

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Desarrollo de los sistemas electrónicos de a bordo de un
Robot Móvil autónomo para el transporte de objetos en
almacenes

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Eléctrico Electrónico

Presenta:

DURÁN LÓPEZ ENRIQUE

Director de Tesis:

DR. SAÚL DE LA ROSA NIEVES



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2021

Índice general

1	Introducción	10
1.1	Justificación	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo general	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
2	Estado del Arte	13
2.1	Robot para la recolección y entrega autónoma de objetos	13
2.2	Un Robot móvil para la recolección de objetos utilizando comandos de voz	16
2.3	El internet de la cosas. Una herramienta útil para los robots móviles	19
2.4	Planificación de trayectorias multi-objetivos	20
2.5	La coordinación entre Robots Móviles	23
2.6	Resumen del estado del arte	25
2.6.1	Tabla de las funcionalidades	26
2.6.2	Tabla de las tecnologías usadas	26
2.6.3	Tabla de los principales requerimientos de procesamiento en los proyectos investigados	29
3	Marco Teórico	31
3.1	Introducción a las configuraciones cinemáticas de un robot móvil con ruedas	31
3.1.1	Configuración Ackerman	32
3.1.2	Configuración omnidireccional	32
3.1.3	Direccionamiento diferencial	32
3.1.4	Triciclo clásico	32
3.1.5	Skid Steer	32
3.1.6	Tracción síncrona	33
3.2	Sensores de a bordo en un robot móvil	33
3.2.1	Definición de sensor	33
3.2.2	Clasificación general de los sensores	33
3.2.3	Clasificación de los sensores por aplicación en un robot móvil	35
3.2.4	Sensores para medir distancias basados en ultrasonido	35
3.3	Sistemas de posicionamiento local	36
3.3.1	Técnicas para la estimación de posición	37
3.3.2	Técnicas para la estimación de una distancia de un AP's a un nodo desconocido.	39
3.3.3	Análisis del método de trilateración	40

3.3.4	Estimación de la distancia r mediante el modelo de sombreado logarítmico-normal, LSNM por sus siglas en inglés	42
3.3.5	Estimación de la posición	43
3.4	Coordinación entre robots móviles para el control de tráfico	45
3.4.1	Utilización de Redes Ad Hoc para la comunicación entre robots móviles	46
3.4.2	Controlador de tráfico del Robot Móvil	46
3.5	Control de velocidad para motores de corriente directa	47
3.6	Suministro y control de la energía eléctrica	49
3.6.1	Convertidor conmutado reductor o buck	50
4	Diseño	54
4.1	Planeación	55
4.2	Desarrollo del concepto	56
4.2.1	Definición de las necesidades	56
4.2.2	Generación del concepto	57
4.2.3	Requerimientos de los bloques conceptuales	58
4.3	Diseño a nivel sistema	59
4.4	Diseño a detalle	61
4.4.1	Carga del paquete	62
4.4.2	Interfaz de Usuario	71
4.4.3	Controlador principal	74
4.4.4	Controlador de movimiento	78
4.4.5	Interfaz de comunicación inalámbrica y estimador de la posición	83
4.4.6	Algoritmo del controlador de tráfico	86
4.4.7	Suministro y Control de la Energía Eléctrica	94
5	Resultados	98
5.1	Análisis de los resultados	98
5.1.1	Carga del paquete	98
5.1.2	Algoritmo de control de movimiento	104
5.1.3	Posicionamiento del robot móvil	107
5.2	Conclusiones finales	113
5.3	Trabajo a futuro	113
6	Bibliografía	115
7	Anexos	117
7.1	Anexo 1. Programación del sensor de proximidad en lenguaje C	117
7.2	Anexo 2. Programación del sensor de fuerza en lenguaje C	117
7.3	Anexo 3. Programación del algoritmo de control de movimiento	117
7.4	Anexo 4. Programación del algoritmo de estimación de la posición	117

Índice de tablas

2.1	Funcionalidades de los proyectos presentados	26
2.2	Tecnologías usada en los proyectos presentados	28
2.3	Principales requerimientos en los proyectos presentados	30
3.1	Clasificación de sensores por aplicación en un robot móvil	35
4.1	Requerimientos de los bloques conceptuales	58
4.2	Especificaciones de la arquitectura del robot	60
4.3	Soluciones a los bloques	61
4.4	Especificaciones Técnicas del sensor de proximidad FC-51	63
4.5	Especificaciones Técnicas del sensor de fuerza FSR- 406	64
4.6	Especificaciones Técnicas de la pantalla Nextion	71
4.7	Especificaciones Técnicas del microcontrolador EK-TM4C1294NCPDT	76
4.8	Especificaciones Técnicas del motor CD JB37-520	79
4.9	Especificaciones del modulo Wi-Fi ESP8266	84
4.10	Especificaciones Técnicas del sensor ultrasonico HC-RS04	88
4.11	Especificaciones Técnicas del convertidor de voltaje LM2596	96
5.1	Resultados de la caracterización del sensor FC-51	98
5.2	Respuesta de la variación de resistencia del sensor FSR 406	100
5.3	Voltajes de salida del circuito para cada valor de peso del paquete	102
5.4	Valores de RSSI medidos con el módulo ESP8266	107
5.5	Distancia estimada utilizando el valor de RSSI medido con el módulo ESP8266	108
5.6	Coordenadas propuestas para los AP's	110
5.7	Resultados obtenidos de la estimación de la posición del robot móvil	110

Índice de figuras

2.1	Robot móvil de nombre APPLE diseñada para la recolección y colocación de objetos de forma autónoma. Imagen recuperada de [1].	14
2.2	Imagen de la estructura del brazo robótico para seleccionar y colocar objetos. Imagen recuperada de [2].	17
2.3	Propuesta del brazo robótico. Imagen recuperada de [2]	18
2.4	Diseño de la arquitectura IoT. Imagen recuperada de [3]	20
2.5	Diagrama conceptual del funcionamiento. Imagen recuperada de [4]	21
2.6	Mapa construido con sensores láser. Imagen recuperada de [4]	23
2.7	Comparación de la productividad de los distintos sistemas. Imagen recuperada de [5]	25
3.1	Configuraciones cinemáticas de un robot con ruedas.	31
3.2	Funcionamiento del sensor ultrasonico. a)Mapeo de la potencia recibida en función del ángulo. b) Zona de detección.	36
3.3	Técnica de trilateración para la estimación de posición. Imagen recuperada de [7]	38
3.4	Técnica de triangulación para la estimación de posición. Imagen recuperada de [8]	38
3.5	Estimación de posición por trilateración. Imagen recuperada de [10]	40
3.6	Patrón de radiación de una antena Wi-Fi. Imagen recuperada de [11]	41
3.7	Casos posibles que podemos para calcular la posición por Trilateración. Imagen recuperada de [??]	41
3.8	Estimación de la posición por Trilateración. Imagen recuperada de [??]	44
3.9	Intersección de las rectas obtenidas por el algoritmo de posición.	45
3.10	Red Ad Hoc. Imagen recuperada de [??]	46
3.11	Controlador de tráfico. Imagen recuperada de [??]	47
3.12	Señales PWM para el control de velocidad. Imagen recuperada de [??]	48
3.13	Circuito básico de un convertidor tipo reductor. Imagen recuperada de [??]	50
3.14	Circuito del convertidor reductor con interruptor cerrado. Imagen recuperada de [??]	51
3.15	Circuito del convertidor reductor con interruptor abierto. Imagen recuperada de [??]	51
3.16	Gráfica del voltaje en el inductor. Imagen recuperada de [??]	52
4.1	Diagrama de Gantt del proyecto	55
4.2	Diagrama a bloques del concepto del Robot Móvil	57
4.3	Arquitectura del robot móvil	59
4.4	Diseño del bloque de la carga del paquete	62
4.5	Gráfica de la resistencia del sensor FSR-406 en función de la fuerza aplicada	65
4.6	Circuito eléctrico del puente de wheatstone	66

4.7	Simulación del Puento de Wheatstone	67
4.8	Amplificador de instrumentación basado en 3 Amplificadores operacionales.	68
4.9	Configuración interna del amplificador de instrumentación AD623. Imagen obtenida de [7]	69
4.10	Simulación del circuito para el sensor de fuerza	70
4.11	Circuito eléctrico para el sensor de fuerza	70
4.12	Diagrama de bloques de la interfaz de usuario	72
4.13	Proceso de configuración para la interfaz de usuario	73
4.14	Diagrama de flujo de la arquitectura del robot móvil	75
4.15	Diagrama de flujo del controlador principal	77
4.16	Diagrama de bloques del controlador de movimiento	78
4.17	Encoder óptico para determinar la velocidad de giro del motor.	79
4.18	Opto-acoplador basado en un foto-transistor. Imagen recuperada de [9]	81
4.19	Control PWM de un motor DC con opto-acoplamiento	81
4.20	Esquemático del circuito para el control de motores basado en el puente H L288. Imagen recuperada de 10	82
4.21	PCB del modulo para el control de motores basado en el puente H L288	83
4.22	Diagrama de bloques del sistema de posicionamiento local del robot móvil	85
4.23	Controlador de tráfico	87
4.24	Diagrama de tiempos del sensor ultrasonico HC-RS04	88
4.25	Principio de funcionamiento del sensor ultrasonico HC-RS04	89
4.26	Intersección de 4 vías	91
4.27	Diagrama de flujo del controlador de tráfico	92
4.28	Diagrama de bloques del suministro y control de energía eléctrica	94
4.29	sistema BMS 3S 40 A con 3 paquetes de baterías en paralelo.	95
4.30	a) Diagrama eléctrico del convertidor Buck con el LM2596 b) PCB del convertidor	96
4.31	PCB del modulo para el control de motores basado en el puente H L288	97
5.1	Señal digital de salida del sensor FC-51 cuando se detecta un paquete	99
5.2	Gráfica de la variación de la resistencia del sensor FSR 406	100
5.3	Gráfica del voltaje de salida en función de la resistencia del sensor FSR 406	101
5.4	Gráfica del voltaje de salida en función del peso del paquete	103
5.5	señal de onda cuadrada generada por el encoder óptico	104
5.6	señal PWM generada por el algoritmo de control cuando no existe una carga en el motor eléctrico	105
5.7	Señal PWM generada por el algoritmo de control cuando existe una carga en el motor eléctrico	106
5.8	Señal PWM generada por el algoritmo de control cuando la velocidad del motor aumenta	106
5.9	RSSI de la señal medida sin obstáculo alguno	107
5.10	RSSI de la señal medida en presencia de una pared en la propagación de la señal	108
5.11	Distancias estimadas utilizando el valor de RSSI medido	109
5.12	Esquema propuesto para los AP's y región de prueba.	109
5.13	Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 1	111
5.14	Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 2	111
5.15	Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 3	112

5.16 Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 4 112

Lista de acrónimos

AVG	Automatic Guided Vehicle
WCS	Warehouse Control System
PyMEs	Pequeñas y Medianas Empresas
DC	Direct Current
IoT	Internet of Things
AP	Access Point
API	Application Programming Interface
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LKH	Lin–Kernighan Heuristic
RAM	Random Access Memory
RUP	Rational Unified Process
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complimentary Metal Oxide Semiconductor
LPS	Local Position System
GPS	Global Position System
UWB	Ultra-Wide Band
RFID	Radio Frequency Identification
BLE	Bluetooth Low Energy
WPAN	Wireless Personal Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
TDoA	Time Difference Of Arrival
ToA	Time of Arrival
AoA	Angle of Arrival
RSSI	Received Signal Strength Indication
PWM	Pulse Width modulation

Resumen

En este trabajo de Tesis se presenta el diseño de un robot móvil, para el ordenamiento de paquetes en un almacén. Primero se definen los objetivos principales a cumplir, posteriormente se realizó una investigación presentada en el Estado del Arte, de algunas tecnologías usadas para el ordenamiento de paquetes con robots móviles en almacenes. Con base a esta investigación se definieron los requerimientos principales para nuestro trabajo. En seguida se presenta en el Marco teórico, las bases científicas y técnicas, donde se expusieron algunos algoritmos, como por ejemplo, para el de posicionamiento en 2 dimensiones o control de tráfico. Después se realizó un diseño, comenzando con un diseño a nivel sistema, identificando las especificaciones para cada bloque y posterior un diseño a detalle, donde se expusieron especificaciones detalladas y una propuesta de solución para cada bloque. Luego se realizó la caracterización de los sensores, la implementación de algunos bloques y pruebas del algoritmo de posición. Dichos resultados fueron analizados y se concluyó que cumplen con los requerimientos propuestos. Finalmente se presentan las conclusiones finales y el trabajo a futuro.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta una justificación para el presente trabajo de tesis, donde se explica brevemente que uno de los problemas en el ordenamiento de paquetes, es el tiempo de entrega y el proceso de ordenamiento, sin embargo, la implementación de robots móviles ha disminuido estos problemas. Posteriormente se presentan el objetivo general y objetivos específicos.

1.1. Justificación

En la actualidad, el ordenamiento de paquetes en almacenes se ha convertido en algo demasiado dinámico y de gran rapidez, cada paquete que es almacenado cada vez permanece menos tiempo en el almacén. Una de las principales razones de que este proceso sea tan dinámico, son los tiempos de espera del cliente para obtener su paquete, pues hoy en día empresas de muy alta productividad entregan paquetes en cuestión de días e incluso de horas.[5]

Un factor importante en el retraso de tiempo en el envío del paquete, es causado por el ordenamiento manual de los paquetes dentro del almacén, ya que para lograr el objetivo de selección los paquetes deben ordenarse de acuerdo a una clasificación específica. Implementar un sistema de ordenamiento con un cierto grado de automatización con ayuda de robots ordenadores de paquetes logrará reducir el tiempo de espera entre cada paquete que será enviado, además de reducir la intervención humana y los errores que puedan causar para la identificación del producto y selección. Entonces se busca que los robots móviles ordenadores ayuden al proceso de ordenamiento de paquetes con un cierto grado de automatización y con intervención humana, sin embargo, ya no como parte del proceso de ordenamiento del paquete, sino como parte de una supervisión técnica del proceso con la finalidad de prevenir cualquier situación que pueda poner en riesgo el objetivo de ordenar y enviar un paquete del robot móvil.[5]

Empresas pequeñas que poseen sistemas de ordenamiento tradicionales en almacenes son menos productivas en comparación con empresas que tienen un alto grado de automatización en el proceso de ordenamiento de paquetes, tal es el claro ejemplo de la empresa Amazon, dentro de su centro logístico en Castellbisbal (Barcelona, España) donde implementaron la tecnología de robots ordenadores de paquetes, los cuáles les permitieron acelerar el tiempo de preparación de pedidos y disminuir las distancias para su ordenamiento, lo que a su vez reduce el tiempo que se tarda en clasificar y ordenar un paquete incluso si este recibe algún cambio de

último minuto. Este sistema automatizado le permitió a Amazon, almacenar un 50 % más de productos por metro cuadrado. Su productividad se vio ampliamente mejorada en comparación con otros centros logísticos que aún no implementan esta tecnología.[9]

Sin embargo el alto costo para implementar esta tecnología, podría representar en unos de los principales problemas para las empresas pequeñas, principalmente porque deben cambiar todo su esquema actual de ordenamiento, para acoplarlo a uno automatizado además de cambiar su tecnología actual que es utilizada. Sin embargo, ante las pruebas de una mayor productividad con sistemas de ordenamiento automatizados, implementados con vehículos transportadores, se dará el fundamento para la creación de un robot ordenador de paquetes, con capacidades básicas para lograr beneficios en la productividad de empresas pequeñas, será un robot acoplado a las necesidades actuales de ordenamiento en almacenes y que pueda ser acoplado a sistemas manuales. Es decir que pueda ser adaptable a los procesos de ordenamiento ya establecidos de pequeñas empresas y que esto no represente un cambio radical en su sistema de ordenamiento. La interfaz electrónica del robot móvil podrá ayudar principalmente a pequeñas empresas en la disminución de los tiempos que tarda cada paquete en ser enviado, realizando de manera más eficiente el ordenamiento de los paquetes nuevos en cooperación con otros robots y los trabajadores dentro del almacén.[2]

Finalmente la demanda de varios productos por un mismo cliente, servicios como sistemas de apartado en tiendas de internet que operan en tiempo real, diversas formas de envío, está en aumento continuamente. Por ello es necesaria la continua innovación de tecnología en los diversos procesos que necesitan un alto grado de calidad y control logístico. Sin duda la implementación de robots móviles para el ordenamiento dentro de sus almacenes, puede ayudar a todas las empresas a tener un porcentaje mayor de eficiencia. Es primordial para las empresas enviar sus productos en el menor tiempo posible, pero la presencia global y una gran diversidad de productos complica cada vez más este proceso y cada día aumenta la complejidad de ordenamiento. Por ello la visibilidad de información es un desafío clave en la gestión de almacenes ya que existe una necesidad de información exacta y visible en todo momento, principalmente en los paquetes que serán ordenados, para este problema se diseñará un módulo de comunicación para obtener la información de todo paquete ordenado ayudando así al control de la información y así mantener siempre un estado actualizado sobre envíos, eliminar redundantes y reducir errores.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar el diseño de un robot móvil transportador de paquetes, con capacidad para trabajar en coordinación con otros robots móviles del mismo tipo, en un almacén cerrado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modulo de control que tenga la capacidad de programar las tareas del robot móvil, tales como recoger la carga, mover las llantas, estimar la posición y velocidad.
- Desarrollar un sistema electrónico para el control de la velocidad del robot móvil y verificación de la carga del paquete.
- Desarrollar un modulo del robot móvil que sea capaz de estimar su posición, en toda el área del almacén.

Capítulo 2

Estado del Arte

A continuación en este capítulo se presentan algunas de las tecnologías usadas en robots móviles autónomos para la recolección y transporte de productos dentro de almacenes cerrados. Finalmente se exponen el resumen de tecnologías y principales funciones de cada aplicación.

2.1. Robot para la recolección y entrega autónoma de objetos

En el artículo *El siguiente paso en la comisión de robots: Recolección y colocación autónoma*[1] de Robert Krug, et al. en son de la opinión, que un problema actual en los robots móviles es la baja capacidad de cumplir estrictas exigencias de velocidad, seguridad y precisión. Para solucionarlo nos presentan un sistema con novedad en la pinza para mejorar el agarre aprovechando las condiciones del objeto y la cinemática que este pueda brindar. Explican que actualmente existen soluciones parciales a este problema con los vehículos guiados autónomos, o por sus siglas en inglés AVG, transportando grandes estanterías con paquetes para ordenarlos de una manera general, sin embargo el proceso autónomo muere una vez que es necesario tomar un paquete para enviarlo y es necesaria la ayuda de un ser humano.

Para resolver dicha problemática ellos plantean el diseño de una plataforma llamada AP-PLE, que cumple con la funcionalidad de recolección y colocación de forma autónoma, representada en la figura 1 que muestra a continuación.

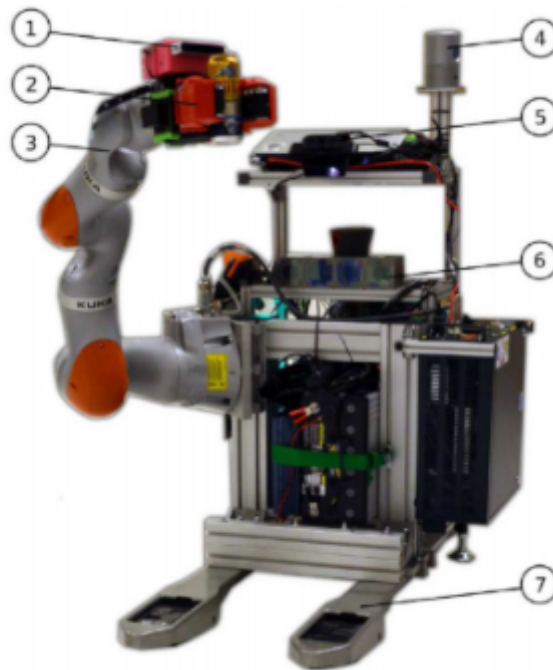


Figura 2.1: Robot móvil de nombre APPLE diseñada para la recolección y colocación de objetos de forma autónoma. Imagen recuperada de [1].

La plataforma APPLE está compuesta por una elevadora Linde CitiTruck representada por el número 7 de la figura 2.1, un vehículo guiado automatizado por sus siglas en inglés AGV, re-equipado siendo capaz de detectar y recoger objetos en zonas de carga utilizando una cámara de luz Asus Xtion Pro Live no representada. En cuanto a la localización de la plataforma APPLE se utiliza un equipo electrónico LIDIAR Velodyne HDL-32E (número 4). En cuestión de seguridad APPLE tiene un escáner láser SICK S300 montado en la parte superior y un sistema de cámaras dedicado a revisar al personal que lleven ropa de seguridad reflectante (número 6), además de un proyector que indica visualmente la trayectoria prevista del AGV (número 5). Finalmente posee un ligero manipulador KUKA LBR iiwa (número 3) provista de una pinza de sujeción con accionamiento inferior (número 2) la detección de objetos se realiza a través de una estructura (número 1) que fue colocada en la palma de la pinza.

Por otra parte en el artículo *Robot móvil de doble brazo para un sistema automático de preparación de pedidos en un almacén con varios tipos de producto*[2] los autores nos explican que el crecimiento de las compras vía internet ha obligado a la modernización y automatización de los almacenes donde se encuentran los productos previos a su envío, estos sistemas varían dependiendo al tamaño del almacén y a la variedad de productos que manejan; siempre sin dejar de depender al final de la participación de trabajadores. En los almacenes de gran tamaño, los sistemas automáticos de clasificación resultan a veces ineficientes y costosos, ya que no pueden manejar diferentes tipos de productos a la vez, se necesitan ajustar en cada cambio de mercancía; en el caso de los almacenes pequeños, se emplean AGV, los cuales transportan el estante completo hacia el trabajador el cual se encarga de la clasificación.

Los investigadores en cuestión se propusieron darse a la tarea de buscar una solución de

automatización que sea eficiente en cualquier tipo de almacén y con la mínima intervención humana, sin limitaciones en los productos que pueda manejar el sistema, ni en el tamaño de los pedidos recolectados. La solución propuesta por ellos fue un robot capaz de auto localizarse dentro de un almacén, el cual tiene la habilidad de reconocer objetos individuales, así como clasificarlos por sí mismo mediante un sistema de dos brazos que colaboran entre ellos (característica específica de su prototipo); y finalmente con ayuda de sistemas de AGV, llevarlos a la zona de recogida.

Especificaciones técnicas del prototipo de robot

Componentes mecánicos

1. Mesa giratoria: le da una libertad de movimiento sobre su eje al robot para no tener que desplazarse completamente al acomodarse.
2. Elevadores: se ajustan dependiendo a la altura del estante en el cual se está trabajando.
3. Un vehículo (motor): el cual está alimentado por una batería de VDC y transformados a 200 VAC mediante un inversor.
4. Brazos mecánicos: los cuales cuentan con un sistema para poder adaptarse a los espacios y tamaños de los paquetes y objetos en cuestión.
5. Conjuntos de transportadoras de rodillo: estos conjuntos de rodillos son los encargados de llevar hasta el área de transporte la mercancía previamente colocada por el robot.

Sensores y dispositivos electrónicos

1. Telémetro láser horizontal (LRF) (Hokuyo UST-20LX): está montado en la parte delantera del vehículo y es el encargado de la auto-localización del vehículo en el almacén.
2. Cámaras RGBD (SoftKinetic DS325): están montadas en ambos brazos y son las que reconocen el tipo de producto, posiciones y orientaciones. La cámara RGB izquierda es una cámara de alta resolución ImagingSource DFK72AUC02-F (resolución: 2592 x 1944, velocidad de cuadro: 6 fps) para buscar productos desde lejos. Mientras que se usa una cámara de alta velocidad ImagingSource DFK 22AUC03-F (resolución: 744 x 480, velocidad de cuadro: 76 fps) para el seguimiento del objetivo cuando hay movimiento.
3. 4 computadoras: la primera está integrada para controlar el vehículo, una mesa giratoria y dos elevadores. Las otras 3 computadoras son las encargadas de ordenar a los componentes mecánicos que se muevan, controlando los sensores, y realizando funciones inteligentes como auto-localización, reconocimiento de objetos y la trayectoria de los brazos. Especificaciones técnicas del prototipo de vehículo AGV.

Para las pruebas, ellos registraron pedidos en el sistema de control del almacén, por sus siglas en inglés WCS, y se registraron datos como la altura de los estantes, de que es cada estante y en donde se recogerá el producto. El WCS envió órdenes a ambos prototipos y mediante comunicaciones inalámbricas, se informó constantemente la posición de ambos prototipos para impedir un choque entre ellos.

Las pruebas fueron exitosas ya que se impidieron interrupciones en los traslados de los prototipos, el robot principal supo actuar en situaciones en donde se encontraban obstáculos en los estantes, captando toda la información correspondiente mediante los ordenadores y escogiendo la trayectoria adecuada en cada movimiento. El AGV tuvo que emplear un mapa del almacén en 2D para no errar en su trayecto, así logrando el transporte adecuado de la mercancía. El trabajo realizado por los investigadores es una solución general para la automatización de los almacenes, ya que actualmente existen diferentes opciones que dependen del tamaño de las instalaciones y de varias actividades realizadas por humanos.

2.2. Un Robot móvil para la recolección de objetos utilizando comandos de voz

Wong Sai Kit y Chitturi Venkatratnam en su artículo titulado *Robot móvil para la recolección y colocación para discapacitados a través de comandos de voz*[3], han diseñado un robot móvil para seleccionar y colocar los objetos a través de comandos de voz. Donde nos explican que su trabajo está pensado principalmente para personas en sillas de ruedas de tal manera que este robot pueda ayudarles a recoger un elemento que se coloca en diferentes alturas y así obtener ayuda en la tarea de recoger un objeto y colocarlo de nuevo a la ubicación deseada con la ayuda de un brazo robótico.

Explican que así las personas discapacitadas podrían tener un acceso laboral, en el sistema de almacenamiento de muchas empresas donde el robot podrá ser totalmente automatizado para recoger y colocar objetos en una ubicación deseada. A continuación en la figura 2.2, se muestra la estructura del brazo robótico.

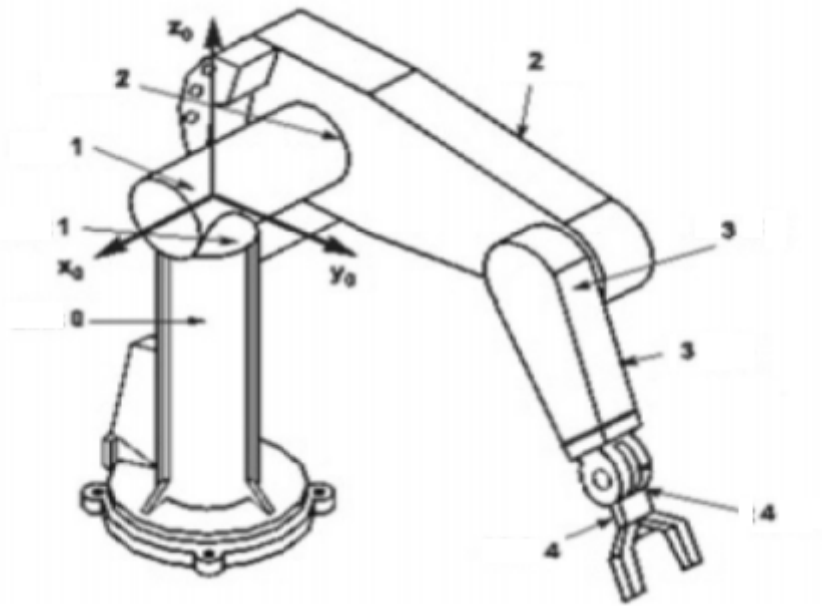


Figura 2.2: Imagen de la estructura del brazo robótico para seleccionar y colocar objetos. Imagen recuperada de [2].

Las consideraciones que tomaron en el diseño fueron que el robot debía hacer realizar las tareas usando vocalizaciones no verbales para el control. Implementaron un sistema vocal para entender la pronunciación en inglés además de proporcionar una diferenciación entre el tono, intensidad y discreción.

Se desarrolló también una interfaz para introducirlo en pequeñas y medianas empresas (PyMEs). Además mencionan que programar de manera tradicional implicaba una programación demasiado robusta y que requería de muchas iteraciones para la tarea más simple por ello implementaron un sistema multi-nodal como la comunicación humana.

En este tipo de comunicación se recibe la información y el robot tendrá la capacidad de desarrollar el significado correcto, con esto nos explican que lograron grandes ventajas como crear la posibilidad de manipular, recoger y colocar el objeto fácilmente, el sistema de razonamiento actuó como una unidad de control para el brazo del robot y por lo tanto si el usuario da un discurso al robot, éste hace funcionar su motor para identificar los comandos dados. Los comandos se traducen entonces a RAPID.

RAPID es un lenguaje de programación, que ejecuta el comando de voz traducido a través de un módulo de RAPID lo que le ayuda a ejecutarse automáticamente. Finalmente desarrollaron un dispositivo para la transferencia de datos a larga distancia de forma inalámbrica para ello utilizaron el controlador inalámbrico ps2 que comunicó con Arduino, además de utilizar un Arduino Mega como controlador principal y servomotores con un par de 11 Kg para el brazo robótico con pinzas de agarre.

El brazo robótico lo construyeron usando 5 servomotores MG996R y algunos soportes U

y L que encajan en los servomotores MG996R. En el diseño del brazo robótico se consideró reducir el peso manejado por el chasis del coche robot. La base del brazo delantero se instaló con una cámara web para la navegación. Además, los motores de 5V de corriente directa, fueron instalados debajo del chasis del auto. En la siguiente figura 2.3 se puede observar la propuesta del brazo robótico



Figura 2.3: Propuesta del brazo robótico. Imagen recuperada de [2].

Para controlar tanto los servomotores como los motores de corriente continua, explican que diseñaron una fuente de alimentación capaz de producir suficiente potencia para que los motores se muevan mientras transportan los objetos. Los servomotores están conectados a los puertos I/O de una Raspberry pi, mientras que los motores DC están conectados a través de un controlador de motor para controlar la velocidad del motor DC.

En cuanto a la parte de programación, se basa principalmente en Python, lenguaje de programación que se implementó en un Raspberry Pi 2.

El robot móvil que construyeron logró recoger objetos con una altura máxima de 23,5 cm, ya que la altura máxima del brazo es de unos 35,5 cm debido a que necesita inclinarse 90 grados para la pinza para recoger. El robot puede recoger un objeto con un peso máximo de 160g.

2.3. El internet de la cosas. Una herramienta útil para los robots móviles

Los autores del artículo *Diseño de una arquitectura basada en el Internet de las cosas para la recolección de pedidos en un almacén típico*[4] explican que el internet de las cosas, por sus siglas en inglés IoT, es la nueva revolución de la tecnología, explican como es que cada vez están más interconectadas las cosas por medio del internet y que en cierto modo esto es un impulso que principalmente debe al gran avance de la tecnología en sensores, redes, móviles, comunicaciones inalámbricas y tecnologías de la información en la nube.

Ellos proponen una solución a través de una arquitectura IoT para la preparación de pedidos en un almacén. Nos explican que en este tipo de arquitectura contienen muchísimas identidades únicas y que están conectadas al internet de alguna manera y por ello las aplicaciones de una arquitectura IoT es realmente extenso desde casas hasta ciudades enteras, logística, industria, agricultura y salud.

Los autores explican su diseño de la arquitectura IoT con una metodología que contiene tres grandes pasos a seguir que son como primer punto la comprensión de los procesos de preparación de pedidos convencionales, es decir el método o forma en como lo hará el robot, seguido del entendimiento de la arquitectura IoT, en esta parte, hace referencia a la base de conocimientos que se necesitan para crear la base de esta arquitectura y por último punto desarrollar los requisitos del proceso de preparación de pedidos para visualizar los requerimientos del diseño.

En el proceso de diseño describen los principales conceptos, entidades y objetos en el dominio del sistema IoT.

Las especificaciones de su modelo hablan sobre la relación entre las entidades físicas y virtuales del sistema. Las entidades físicas son tres robot, bastidor y productos. Además de esto nos mencionan que en este tipo de sistema se presentan algunos tipos de servicios manuales como son:

- En el comienzo de preparación de pedidos, un servicio está presente y se trata de ayudar a recuperar el modo automático a través del modo manual en el sistema IoT. Por ejemplo cuando un pedido se encuentra fuera de la zona provista por el sistema.
- Ayudar al robot a identificar el bastidor.
- Ayudar en los movimientos de los robots a lo largo de la detección de chips.
- Además de ser el monitoreo y control de los robots

Presentaron el diseño final como un sistema por capas, en la siguiente figura 2.4 observamos estas capas. Para la preparación de pedidos es la capa de aplicación WebApp, servidor de la aplicación y servidor de base de datos. Existe una capa de gestión para la arquitectura IoT, base de datos y los dispositivos de gestión se encuentran en esta capa. La capa de servicio que contiene los servicios nativos y servicios WEB. La capa de seguridad que incluye la identificación y autorización del sistemas y por último tenemos una capa de comunicación de la arquitectura IoT donde se encuentran las comunicación APIs y los protocolos de comunicación. La capa de los dispositivos incluye sensores, actuadores y dispositivos informáticos que se utilizan en el

ordenamiento de pedidos.

