot{\psi}_L) \end{aligned} \quad (4)$$

De manera inversa se puede conocer las velocidades angulares de las ruedas  $\dot{\psi}_R$  y  $\dot{\psi}_L$  si se conoce la velocidad lineal  $v$  y angular  $\omega$  con las Ecuaciones (5).

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_R &= \frac{2v + 2\omega l}{2R} \\ \dot{\psi}_L &= \frac{2v - 2\omega l}{2R} \end{aligned} \quad (5)$$

## 6.4. Control no lineal de robots móviles

Si se desea que el robot móvil (representado por el modelo del unicycle) vaya de un punto inicial  $P_i$  a un punto final  $P_f$  se necesita un Controlador. En este caso se usa un Controlador No Lineal (se ve en las Ecuaciones (3) que el modelo está representado por Ecuaciones no lineales:).

En la Figura (8) se observan los parámetros necesarios para realizar el recorrido. Este controlador garantiza que que el eje  $X$  del unicycle  $X_B$  queda alineado con el eje horizontal del marco inercial  $X_I = X_G$  y sus coordenadas serán las mismas. El controlador busca reducir la distancia entre los puntos  $\rho$ , la diferencia de la orientación del robot con el punto  $\alpha$  y con el eje horizontal del inercial  $\beta$ .

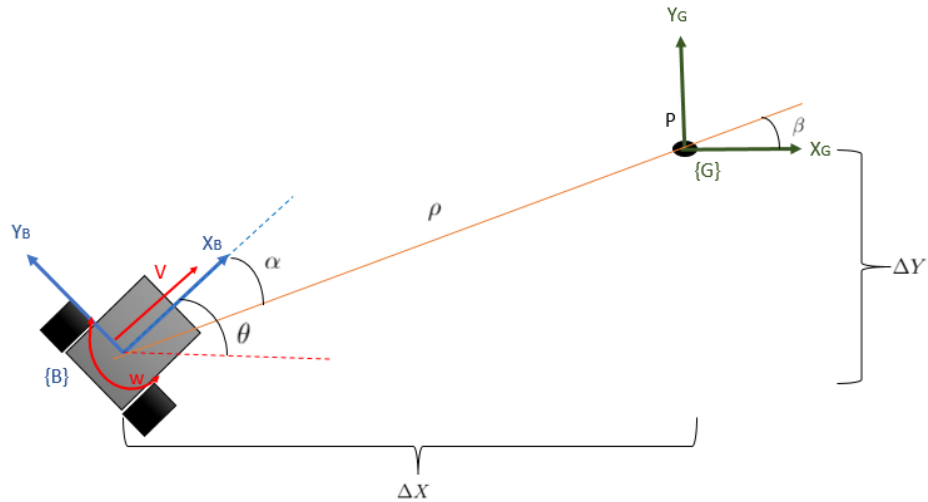


Figura 8: Control no lineal

Las ecuaciones se muestran en (6). Nótese el uso de la función  $atan2()$  de programación que retorna un ángulo entre  $(-\pi, \pi]$ . Además el controlador funciona si  $\alpha \in (\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ , afuera de este tendrá problemas. Se determinan entonces los valores de la velocidad lineal  $v$  y velocidad angular  $\omega$  mediante las Ecuaciones (7), en dónde  $K_\rho$ ,  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  son las constantes seleccionadas del controlador no lineal. Para la selección de estas constantes se deben considerar las restricciones dadas por las Ecuaciones (8). Luego se utilizan los resultados en (7) en las Ecuaciones (5) para determinar las velocidades en cada rueda.

$$\begin{aligned}\rho &= \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \\ \alpha &= -\alpha + atan2\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) \\ \beta &= -\theta - \alpha\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}v &= K_\rho \rho \\ \omega &= K_\alpha \alpha + K_\beta \beta\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}K_\alpha &> 0 \\ K_\alpha - K_\rho &> 0 \\ K_\beta &< 0\end{aligned}\tag{8}$$

Cabe mencionar que  $\Delta X = X_f - X_a$  dónde  $X_f$  es el punto final al que se desea llegar y  $X_a$  pertenece a la posición horizontal de robot móvil actualmente; este valor va cambiando conforme se va moviendo el robot. Lo mismo sucede con el caso de  $\Delta Y$ . Entonces  $X_a$  y  $Y_a$  se obtienen con el DWM1001-DEV. La otra entrada es  $\theta$ , que es la orientación actual del robot móvil, que en este caso está medido por la IMU 9 GDL -ver Sección (6.5).

Seguidamente se hace un resumen mediante pasos de cómo funciona el controlador no lineal mediante una lista de pasos. [7]

1. Seleccionar las constantes  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$  y  $K_\rho$ .
2. Establecer una distancia pequeña de cercanía, por ejemplo:  $dX = dY = 0.1 \text{ m}$
3. Leer los datos de posición actual del robot móvil  $(X_a, Y_a)$  con el DWM1001.
4. Leer la orientación actual del robot  $\theta$  con la IMU 9 GDL.
5. Calcular las diferencias de distancias  $\Delta X$  y  $\Delta Y$ .
6. Si  $\Delta X < dX$  y  $\Delta Y < dY$ , entonces detener el robot. Sino continuar con el siguiente paso.
7. Calcular  $\rho$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  con las Ecuaciones (6).
8. Calcular las velocidades  $v$  y  $\omega$  con las Ecuaciones (7).
9. Calcular las velocidades en cada rueda con las Ecuaciones (5).
10. Enviar PWM a cada rueda según su velocidad.
11. Regresar al paso (3).

## 6.5. Orientación robot móvil (IMU 9 GDL)

Como se mencionó antes el controlador del robot móvil debe conocer tanto la posición en tiempo real como su orientación con respecto a un eje de referencia -representado como  $\theta$  en la Figura (8)-. Para esto se utiliza un módulo electrónico llamado IMU 9 Grados de Libertad. Este incluye un magnetómetro, un acelerómetro y un giroscopio. El magnetómetro miden el campo magnético de la tierra y su dirección. Esta la usan como referencia del norte. Un acelerómetro mide las aceleraciones en los ejes coordenados, pero no solo las cambios de velocidades sino que también aquel relacionado con su peso experimentado por su masa. En otras palabras si se encuentra en reposo se medirá la aceleración gravitacional hacia abajo. El giroscopio mide la velocidad angular en los tres ejes cuando este está cambiando su orientación. Al integrarse estos tres sensores se obtiene la IMU de 9 GDL y su ventaja es que nos permite conocer la orientación exacta de este en determinado momento.

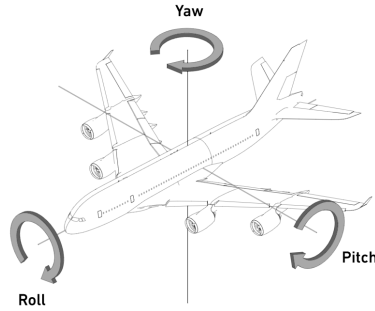


Figura 9: Ángulos Roll, Pitch y Yaw [8]

La orientación exacta se refiere a que se conocen los ángulos de Euler que definen la orientación en el espacio del objeto. Estos no son más que el valor de los ángulos que se generan entre el objeto y los ejes inerciales. Con estos tres valores se conoce la orientación exacta de un objeto en el espacio. Se les conoce como Roll, Pitch y Yaw como se observa en la Figura (9), denominados también como  $\theta$ ,  $\phi$  y  $\psi$ , respectivamente. Nótese que para un robot móvil solo es de interés la rotación en el eje Z, es decir el ángulo Yaw, ya que el robot siempre está pegado al piso. [9]

Para obtener los ángulos de Euler a partir de los datos que entrega cada uno de los sensores de la IMU se utiliza un método conocido normalmente como fusión de sensores. Se denomina  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  a las aceleraciones medidas por el acelerómetro en sus respectivos ejes. Se utiliza  $m_x$ ,  $m_y$  y  $m_z$  para los datos provistos por el magnetómetro en cada uno de los ejes. Se representan las velocidades angulares en cada uno de los ejes con  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  y  $\omega_z$ ; dados por el giroscopio.

El primer paso consiste en obtener los ángulos roll y pitch del acelerómetro

$$\theta_A = \tan^{-1} \left( \frac{a_y}{a_z} \right) \quad \phi_A = \tan^{-1} \left( -\frac{a_x}{\sqrt{(a_y^2 + a_z^2)}} \right) \quad (9)$$

Luego se calcula el ángulo yaw a partir de las mediciones del magnetómetro

$$\psi_M = \tan^{-1} \left( \frac{m_y}{m_x} \right) \quad (10)$$

Se calculan el roll, pitch y yaw del giroscopio en base al periodo de tiempo que se realiza la medición  $-\Delta t-$

$$\theta_G = \omega_x \cdot \Delta t \quad \phi_G = \omega_y \cdot \Delta t \quad \psi_G = \omega_z \cdot \Delta t \quad (11)$$

Se realiza una fusión de sensores del acelerómetro y el magnetómetro para obtener los nuevos roll, pitch y yaw, utilizando los resultados de las Ecuaciones (9) y (10).

$$\begin{aligned} M_x &= m_x \cdot \cos(\phi_A) + m_z \cdot \sin(\phi_A) \\ M_y &= m_x \cdot \sin(\theta_A) \cdot \sin(\phi_A) + m_y \cdot \cos(\theta_A) - m_z \cdot \sin(\theta_A) \cdot \cos(\phi_A) \\ \psi_{AM} &= \tan \left( \frac{M_y}{M_x} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Hasta este punto ya se tienen los datos  $\theta_A$ ,  $\phi_A$  y  $\psi_{AM}$  y el trío del giroscopio;  $\theta_G$ ,  $\phi_G$  y  $\psi_G$ . Cabe destacar que  $\theta_A = \theta$  y  $\phi_A = \phi$ . Para obtener el último dato se utiliza un filtro complementario.

$$\varepsilon = \lambda \cdot (\varepsilon + Gyro \cdot \Delta t) + (1 - \lambda) \cdot \psi_{AM}$$

dónde  $\varepsilon$  representa los tres ángulos de Euler ( $\theta$ ,  $\phi$  y  $\psi$ ),  $Gyro$  son los tres datos del giroscopio ( $\theta_G$ ,  $\phi_G$  y  $\psi_G$ ) y  $\lambda$  es una constante de filtrado, que este caso se utilizó  $\lambda = 0.98$ . No obstante, es posible utilizar algún otro filtro, se recomienda el de Kalman [10].

## 6.6. Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado al cual se le programan las instrucción que debe ejecutar. Este cuenta con una unidad de procesamiento, memoria, periféricos y pines de entrada y salida. Básicamente este el que controla un robot o un circuito. A se le conectan los sensores del robot como entradas y los actuadores se le conectan a sus salidas. En base a lo que lee de los sensores manda instrucciones a los actuadores para que se comporten de cierta forma.

El Arduino DUE es una placa que incluye un microcontrolador - ver Figura (10). El microcontrolador que utiliza es el *Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU*. Es un microcontrolador de alto procesamiento de 32 bit y una velocidad máxima de 84 MHz. Incluye 5 UARTs, 4 canales de SPI, 3 timers de propósito general de 32 bits, 12 bit ADC y 12 bits DAC entre muchas otras cosas. La placa Arduino DUE provee 54 pines de entrada y salida, de los que 12 se pueden usar como PWM, 4 UART, 12 analógicos, 2 DAC, entre otros. Cuenta con 512K bytes de memoria Flash y 96K bytes de memoria SRAM. Su ventaja de

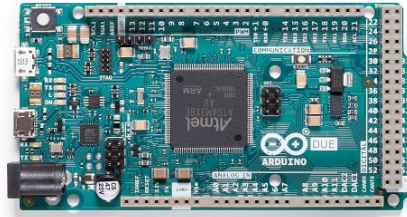


Figura 10: Arduino DUE

alto procesamiento es el determinante para su uso como el controlador del robot móvil de este trabajo.

## 6.7. Control de motores

Un elemento muy importante de los robots móviles son los motores y los dispositivos utilizados para su control. Los motores no se pueden conectar directamente a un microcontrolador debido a que la corriente que este entrega no es la suficiente para la alimentación del motor por eso se utiliza un driver -ver Figura (54a)-. Este recibe la señal del microcontrolador para prender o apagar el motor y el driver le envía la corriente y voltaje necesaria para que el motor funcione. Además estos permiten hacer girar el motor para ambos lados y hasta variar su velocidad, sin mencionar que traer protecciones de sobre corriente para no dañar el controlador. Tanto la dirección como la velocidad a la que debe funcionar el motor la dicta el microcontrolador al driver y este hace actuar al motor.

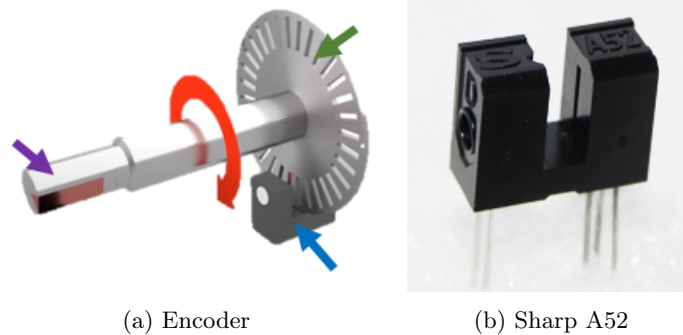


Figura 11

Puede suceder que el driver le asigne cierta velocidad pero debido a deslizamiento en el piso o a ciertas fricciones el motor no gire a la velocidad establecida. Para determinar la velocidad real a la que está girando el motor se necesita usar un Encoder: -ver Figura (11a)-. Este consiste en un fotointerruptor, un disco con ranuras y que va montado en el eje del motor -flechas celeste, verde y violeta en la imagen, respectivamente-. Cuando eje del motor gira, también lo hace el disco con ranuras. Estas pasan por fotointerruptor y va detectando cuando una ranura pasa por él. Conociendo cuantas ranuras pasan por un determinado tiempo, se puede conocer la velocidad angular real del motor.

Los encoders son foto-interruptores ranurados tipo Sharp A52, ver Figura (11b). Estos

tienen una ranura de 3mm de ancho. En una de las paredes internas a la ranura hay un emisor láser que es recibido por un foto-diodo. Cuando algún objeto pasa a través de la ranura el foto diodo detecta la ausencia del láser y envía una señal de 5V en su pin  $V_o$  indicando la interferencia del área no ranurada. Este impulso creciente activa la interrupción de un pin digital, en la cual se calcula la velocidad en términos de  $rpm$  con la Ecuación (13), dónde los tiempos están medidos en milisegundos y  $N_{ticks}$  representa la cantidad de ranuras que tiene el encoder.

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_{actual} - t_{anterior} \\ w &= \frac{2 \pi / N_{ticks}}{\Delta t / 1000} \\ rpm &= w \left( \frac{60}{2 \pi} \right)\end{aligned}\tag{13}$$

## 6.8. Comunicación de radiofrecuencia



Figura 12: NRF24L01

La comunicación por radiofrecuencia es una comunicación inalámbrica entre dos dispositivos electrónicos. Utiliza ondas del espectro electromagnético que utiliza ondas desde los 3 Hz hasta los 300 GHz. El módulo electrónico NRF24L01 utiliza este tipo de ondas para su comunicación inalámbrica. Este se usará en el trabajo para la comunicación del control remoto con el robot móvil. Se utilizan dos módulos y ambos funcionan como emisor y receptor, es decir la comunicación es bi-direccional. Es capaz de transmitir 32 bytes. Se utiliza una antena para aumentar la distancia máxima de comunicación (aprox. 1Km). En la Figura (12) se observa el módulo con la antena.

## 6.9. Puente H

Si no se tiene un driver y se desea controlar la dirección de un motor, ya sea para adelante o para atrás se puede utilizar un circuito Puente H. Este circuito recibe una señal digital para que el motor avance para enfrente y otra señal digital para que avance el motor hacia atrás. En la Figura (13) se muestra el circuito. El circuito consiste de Transistores: de Darlington tanto PNP, como NPN y resistencia. El círculo con la letra M representa el motor. A y B son las entradas de las señales digitales.

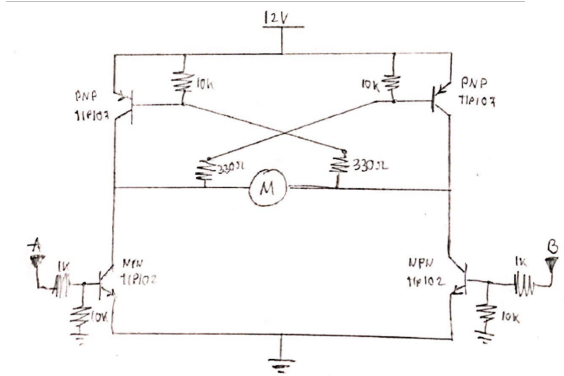


Figura 13: Circuito puente H

Cuando se activa la señal de A y B es cero, entonces se activa en transistor NPN izquierdo y el PNP derecho. Entonces la corriente fluye de la fuente y atraviesa el motor en dirección derecha para dirigirse a tierra. Entonces el motor gira hacia la derecha. En el caso contrario, cuando se activa B y A es cero, entonces se activa el transistor NPN derecho y el PNP izquierdo, entonces la corriente fluye de la fuente atravesando el motor hacia la izquierda para terminar en la tierra. El motor girará entonces para al izquierda.

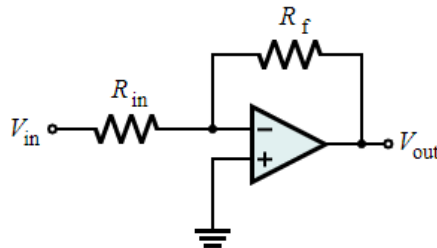


Figura 14: Circuito amplificador de voltaje

Las entradas A y B tiene que ser señales de 12V o 0V, pero el controlador entrega menos voltaje -5V o 3.3V dependiendo del tipo-. Por lo tanto se necesita un amplificador de voltaje. El circuito se representa en la Figura (14). Es consiste en un Op-Amp: amplificador de voltaje y las resistencias correspondientes calculadas. La formula que rige la amplificación de voltaje es la siguiente,

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

dónde  $A$  es la ganancia de amplificación.  $A = 2.4$  si la entrada son 5V y  $A = 3.63$  si la entrada son 3.3V. Se selecciona la combinación adecuada de resistencia para obtener la ganancia deseada de acuerdo a la ecuación.

## 6.10. Cálculo de batería

Puesto que las baterías reales no se descargan linealmente, es decir si entregan mayor flujo de corriente, su capacidad de carga -medida en Amperios-hora- se reduce. Esta no linealidad se toma en cuenta mediante la formula para el cálculo de baterías de Peukert:

$$T = \frac{C}{I^n} \quad (14)$$

donde  $T$  es el tiempo de vida de la batería,  $C$  es la capacidad teórica medida en Amperios-hora -que es la que se provee en la hoja de datos de la batería-,  $I$  es la corriente que entrega constantemente la batería (la corriente total de consumo medido) y  $n$  es el número de Peukert, que es el coeficiente de no linealidad de la descarga de baterías. Las baterías tienen un número de Peukert de  $n = 1$  a  $n = 1.4$ . [11]

## 6.11. Cálculo torque motor robot móvil

Para calcular el torque que necesitan los motores de un robot móvil se debe conocer la masa total del robot, la cantidad e motores, el radio de la rueda, la inclinación máxima del suelo donde se moverá, la aceleración deseada, y la eficiencia de los motores. Cabe mencionar que el próximo cálculo aplica solamente para motores conectados directamente con la rueda [11]. Se realiza el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas involucradas en la rueda del robot -Figura (15)-.

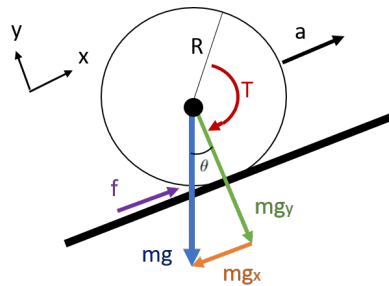


Figura 15: DCL rueda de robot móvil

Matemáticamente se expresa,

$$\sum F_x = m a = f - (m g)_x$$

dónde  $m$  es la masa del robot móvil,  $a$  es la aceleración y  $f$  es la fricción de las ruedas con el suelo, precisamente la que hace que la rueda avance hacia adelante. Es decir, va relacionada al torque con la que gira la rueda sobre su eje  $T$  y el radio de la rueda  $R$ ,

$$f = \frac{T}{R}$$

Realizando un poco de álgebra se obtiene la expresión para el torque:

$$T = \left( \frac{100}{e} \right) \left( \frac{(a + g \operatorname{sen}(\theta)) m R}{N} \right) \quad (15)$$

La cantidad de motores se representa como  $N$  y la eficiencia total de todo el sistema de motor  $e$  incluye las eficiencias de batería  $e_b$ , del controlador del motor  $e_{mc}$ , de los cepillos internos del motor DC  $e_{dc}$  y de cada engrane  $n$  de la caja reductora  $e_c^n$ . La eficiencia total de todo el sistema motor en un robot móvil es

$$e = (e_b)(e_{mc})(e_{dc})(e_c^n)$$



---

### Descripción del problema y funcionamiento del robot

---

Como se mencionó anteriormente, este proyecto surgió como la necesidad de optimizar el proceso de secado de café guatemalteco de alta calidad. Actualmente, se riega el café en un patio grande para que el sol vaya secando los granos durante todo el día. En el patio se seccionan los diferentes tipos de café en rectángulos, véase la Figura (16). Para procurar que el sol seque a todos los granos uniformemente, se raya el terreno de café manualmente con un rastrillo. No obstante esto presenta complicaciones ya que se presentan imperfecciones en el rayado, lo que a su vez impide que los granos se sequen igualmente.



Figura 16: Café en proceso de ser secado

La propuesta en este trabajo de graduación es la implementación de un robot móvil autónomo que porte un rastrillo y que vaya rayando el terreno de café mientras vaya cruzando por el terreno. La integración de un controlador en dicho robot lo forzará a seguir una trayectoria sobre el terreno. Las ventajas del robot móvil en esta tarea es que el recorrido de rayado siempre es el mismo y es más exacto. Además, trabajo casi sin la intervención humana porque es autónomo permitiendo así que el personal se dedique a otros procesos más delicados. A esto se le añade el hecho que un robot trabaje con la misma intensidad durante todo su trabajo, es decir mantiene su velocidad y su exactitud,

La trayectoria del robot móvil dentro del terreno de café se muestra en la Figura (17). Empieza avanzando verticalmente hasta finalizar el terreno de café. Entonces dará un giro de  $180^\circ$  para empezar a rayar verticalmente pero en el sentido contrario. Este giro es controlado para que el nuevo rayado sea exactamente después de la franja ya rayada en la ida. Este proceso se repite hasta que el robot llegue al final horizontal del terreno. Cuando esto sucede, el robot da un giro de  $270^\circ$  para empezar a rayar horizontalmente.

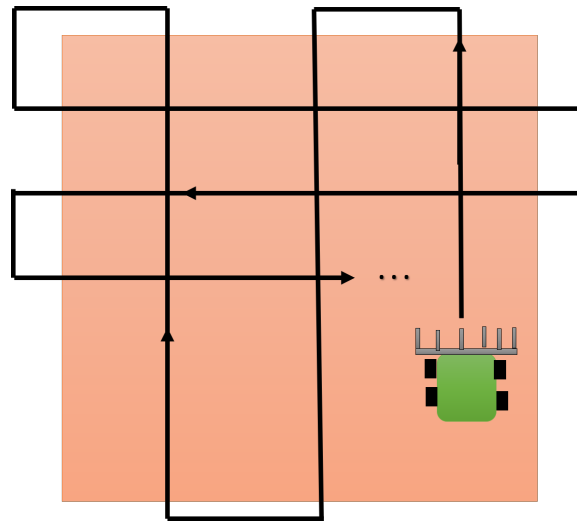


Figura 17: Representación del recorrido del robot móvil

El diseño electrónico y de control del robot se realizó con bae en este funcionamiento y tomando en cuenta los aspectos externos importantes. Por ejemplo, el sistema de tracción se diseñó para que el torque fuese suficiente para poder abrirse paso por café mojado. Para el suministro energético se tomó en cuenta el hecho que la jornada de secado dura aprox. 7 horas. Además, se implementaron los sensores capaces de entregar la información que el controlador requiere para que el robot conozca su posicionamiento en tiempo real dentro y fuera del terreno de café, y así poder seguir la trayectoria.

## Prototipo 1

El primer diseño que se realizó se muestra en la Figura (18). El diseño electrónico consistió principalmente de la parte en suministro energético, la tracción para poder moverse, los sensores y microcontroladores que permiten controlar la trayectoria del robot en el terreno de café y el control remoto para manejo a distancia.