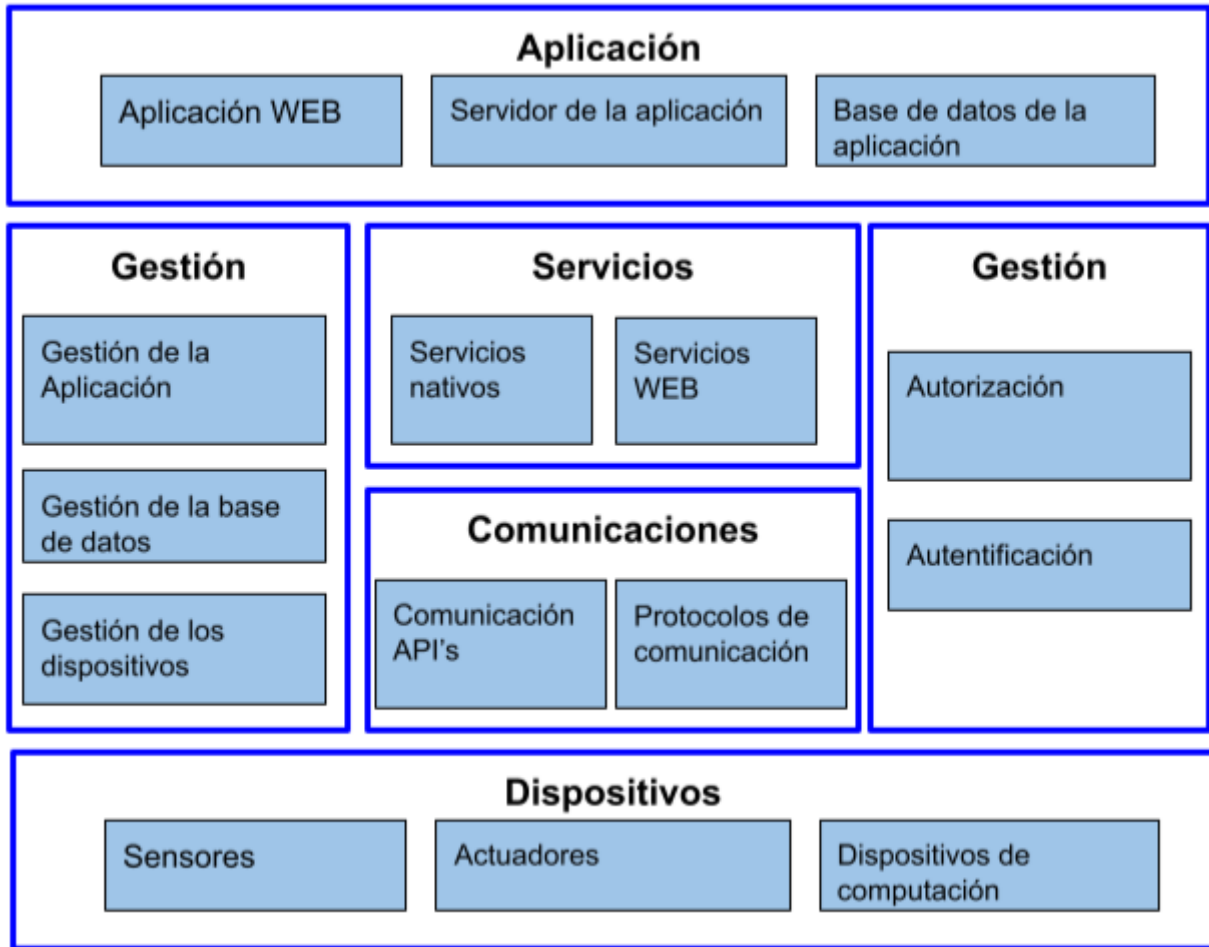


Figura 2.4: Diseño de la arquitectura IoT. Imagen recuperada de [3]

2.4. Algoritmo para la planificación de trayectorias multi-objetivos

K. Hernandez, et al. ,miembros del IEEE en su artículo titulado *Sistema de planificación autónomo de trayectorias multi-objetivos para tareas de recogida y entrega en robots móviles*[5], nos presentan el diseño de un sistema capaz de elaborar trayectorias multi-objetivos para recoger y colocar objetos con un robot móvil. Nos dicen que en entornos de trabajo siempre son necesarios este tipo de robots autónomos y que actualmente el gran reto es evitar los obstáculos dinámicos principalmente en robots que tienen en común múltiples objetivos y ahorrar la mayor energía posible.

El sistema fue basado en la Heurística de Lin-Kernighan (LKH), que posteriormente ellos modificaron para implementar un sistema de recolección/entrega de tareas utilizando distancias euclidianas, caminos hamiltonianos y un robot móvil 3DX .

2.4. ALGORITMO PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS MULTI-OBJETIVOS²¹

Utilizaron un mapa en 2D construido utilizando un sensor láser LRF en el que se posicionan distintas metas que los clientes pueden solicitar para servicios de entrega o recogida en cualquier momento, nos explican que primero calcula el camino Hamiltoniano más corto en tiempo real, después el robot navega por la ruta calculada y al igual que otros sistemas de Pick and Place autónomos, este sistema no lo es completamente ya que es necesario la validación humana al final de su recorrido para recoger o entregar los objetos finalmente el robot regresa a un estado inicial “home” a la espera de nuevas metas por cumplir.

El ARMM nombre del sistema propuesto en el trabajo presenta que el robot móvil fue un Pioneer 3DX equipado con una computadora con 1.6 GHz, 4 Gb de RAM y Ubuntu 12.04. Además de utilizar como sensor láser principal un SICK LMS200 y la odometría móvil. En la Figura 2.5 se muestra un diagrama conceptual de su funcionamiento.

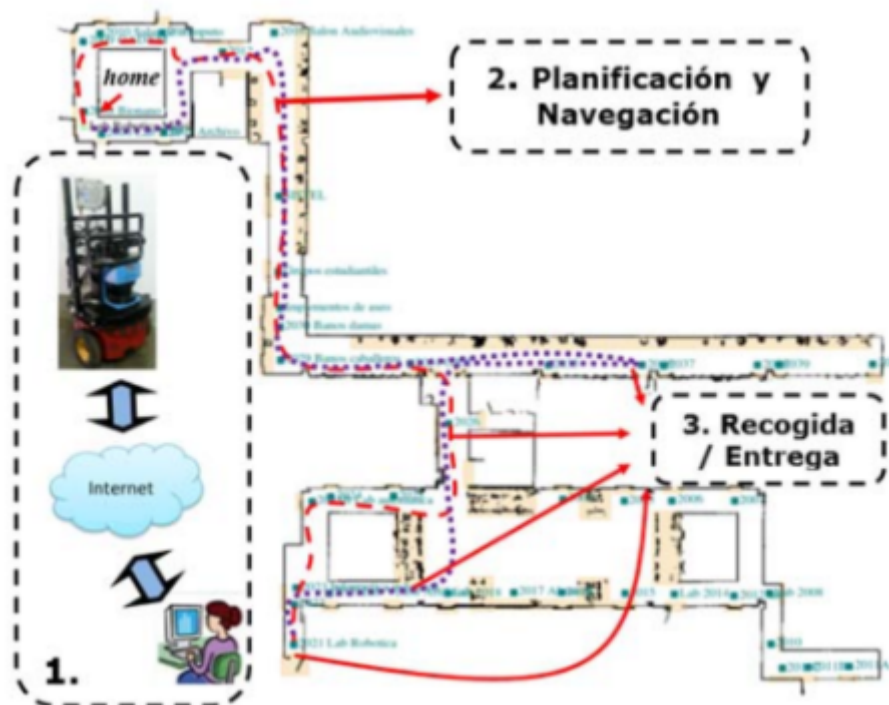


Figura 2.5: Diagrama conceptual del funcionamiento. Imagen recuperada de [4].

De la figura 2.5 nos explican que las líneas rojas son las que debe evitar el robot con el fin de no quedar atrapado. El mapa final fue elaborado con una herramienta de mapeo basada en el filtro de partícula de Mobile Robots Inc. Para el proceso de desarrollo del ARMM utilizaron una metodología RUP (Rational Unified Process). Para la solución del problema ya mencionado anteriormente se basaron en el algoritmo Lin-Kernighan que presenta propiedades como que es un problema combinatorial simétrico y métrico; trata con distancia no-euclidianas; y genera una ruta Hamiltoniana que ayuda a que el robot siempre pueda regresar a home.

Construcción del Mapa

Construyeron un mapa de un lugar específico con 43 metas diferentes. El proceso de construcción fue el siguiente:

1. Capturar datos del láser cada vez que el robot se desplaza 50 cm o rota 10°
2. Registrar los datos del láser para obtener el mapa 2D usando la aplicación Mapper 3
3. Se definen zonas prohibidas y los objetivos usando Mapper

En la figura [2.6](#) se muestra el mapa construido para la navegación del robot móvil.

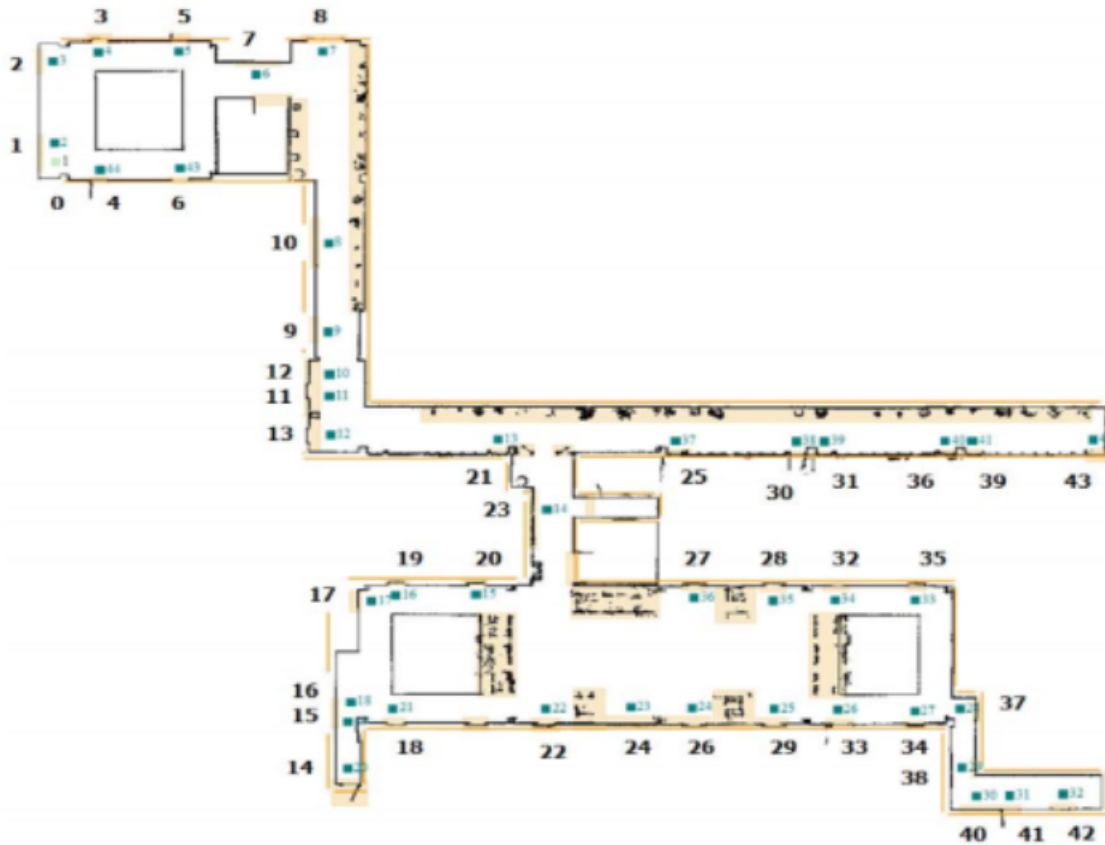


Figura 2.6: Mapa construido con sensores láser. Imagen recuperada de [4]

2.5. El trabajo coordinado entre Robots Móviles

En el artículo *Nuevo sistema de vehículo guiado automático que utiliza la programación holónica en tiempo real para la recolección de pedidos en el almacén*[6] se propone un nuevo sistema robótico utilizando un sistema automatizado. Un vehículo guiado automático por sus siglas en inglés AGV, para preparación de pedidos en almacenes logísticos. Este sistema mejora la productividad de la actividad de recolección mediante el transporte tanto los estantes a ubicaciones apropiadas en el momento apropiado.

Los artículos son almacenados en estanterías móviles de inventario. Los AGV levantan los estantes de inventario y los transportan a las estaciones de recolección (PS) en las que los recolectores recogen los artículos pedidos de los estantes de inventario y los clasifican en cajas de envío en los estantes de clasificación. Los sistemas eliminan el tiempo de caminata de los recolectores y reducen el tiempo de preparación de pedidos. Los sistemas de selección con AGV logran una alta escalabilidad debido a que transportan estantes.

Este sistema puede minimizar la cantidad de trabajadores adicionales y la cantidad de transportadores instalados. El sistema OrderFetch supera las desventajas del sistema Item-Fetch transportando ambas estanterías de inventario y estantes de clasificación.

Para programar tareas apropiadas, se requiere un método de programación en tiempo real para decidir qué estante de inventario y estante de clasificación se transportarán, a qué lugar indicado, para que AGV y en qué momento. Para resolver este problema de programación en tiempo real, en este estudio aplican el método de programación holónica en tiempo real. El método de programación holónica en tiempo real puede programar tareas apropiadas mediante la estimación del tiempo de transporte en el estante.

En el sistema OrderFetch, se introducen estantes de clasificación móviles y los AGV transportan tanto los estantes de inventario como los estantes de clasificación. Un estante de clasificación en el que se han ordenado todas las cajas de envío es transportado por un AGV. Las cajas de envío ordenadas son sacadas del estante de clasificación y transportadas desde la banda transportadora a la siguiente área de trabajo por otros trabajadores y transportadores. El sistema OrderFetch puede reducir el número de trabajadores y transportadores adicionales en comparación con el sistema itemFetch. Optimiza la asignación de pedidos dados a los AGV utilizando el algoritmo genético para reducir el tiempo de transporte de los AGV. Proponen un nuevo tipo de operación de sistema de picking AGV y un método de programación en tiempo real en este estudio.

Programación holónica

Un holón, que es una combinación de "holos" on.^{en} griego, se define como un módulo autónomo y cooperativo de un sistema. Un holón consiste en una parte de procesamiento de información y a menudo una parte de procesamiento físico. La parte de procesamiento de la información incluye la propia información del holón, una unidad de cálculo para evaluar los holones y a menudo tomar decisiones de manera cooperativa entre los holones, y una unidad de comunicación para intercambiar información con otros holones. Un holón de tarea no incluye una parte de procesamiento físico.

En la programación holónica, el holón de coordinación selecciona una combinación de holones de tareas y holones de recursos basándose en los valores de eficacia de las combinaciones. El valor de eficacia es un indicador del estado de un holón. Cada holón envía su valor de eficacia al holón de coordinación. El holón de coordinación selecciona la mejor combinación de holones de tareas y holones de recursos basándose en los valores de eficacia de las combinaciones. La programación holónica por lotes planea asignar holones de recursos a todos los holones de tareas por adelantado basándose en los valores de eficacia al comienzo de la operación del sistema. Por el contrario, los planes de programación holónica en tiempo real para asignar holones de recursos a holones de tareas basados en los valores de eficacia cuando los estados de los holones cambian.

Resultados que obtuvieron

Muestran que la programación de las tareas de transporte de estanterías adecuadas mediante el método de programación holística en tiempo real en el sistema ShelfMigrant les permitió reducir el tiempo de espera de los recolectores y mejorar la productividad en comparación con la del sistema OrderFetch.

Los tiempos de espera de los recolectores al utilizar el sistema OrderFetch y el sistema ShelfMigrant con diferentes diseños y datos de órdenes de recolección se muestran en la Figura 2.7.

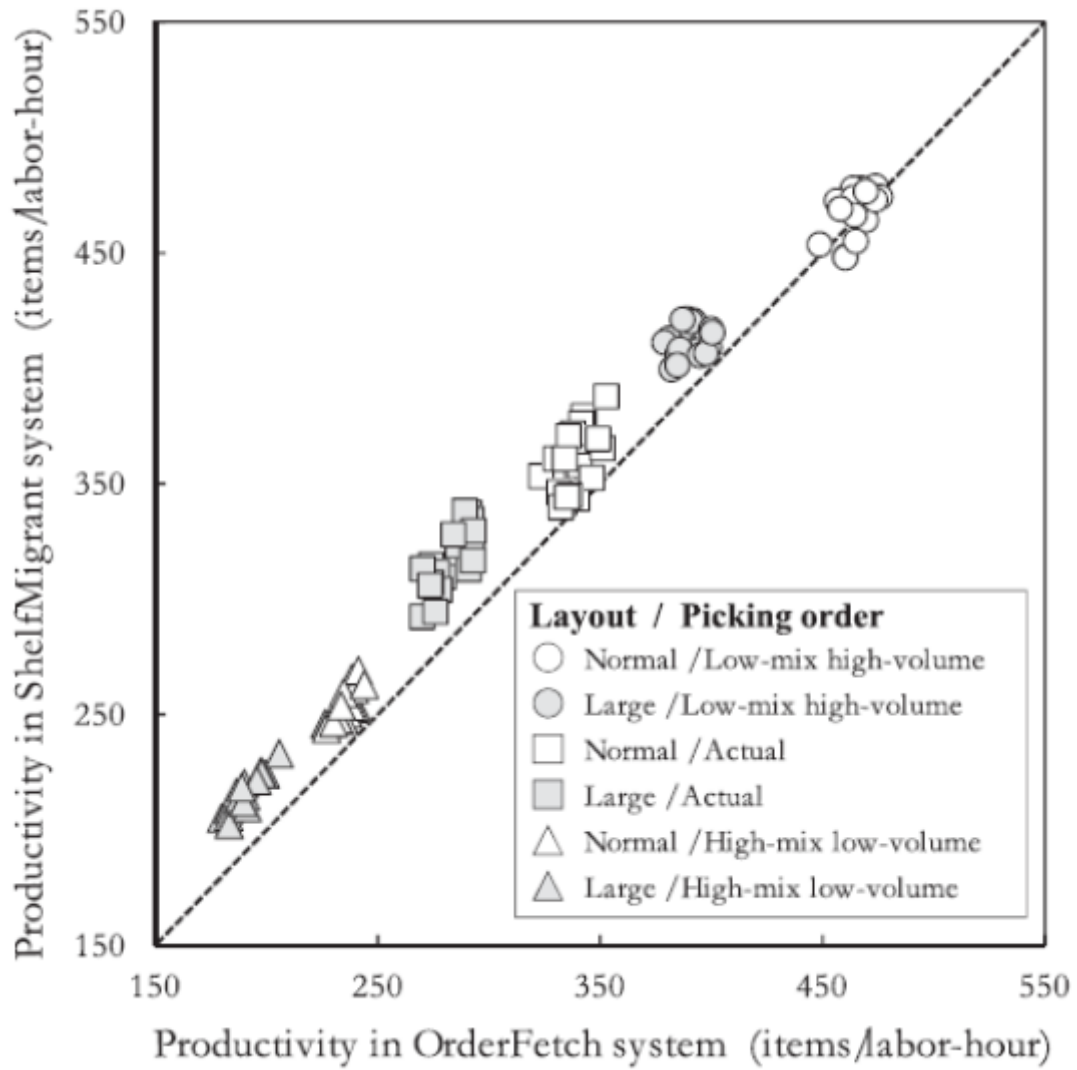


Figura 2.7: Comparación de la productividad de los distintos sistemas. Imagen recuperada de [5].

2.6. Resumen del estado del arte

A continuación se muestra un resumen de las distintas aplicaciones que se investigaron con el fin de poder obtener una referencia de cómo nuestro trabajo podría lograr tener un alto impacto.

2.6.1. Tabla de las funcionalidades

En la Tabla 2.1 se muestran las principales funciones que se incluyen en cada aplicación, esto con fin de poder realizar un proyecto que contemple estas funciones para lograr una mejora significativa.

Referencia	Enfoque en almacenes	Agarre y colocación de objetos	Utilización de AGV	Rutas multi-objetivos	Implementación real	Transporte de objetos	Arquitectura IoT
[1]	No	Si	Si	Si	Si	No	No
[2]	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No
[3]	No	Si	No	No	Si	No	No
[4]	No	No	No	No	No	No	Si
[5]	No	No	Si	Si	Si	Si	No
[6]	Si	No	Si	Si	Si	Si	No

Tabla 2.1: Funcionalidades de los proyectos presentados.

2.6.2. Tabla de las tecnologías usadas

Posteriormente se realizó un segundo análisis pero enfocado a la tecnología utilizada en cada uno de los proyectos investigados, donde un punto importante a destacar es el uso de tecnología costosa. Este análisis se presenta en la Tabla 2.2

Referencia	agarre y colocación de objetos	sensores o tecnología de conectividad	transporte de objetos
[1]	<p>* Manipulador KUKA LBR iiwa para el agarre de objetos con capacidad para mover libremente 2 Kg. de peso neto.</p>	<p>* Cámara de luz Asus Xtion Pro Live, provee de una visión al vehículo para reconocer personas trabajadoras.</p> <p>* Sensor LIDIAR Velodyne HDL-32E. Permite que el vehículo pueda orientarse en el almacén mediante el método de triangulación.</p> <p>* Escáner láser SICK S300 para la creación de un mapa 2D y poder programar las rutas del vehículo</p>	<p>*Elevadora Linde CitiTruck para la carga de objetos desde el suelo. La capacidad de carga no se especifica.</p>
[2]	<p>* No se enfoca en el agarre o colocación de objetos solo en el transporte.</p>	<p>* Telémetro láser horizontal LRF modelo Hokuyo UST-20LX para la creación de un mapa 2D del almacén</p> <p>* Cámaras RGB modelo SoftKinetic DS325 para la identificación de señales en el almacén y poder reconocer objetos a cargar y personal del almacén.</p> <p>* Sensor de visión LRF para reconocer a personas dentro del almacén.</p>	<p>* 4 computadoras como unidades de control del vehículo, no se especifica ningún modelo de vehículo especial.</p>

Referencia	agarre y colocación de objetos	sensores o tecnología de conectividad	transporte de objetos
[3]	* Servomotores MG996R para el movimiento del brazo robótico, no se especifican las capacidades.	* No se especifican sensores en el proyecto.	* Motores DC 5V son la principal fuente para el movimiento de vehículos, no se especifican capacidades. * Raspberry Pi 2 como controlador secundario del movimiento del vehículo. * Arduino Mega como controlador principal de las funciones de agarre y colocación de objetos.
[4]	* Elaborado para vehículos ordenadores, sin embargo no se especifica ningún modelo.	* Internet es la principal herramienta de esta arquitectura pues permite comunicarse vía inalámbrica con otros elementos.	*no se especifica ningún modelo.
[5]	* No se enfoca en el agarre de objetos.	* sensor láser principal un SICK LMS200 para la creación de un mapa 2D del almacén o lugar. * Aplicación Mobile Robots Inc. para la elaboración del mapa 2D	* Robot móvil Pioneer 3DX es el vehículo para transportar objetos * Computadora con 1.6 GHz, 4 Gb de RAM y Ubuntu 12.04 se utiliza como principal controlador del sistemas
[6]	* No se enfoca en el agarre de objetos.	* Programación Holónica principal característica del sistema pues permite obtener información de otros vehículos para mejores decisiones y aumentar la productividad en el almacén	* Diseñado para vehículos ordenadores, sin embargo no se dan especificaciones de uno.

Tabla 2.2: Tecnologías usada en los proyectos presentados.

2.6.3. Tabla de los principales requerimientos de procesamiento en los proyectos investigados

Finalmente para finalizar el resumen del estado del arte, se realizó un último análisis. En la siguiente Tabla [2.3](#) se extraen los requerimientos del proceso para cada proyecto, este es un punto importante debido a que podemos visualizar los últimos enfoques que se han realizado en cuestión del área de robots móviles para la recolección y colocación de pedidos en almacenes.

Re- fe- ren- cia	Enfoque principal	Principal objeto de procesamiento
[1]	Agarre y colocación de objetos en la industria a través de un brazo robótico y vehículo AVG	Mejorar atributos como velocidad, seguridad y precisión en el agarre de objetos.
[2]	Sistema automatizado en almacenes a través de AVG's modificados.	un robot capaz de auto localizarse dentro de un almacén, el cual tiene la habilidad de reconocer objetos individuales, así como clasificarlos por sí mismo mediante un sistema de dos brazos que colaboran entre ellos.
[3]	Brazo robótico para el agarre y colocación de objetos en diferentes aplicaciones industriales	Manejar el brazo robótico a través de comandos de voz y que sea capaz de interpretar los enunciados.
[4]	Arquitectura basada en el internet de las cosas para el ordenamiento de almacenes con vehículos AVG	Implementar un modelo IoT que describa los principales conceptos, entidades y objetos en el dominio del sistema IoT para obtener información en tiempo real.
[5]	Análisis y obtención de rutas eficaces para un AGV	Implementar un sistema para la creación de rutas con el fin de recoger y entregar objetos utilizando algoritmos específicos.
[6]	Sistemas de ordenamiento en almacenes a través de AVG's	Crear un sistema que transporte tanto los estantes de inventario como los estantes de clasificación incompletos mediante programación Holónica en tiempo real .

Tabla 2.3: Principales requerimientos en los proyectos presentados.

Capítulo 3

Marco Teórico

En este capítulo se presenta una investigación del conocimiento científico, acerca del robot móvil, así como la teoría de un algoritmo para la estimación de la posición en 2 dimensiones. También se expone el funcionamiento de algunos sensores y circuitos eléctricos utilizados para el control de velocidad y carga del paquete.

3.1. Introducción a las configuraciones cinemáticas de un robot móvil con ruedas [10]

Los robots móviles con ruedas pueden construirse con diferentes configuraciones para conseguir desplazamientos más eficientes, cada configuración presenta características propias permitiendo en algunas ser más eficientes desde el punto de vista energético y en cambio otra conseguir mejores velocidades. En la figura 3.1 se muestran como están constituidas cada configuración.

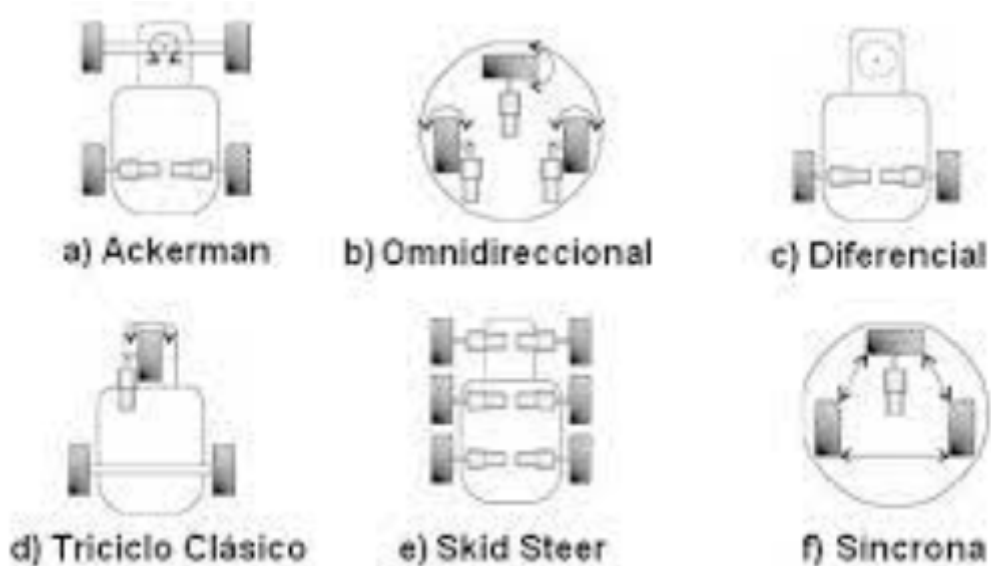


Figura 3.1: Configuraciones cinemáticas de un robot con ruedas.

3.1.1. Configuración Ackerman

La configuración Ackerman es la utilizada en los vehículos de cuatro ruedas convencionales. Las dos ruedas delanteras giran para controlar la orientación y las traseras se mantienen paralelas. Cuando se efectúa un giro, la rueda interior gira en un ángulo mayor que la exterior para evitar el deslizamiento. El mayor problema de la configuración Ackerman es su limitación de maniobras.

3.1.2. Configuración omnidireccional

Los robots omnidireccionales pueden moverse en cualquier dirección del plano y alcanzar cualquier posición sin necesidad de rotar antes. La base de su funcionamiento son las ruedas omnidireccionales que utilizan, cuyas ruedas locas pueden girar perpendicularmente al eje de la rueda principal a la que van unidas.

La única rueda sobre la que se aplica la acción, no obstante, es la rueda principal. Estos robots suelen llevar tres ruedas omnidireccionales, aunque hay diseños que llevan cuatro. Con tres ruedas, el sistema tiene suficientes actuadores para controlar los tres grados de libertad de movimiento plano (dos de traslación y uno de rotación). Aplicando distintas velocidades de giro a cada rueda, se consigue que el robot gire o que avance en la dirección deseada.

3.1.3. Direccionamiento diferencial

El direccionamiento es dado por la diferencia de velocidades de dos ruedas laterales, que a su vez proporcionan la tracción. Adicionalmente son necesarias una o más ruedas, con o sin desplazamiento, que sirven de apoyo. Es la configuración más utilizada en robots para interiores por su simplicidad y bajo coste. Sus desventajas son la dificultad de controlar los deslizamientos y las trayectorias rectas debido a que ambas ruedas deben ir a la misma velocidad, si existe una mínima diferencia, este se desvía de la línea .

3.1.4. Triciclo clásico

Este sistema es el del triciclo clásico. Dispone de dos ruedas de tracción y una rueda delantera (o trasera) orientable para la dirección. La rueda orientable también puede ser de tracción, en cuyo caso las dos ruedas del otro eje deben ser libres. Se trata de una configuración simple, pero puede presentar problemas de estabilidad como la pérdida de tracción cuando se desplaza por una pendiente.

3.1.5. Skid Steer

En esta configuración se disponen de varias ruedas en cada lado del robot los motores actúan de forma simultánea. La velocidad del robot es el resultado de las velocidades de las ruedas de izquierda con las derechas, por ello esta configuración tiene como gran ventaja una buena tracción y al agregarle más ruedas se produce un desplazamiento transversal.

3.1.6. Tracción síncrona

En un robot de tracción síncrona cada rueda es motriz y directriz. La configuración más típica se compone de tres ruedas orientables dispuestas en los vértices de un triángulo equilátero sobre una plataforma circular colocada sobre el triángulo. Las tres ruedas apuntan en la misma dirección y giran a la misma velocidad, esto se consigue mediante un conjunto complejo de correas que conectan las ruedas. Se usan dos motores independientes, uno hace rodar todas las ruedas y el otro las hace girar simultáneamente. El vehículo controla tanto la dirección en la que apuntan las ruedas como la velocidad a la que ruedan. Dado que todas las ruedas permanecen paralelas, el robot gira siempre alrededor de su centro geométrico. Los robots de tracción síncrona pueden controlar la orientación directamente.

3.2. Sensores de a bordo en un robot móvil

[11]

3.2.1. Definición de sensor

Un transductor es, en general, un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otro. Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor.

La estructura de un sensor completo se compone de un controlador, si existe, es el elemento interfaz entre el usuario del sensor y el transductor, un transductor que convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una señal eléctrica y finalmente un acondicionamiento de la señal que realiza la función de modificar la señal entregada por el transductor para obtener una señal adecuada (amplificación, linealización, etc.).

Existen una variedad de sensores usados en un robo móvil; algunos son empleados para medir simples valores como la temperatura interna del robot o la velocidad angular en las ruedas del robot móvil. Los sensores más sofisticados son usados para obtener la información del ambiente o directamente medir la posición global del robot. La importancia del funcionamiento correcto de los sensores es vital para que un robot pueda concluir su tarea en tiempo y forma. Los obstáculos que un robot pueda enfrentar muchas veces dependen de la precisión en la información de los sensores.

3.2.2. Clasificación general de los sensores

A continuación se muestra la clasificación de sensores de acuerdo al tipo de medición y la forma que es obtenida:

* Sensores propioceptivos: Miden valores internos al sistema del robot, por ejemplo: velocidad de motores, voltaje de la batería, ángulos de giro en las articulaciones de los brazos, etc.

* Sensores exteroceptivos: Adquieren información del ambiente en el que se encuentra el robot, por ejemplo: medición de distancia, intensidad de luz, amplitud de sonido; por lo tanto, las mediciones de los sensores exteroceptivos son interpretados por el robot con el fin de extraer características significativas del ambiente.

* Sensores pasivos: Miden la energía entrante del medio ambiente, por ejemplo: temperatura, micrófonos, cámaras CCD o CMOS, etc.

* Sensores activos: Emiten energía hacia el medio ambiente obteniendo la medición de acuerdo a la reacción del ambiente. En este tipo de sensores son sensibles al ruido, que influye al resultado de la medición

3.2.3. Clasificación de los sensores por aplicación en un robot móvil

En la tabla 3.1 se puede observar los sensores más utilizados en un robot móvil.


Clasificación	Sensores	Aplicación común
Sensores de contacto	- Fin de carrera - ópticos - de proximidad	Detección de contacto físico
Sensores de motores	- Encoders - Potenciómetros - Encoders ópticos - Encoders magnéticos	Determinación de velocidad angular y posición de motores eléctricos.
Sensores de orientación	- Compass o magnetómetro - Giroscopio - Clinómetro	Orientación del robot en relación a un sistema de referencia.
Sensores de localización	- GPS - Radiobalizas ópticos - Radiobalizas ultrasónicas - Radiobalizas reflectivos	Localización en un sistema de referencia.
Sensores de rango	- Sensores reflectivos - Sensores ultrasónicos - Sensor láser - Triangulación óptica - Luz estructurada.	Reflectividad, tiempo de vuelo y triangulación geométrica.
Sensores de visión	- Cámaras CCD/CMOD	Análisis de imágenes, segmentación, reconocimiento de objetos. 

Tabla 3.1: Clasificación de sensores por aplicación en un robot móvil.

3.2.4. Sensores para medir distancias basados en ultrasonido

Los sensores de ultrasonido son una tecnología de medida activa en donde se emite una señal ultrasónica en forma de pulso, para posteriormente recibir el reflejo de la misma o eco. Se pueden explotar diferentes aspectos de la señal reflejada: el tiempo de vuelo o la atenuación.

La forma estándar de usar un sensor ultrasónico es dar un impulso corto, pero de gran voltaje y a alta frecuencia, a la cápsula emisora para producir una onda ultrasónica. Si la onda ultrasónica viaja directamente contra un obstáculo, rebota, y vuelve directamente hasta el receptor.

La distancia que hay entre el sensor y el objeto es la mitad de la distancia que ha recorrido la señal y se calcula

$$d = \frac{v}{t} [m]$$

Donde d representa la distancia en unidad de metros, v la velocidad en unidad de $\frac{m}{s}$ y t es el tiempo en segundos.

La velocidad es precisamente la del sonido y esta depende muchas veces de la temperatura y el aire, pero generalmente se usa un valor medio de 344 m/s y t es el tiempo en que tarda en llegar la señal de rebote al sensor. La frecuencia de la onda que se emite suele ser de unos 40-50 kHz. Cuanto mayor sea la frecuencia más direccional es la onda, pero se atenúa más, como se observa en la figura 3.2, del lado izquierdo tenemos un mapeo de la señal de rebote dependiendo del ángulo.

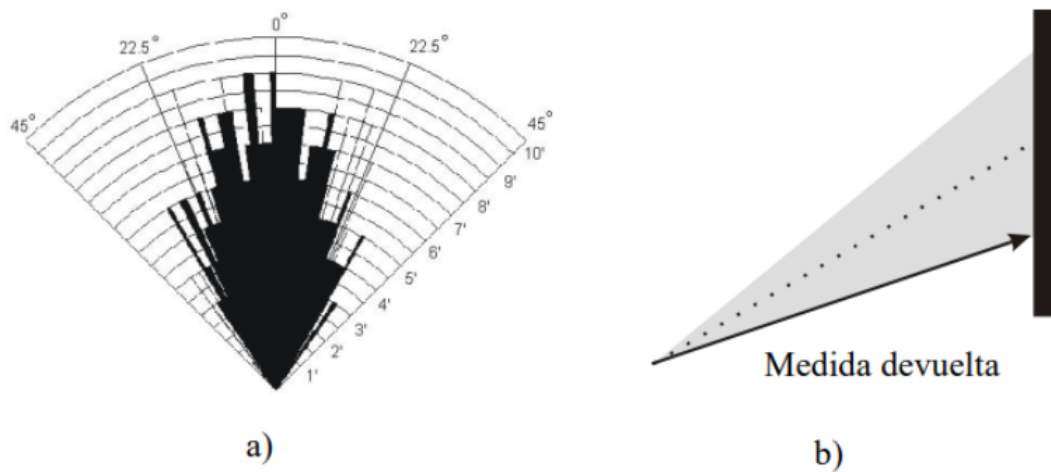


Figura 3.2: Funcionamiento del sensor ultrasonico. a) Mapeo de la potencia recibida en función del ángulo. b) Zona de detección.

3.3. Sistemas de posicionamiento local

Un sistema de posicionamiento local LPS, por sus siglas en inglés, nos permite obtener la ubicación de nuestro objeto en todo momento. Los costos y el hardware requerido para el funcionamiento de un LPS en comparación con un sistema de posicionamiento global GPS, por sus siglas en inglés, son menores, esto nos permite tener en cuenta que un LPS podría ser la mejor opción para nuestro robot móvil, además de tener mayor precisión en la medición con respecto a un GPS.

Las principales tecnologías actuales que se utilizan para posicionamiento local son UWB (Ultra-WideBand), RFID (Radio Frequency Identification), BLE (Bluetooth Low Energy), Zig-Bee basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal WPAN por sus

siglas en inglés (Wireless Personal Area Network) y WiFi basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal WPAN.

Cada tecnología tiene sus propias ventajas y desventajas, sin embargo se propone la opción viable utilizar tecnología Wi-Fi porque requiere poca infraestructura para ser instalado además de presentar una configuración rápida de forma sencilla y con capacidad de ampliación si se requiere. La localización se puede hacer en el propio dispositivo móvil.

La banda de trabajo de WiFi (2.4 GHz y 5 GHz) es una banda libre. Este hecho presenta una serie extra de ventajas como la rápida implantación y adopción de la tecnología, pero también presenta inconvenientes como las interferencias y las medidas erróneas, sin embargo estas desventajas pueden disminuirse mediante métodos estadísticos y algoritmos de posicionamiento adecuados.

Una vez presentadas las tecnologías actuales para un LPS, a continuación se presentan algunas técnicas para estimar la posición de un objeto dentro de un LP y se analizará la opción se considera viable para el proyecto.

3.3.1. Técnicas para la estimación de posición

Existen diversas técnicas para estimar la posición en un LPS sin embargo las más comunes son tres; trilateración, triangulación y multilateración. Cada técnica se utiliza dependiendo de la aplicación.

Trilateración

La técnica de trilateración calcula la posición de un nodo midiendo las distancias desde él mismo hasta varias posiciones de referencia, llamados comúnmente puntos de acceso (AP, por sus siglas en inglés). Para calcular la posición de un nodo en dos dimensiones es necesario conocer al menos las distancias desde tres AP's no colineales (en diferentes líneas), como se muestra en la siguiente figura. En tres dimensiones, son necesarias cuatro AP's en planos distintos. Para la estimación de la distancia entre un nodo desconocido y un AP's también existen diversas técnicas que se presentarán más adelante. En la figura 3.3 podemos observar la técnica de trilateración.

Triangulación

La triangulación es similar a la trilateración, solo que, en lugar de distancias, se utilizan ángulos de llegada de AP's para determinar la posición de un nodo desconocido. En general, se requieren dos ángulos y la distancia entre dos AP's en un entorno bidimensional como se representa en la figura . Para tres dimensiones son necesarios dos ángulos, la distancia entre dos AP's y un acimut (ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo) para especificar una posición precisa. Normalmente se utiliza un vector de referencia constante con valor 0 grados (por ejemplo, el norte magnético). En la figura 3.4 se representa esta técnica de estimación de la posición.

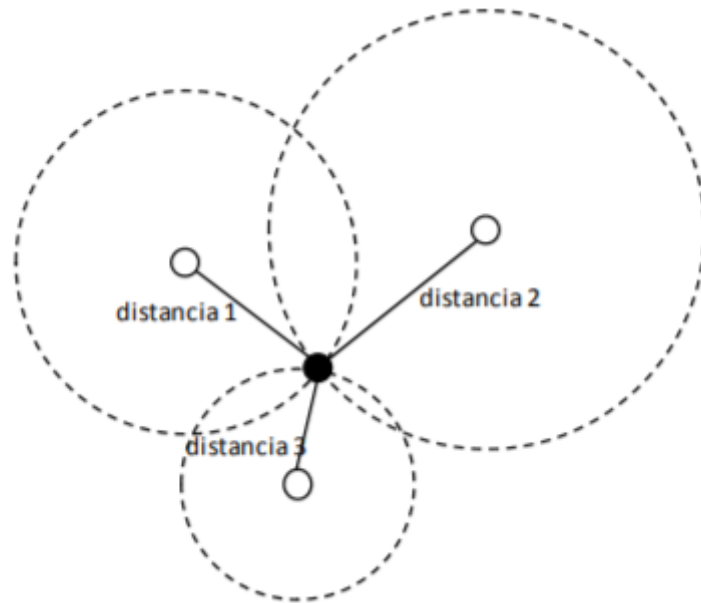


Figura 3.3: Técnica de trilateración para la estimación de posición. Imagen recuperada de [7].

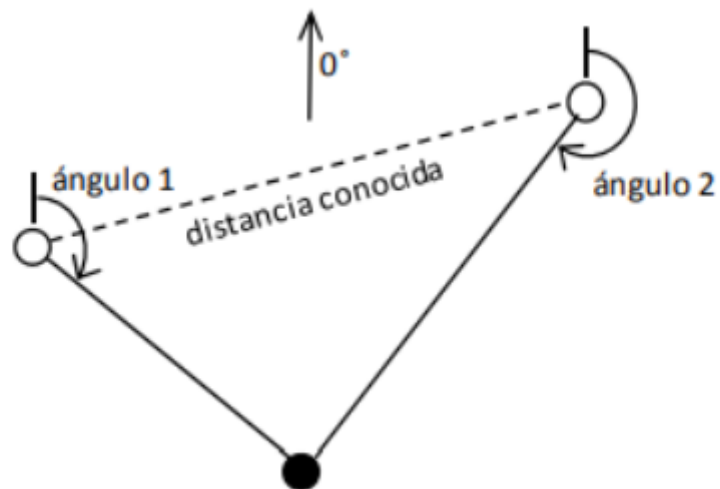


Figura 3.4: Técnica de triangulación para la estimación de posición. Imagen recuperada de [8].

Multilateración

Al igual que en el método de triangulación, para la multilateración se necesitan las distancias a un número determinado AP's para calcular la posición de un nodo, solo que en este caso, las distancias se determinan utilizando mediante técnicas de tiempos de llegada de una señal TDoA por sus siglas en inglés.

Se considera que la opción de trilateración es adecuada para esta aplicación, por la principal razón de que solo necesitamos dos coordenadas de posición (x,y) por ello no es necesario utilizar otras técnicas que necesitan de un análisis más complejo. Para la estimación de las distancias se presentan también otras técnicas.

3.3.2. Técnicas para la estimación de una distancia de un AP's a un nodo desconocido.

Se describen las diversas técnicas para estimar la distancia de un punto a otro utilizando una señal inalámbrica.

Tiempo de llegada, ToA por sus siglas en inglés.

La medición del ToA de una señal es un método robusto para estimar distancias que se usa, entre otros, en GPS. Esta técnica mide el tiempo que tarda una señal en viajar de un nodo a otro a una velocidad conocida. Por ejemplo, las ondas sonoras viajan a una velocidad aproximada de 344 metros/segundo con una temperatura de 21°C. Así, un pulso de ultrasonido enviado por un nodo y que llega a otro 14.5 milisegundos después, nos permite concluir que la distancia entre ellos es de 5 metros. Sin embargo es necesaria una precisa sincronización entre el emisor y el receptor.

Diferencia de tiempos de llegada, TDoA por sus siglas en inglés

Este tipo de técnica permite una sincronización en el tiempo más compleja. En estos sistemas, el transmisor emite un pulso acústico (ultrasonido) junto con un pulso de radio (10 - 20 MHz) , mientras que el receptor compara el tiempo de llegada de ambos pulsos. Conociendo la velocidad de vuelo de cada una de las señales, la diferencia de tiempo entre las llegadas revela la distancia entre el emisor y el receptor. Las diferentes medidas tienden a producir un error medio en la estimación del 74 %.

Ángulo de llegada, AoA, por sus siglas en inglés

El ángulo de llegada se define como el ángulo que forma la dirección de propagación de una onda incidente y una determinada dirección de referencia, que se conoce con el nombre de orientación. La antena que posee cada sensor es utilizada para medir el ángulo de llegada. Las estimaciones de AoA requieren hardware adicional demasiado caro para ser utilizado en redes de sensores muy grandes.

Indicador de Intensidad de Señal Recibida , RSSI, por sus siglas en inglés

Esta técnica utiliza las propiedades de atenuación de una señal para modelar la distancia entre dos nodos como una función del RSSI. En distancias cortas, las estimaciones obtienen errores de aproximadamente un 10 % en una distancia máxima de 20 metros. La incertidumbre de la propagación de las ondas de radio impone problemas como el desvanecimiento de múltiples trayectorias (multipath fading), sombras (shadowing) y pérdidas de trayectorias (path loss). Estos efectos complican el desarrollo de un modelo consistente. Como resultado, los sistemas

basados exclusivamente en valores de RSSI obtienen estimaciones imprecisas, sin embargo con diversos métodos estadísticos podemos reducir estos efectos negativos.

Se considera que utilizar el método con el RSSI es el más adecuado por su bajo costo y por no requerir una sincronización con el tiempo para la determinación de este parámetro. Sin embargo se tomarán en cuenta los efectos negativos que pueden afectar la precisión de las mediciones.

3.3.3. Análisis del método de trilateración

La localización mediante trilateración se basa en la suposición de que las antenas generan un patrón de radiación en forma de esfera con centro en la propia antena. Con tres de estas esferas, cada una con un radio establecido en base a la potencia recibida de cada una de ellas, se puede obtener la estimación de la localización al intersecar las tres esferas sin embargo si las antenas se encuentran puestas sobre un plano en común junto con nuestro robot móvil, lo que se obtiene son circunferencias con radio r establecido igualmente por la potencia de la propia antena, y entonces nuestro problema se reduce a dos dimensiones, la intersección entre las circunferencias representan la posición de nuestro robot móvil, tal como se representan en la figura 3.5 .

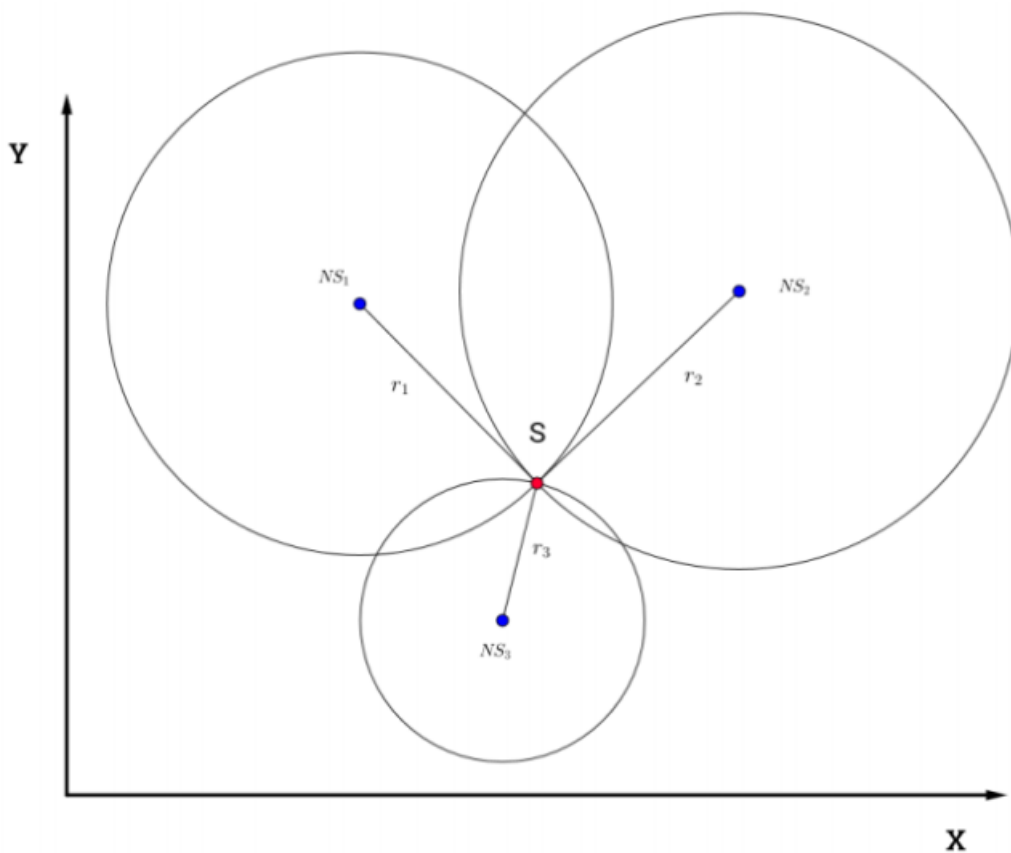


Figura 3.5: Estimación de posición por trilateración. Imagen recuperada de [10].

Un punto a tomar en consideración, es que las antenas reales de Wi-Fi no generan un patrón de radiación esférico sino en forma de donut o toroide como se observa en la figura 3.6. Lo normal es que los nodos AP tengan instaladas antenas omnidireccionales con estas antenas se puede controlar el plano donde se coloca el toroide, el plano se pone paralelo a la horizontal, por lo que la aproximación anterior es válida si el nodo Cliente se sitúa en la misma planta que el nodo AP o en sus proximidades como ya lo habíamos propuesto.

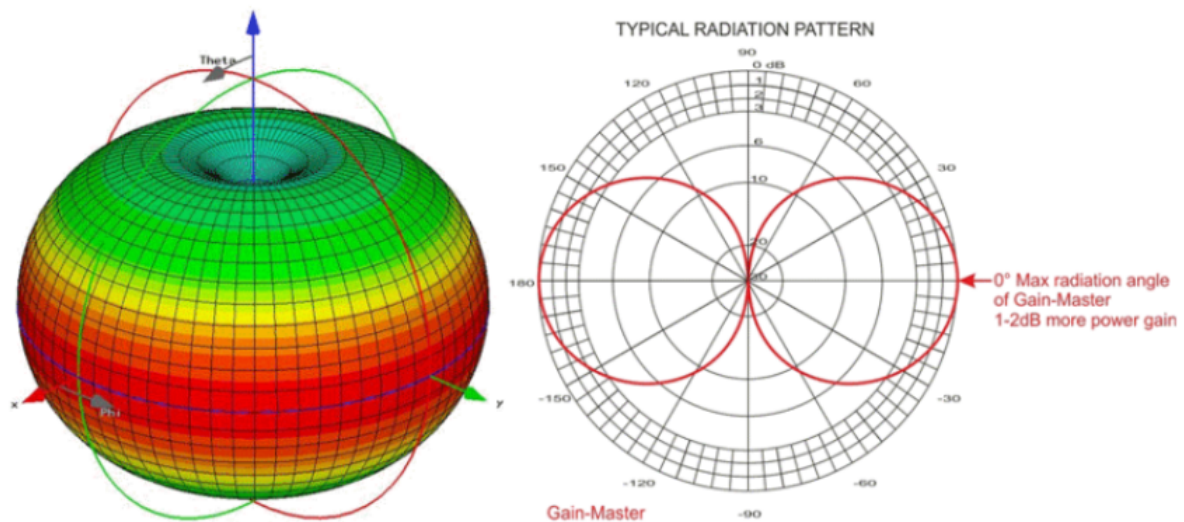


Figura 3.6: Patrón de radiación de una antena Wi-Fi. Imagen recuperada de [11].

Finalmente para encontrar la posición buscada, nos enfrentamos a un reto de obtener tres casos que son los siguientes representados en la figura 3.7. En el caso 1 observamos que nuestro nodo desconocido se encuentra afuera de las circunferencias. El caso 2 muestra a nuestro nodo desconocido adentro de cada circunferencia y finalmente el caso 3, que representa el caso ideal, donde nuestro nodo desconocido se encuentra justo en la intersección de las tres circunferencias.

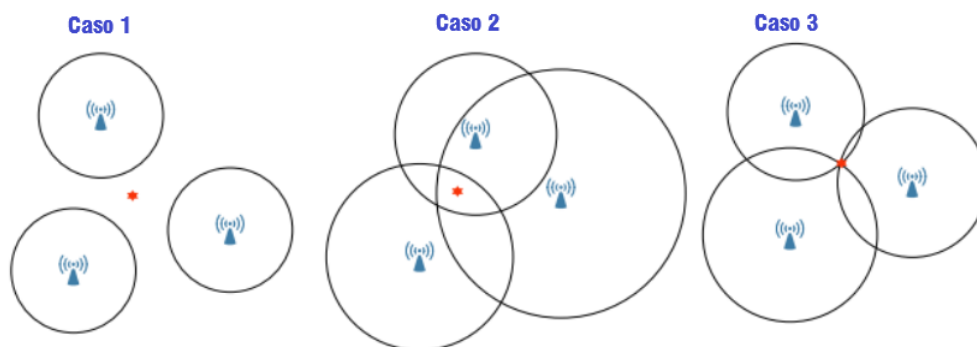


Figura 3.7: Casos posibles que podemos para calcular la posición por Trilateración. Imagen recuperada de [8].

Esta variedad de casos es debida al porcentaje de error al calcular la distancia del radio r_n , a continuación se presenta un cálculo adecuado que considera los efectos negativos ya mencio-

nados antes para la estimación de la distancia del los radios r_n .

El RSSI como mencionamos antes es una indicador de la potencia o intensidad de señal recibida, la unidad de este medición es el decibel [dB] con referencia a los mili-Watts [dBm] el valor promedio de una señal de Wifi se mide entre 0 y -120 dBm. La señal es más fuerte cuando presenta un valor de 0 dBm y muy inferior en -120 dBm hablando de potencia recibida.

Esta intensidad de señal puede variar dependiendo del medio donde esté viajando la señal, el caso ideal sería considerar un modelo lineal para esta intensidad, sin embargo no es así, debido a que existen objetos por los cuales tiene que viajar la señal y esto causa pérdidas mayores a las esperadas, para ello utilizaremos una modelo que considera estas pérdidas y los efectos negativos ya mencionados antes, con la finalidad de mejorar la precisión.

3.3.4. Estimación de la distancia r mediante el modelo de sombreado logarítmico-normal, LSNM por sus siglas en inglés

Un modelo de propagación es una ecuación normalmente dada en dB (decibeles) que trata de calcular y describir las pérdidas de una señal en un determinado ambiente de propagación. El LSNM, es un modelo empírico basado en una referencia de pérdidas a una distancia pre-establecida, y aplicable en entornos cerrados mediante factores de corrección. Se expresa una ecuación en función de la distancia entre transmisor y receptor, la ecuación 3.1 representa el LSNM.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.1)$$

Donde $PL(d)$ es la pérdida del trayecto a la distancia d . $PL(d_0)$ es la pérdida del trayecto a la distancia de referencia d_0 . El parámetro n es el exponente de la pérdida del trayecto, que se ve afectado por el entorno debido a los diferentes objetos por donde viaja la señal. X representa el ruido de la medición, se supone una variable aleatoria gaussiana con un valor medio de cero y una varianza de σ .

La pérdida del trayecto $PL(d)$ y la RSSI está dada por la siguiente ecuación

$$RSSI = Pt - PL(d) \quad (3.2)$$

Donde Pt indica la potencia recibida total sin pérdidas, ahora si sustituimos la ecuación (3.1) en la ecuación (3.2) obtenemos la siguiente expresión.

$$RSSI = Pt - PL(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (3.3)$$

Donde podemos reescribir la ecuación si realizamos lo siguiente, colocamos una sola constante llamada $A = Pt - PL(d_0) - X_\sigma$ y además hacemos que el valor de $d_0 = 1$ por lo tanto la ecuación 3.3 puede reescribirse como

$$RSSI = A - 10n \log(d) \quad (3.4)$$

Por lo tanto de la ecuación 3.4 podemos despejar la distancia d del nodo desconocido al nodo transmisor, obteniendo así los radios $r = d$ de las circunferencias que determinarán la posición de nuestro robot, quedando la ecuación 3.5 que nos permite calcular los radios de las circunferencias.

$$d = d_0 10^{\frac{A-RSSI}{10n}} \quad (3.5)$$

En múltiples referencias se emplean métodos estadísticos y probabilísticos para mejorar las estimaciones hechas para el RSSI debido a que presenta muchas variaciones por distintos factores. Por lo tanto la distribución de las mediciones del RSSI pueden modelarse con una distribución Gaussiana o Normal. Por lo tanto la función de densidad es la siguiente.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (3.6)$$

Donde $P(x)$ es la probabilidad de la medición x , σ_d es la desviación estándar de las mediciones a una distancia d y μ representa la media de nuestros datos.

σ_d y μ están definidas por las siguientes ecuaciones, donde n representa las mediciones totales realizadas.

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (3.7)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \quad (3.8)$$

n representa el número de mediciones, μ es la media de nuestras muestras de las mediciones y finalmente x_i representa la medición i .

Esto se realiza con el fin de mejorar la precisión de la posición y disminuir la influencia del ruido de las mediciones, se emplearía lo siguiente. La probabilidad de que una medición de RSSI tenga un nivel de confianza aceptable es de 0,6826, siempre y cuando se encuentre en el siguiente intervalo ($\mu - \sigma_d \leq x_i \leq \mu + \sigma_d$). Esto es una característica de la función de distribución gaussiana. El valor de RSSI se obtiene seleccionando el valor medido de RSSI en el intervalo propuesto y este se considera como un valor que tiene un grado de confiabilidad más alto.

3.3.5. Estimación de la posición

Una vez obtenida la distancia de los radios r , ahora estimaremos la posición geométrica, pues ahora basándonos en la siguiente situación, donde conocemos los radios de las circunferencias, como se muestra en la figura 3.8.

Podemos observar que los AP's, es decir nodos que son de referencia para el nodo desconocido tienen coordenadas $A_1(a_1, b_1)$, $A_2(a_2, b_2)$, $A_3(a_3, b_3)$ y distancias d_1 , d_2 y d_3 al nodo objetivo o desconocido respectivamente.

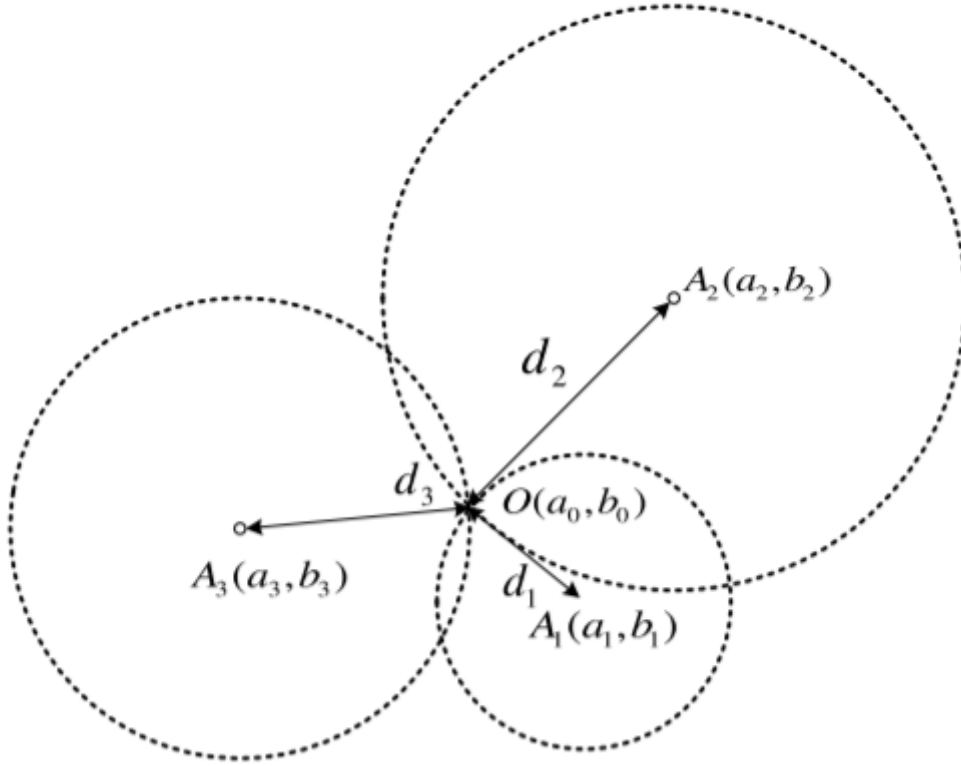


Figura 3.8: Estimación de la posición por Trilateración. Imagen recuperada de [7]

Entonces observamos que dichas distancias forman una circunferencia tomando como centro las coordenadas de los AP's, por lo tanto podemos encontrar las ecuaciones de dichas circunferencias.

$$(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 = d_1^2 \quad (3.9)$$

$$(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 = d_2^2 \quad (3.10)$$

$$(x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 = d_3^2 \quad (3.11)$$

Desarrollando los binomios al cuadrado, tenemos las siguientes ecuaciones

$$x^2 + 2xa_1 + a_1^2 + y^2 + 2yb_1 + b_1^2 = d_1^2 \quad (3.12)$$

$$x^2 + 2xa_2 + a_2^2 + y^2 + 2yb_2 + b_2^2 = d_2^2 \quad (3.13)$$

$$x^2 + 2xa_3 + a_3^2 + y^2 + 2yb_3 + b_3^2 = d_3^2 \quad (3.14)$$

Al restar los siguientes radios $d_1^2 - d_2^2$ y $d_3^2 - d_2^2$ observamos que se eliminan los términos cuadráticos, y simplemente nos quedan dos ecuaciones de grado 1.

$$2x(a_2 - a_1) + a_1^2 + 2y(b_2 - b_1) + b_1^2 - a_2^2 - b_2^2 = d_1^2 - d_2^2 \quad (3.15)$$

$$2x(a_2 - a_3) + a_3^2 + 2y(b_2 - b_3) + b_3^2 - a_2^2 - b_2^2 = d_3^2 - d_2^2 \quad (3.16)$$

Estas expresiones en el plano cartesiano representan a dos rectas. Debido a que las distancias medidas tendrán errores inherentes al sistema, por razones generalmente de ruido, las tres circunferencias no se intersectan en un punto, sino que en el mejor de los casos solo se puede asegurar la intersección de conjuntos de dos circunferencias. Las rectas obtenidas corresponden a aquellas que pasan por los dos puntos de intersección de las circunferencias involucradas, o bien, perpendiculares a la recta que pasa por sus centros y que pasan por el espacio intermedio entre ellas tal como se representa en la figura 3.9 . Por lo tanto siempre tendremos una solución posible.

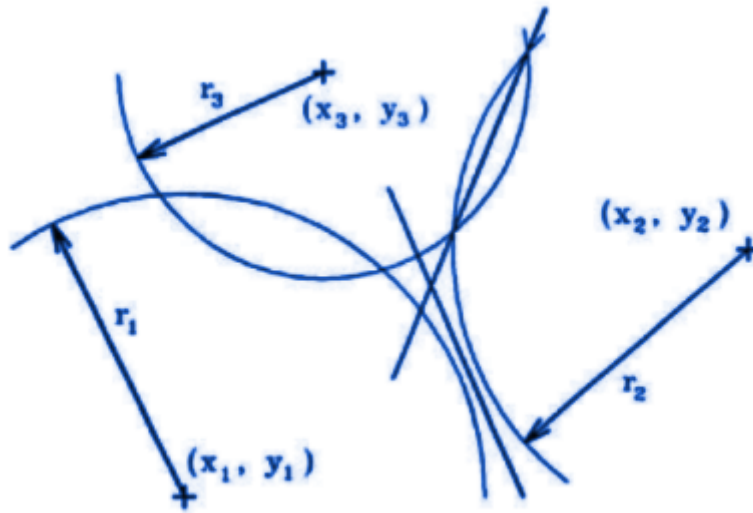


Figura 3.9: Intersección de las rectas obtenidas por el algoritmo de posición.

Finalmente para encontrar las coordenadas encontramos la intersección de ambas rectas formadas por la resta de las circunferencias, obteniendo lo siguiente

$$x = \frac{(b_2 - b_1)(d_2^2 - d_3^2 - a_2^2 + a_3^2 - b_2^2 + b_3^2) - (b_3 - b_2)(d_1^2 - d_2^2 - a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 + b_2^2)}{2(a_3 - a_2)(b_2 - b_1) - 2(a_2 - a_1)(b_3 - b_2)} \quad (3.17)$$

$$y = \frac{(a_2 - a_1)(d_2^2 - d_3^2 - a_2^2 + a_3^2 - b_2^2 + b_3^2) - (a_3 - a_2)(d_1^2 - d_2^2 - a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 + b_2^2)}{2(a_2 - a_1)(b_3 - b_2) - 2(a_3 - a_2)(b_2 - b_1)} \quad (3.18)$$

Donde la ecuación 3.17 representa la coordenada x de la posición del robot y la ecuación 3.18 representa la coordenada y de la posición.

3.4. Coordinación entre robots móviles para el control de tráfico

La comunicación entre robots móviles es sumamente necesaria para poder lograr un control de tráfico entre robots, independientemente de los sensores del robot, mantener una comunica-

ción constante para indicar su posición. Existen diversas formas de comunicación, sin embargo al estar utilizando señales de Wi-Fi para determinar su ubicación, esta misma, será utilizada para la comunicación entre robots. Actualmente, la banda de 2.4 GHz y 5GHz se utiliza comúnmente para sistemas locales de comunicación.

3.4.1. Utilización de Redes Ad Hoc para la comunicación entre robots móviles

Los robots móviles pueden enfrentarse con frecuencia a un entorno desconocido y cambiante; con obstáculos no esperados. La comunicación centralizada y estática resulta ineficiente en estas circunstancias debido principalmente a la gran cantidad de energía necesaria para que cada robot pueda comunicarse con el nodo base, si esta se encuentra a grandes distancias también representa un problema. También si existe una falla en el nodo base podría deshabilitar toda la red por ello es importante realizar otro tipo de red de comunicación que no dependa de un solo nodo, este tipo de red se le conoce como Ad Hoc. Independientemente del tipo de canal empleado, las redes ad hoc podrían ayudar a resolver estos problemas.

En una red ad hoc para comunicación entre robots, ninguna unidad conoce la red completa, sino sólo a sus vecinos inmediatos, como puede observarse en la Figura .

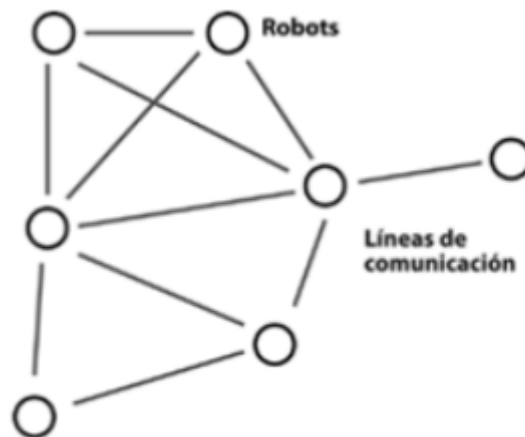


Figura 3.10: Red Ad Hoc.

La información tendrá que pasar por varios nodos antes de llegar a su destino. Para transmitir información cada robot tendrá que actuar como un router y valerse de protocolos de enrutamiento dinámicos. En las redes Ad Hoc, cada nodo sólo conoce a sus vecinos cercanos. La información tendrá que pasar por varios nodos antes de llegar a su destino. Para transmitir información cada robot tendrá que actuar como un router y valerse de protocolos de enrutamiento dinámicos.