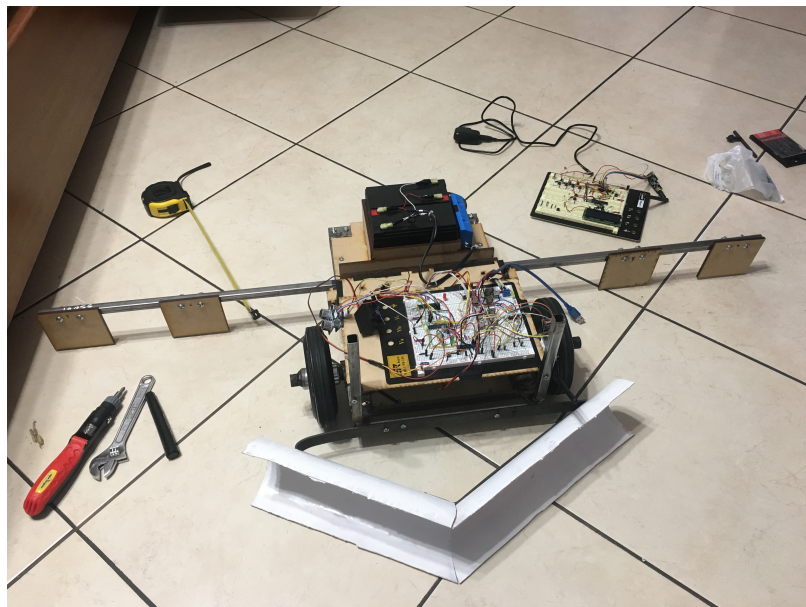


Figura 18: Imagen del Prototipo 1

El recorrido del robot móvil prototipo 1 en el terreno de café se muestra en la Figura (19). Se utilizó un juego de módulos láser como indicadores de finalización del terreno de café. Es decir, se colocó un módulo láser en cada esquina del terreno de modo que los Rayos

láser: enmarcan el terreno de café y el robot cuenta con receptores láser. Entonces cuando el robot móvil cruza dichos rayos láser, éste reconoce que él terminó el área de café y es necesario girar 180° para rayar el terreno en sentido contrario. Los módulos láser colocados en las esquinas se insertaron en torres de 30 cm, de modo que cuando el robot está cerca de ellas, las detecta con un sensor de proximidad. De este modo puede conocer cuando ya terminó de rayar el terreno a lo ancho y debe empezar a rayar horizontalmente. Este proceso se repite durante toda la jornada de trabajo.

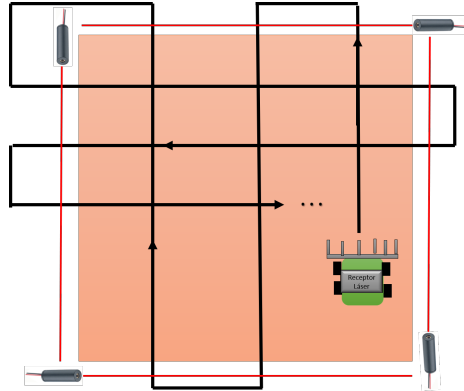


Figura 19: Representación del recorrido del Prototipo 1

En la Figura (20) se muestra el diagrama de bloques de toda la parte electrónica del robot móvil. Los cuadros de color negro en la imagen representan el suministro energético y su circuito regulador. Básicamente, el circuito regulador recibe la corriente de los paneles solares para mantener alimentada la batería -solamente para alargar su vida de trabajo y no para mantenerla cargada completamente todo el tiempo de trabajo-. El circuito regulador utiliza la carga de la batería para alimentar a todos los demás circuitos a sus voltajes correspondientes. En la Sección (8.1) se detalla más al respecto. El círculo color naranja representa el sistema de tracción, que incluye los motores de las rueda y el circuito de potencia que se encarga hacer girar dichos motores en ambos sentidos con el fin de hacer avanzar o girar al robot móvil, refiérase a la Sección (8.2).

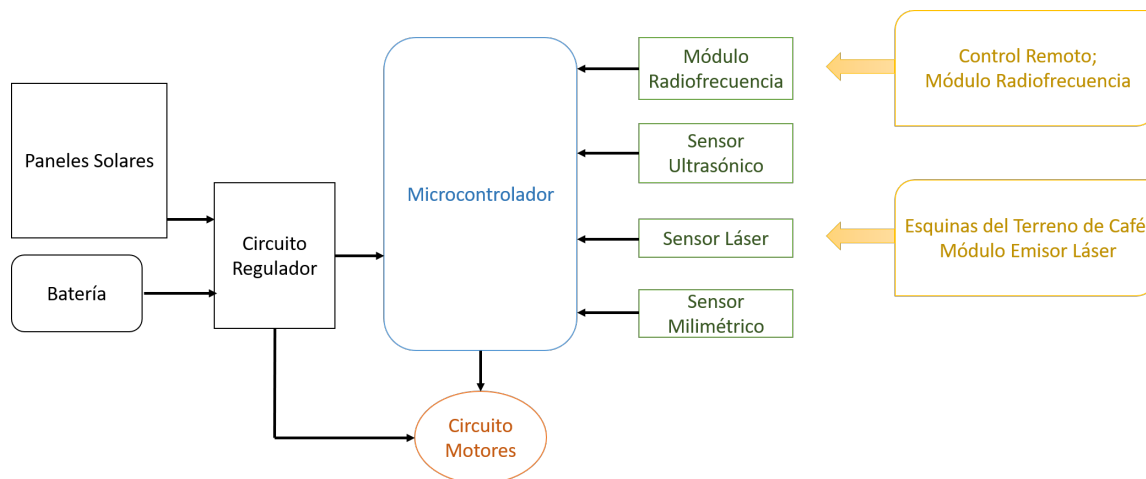


Figura 20: Diagrama de bloques Prototipo 1

El microcontrolador, en azul, es el encargado de recibir los datos de los sensores, en

verde, y procesarlos para hacer actuar a los motores. Los circuitos externos al robot móvil se muestran en color amarillo. Entre ellos está el módulo emisor láser, que son puestos en las esquinas del terreno de café, como se ilustran en la Figura (19) y el control remoto, que se utiliza para controlar al robot móvil a distancia por un humano. La utilización de los sensores como sistema de posicionamiento del robot móvil y los detalles del control remoto se especifican en la Secciones (8.3) y (8.4), respectivamente. En la Figura (21) se observa la ilustración de los componentes y circuitos electrónicos implementados en el robot móvil.

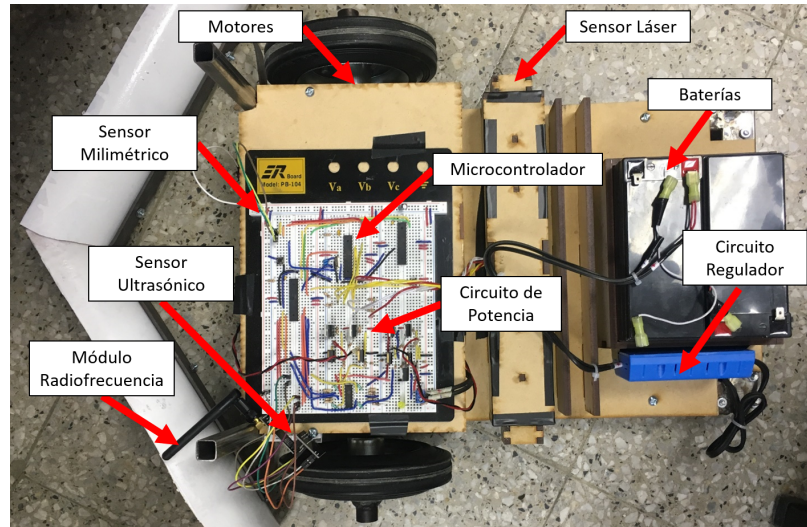


Figura 21: Componentes y circuitos electrónicos del Prototipo 1

## 8.1. Suministro energético y circuito regulador

El suministro energético incluye la batería, los paneles solares y el circuito regulador, que obtiene la carga de los paneles y los utiliza para mantener la vida de la batería. Además, regula el voltaje de la batería para entregar los voltajes requeridos a cada circuito eléctrico.

### 8.1.1. Batería

La demanda energética del robot es de un poco más de 2 Amperios. Cada motor utiliza aprox. 1A cuando avanza hacia delante y los demás circuitos y sensores requieren unas decenas de miliamperios. Para una duración de batería de 7 horas y media se necesitaría una batería de 17.5 Amperios-hora, según la Ecuación (14) y tomando  $n = 1.2$ . Por lo tanto se utilizaron dos baterías para UPS de 12 volts y 9 Amperios-hora cada una y se conectaron en paralelo para obtener una capacidad de 18AH, y suplir la demanda energética del robot móvil. La batería es capaz de entregar máximo 10A, lo que es suficiente para lo que demanda la electrónica del robot. No obstante en este cálculo no se tomaron en cuenta las altas demandas de corriente pico en el primer segundo cuando los motores empiezan a avanzar y tienen que realizar suficiente torque para vencer el estado estático de todo el robot. Considerando que esto sucede múltiples veces a lo largo de la trayectoria -cuando realiza

giros y cambios de dirección- entonces la demanda energética es mayor. Esta es la razón de añadir paneles solares al robot; para alargar la vida de la batería cuando esté trabajando.

### 8.1.2. Panel solar

Se utilizaron dos paneles solares de 18 watts cada uno. Cada uno es capaz de entregar aprox. 700 miliamperios bajo luz solar intensa. Se estima entonces que ambos pueden suministrar en conjunto entre 1A a 1.4A, lo que podría alargar la vida de la batería hasta en 5 horas extra. Además, los paneles entregan 18 voltios; lo requerido para mantener baterías de 12V. Cada panel mide 42 x 28 cm y 2mm de espesor, es flexible y de bajo peso, específicamente 0.76lb. Esta última característica, el tamaño y la potencia fue determinante para la elección de este panel, ya que no le aporta mayor peso relativamente hablando y entregan suficiente corriente para este prototipo. (Figura 22a)

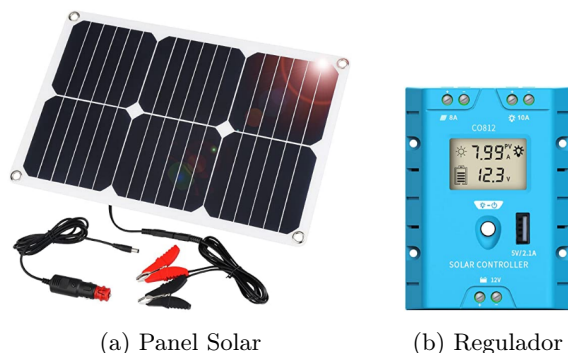


Figura 22: Componentes para el suministro energético del robot

### 8.1.3. Circuito regulador

Para mantener la duración de la batería con los paneles se utiliza el Circuito regulador: de la Figura (22b). Este regulador tiene entradas para panel solar y batería -ver Figura (23)-. Acepta hasta 10A de entrada en paneles solares y no más de 130 watts. Se le conecta una batería de 12V, a la cual carga cuando su voltaje está bajo. Aparte, tiene una salida de 12V/10A para alimentar algún aparato. Las cargas que demandan corriente alta se conectan directamente a la batería. Cabe mencionar que este regulador también sirve como protección, ya que cuenta con varias protecciones como protección contra sobrecarga, contra cortocircuitos, contra rayos, contra bajo voltaje, contra alto voltaje, y polaridad inversa.

Para este prototipo se conectaron todos los circuitos electrónicos y los motores a la salida superior derecha de 12V/10A del regulador, debido a que estos consumen aproximadamente el 25% de esta salida.. Los motores demandan 12V pero los demás circuitos electrónicos se alimentaron con 5V, los que se obtuvieron mediante un regulador de 12V a 5V tipo LM7805.

Los resultados obtenidos del implementar estos elementos electrónicos en el robot móvil se encuentra en la Sección (9.2).

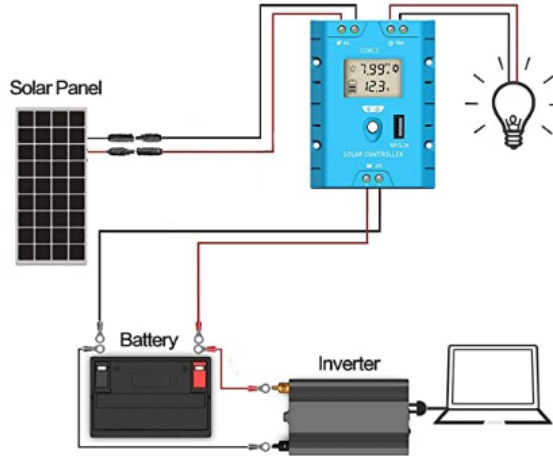


Figura 23: Diagrama del suministro energético

## 8.2. Tracción

En el sistema de Tracción: se incluyen el circuito de potencia para controlar los motores, que a su vez hacen girar las ruedas. Para la elección de los motores se tomaron en cuenta tres aspectos como prioridad: el torque, la corriente de consumo y la facilidad de compra (incluyendo el precio). Otros factores como velocidad angular máxima también se tomó en cuenta pero no fue prioridad. El cálculo del torque se realizó utilizando la Ecuación (15) con  $e = 65\%$ ,  $a = 0.1m/s^2$ ,  $m = 30 Lbs$ ,  $\theta_{max} = 4^\circ$ ,  $R = 8 cm$  y  $N = 2$  motores. Se obtuvo  $T = 6.7 Kg * cm$ . Por lo tanto se eligieron motores DC de  $7 Kg*cm$  que consumen casi 300 mA sin torque se oposición y casi 1.2A para torques de detención. Por último, este motor estaba disponible en Guatemala, por lo que satisfizo los aspectos prioritarios para la elección de motores. No obstante, este motor no dio los resultados esperados, en la Sección (9.1) se dará más detalle al respecto.

Se utilizó un Puente H por motor como circuito de potencia para controlar tanto la velocidad, como la dirección de giro de los motores. Estas dos se pueden controlar con dos señales PWM: del microcontrolador y esta es una gran ventaja del Puente H. Para mayor información acerca del Puente H refiérase a la Sección (6.9). Para la etapa de amplificación de voltaje -amplificar las señales del microcontrolador de 5V al voltaje con el que opera el Puente H, es decir 12V- se utilizó un Op-Amp no inversor LM324N. Se eligió este primero porque incluye varios Op-Amp en el chip y luego porque acepta cero volts en la pata de voltaje negativo. Esto es importante ya que solamente con baterías de 12V es imposible obtener -12V, así que es más fácil conectar este pin a tierra. Se utilizó  $R_f = 1.5K\Omega$  y  $R_{in} = 1K\Omega$ , con  $A = 2.4$ . Para el Puente H como tal se utilizaron los transistores PNP TIP107 y NPN TIP102. Se utilizaron estos ya que la corriente máxima de colector soportada es de 8A (-8A para los NPN) y corriente pico máximo de 15A (-15A para los NPN). Esta es corriente permitida más que suficiente para alimentar a los motores seleccionados. En la Figura (24) se observa el diagrama completo del circuito de potencia, dónde  $A$  y  $B$  representan las señales PWM provenientes del microcontrolador.

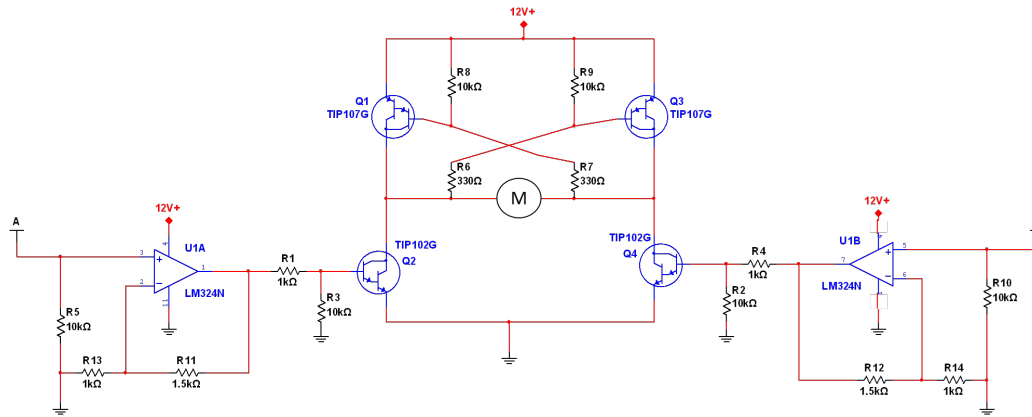


Figura 24: Circuito Puente H

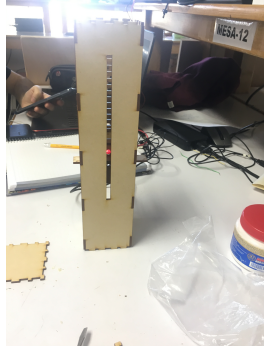
### 8.3. Sistema de posicionamiento del robot móvil

Debido a que se desea que el robot siga una trayectoria automáticamente es necesario integrarle varios sensores que le permita conocer su posición en tiempo real y así seguir el recorrido. La lectura de los sensores, el procesamiento de esta información y la activación de los actuadores en base a esta información, todo esto es trabajo del microcontrolador. Los sensores utilizados fueron cuatros sensores láser, un módulo NRF24L01, dos sensores ultrasónicos HCSR-04 y el sensor milimétrico VL53L0X.

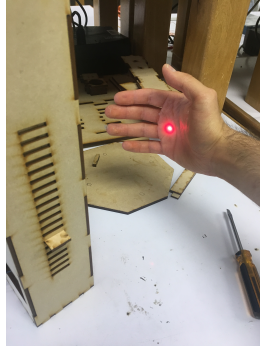
#### 8.3.1. Sistema láser

Como se explicó al inicio del capítulo referente a la Figura (19), para este prototipo se utilizaron módulos láser como indicadores de finalización del terreno de café. Básicamente se colocan módulos emisores de luz láser en las cuatro esquinas del rectángulo de café. El robot móvil cuenta con receptores láser, de modo que cuando cruza los rayos láser conoce que ya finalizó el terreno de café y debe girar.

Estos emisores láser se colocaron en torres de 30 cm de alto. el emisor láser se instaló dentro de la torre y este tiene altura variable mediante unas paletas que se colocan en la altura deseada y que sujetan al módulo emisor láser. La idea detrás de la altura variable es que para terrenos irregulares la luz láser no apunta directamente al sensor receptor láser colocado en el robot móvil, así que se puede variar para que estos queden alineados. En la Figura (25a) se muestra una imagen de la torre armada. En la Figura (25b) se observa la luz láser saliente y al costado de la torre se ven las ranuras en las cuales se puede insertar la pestaña para ajustar la altura del láser. Y en la Figura (25c) se muestra el interior de la torre y específicamente la cabina donde va sujetado el módulo láser y su respectiva pestaña para ajustar la altura.



(a) Torre



(b) Láser



(c) Torre adentro

Figura 25: Imágenes torre láser

Los módulos láser utilizados son como los que se muestran en la Figura (26), estos se alimentan con 5V, potencia de 5mw y el punto rojo es totalmente visible a 100 metros -más de lo suficiente para las dimensiones del terreno de café-.



Figura 26: Módulo láser

Los receptores instalados en el robot móvil son fotoresistencias de 12 mm de cara. Como su nombre lo indica, estos componentes son resistencia que con la presencia de luz varía su resistividad y por lo tanto el voltaje entre sus terminales. Por lo que este valor puede ser leído por una entrada analógica de un microcontrolador y saber así cuando existe un aumento de luz. Por ende, al recibir el rayo de luz láser el fotoresistor disminuye su resistividad y el microcontrolador lee valor analógico alto. Este valor analógico está en el rango de 0 a 1024, donde 0 es total ausencia de luz y 1024 y total presencia de lumínica. Se instalaron 4 sensores fotoresistivos, dos en cada lado del robot móvil, para que pueda detectar láser de ambos lados. Para lograr la distinción entre la luz solar y la luz láser fue necesario cubrir las fotoresistencias de la luz solar, de modo que siempre estuviera detectando oscuridad aún a plena luz de medio día y cuando un rayo láser entrara en contacto con el sensor, este leyera un incremento considerable de luz entrante. Para esto se insertaron los sensores en un doble tubo de PVC color negro. Este luego fue recubierto por una cobertura de MDF sellado para asegurar que no hubiese infiltración de luz solar alguna. La cobertura de MDF solo tiene una pequeña abertura al costado que es donde se supone entra nada más el rayo de luz láser. En la Figura (27) del lado izquierdo se muestra la cobertura de MDF ya montado en el robot móvil y del lado derecho se observa una aumentación del interior, dónde precisamente se encuentra el tubo de PVC negro. Los resultados y conclusiones de las pruebas de todo este sistema láser se detallan en la Sección (9.3).



Figura 27: Tubo para fotositencias

### 8.3.2. Sensores de distancia

Todo el sistema láser mencionado anteriormente solo sirve para que el robot móvil sepa cuando finaliza el terreno de café, es decir ya terminó de rayar la ida y entonces el láser le indica que debe girar  $180^\circ$  y empezar a rayar en sentido contrario. No obstante, se necesita de otro indicador para señalar el fin del recorrido de derecha a izquierda y empezar un recorrido de arriba a abajo. Este trabajo lo realiza el sensor ultrasónico HC-SR04. Este sensor mide la distancia hacia un objeto en un rango de 2cm hasta 4m. Se colocó un sensor HC-SR04 en cada lado del robot móvil. Cuando el robot se va acercando a la orilla del terreno, alguno de sus costados se acerca a las torres y el sensor ultrasónico lo detecta. Esta es la indicación para que el móvil de que debe realizar un giro de  $270^\circ$  y cambiar las direcciones de rayado. El motivo de que las torres tengan 30 cm de alto y cuadradas es precisamente para que estos sensores las puedan detectar.

Se utilizó otro sensor de distancia como apoyo a los mencionados; el VL53L0X -ver Figura (28)-. Este es un sensor de distancia milimétrico de alta precisión que funciona a base de láser. Tiene un rango de 2 metros y es un chip pequeño  $-2.4 \times 4.4 \text{ mm}-$ . Los datos se obtienen fácilmente, pues están disponibles vía  $I^2C$ . A diferencia del HC-SR04, este está diseñado para medir distancias relativamente más cortas a objetos pero con una mayor precisión. El error es de menos de 1 mm. La otra diferencia es que los sensores de distancia ultrasónicos se pueden ver afectados con superficies inclinadas, debido a que el sonido se desvía al rebotar en dicha superficie inclinada y ya no regresa a la parte receptora. Por lo que no capta la presencia del objeto. No obstante, el VL53L0X da buenos resultados con cualquier tipo de superficie por el hecho que funciona con luz láser. Esta no es desviada tan fácil con superficies irregulares como el sonido.

Esta última característica, la alta precisión y el tamaño pequeño, son útiles para refuerzo de los demás sensores. A pesar, de que el sistema láser es el encargado de señalarle al robot móvil la finalización del terreno de café, se eligió este sensor como apoyo para esta tarea por si el sistema láser falla. Esto lo realiza midiendo la distancia hacia el suelo, de modo que al medir la altura del suelo al sensor significa que no hay café, pero si se mide distancia de unos centímetros menor, significa que hay café debajo y por ende el robot aún no ha salido

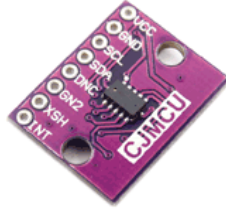


Figura 28: Módulo VL53L0X

del terreno. Desde dónde va instalado el sensor al suelo hay 8cm, pero cuando hay café en el suelo esta distancia se reduce a aproximadamente 4cm. El sensor es apto para este trabajo ya que los granos de café generan una superficie irregular que no afecta la medición por lo mencionado respecto a su utilización de láser. Aparte, su tamaño permite instalarlo en casi cualquier lugar del robot y su precisión milimétrica permite concluir si hay granos de café o no. En la Sección (9.3) se discute acerca de los resultados obtenidos y las conclusiones respecto a los sensores de distancia utilizados.

### 8.3.3. Microcontrolador

Se utilizó un ATMEGA328p como microcontrolador y es el encargado de leer la información de todos los sensores, procesarla y hacer actuar los motores de acuerdo a la información. Este microcontrolador cuenta con 28 pines de entrada y salida, de los cuales 13 son digitales y 6 son analógicos. Además, cuenta con comunicación UART,  $I^2C$ , SPI, seis salidas PWM. Tiene ADC de 10 bits, dos timers de 8 bits y un timer de 16 bits. Posee una velocidad de reloj interna de hasta 20 MHz, hasta 32K bytes de memoria Flash y 2K bytes de SRAM.