3.4.2. Controlador de tráfico del Robot Móvil

El controlador de tráfico del robot móvil es el sistema encargado de llevar el vehículo de un lugar a otro a través de las intersecciones que pueda encontrarse, será mediante la información de la generación de trayectorias y la comunicación con el administrador de intersección. La generación de trayectorias marcará todas las intersecciones que el robot pueda cruzar y compartirá esta información con los otros.

El administrador de intersecciones será encargado de establecer un cruce seguro, este conocerá la información de las posiciones de los cruces y los robots móviles cercanos para establecer un protocolo de cruce seguro, el administrador estará en comunicación con todos los robots móviles como se puede observar en la figura

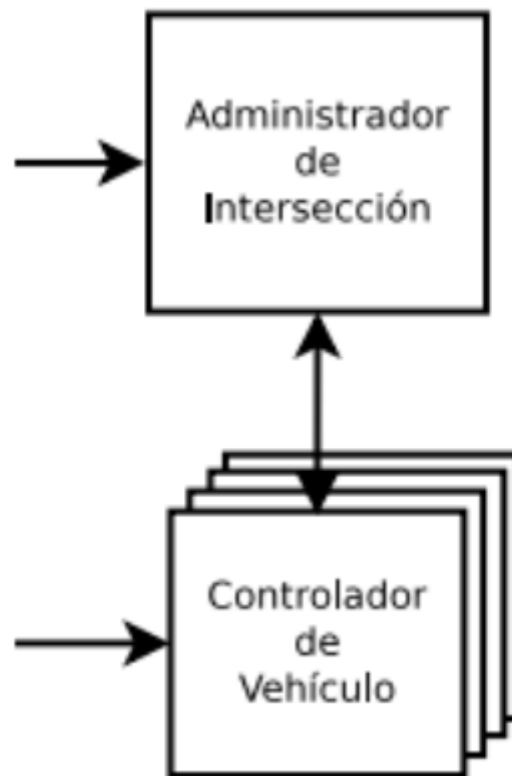


Figura 3.11: Controlador de tráfico.

3.5. Control de velocidad para motores de corriente directa

Para los robots móviles es necesario que puedan mantener una velocidad constante para poder establecer mediciones como el tiempo de espera, cruces y realizar un aprovechamiento máximo de la batería del robot.

El principal problema de los motores de corriente continua es el control de velocidad. Para nuestros objetivos la velocidad es un factor importante que determinará la calidad con la que se lleve la operación. El control de la velocidad de motores de corriente continua se realiza ya sea a través de la variación de la tensión o por medio de un tren de pulsos. Aplicando un tren de pulsos se proporcionará al motor conducción durante una fracción de tiempo. Esto tiene el efecto de ajustar la velocidad a un valor estable.

La frecuencia del pulso y el ciclo de trabajo fijarán la cantidad de corriente recibida por las bobinas del motor por unidad de tiempo y por tanto determinarán la velocidad de rotación.

La modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) puede ser usada para reducir la cantidad total de potencia proporcionada a una carga sin ocasionar pérdidas debidas a controles con cargas resistivas. Esto se debe a que la potencia media que se aporta es proporcional al ciclo de trabajo de la modulación. Con un índice de modulación suficientemente alto, los filtros electrónicos pasivos pueden ser usados para suavizar el tren de pulsos.

En la siguiente imagen podemos observar como la diferencia de tensión promedio aplicada a la carga varía dependiendo del ancho de pulso que se aplique, entre más pequeño es el pulso menor será la diferencia de tensión aplicada a las bobinas del motor y el caso contrario entre mayor sea el ancho del pulso, mayor será la diferencia de tensión aplicada.

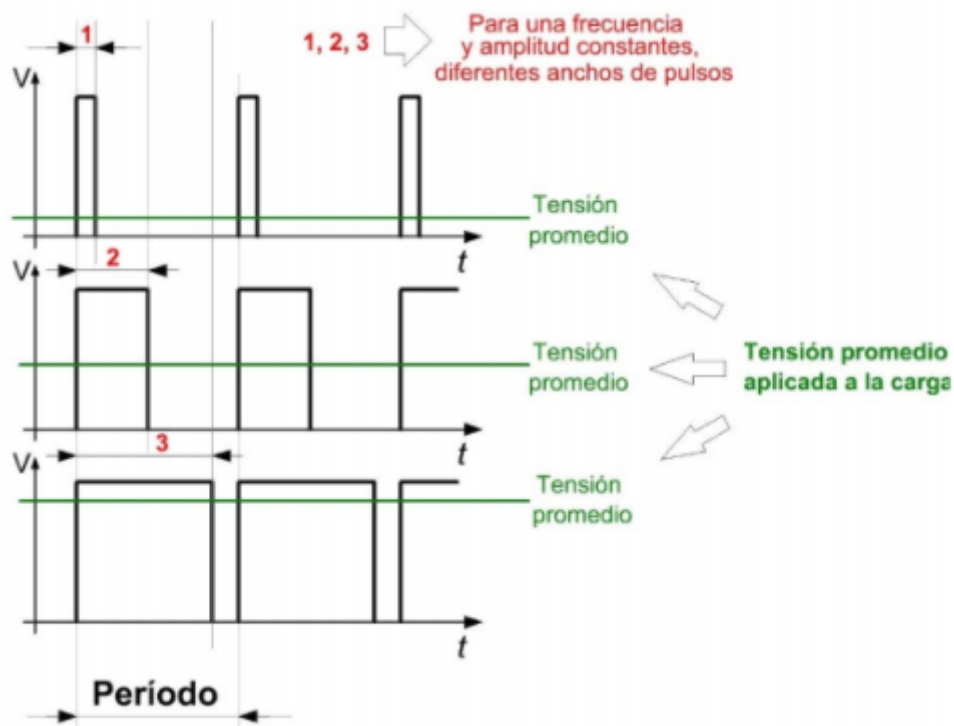


Figura 3.12: Señales PWM para el control de velocidad.

Este control de velocidad mediante el ancho de pulso, se puede demostrar de la siguiente manera.

El valor promedio de una señal está definido por:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.19)$$

Si $f(t)$ es una señal cuadrada de período T y ciclo de trabajo D , entonces su valor es y_{max} para $0 < t < DT$ y y_{min} para $DT < t < T$ y la expresión del valor promedio se puede expresar como:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_0^D y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \quad (3.20)$$

$$\bar{y} = \frac{Dy_{max} + T(1 - D)y_{min}}{T} \quad (3.21)$$

Si analizamos en 1 periodo tenemos lo siguiente.

$$\bar{y} = Dy_{max} + (1 - D)y_{min} \quad (3.22)$$

Si y_{min} presenta un valor de cero entonces la ecuación queda de la siguiente manera

$$\bar{y} = Dy_{max} \quad (3.23)$$

Lo que nos representa que el valor promedio de tensión en la salida, es directamente proporcional al ciclo de trabajo de la onda cuadrada. Por lo tanto para el control de velocidad de los motores necesitamos generar una señal PWM que pueda mantenerse de forma constante, el uso de sensores puede ofrecer una retroalimentación al sistema para poder aumentar o disminuir el ciclo de trabajo cuando los motores lo requieran.

3.6. Suministro y control de la energía eléctrica

En muchas ocasiones es necesario obtener un voltaje mayor o menor al de nuestra fuente de CD para alimentar los diferentes módulos del robot. Para poder controlar la diferencia de tensión que se suministra al robot puede realizarse mediante una fuente lineal y un regulador de voltaje que permita elevar o decrementar el nivel de voltaje al nivel deseado de una manera fácil de implementar, sin embargo, esto es muy ineficiente y tendríamos pérdidas excesivas en la batería del robot móvil por lo tanto esto no parece muy viable de implementar.

Para realizar dicha tarea existen los reguladores de tensión conmutados, que trabajan bajo el principio de mantener un voltaje en la salida ya sea mayor o menor al de la fuente trabajando de manera conmutada permitiendo convertir un voltaje de entrada de CD a un voltaje de salida de CD, regular el voltaje de salida de corriente directa contra variaciones de carga y de fuente proporcionando aislamiento entre la fuente de entrada y la carga. Regularmente los componentes electrónicos trabajan a voltaje fijo así como microprocesadores trabajan con voltajes de 3.3 V a 5 V, entonces, para mantener dicho voltaje se tendrá en cuenta este tipo de regulador. A continuación se presenta el convertidor reductor de DC-DC conmutados, para una posible implementación en el robot móvil .

3.6.1. Convertidor conmutado reductor o buck

En algunas aplicaciones el objetivo es producir una salida que sea continua pura menor a la fuente de DC. Una manera de obtener una salida continua en el circuito anterior es insertar un filtro paso bajo después del interruptor. El circuito reductor o buck, se compone de un filtro LC paso bajo con una bobina y un capacitor, un diodo que proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor está abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Este circuito se representa en la figura 3.13 .

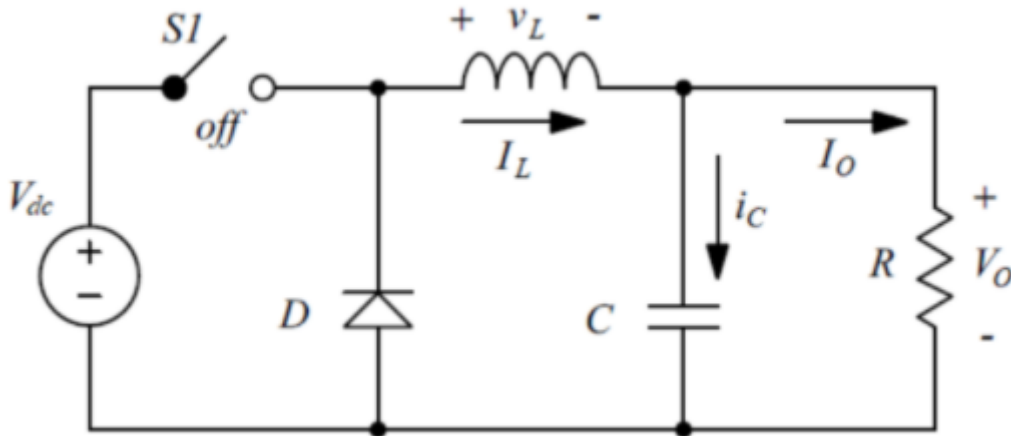


Figura 3.13: Circuito básico de un convertidor tipo reductor. Imagen recuperada de [??]

Para realizar el análisis de este convertidor nos concentramos en la corriente y voltaje del inductor, así como la corriente en el capacitor. Se considera que el convertidor estará en funcionamiento en un régimen permanente, además que todos componentes que conforman al convertidor son ideales, que tanto la corriente en inductor como los voltajes de entrada y salida se mantienen constantes por último también se considera que la frecuencia de conmutación del interruptor y por lo tanto el periodo T se mantienen constante, de tal forma que el interruptor se mantiene cerrado durante el tiempo DT y abierto durante el tiempo $D'T$ donde $D' = 1 - D$.

Primero analizaremos el convertidor cuando el interruptor está cerrado, esto sucede durante el tiempo DT , entonces tenemos el siguiente circuito, donde el diodo se polariza en inversa, haciendo que no permita que la corriente fluya por el diodo, por eso se representa como una parte abierta. En la figura 3.14 se representa este circuito.

Donde podemos observar que el voltaje del inductor, está definido como la diferencia del voltaje de la fuente y el voltaje de salida, mientras que la corriente del capacitor es la diferencia de la corriente del inductor, que se considera de forma constante, y la corriente de salida.

$$v_L = V_{dc} - V_0 \quad (3.24)$$

$$i_C = I_L + I_0 \quad (3.25)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (3.26)$$

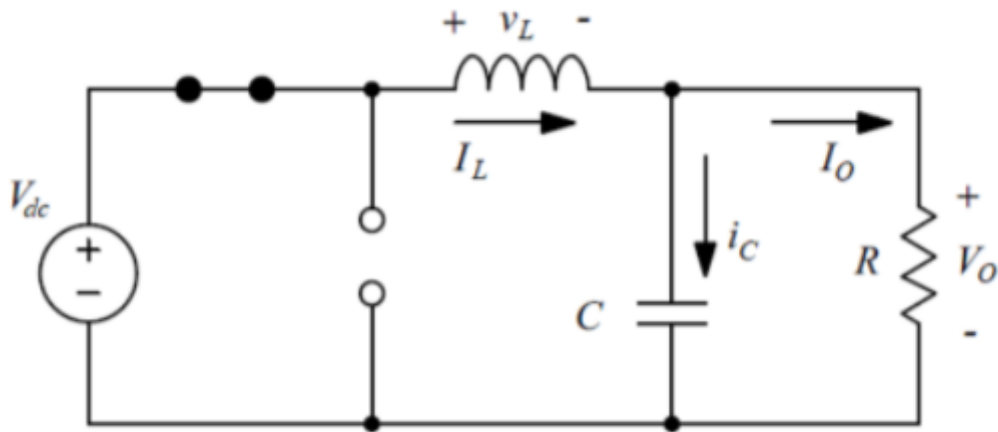


Figura 3.14: Circuito del convertidor reductor con interruptor cerrado. Imagen recuperada de [??]

En cambio durante el tiempo D'T el interruptor se encuentra abierto y tenemos el siguiente circuito, el diodo se polariza en activa directa, ofreciendo de esta forma una ruta para que fluya la corriente almacenada en el inductor.

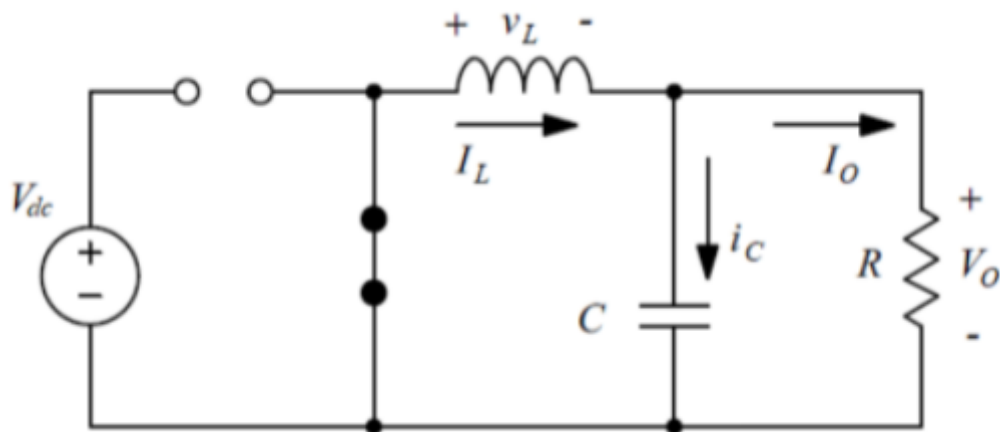


Figura 3.15: Circuito del convertidor reductor con interruptor abierto. Imagen recuperada de [??]

La primera consecuencia que observamos es que la fuente de voltaje se desconecta del circuito durante este tiempo, por lo tanto, el voltaje del inductor es igual al voltaje negativo de salida y la corriente del capacitor sigue siendo la misma.

$$v_L = -V_0 \quad (3.27)$$

$$i_C = I_L + I_0 \quad (3.28)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (3.29)$$

Graficando el voltaje en el inductor tenemos la siguiente señal representada en la figura 3.16, donde vemos que se comporta como una señal cuadrada con un ciclo de trabajo D , definido por la conmutación del interruptor.

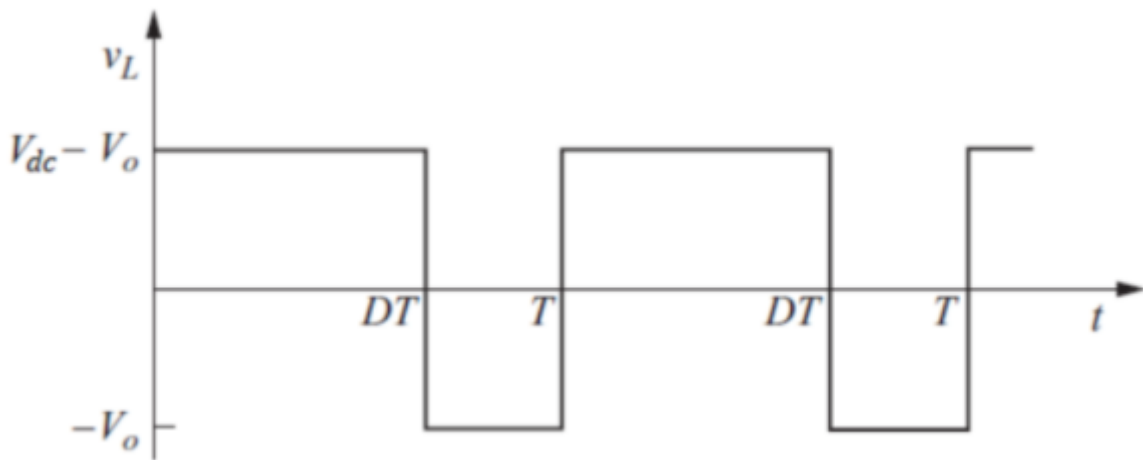


Figura 3.16: Gráfica del voltaje en el inductor. Imagen recuperada de [??]

Como sabemos el voltaje promedio en el inductor es igual a cero por lo tanto aplicamos la definición del valor promedio de una señal e igualamos a cero obteniendo lo siguiente.

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0 \quad (3.30)$$

Expresando la integral de nuestra señal que se muestra en la figura 3.16, obtenemos los siguiente.

$$\frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} (V_{dc} - V_0) dt + \int_{DT}^T -V_0 dt \right] = 0 \quad (3.31)$$

Resolviendo las integrales

$$\frac{1}{T} \left[(V_{dc} - V_0) \int_0^{DT} dt + (-V_0) \int_{DT}^T dt \right] = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{T} [(V_{dc} - V_0)DT - V_0(T - DT)] = 0 \quad (3.33)$$

Si analizamos en 1 periodo completo y considerando que $1 - D = D'$ tenemos que la ecuación se simplifica

$$(V_{dc} - V_0)D - V_0D' = 0 \quad (3.34)$$

Despejando de la ecuación 3.34 a el voltaje de salida, tenemos como resultado la ecuación que nos indica que el voltaje de salida estará en función del ciclo de trabajo D.

$$V_0 = DV_{dc} \quad (3.35)$$

Capítulo 4

Diseño

La metodología de diseño que se usó para el desarrollo de este proyecto consta en forma general de 5 fases, las cuales se indican a continuación.

- Planeación
- Desarrollo del concepto
- Diseño en el nivel sistema
- Diseño de detalle
- Pruebas y refinamiento

Comenzando con la etapa de planeación donde se realizó una identificación de las oportunidades para un diseño innovador y una estrategia a seguir para el desarrollo óptimo del proyecto. En la siguiente fase llamada desarrollo del concepto se analizaron las necesidades del proyecto, los requerimientos específicos y se propuso la estructura de una solución.

Posteriormente el diseño a nivel sistema, se realizó una arquitectura del producto mediante un análisis de bloques funcionales. Posterior a este análisis, se definieron las especificaciones de cada bloque funcional además de analizar posibles implicaciones entre los ellos.

Después en el diseño de detalle, se presentó un diseño robusto donde se definen componentes, valores estándares, técnicas para su elaboración y todos los elementos necesarios para cumplir con las especificaciones. En esta etapa nos permitió realizar modificaciones a las fases anteriores, y así finalmente obtener un diseño final para la construcción del primer prototipo.

Finalmente se realizaron las pruebas en el primer prototipo realizado, permitiendo obtener conclusiones acerca de su funcionamiento y así realizar refinamientos al proyecto y presentar las conclusiones.

4.1. Planeación

Se realizó una investigación que fue expuesta en el capítulo 1 Estado del Arte, donde se identificó que el ordenamiento de paquetes en almacenes se ha vuelto cada vez más dinámico, debido a la enorme cantidad de paquetes que se tienen que manipular y por lo tanto las operaciones en el almacenamiento se tienen que hacer más rápidas y eficientes para que los paquetes puedan enviarse en tiempo y forma. Uno de los ejemplos más conocidos en esta área es la empresa Amazon, en la cual se implementó robots móviles para realizar el ordenamiento de paquete y así aumentar su eficiencia y mejorar su capacidad de almacenamiento de paquetes.

En este contexto, en el presente trabajo de Tesis se propuso el desarrollo de un robot móvil para el ordenamiento de paquetes en almacenes, buscando un diseño que cumpla con los requerimientos que se presentan en el estado del arte.

Para lograr dicho propósito establecido, se contemplo un trabajo y revisión del avance de las actividades de forma semanal en un periodo de 1 año. Dichas actividades que fueron planeadas con base a un desarrollo del producto, donde una de las primeras actividades es la definición de los objetivos y el problema del trabajo de Tesis. Posteriormente se plantearon actividades como el Estado del Arte, Marco Teórico para tener una base de conocimientos sobre el tema y poder realizar el diseño e implementación del proyecto.

Finalmente se realizó un diagrama de Gantt, representado en la figura 4.1 donde se establecieron las actividades mencionadas que se realizaron además de agregar los límites de tiempo para realizar un avance de cada actividad, contemplando las revisiones para sus futuras correcciones.

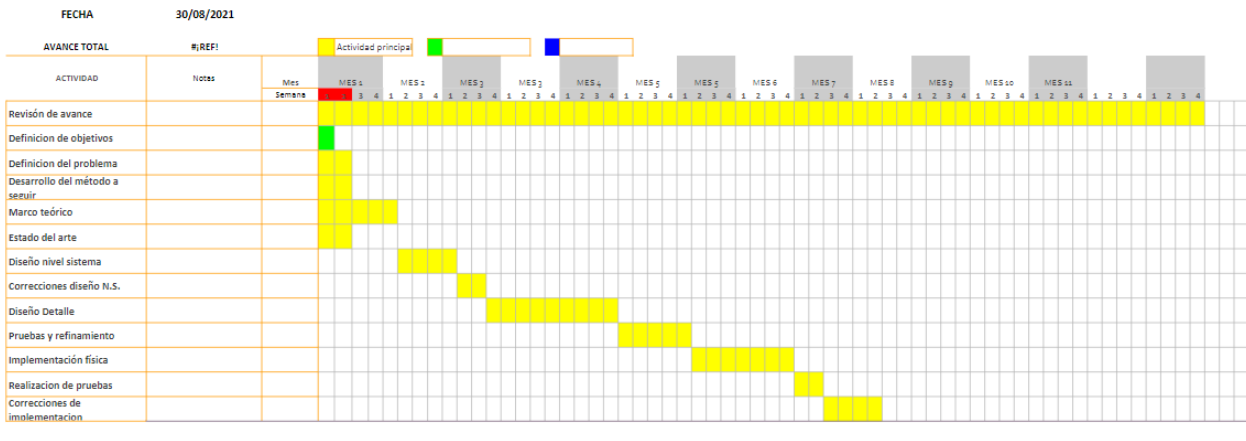


Figura 4.1: Diagrama de Gantt del proyecto.

4.2. Desarrollo del concepto

4.2.1. Definición de las necesidades

Se definieron las siguientes necesidades para el desarrollo del robot móvil, con base en los casos observados e investigados en el estado del arte. También se especificaron estas necesidades como principales del proyecto, de acuerdo con las distintas aplicaciones del robot, para obtener un diseño que pueda ser capaz de cumplir las funciones y requerimientos, para el almacenamiento de paquetes.

1. El robot móvil podrá realizar el transporte autónomo de paquetes de un punto a otro, dentro de un almacén cerrado, con una velocidad constante, capaz de controlar el tráfico con otros robots e informar su estado actual.
2. El robot móvil deberá tener un grado de autonomía para trabajar en conjunto con otros robots iguales dentro un almacén con el fin de evitar accidentes de colisión y tener un control de tráfico optimizado.
3. Tendrá la capacidad de comunicarse con los usuarios además de mostrar su información de telemetría en un pantalla a bordo del robot móvil.
4. Podrán programarse varias tareas, con objetivos específicos, como la entrega de un paquete o recolección del mismo, en ambos el robot deberá ser capaz de aceptar o no la tarea, con base a su estado de almacenamiento de energía eléctrica y cumplir dichos objetivos.
5. El robot móvil podrá transportar paquetes de volumen pequeño y medianos con un peso menor a 5 Kg.

4.2.2. Generación del concepto

A partir de la definición de las necesidades se plantea el concepto de un Robot Móvil que permita recibir objetos a bordo para su transporte de un punto a otro en un almacén, tomando en cuenta que deberá trabajar en conjunto con otros robots móviles de su mismo tipo de forma coordinada. En la figura 4.2 se observa el diagrama a bloques del concepto, donde podemos observar la posible relación entre los bloques que se necesitarán para el funcionamiento correcto.

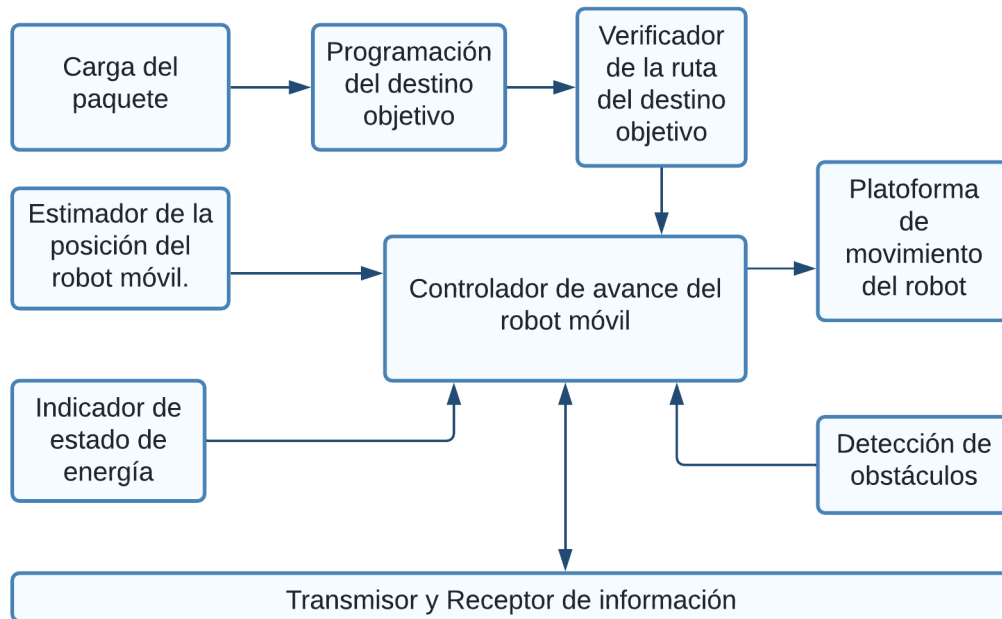


Figura 4.2: Diagrama a bloques del concepto del Robot Móvil.

En la figura 4.2 podemos observar, que el concepto planteado del robot móvil requiere un bloque que realice la funciones de carga del paquete, el cual debe ser un paquete de volumen pequeño o mediano con un peso menor a 5 kg, de acuerdo a las necesidades definidas del robot móvil. Luego se contará con un módulo que permita la programación del destino objetivo del paquete que deberá transportar el robot móvil. Posteriormente se contará con un módulo que realice la verificación de una posible ruta existente hacia el destino objetivo programado, por lo tanto si este módulo verifica que se puede llegar al destino solicitado entonces se envía la información del paquete, destino y ruta verificada al módulo controlador de avance del robot móvil para el comienzo del transporte, por el contrario, si la ruta no es verificada por el módulo correspondiente, no se comenzará el transporte del paquete y se indicará al usuario mediante una interfaz de comunicación.

El controlador de avance del robot móvil también recibirá la información de la posición del robot móvil, estado de la energía eléctrica y detección de obstáculos para el transporte del paquete. Finalmente tenemos un transmisor y receptor de información para establecer la comunicación con otros robot móviles de su mismo tipo, con el fin de tener un trabajo coordinado y evitar accidentes.

4.2.3. Requerimientos de los bloques conceptuales

Posteriormente de analizar el concepto del robot móvil, representado en la figura 4.2 , se realizó un análisis de los primeros requerimientos de los bloques que lo conforman. En primer lugar se realizó la tabla 4.1 que presenta los requerimientos necesarios para su funcionamiento.

Bloque	Requerimientos
Carga del paquete	<ul style="list-style-type: none"> * Podrá detectar paquetes a bordo del robot móvil * Tendrá la capacidad de estimar el peso del paquete * Verificará que el peso del paquete sea menor a 5 kg
Programación del destino objetivo	<ul style="list-style-type: none"> * Deberá permitir el ingreso de información de un destino objetivo al que el robot móvil deberá dirigirse * El ingreso de dicha información al robot podrá enviarse de forma inalámbrica o por una teclado a bordo del robot móvil. * Podrán programarse varios destinos
Verificador de la ruta al destino objetivo	<ul style="list-style-type: none"> * Tendrá la capacidad de determinar si existe una ruta posible para llegar al destino objetivo programado. * Seleccionará la ruta con menores cambios de dirección * Si no existe ruta posible para llegar al destino tendrá la capacidad de avisar al usuario.
Controlador de avance del robot móvil	<ul style="list-style-type: none"> * Tendrá la capacidad de interpretar la información de ruta y posición para mover al robot móvil. * Realizará el análisis de información de otros robots móviles así como la detección de obstáculos para evitar posibles colisiones. * Generará las señales de control para la plataforma de movimiento
Plataforma de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> * Tendrá la capacidad de recibir las señales de control y desplazar al robot móvil. * Podrá estimar la velocidad de movimiento
Estimador de la posición	<ul style="list-style-type: none"> * Podrá estimar la posición del robot móvil en todo momento, utilizando señales inalámbricas de Wi-Fi * Podrá enviar la posición al controlador de avance del robot móvil
Indicador del estado de energía	<ul style="list-style-type: none"> * Proporcionará un valor en porcentaje del estado de energía * Tendrá la capacidad de enviar el estado de energía al controlador de avance del robot móvil
Detección de obstáculos	<ul style="list-style-type: none"> * Podrá detectar los obstáculos todo el tiempo que el robot se encuentre activo. * La distancia máxima de detección será de 4 metros.
Transmisor y receptor de información	<ul style="list-style-type: none"> * Enviará a otros robots su información de posición y si se encuentra en estado activo o no, de forma inalámbrica. * Tendrá también la capacidad de recibir dicha información

Tabla 4.1: Requerimientos de los bloques conceptuales.

4.3. Diseño a nivel sistema

A partir del concepto presentado en la figura 4.2 se realiza el diseño a nivel sistema, donde se describe la función principal y los requerimientos de cada bloque que conforman una arquitectura del robot móvil y una solución al proyecto. En la figura 4.3 se presenta dicha arquitectura con las conexiones entre bloques y funciones principales de cada uno.

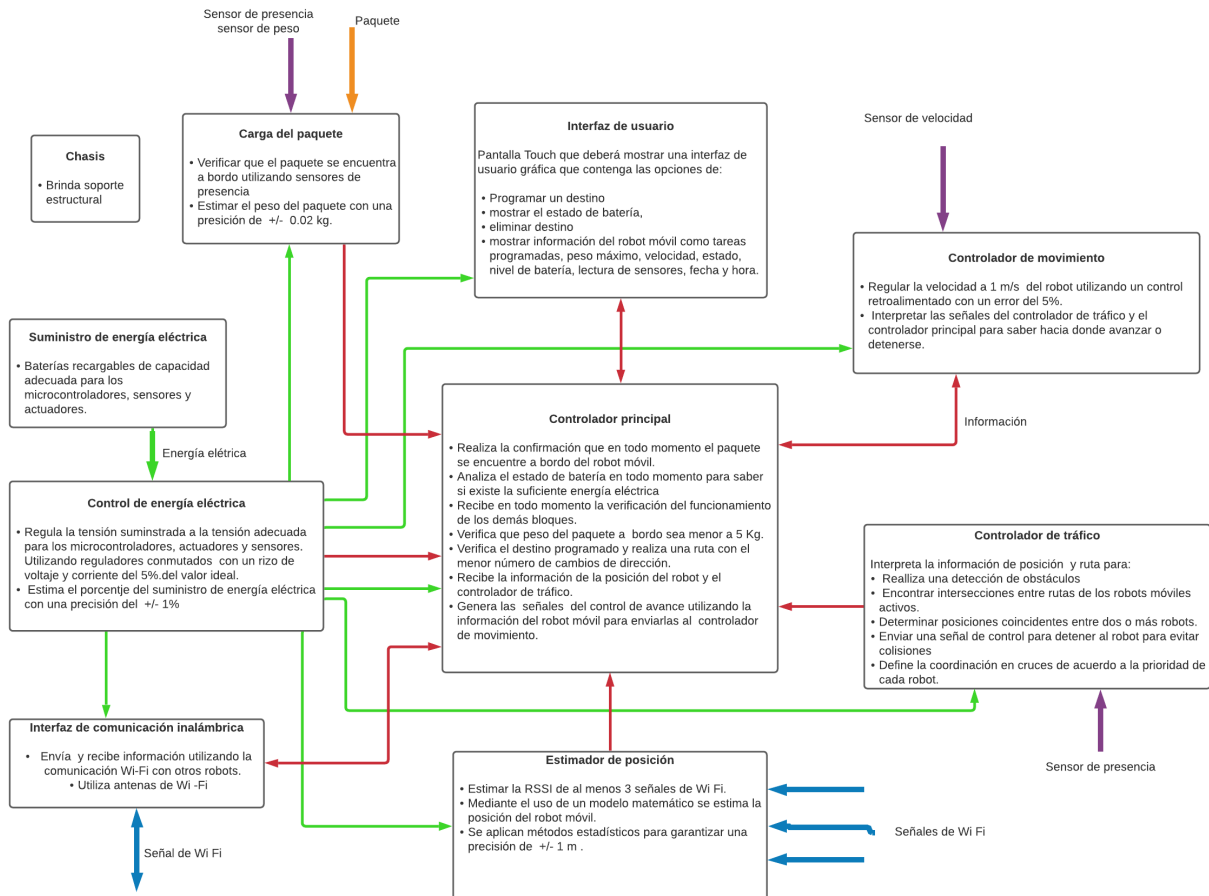


Figura 4.3: Arquitectura del robot móvil.