Se seleccionó el ATMEGA328p como microcontrolador *master* del robot móvil ya que cuenta con todas las características necesarias para la lectura de los sensores y el respectivo procesamiento de datos. En la Figura (29) se observa las conexiones del chip con los sensores y actuadores utilizados en este robot móvil. Los datos de las fotoresistencias, que son los receptores de luz láser, se obtienen mediante lectura analógica, por lo que fueron conectados a los pines A0 a A3 del microcontrolador (color rosa en la imagen). Cada sensor ultrasónico HC-SR04 requiere de un pulso PWM para generar el *trigger* y un digital que mide el eco. Por lo tanto, se utilizaron los pines D5 y D6 para generar los PWM y los pines D2 y D4 como entradas digitales para medir el pulso del eco. El sensor de distancia milimétrico envía los datos de las mediciones vía  $I^2C$ , que son los pines A4 (SDA) y A5 (SCL). El módulo de radiofrecuencia NRF24L01 funciona con comunicación SPI y dos digitales, por lo que se utilizaron los pines SCK, MISO, MOSI (D11-D13) y los digitales de salida D6-D7. Por último, el circuito de potencia de los motores recibe dos señales tipo PWM que se generan en los pines D9-D10 (color naranja en la imagen). Aparte se utilizó un reloj externo de 16MHz conectado a los pines OSC1 y OSC2. Otras razones por las que se eligió este microcontrolador fue porque es accesible y barato en Guatemala y porque se le puede programar con el lenguaje C++, utilizando la interfaz de Arduino <sup>®</sup>. Por último, es fácil escribirle la programación al chip haciendo uso de un módulo FTDI vía UART.

-	RESET	ATMEGA328P	A5	VL53L0X
-	RXD		A4	VL53L0X
-	TXD		A3	LÁSER
	D2		A2	LÁSER
HCSR-04	D2		A1	LÁSER
HCSR-04	D4		A0	LÁSER
5V	VCC		GND	0V
0V	GND		AREF	5V
OSC1	OSC1		VCC	5V
OSC2	OSC2		D13	NRF24L01
HCSR-04	D5		D12	NRF24L01
HCSR-04	D6		D11	NRF24L01
NRF24L01	D7		D10 - PWM	MOTOR A
NRF24L01	D8		D9 - PWM	MOTOR B

Figura 29: Conexiones del ATMEGA328p

## 8.4. Comunicación vía control remoto

### 8.4.1. Funcionamiento

Se mencionó anteriormente que el robot móvil de ser autónomo. No obstante, es importante que el usuario tenga alguna forma para controlarlo a su gusto, ya sea que quiera rayar el terreno de café de una forma diferente o simplemente que desee terminar la operación del robot antes de tiempo. Para esto se decidió añadir un control remoto. Este posee la capacidad de controlar el avance, los giros, la velocidad, las aspas y la activación del modo autónomo o controlador vía remota. El otro gran propósito es que el usuario pueda conocer información importante acerca del robot en tiempo real, como por ejemplo el nivel de batería, tiempo total de trabajo o mensaje de inicialización y modos de operación. El diseño del control remoto como tal se observa en la Figura (30).

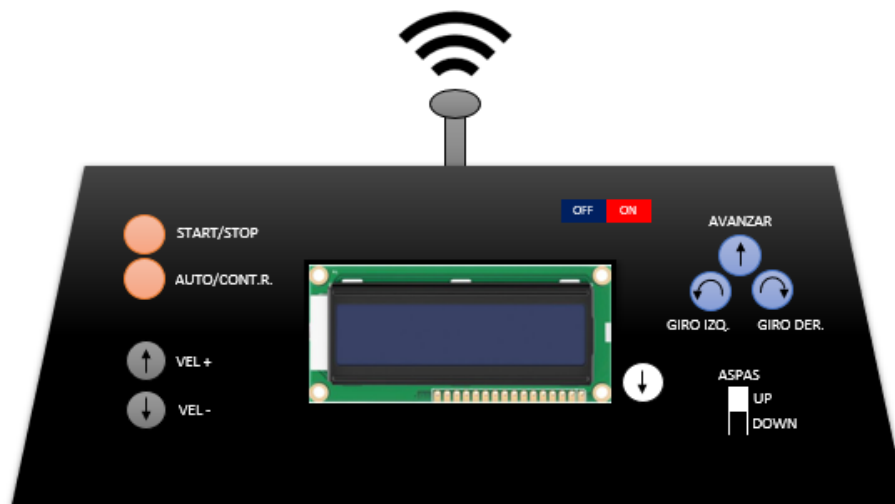


Figura 30: Mockup del control remoto

De color rojo pálido se muestran dos pulsadores: AUTO/CONTROL REMOTO y START/STOP. El primero sirve para seleccionar el modo de operación del robot, es decir el usuario elige si el robot funcionará de forma autónoma o controlado vía remota. Si es autónomo

entonces el robot sigue la trayectoria establecida en el terreno de café con la ayuda de sus sensores, pero si está en modo control remoto entonces el robot solamente seguirá las órdenes del usuario. Al encender el robot está en modo autónomo y al presionar una vez dicho botón se cambia a como control remoto, presionarlo una vez más regresa a autónomo. El segundo botón de color rojo pálido sirve poner en marcha o para al robot. Este botón solo sirve en modo autónomo, entonces cuando el usuario desea que el robot inicie su recorrido presiona el botón y el robot empezará a andar. Si el robot está en modo autónomo y está en marcha el usuario puede detenerlo presionando este botón.

Del mismo lado izquierdo del control remoto está los dos pulsadores de color gris. Su función es aumentar o disminuir la velocidad del robot. Esto aplica tanto para modo auto como modo control. Del lado superior derecho se encuentran tres botones celestes. Estos dictan la dirección a la que debe ir el robot: avanzar, girar a la derecha o izquierda. Y más abajo del lado derecho existe un interruptor que controla el estado de las aspas, es decir si están arriba o abajo. Por supuesto los tres botones celestes y el interruptor de las aspas aplican sólo para modo control remoto, pues es modo autónomo el robot se guía por sus sensores.

Arriba del lado derecho se encuentra un interruptor para prender y apagar el control remoto. Y hasta arriba se observa una representación de la antena que transmite y recibe los datos hacia y desde el robot móvil. En el centro se muestra la LCD que es la encargada de desplegar la información para el usuario. El robot móvil siempre está enviando información respecto a la carga de la batería o a el tiempo que lleva trabajando en el día, su velocidad actual o su modo actual de operación. Este último le indica al usuario si está en automático y está esperando que se presiona el botón START para iniciar la operación, o le indica si está en modo manual y está esperando las indicaciones del usuario para operar. Además, la LCD despliega alarmas y avisos importantes como por ejemplo cuando la batería del robot está al 10 % de capacidad y es necesario que se detenga la operación y poner a cargar el robot, así mismo indica cuando la batería misma del control remoto está a 10 % de capacidad y es necesario cargarlo. Junto al lado derecho de la LCD hay un pulsador (blanco en la figura) que con el cual el usuario puede navegar por la información que se despliega en la LCD. Sucede que en la pantalla se despliega un mensaje a la vez, entonces al presionar dicho botón se va desplegando el resto de información y mensajes.

#### **8.4.2. Electrónica**

En la Figura (31) se muestra el diagrama de bloques de los componentes electrónicos que forman al control remoto. De color negro se muestran las partes correspondientes a la alimentación energética del dispositivo. En naranja se incluyen todos los pulsadores y el interruptor, en verde se representa al módulo de radiofrecuencia que se encarga de comunicarse directamente con el robot móvil, en gris la LCD y en celeste el microcontrolador que lee los estados de los pulsadores, controla los datos de envío y recepción del módulo de radiofrecuencia y dicta lo que debe desplegarse en la LCD.

Como fuente de alimentación se utilizaron dos baterías 18650de 3.7V y 4AH; Figura (32a). Se pusieron en seria para aumentar el voltaje a 7.4V. Esto se logra con un porta-baterías especial para dichas baterías (ver Figura (32b)). Como no hay actuadores mecánicos,

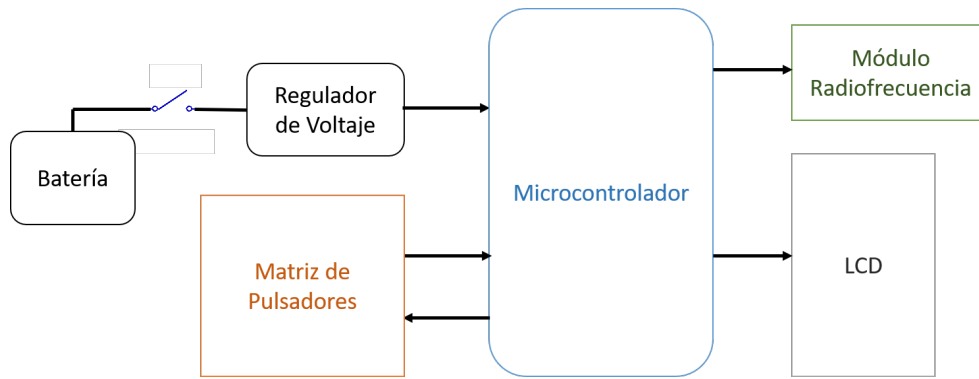
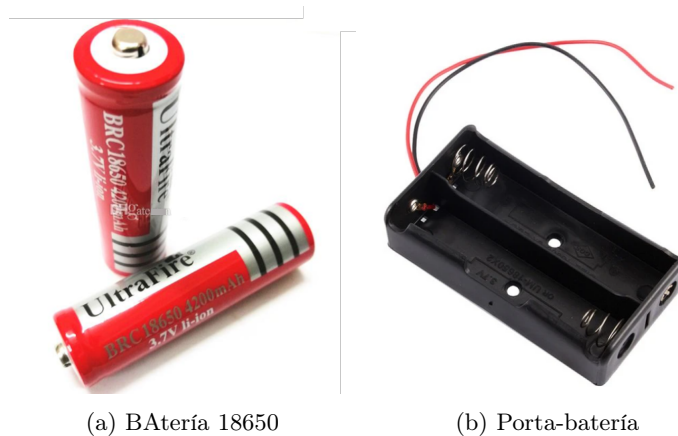


Figura 31: Diagrama de bloques control remoto

el consumo energético es muy bajo; mucho menor a 100mA. Con la capacidad energética de 4AH y asumiendo un consumo de 100mA, la batería tiene una duración de aprox. 60 horas según la Ecuación de Peukert (14), que son como 8 días de trabajo de 7.5 horas.

En serie con la batería hay un interruptor que es el que enciende y apaga el control remoto. Luego le sigue el regulador de voltaje LM7805 para convertir los 7.4V en 5V, pues todos los componentes electrónicos utilizados se alimentan con 5V.



(a) BAtería 18650

(b) Porta-batería

Figura 32: Batería y su portador para el control remoto

En total se cuentan con 8 botones y un interruptor. Todos ellos representan una gran cantidad de pines solamente para lectura digital, por lo que se utilizó la denominada matriz de pulsadores, de modo que estos 8 pulsadores se puedan conectar sólo a 6 pines digitales. El circuito se observa en la Figura (33). Este circuito consiste de dos columnas y 4 filas. Las columnas son señales digitales provenientes del microcontrolador y las filas son entradas del microcontrolador para lectura digital. Para las columnas el microcontrolador genera un pulso lógico con período de 100ms para ambos, solo que en desfase, de modo que cuando una columna tiene 5V la otra tiene 0V y para el siguiente periodo sucede al revés. Cuando un pulsador es presionado se genera un corto de modo que en su respectiva fila se obtiene 5V. En ese preciso momento el microcontrolador sabe que columna está prendida. Por lo tanto, si conoce la fila que fue presionada y la columna que está activada, entonces puede saber con certeza cual es el pulsador presionado. La operación para levantar y bajar las aspas no se realiza con un pulsador directamente, sino con un interruptor, el cual no se incluye en la

matriz sino que se conecta directamente a una entrada digital del microcontrolador.

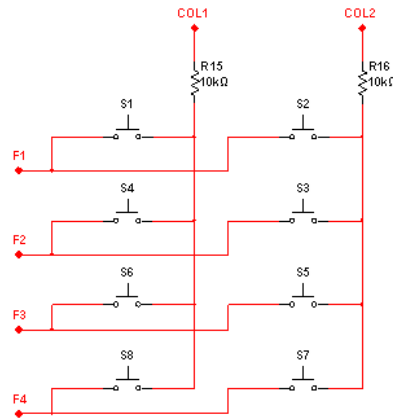


Figura 33: Circuito matriz de pulsadores

El microcontrolador utilizado es una vez más el ATMEGA328p. Se seleccionó este por las mismas razón que por las que se seleccionó para el robot móvil -refiérase a ala Sección (8.3.3)-. Las conexiones realizadas para este microcontrolador se observan en la Figura (34). Las dos columnas de la matriz de pulsadores necesitan de dos salidas PWM, por lo que se usaron los pines D5 y D6. Las cuatro filas son lectura digitales, por lo que se eligieron los pines D3-D4 y D9-D10. El interruptor se lee igualmente con una entrada digital (D2). El módulo de radiofrecuencia NRF24L01 se conecta a los pines respectivos de SPI (D11-D13) más dos salidas digitales (D7-D8). Y la LCD requiere de 6 salidas digitales, para las que se seleccionaron los pines (A0-A5). Una vez más se utilizaron los pines UART para programar el microcontrolador y se utilizó un cristal externo de 16MHz.

-	RESET	ATMEGA328P	A5	LCD - D7
-	RXD		A4	LCD - D6
-	TXD		A3	LCD - D5
SWITCH	D2		A2	LCD - D4
F1	D4		A1	LCD - EN
F2	D4		A0	LCD - RS
5V	VCC		GND	0V
0V	GND		AREF	5V
OSC1	OSC1		VCC	5V
OSC2	OSC2		D13	NRF24L01
COL 1	D5		D12	NRF24L01
COL 2	D6		D11	NRF24L01
NRF24L01	D7		D10	F3
NRF24L01	D8		D9	F4

Figura 34: Conexiones del ATMEGA328p para el Control Remoto

En parte inferior de la Figura (35) se muestra la electrónica del control remoto en pro-  
to-board y en la parte superior el robot móvil. Para conocer de las pruebas y los resultados  
obtenidos de la comunicación remota, se puede referir a la Sección (9.4).

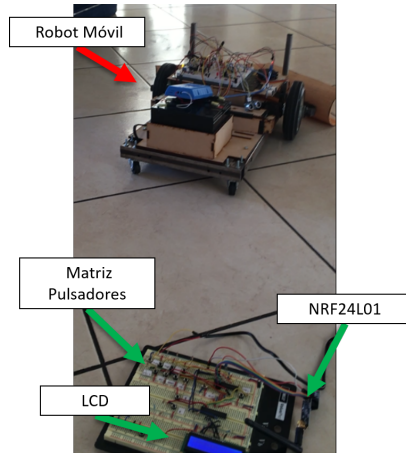


Figura 35: Circuito electrónico físico del control remoto

### 8.4.3. Módulo NRF24L01

La comunicación entre el robot móvil y el control remoto se logra a través de los módulos NRF24L01; refiérase a la Sección (6.8) para más detalle. Se seleccionaron estos módulos por la capacidad de la comunicación bidireccional, por el rango máximo de funcionamiento (1Km) y por capacidad de envío y recepción (32 bytes). Se utilizó un módulo en el robot móvil y otro en el control remoto.

El NRF24L01 del control remoto le envía al robot la información de los estados de los pulsadores y de las aspas. La información de cada pulsador y del interruptor de las aspas se envía en forma de un bit, para un total de ocho bits comprimidos en un byte. Cuando un pulsador es presionado se establece su respectivo bit como un uno lógico, de lo contrario se establece como un cero lógico. También envía un byte dedicado a la verificación de buena comunicación con el control remoto. Este byte tiene un valor asignado en cada bit y el robot móvil regresa el valor que recibe de dicho byte. Si el control remoto recibe el mismo valor que el que envió significa que la comunicación está bien y el robot está listo para operar. En el Cuadro (1) se muestra que información contiene cada bit de los bytes mencionados.

	Descripción	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0	Información pulsadores	Auto - Cont.R.	Start - Stop	Vel+	Vel-	Avanzar	Giro Izq.	Giro Der.	Aspas Up/Down
1	Verificación comunicación	1	1	1	0	0	1	1	1

Cuadro 1: Bytes enviados por el control remoto

Por otro lado, el robot móvil envía al control remoto la información respecto a la batería, tiempo de operación en horas y minutos, estado de la comunicación remota, y los estados actuales del robot. Es decir el modo de operación actual, su movimiento actual (avance, cambio de dirección, giro derecho o giro izquierdo), estado de las aspas (si están arriba o abajado) y la velocidad. Posee cuatro velocidades siendo el valor decimal 0 cuando está parado y los decimales 1 al 3, dónde 1 es el menor y 3 el mayor.

En el Cuadro (2) se muestra con más detalla la información de cada byte enviado por el robot móvil. El primer byte es el que contiene la información del nivel de carga en porcentaje de la batería del robot. Este valor se traduce de decimal a binario y el binario es el que se manda en dicho byte. Como el valor máximo es 100 %, solo se requieren de 7 bits <sup>1</sup> para representar este número. El segundo byte representa al de la verificación de comunicación. Básicamente, el microcontrolador escribe en este byte exactamente la misma información que recibe del control remoto. En la tabla VC[X] representa el bit X del byte de verificación enviado por el control remoto. El tercer y cuarto byte llevan la información del tiempo actual de operación del robot móvil, dónde el tercero contiene las horas y el cuarto los minutos. Un día de trabajo en la finca no tiene ni 10 horas no obstante se habilitan 5 bits para un máximo de 32 horas <sup>2</sup>. Una hora tiene sesenta minutos por lo que se requieren de 7 bits para representar este número. El último byte contiene la información del tipo de movimiento actual que está realizando el robot móvil; nótese que para representar los cuatro niveles de velocidad se requieren dos bits.

	Descripción	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0	Batería	X	Nivel de carga (%) [0..6]						
1	Verificación comunicación	VC[7]	VC[6]	VC[5]	VC[4]	VC[3]	VC[2]	VC[1]	VC[0]
2	Tiempo de operación	X	X	X	Horas [0..4]				
3	Tiempo de operación	X	Minutos [0..6]						
4	Información actual	Avanzar	Giro Izq.	Giro Der.	Cambio Direcc.	Aspas Up/Down	Vel[1]	Vel[0]	Modo Auto/CR

Cuadro 2: Bytes enviados por el robot móvil

---

<sup>1</sup>2<sup>7</sup><sub>binario</sub> = 128<sub>decimal</sub>  
<sup>2</sup>2<sup>5</sup><sub>binario</sub> = 32<sub>decimal</sub>



---

## Discusión y resultados del Prototipo 1

---

Luego de construir todo el robot móvil e implementar todas las partes electrónicas, se realizaron pruebas de laboratorio para cada parte en específico para conocer su desempeño. Ciertos sistemas electrónicos funcionaron como era requerido, pero no así en otros. Básicamente, todos los sistemas mostraron buen funcionamiento en el laboratorio pero no llegaron a los altos requerimientos que implica funcionar en campo con condiciones muy diferentes a las de laboratorio. Se aprendió de dichos errores y se tomaron en cuenta para una nueva iteración de este proyecto. En esta sección se detallarán pues las pruebas que se le realizaron a cada parte electrónica del prototipo 1 y a las conclusiones que se llegaron, específicamente los nuevos aprendizajes para un nuevo prototipo.

### 9.1. Sistema de tracción

#### 9.1.1. Pruebas y resultados

Esta es una de las partes más importantes del robot móvil, no obstante no pasó las pruebas que garantizaban un buen desempeño en el campo. El factor más importante es el torque, pues este determina si el robot es capaz de mover su propio peso más el café que debe mover con sus aspas y considerando el terreno no uniforme.

La primera prueba se realizó en un piso lizo sin fuerza horizontal de oposición ni peso extra encima (Figura (35)). Se le hizo avanzar aproximadamente 5 metros y se le hizo girar  $90^\circ$  a la izquierda y a la derecha. En estas condiciones los motores fueron capaces de desplazar al robot móvil los 5 metros sin problemas, sin embargo no completó el giro en ninguna de las direcciones. Giró aproximadamente  $20^\circ$  a la izquierda y menos de  $15^\circ$  a la derecha. Al girar no alcanzó ni el 10% de su velocidad promedio, hasta quedar completamente quieto en

la posiciones mencionadas. Este fue el primer claro indicio que se requiere aún más torque. Aun así se hizo una segunda prueba, en la cual se le añadió una pesa de 20 lbs. En esta prueba logró completar los 5m de recorrido pero a aproximadamente al 50% de su velocidad promedio. Esto indica que los motores estaban siendo forzados a dicho peso.

Ya no realizaron las demás pruebas (fuerza horizontal de oposición y terreno irregular) porque no pasó las pruebas anteriores. La conclusión es que en condiciones reales el sistema de tracción no será capaz de cumplir con su tarea. Por lo tanto se requiere de un sistema de tracción más potente.

### 9.1.2. Discusión y aprendizajes

El principal causante de los resultados es el torque de los motores. El cálculo obtenido de  $T = 6.7 \text{ Kg*cm}$  resultó ser un cálculo muy ideal que no contó con todos los factores de la vida real. En el cálculo no se tomó en cuenta que la estructura mecánica tiene imperfecciones y existen fricciones internas. De hecho ambos motores no estaban perfectamente alineados y la abrazadera que sostiene un motor está unos milímetros más abajo que la otra. Estas situaciones implica que las ruedas y el eje del motor no estén completamente alineados y que existan fricciones indeseadas. Otro aprendizaje es que en los cálculos no se tomó en cuenta cuando el robot gira sobre su eje, pues cada motor gira en dirección contraria, entonces cada motor debe mover todo el peso por sí solo.

En resumen, se identificó que se necesitan motores más fuertes. Por supuesto esto de por sí requiere de un rediseño completo, puesto que motores con mayor torque son considerablemente más grandes y esto implica un rediseño mecánico. Aparte, el consumo de corriente es mayor, lo que implica que las baterías deban ser de mayor capacidad y que el circuito de potencia pueda soportar dichas corrientes. Por lo tanto, en la nueva iteración, se requiere de un nuevo circuito de potencia (driver) y mayores baterías. En la Sección (10.6) se dará mayor detalle respecto todos estos nuevos cambios para el siguiente prototipo.

## 9.2. Suministro energético y circuito regulador

### 9.2.1. Pruebas y resultados

En la primera prueba se realizó la interconexión del suministro energético mostrado en la Figura (23), conectándole solo un panel y una de las baterías al circuito regulador (Figura (36)). Se obtuvo que el circuito regulador carga la batería de 12V a 13.8V y aproximadamente 200mA constantemente, esto solamente con el panel solar de 18W. Para esta prueba la batería no estaba tan escaso de energía así que la corriente entregada por el regulador era la necesaria para cargarlo.

Seguidamente, se le conectó en la salida del circuito regulador uno de los motores, con el objetivo de determinar si a la salida del circuito regulador sale la suficiente corriente para hacer girar el motor. El regulador entregó los 300mA necesarios para hacer girar el motor. Luego se le ejerció un torque de oposición -simplemente se le apretó el eje con la mano- y el

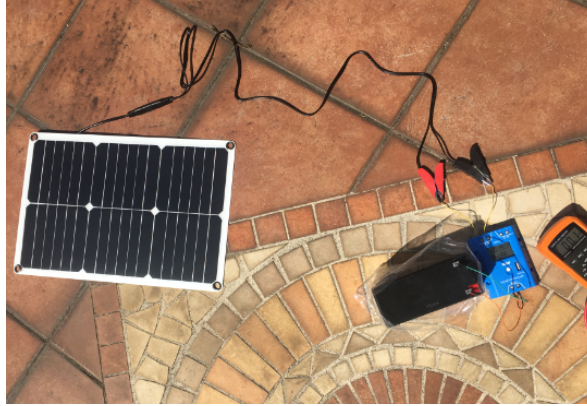


Figura 36: Foto de la interconexión del suministro energético

circuito entregó 1.1A aprox. sin problemas. Se conectaron ambos motores y en este caso el sistema logró proveer la corriente necesaria para hacerlos girar aún con torque de oposición.

### 9.2.2. Discusión y aprendizaje

Con la prueba primera se concluye que el sistema panel solar-circuito regulador efectivamente entrega el voltaje y corriente necesaria para cargar la batería (a plena luz del día). Con la prueba segunda se concluye que el sistema de suministro energético (panel, regulador, batería) provee la corriente necesaria para alimentar todo el circuito aún a torque de detención.

Dado a los buenos resultados de este sistema, se implementará en el prototipo 2. El único cambio es el de las baterías de mayor capacidad, para poder alimentar los nuevos motores. Por esta razón, en el nuevo prototipo se conectan los motores directamente a la batería de 12V y a la salida del regulador de 12V/10A se conecta el resto de los circuitos. Aparte, se necesita menor calibre de cables para soportar las grandes corrientes de consumo por parte de los motores (se detallará más en la Sección (10.7)).

## 9.3. Sistema de posicionamiento del robot móvil

### 9.3.1. Módulo láser

Primeramente se probó el receptor láser ya montado en el robot móvil. Se colocó al robot a plena luz del medio día en un pavimento similar al utilizado en las fincas de café y se le apuntó con el emisor láser desde 1m de distancia directamente al receptor. Se realizó lo mismo con cada uno de los cuatro receptores y en promedio se obtuvo un valor analógico de 920, cuando el receptor tenía el rayo láser directamente sobre él. Cuando no había luz láser los sensores medían un valor analógico de en promedio 810, es decir que simplemente existe un aumento de casi 10% en la lectura analógica cuando el rayo láser entra en contacto con el receptor.

Estos son resultados no favorables para el funcionamiento del robot. Primeramente, solamente un aumento del 10% cuando detecta láser no refleja un método preciso para indicarle al robot que el terreno finalizó. Es decir, existe mucha probabilidad que en ciertas ocasiones el robot pueda confundir la luz del día con luz láser. El principal problema es que los receptores detectan gran cantidad de luminosidad cuando no hay láser, a pesar de todo el cubrimiento de PVC y MDF. La razón de esto puede ser que la luz del día se refleja en el pavimento y entra en el tubo de PVC. Aunque en promedio el aumento fue de 10% hubo veces en las que el valor analógico fue casi indistinguible que sin rayo láser. Por esta razón, se considera que los receptores láser no son los indicados para este trabajo; funcionan bien en lugares solares dónde no existe luz solar directa, pero en campo puede confundir el sol con el láser.

Seguidamente, se probó la torre láser. Se simularon las condiciones de campo, es decir se colocó la torre en un pavimento similar al utilizado en la finca y se hizo pasar el robot móvil en dirección perpendicular a la dirección del rayo láser, para medir el valor analógico de los receptores cuando cruzaran la luz láser. No obstante, las torres no dieron los resultados esperados en esta prueba. En primer lugar, no se tomó en cuenta que un terreno o pavimento no es perfectamente plano. Las inclinaciones, por muy pequeñas que sean hacen que el rayo láser se vaya torciendo a mayor distancia. Por lo tanto, a diferentes distancias el rayo tiene diferentes alturas, mientras que el sensor receptor siempre tiene la misma altura y por ende el robot solo detectará el láser a una distancia específica. Aún utilizando el variador de altura existe el problema de que el rayo tiene algún tipo de inclinación. En segundo lugar, se detectó que es muy difícil apuntar el láser, pues la que la luz del día es tan fuerte que cuesta distinguir el punto del láser en cualquier superficie. Esto es un gran problema a la hora de realizar el rectángulo de rayos láser como el de la Figura (19). Es decir, el cliente debería colocar un torre de tal manera que el rayo láser apunte a la siguiente torre de la otra esquina del terreno y así sucesivamente hasta generar el rectángulo, pero a plena luz del día es muy difícil ver si el punto láser está en la torre de la otra esquina o no. Entonces, la colocación de las torres en cada esquina no es algo sencillo para el usuario y es probable que hasta no logre colocarlas bien.

En pocas palabras el sistemas láser será inútil en el campo. La gran intensidad de la luz solar puede provocar que el receptor láser la confunda con la luz láser. Además, las pequeñas inclinaciones provocan que el rayo láser no sea completamente horizontal, impidiendo así que el receptor lo detecte a cualquier distancia y la instalación de las torres en las esquinas resulta una tarea muy complicada para el usuario. Se concluye que es necesario utilizar otro método para indicarle al robot las dimensiones del terreno de café. Este nuevo método debe no ser afectado ni por la luz solar ni por las condiciones del terreno.

### **9.3.2. Módulos de distancia**

Primero se probó el módulo HC-SR04 haciendo pasar el robot enfrente de la torre de los módulos láser. Se realizó esto varias veces solo que a diferentes velocidades y distintas separaciones con la torre. Los resultados fueron muy bueno, porque capturó la distancia correcta hacia la torre con un margen de error de no más de 3cm, lo cual es muy aceptable para al aplicación.

La prueba del VL53L0X se realizó con cáscaras de nueces. Estas se colocaron en el piso para simular los granos de café. Los resultados fueron aceptables, más no los deseados. En ciertos puntos de la cama de las cáscaras se forman agujeros casi tan profundos como el suelo, entonces la lectura en ciertos puntos es casi la del suelo. Esto puede ser una complicación, ya que el robot entendería que en dicho punto ya no ha granos de café. Por supuesto, se puede resolver promediando los datos leídos.

A pesar de que las pruebas de laboratorio fueron aceptables. Estos sensores también pueden presentar problemas en una situación real. El problema principal con los sensores HC-SR04 es el de las inclinaciones del pavimento. Estas hacen que la torre se incline un poco, de modo que la pared de la torre no es completamente vertical. Entonces las ondas ultrasónicas del sensor puede que tenga una leve desviación al rebotar con dicha pared provocando que la lectura de distancia no sea tan exacta. El VL53L0X por su parte, puede que tenga sus complicaciones igualmente por las irregularidades del terreno real, es decir que los granos no se acumulan uniformemente y exista lugares donde el nivel de café es muy cercano a los 8cm, lo que a su vez confunde al robot.

No se descarta la opción que pueden dar resultados lo suficientemente buenos en el campo como para indicar las distancias correctas al robot. No obstante, se considera que no son aptas para usarse porque sí existe la posibilidad de lecturas erróneas debido principalmente a irregularidades en el terreno, lo que afectaría el comportamiento del robot considerablemente. Por lo tanto, no se seleccionan estos sensores tampoco para la próxima iteración. Se seleccionan unos que no dependen de las condiciones del terreno, ni de ninguna distancia hacia un objeto físico o improvisado. Se detalla más en el siguiente capítulo.

### **9.3.3. Microcontrolador**

En este prototipo no se utilizó un controlador como tal sino que se dejó que los sensores fueran los encargados de dictarle el recorrido al robot móvil. Sin embargo, esto no da buenos resultados por que ciertos desvíos en el recorrido del robot -provocados ya sea por deslizamientos en las llantas u otras razones- son imposibles componerlos solamente con los datos provistos con los sensores. Por lo tanto, en la siguiente iteración se implementará un control para robots móviles, que garantice que el robot se mantenga en la trayectoria a pesar de cualquier desviación externa. Implementar un controlador implica el uso de nuevos sensores así como un microcontrolador con mayor poder computacional para procesar la data. En cuanto al microcontrolador utilizado en este prototipo se puede mencionar que funcionó adecuadamente, puesto que cumplió con todo lo necesario para la lectura y procesamiento de datos provistos por los sensores. Del nuevo microcontrolador utilizado en la siguiente iteración se hablará más adelante.

## **9.4. Comunicación vía control remoto**

Esta fue la parte electrónica que mejores resultados dio. El sistema resultó exitosa en la mayor prueba que tenía que fue hacer mover al robot móvil con la comunicación inalámbrica. Se enviaron los comando de avanzar y girar para ambos lados y el robot respondió

correctamente a dichos comandos. De hecho la Figura (35) se tomó al momento de realizare dicha prueba y el robot caminó cuando se le presionó el botón de avanzar en el control remoto. Respecto a los circuitos electrónicos del control remoto, también se puede decir que los resultados fueron satisfactorios -la matriz de pulsadores, como la LCD, etc-. En definitiva se utilizara este sistema de comunicación en el próximo prototipo. Se utiliza la misma circuitería así como los módulos NRF24L01 y al ATMEGA328p como microcontrolador.

A partir de los resultados del primer prototipo se concluyó que se debían realizar varios cambios en la parte electrónica, siendo uno de los principales el cambiar el método de posicionamiento en tiempo real del robot. Para esto se decidió cambiar todos los sensores por un solo módulo que no dependa ni de la luz solar ni de las irregularidades del terreno ni de cualquier otro factor externo. Dicho módulo es el denominado DWM1001-DEV. El siguiente gran cambio es el de implementar un controlador para robots móviles, de modo que a pesar de cualquier desvío externo en la trayectoria se pueda reincorporar en ella. Y el otro cambio que se realizó es el de la implementación de motores con mayor torque, lo que implicó aumentar el suministro energético. Y por último se le añade un sistema para elevar las aspas.

Sobre el DWM1001-DEV se redacta en la Sección (10.1) pero básicamente es set de módulos que indica el posicionamiento en tiempo real del robot móvil dentro y fuera del terreno de café. Estos módulos sustituyen a los sensores láser y los sensores de distancia -HC-SR04 y VL53L0X-. A grandes rasgos, del set de módulos se coloca uno en cada esquina del terreno y uno directamente sobre el robot de modo que el robot conoce su posición en tiempo real con respecto a los módulos de las esquinas. Estos entonces no depende de las condiciones externas ya sea de la luz solar o las irregularidades del terreno del campo ni depende de mediciones a objetos físicos externos al robot, ya que funciona nada más mediante señales de radiofrecuencia. Se permite continuar con el recorrido de rayado requerido, el cual se presenta en la Figura (37). Como se observa ahora en cada esquina se colocan los módulos DWM1001-DEV a los que se denominan *Anchor*, debido a que están estáticos durante el tiempo de operación. El DWM1001 que se coloca sobre el robot móvil se denomina *Tag* debido a que es el que está en constante movimiento y el que referencia su posición con respecto a los *Anchor*s que son las esquinas del terreno de café en esta aplicación.

Para la implementación del controlador es necesario contar con un sensor de medición inercial -también conocido como *IMU*-. Este mide la orientación actual del robot móvil .



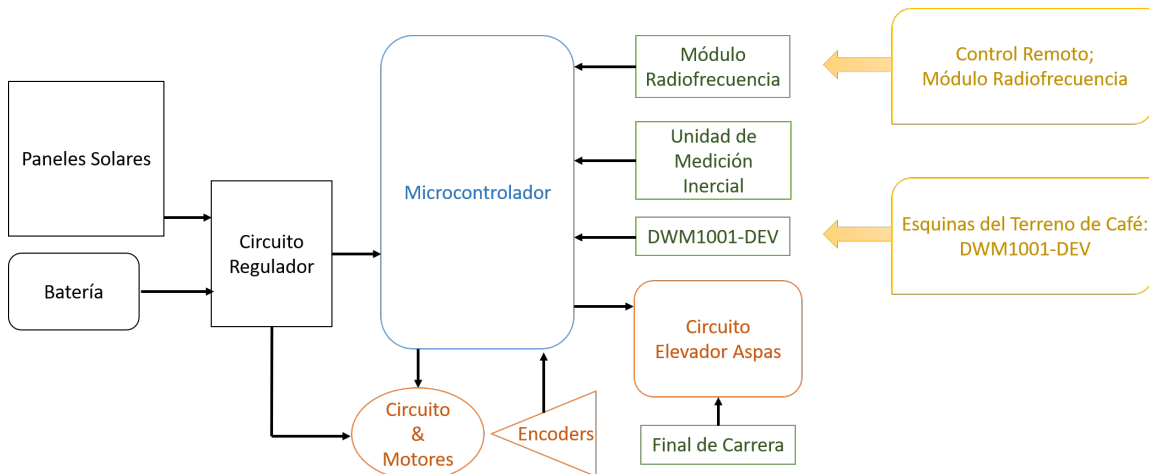


Figura 38: Diagrama de bloques Prototipo 2

Tag. De los Anchor uno debe ser el iniciador o el origen. Básicamente, estos módulos generan un sistema coordenado, en el que el Anchor iniciador es el punto (0,0), los demás Anchors son puntos fijos en el sistema coordenado y el Tag es un punto móvil. En la Figura (39) se representa lo anterior.

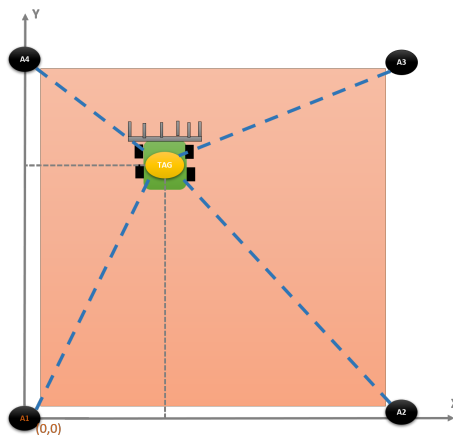


Figura 39: RTLS con DWM1001-DEV

La ventaja de esto es que al conocer las coordenadas de los Anchors con respecto al origen, se conoce el espacio del rectángulo del terreno de café en el sistema coordenado. Por lo tanto, es más fácil saber cuando el Tag está fuera de las dimensiones de dicho rectángulo. Por ejemplo, cuando la posición en el eje Y del robot es mayor que el la del Anchor A4 y A3, entonces se sabe que ya finalizó el terreno. Y así sucesivamente en cada lado del rectángulo.

Se podría decir que funciona similar a un módulo de GPS. Sin embargo la grna diferencia está en que GPS tiene un margen de error de casi 2 metros y los módulos de menos de 10 cm. Claro está que el GPS funciona como RTLS alrededor de todo el mundo mientras que el DWM1001 para rangos no mayores de 150m, área que es más de lo que se necesita para esta aplicación.

### 10.1.1. Anchor

El circuito para los Anchors se observa en la Figura (40) del lado izquierdo. Se le instalaron dos baterías 18650 en serie de 3.7V cada uno para elevar el voltaje a 7.4V. Cabe mencionar, que las baterías 18650 se reutilizaron del prototipo 1 para evitar más costos en gastos. El voltaje de 7.4V es reducido a 5V por el regulador de voltaje LM7805 y este es voltaje de suministro para el DWM1001-DEV. Del lado derecho de la imagen se muestra el circuito físico. Este circuito se replicó para cada uno de los cuatro Anchors y se colocaron en cada una de las esquinas del terreno de trabajo.

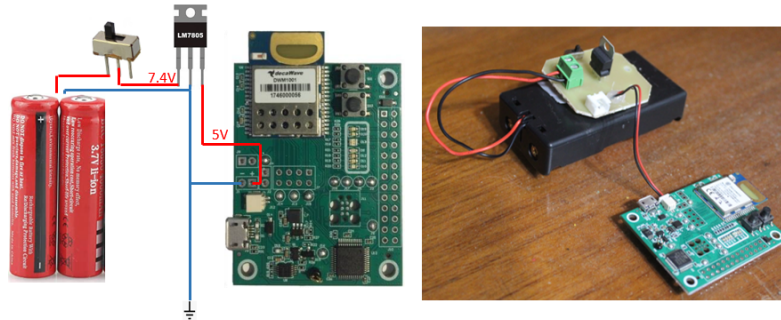


Figura 40: Circuito Anchor

### 10.1.2. Tag

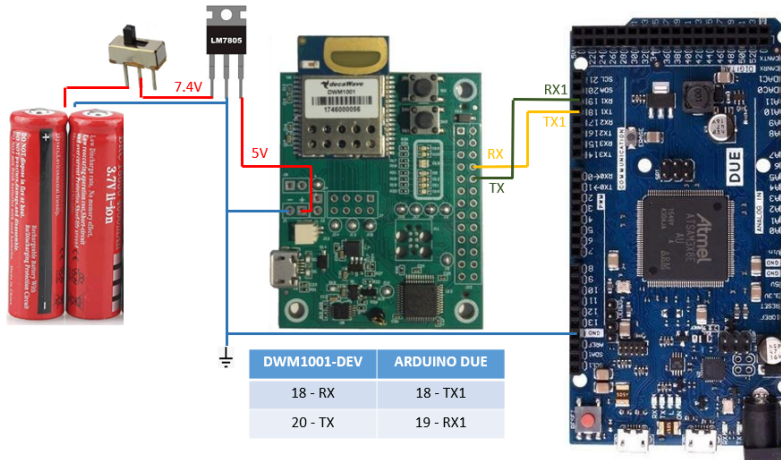


Figura 41: Circuito del Tag

Este es el módulo que va directamente conectado al microcontrolador. Por lo tanto este no sólo necesita de suministro energético sino que requiere comunicación con el microcontrolador. Se utilizó la comunicación UART. Se detalla en la Sección (10.5) la selección del microcontrolador para este prototipo; el Arduino DUE. El Arduino DUE ya utiliza el UART0 para la comunicación serial vía USB con la PC. Por esta razón se utiliza el UART1 para comunicación con el módulo DWM1001-DEV. En la Figura (41) se muestra el circuito del

Tag. Utiliza el mismo circuito para el suministro energético que el Anchor, es decir dos baterías 18650 en serie pueden entregar 7.4V y un regulador LM7805 que regula a 5V.

El UART1 se encuentra en los pines 18 (TX1) y 19 (RX1) del Arduino DUE. El DWM1001-DEV cuenta en un sólo UART en sus pines 18 (RX) y 20 (TX).

DWM1001-DEV	Arduino DUE
18 - RX	18 - TX1
20 - TX	19 - RX1

Cuadro 3: Conexión UART y DWM1001-DEV (Tag)

La construcción del circuito se observa en la Figura (42).

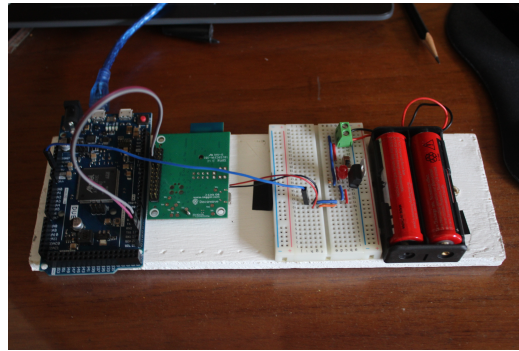


Figura 42: Fotografía Circuito Arduino DUE y DWM1001-DEV (Tag)

Para la lectura de los datos se realizó un programa en el microcontrolador basado en el siguiente pseudocódigo:

1. Se inicializa el UART0 y UART1 del ATSAM3X8E a 115200 baudrate cada uno. El UART0 es para la comunicación vía USB con la PC y el UART1 para la comunicación con el DWM1001-DEV (Tag).
2. Microcontrolador envía *ENTER* en el UART1. Esto es '\r'. Espera 450ms para enviar un segundo *ENTER*. Esto es requerido para pasar del *Generic Mode* al *Shell Mode*.
3. Espera a recibir '>', lo que significa que el DWM1001-DEV logró pasar al *Shell Mode*. Si no recibe este caracter en un período de 1.5 segundos, quiere decir que no hubo una comunicación exitosa. Entonces se regresa al Paso (2).
4. El microcontrolador envía la función 'la' + '\r'. A esta instrucción el DWM1001-DEV devuelve la información de todos los Anchors conectados a la network. La respuesta del módulo se despliega en el Monitor Serial del UART0. Al recibir el caracter '>' se indica que ha finalizado la respuesta del DWM1001-DEV.
5. Se envía la función 'lep' + '\r', a la que se obtiene como respuesta el coordenada de la posición actual del DWM1001-DEV con respecto al Anchor iniciador. La respuesta viene en la forma de  $(x, y, z, erro\ estimado)$ , como se muestra en la Figura (44). Esta información se despliega en el monitor serial del UART0.

6. Por último, se envía 'quit' + '\r' para finalizar la comunicación con el DWM1001-DEV. Recibir el caracter '!' significa que se ha finalizado exitosamente la comunicación.

### 10.1.3. Discusión y resultados

Se realizó un RTLS a pequeña escala no al aire libre. Se colocaron los cuatro Anchors como se muestra en la Figura (43).

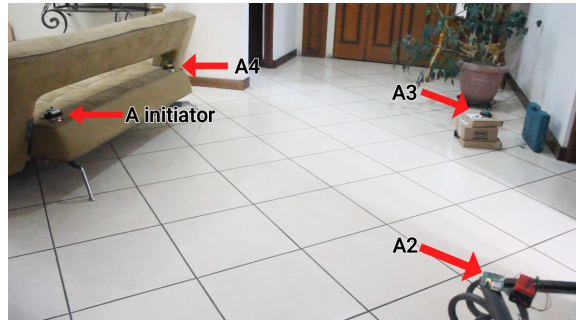


Figura 43: Prueba de RTLS en interior

Se conectó el Arduino DUE del circuito del Tag vía USB a la computadora para monitorear la posición del Tag en el espacio. Además, se utilizó la aplicación para Android de *DecaWave* para visualizar el posicionamiento en tiempo real del Tag respecto a los Anchors. Comparando el resultado de la App con el que lee el DUE del Tag se comprobó la exactitud del RTLS compuesto por módulos DWM1001-DEV. En la Imagen (44) se muestra el resultado del RTLS.

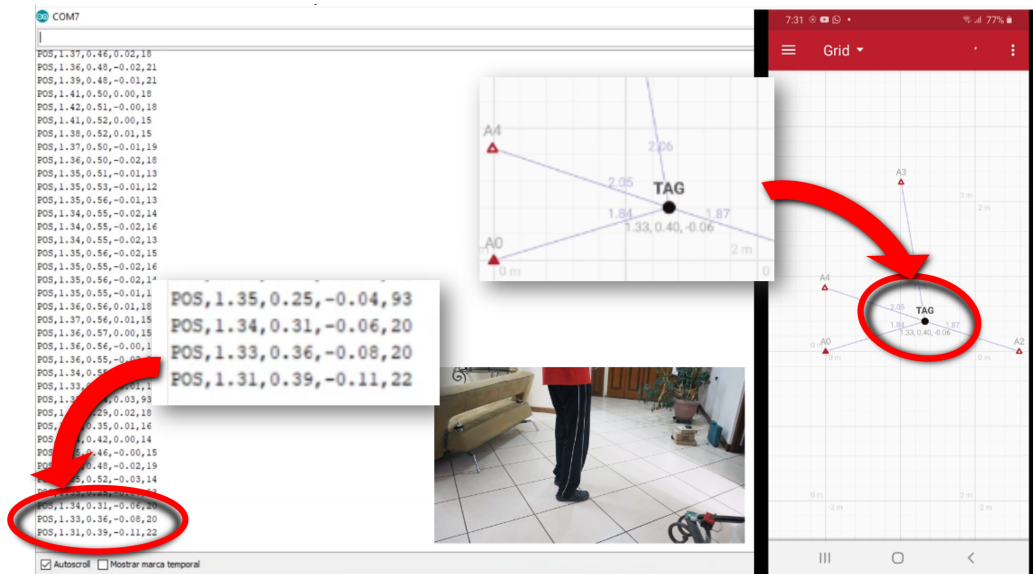


Figura 44: Resultado prueba RTLS

En el fondo se están desplegando los datos en tiempo real leídos por el Arduino DUE.

Del lado derecho se muestra la visualización de la aplicación de *DecaWave* del RTLS. En el centro inferior se enseña una imagen de mi posición -y por lo tanto la del Tag- dentro del rectángulo formado por los Anchors (43). Las tres imágenes corresponden al mismo momento. En ese instante, el Arduino DUE leyó la posición de  $(x, y) = (1.31 \text{ m}, 0.39 \text{ m})$  -ignorando la altura que no interesa en esta aplicación-. Por su parte, la aplicación marca  $(x, y) = (1.33 \text{ m}, 0.4 \text{ m})$ . En esta muestra aleatoria los datos obtenidos por el Due del Tag representaron un error de  $e_x = 1.5\%$  y  $e_y = 2.2\%$ . Se concluye entonces que la lectura de datos del DUE es exitosa.

El Tag también tiene la capacidad de desplegar la distancia que tiene hacia un anchor. Se realizó una prueba de precisión y otra de exactitud. En la prueba de precisión se dejó quieto el Tag y se leyó la distancia hacia un Anchor por unos segundos. A pesar de estar quieto presentó variaciones en un rango de  $\pm 10 \text{ cm}$  aproximadamente. Sin embargo, este valor se reduce cuando hay cuatro Anchors en el RTLS a cerca de  $\pm 6 \text{ cm}$ . Para examinar la exactitud, se obtuvo el promedio de las mediciones y al compararla con la real se estimó un desfase de 4 cm aprox. Para la aplicación que se le dará, este dato es muy bueno, puesto que la trayectoria del robot móvil está en el rango de los metros.

## 10.2. Odometría del robot

Es de mucha importancia para este proyecto que el robot móvil conozca su orientación en todo momento, para evitar la problemática que factores externos lo desvíen de su trayectoria establecida. Es decir, las pequeñas imperfecciones en el terreno o los mismos granos de café pueden generar una rotación en el robot. También, sucede que fricciones internas en el mecanismo o en los motores del robot provoquen que una rueda tenga mayor velocidad que la otra, a pesar que el microcontrolador establece una velocidad igualitaria para ambos. La diferencia de velocidades genera un giro indeseado.