Como podemos observar, ahora tenemos bloques conectados entre sí, donde ahora el nivel de detalle es más específico que el anterior concepto. Tenemos bloques que representan una función y sus principales especificaciones. Además de agregar los elementos externos como el chasis, el suministro de energía y las interfaces de comunicación. También se muestran el flujo de energía y de información entre los bloques.

Entonces a partir de esta arquitectura de la figura 4.3 se pueden definir las especificaciones de cada uno de los bloques que se presentan en la tabla 4.2, así como la primera solución planteada para cada uno de ellos.

Bloque	Especificaciones
Carga del paquete	<ul style="list-style-type: none"> * Verificar la presencia de un paquete a bordo en toda la plataforma de carga del robot móvil. * Capacidad para poder estimar el peso del paquete con una precisión de ± 0.02 kg.
Interfaz de Usuario	<ul style="list-style-type: none"> * Pantalla Touch a bordo del robot móvil que permita la comunicación con el usuario a través de una Interfaz de Usuario Gráfica (GUI). La GUI deberá permitir realizar lo siguiente: <ul style="list-style-type: none"> * Programación de un destino objetivo * Mostrar el porcentaje de batería, hora y fecha en todo momento. * Eliminar un destino objetivo programado * Permitir al usuario poder ver la información de destinos programados, estado del robot móvil, peso máximo y velocidad máxima. * Permitir ingresar una base de datos con las coordenadas de los destinos y el mapa de ruta.
Controlador principal	<ul style="list-style-type: none"> * Realiza la confirmación de la presencia de un paquete para proceder a su transporte. * Analiza el estado de la batería en todo momento para saber si existe la suficiente energía eléctrica para el transporte. Si no existe suficiente energía eléctrica, avisará al usuario. * Recibe en todo momento la verificación del funcionamiento de los otros bloques. Si un bloque no funciona, no realizará el transporte. * Verifica en todo momento que el peso del paquete no sea mayor a 5 kg. * Tiene la capacidad de verificar que pueda llegar al destino programado y crear la ruta con menores cambios de dirección. * Recibe e interpreta la información de la posición y señales del control de tráfico en todo momento. * Genera las señales del controlador de movimiento del robot móvil. * Tiene la capacidad de controlar la Interfaz de Usuario.
Controlador de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> * Tiene la capacidad de interpretar las señales del controlador principal para saber cuando detenerse o avanzar. * Regula la velocidad del robot móvil a 1 m/s utilizando un control retroalimentado con un error máximo del 5 %. * Tiene la capacidad de estimar la velocidad del robot móvil.
Estimador de posición	<ul style="list-style-type: none"> * Tiene la capacidad de poder estimar la RSSI de tres señales de Wi-Fi, considerando las pérdidas por distancia y objetos. * Utiliza un método matemático para estimar la posición del robot móvil, utilizando las RSSI de las tres señales. * Aplica métodos estadísticos para obtener un precisión de ± 1 m.
Controlador de tráfico	<ul style="list-style-type: none"> * Tiene la capacidad de interpretar la información de la posición del robot móvil y rutas * Realiza un detección de obstáculos a una distancia de 3 m durante todo momento. * Tiene la capacidad de encontrar intersecciones entre rutas de robots móviles activos. * Determina si dos o más robots tienen posiciones iguales. * Envía al controlador principal una señal de control para evitar colisiones por obstáculo o posiciones iguales. * Establece la coordinación en cruces, de acuerdo a la prioridad de cada robot móvil.
Interfaz de comunicación inalámbrica	<ul style="list-style-type: none"> * Utiliza antenas de Wi-Fi para establecer una comunicación * Envía y recibe la información de rutas activas, posición, nivel de prioridad y control de tráfico.
Suministro de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> * Baterías recargables a bordo del robot móvil. * Capacidad adecuada para alimentar a los sensores, microcontroladores y actuadores, a bordo del robot móvil.
Control de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> * Regula las tensiones y corrientes suministrada a los actuadores, sensores y microcontroladores. * Utiliza reguladores conmutados con un rizo de tensión y de corriente del 5 % del valor real. * Estima el porcentaje de suministro de energía eléctrica con una precisión de ± 1 %.
Chasis	<ul style="list-style-type: none"> * Provee un soporte estructural a todos los elementos a bordo del robot móvil * Provee de una plataforma de carga con un volumen adecuado para la carga de los paquetes.

Tabla 4.2: Especificaciones de la arquitectura del robot.

4.4. Diseño a detalle

A partir de las especificaciones definidas en el diseño a nivel sistema, se propone en esta etapa las soluciones a cada bloque que conforma la arquitectura del robot móvil, ver Tabla 4.3.

Bloque	Solución
Carga del paquete	<ul style="list-style-type: none"> * Para la detección de un paquete, se realizará la implementación de sensores con tecnología infrarrojo, colocados en posiciones estratégicas para garantizar la detección en toda la base de la plataforma de carga del robot móvil. * La estimación del peso del paquete, se realizará con un sensor resistivo de fuerza. Si obtenemos la fuerza que ejerce el paquete sobre el sensor, podemos estimar su masa con la relación $m = F/g$ [kg], donde F es a fuerza y g es la gravedad. * Se debe garantizar el correcto funcionamiento de los sensores así como un buen acondicionamiento.
Interfaz de Usuario	<ul style="list-style-type: none"> * Se implementará una interfaz de usuario con una pantalla de tecnología Touch. Tendrá una Interfaz de Usuario Gráfica que permita la visualización de la información requerida, el ingreso de información como la elección de un destino o información de algún paquete. * La pantalla tendrá un controlador propio, podrá comunicarse vía serial con nuestro controlador principal para la transferencia de información que reciba la pantalla o viceversa, información que deberá mostrar en la pantalla.
Controlador principal	<ul style="list-style-type: none"> * Se utilizará un microcontrolador Tiva Series TM4C1294 con un procesador ARM Cortex-M4, para programar las acciones del controlador principal. Se utilizará como el lenguaje de programación C. * El microcontrolador Tiva Series nos ofrece varios módulos de comunicación serial y convertidores analógicos-digital, totalmente programables.
Controlador de movimiento	<ul style="list-style-type: none"> * Se implementará un control con señales PWM para mantener la velocidad constante del Robot Móvil. Se utilizarán motores que contengan sensores de velocidad * Se utilizará esta señal PWM generada para suministrar la potencia requerida por los motores.
Estimador de posición	<ul style="list-style-type: none"> * Se realizará una red de señales Wi-Fi con el módulo ESP8266 para generar tres puntos de accesos que sirvan como referencias para estimar la posición del Robot Móvil. * El módulo ESP8266 presenta una fácil programación con el microcontrolador Arduino.
Controlador de tráfico	<ul style="list-style-type: none"> * Se hará uso del mismo controlador principal para la programación del controlador de tráfico. Este tendrá la capacidad de comunicarse con el controlador de movimiento, permitiendo avanzar o detenerse en un momento dado. * Manejará la información de un sensor ultrasónico que le permita obtener información acerca de obstáculos en su camino.
Interfaz de comunicación inalámbrica	<ul style="list-style-type: none"> * Esta interfaz de comunicación inalámbrica contiene los módulos ESP8266 para establecer la comunicación entre robots móviles.
Suministro de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> * Se suministrará la energía eléctrica con 3 batería de Litio de 3.7 V conectadas serie para obtener un voltaje de 11.1 V. * Alimentará a los reguladores para microcontroladores, sensores y motores. * Tendrá un control para la sobrecarga y sobredescarga de las baterías.
Control de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> * Este permitirá estimar el nivel de batería, también proporcionará valores óptimos para la alimentación de microcontroladores, sensores y motores. * Mantendrá constante esos niveles de tensión utilizando reguladores de tensión conmutados.
Chasis	<ul style="list-style-type: none"> * Se hará uso del material acrílico por su baja densidad para construir el chasis.

Tabla 4.3: Soluciones a los bloques.

4.4.1. Carga del paquete

El bloque de carga del paquete que podrá transportar el robot móvil deberá cumplir con las especificaciones planteadas en la Tabla 4.2.

La plataforma de carga a bordo del Robot Móvil, que permita el transporte deberá recibir los paquetes de volumen pequeños y medianos además de incluir los sensores de peso y presencia. Para ello comenzaremos estableciendo una plataforma con forma de prisma rectangular o cuboide con las siguientes dimensiones 25 cm x 20 cm x 7 cm (largo x ancho x altura).

En la figura 4.4 se muestra el diseño y los elementos principales para su construcción que cumplen con los requerimientos de la carga del paquete.

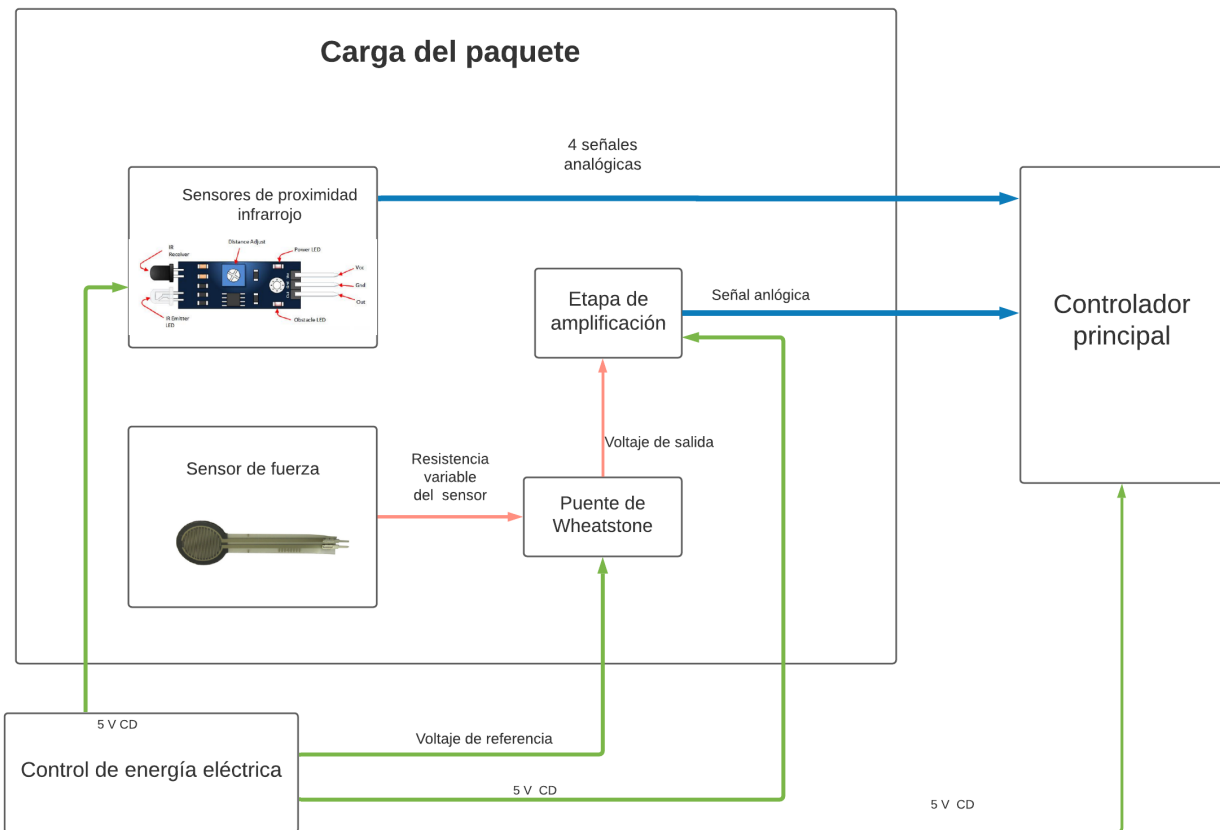


Figura 4.4: Diseño del bloque de la carga del paquete.

Para la detección de objetos se usará un sensor de proximidad con tecnología infrarrojo modelo FC-51 OKY3127, ya que esta basado en el comparador LM393, el cual es muy estable y preciso. Sus principales características son mostradas en el Tabla 4.4. Este sensor tiene la capacidad de realizar una detección con un rango de 2 a 30 cm, con un ángulo de cobertura de 35°, ideal para nuestra plataforma de carga.

El sensor de proximidad infrarrojo funciona con dos diodos, uno emisor de la señal y otro receptor de la misma. El diodo transmisor emite la señal y si está rebota en algún objeto el

Especificación Técnica	Valor
Número de Modelo	FC-51
Ángulo de cobertura	35 °
Voltaje de funcionamiento	3.0 - 6.0 [V]
Rango de detección	2 - 30 [cm]
Nivel de salida	Nivel Alto: Cuando no se detecta presencia. Nivel Bajo: Cuando se detecta presencia.
Consumo	23 - 43 [mA]
Distribución de los pines	Pin1: VCC alimentación Pin 2: GND Pin 3: Salida digital

Tabla 4.4: Especificaciones Técnicas del sensor de proximidad FC-51.

diódo receptor es el encargado de recibir dicha señal, esto genera un cambio en la salida digital del sensor, este cambio deberá ser detectado por el microcontrolador. La lectura del sensor de presencia presenta un estado en alto cuando no detecta nada y un estado bajo cuando existe una detección de algún paquete.

Este sensor necesita una conexión a tierra y una alimentación de 5 V. El modelo FC-51 incluye un potenciómetro que nos permite ajustar la sensibilidad de detección, con el cual definiremos la distancia de máxima de detección.

Las salidas digitales de los sensores de proximidad, estarán conectados a los puertos E0 y E1 del controlador principal Tiva TM4C1294NCPDT de Texas Instruments, el cuál se ha elegido porque nos permite cumplir con todas las especificaciones propuestas. En la Tabla 4.8 se muestran sus especificaciones técnicas.

El siguiente pseudocódigo nos indica la programación referente a este sensor de proximidad, en el Anexo 7.1 puede consultarse la programación referente en lenguaje C para el microcontrolador mencionado, aunque este código puede ser adaptado a cualquier otro microcontrolador solo modificando la lectura y escritura de puertos I/O.

FUNCION LEER_SENSOR_PROX

INICIO

INICIALIZAR Puertos

LEER valor_sensor1;

LEER valor_sensor2;

LEER valor_sensor3;

SI valor_sensor1 || valor_sensor2 || valor_sensor3
= "0" ;

ASIGNAR A objeto_detectado = TRUE;

SI NO

ASIGNAR A objeto_detectado= FALSE;

FIN

Para determinar la carga máxima del robot móvil, se colocará un sensor de fuerza resistivo FSR 406, este sensor varia su resistencia entre sus terminales en función de la fuerza que se aplique en la zona de detección, a continuación en la Tabla 4.5 se muestran las características técnicas del sensor y la curva del valor de resistencia en función de la fuerza aplicada.

Especificación Técnica	Valor
Número de Modelo	FSR-406
Fuerza de actuación	0.1 [N]
Rango de sensibilidad	0.1 - 100 [N]
Resistencia sin fuerza de actuación	10 [MΩ]
Dimensiones del área sensible	43.69 x 43.69 [mm]
Temperatura de operación	-30 a 70 [°C]

Tabla 4.5: Especificaciones Técnicas del sensor de fuerza FSR- 406.

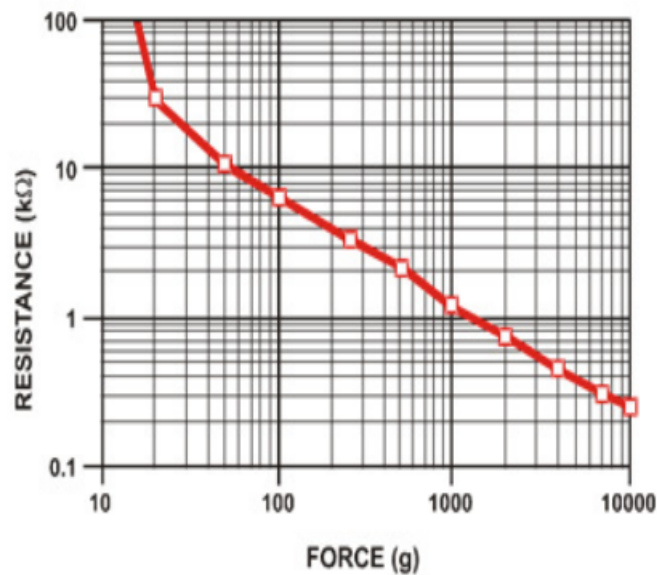


Figura 4.5: Gráfica de la resistencia del sensor FSR-406 en función de la fuerza aplicada.

Para este caso se deberá agregar un puente de Wheatstone para obtener una variación de voltaje en función del cambio de resistencia del sensor y el circuito nos permitirá medir cambios de resistencia con una resolución mayor. Finalmente tendremos que agregar una etapa de amplificación, porque la señal de salida del puente de wheatstone puede llegar a ser muy pequeña por lo tanto, para no tener algún problema con la conversión de esta señal analógica a una señal digital para el microcontrolador se diseñará esta etapa de amplificación.

Como se ha mencionado el sensor de fuerza varia su resistencia en función de la fuerza aplicada en el área de detección. Este cambio en el valor inicial R_0 del sensor será medido con un Puente de Wheatstone, donde entonces la variación de la resistencia estará en función del voltaje.

$$R_X = f(V_{AB})$$

Entonces, el siguiente circuito, mostrado en el Figura 4.6, nos muestra la configuración del Puente de Wheatstone, donde R_X es la resistencia variable del sensor.

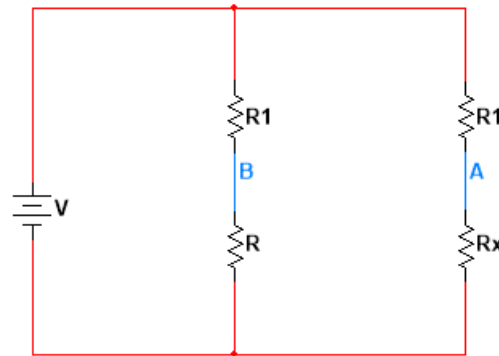


Figura 4.6: Circuito eléctrico del puente de wheatstone.

En principio se busca tener una estabilidad del puente de Wheatstone haciendo que el voltaje $V_{AB} = 0[V]$, esto se llama la condición de equilibrio. La variación de R_X , que representa la resistencia variable del sensor de fuerza causa un desequilibrio del Puente de Wheatstone, haciendo que el voltaje $V_{AB} \neq 0$ y por lo tanto obtendremos un voltaje que está en función de ese cambio de resistencia.

El siguiente modelo es una linealización para obtener la salida de dicho voltaje V_{AB}

$$V_{AB} = V \left(\frac{R_X - R}{R_1 + R} \right) [V]$$

Donde se debe de cumplir las siguientes condiciones; de linealidad $R_1 \gg R_X$ y de equilibrio es decir $R_X = R$ del puente de Wheatstone. La resistencia R representa una compensación, es decir, nos define el voltaje inicial de V_{AB} .

Por lo tanto, si se pretende medir variaciones de resistencia entre $[1, 18][K\Omega]$ lo cual representa nuestra resolución. Utilizando un voltaje $V = 5[V]$ y cumpliendo con la condición de linealidad y de equilibrio.

$$R_1 \gg R_X$$

$$R_X = R$$

Por lo tanto $R_1 = 180[K\Omega]$ y el valor de $R = 18[K\Omega]$. Por lo tanto nuestro modelo lineal es el siguiente:

$$V_{AB} = 5 \left(\frac{R_X - 18 \times 10^3}{180 \times 10^3 + 10 \times 10^3} \right) [V] \quad (4.1)$$

En la Figura 4.7 se observa la simulación elaborada en el software Multisim del Puente de Wheatstone, considerando una tolerancia en las resistencias del 5 % y una variación de 1 [K Ω]

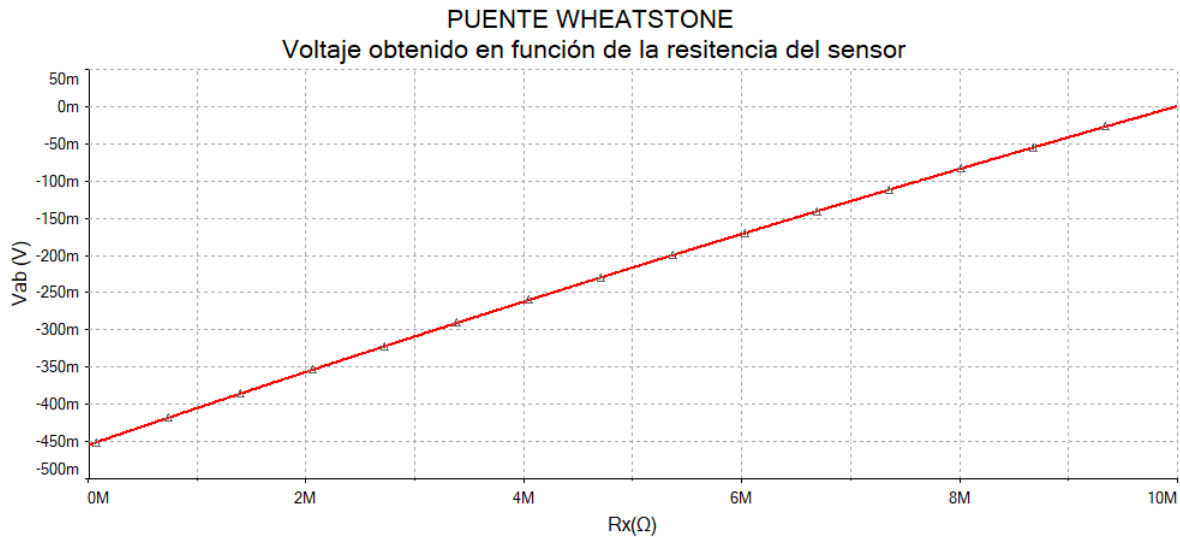


Figura 4.7: Simulación del Puente de Wheatstone.

Entonces podemos observar, el voltaje en función de la resistencia obtenida varía de forma lineal y obtendremos valores de voltaje negativos, dado que la resistencia del sensor no aumenta, sino que disminuye al aplicarle una fuerza. Por lo tanto debemos considerar esto y colocar un circuito que sea capaz de restar dichos voltajes y amplificar la señal de salida.

Además analizando nuestro modelo lineal mostrado en la ecuación 4.1, notamos que para la máxima variación de resistencia obtenemos un voltaje aproximado de -450 [mV], y sin ninguna variación un voltaje de 0 [V] .

Entonces se utilizará un amplificador de instrumentación, el cual nos permitirá restar los voltajes y aplicar una ganancia de voltaje ajustable, además de poner la salida a un voltaje de referencia que nosotros deseamos. En la siguiente Figura 4.8 se observa el amplificador de instrumentación basado en 3 amplificadores operacionales. Esto nos permite tener una ganancia ajustable, una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja.

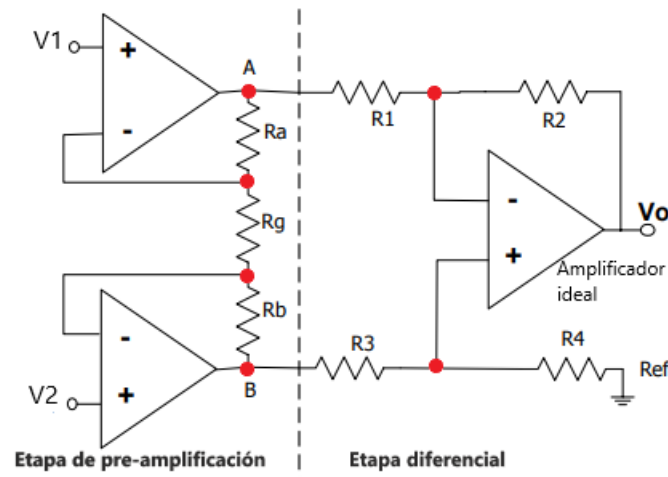


Figura 4.8: Amplificador de instrumentación basado en 3 Amplificadores operacionales.

Como podemos observar tenemos dos etapas, una etapa de pre-amplificación y una etapa de un amplificador diferencial, la salida de esta etapa esta dada por la siguiente ecuación.

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_B - V_A) [V] \quad (4.2)$$

Analizando las salidas de la etapa de pre-amplificación, para encontrar V_A y V_B en función de V_1 Y V_2 . Entonces aplicaremos la propiedad de los amplificadores operacionales del corto circuito virtual y la ley de corrientes de Kirchhoff en el punto A y en el punto B, obteniendo las siguientes ecuaciones.

Punto A:

$$\frac{V_A - V_1}{R_a} = \frac{V_1 - V_2}{R_g}$$

despejando V_A :

$$V_A = V_1 \left(\frac{R_a}{R_g} + 1 \right) - \frac{R_a}{R_g} V_2 \quad (4.3)$$

Punto B:

$$\frac{V_1 - V_2}{R_g} = \frac{V_2 - V_B}{R_b}$$

$$V_B = V_2 \left(\frac{R_b}{R_g} + 1 \right) - \frac{R_b}{R_g} V_1 \quad (4.4)$$

Entonces sustituyendo la ecuación 4.3 y 4.4 en la ecuación 4.2 del amplificador diferencial, y tomando en cuenta que

$$R_a = R_b = R$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

obtenemos la salida del amplificador de instrumentación.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) + V_{ref}[V]$$

Para el modelo AD623 se observa en Figura 4.9 que en su configuración interna presenta valores iguales para todas las resistencias.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = 50[K\Omega]$$

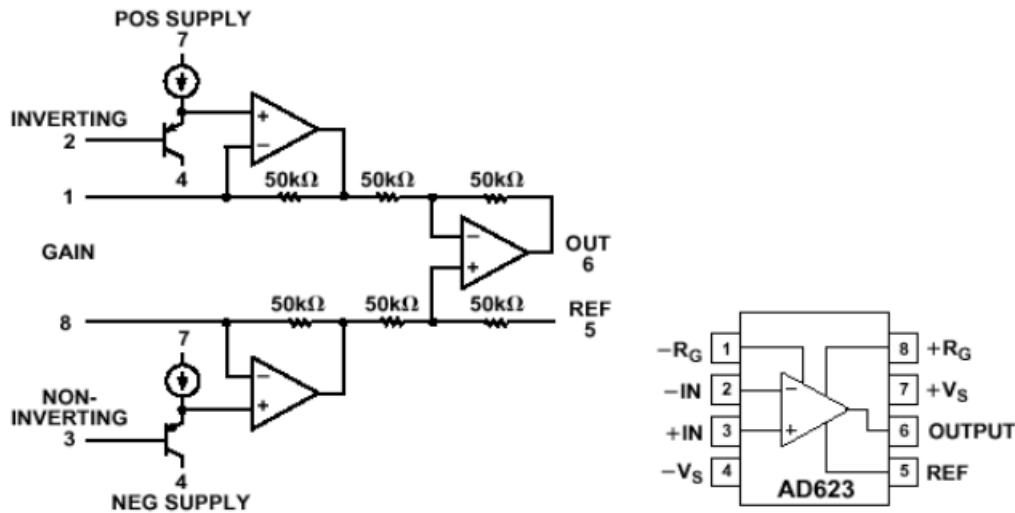


Figura 4.9: Configuración interna del amplificador de instrumentación AD623. Imagen obtenida de [7].

Por lo tanto la salida de voltaje para nuestro caso, donde pondremos un voltaje de referencia de 5 [V] es:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2(50 \times 10^3)}{R_g}\right) + 5 [V]$$

Donde la ganancia de este amplificador depende la resistencia R_g y de tal manera que tengamos una ganancia ajustable R_g representaría un potenciómetro. Para obtener voltajes de 0 a 5 [V], se utilizará una referencia de 5 V, así la salida negativa será restada a este voltaje de referencia.

Por lo tanto con una valor de $R_g = 22[K\Omega]$ obtenemos los valores de voltaje mostrados en la Figura 4.10 y como nuestro voltaje de referencia es 5 [V] obtenemos voltajes positivos.

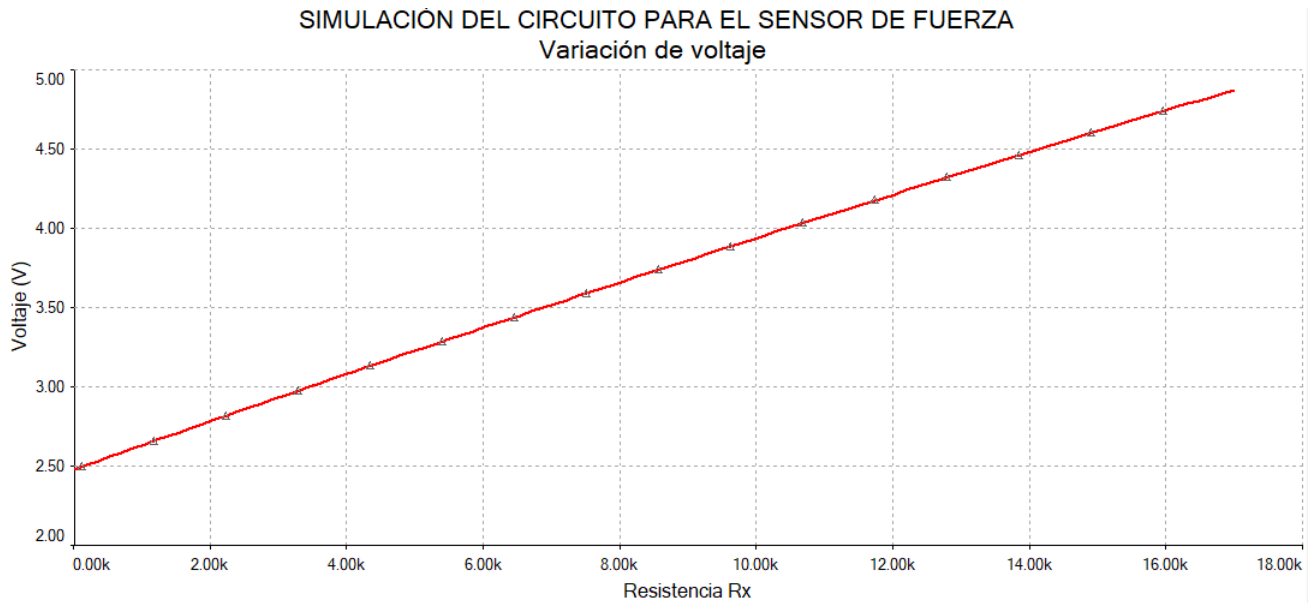


Figura 4.10: Simulación del circuito para el sensor de fuerza.

En la Figura 4.11 se muestra el circuito con la configuración final para poder utilizar el sensor resistivo de fuerza. La salida analógica de este circuito tendrá que ser convertida en una señal digital, para ser interpretada con un microcontrolador, por lo tanto, nuestro controlador principal deberá de contar con un convertidor analógico-digital.

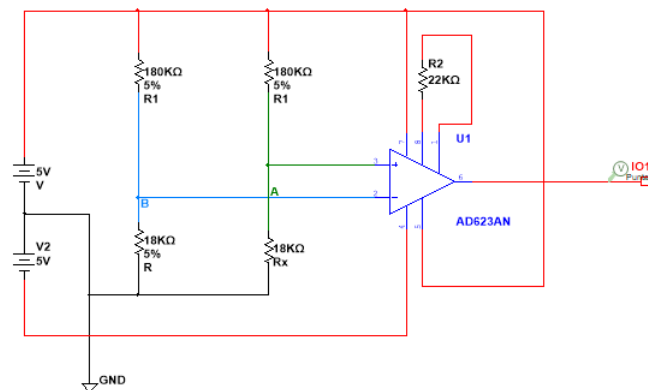


Figura 4.11: Circuito eléctrico para el sensor de fuerza.

El siguiente Pseudocódigo, muestra como será la programación de dicho sensor de fuerza para obtener el peso, conociendo su modelo lineal podemos encontrar un modelo lineal que nos relacione el voltaje de lectura con el peso, de acuerdo con los datos obtenidos en simulación mostrados en la Figura 4.10

$$X = \frac{5}{V_{out}} \left[\frac{Kg}{V} \right]$$

FUNCION LEER_SENSOR.F

INICIO

LEER valor_sensor ;

CALCULAR m = valor_sensor * X;

ASIGNAR masa_paquete = m

FIN

4.4.2. Interfaz de Usuario

En el diseño del bloque que nos proporciona una interfaz de usuario, con posibilidad de ingresar información en ella mediante interacción táctil, para esto se utilizará una pantalla LCD Nextion 2.8 con tecnología "Touch TFT", que nos permitirá cumplir con las especificaciones de la Tabla 4.2. La comunicación entre el usuario y el controlador principal se realizará a través de una interfaz gráfica optima, que permita enviar y recibir información con el robot móvil y una persona. Dicha interfaz gráfica se diseñará en el software especial que nos proporciona los fabricantes de la pantalla marca Nextion. En la Tabla 4.6 se presentan las principales características técnicas.

Características LCD Nextion 2.4	
Resolución	320 x 240 Píxeles
Tecnología	Resistiva
Luz de fondo	LED
Tiempo de vida de la luz de fondo	30,000 Horas
Nivel de brillo	Nivel de brillo ajustable 0 a 200 [nit]
Peso	25 gramos
Voltaje de operación	5 [V]
Corriente de operación	Modo normal con brillo al 100% : 90 [mA] Modo sleep: 15 [mA]

Tabla 4.6: Especificaciones Técnicas de la pantalla Nextion.

La interfaz gráfica (GUI, por sus siglas en inglés) será cargada previamente en la pantalla en una memoria tipo microSD que el controlador de la pantalla es capaz de interpretar o por una conexión USB. Dicha interfaz GUI será programada utilizando el software de Nextion Editor que nos proporciona el fabricante, ahí se diseñarán las imágenes que la GUI necesitará, así como los tipos de datos que enviará o recibirá y las acciones que realizará. Posteriormente se realizará una conexión hacia el bloque controlador principal del robot móvil, utilizando un protocolo de comunicación que nos proporciona el controlador de la pantalla, generalmente UART, así el bloque del controlador principal tendrá la capacidad de comunicarse con la pantalla, poder enviar o recibir para modificar la información de los objetos programados de la GUI, mediante comandos AT.