En la Sección (6.5) se detalló que la orientación de un objeto en el espacio se puede determinar con los ángulo de Euler, pero para un robot móvil que se mueve en un plano de dos dimensiones basta con conocer con el ángulo Yaw o el ángulo alrededor del eje Z. La Unidad de Medición Inercial o *IMU* por sus siglas en inglés, es un módulo electrónico que nos indica sus ángulo de Euler actualmente. Por lo tanto, al instalarlo en el robot se conoce su Odometría: y en consecuencia, se sabe cuando hay desviaciones indeseadas en su orientación. El otro mecanismo que nos permite conocer si existen giros indeseados debido a la diferencia de velocidades entre las dos ruedas son los *encoders*. Respecto a su funcionamiento se especificó en la Sección (6.7). Y su gran ventaja es que nos permite conocer la velocidad angular de cada rueda actualmente.

Para el prototipo 2 se incorporó una IMU de 9 Grados de libertad:, que incorpora un giroscopio, acelerómetro y un magnetómetro. Esto quiere decir que el sensor entrega sus velocidades angulares con respecto a cada eje coordenado (giroscopio), las aceleraciones en cada eje (acelerómetro) y las mediciones magnéticas en cada coordenada (magnetómetro), entonces el microcontrolador recibe 9 datos en total, con los cuales se calcula la posición absoluta del sensor (ángulos de Euler).

En la Figura (46) se muestra en el fondo, los resultados de la pose actual de la IMU

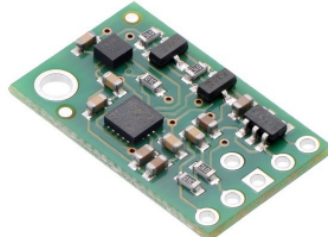


Figura 45: IMU

leída por el Arduino DUE. A la derecha se muestra una imagen de la dirección real de la IMU en ese preciso momento y se compara con la brújula de un celular. En ese momento la IMU marca casi cero tanto en roll como en pitch, lo que es correcto pues esta estaba puesta sobre una mesa plana y sin torceduras. Marcó  $yaw = 8.38^{\circ}$  grados con respecto al norte, mientras que la brújula física marca  $yaw = 15^{\circ}$ . La lectura es en este caso de casi 7 grados diferente que la brújula. Esto indica que la exactitud no es tan buena, puesto que el error es del 44%. No obstante, se observa que la precisión sí es buena: en las 48 iteraciones que se realizaron en el ejemplo se tuvo una diferencia de  $\pm 0.12^{\circ}$  estando estático en la mesa. La buena precisión implica que el controlador va a funcionar similar a como en teoría, puesto que el ángulo  $\alpha$  en (6.4) no tendrá variaciones exuberantes durante el tiempo.

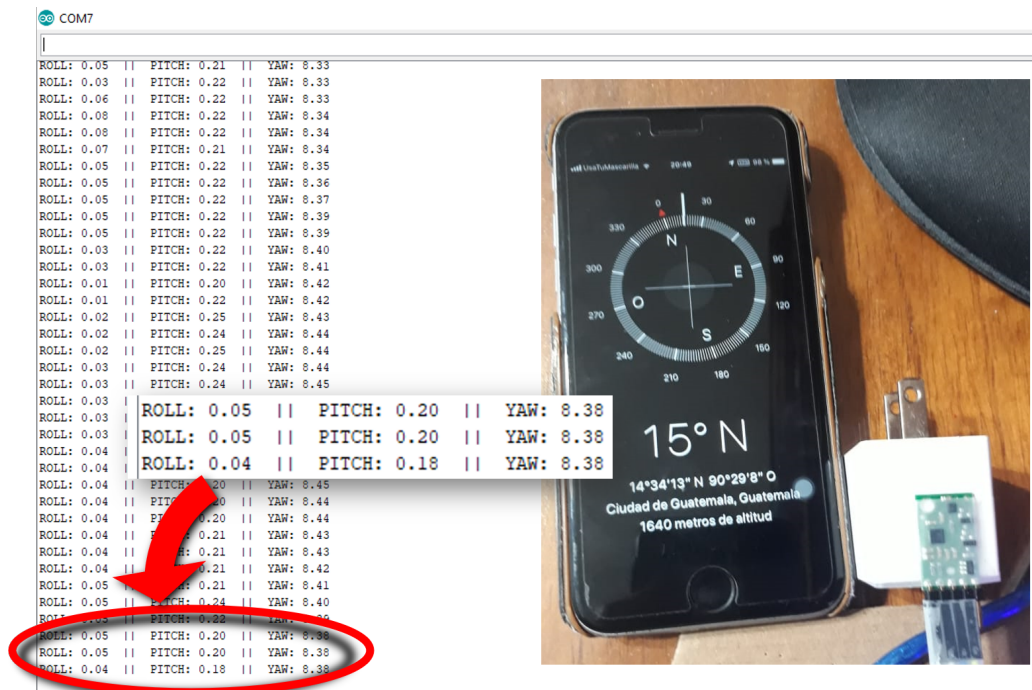


Figura 46: Lectura de la pose de la IMU

No obstante, se encontró un inconveniente con la IMU y es que los 360 grados que tiene una vuelta no están equitativamente distribuidos. Es decir, del norte real al este, la Imu indica 85 grados, del este al sur 85, del sur al oeste 75 y del oeste al norte 115 -los datos son aproximados-. Aún no se conoce si la razón de esto es por mala calibración o por problema interno de la IMU. Este problema se resuelve si antes de iniciar el trabajo se configura que

grado es el norte, sur, este y oeste; claro que esto es tediosos para el usuario.

Los encoders también fueron probados pero no dieron los resultados esperados. Primeramente se probó uno en modo estacionario y constante, es decir el motor giraba a velocidad constante y en el aire. El resultado se observa en la Figura (47a), donde el eje Y son los rpm del motor leídos por el encoder y el eje X el tiempo en milisegundos. Se observa que la lectura presenta bastante oscilación a pesar de que es velocidad constante y sin que la rueda toque el suelo. Esta oscilación se puede deber a que una rueda no gira 100 % constantemente, irregularidades en el hardware de la rueda o a errores propios del encoder. Para resolver este problema bastaría con agregar un filtro promediador o filtro de Kalman, pues estos eliminan la oscilación.

La segunda prueba se realizó también a velocidad constante y en el aire, solo que esta vez se le añadió el código completo del robot, el cual incluye la lectura de la información del NRF24L01, del DWM1001-DEV y de la IMU. Sin embargo en esta prueba la lectura del encoder presentó error, como se ve en la Figura (47b). Se observa que ahora la lectura del rpm de la rueda disminuyó considerablemente, a pesar de ser probado en las mismas condiciones que el anterior solo que se le añadió el resto de código. La razón de esta irregularidad se puede deber a que las funciones de interrupción pueden tener conflictos con las lecturas seriales, tal como las del DWM1001-DEV. Esta lectura consume mucho tiempo, aproximadamente 20 milisegundos, y este tiempo puede generar este error. Se recomienda realizar más pruebas o probar corregir el error para poder integrar el encoder en el sistema electrónico. Previo a esto se recomienda omitir el uso de encoder, pues estos no son vitales durante la operación; el encargado de orientación y el posicionamiento en tiempo real del robot son la IMU y el DWM1001-DEV, los encoders, por su parte, solo están para darle robustez a estas mediciones.

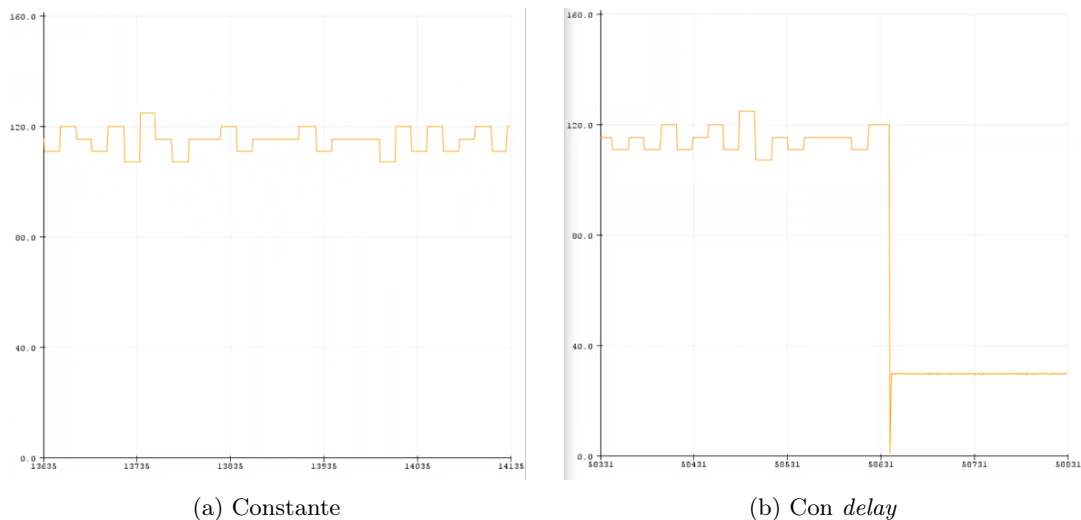


Figura 47: Lectura de un *Encoder*.

### 10.3. Simulación WEBOTS

Dadas las restricciones debido a la pandemia por el COVID-19 no se pudieron utilizar los laboratorios universitarios, por lo que la mayoría del proyecto se basó en las simulaciones en la plataforma de WEBOTS:. En este software se simularon tanto el robot móvil como tal, los sensores utilizados y el control no lineal para seguir la trayectoria deseada.

En la Figura (48) se muestra el resultado final de la simulación del robot móvil. Este tiene las mismas dimensiones tanto del cuerpo como de las ruedas y de las aspas que el real. Se diseñó lo más realista posible. El único inconveniente fue que no se logró simular la rueda loca trasera, así que se le implementaron cuatro ruedas en substitución. Para motivos de simulación esto no afecta mucho. Se definió a cada rueda como *HingeJoint* de la forma de un *RotationalMotor*. Esto simula los motores reales de un grado de libertad. Una ventaja es que esta forma permite conocer la velocidad angular actual del motor, lo que representa a un encoder real. También, se le insertó una *InertialUnit* que es literalmente la IMU de 9 grados de libertad, porque este dispositivo devuelve la orientación del móvil. No existe un método en WEBOTS para simular a un módulo DWM1001-DEV como tal, pero se utilizó un dispositivo GPS con error = 0m como representación, porque devuelve la posición actual del robot tal como un DWM1001. Por último, se simuló el sistema elevador de aspas con una junta tipo *SliderJoint* en un *SupportLink Solid*, que representa al perfil de aluminio en donde se deslizan las aspas. Las aspas tienen las mismas medidas que en vida real también.

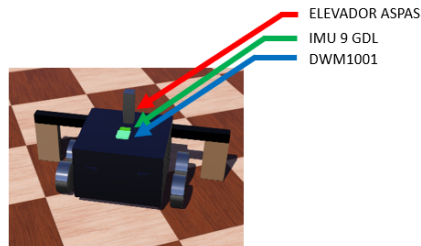


Figura 48: Robot móvil simulado en WEBOTS

Se implementó un campo de trabajo en el mundo de WEBOTS para el robot móvil. Se definió un terreno café imaginario de 20 metros de largo por 10 metros de ancho. Imaginario porque no hay manera de simular los granos de café. En las esquinas del terreno de café imaginario se le añadieron estacas de madera para representar los módulos *Anchor*, tal como se muestra en la Figura (49). Se define al Anchor de la esquina inferior izquierda como el iniciador.

Se planeó una trayectoria para la simulación como la que se mira en la Figura (50). Básicamente, se definieron cuatro puntos fuera del terreno de café en cada una de las caras rectángulo de café -representados por estrellas amarillas en la imagen-. Para llegar al punto el robot debe cruzar el terreno y es en este recorrido rectilíneo en el que se activa el controlador no lineal, de modo que el robot mantenga su recorrido siempre apuntando al punto final. Durante dicho recorrido el controlador fuerza a que la orientación del móvil apunte directo al punto final y también fuerza a que su posición sea la misma que la del punto final. Una vez llegando al punto el robot debe realizar un giro de  $90^\circ$ . El giro no lo realiza con el controlador no lineal sino que lo realiza con un controlador a lazo cerrado, hasta girar

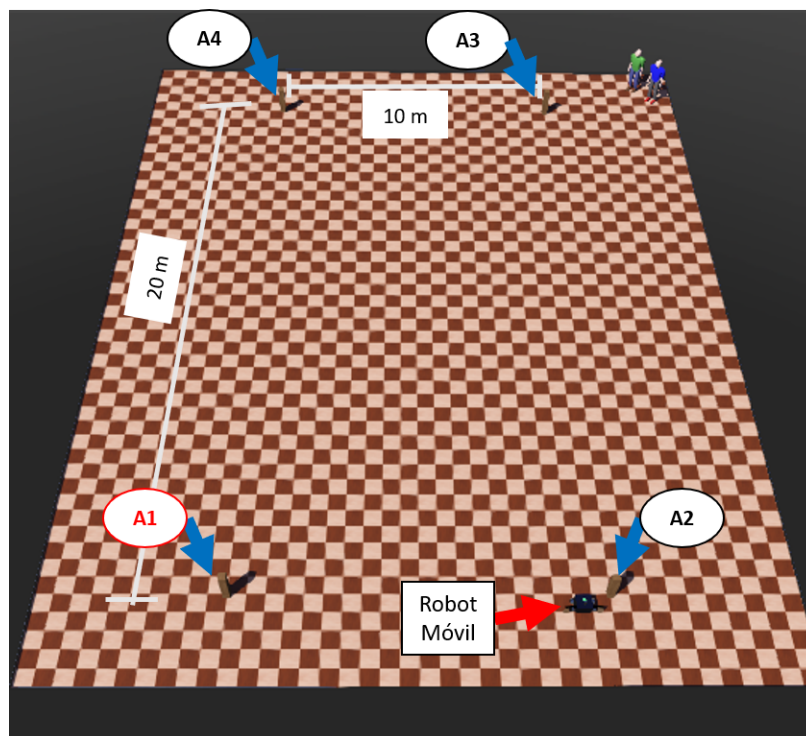


Figura 49: Simulación del campo de trabajo en WEBOTS

los  $90^\circ$ . Entonces, apago este y enciende el no lineal para realizar el recorrido rectilíneo siguiente, y así sucesivamente. En resumen, los recorridos que cruzan el terreno los realiza con el controlador no lineal y los giros con uno de lazo cerrado. A partir del minuto 12:34 de este video se muestra una corrida de la simulación.

A continuación se muestra un breve pseudocódigo del funcionamiento del control a lazo cerrado:

1. Se define un error  $e = 10.0$  y la orientación final deseada  $\theta_f$ .
2. Se setean las direcciones de los motores de ambos lados de tal manera que inicie un giro sobre su eje Z en dirección deseada.
3. Se calcula diferencia de orientación  $e = \theta_i - \theta_f$ , donde  $\theta_i$  es la orientación actual del robot móvil determinada por la IMU.
4. Si  $e < 0.05^0$  entonces el robot móvil ya llegó a la orientación deseada, los motores se detienen y se pasa al controlador no lineal para proseguir con el recorrido. Si  $e \geq 0.05^0$  entonces aún no se ha llegado a la orientación final deseada y se regresa al punto (3).

Respecto al controlador lineal se detalla en la Sección (10.4). Pero seguidamente se muestra el pseudocódigo completo del robot móvil que incluye ambos controladores:

1. Se define un *array* de una matriz de  $2 \times N$  que contenga todos los puntos definidos afuera del rectángulo del café, donde  $N$  es la cantidad de puntos.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{0|x} & P_{1|x} & \cdots & P_{N|x} \\ P_{0|y} & P_{1|y} & \cdots & P_{N|y} \end{bmatrix}$$

2. Inicializar un contador  $j = 0$  el cual representa el punto que se desea llegar.
3. Leer la lectura de la posición actual  $(X_a, Y_a)$  del GPS, leer la orientación actual  $\theta_i$ .
4. Calcular la diferencia de distancias respecto al punto final  $dX$  y  $dY$ , respecto al punto que se desea llegar de acuerdo con el valor del contador.
5. Activar el controlador No Lineal descrito en el Pseudocódigo (6.4).
6. Si llegó al punto final, detener motores e iniciar giro de  $90^0$  con el controlador de lazo cerrado del Pseudocódigo (10.3).
7. Al llegar a la orientación deseada, se redefine el contador como  $j = j + 1$ .
8. Si  $j = N$  entonces regresar al punto (2), es decir se llegó al final de la trayectoria y se prosigue a repetirla. Si  $j < N$  entonces regresar al punto (5), es decir aún no se ha finalizado y se activa controlador no lineal para llegar al próximo punto.

Nótese que es un ciclo infinito, lo cual es coherente con la aplicación real ya que se espera que el robot repita la trayectoria un sinnúmero de veces hasta ser detenido por el usuario.

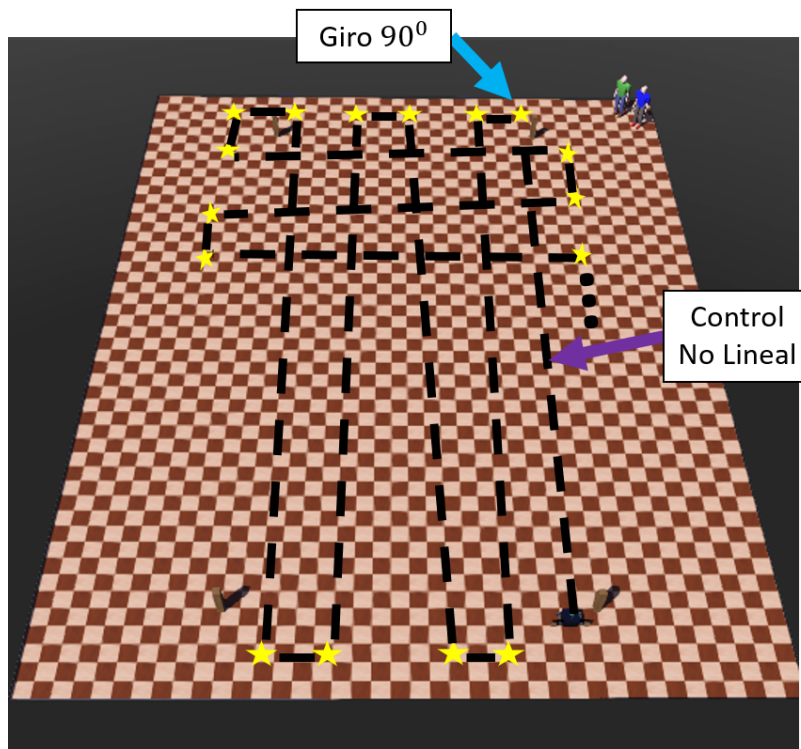
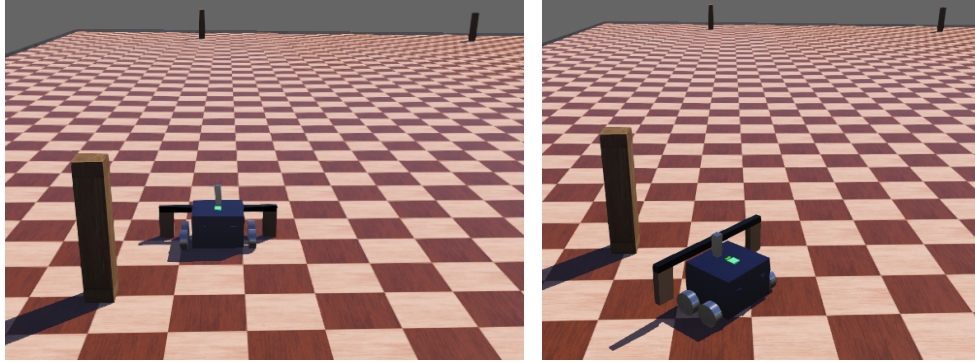


Figura 50: Trayectoria del robot móvil en la simulación

Se mencionó con anterioridad que el robot móvil posee unas aspas que se elevan al finalizar el terreno de café y se están al nivel del suelo cuando este está dentro del terreno

de café rayándolo. Este mecanismo también se simuló en WEBOTS. En la Figura (51a) el robot móvil está dentro del terreno de café -definido por las cuatro estacas de madera-, por lo tanto tiene las aspas al nivel del suelo para ir moviendo los granos de café. En la Figura (51b) ya salió de dicho terreno por lo que tiene las aspas levantadas. En dicha imagen está en la etapa de girar  $90^0$ . La implicación real de esto es que si fuera del terreno tuviera las aspas bajas y da el giro, entonces esparciría los granos de café por todos lados, lo cual no es deseable.



(a) Elevadas

(b) Bajadas

Figura 51: Simulación del sistema elevador de aspas en WEBOTS

## 10.4. Control no lineal

Existen varios tipos de controladores para robots móviles como el PID, PID con acercamiento exponencial, LTI moderno, LQI y el No Lineal. Para la simulación en WEBOTS se probó el controlador PID con acercamiento exponencial, el LQI y el No Lineal. Sin embargo, los primeros dos no dieron buenos resultados. Aunque con el PID con acercamiento exponencial el robot llegó al punto de destino, durante todo el trayecto iba tambaleándose mucho. Los motores tenían cambios de velocidad bruscos, lo cual en vida real podría hasta dañar los motores o demandar corrientes muy elevadas que perjudicaran algún componente de por medio. El LQI dio muy malos resultados ya que ni se logró llegar al punto final. El tercer controlador que se probó fue el No Lineal y este fue el que tuvo buen funcionamiento, puesto que se desplazó con bastante suavidad y obviamente llegó al punto meta.

La teoría detrás del controlador No Lineal se explicó en las Secciones (6.3) y (6.4). La programación sigue los pasos mostrados en el Pseudocódigo (6.4). Para la simulación en WEBOTS se utilizaron las siguientes constantes:

$$K_{\alpha} = 1.5, \quad K_{\beta} = -0.01, \quad K_{\rho} = 1.4$$

y las distancias de cercanía a la meta:

$$dX = dY = 0.1 \text{ m}$$

El punto actual  $(X_a, Y_a)$  es provisto por el dispositivo tipo GPS y la orientación actual  $\theta_i$  del robot móvil lo provee el dispositivo IMU. El punto final es de los que se definieron en

las afueras de terreno de café. La diferencia de distancia entre el punto final y el actual se calcula mediante  $\Delta X = X_f - X_a$  y  $\Delta Y = Y_f - Y_i$ .

## 10.5. Microcontrolador

Se mencionaron en el capítulo anterior las necesidades de emplear un microcontrolador más potente para procesar toda la data de los sensores, pues los sensores en este nuevo prototipo entregan más información que el pasado. Pero principalmente es que al implementar el controlador no lineal se necesitan realizar cálculos matemáticos de punto flotante muy pesado que un ATMEGA328p lo hace en un tiempo muy largo o es posible que con todas las operaciones matemáticas que debe realizar se sature su memoria SRAM.

El microcontrolador seleccionado fue el Arduino DUE, cuyas características y capacidades se comentan en la Sección (6.6). Comparando con el ATMEGA328p, este tiene el doble de pines, tiene más pines destinados a los distintos tipos de funciones periféricas como las comunicaciones UART, SPI, I2C, PWM, etc. Adicionalmente su capacidad de memoria SRAM es 48 veces mayor y la memoria Flash es 16 mayor que el del ATMEGA.

En es este prototipo se utilizó de la comunicación UART para comunicarse con el DWM1001-DEV,  $I^2C$  para comunicarse con la IMU de 9 grados de libertas y de la comunicación SPI para con el módulo de radiofrecuencia NRF24L01. Además necesita de dos PWM para controlar las velocidades de los motores y dos digitales para activar o desactivarlos. Se necesitan de dos entradas digitales con interrupciones para leer los datos de los dos encoders y otros dos para leer los finales de carrera.

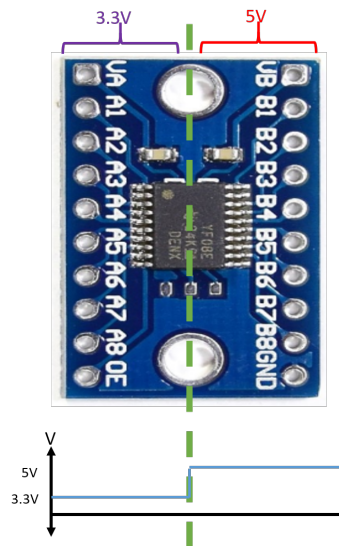


Figura 52: Funcionamiento TXS0108E

El Arduino DUE se alimenta directamente de 12V, no obstante todos sus pines trabajan a 3.3V. Muchos sensores trabajan también a 3.3V, por lo que no hay problema pero existen otros que trabajan a 5V, véase la Tabla (6). Para resolver este problema de la comunicación a diferentes voltajes se utiliza el módulo TXS0108E. Este es un regulador de voltaje

bidireccional de 3.3V a 5V o viceversa. En la Figura (52) se muestra lo anterior. Del lado izquierdo del módulo se conectan los dispositivos de voltaje bajo (3.3V) y del lado derecho los de voltaje alto (5V). Los pines del lado izquierdo están unidos con su opuesto del lado derecho, es decir el A1 está unido internamente con el B1 y así sucesivamente. Entonces, por ejemplo la señal que entra en A1 es convertida directamente a 5V en B1. Y la señal que entra en B1 es reducida automáticamente a 3.3V. La bidireccionalidad es conveniente en este proyecto para las comunicación  $I^2C$ , UART o SPI que son de doble vía.