En la figura 4.12 se muestra el diseño a bloques de la interfaz de usuario, donde se puede observar las conexiones que se necesitarán.

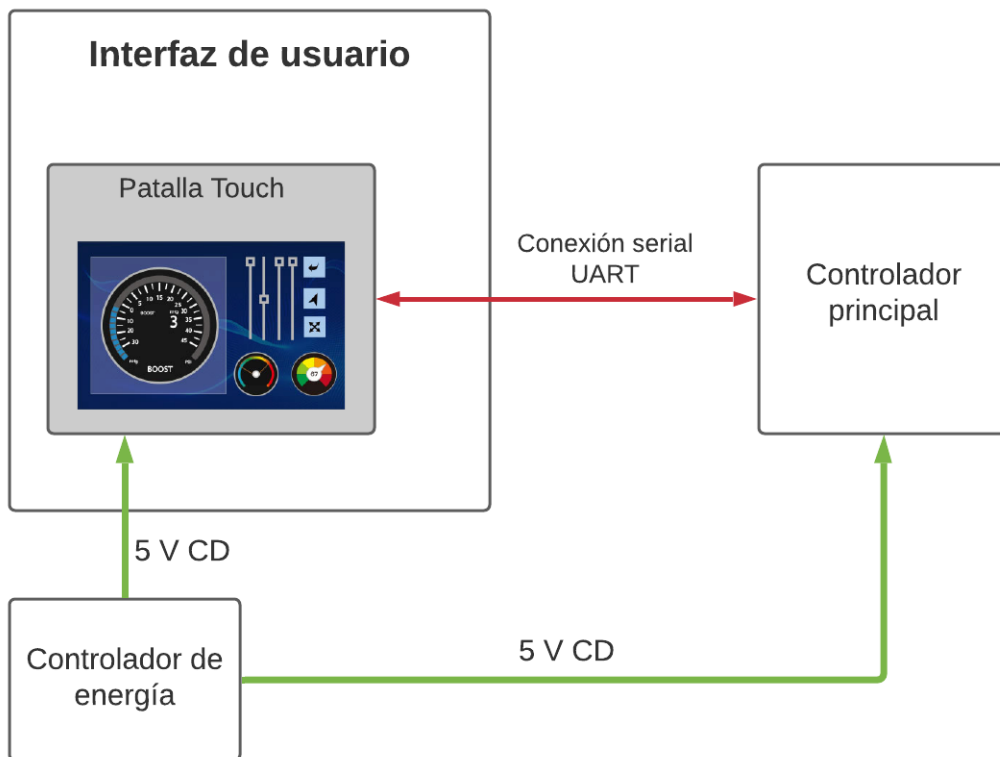


Figura 4.12: Diagrama de bloques de la interfaz de usuario.

Proceso de configuración de la interfaz de usuario

En la Figura 4.13 se puede observar el proceso para la configuración de la pantalla, las conexiones requeridas, así como la relación entre dichos bloques diseñados.

Configuración de la Interfaz gráfica

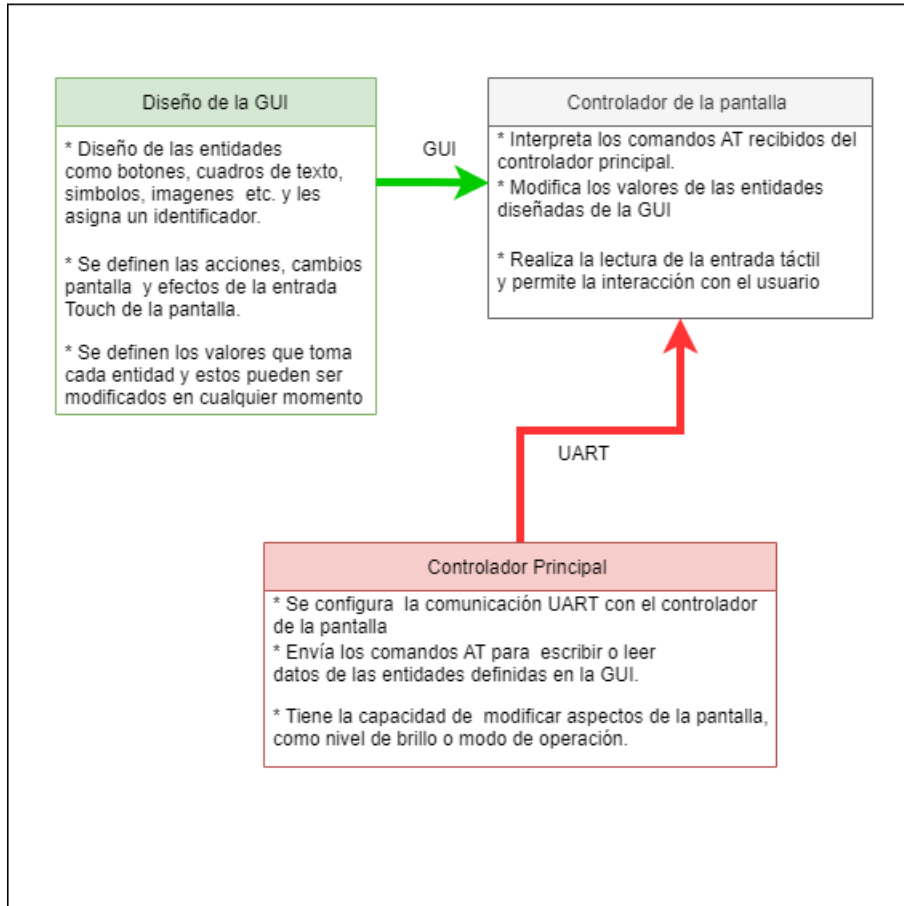


Figura 4.13: Proceso de configuración para la interfaz de usuario.

4.4.3. Controlador principal

El bloque controlador principal nos permitirá cumplir con las especificaciones de la Tabla 4.2. para ello, este bloque deberá tener el control de todos los bloques que conforman la arquitectura del robot móvil, ver figura 4.3. Por lo tanto, será capaz de recibir las señales de los demás bloques e interpretarlas para obtener su información. El control de estos bloques se realizará de manera paralela, por lo tanto, el controlador principal tendrá que ser programado para manejar varios procesos al mismo tiempo.

El control del bloque carga del paquete se realizará programando su algoritmo de control en el controlador principal, para ello debe ser capaz de recibir la señal analógica del sensor de fuerza y las 4 señales digitales de los sensores detectores de presencia, además de también programarse su código correspondiente para obtener su información. Con respecto a la señal analógica del sensor de fuerza, el controlador principal deberá de contar con 1 canal convertidor analógico-digital.

Para el bloque correspondiente al controlador de movimiento, será necesario de la misma forma, que el controlador principal sea capaz de recibir la señal analógica del encoder óptico por medio de un canal 2 convertidor digital-analógico, y programar su algoritmo diseñado para la obtención de la velocidad del robot móvil, a partir de dicha señal. Una vez realizado este algoritmo, se aplicará el control de velocidad, generando una señal digital de salida PWM, que será utilizada para el control de alimentación de los motores.

En el caso de los bloques correspondientes al control de la energía eléctrica, estimador de posición y controlador de tráfico, son elementos de software, donde sus algoritmos de control serán programados en el controlador principal. En el bloque interfaz de comunicación inalámbrica, se configurará el módulo de comunicación Wi-Fi con las especificaciones necesarias para obtener la potencia de tres señales Wi-Fi. Una vez configurado, la información será obtenida por el controlador principal, configurando una comunicación serial I2C, este proceso deberá de ser cada cierto tiempo de tal manera que consideremos siempre tener la formación actualizada.

Los diagramas de flujo correspondientes a la programación del controlador principal, para la gestión de cada bloque de la arquitectura del robot móvil, son mostrados en la siguiente figura 4.14.

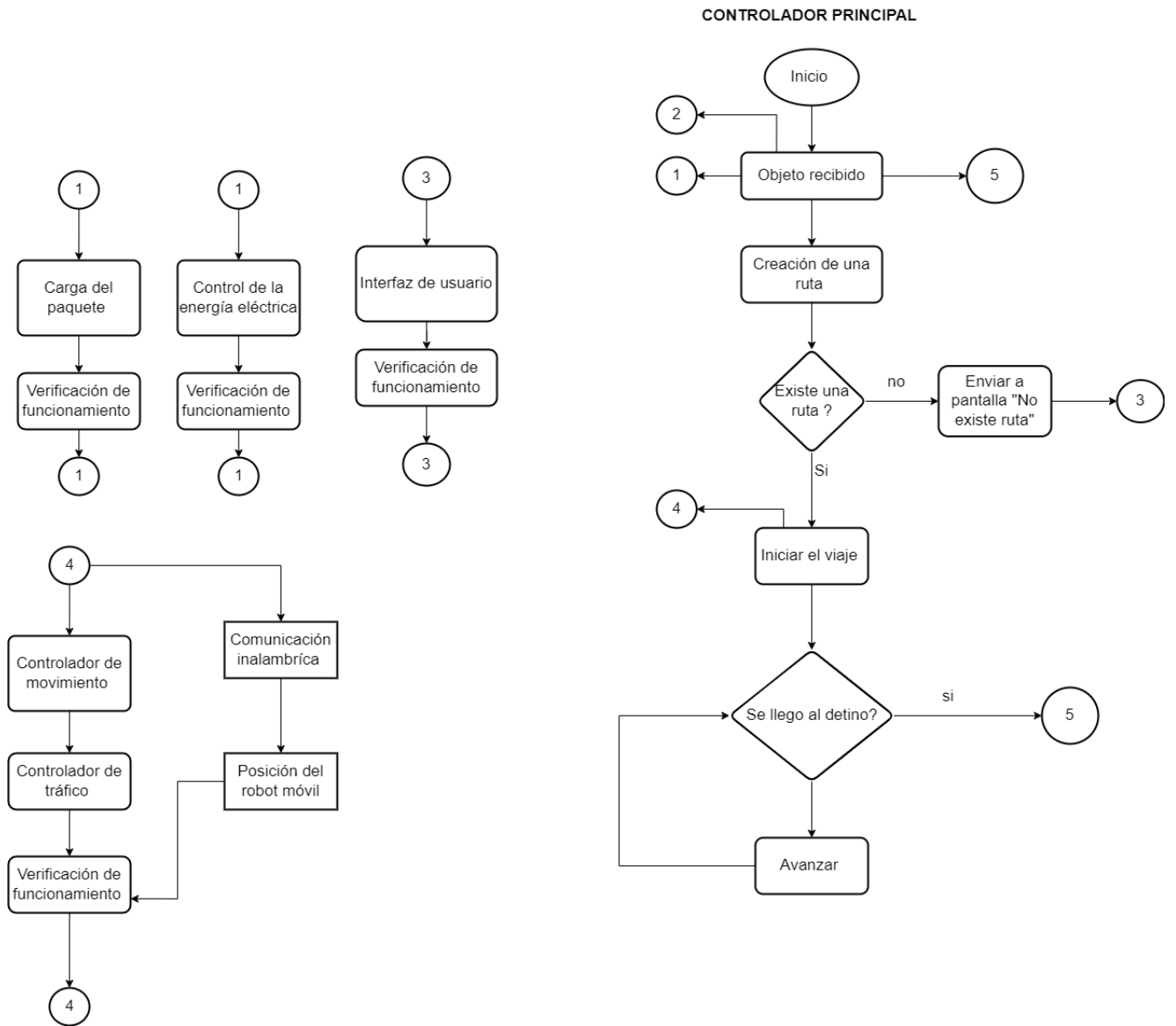


Figura 4.14: Diagrama de flujo de la arquitectura del robot móvil.

Por lo tanto, una vez mencionado, los procesos y señales que nuestro controlador principal debe de realizar, los canales convertidores Analógicos-Digital deberán ser de al menos 8 bits, para garantizar una buena resolución y precisión en el muestreo de las señales, ya que estos se ocuparán para interpretar las señales analógicas de entrada al sistema y determinarán algunas de las señales digitales para el control. Deberá contar con periféricos como puertos de entrada y salida, un modulo de comunicación UART e I2C configurables para comunicación serial con los otros controladores.

El microcontrolador que se ha elegido es el modelo TM4C1294NCPDT de la empresa Texas Instruments, porque consta de un procesador ARM-Cortex-M4 de 120 bits y 32 bits, diseñado para sistemas embebidos contando con una gran variedad de puertos de entrada y salida, así como protocolos de comunicación CAN 2.0, I2C, UART y SSI. En la siguiente Tabla 4.7 podemos observar algunas de la características más destacadas de este microcontrolador.

Características EK-TM4C1294NCPDT	
Rendimiento	
Núcleo	Núcleo del procesador ccc ARM Cortex-M4F
Rendimiento	Operación de 120 MHz; Rendimiento de 150 DMIPS
Flash	Memoria Flash de 1024 KB
SRAM del sistema	SRAM de sistema de ciclo único de 256 KB
EEPROM	6KB de EEPROM
ROM interna	ROM interna cargada con TivaWare™ para el software de la Serie C
Interfaz de Periféricos Externos (EPI)	Interfaz dedicada de 8/16/32 bits para periféricos y memoria
Interfaces de Comunicación	
Receptores/transmisores asíncronos universales (UART)	8 UART
Interfaz serie síncrona cuádruple (QSSI)	Cuatro módulos SSI con soporte Bi-, Quad- y SSI avanzado
Circuito Inter-Integrado (I2C)	Diez módulos I2C con cuatro velocidades de transmisión, incluido el modo de alta velocidad
Red de área del controlador (CAN)	Dos controladores CAN 2.0 A/B
MAC Ethernet	MAC Ethernet 10/100
Bus serie universal (USB)	USB 2.0 OTG/Host/Dispositivo con opción de interfaz ULPI y compatibilidad con Link Power Management (LPM)
Ethernet PHY	PHY con soporte de hardware IEEE 1588 PTP
Control de Movimiento Avanzado	
Modulador de ancho de pulso (PWM)	Un módulo PWM, con cuatro bloques generadores PWM y un bloque de control, para un total de 8 salidas PWM.
Interfaz de codificador de cuadratura (QEI)	Un módulo QEI
Soporte Analógico	
Convertidor de analógico a digital (ADC)	Dos módulos ADC de 12 bits, cada uno con una frecuencia de muestreo máxima de dos millones de muestras/segundo
Controlador de comparador analógico	Tres comparadores analógicos integrados independientes
Comparador Digital	16 comparadores digitales
JTAG y depuración de cable serie (SWD)	Un módulo JTAG con ARM SWD integrado

Tabla 4.7: Especificaciones Técnicas del microcontrolador EK-TM4C1294NCPDT.

El siguiente diagrama de flujo 4.15 muestra el funcionamiento de forma general del controlador principal, para transportar un paquete.

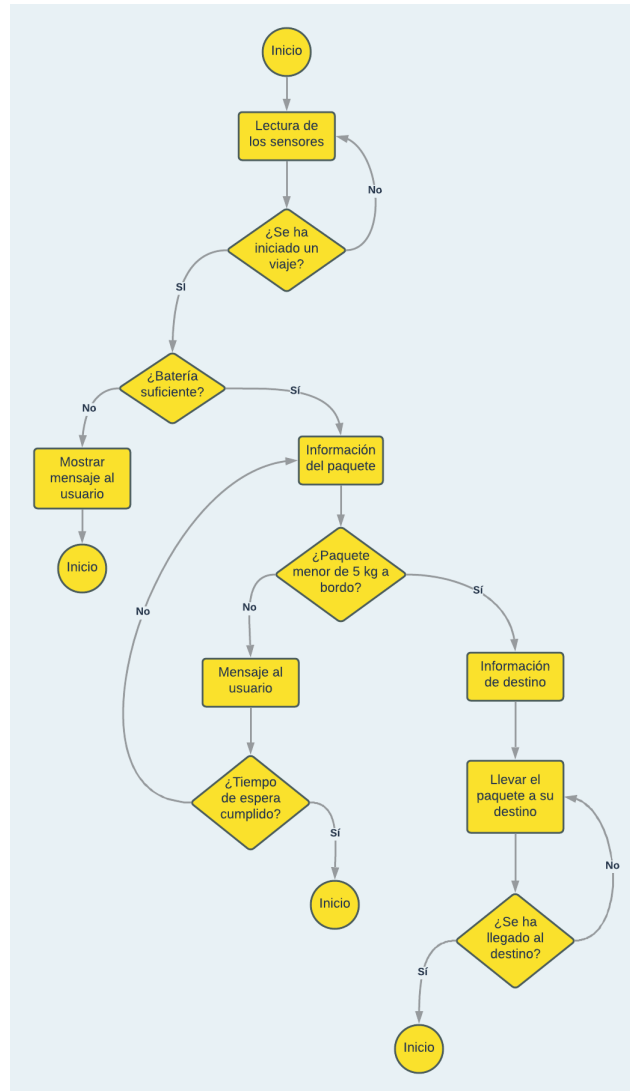


Figura 4.15: Diagrama de flujo del controlador principal.

4.4.4. Controlador de movimiento

Este bloque será programado en el microcontrolador principal, el cual como primer lugar deberá ser capaz de recibir las señales analógicas del sensor de velocidad e interpretarlas, por lo tanto, deberá disponer de convertidores analógicos-digital. El microcontrolador elegido para este trabajo, dispone de varios convertidores analógicos-digital.

El funcionamiento de este bloque es estimar la velocidad a partir de las lecturas del sensor analógico, para generar con el microcontrolador, señales de modulación por ancho de pulso, que puedan ser variables con el fin de mantener siempre una velocidad constante en el robot móvil. Posteriormente, con estas señales generadas y transmitidas por un puerto de salida del microcontrolador, se utilizará un opto-acoplamiento con el circuito integrado 4N35 para controlar la etapa de potencia y así lograr el control de velocidad.

El diseño del controlador de movimiento se muestra en la figura 4.16 , donde podemos observar el diagrama a bloques, la interconexión de estos bloques y además de sus principales requerimientos que debemos considerar en el diseño.

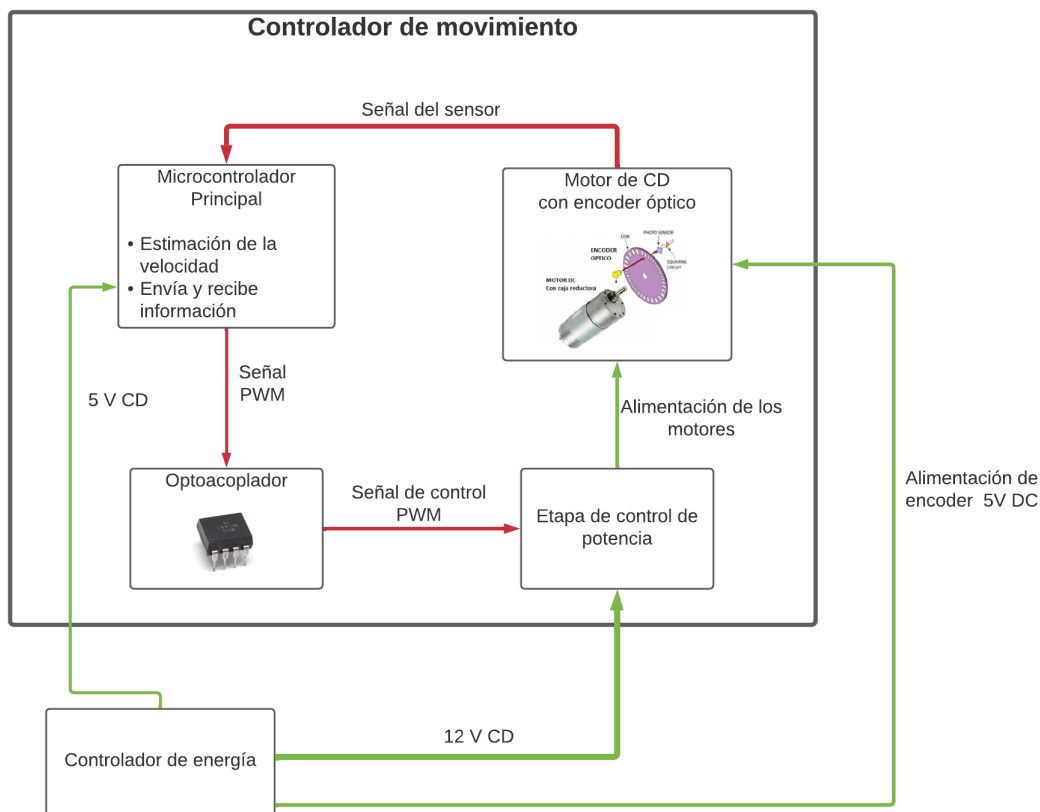


Figura 4.16: Diagrama de bloques del controlador de movimiento

Entonces para el diseño, se utilizarán motores JGB37-520 los cuales tienen acoplados un encoder óptico. Dicho encoder óptico genera una señal de onda cuadrada, donde el ciclo de trabajo de esta señal será proporcional a la velocidad de giro del motor. Entonces se aplicará

una relación lineal que nos permita calcular de acuerdo con el ciclo de trabajo la velocidad del motor y con ello variar las señales PWM. En la siguiente Tabla 4.8 se muestran algunas características más importantes del motor.

Especificación Técnica	Valor
Número de Modelo	JB37-520
Voltaje de alimentación del motor	12 [V]
Voltaje de alimentación del encoder	5 [V]
Velocidad sin carga	60 [RPM] / 120 [mA]
Toque con carga nominal	19 [Kg.cm] / 1 [A] 46 [RPM]
Relación de engranes	1:168
Señales de salida	2 señales de salida 11 pulsos por 1 vuelta

Tabla 4.8: Especificaciones Técnicas del motor CD JB37-520.

El encoder óptico del sensor, proporciona dos señales A y B, las cuales indican la velocidad del motor y el sentido de giro. En la siguiente Figura 4.17 se observa dichas señales del encoder óptico. Se utilizará un Bus de comunicación 74LS245 para dar un nivel de voltaje adecuado a las señales del encoder, antes de ser leídas por el microcontrolador.

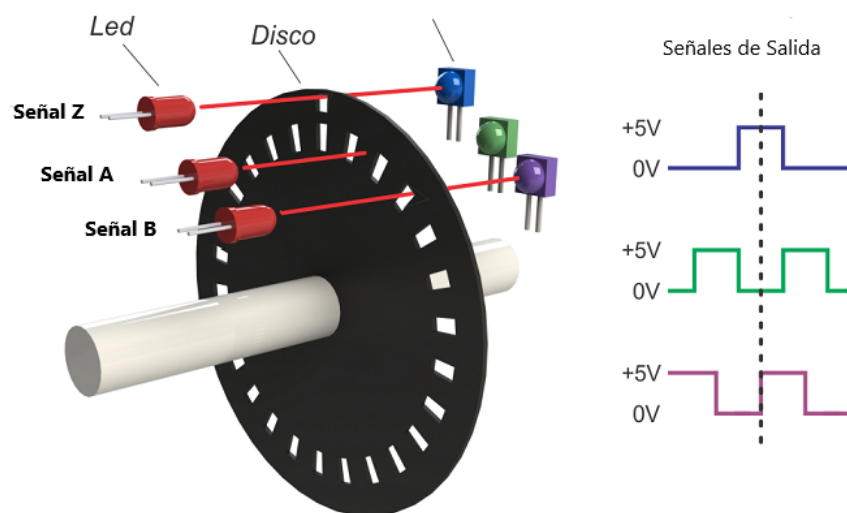


Figura 4.17: Encoder óptico para determinar la velocidad de giro del motor.

Para nuestro diseño, por cada vuelta del rotor antes de la caja de engranes, se producen 11 pulsos del canal A del encoder y como el motor tiene una relación de reducción en su caja de engranes de 1:168. Por tanto, se tienen 1848 pulsos del encoder por cada revolución del rotor

después de la caja de engranes. Por lo tanto el número de vueltas se puede determinar como: .

$$N = \frac{n}{1848} \quad (4.5)$$

Donde n es el número de pulsos detectados por el microcontrolador. Por lo tanto podemos calcular las RPM del motor. Finalmente para saber la rapidez del robot móvil podemos determinar su desplazamiento de acuerdo con el número de vueltas en 1 segundo, si la llanta tiene un perímetro de 0.2 [m], por lo tanto para obtener la rapidez realizamos la siguiente estimación

$$R = \frac{N \times 0,2m}{t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.6)$$

EL siguiente pseudocódigo muestra la programación de la función que calculará el valor de velocidad para el robot móvil.

```

FUNCION LEER_SENSOR_VEL(R)

INICIO DE LA INTERRUPCION
ASIGNAR contador_n = 0;
MIENTRAS QUE cronometro <= 0.5 s
    SI valor_S_VEL == '1'
        ENTONCES contador_n = contador_n + 1 ;

ASIGNAR N = contador_n /1848;
ASIGNAR contador_n = 0;
ASIGNAR R= (N*0.2) /0.5

FIN

```

Una vez realizado el calculo de la velocidad del robot, entonces se aplicarán las señales PWM con el microcontrolador, aplicando un ciclo de trabajo de referencia para una velocidad, posteriormente, se disminuirá o aumentará, en incrementos de 5% de su valor original. Si la velocidad del robot móvil disminuye, entonces el ciclo de trabajo aumentará en los incrementos mencionados para mantener la velocidad al mismo valor, si el valor de velocidad aumenta el ciclo de trabajo disminuirá.

El siguiente pseudocódigo, nos muestra la programación de dicho control de velocidad, haciendo incrementos y decrementos de 5% de acuerdo con el valor calculado. Tomando en cuenta una tolerancia del $\pm 10\%$ para considerar el valor constante.

```

FUNCION CONTROL_VEL(velocidad , vel_ref ,CT)

INICIO DE LA INTERRUPCION
SI velocidad < vel_ref - (vel_ref*0.1)
    ENTONCES CT = CT+(CT*0.05) ;
SINO SI velocidad > vel_ref +(vel_ref*0.1)
    ENTONCES CT = CT-(CT*0.05)
SINO CT=CT

```


FIN

Las salidas de los 4 señales PWM, estarán conectadas a 4 puertos de salida del microcontrolador, y a su vez estas señales serán transmitidas por un opto-acoplador modelo 4N25, el cual está basado en un foto-transistor. Al activar el diodo emisor del opto-acoplador que puede observarse en la Figura 4.18 emite luz, que captada por el foto transistor, permitiendo la activación de este. Por lo tanto de esta manera podemos opto-acoplar nuestro microcontrolador, transmitiendo la señal PWM de control al circuito de potencia.

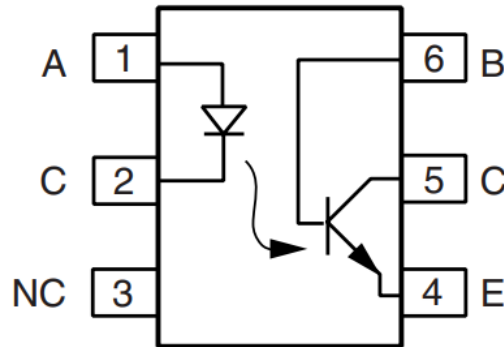


Figura 4.18: Opto-acoplador basado en un foto-transistor. Imagen recuperada de [9].

Después se utilizará un MOSFET de potencia con el fin de funcionar como un interruptor controlado por las señales PWM. Esto para no sobrepasar la corriente máxima soportada por el opto-acoplador. Entonces con base, a la corriente máxima del dispositivo 4N25, se propone el siguiente circuito, mostrado en la Figura 4.19.

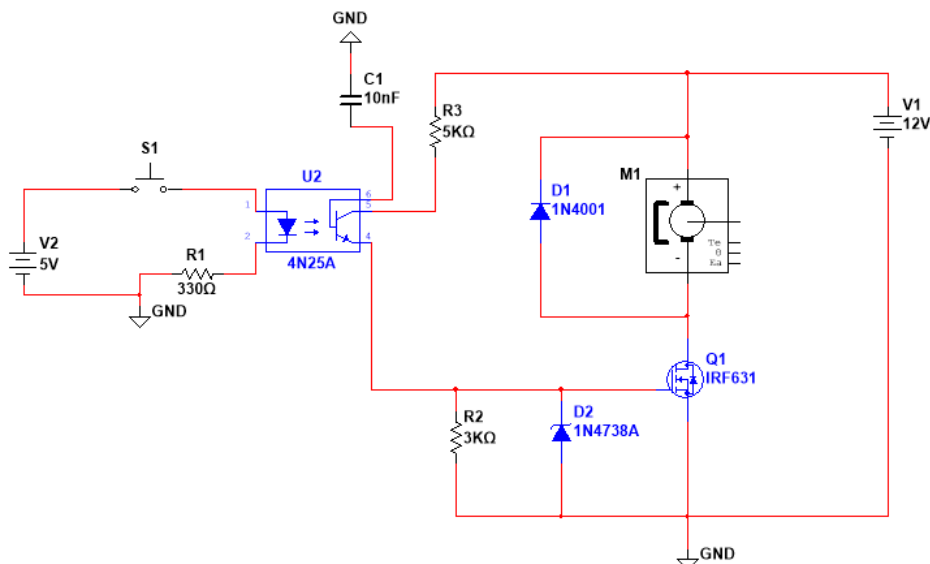


Figura 4.19: Control PWM de un motor DC con opto-acoplamiento.

El MOSFET IRF631 de canal N en este caso, no se estará ocupando como amplificador, sino, como interruptor. Este transistor nos proporciona una alta capacidad de corriente, además de tener una velocidad de respuesta buena. La resistencia $R3$ limita la capacidad de corriente que llega al colector, del foto-transistor del 4N25, después $R2$ y el diodo zener, mantienen un voltaje constante de 8.2 [V] en la compuerta del IRF631, sin importar si el voltaje de la fuente aumenta o disminuye. Posteriormente al activarse el optoacoplador, el MOSFET permite la conexión del motor, finalmente el diodo D1 es una protección contra picos transitorios de tensiones, debido a la conmutación de la alimentación.

Sin embargo, este circuito tiene una desventaja, pues no nos proporciona un control de giro para el motor. Entonces para solucionar este problema, utilizaremos el módulo OKY3195 que esta basado en el puente H L298, el cual nos permite tener un control de giro horario o anti-horario, entradas de conexión y desconexión de los motores a través de una entrada con nivel lógico, proporcionarnos una etapa de potencia para la alimentación de los motores con una corriente máxima de 2 A y un convertidor a 5 V para alimentar las partes lógicas de la placa. Por lo tanto resulta más compacto utilizar esta PCB, sin embargo se deben seguir usando los optoacopladores, con el fin de evitar riesgos en el microcontrolador principal.

En la figura 4.20 se muestra el esquemático de la PCB basado en el puente H L298 y el regulador de voltaje 78M05 y en la figura 4.21 se muestra PCB del circuito propuesto.

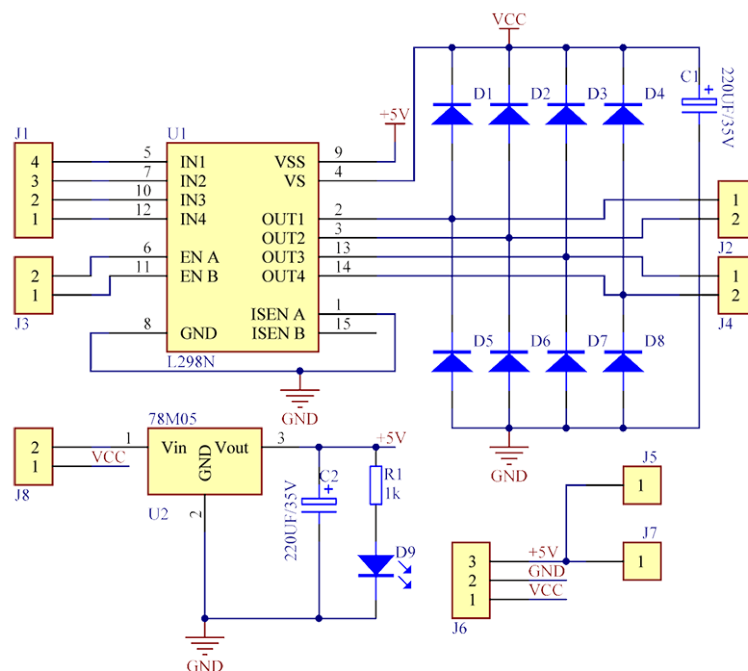


Figura 4.20: Esquemático del circuito para el control de motores basado en el puente H L288. Imagen recuperada de [10].

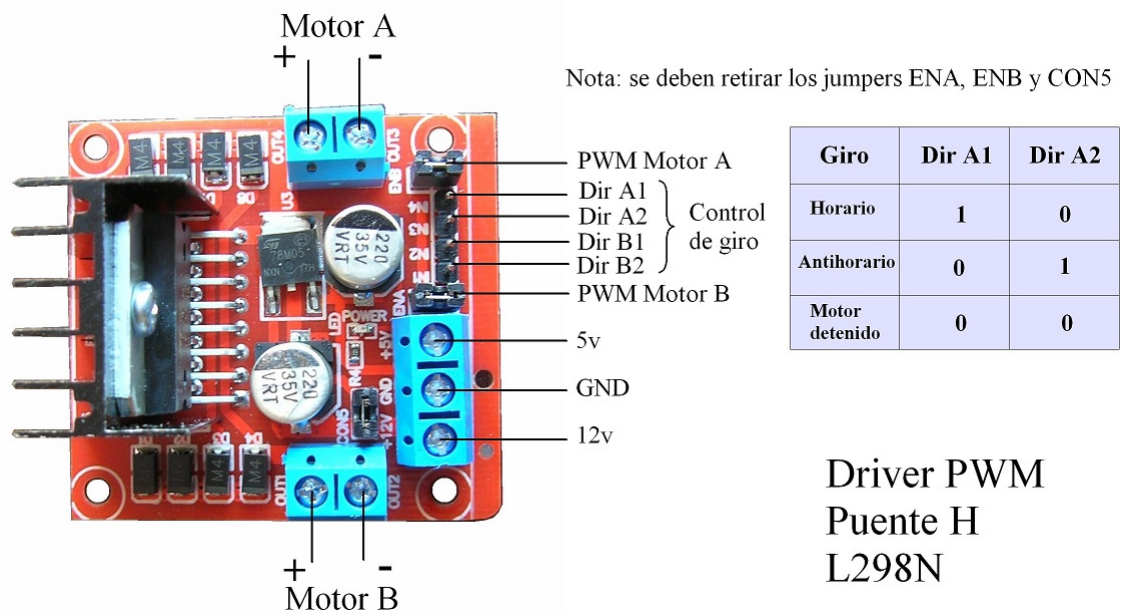


Figura 4.21: PCB del modulo para el control de motores basado en el puente H L288.

En la Figura 4.21 observamos que con dicho modulo, tenemos la posibilidad de controlar hasta 2 motores, con 3 entradas digitales para cada motor; la entrada de habilitación o señal de PWM y otras dos A1, A2 para el sentido de giro, observamos que si tenemos la combinación 00, entonces el motor se detiene, 01 el motor gira en sentido antihorario y 10 en sentido horario. Ambos motores tienen sus propias líneas de control, con esto podemos realizar giros y avanzar en ambos sentidos.

4.4.5. Interfaz de comunicación inalámbrica y estimador de la posición

La interfaz de comunicación inalámbrica utilizará el modulo ESP8266, programados en modo transmisor y receptor de señal Wi-Fi. Este módulo puede funcionar como un punto de acceso o como una estación (Dispositivo que se conecta a una red Wi-Fi). Entonces esto nos permitirá crear una red o faros de wifi, por lo tanto el robot podrá conectarse a estos puntos de acceso en cualquier lado, y con al menos tres, podrá estimar su posición actual. Algunas de las características se muestran en la Tabla 4.9

	Especificación Técnica	Valor
Wi Fi	Número de Modelo	ESP8266
	Protocolo de comunicación	802.11 b/g/n
	Rango de frecuencias	2.4 - 2.5 [GHz]
	Potencia de transmisión Tx	802.11 b: +20 [dBm] 802.11 g: +17 [dBm] 802.11 n: +14 [dBm]
	Sensibilidad de recepción	802.11 b: -91 [dBm] 802.11 g: -75 [dBm] 802.11 n: -72 [dBm]
	Certificación	Wi Fi alliance
Hardware	CPU	Tensilica L106 32-bit
	Interfaz Periférica	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR GPIO/ADC/PWM/LED
	Voltaje de operación	2.5 - 3.6 [V]
	Corriente de operación	80 [mA]
	Rango de temperatura en operación	40 - 125 [°C]
Software	Modos de Wi-Fi	Station/ SoftAP/ SoftAP + Station
	Seguridad	WPA/WPA2
	Protocolo de Redes	IPv4, TCP/ UDP/ HTTP
	Configuración de usuario	Instrucciones AT

Tabla 4.9: Especificaciones del modulo Wi-Fi ESP8266.

Obtendrá la posición actual del robot móvil, utilizando la recepción al menos 3 puntos de acceso, creados con el módulo ESP8266 los cuales pueden comunicarse bajo el estándar Wi-Fi 802.11 b, una vez recibida la potencia de las 3 señales, el microcontrolador principal deberá aplicar un algoritmo de trilateración de dos coordenadas “(x,y)”, esta posición deberá al menos tener un grado de precisión de 1 [m] .

Se utilizará un modelo matemático para estimar la potencia de la señal recibida considerando las pérdidas por longitud y objetos en el medio. Además se utilizarán métodos estadísticos para mejorar la exactitud del valor medido. El valor de posición deberá ser enviado al controlador principal para su utilización.

El sistema de posicionamiento local brindará la información de la posición del robot al controlador principal y proporcionará la comunicación con otros robots móviles como se observa en la figura 4.22

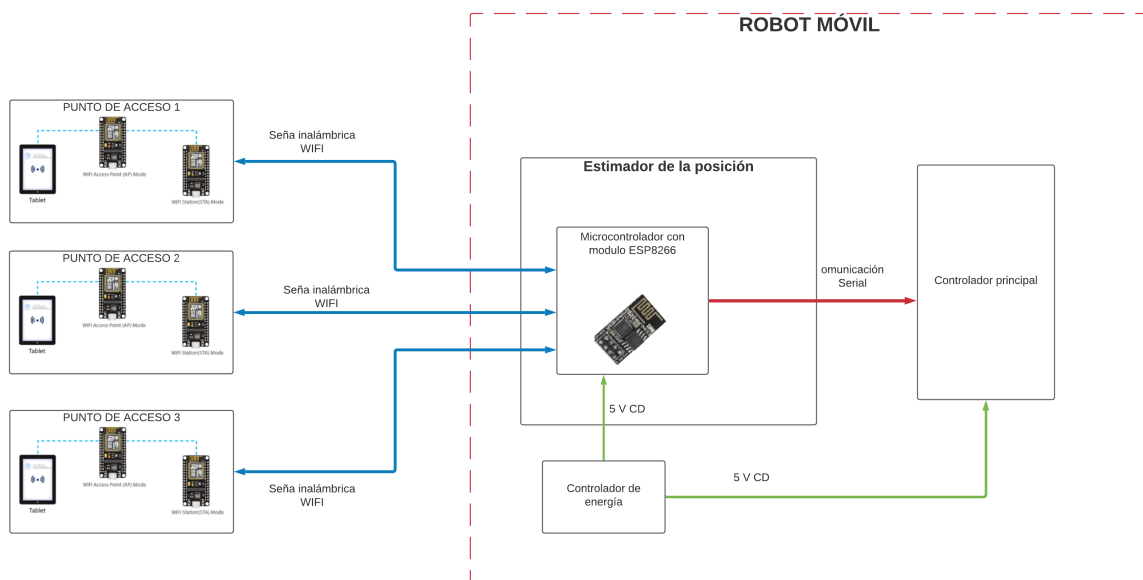


Figura 4.22: Diagrama de bloques del sistema de posicionamiento local del robot móvil.

Entonces como primer lugar, se estudió la programación del microcontrolador ESP8266 con el fin de conectarse a las redes de Wi-Fi o puntos de acceso. Y como se pudo observar en la Tabla 4.9 con base en la características del ESP8266 se realizarán en primer lugar, pruebas para lograr los dos primeros objetivos y esenciales del trabajo, configurar al ESP8266 como un punto de acceso, conectarse a varias redes Wi-Fi (puntos de acceso) y obtener la información de dicha red (nombre y RSSI), con la finalidad de utilizar esta información para aplicar el algoritmo de estimación de posición.

Posteriormente de obtener la información de la señal, específicamente su RSSI, se aplicará el algoritmo para conocer la distancia a la que se encuentra del punto de acceso o red de Wi-Fi. Aplicando el siguiente pseudocódigo.

FUNCION_ESTIMAR_POSICION(n , A , d_0 , PA_1 , PA_2 , PA_3)

INICIO DE LA INTERRUPCION

```
ASIGNAR RSSI_1 = PA1-> RSSI
ASIGNAR RSSI_2 = PA2-> RSSI
ASIGNAR RSSI_3 = PA3-> RSSI
```

```
CALCULAR d1 == d0*(10^((A-RSSI_1)/(10n)));
CALCULAR d2 == d0*(10^((A-RSSI_2)/(10n)));
CALCULAR d3 == d0*(10^((A-RSSI_3)/(10n)));
```

```
ASIGNAR x1 = PA1 -> coor_x ;
ASIGNAR y1 = PA1 -> coor_y ;
ASIGNAR x2 = PA2 -> coor_x ;
ASIGNAR y2 = PA2 -> coor_y ;
ASIGNAR x3 = PA3 -> coor_x ;
ASIGNAR y3 = PA3 -> coor_y ;
```

```
CALCULAR x11= x1 ^ 2;
CALCULAR x22= x2 ^ 2;
CALCULAR x33= x3 ^ 2;
CALCULAR y11= y1 ^ 2;
CALCULAR y22= y2 ^ 2;
CALCULAR y33= y3 ^ 2;
CALCULAR d11= d1 ^ 2;
CALCULAR d22= d2 ^ 2;
CALCULAR d33= d3 ^ 2;
```

```
CALCULAR Posicion-> coor_x =
((y2-y1)(d22-d33-x22+x33-y22+y33)
-(y3-y1)(d11-d22-x11+x22-y11+y22)) / (2(x2-x1)(y3-y2)
-2(x2-x1)(y3-y2))
```

```
CALCULAR Posicion-> coor_y = ((x2-x1)(d22-d33-x22+
x33-y22+y33)-
(x3-x2)(d11-d22-x11+x22-y11+y22)) / (2(x2-x1)(y3-y2)
-2(x3-x2)(y2-y1))
```

FIN

4.4.6. Algoritmo del controlador de tráfico

El diseño del algoritmo de control de tráfico, será programado en el controlador principal considerando la Tabla 4.3 donde se mencionan sus especificaciones para poder así definir las

funciones que se deben cumplir. Estas permitirán un avance continuo sin accidentes con otros robots.

1. Resolverá el tráfico con otros robots móviles en las intersecciones, definiendo una prioridad entre todos los robots en la intersección.
2. Proporcionará a los robots cercanos la información de posibles intersecciones con él.
3. Evitará las colisiones con otros robots u objetos en la trayectoria del robot.

Entonces para lograr estas funcionalidades, el controlador de tráfico hará uso de la información de posición de los robots y la prioridad definida del robot. Dicha información estará guardada en el controlador principal, por lo tanto, todos los robots que se encuentren en los cruces, deberán de identificarse, para compartirse dicha información y que cada controlador de tráfico sea capaz de permitir o no el avance.

Deberá utilizar esta información para encontrar posibles coincidencias de posición o de rutas, definir el cruce a través de las prioridad de cada uno además de hacer uso de un sensor de ultrasonido, para la detección de obstáculos hasta una distancia de 10 m. Evitará estas posibles colisiones en cruces comunicándose con el controlador de movimiento permitiendo parar al robot y mandando la instrucción al otro robot para avanzar.

En la figura 4.23 se observan los sub-sistemas de programación que conformarían este controlador de tráfico.

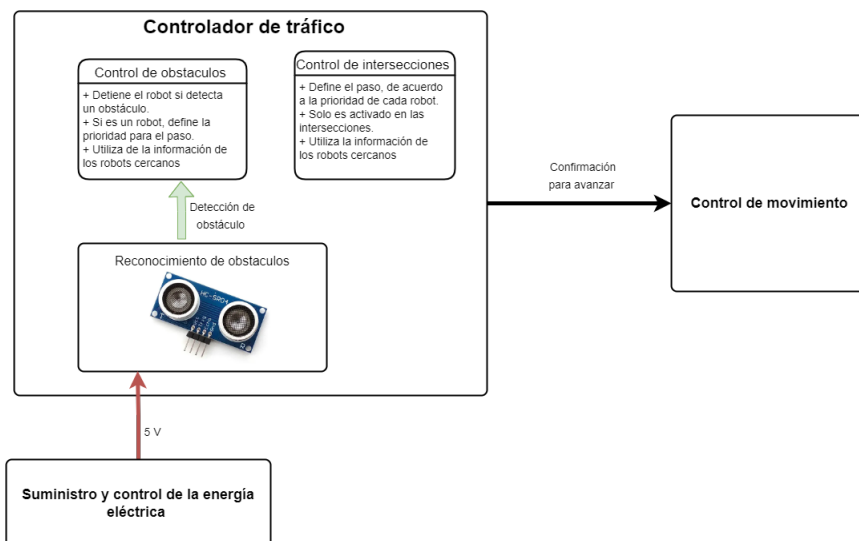


Figura 4.23: Controlador de tráfico.

En primer lugar se diseñara el control de la detección de obstáculos, esta tarea, como se ha mencionado se realizará por el controlador principal. Se utilizará un sensor de ultrasonido modelo HC-RS04, el cual esta compuesto por un emisor y un receptor de ultrasonidos que nos permitirán realizar la detección de algún obstáculo u objeto, enviando un pulso de ultrasonidos y midiendo el tiempo que transcurre hasta que vuelve dicho pulso, podemos saber si hay un objeto enfrente o no. En la Tabla 4.10 se muestran sus características técnicas.

Especificación Técnica	Valor
Número de Modelo	HC-SR04
Voltaje de entrada	5 [V]
Corriente de consumo	15 [mA]
Rango de detección	2 - 500 [cm]
Angulo de detección	20 °
Pines	<ul style="list-style-type: none"> - Vcc: Voltaje de entrada - Trigger: Activación del disparo de pulsos ultrasonicos. - Echo: Detección de pulso reflejado

Tabla 4.10: Especificaciones Técnicas del sensor ultrasonico HC-RS04.

De acuerdo con su hoja de especificaciones del fabricante, en la Figura 4.24 se muestra su diagrama de tiempos, donde podemos observar que el dispositivo dispara 8 pulsos con una frecuencia de 40 KHz, para iniciar este disparo, es necesario colocar un pulso con una duración mínima de 10 us en el pin de Trigger del módulo, una vez que termina este pulso, se debe estimar el tiempo que tarda en captarse una señal de rebote, el pin Echo es el encargado de decirnos, cambiando a un estado en alto si se detecta algún rebote de la señal.

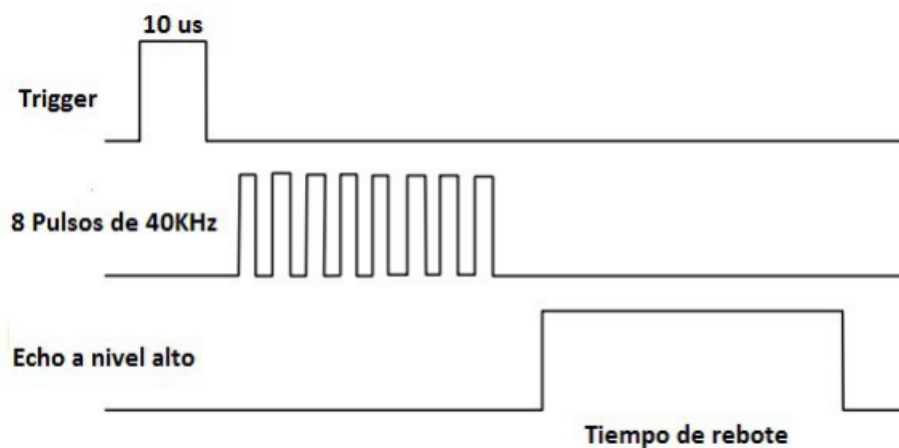


Figura 4.24: Diagrama de tiempos del sensor ultrasonico HC-RS04.

Para saber si hay un objeto y a que distancia, debemos estimar el tiempo que tarda en detectarse un pulso ultrasonico de rebote, esta parte se hará con el receptor ultrasonico integrado. Utilizando el microcontrolador principal podemos encontrar dicho tiempo, inicializando un contador cuando se inicie el disparo y detenerlo cuando se detecte un pulso de rebote, pero para conocer al distancia, debemos aplicar la siguiente ecuación, donde se considera la velocidad del sonido con un valor de $344 \frac{m}{s}$. En la Figura 4.25 se muestra el funcionamiento de dicho sensor.

$$d = v_{sonido} \left(\frac{tiempo_{deteccion}}{2} \right) [m]$$

$$d = 172 * tiempo_{deteccion} [m]$$

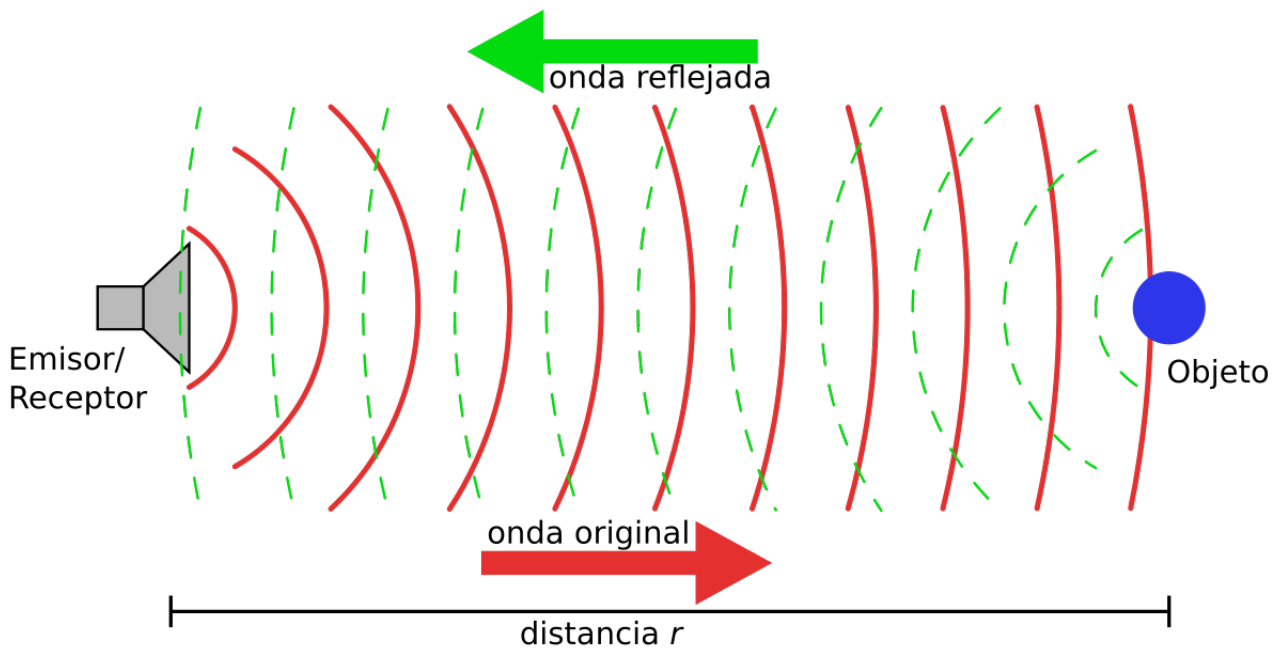


Figura 4.25: Principio de funcionamiento del sensor ultrasonico HC-RS04.

Dicha distancia r es obtenida en metros, entonces para programar el sensor se realizó el siguiente pseudocódigo, la cual contempla una función que realiza una medición del sensor.

```

FUNCION_DETECCION_OBST( detec_objeto , distancia )

ASIGNAR sal_pulso = "1" ;

MIENTRAS QUE temporizador < 15 us
    ACTIVAR temporizador;

DESACTIVAR temporizador;
REINICIAR temporizador;
ASIGNAR sal_pulso ="0";

MIENTRAS QUE pulso_reflejado == "1" O temporizador >
    30 ms
    ACTIVAR temporizador;

DESACTIVAR temporizador;
SI temporizador > 30 ms ENTONCES
    detec_objeto = FALSE;
    REINICIAR temporizador;
    FIN
SINO
    ASIGNAR tiempo = temporizador;
    REINICIAR temporizador ;
    ASIGNAR detec_objeto = TRUE;
    ASIGNAR distancia = 172*tiempo ;

FIN

```

Para el diseño del control de intersecciones, se contemplara, que cada auto tiene la siguiente información; posición, nivel de prioridad y número identificador. Entonces para realizar el control de tráfico, se considera los siguientes puntos

- Las trayectorias de los robots móviles dentro del almacén, tienen sentidos definidos que no pueden alterarse.
- El número de prioridad son definidos, estáticos e irrepetibles, iniciando por el número 1 que se considera el de menor prioridad.
- Todos los robots, tienen la información de cada robot que se encuentra en la intersección.

Considerando el caso de una intersección de 4 vías, y 4 robots móviles esperando el cruce, tal como se observa en la Figura 4.26, se diseñó un diagrama de flujo, donde con base en la información de cada robot podemos permitir el paso a cada uno evitando las colisiones entre ellos.

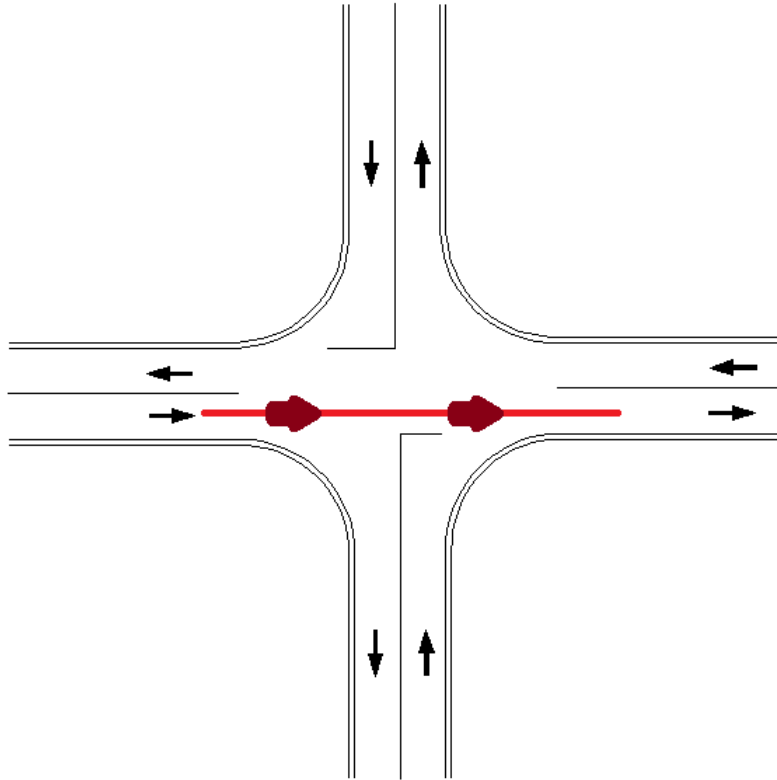


Figura 4.26: Intersección de 4 vías.

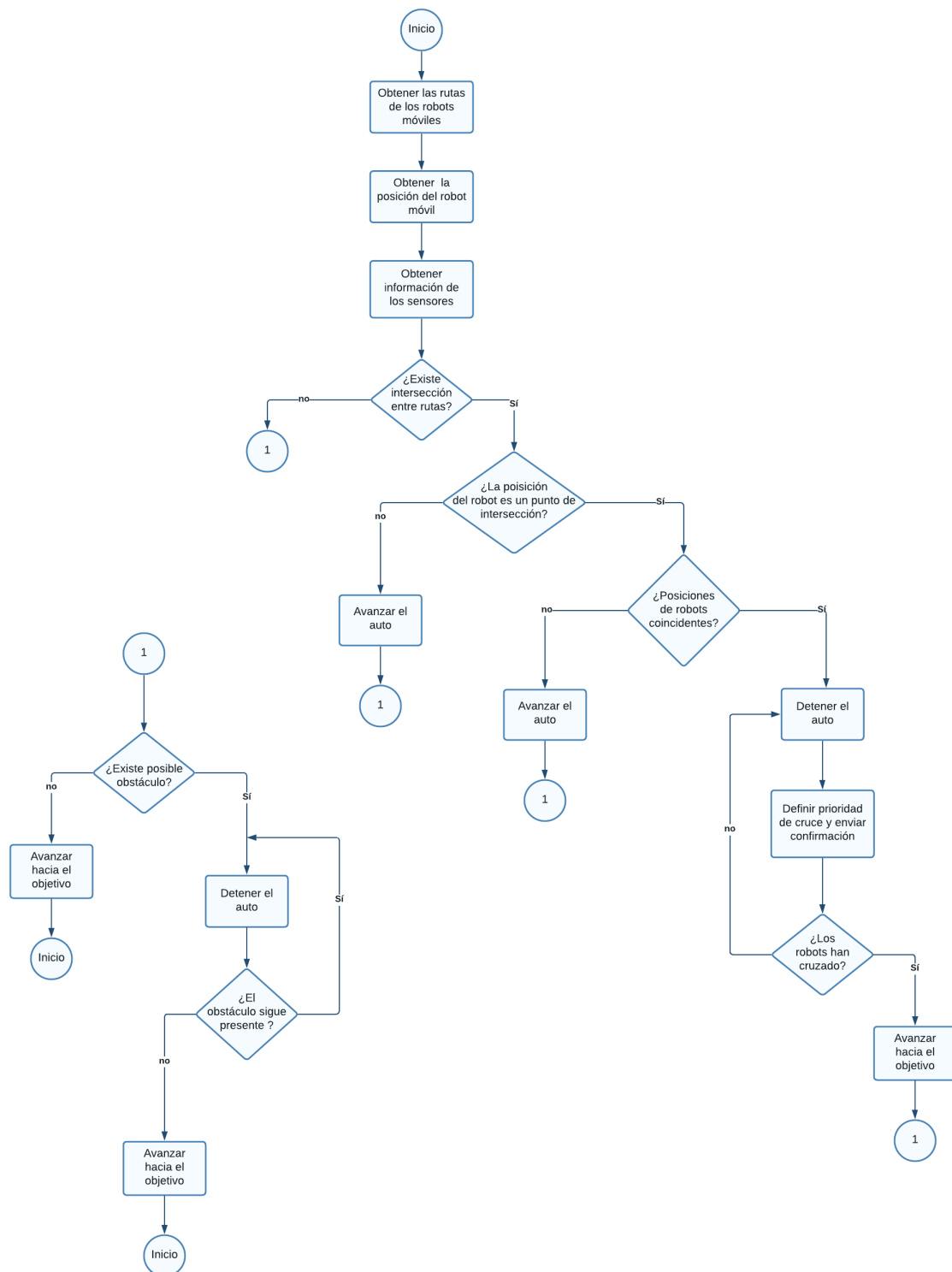


Figura 4.27: Diagrama de flujo del controlador de tráfico.

Basado en el diagrama de flujo de la Figura 4.27, se realizará la programación de las funciones para cada bloque. El siguiente pseudocódigo fue de utilidad para la elaboración de los códigos.

```

FUN_CTRL_COLISION ( Bool Objeto)

SI objeto = TRUE ENTONCES
    AVANZAR = FALSE;
SINO
    AVANZAR =TRUE;

FIN

FUN_CTRL_INTERSECCION ( Bool AVANZAR, ROBOTS )

MIENTRAS OBSTACULO = FALSE ;

    OBTENER ROBOTS->Posiciones ;

    Robot1->Interseccion_1 = OBT_INTER_ROBOT(posicion_1)
    ;
    Robot2->Interseccion_2 = OBT_INTER_ROBOT(posicion_2)
    ;
    Robot2->Interseccion_3 = OBT_INTER_ROBOT(posicion_3)
    ;
    .
    .
    .
    Robotn->Interseccion_n = OBT_INTER_ROBOT(posicion_n)
    ;

    ROBOTS_INTER = BUSCAR_TRAF_INTER ( Intersecciones);

    MIENTRAS QUE ROBOTS_INTER != vacio ;
        OBTENER Prioridades ;
        AVANZAR_Prioridad_Mayor(prioridades);
        MIENTRAS QUE confirmacion_cruce = FALSE;
            ESPERAR ;
        ELIMINAR_prioridad_mayor(prioridades);

```

4.4.7. Suministro y Control de la Energía Eléctrica

En esta parte se utilizará una fuente de energía eléctrica, de tecnología Li-Po, para mantener el voltaje constante que es requerido por los motores de 12 V con un consumo máximo de 2 A y los controladores alimentados con un voltaje de 3.3 V - 5 V, con capacidad máxima de 1 A. Se hará uso de reguladores conmutados retroalimentados para poder mantener dichos voltaje de forma constante y tener una eficiencia mejor.

Se considero que en la salida del convertidor y reguladores de voltaje, el rizo de voltaje y corriente no deberá exceder el 5%, además de contar con un sistema electrónico para medir el consumo y la energía que es almacenada en las baterías. Es decir, el microcontrolador principal tendrá la capacidad de conocer el estado de las baterías, el consumo y la energía almacenada.

Para el suministro de energía eléctrica se utilizarán 3 baterías recargables Li-Po, conectadas en serie con obteniendo un voltaje de 11.1 V con una capacidad de 5000 mA/h, con esto se alimentará, el regulador de voltaje para los motores y el convertidor de 12 V a 5 V para los microcontroladores y sensores. Además se utilizará un módulo de control para la carga y descarga de las baterías, con el fin de evitar sobre cargas y sobre descargas de las baterías.

En la figura se puede observar dicho suministro y control de energía eléctrica.

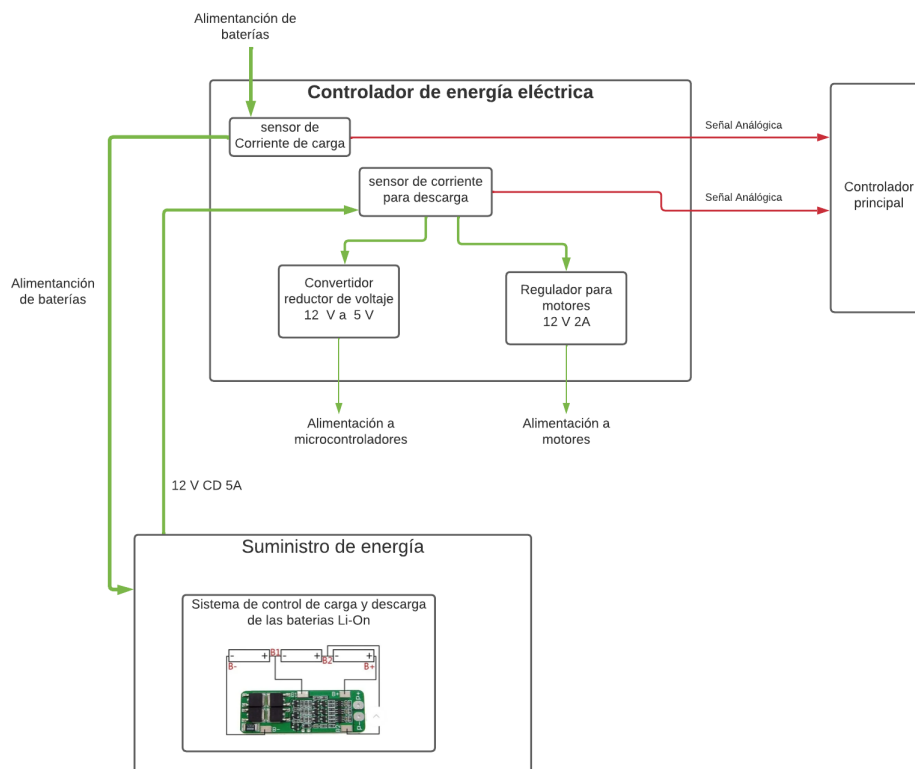


Figura 4.28: Diagrama de bloques del suministro y control de energía eléctrica.

En el suministro de energía, como se había mencionado anteriormente se utilizarán 3 baterías recargables de tecnología Li-On de 3.7 V con una carga total de 5000 mAh, conectadas en serie para obtener un voltaje de 11.1 V y 5000 mAh, sin embargo, es necesario agregar un sistema de control de carga y descarga para las baterías, generalmente llamado BMS.

El sistema de administración de batería (BMS) es un circuito capaz de monitorear un paquete de baterías para que funcionen en los parámetros seguros de operación (voltaje, corriente y temperatura) durante su carga y descarga. El BMS desconecta las baterías si se encuentra fuera de los parámetros seguros de operación además de equilibrar o igualar el voltaje.

Para nuestro diseño se implementará con el modelo BMS-3S-40A, con las siguientes funciones:

- Protección de las celdas que conforman a la batería: El BMS nos evitará inconvenientes en la carga y descarga, que puedan llegar a afectar la vida útil de cada batería y así evitar daños.
- Control de carga y descarga de las baterías: Es una característica más importantes debido a que entre las causas más comunes de daño de baterías se encuentra un inapropiado proceso de carga y descarga.
- Balance de voltaje en las celdas: En un paquete de baterías, la diferencia de voltaje entre celdas se debe a la impedancia interna de cada una de estas o a condiciones de operación diferente; el sistema BMS compensará esta diferencia en cada celda extendiendo así su vida útil.

En la figura 4.29 se observa la conexión del BMS y las baterías. Así mismo, en este proyecto se realizará una prueba conectando solo tres baterías en serie, sin embargo, se puede agregar otro paquete de tres baterías conectadas en paralelo para tener una mayor capacidad e inclusive hasta tres etapas, logrando así una capacidad de máximo 15,000 mAh.

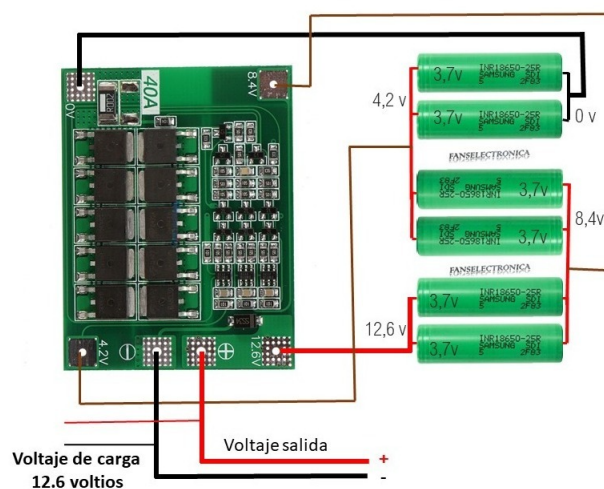


Figura 4.29: sistema BMS 3S 40 A con 3 paquetes de baterías en paralelo.

Para el diseño del convertidor conmutado de voltaje "Buck" se utilizará el circuito integrado LM2596, porque nos ofrece una salida de voltaje ajustable, una frecuencia de conmutación estable y alta eficiencia, estas características se presentan a continuación en la Tabla 4.11

Especificación Técnica	Valor
Número de Modelo	LM2596
Frecuencia de conmutación	150 [KHz]
Salida de voltaje ajustable	1.4 - 37 [V] TOL. 4 %
Corriente máxima	3 [A]
Entrada de voltaje	4.5 - 40 [V]

Tabla 4.11: Especificaciones Técnicas del convertidor de voltaje LM2596.