El PCB del circuito *Master*, que es donde va el microcontrolador, se diseñó de tal manera que los sensores no estén soldados directamente al PCB sino que exista una desconexión manual entre los sensores y el microcontrolador. Esto con el objetivo de poder aislar ciertas partes del circuito electrónico ya sea para pruebas de campo o por si algún sensor o componente se daña y que pueda ser fácil reemplazable. Se utilizan los pines DUPONT, como los mostrados en la Figura (53). La parte que se muestra a la izquierda son las que son soldadas al PCB y en la derecha se muestra el cable con conector DUPONT, el cual va conectado al sensor. Las conexiones DUPONT poseen un mecanismo que al ser conectadas se quedan completamente fijas, porque para desconectarlos es necesario presionar una pequeña palanca que tienen. De este modo evitan que alguna fuerza o movimiento brusco desconecte involuntariamente el sensor.

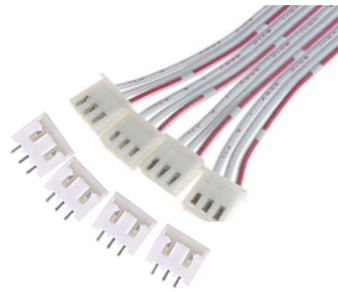
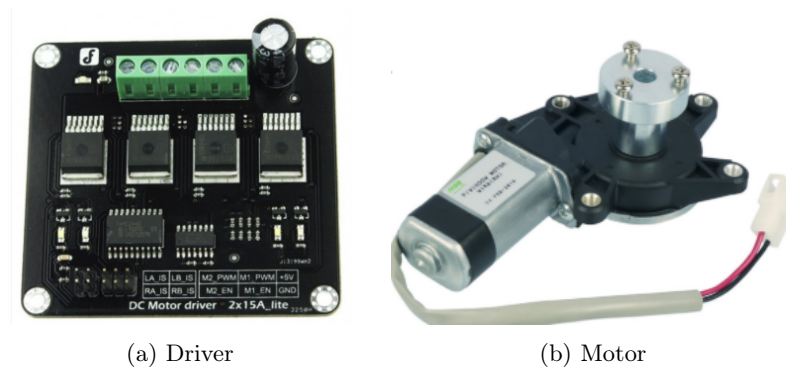


Figura 53: Pines DUPONT

## 10.6. Tracción



(a) Driver

(b) Motor

Figura 54: Componentes de la tracción del Prototipo 2

Por los motivos señalados en el capítulo anterior, se seleccionaron unos motores más

potentes para este prototipo. Para los cálculos se siguió utilizando la Ecuación (15) utilizando los mismos valores que para el cálculo del prototipo 1, es decir  $e = 0.58$ ,  $a = 0.1m/s^2$ ,  $g = -9.81m/s^2$ ,  $\theta = 5^\circ$ ,  $R = 0.08m$  y  $N = 2$ . El único cambio es el de la masa, pues ahora la batería es una de carro de aproximadamente 40lbs, por lo tanto al tomar en cuenta la estructura se estima un peso de 70lbs en total (exagerando un poco). El resultado es  $T = 19Kg * cm$ . No obstante, en esta ecuación no se toma en cuenta el torque de oposición que generar los granos de café al ser empujado por las aspas. No se cuenta con café real en el campus universitario para tener este dato. Es por esto que el valor del torque final se debe inflar un poco.

Se eligió entonces un motor con torque nominal mayor al resultado; precisamente un motor de  $30Kg * cm$  y con torque de detenimiento de hasta  $100Kg * cm$  (54b). No cabe duda que este torque puede no solo con su propio peso sino contra cualquier fuerza de oposición que existe en el terreno de café. También es un motor de 12VDC, tiene velocidad de  $60 \pm 15rpm$ . El peso de los motores es de 700 gramos. La única complejidad en cuanto a estos motores es la alta demanda de corriente. Sin torque de oposición consumen  $<5A$ , con torque de oposición consumen  $<15A$  y con torque de detenimiento  $<28A$ .

En práctica se midió que un sólo motor requiere 1A sin torque de oposición. Debido a que no se puede utilizar los laboratorios del campus debido al paro nacional por la pandemia, se realizaron pruebas ceseras para determinar la corriente utilizada por motor someténdola a diferentes torques de resistencia. La metodología de la prueba -mostrada en la Figura (55)- consistió en que el motor elevó una canasta con diferentes pesas de ejercicio y se le midió la corriente. Los resultados se muestran en la Tabla (4). Primero, se elevó una pesa de 12 Lbs con lo que se obtuvo una corriente promedio de 2.85A y una corriente máxima de 3.18A. Se le añadió otra pesa para un total de 27 Lbs, lo que significó una corriente de consumo de 5.80A en promedio y 6.21A máximo. Por último, se le añadió una pesa de 8Kg para un total de 44.64 Lbs, para el cual el motor utilizó 8.40A en promedio y un máximo de 9.11A.

Peso [Lb]	Peso [Kg]	Torque [Kg/cm]	I prom. [A]	I max [A]
12	5.44	4.27	2.85	3.18
27	12.24	9.62	5.80	6.21
44.6	20.24	15.90	8.40	9.11

Cuadro 4: Resultados (corriente y torque) de la prueba del motor

Cabe mencionar que para el cálculo del torque de oposición se utilizó la Ecuación (16), utilizando la medida del radio del eje del motor que es de aprox. 1.3 cm.

$$T = \frac{P_{Kg}}{R} \quad (16)$$

Dados los resultados anteriores es evidente que se necesita una batería de alta capacidad -de automóvil-, puesto que si en otro caso no será capaz de aguantar mucho tiempo. Esto se detalla mejor en la Sección (10.7).

El otro cambio al utilizar estos motores es el del circuito controlador de los motores. Anteriormente se utilizó un puente-H basado en transistores de potencia tipo TIP107 y TIP102. No obstante, por el alto flujo de corriente se necesita de un circuito más potente.



Figura 55: Prueba corriente y torque Motor

Se utiliza entonces un driver especial para los motores. Se utiliza el driver mostrado en la Figura (54a), que es uno de dos canales, es decir cada canal cuenta con un Puente-H independiente, en el que se le puede conectar un motor y por lo tanto se puede controlar la velocidad y la dirección de cada motor por separado. Cada canal soporte 15A continuos, lo que es adecuado a los motores que se utilizarán, puesto que estos no utilizan más de 15A con torque de oposición. El driver, además, soporta una corriente pico de aproximadamente 20A. El driver maneja motores de 5V hasta 35V. La otra gran ventaja de este componente electrónico es que cuenta con protecciones de sobre-voltaje, bajo-voltaje, sobre-temperatura, limitación de corriente y cortocircuito.

La facilidad de utilización fue otra característica determinista para la elección de este driver, porque se puede controlar directamente con señales del microcontrolador. Posee seis pines para poder controlar tanto los Puentes-H como las velocidades de ambos motores. Uno de ellos es para el voltaje de referencia del microcontrolador (5V) y tierra (0V). Luego cuenta con un pin de nombre *EN* para cada motor, que sirve para controlar la dirección de giro. Por último, cuenta con un pin por motor que recibe un PWM del microcontrolador. Esta señal PWM indica la velocidad del motor; el porcentaje del PWM indica el porcentaje de la velocidad a la que funcionará con respecto a la velocidad máxima angular. Un PWM al 100 % es velocidad máxima y uno al 0 % es paro total.

## 10.7. Suministro energético

### 10.7.1. Batería

Se sugiere medir el torque de oposición real en el campo de trabajo para conocer la cantidad de corriente exacta que consumen los motores en dichas condiciones. No obstante, utilizando el cálculo de torque de oposición de la Sección (10.6) e interpolando los datos

del Cuadro (4) se obtiene una corriente de aproximadamente 10A por motor; 20A para ambos motores. Para el mecanismo elevador de aspas se utilizan dos motores que utilizan aproximadamente 300mA cada uno cuando elevan las aspas -momento de mayor consumo durante su operación-. Todos los demás sensores junto al arduino DUE requieren aproximadamente 100mA. Por lo tanto, se aproxima el total de consumo de corriente de toda la parte electrónica y de potencia en aproximadamente 21.4A. No obstante, ambos paneles solares entregan al sistema aproximadamente 1.2A por lo que el requerimiento total se estima en 20.2A, aproximadamente.

Se implementa una batería de alta capacidad, específicamente una de carro. Se sugiere una batería de vehículo de 115 AH que normalmente tienen un peso de un poco más de 40lbs. Utilizando la Ecuación de Peukert (14) para determinar la vida de esta batería se obtiene que  $T_{descarga} = 3.12$  horas, con  $I = 20.2A$ ,  $C = 115AH$  y  $n = 1.2$ .

Aún con una de las baterías más potentes no se logra satisfacer las 7.5 horas de trabajo diario. Se necesitarían casi dos baterías de 115AH para suplir todo el tiempo. Por esta razón este prototipo se diseñó con la ventaja que la batería es de fácil reemplazo. La idea es que el robot opere las 3.12 horas mientras dura la vida de la batería pero cuando esta esté a punto de agotarse, el robot envía un mensaje al control remoto del usuario para advertir. El usuario detendrá al robot, extraerá la batería agotada e insertará una totalmente recargada y pondrá en marcha nuevamente al robot durante las próximas horas que dure la batería. Mientras tanto, el usuario pondrá a cargar la batería agotada para su próximo uso. No se instalan todas las baterías en el robot móvil de una vez debido al gran peso de estas, evitando así que los motores utilicen aún más corriente o que lleguen al torque de detenimiento.

Se sugiere el uso de un cargador especial para baterías de carro mínimo de 5A, pues el tiempo de carga de la batería de 115AH sería de 23 horas. Con un cargador de 10A el tiempo de carga total es de 11.5 horas. Actualmente, se utilizan las baterías que se tenían a disposición del prototipo 1 para realizar las pruebas. Estas se están cargando luego de cada prueba con un cargador de batería de auto de 1.5A.

### 10.7.2. Panel solar y circuito regulador

Tanto el panel solar como el circuito regular mostraron buenos resultados en el prototipo 1, entonces se siguen implementando en el nuevo robot. El panel solar ayuda a alargar la vida de la batería, puesto que entrega 1.5A constantemente, corriente que utiliza el circuito regulador para cargarla. Además, el regulador utiliza la carga de la batería para alimentar al robot móvil. Por la gran demanda energética las conexiones en este robot se hicieron un tanto diferentes al anterior, refiérase a la Figura (56). La diferencia fue que se conecta directamente a la batería el driver y a este se le conectan los dos motores de 30Kg\*cm. Esto es debido a la gran cantidad de corriente solicitada por los motores, pues la salida DC del regulador entrega máximo 10A. A esta salida del regular se conecta toda la demás electrónica, es decir, sensores, microcontrolador y los dos motores elevadores de aspas, puesto que requieren menos de 3A.

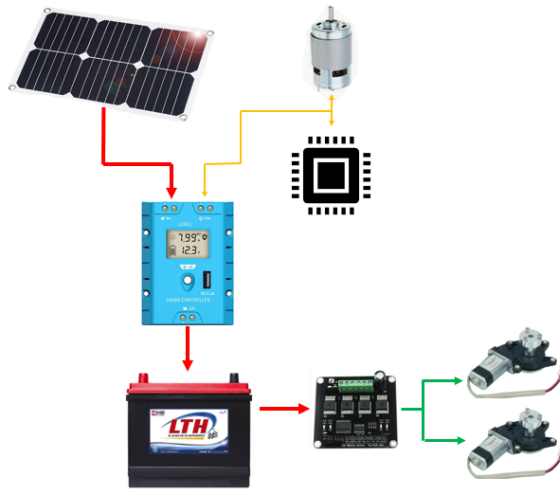


Figura 56: Conexión suministro energético Prototipo 2

### 10.7.3. Cableado

Los altos flujos de corriente también requieren de cables de potencia de menor calibre. Cabe mencionar que a menor calibre, mayor es su diámetro y mayor corriente puede pasar. Para las conexiones del suministro energético se utilizan cables de calibre 12AWG y 16AWG. El calibre 16AWG tiene un diámetro de 3mm, soporta máxime 600V y 35A. El de 12AWG es de 4.5mm de diámetro, soporta máxime 600V y hasta 88A. En el Cuadro (5) se muestra las características de cada cable dentro de la conexión del suministro eléctrico y el calibre utilizado.

Rama	Corriente promedio	Voltaje	Calibre del cable	Desconexión XT60
Panel - Regulador	1.5A	24V	12AWG	Sí
Regulador - Batría	1.5A	12V	12AWG	Sí
Batería - Driver	16A	12V	12AWG	Sí
Regulador - Electrónica + Motor elevador	3A	12V	16AWG	No
Driver - Motor tracción	11A	12V	16AWG	No

Cuadro 5: Características del cableado

Cabe mencionar que algunos cableados cuentan con conectores tipo XT60 (Figura(57)). Este permite abrir un circuito y volverlo a cerrar cuando se requiera. Se implementa en este proyecto para facilidad a la hora de realizar pruebas aislando ciertas regiones electrónicas o en el caso de la batería para fácil reemplazo de esta cuando se agote. Los cableados que no cuentan con desconexión XT60 cuentan con bornes tipo bloque que están soldados al circuito PCB.

Cabe mencionar que el cable entre el regulador y la electrónica + los motores elevadores de aspas está a 12V con el objeto de alimentar a los motores, sin embargo la electrónica y los sensores se alimentan de 5V ó de 3.3V. En el circuito PCB se utiliza entonces un regulador

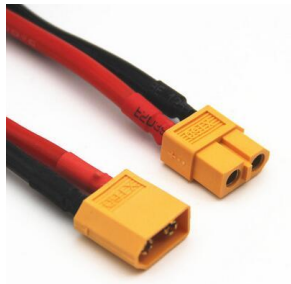


Figura 57: Desconexión tipo XT60

de voltaje tipo LM7805 para bajar el voltaje de 12V a 3.3V y un regulador de voltaje tipo LM1117T-3.3 para bajar el voltaje de 12V a 3.3V. En el Cuadro (6) se muestran los voltajes de suministro para los distintos sensores.

Sensor/Componente	Voltaje de suministro
Arduino DUE	12V
DWM1001-DEV	5V
NRF24L01	5V
IMU 9 GDL	3.3V
Sharp A52	3.3V
Final carrera	3.3V

Cuadro 6: Voltaje de suministro - Sensores y componentes electrónicos

## 10.8. Sistema electrónico para elevar las aspas

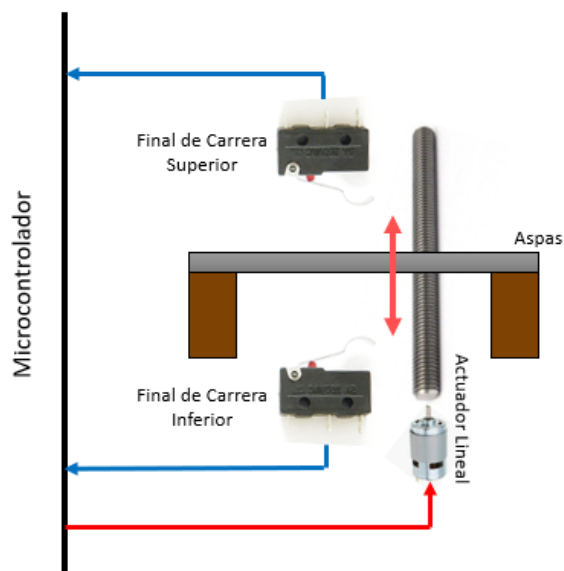


Figura 58: Sistema elevador de aspas

El sistema elevador de aspas funciona principalmente con un actuador lineal. Para el actuador lineal se utiliza el motor que se se había utilizado para el prototipo 1; el motor de 12V y 7Kg\*cm. En un sentido de giro levanta las aspas y en el otro sentido baja las aspas. Controlar la dirección de giro del motor se realiza mediante un Puente-H y una amplificación de voltaje previa de 5V a 12V. Se utilizó el mismo circuito mostrado en la Figura (24), dónde las señales A y B son señales digitales provenientes del Arduino DUE.

Este sistema, además cuenta con dos finales de carrera que nos indican cuando la barra de las aspas ya llegó arriba y cuando ya llegó a la posición más baja. Un final de carrera es básicamente un pulsador que deja pasar voltaje cuando es presionado. Un final de carrera se instala en la parte superior de la carrera y el otro en la parte inferior. Entonces cuando la barra de aspas llega a la parte superior de la carrera, presiona al final de carrera y este envía un voltaje alto al microcontrolador. Así es como sabe el microcontrolador que la barra ha llegado hasta arriba. En consecuencia, el microcontrolador apaga la señal que provoca la activación del motor. Lo mismo sucede con el final de carrera de la parte inferior. En la Figura (58) se representa el funcionamiento de este sistema.

El funcionamiento completo de la operación de este sistema de elevación de aspas se detalla en el listado de pasos siguiente:

1. Determinar si robot móvil se encuentra dentro del terreno de café, es decir  $0 < X_a < X_{A2}$  y  $0 < Y_a < Y_{A3}$ <sup>1</sup>.
2. En caso afirmativo y si el final de carrera inferior no está activado -que implica que las aspas están arriba-, entonces salida del microcontrolador se setea  $B = 1_{binario}$  de modo que las aspas empiecen a bajar. Esperar a que final de carrera inferior se active y setear  $B = 0_{binario}$ . En caso que el final de carrera inferior ya hubiese estado activado implicaría que las aspas ya están bajas, en dicho caso no efectuar nada.
3. En caso que (1) es falso, quiere decir que robot móvil está fuera del terreno de café. Chequear que final de carrera superior no esté activado -lo que implica que las aspas están bajas todavía-. Si es afirmativo setear  $A = 1_{binario}$  para empezar subir las aspas. Esperar a que el final de carrera superior sea positivo para setear  $A = 0_{binario}$ , pues implicaría que aspas ya subieron. En case que final de carrera superior haya estado activado, significa que aspas ya están levantadas y por lo tanto no es necesario efectura nada.
4. Regresar a (1).

## 10.9. Metodología para integración de sistemas electrónicos y fabricación de PCBs

Por complicaciones debido a la pandemia el alcance se vio limitado, es decir no se pudieron integrar los sistemas electrónicos en una estructura mecánica (Tesis de Alejandro Windevexhel). Es por esta razón, que se dispuso realizar un modelo a escala e integrarle a

---

<sup>1</sup>dónde el punto  $(X_a, Y_a)$  es el punto actual del robot medido por el Tag,  $X_{A2}$  es la coordenada X del Anchor A2 y  $Y_{A3}$  es la coordenada en Y del Anchor A3.

este pequeño robot toda la electrónica (Figura (59)). Además en este documento se propone una metodología para la integración de los sistemas electrónicos, con una estructura a escala real.

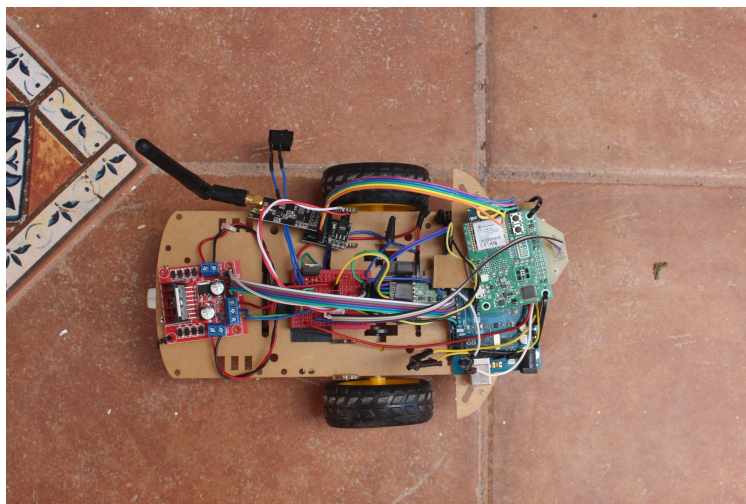


Figura 59: Robot a escala

Se realizó la simulación a escala del rayado de café con es modelo a escala, con el objeto de probar controlador para su movimiento. El resultado se observa en este link. El controlador funcionó bastante bien, aunque oscila un poco en vez de seguir la trayectoria recta. Esto es posible mejorarlo al seleccionar mejores constantes, pero para el propósito de este proyecto, es aceptable. Los giros de 90 grados controlados por la IMU, también fueron aceptables aunque sigue existiendo el problema de la no equidad en los 360 grados. Causa que el robot no quede apuntando directamente a la dirección que tiene que seguir. No obstante, esto es corregido por el controlador ya cuando el robot está siguiendo la trayectoria.

Sin embargo este es un modelo a escala; la implementación a escala real deberá seguir un procedimiento similar que el del robot a escala, el cual se detalla a continuación. Antes es necesario especificar que ya se fabricaron los circuitos impresos de los circuitos Master, Anchor, control remoto y el circuito elevador de aspas. Se soldaron los componentes electrónicos a las placas del Anchor (Figura (67)), control remoto (Figura (72)) y el circuito elevador de aspas (Figura (75)) y estos funcionaron correctamente, tal como sus representantes en Protoboard. Cabe mencionar que el PCB del Master, a pesar de haber sido fabricado, no se le soldaron los componentes todavía. La razón es que este circuito contiene componentes caros traído del extranjero. No es prudente soldarlos y sin tener la seguridad de que el PCB funciona correctamente y echar a perder dichos componentes. Los PCBs que sí fueron soldados se tenían componentes extra por si se daba el caso que el PCB no funciona, lo cual no fue el caso para ningún circuito impreso.

Antes de fabricar el PCBs del circuit Master del robot móvil se sugiere instalar su representante en protoboard en la estructura del robot móvil y realizar las pruebas de campo, puesto que es más fácil realizar cambios en protoboard si es que alguna parte no da buenos resultados en campo. Las pruebas de campo incluyen, las pruebas de tracción, control remoto, orientación, posicionamiento en tiempo real, suministro energético y posición de aspas. Los motores deben se capaces de mover al mismo robot móvil a través del campo lleno de granos

de café. El robot debe poder girar con facilidad también. La prueba de control remoto es simplemente controlar los movimientos con el control remoto y asegurarse que la información sea recibida y enviada de forma correcta sin importar la distancia. La prueba de orientación consiste en probar que la orientación dictada por los sensores sea acorde a la de una brújula real. Se debe probar la red de DWM1001-DEV y determinar si al mover el robot por el campo, el TAG muestra su posición correcta. La prueba de alimentación energética consiste en hacer mover al robot móvil por el terreno de café por 1.5 horas y medir el nivel de carga de la batería, con ello se puede determinar el tiempo de vida real del robot en campo. Las aspas simplemente deben subir y bajar correctamente.

Habiendo asegurado el buen funcionamiento de cada sistema se recomienda probar el controlador no lineal. Este debe seguir la trayectoria de rayado dentro del terreno de café durante toda la jornada de trabajo. Se sugiere que esto se realice aún en protoboard. De ser necesario, corregir los errores tanto de programación como de hardware en el protoboard. Luego se recomienda proseguir a reeditar el esquemático y el diseño del PCB en ALTIUM, seguidamente mandarlo a re-fabricar (de ser necesario) y soldar componentes. Así se tendrían ya todos los PCB funcionando en el robot móvil.

## 10.10. Listado de materiales electrónicos completo

En los Cuadros (7) y (8) se muestra el listado completo de todos los componentes eléctricos y electrónicos utilizados en el prototipo 2. Se muestra el lugar de adquisición, la cantidad de piezas utilizadas, el precio unitario (los precios en dólares estadounidenses son las piezas compradas en el extranjero) y el total. Este último está en quetzales utilizando una tasa de  $US\$ 1.00 = Q 7.70$  para las piezas adquiridas en el extranjero.

El Cuadro (9) muestra los precios de la fabricación de los PCBs, cotizados en la empresa manufacturera de PCBs **JLCPCB**. La tabla muestra las dimensiones de la placa y su precio de producción. Este precio corresponde al precio de **cinco** unidades puesto que es la cantidad mínima de producción de la empresa manufacturera. Todas las placas tienen dos capas, 1.6 cm de espesor y dieléctrico FR-4.

Cabe mencionar que en ninguna de las tablas se incluyen **montos de envío o pagos de impuestos en aduanas**. El monto total de la compra de los componentes y de la fabricación de las placas, tendría un costo de (sin incluir costes de envío e impuestos de aduanas): **TOTAL = Q7126.10**.

Componente	Lugar de compra	Cantidad	Precio	Sub-Total
Motor derecho	Robotshop	1	\$19.50	Q150.15
Motor izquierdo	Robotshop	1	\$19.50	Q150.15
Driver motores	Robotshop	1	\$44.95	Q346.12
Conector potencia	Robotshop	4	\$1.75	Q53.90
Batería	Cemaco	1	Q810.00	Q810.00
Cargador batería	Amazon	1	\$30.00	Q325.42
Bornes	Cemaco	1	Q30.00	Q30.00
Cable 16AWG	La Electrónica GT	2	Q2.50	Q5.00
Cable 12AWG	La Electrónica GT	2	Q4.00	Q8.00
Tubo termoencogible 3.5mm	La Electrónica GT	1	Q3.00	Q3.00
Tubo termoencogible 2.5mm	La Electrónica GT	1	Q2.00	Q2.00
Conector Dupont + Pines	Amazone	1	\$14.99	Q115.42
Conector Dupont para cable	Amazone	1	\$11.99	Q92.32
Cable Dupont	Amazone	1	\$11.00	Q84.70
IMU 9 GDL	Pololu	1	\$15.95	Q122.82
DWM1001-DEV	DigiKey	5	\$39.00	Q1,501.50
Fotointerruptor Sharp A52	SMD Electrónica	2	Q30.00	Q60.00
Sujetador batería 18650 7.4V	La electrónica GT	5	Q13.00	Q65.00
TXS0108E regulator	La electrónica GT	2	Q24.00	Q48.00
Arduino DUE	Guatemala Digital	1	Q290.00	Q290.00
Micro-Switch final carrera	SMD Electrónica	2	Q5.00	Q10.00
LM1117T-3.3	SMD Electrónica	5	Q6.00	Q30.00
Pin fila Header Macho	SMD Electrónica	1	Q5.00	Q5.00
Pin doble fila Header Macho	SMD Electrónica	1	Q6.00	Q6.00
Panel solar	Amazon	2	\$50.00	Q770.00
Solar Charger Controller	Amazon	1	\$12.00	Q92.40
Car Battery Charger	Guatemala Digital	1	Q239.00	Q239.00
Batería 18650	ABC Electrónica	10	Q620.00	Q620.00
Cargador batería 18650	AbC Electrónica	2		
LM7805	SMD Electrónica	6	Q4.00	Q24.00
Switch unitario	SMD Electrónica	5	Q7.50	Q37.50
Switch potencia	ABC Electrónica	1	Q5.00	Q5.00
Cristal 16 MHz	SmD Electrónica	1	Q6.00	Q6.00
Motor Dc	Guatemala Digital	2	Q179.00	Q358.00
TIP102 NPN	ABC Electrónica	2	Q7.50	Q15.00
TIP107 PNP	ABC Electrónica	2	Q7.50	Q15.00
Atmega328P	SmD Electrónica	1	Q50.00	Q50.00
Capacitores	SmD Electrónica	6	Q1.00	Q6.00
Resistencias	SmD Electrónica	15	Q0.50	Q7.50
Terminales de tornillo	SmD Electrónica	13	Q2.50	Q32.50
NRF24L01 & Modulo	Amazon	2	\$10.00	Q154.00
KA228	Amazon	6	\$1.90	Q87.78

Cuadro 7: BOM completo del Prototipo 2 (Parte 1).

Componente	Lugar de compra	Cantidad	Precio	Sub-Total
Push Buttons	SMD Electrónica	9	Q1.00	Q9.00
LCD	SMD Electrónica	1	Q40.00	Q40.00
LM324N	SMD Electrónica	1	Q10.00	Q10.00
FTDI	La electrónica GT	1	Q49.00	Q49.00
Base integrados	SMD Electrónica	4	Q3.00	Q12.00
Alambre Protoboard	SMD Electrónica	7	Q3.00	Q21.00
TOTAL COMPONENTES ELECTRÓNICOS				Q6,975.18

Cuadro 8: BOM completo del Prototipo 2 (Parte 2).

Placa	Dimensiones	Peso	Precio	Sub-Total
Master del robot móvil	133 x 93 mm	210g	\$7.60	Q58.52
Anchor	71 x 66 mm	80g	\$2.00	Q15.40
Control remoto	133 x 66 mm	110g	\$6.00	Q46.20
Elevador aspas	70 x 72 mm	80g	\$2.00	Q15.40
Encoder	40 x 24 mm	20g	\$2.00	Q15.40
TOTAL PCBS			Q150.92	

Cuadro 9: Cotización manufactura placas PCB



1. La principal complicación del prototipo 1 fue que el torque de los motores no es el suficiente para el trabajo que debe realizar. Por otro lado, los sensores utilizados para controlar la trayectoria del rayado resultaron no ser los adecuados, ya que las condiciones del terreno perjudican la lectura de los sensores. El prototipo 2 cuenta con un sistema de tracción más potente y cuenta con sensores que le permite conocer su orientación y su posición en tiempo real independiente de los factores externos del campo de trabajo.
2. Se logró crear una *network* compuesta por cinco módulos DWM1001-DEV: cuatro *Anchors* y un *Tag*. Se obtuvo la posición actual del Tag respecto a los *Anchors* con una variación en promedio de aproximadamente  $\pm 10$  cm, siendo un RTLS adecuado para la aplicación.
3. En cuanto a la odometría, se obtuvo buena precisión del *Yaw* con variación en promedio de  $\pm 0.12^\circ$  aproximadamente. No obstante, los  $360^\circ$  de una vuelta no están distribuidos equitativamente, y en cada inicialización el norte varía. A estos dos, no obstante, se les logró hallar solución.
4. Se utilizó un controlador no lineal para robots móviles en la simulación que cumplió con dirigir al robot móvil sobre la trayectoria de rayado con un movimiento suave y preciso.
5. Todo el suministro energético propuesto tiene un tiempo de vida de 3.12 horas aproximadamente, siendo un total de dos baterías por jornada de trabajo.
6. Se utilizaron con éxito los módulos NRF24L01 para enviar y recibir data desde y hacia el control remoto.
7. La parte electrónica y eléctrica del prototipo 2 tiene un costo aproximado de Q7126.10.
8. Se diseñaron los esquemáticos y circuitos impresos de los siguientes módulos: circuito master del robot móvil, control remoto y los *Anchors*.

9. Se propuso una metodología para realizar la integración de todos los sistemas electrónicos en el robot móvil y el proceso para la fabricación de los circuitos impresos. Además, se realizó un modelo a escala del robot móvil.

## CAPÍTULO 12

---

### Recomendaciones

---

Establecer una comunicación entre el robot móvil y el usuario vía bluetooth utilizando un módulo HC05 en vez de utilizar radiofrecuencia con el NRF24L01. El bluetooth permite conectarse mediante un dispositivo inteligente, por lo que se puede desarrollar una App para controlar al robot. La ventaja de esto es más facilidad de uso para el usuario, se ahorra los gastos del hardware del control remoto físico y también esta App se podría comunicar con la App de *DecaWave* para configurar y monitorear el RTLS.



- 
- [1] M. H. Floto y D. H. W. Griepentrog, “Field Robot Event”, 2019. dirección: <https://www.fieldrobot.com/event/>.
  - [2] —, “Field Robot Event 16th Edition, Proceedings 2018”, 2018. dirección: [https://www.fieldrobot.com/event/wp-content/uploads/2019/06/Proceedings\\_FRE2018.pdf](https://www.fieldrobot.com/event/wp-content/uploads/2019/06/Proceedings_FRE2018.pdf).
  - [3] D. P. Chaima BENSACI Youcef ZENNIR, “Nonlinear Control of a Differential Wheeled Mobile Robot in Real Time -Turtlebot 2”, 2019. dirección: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02014895/document>.
  - [4] DecaWave, “MDEK1001 Kit User Manual Module Development & Evalutaion Kit for the DWM1001”, 2017. dirección: <https://www.decawave.com/mdek1001/usermanual/>.
  - [5] A. Guatemala, “Datos Actividad Cafetalera Nacional 2019”, *Café de Guatemala en Cifras*, 2019. dirección: <https://www.anacafe.org/uploads/file/cd2552c54b3a4616b0e82ae14c7db77/GuatemalaCafeenCifras-2018-2019.pdf>.
  - [6] DecaWave, “DWM1001 Module Development Board Datasheet”, 2017. dirección: <https://www.decawave.com/dwm1001dev/datasheet/>.
  - [7] K. Lynch y F. Park, *The L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Companion*. Cambridge University Press, 2017.
  - [8] W. Foundation, “Aircraft Principal Axes”, *Wikipedia Foundation*, 2019. dirección: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft\\_principal\\_axes](https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes).
  - [9] G. Lucas, *Using a PID-based Technique For Competitive Odometry and Dead-*. The Newsletter for the Seattle Robotics Society, 2001. dirección: [http://www.seattlerobotics.org/encoder/200108/using\\_a\\_pid.html](http://www.seattlerobotics.org/encoder/200108/using_a_pid.html).
  - [10] L. Tran, “Data Fusion with 9 Degrees of Freedom Inertial Measurement Unit To Determine Object’s Orientation”, 2017.
  - [11] C. Benson, *Drive Motor Sizing Tutorial*. Robotshop, 2014. dirección: <https://www.robotshop.com/community/blog/show/drive-motor-sizing-tutorial>.



## 14.1. Esquemáticos de los circuitos

Seguidamente se muestran todos los esquemáticos de todos los circuitos utilizados en el proyecto. Solamente el esquemático del circuito Master del robot móvil no es definitivo, debido a que su PCB aún no ha sido ensamblado no probado. Por lo que está sujetos a cambios en un futuro cercano. Los demás esquemáticos sí son los definitivos.

### 14.1.1. Circuito para DWM1001-DEV - *Anchor*

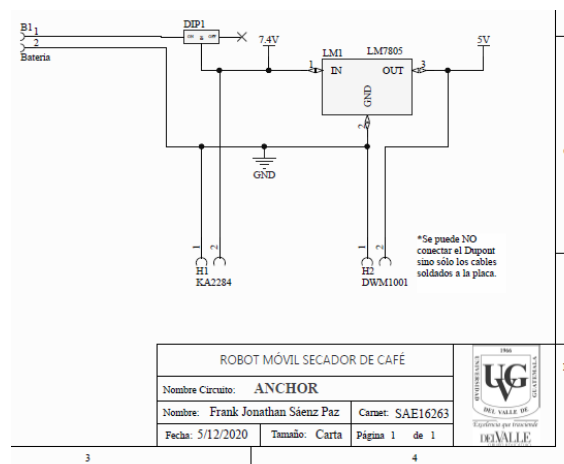


Figura 60: Esquemático circuito Anchor

### 14.1.2. Circuito Master del robot móvil

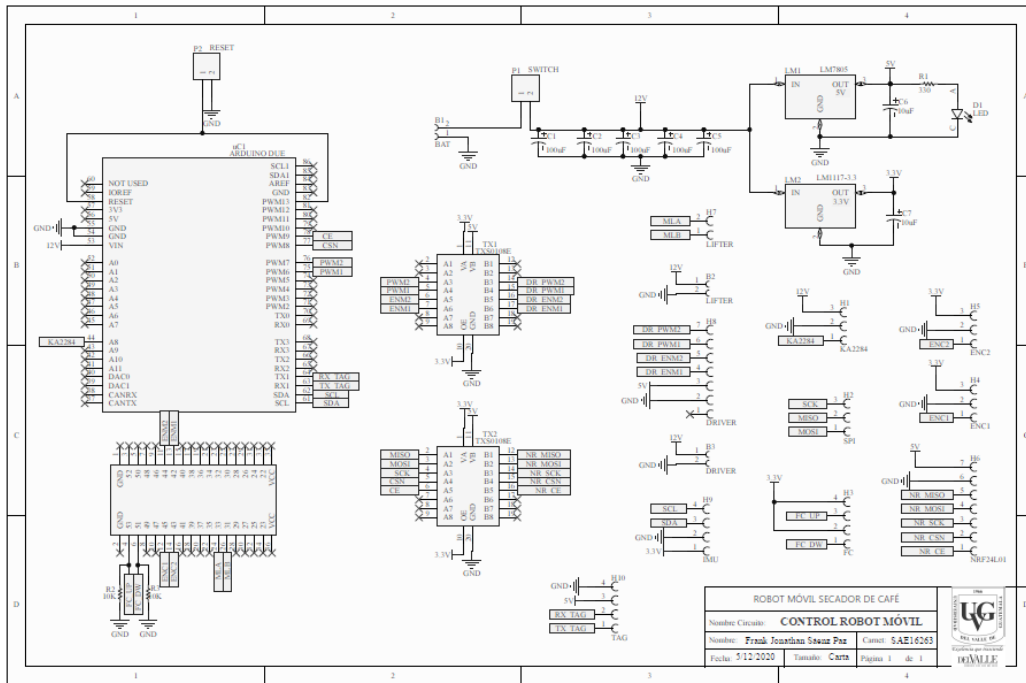


Figura 61: Esquemático circuito Master del robot móvil

### 14.1.3. Circuito de los Encoders

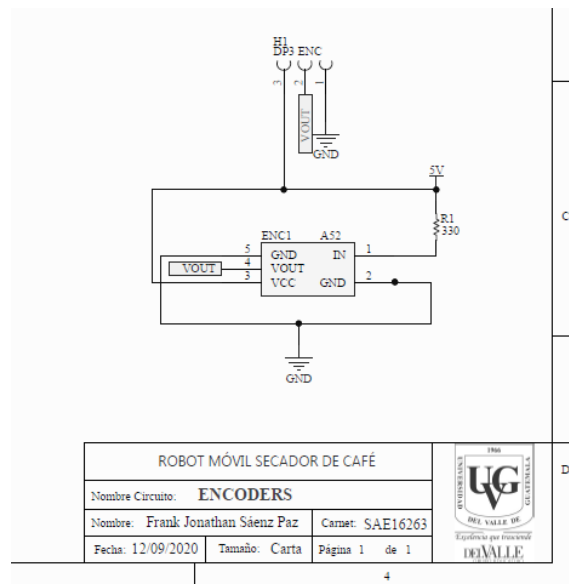


Figura 62: Esquemático circuito Encoders

### 14.1.4. Circuito del control remoto

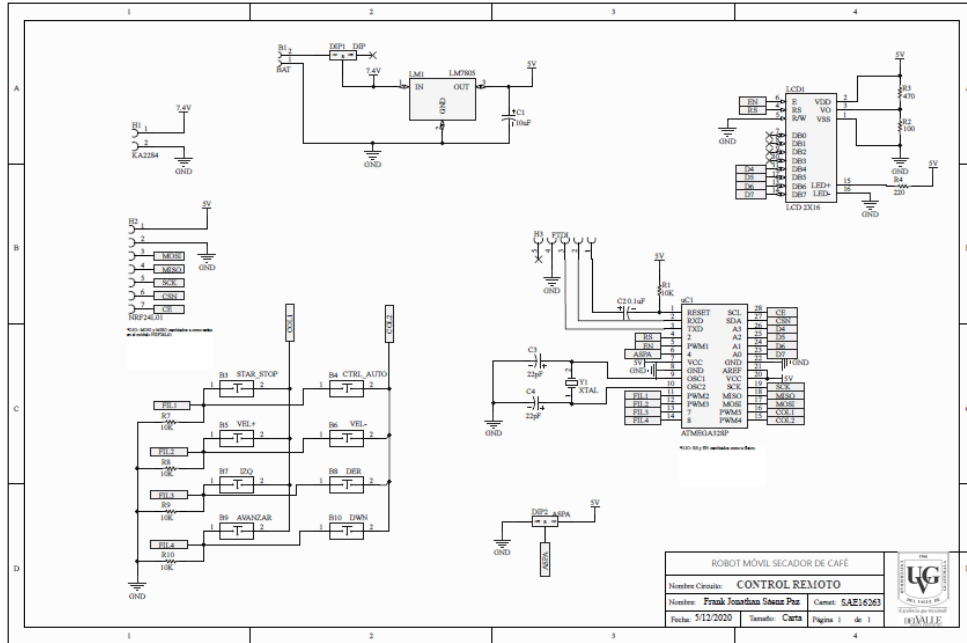


Figura 63: Esquemático circuito control remoto

### 14.1.5. Circuito elevador de aspas

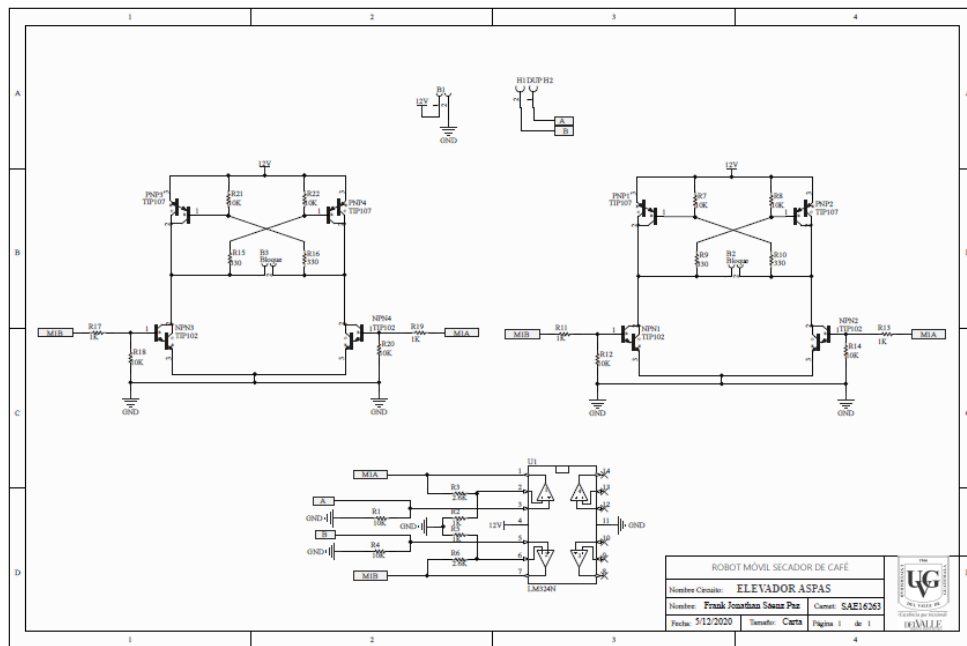


Figura 64: Esquemático circuito elevador aspas

## 14.2. PCBs

Seguidamente se muestran todos los diseños de PCBs, sus representaciones en 3D y los PCBs físicos con sus componentes electrónicos soldados.

### 14.2.1. PCB para DWM1001-DEV - *Anchor*

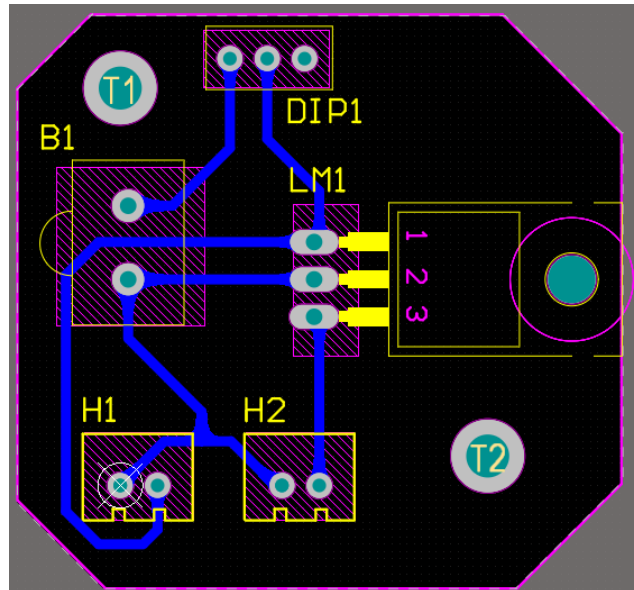


Figura 65: Diseño PCB circuito Anchor

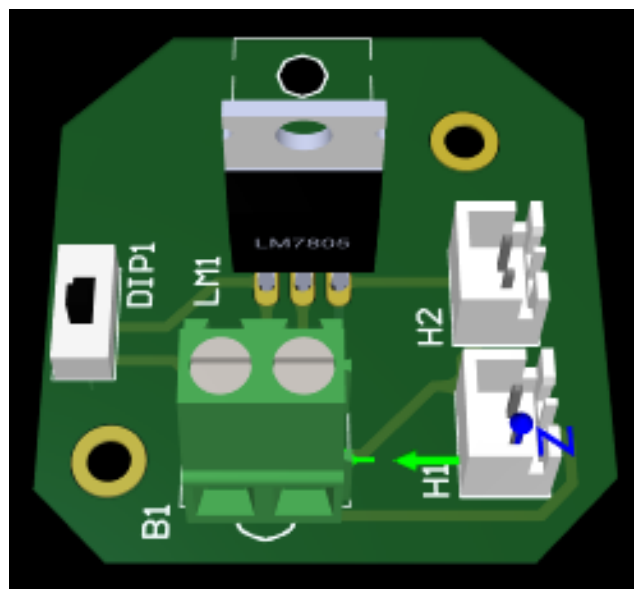


Figura 66: Representación 3D del circuito Anchor

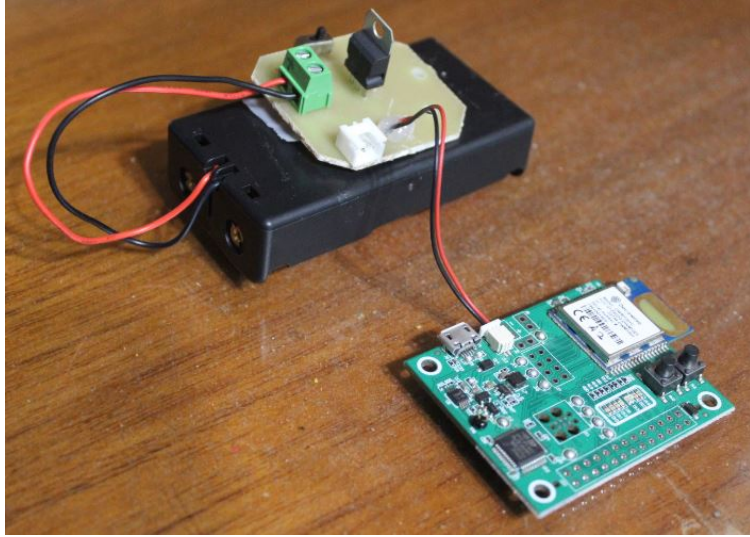


Figura 67: PCB circuito Anchor

#### 14.2.2. PCB Master del robot móvil

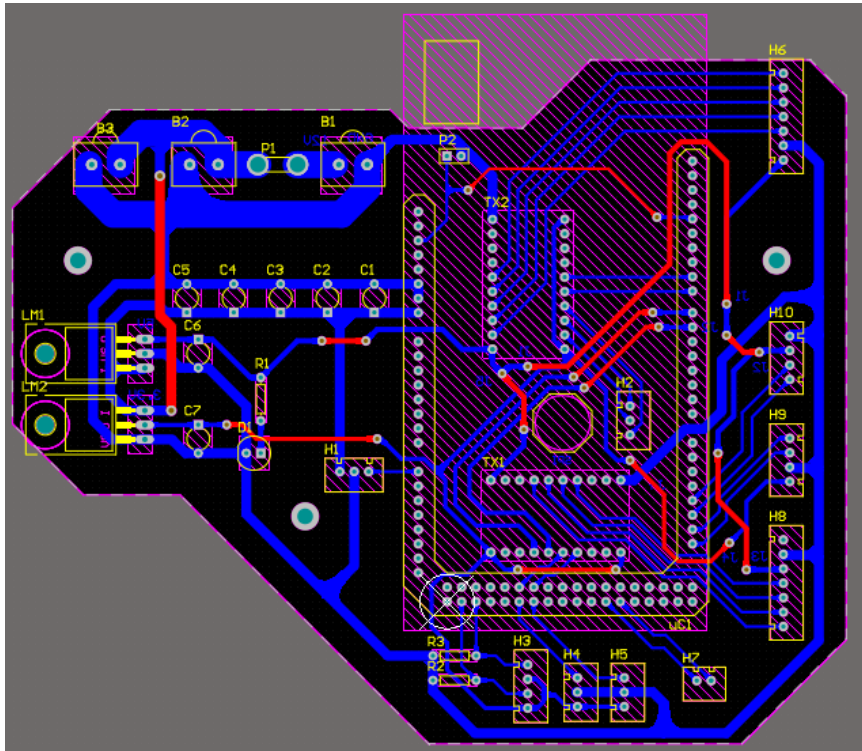


Figura 68: Diseño PCB Master del robot Móvil

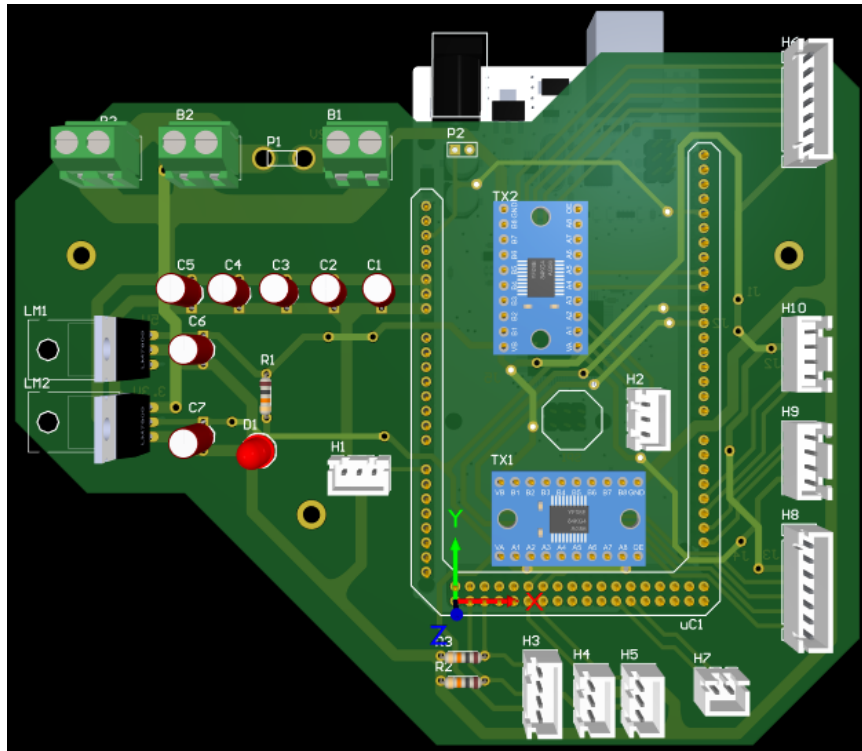


Figura 69: Representación 3D del circuito Master del robot móvil

### 14.2.3. PCB Control Remoto

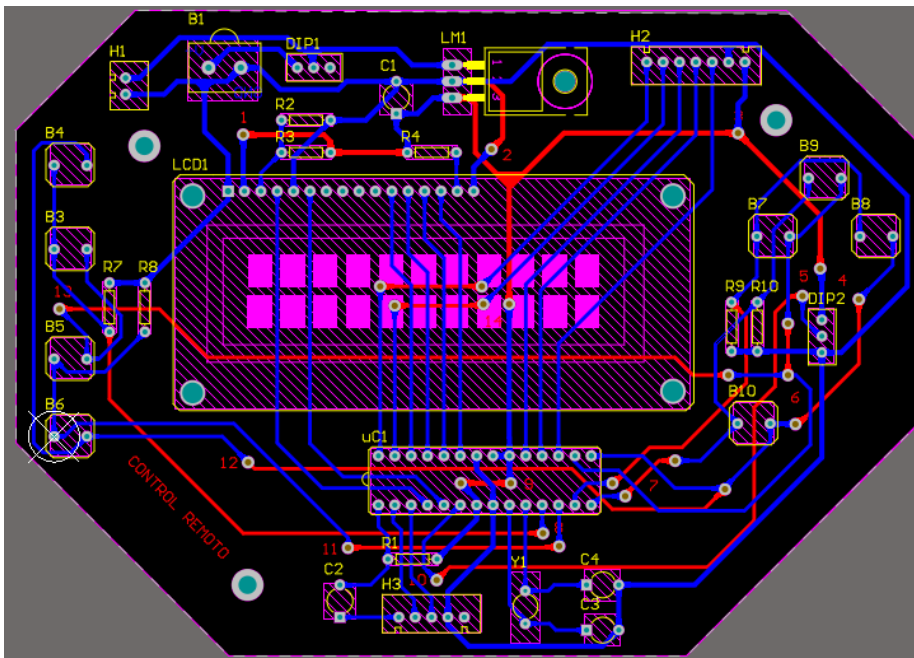


Figura 70: Diseño PCB control remoto

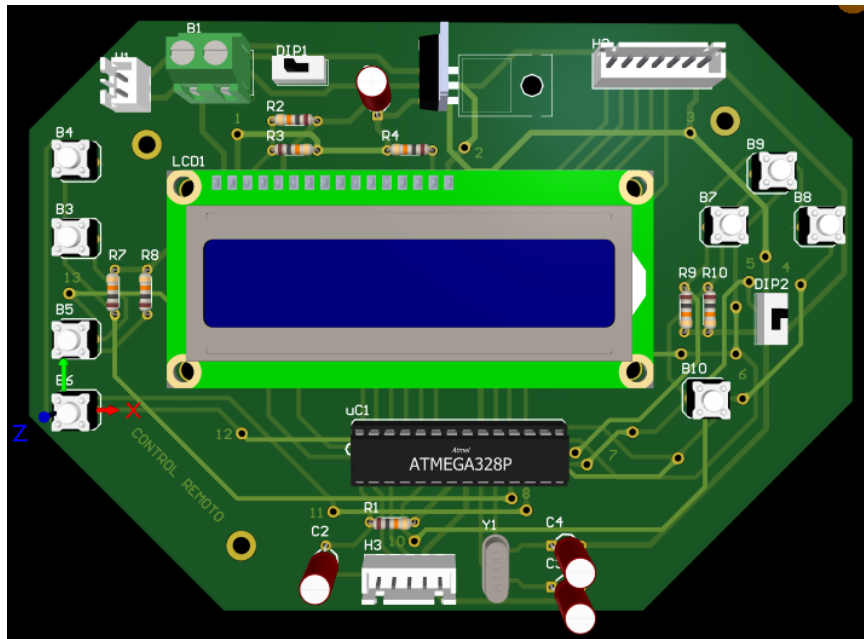


Figura 71: Representación 3D del circuito control remoto

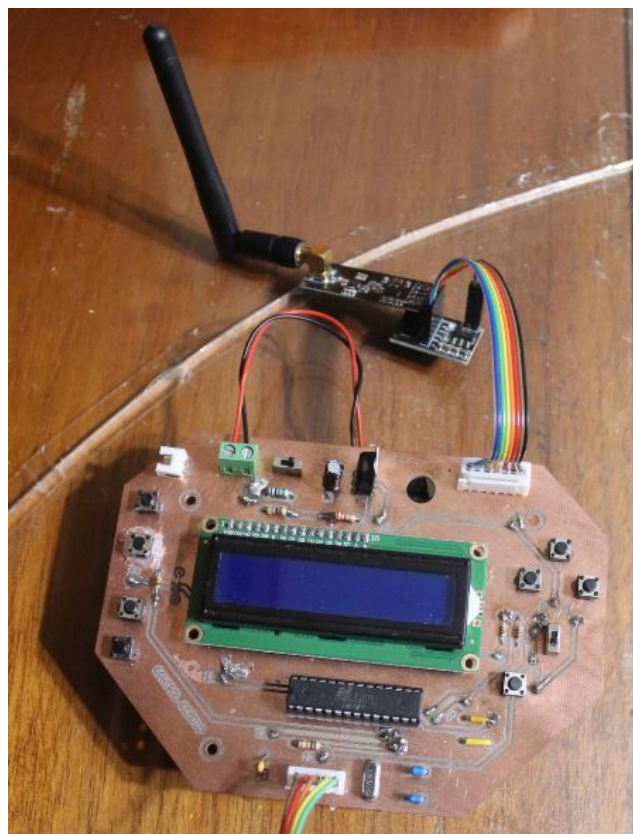


Figura 72: PCB circuito control remoto

#### 14.2.4. PCB elevador de aspas

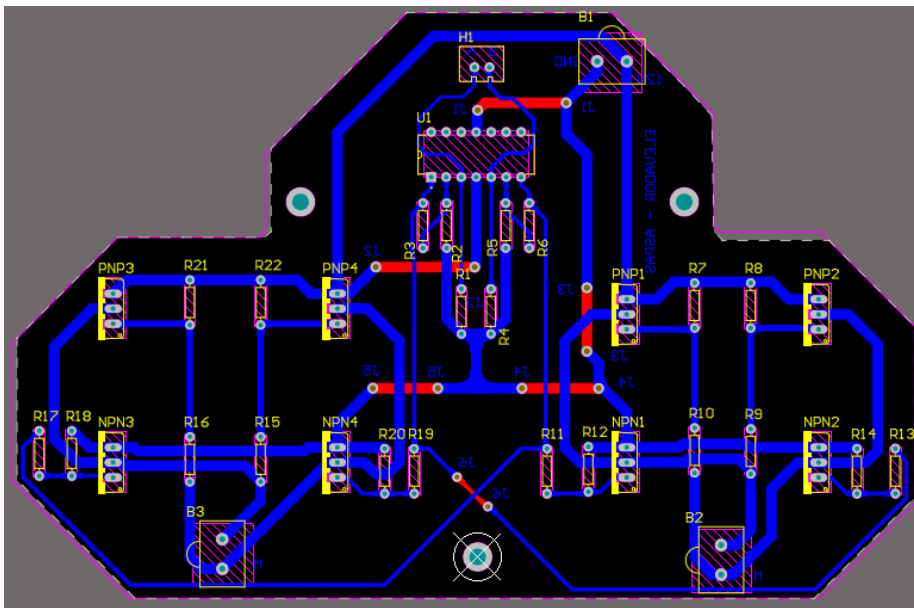


Figura 73: Diseño PCB elevador de aspas

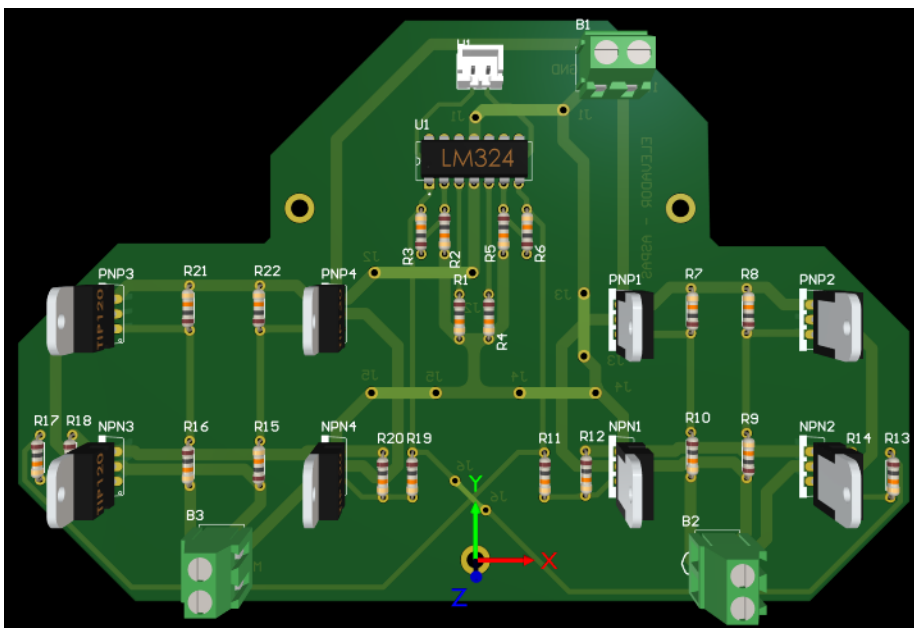


Figura 74: Representación 3D del circuito elevador aspas

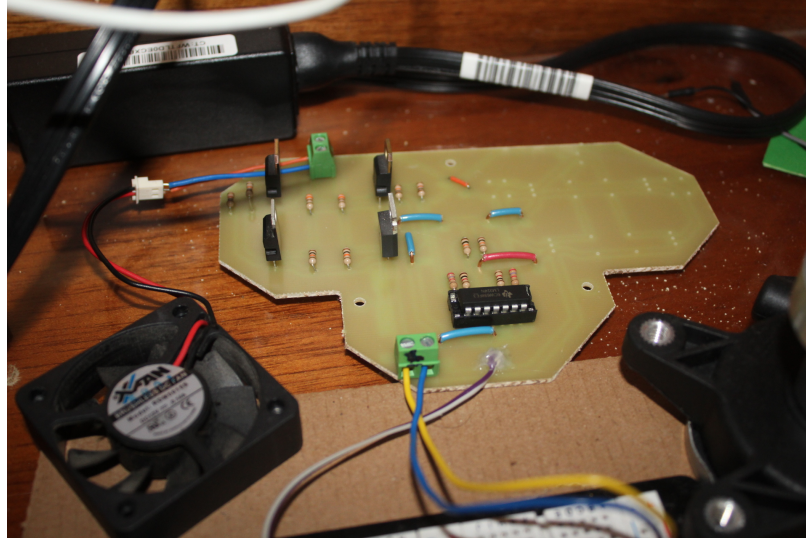


Figura 75: PCB elevador de aspas

### 14.2.5. PCB Encoders

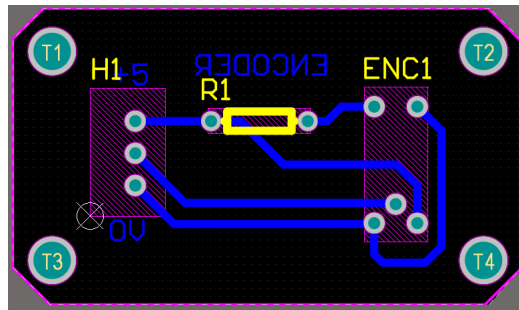


Figura 76: Diseño PCB Encoder

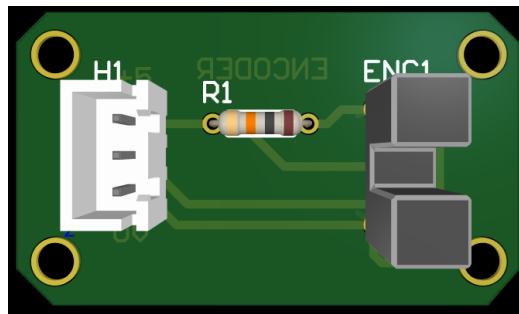


Figura 77: Representación 3D del circuito Encoder

## 14.3. Detalles circuitos Prototipo 2

### 14.3.1. Circuitos de robot móvil

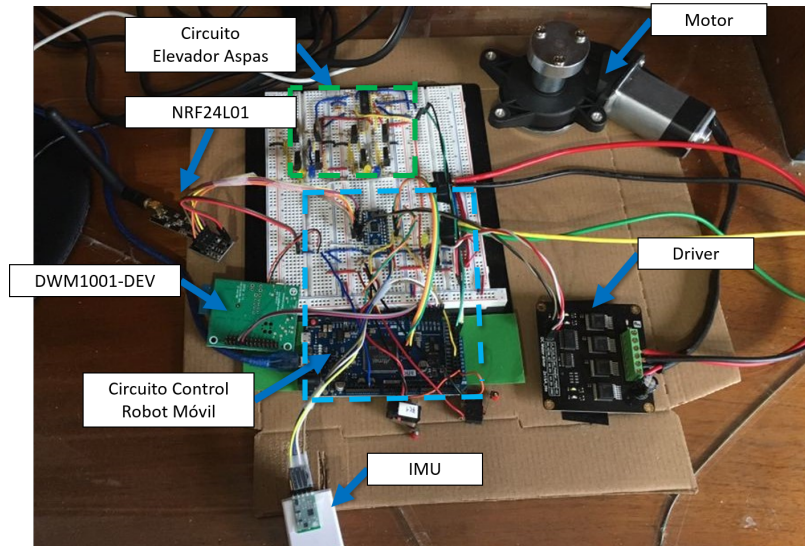


Figura 78: Fotografía circuitos en robot móvil

### 14.3.2. Control remoto

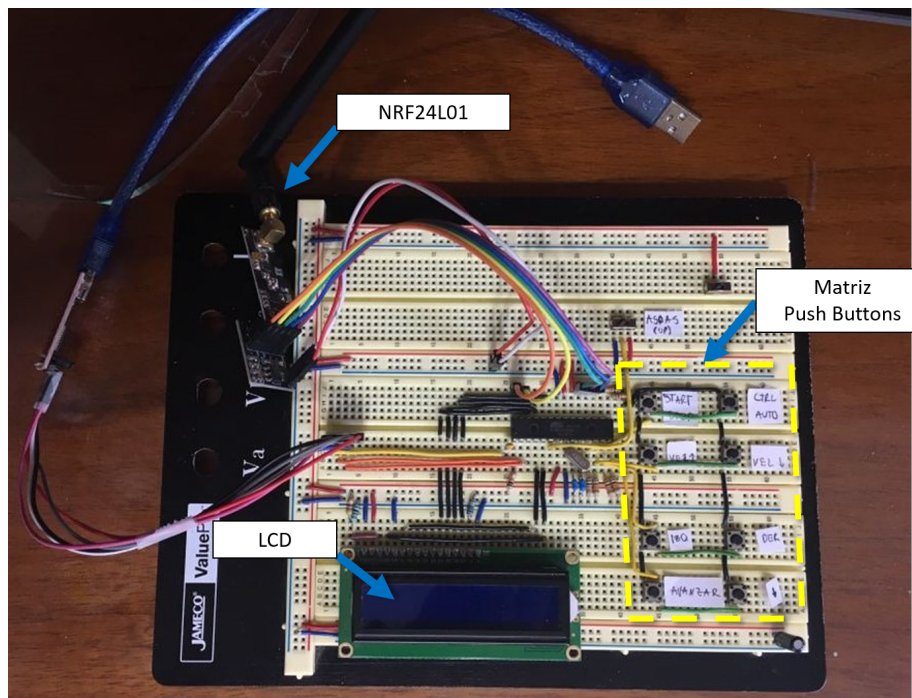


Figura 79: Fotografía circuito control remoto (Protoboard)

### 14.3.3. RTLS - Anchors y Tag

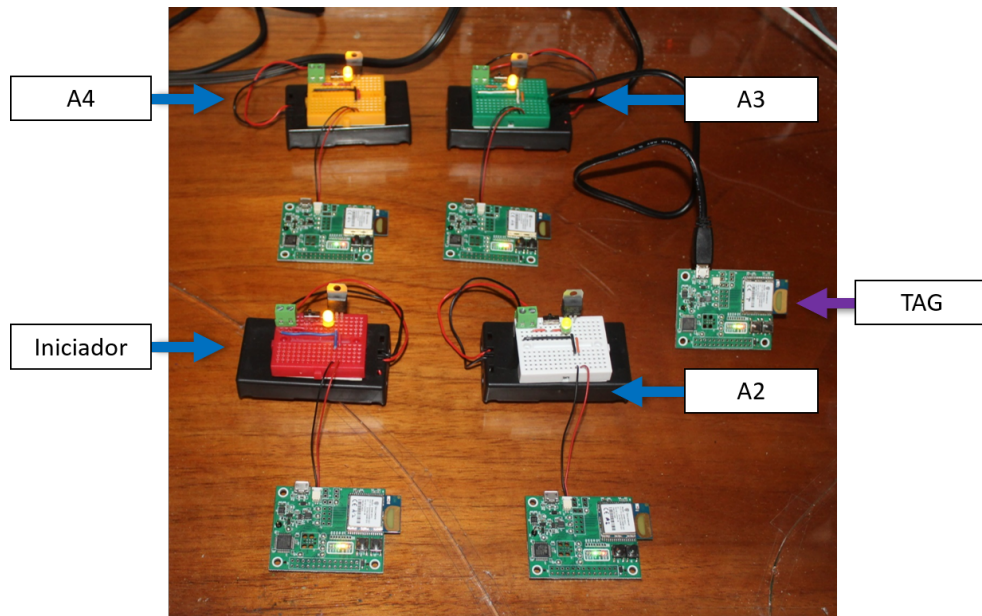


Figura 80: Circuito de los cuatro Anchors (Protoboard) y un Tag

### 14.3.4. Encoders

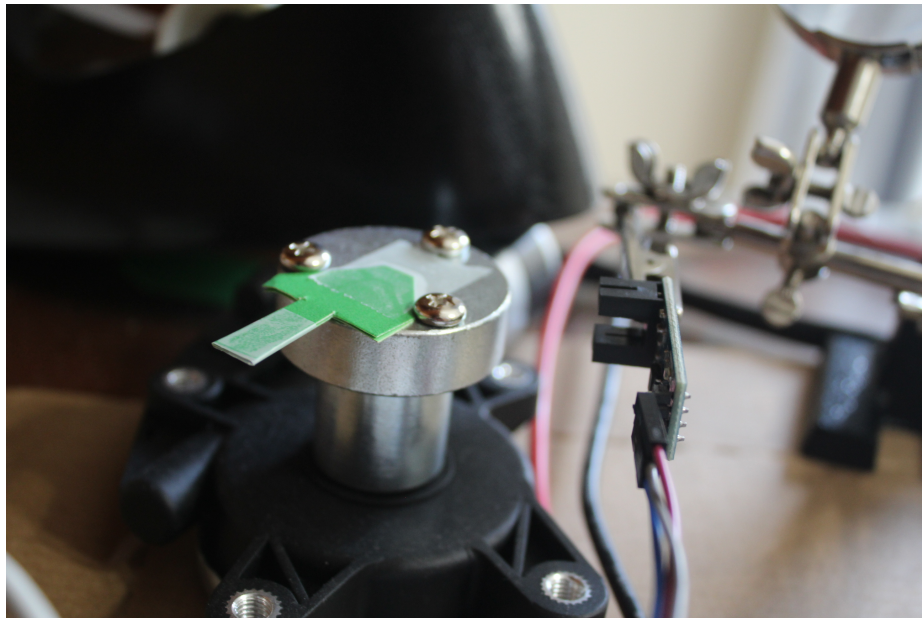


Figura 81: Fotografía del Encoder leyendo la velocidad del motor.



**Cinemática:** Característica de un cuerpo o sistema que describe su movimiento en el espacio. 14

**Circuito regulador:** Circuito que regula el voltaje. Convierte el voltaje en su entrada a un valor deseado, no importando el valor del de la entrada. Normalmente, los reguladores convierten un voltaje de entrada a 12V, 5V o 3.3V. 30

**Controlador:** Es un programa informático que posibilita la interacción entre el robot y su contorno. Es decir, el controlador procura que el robot móvil realice una acción en específico tomando en cuenta el efecto del entorno sobre el robot. Utiliza los sensores para conocer el estado actual del robot y conocer su entorno. En base a esta información toma decisiones para que este realice la acción objetivo. 15

**Ecuaciones no lineales:** Ecuación de una o más variables, en la existen variables elevadas a alguna potencia diferente de cero o uno, o multiplicación entre variables. 15

**Encoder:** Dispositivo electrónico que mide la velocidad angular de una rueda gracias a un disco ranurado que se coloca en el eje del motor y el cual es detectado por un foto-interruptor. 19

**Grados de libertad:** Es el número mínimo de parámetros para determinar por completo la velocidad de alguna parte del cuerpo. También representa el número mínimo de parámetros que se requieren para establecer una velocidad determinada de cierta parte del cuerpo. 55

**Marco de referencia inercial:** Espacio geométrico respecto al cual se referencian los demás marcos de referencia. 14

**Marco de referencia:** Espacio geométrico propio de un cuerpo, es decir el sistema coordenado propio del cuerpo-. Todas las medidas del cuerpo están referenciadas a este espacio geométrico. 14

**Módulo electrónico:** Es un dispositivo que posee una integración de componentes para controlar ciertas funciones de algún sistema eléctrico o electrónico, como por ejemplo algún sensor o un motor. 12

**Odometría:** Se refiere a la estimación de la pose de un robot móvil que incluye la orientación. 55

**Op-Amp:** Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico utilizado en la electrónica analógica para amplificar voltajes de entrada. 21

**PWM:** También conocido como modulación por ancho de impulsos, es en electrónica digital un señal de voltaje cuadrada cuyo ancho del pulso varía con el objetivo de transmitir información o para controlar la cantidad de energía que se envía alguna carga eléctrica. 31

**Rayos láser:** Es una emisión de luz amplificada mediante una estipulación de emisión de radiación. 27

**Robot móvil:** máquina robótica con ruedas capaz de desplazarse sin ayuda de un conductor humano porque es automático. 13

**Tracción:** Par de fuerza que realizan las ruedas de un robot móvil para lograr el desplazamiento del mismo. 31

**Transistores:** En la electrónica digital. se utilizan los transistores para entregar una señal de respuesta ante una señal de entrada. Al ser excitado por una señal lógica, este deja pasar la señal que puede ser a distinto voltaje. Los transistores tienen muchas aplicaciones. 20

**WEBOTS:** Software de código abierto para simular robots. Posee robots comerciales o se pueden diseñar los propios. Además, se les puede programar su controlador para controlarlos. 58