Este circuito integrado LM2596 en su versión de voltaje de salida ajustable, nos permitirá obtener el voltaje de 5 V con un rizo de voltaje de 4 %. En la Figura 4.30 muestra su esquema eléctrico y la placa del integrado.

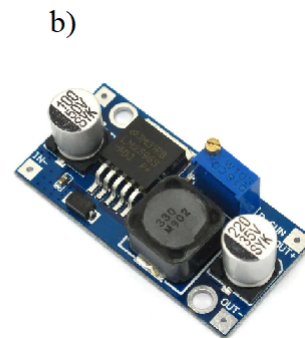
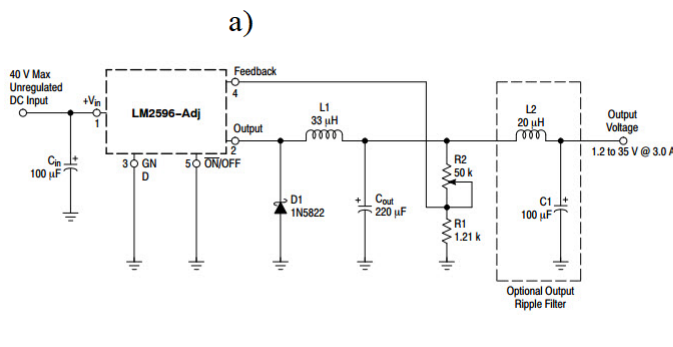


Figura 4.30: a) Diagrama eléctrico del convertidor Buck con el LM2596 b) PCB del convertidor

Finalmente con el regulador de voltaje, ocuparemos también un sistema de control que nos permita las siguientes funciones:

1. Regular el voltaje de salida siempre en 12 V
2. Conexión y desconexión de los motores, controlada por una señal PWM
3. Control de giro en ambos sentidos

Para cumplir con estas funciones, se utilizará el circuito integrado basado en el puente H L298, mencionado anteriormente, que además de proporcionarnos una entrada para la señal PWM, que permite la desconexión y conexión de los motores y tener el control de giro del motor a través de entradas digitales, nos permite regular el nivel de voltaje en los motores, permitiendo seguir funcionando incluso con un nivel de voltaje mínimo de 3.3 [V] en la Figura 4.31 se muestra el circuito integrado.

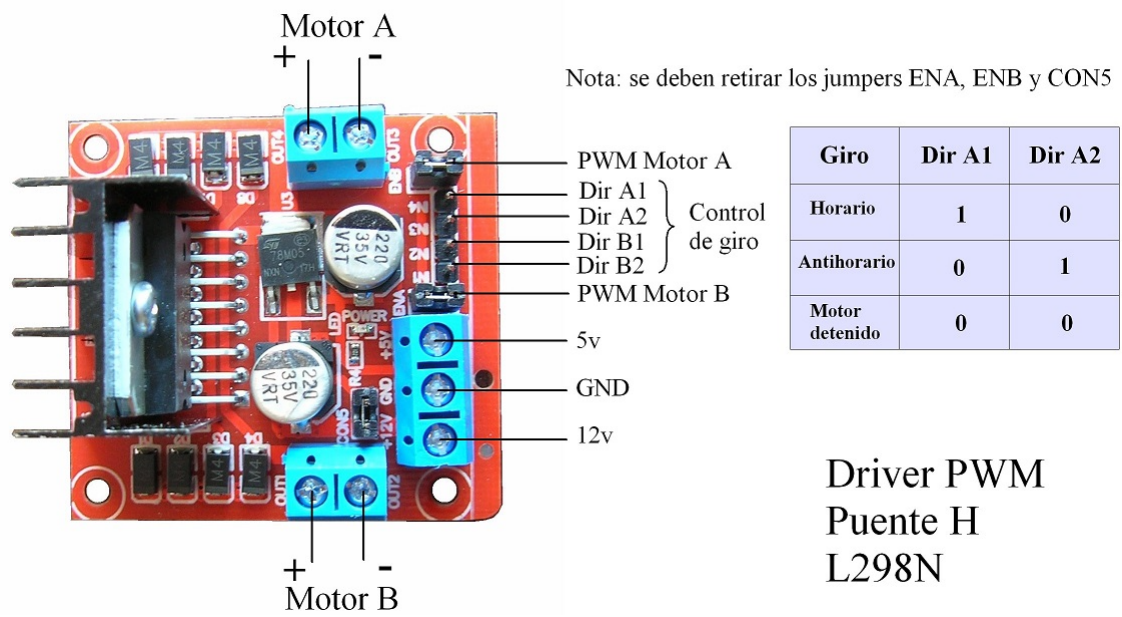


Figura 4.31: PCB del modulo para el control de motores basado en el puente H L288.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos. Se realizó la caracterización de los circuitos diseñados para cada bloque de la arquitectura del robot móvil, mostrados en el capítulo anterior, con la finalidad de garantizar el funcionamiento correcto de cada bloque y obtener información real acerca de sus parámetros. Se realiza un análisis de la información y se obtienen las conclusiones finales de este trabajo.

5.1. Análisis de los resultados

5.1.1. Carga del paquete

Se comenzó realizando una caracterización de los sensores que dispone el bloque llamado carga de paquete, el cual cumple funciones relacionadas con la detección de presencia y estimación del peso de un paquete a bordo del robot móvil. Entonces, de acuerdo con los experimentos realizados en un ambiente controlado, en la Tabla 5.1 se observan las características obtenidas en la experimentación en comparación con los valores de diseño. Se puede observar una variación en cuanto al alcance de detección y el ángulo de cobertura, estos cambios fueron considerados para un diseño final.

Especificación Técnica	Valor	Valor obtenido
Número de Modelo	FC-51	FC-51
Ángulo de cobertura	35 °	Máximo: 22 °
Voltaje de funcionamiento	3.0 - 6.0 [V]	3.0 - 6.0 [V]
Rango de detección	2 - 30 [cm]	2.5 - 20 [cm]
Nivel de salida	Nivel Alto: Cuando no se detecta presencia. Nivel Bajo: Cuando se detecta presencia.	Voltaje de alimentación: Cuando no se detecta presencia 0 [V] : Cuando se detecta presencia
Consumo	23 - 43 [mA]	Consumo máximo: 30 [mA]

Tabla 5.1: Resultados de la caracterización del sensor FC-51.

La señal digital de salida del sensor FC-51 fue analizada con ayuda de un osciloscopio digital modelo PicoScope 2000 Series, el cual consta con 2 canales de entrada y un software que nos permite analizar las señales de entrada desde una computadora. En la Figura 5.1, se muestra un intervalo donde el sensor detecta un paquete, dicho experimento se realizó a distintas distancias y ángulos, obteniendo siempre un cambio de un estado de nivel alto a nivel bajo.

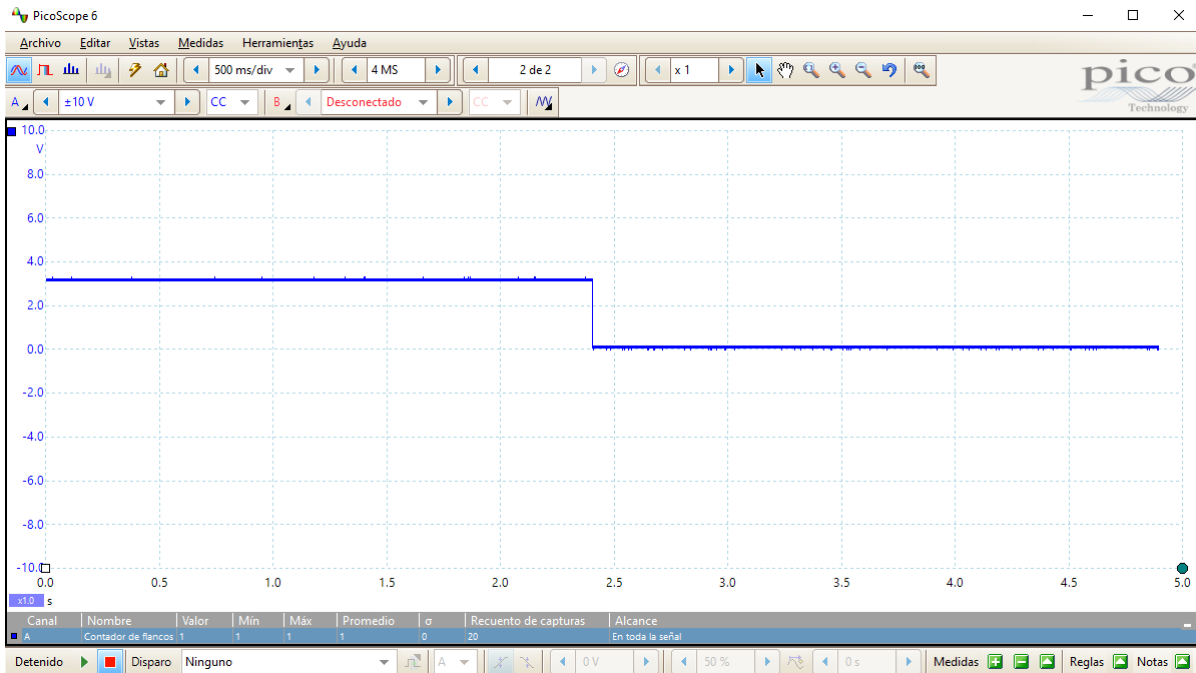


Figura 5.1: Señal digital de salida del sensor FC-51 cuando se detecta un paquete.

Para la caracterización del sensor resistivo de fuerza FSR 406, primero se obtuvo el valor de resistencia inicial, luego se realizaron mediciones de la variación de la resistencia inicial, aplicando una fuerza debida a ciertas masas conocidas, obteniendo así una respuesta de la sensibilidad del sensor en función de la masa del paquete. En la Tabla 5.2 se muestran la variación de dicha resistencia, donde se observa una alta sensibilidad para valores de fuerza pequeños.

Resistencia inicial : 16.4 [K Ω]			
Peso [Kg]	Resistencia [K Ω]	Peso [Kg]	Resistencia [K Ω]
0.2	4.322	3.2	0.545
0.4	2.635	3.4	0.515
0.6	1.829	3.6	0.487
0.8	1.469	3.8	0.479
1.0	1.228	4.0	0.464
1.2	1.125	4.2	0.450
1.4	1.046	4.4	0.438
1.6	0.910	4.6	0.422
1.8	0.783	4.8	0.415
2.0	0.719	5.0	0.405
2.2	0.684	5.2	0.382
2.4	0.667	5.4	0.374
2.6	0.639	5.6	0.361
2.8	0.590	5.8	0.352
3.0	0.560	6.0	0.341

Tabla 5.2: Respuesta de la variación de resistencia del sensor FSR 406

Variación de la resistencia del sensor FSR 406

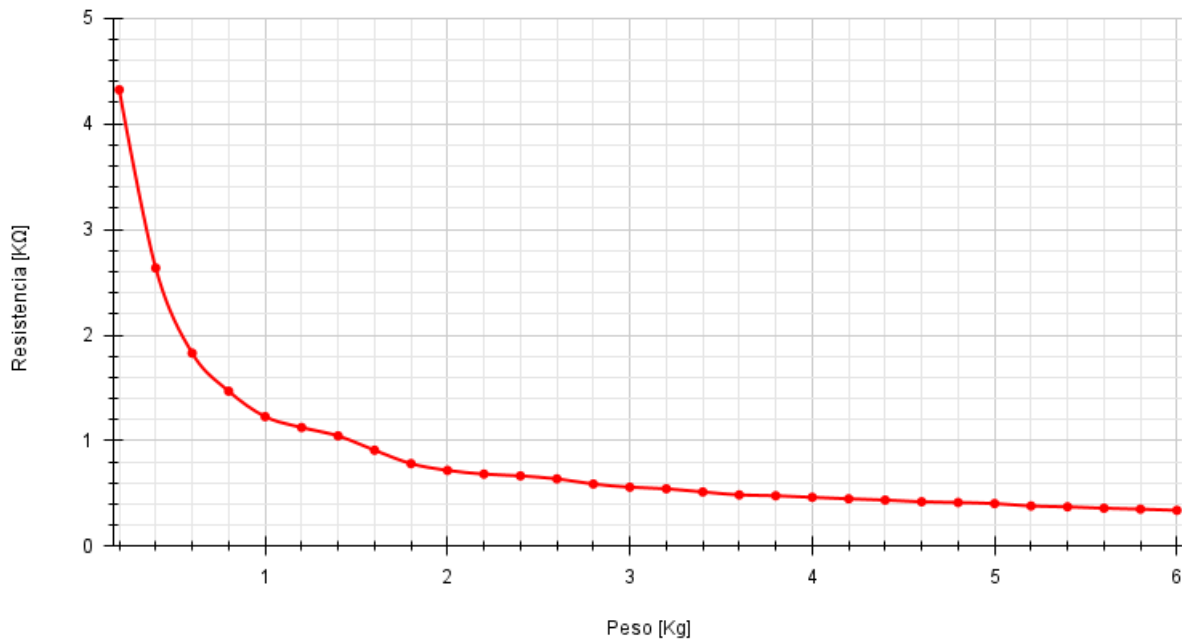


Figura 5.2: Gráfica de la variación de la resistencia del sensor FSR 406.

Posteriormente se analizó la salida de voltaje del circuito mostrado en la Figura 4.11 para cada valor de resistencia, así permitiéndonos comparar nuestro modelo linealizado con los valores reales. En la Figura 5.3 se muestra una gráfica, donde podemos apreciar la respuesta de voltaje en función de la resistencia R_x del sensor.

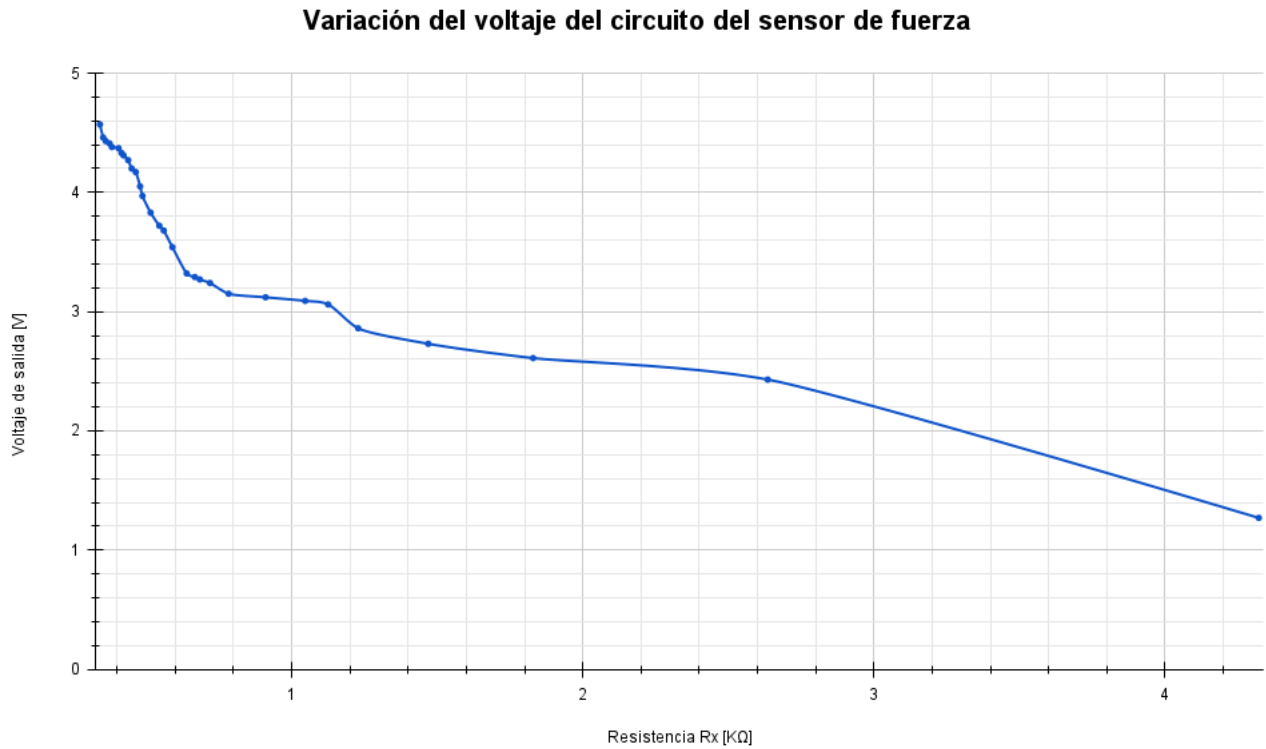


Figura 5.3: Gráfica del voltaje de salida en función de la resistencia del sensor FSR 406.

Con la información obtenida con la experimentaciones podemos relacionar las dos variables de nuestro interés, el peso en kilogramos de un paquete y el valor de voltaje correspondiente, en la siguiente Tabla 5.3 de muestra la relación de estas dos variables y en la Figura 5.4 su gráfica correspondiente.

Resistencia inicial : 16.4 [K Ω]					
Peso [Kg]	Resistencia [K Ω]	Voltaje de salida [V]	Peso [Kg]	Resistencia [K Ω]	Voltaje de salida [V]
0.2	4.322	1.27	3.2	0.545	3.72
0.4	2.635	2.43	3.4	0.515	3.83
0.6	1.829	2.61	3.6	0.487	3.97
0.8	1.469	2.73	3.8	0.479	4.05
1	1.228	2.86	4	0.464	4.17
1.2	1.125	3.06	4.2	0.45	4.2
1.4	1.046	3.09	4.4	0.438	4.27
1.6	0.91	3.12	4.6	0.422	4.31
1.8	0.783	3.15	4.8	0.415	4.33
2	0.719	3.24	5	0.405	4.37
2.2	0.684	3.27	5.2	0.382	4.38
2.4	0.667	3.29	5.4	0.374	4.41
2.6	0.639	3.32	5.6	0.361	4.43
2.8	0.59	3.54	5.8	0.352	4.46
3	0.56	3.68	6	0.341	4.57

Tabla 5.3: Voltajes de salida del circuito para cada valor de peso del paquete.

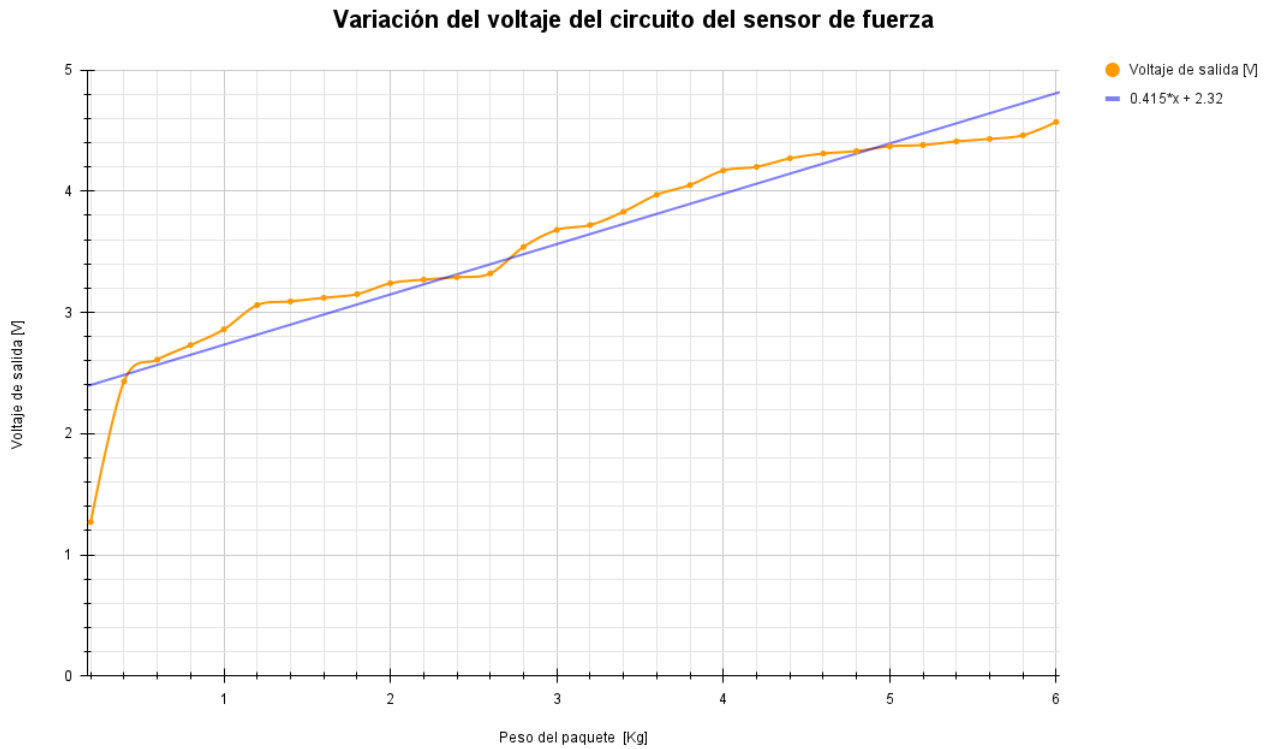


Figura 5.4: Gráfica del voltaje de salida en función del peso del paquete.

Por lo tanto, de acuerdo con la información obtenida, una aproximación lineal puede ser representativa para nuestros datos, por ello se realizó dicha aproximación, con ayuda del software Excel para realizar las operaciones necesarias. En la Figura 5.4 se muestra dicha aproximación en color azul, y se puede observar que presenta una aproximación regular. Por lo tanto la siguiente ecuación determinará el peso de un paquete en función del voltaje de entrada del sensor.

$$X = \frac{V_{out} - 2,32}{0,415} [Kg]$$

5.1.2. Algoritmo de control de movimiento

Para comprobar el funcionamiento del bloque llamado control de movimiento, diseñado en el capítulo anterior, se puso a prueba el algoritmo de control para el motor eléctrico, utilizando las señal de onda cuadrada generada por el encoder óptico del motor, ver figura 5.5, la frecuencia de dicha señal esta en función de la velocidad del motor, las lecturas fueron interpretadas por el controlador principal y aplicando el algoritmo de control, generó una señal PWM con un ciclo de trabajo variable, dependiendo si el motor requería más potencia o menos.

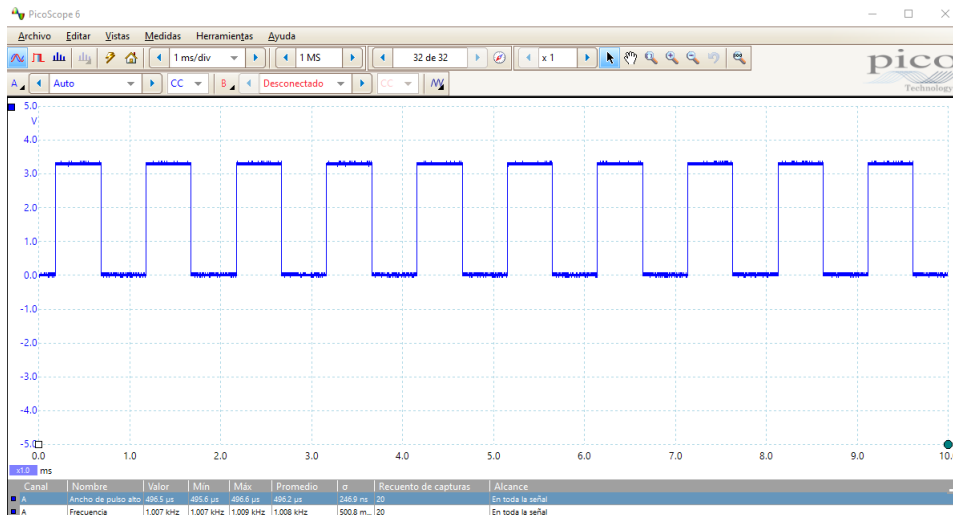


Figura 5.5: señal de onda cuadrada generada por el encoder óptico.

En la Figura 5.6 se muestra la señal PWM de salida generada cuando el motor tiene la velocidad indicada por el algoritmo de control de velocidad, dicho algoritmo fue programado en el controlador principal, esta señal presenta un ciclo de trabajo del 50%.

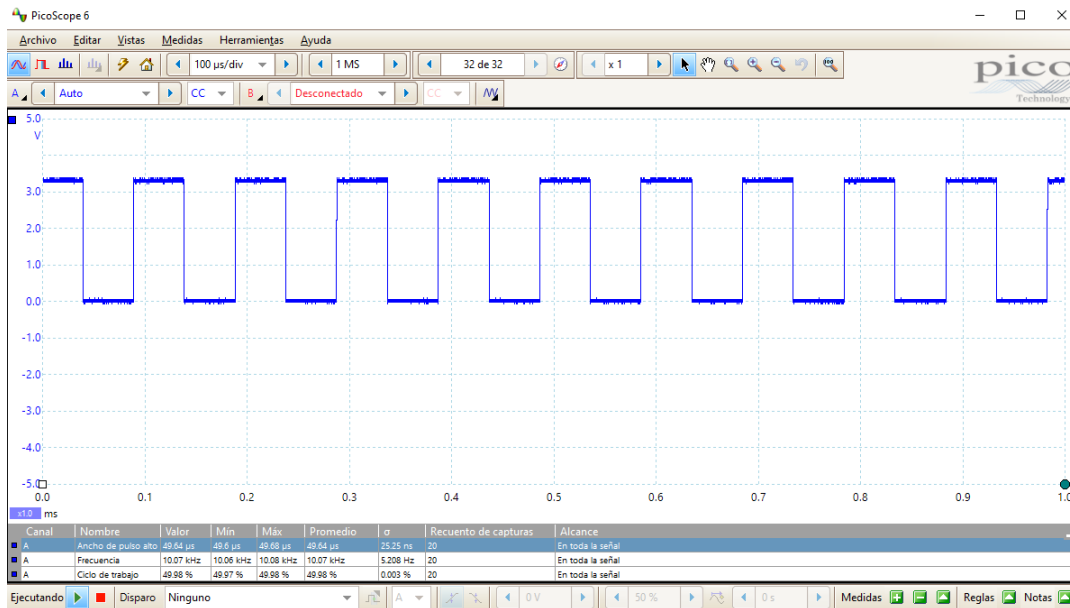


Figura 5.6: señal PWM generada por el algoritmo de control cuando no existe una carga en el motor eléctrico.

Posteriormente al aplicar una carga al motor eléctrico, de tal manera que su velocidad disminuya, se puede observar en la Figura 5.7 como dicha señal de salida PWM, eleva el porcentaje de su ciclo de trabajo para aumentar la potencia que recibe el motor eléctrico y mantener la velocidad angular del motor. Finalmente si por alguna circunstancia el motor empezará a girar más rápido de la velocidad permitida, el algoritmo de control realiza una disminución del porcentaje del ciclo de trabajo, con el fin de suministrar menos potencia, ver figura 5.8, y así lograr de la misma forma mantener la misma velocidad angular.

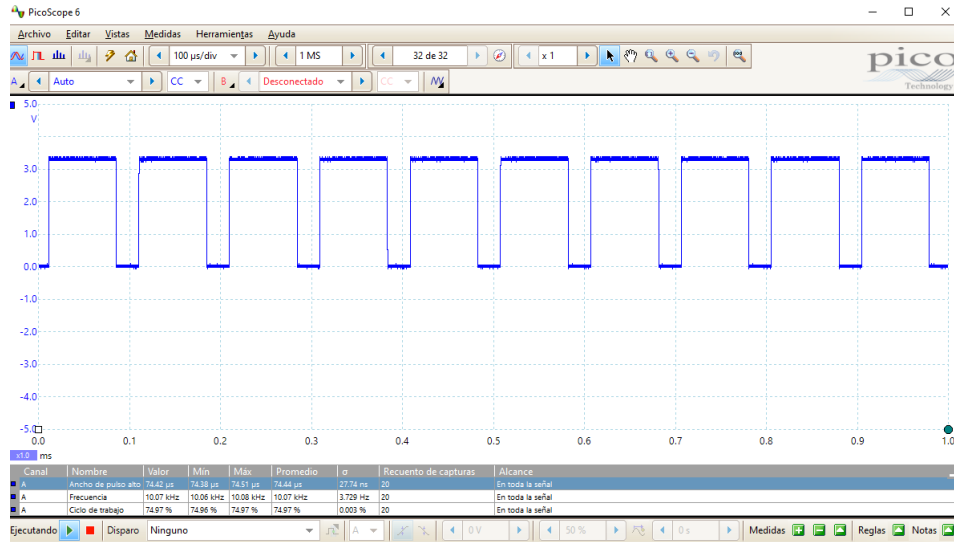


Figura 5.7: Señal PWM generada por el algoritmo de control cuando existe una carga en el motor eléctrico.

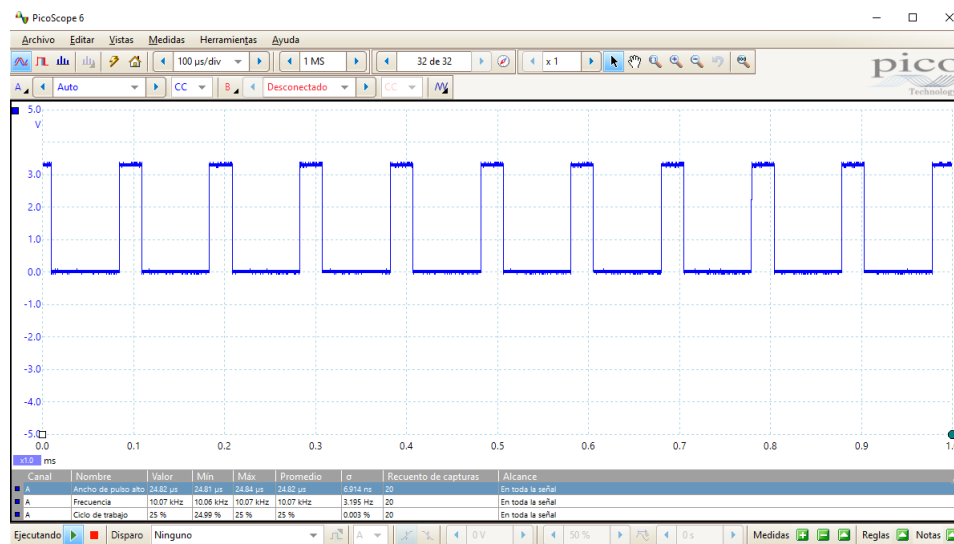


Figura 5.8: Señal PWM generada por el algoritmo de control cuando la velocidad del motor aumenta.

5.1.3. Posicionamiento del robot móvil

Respecto a la estimación de la posición del robot móvil, primero se realizaron mediciones del RSSI de distintas señales Wi-Fi con diferentes distancias mostrados en la Tabla 5.4, utilizando el módulo ESP8266 previamente configurado para obtener la información, este experimento se llevo a cabo en el Laboratorio de Instrumentación Electrónica de Sistemas Espaciales (LIESE) ubicado en la Facultad de Ingeniería.

Distancia [cm]	RSSI 1 [dBm]	RSSI 2 [dBm]	RSSI 3 [dBm]	RSSI promedio [dBm]
50	-31	-33	-32	-32.00
100	-36	-35	-36	-35.67
150	-37	-37	-38	-37.33
200	-38	-40	-38	-38.67
250	-40	-41	-39	-40.00
300	-41	-43	-40	-41.33
350	-42	-43	-42	-42.33
400	-44	-44	-43	-43.67
450	-47	-45	-45	-45.67
500	-49	-48	-48	-48.33

Tabla 5.4: Valores de RSSI medidos con el módulo ESP8266.

En la siguiente Figura 5.9 se muestra la gráfica de dichos resultados, donde puede observarse la disminución del RSSI de la señal, ahora en la Figura 5.10 se observa una situación especial, pues presenta una pérdida en un rango desde -5 a -15 dBm en el RSSI de la señal debido a que en su propagación se presenta un obstáculo, en este caso una pared.

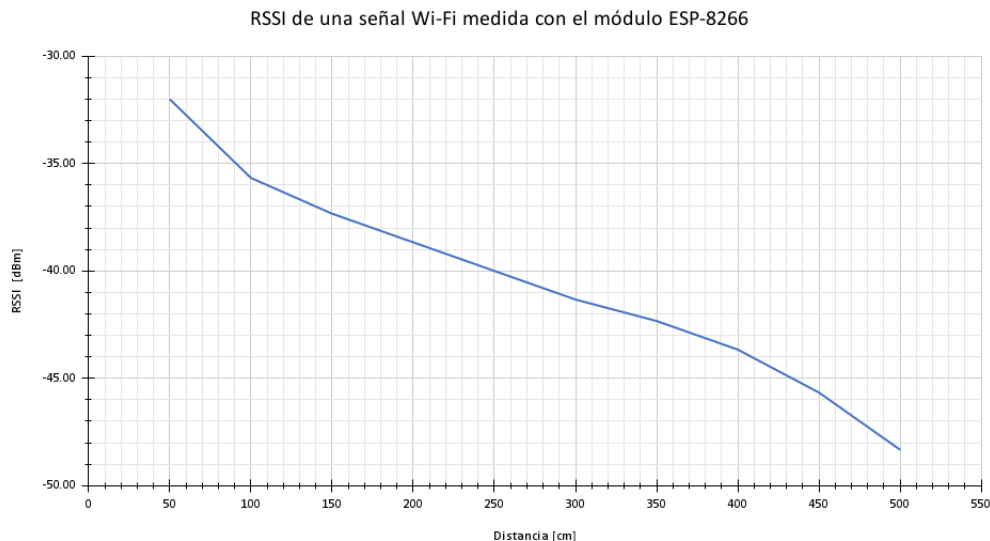


Figura 5.9: RSSI de la señal medida sin obstáculo alguno.

Una vez realizado las mediciones y obtenido un promedio del valor de RSSI para cada distancia conocida, se aplico el algoritmo para estimar dicha distancia a partir de dicho valor de RSSI, en la siguiente Tabla 5.5 se observa las distancias estimadas y su porcentaje de error en

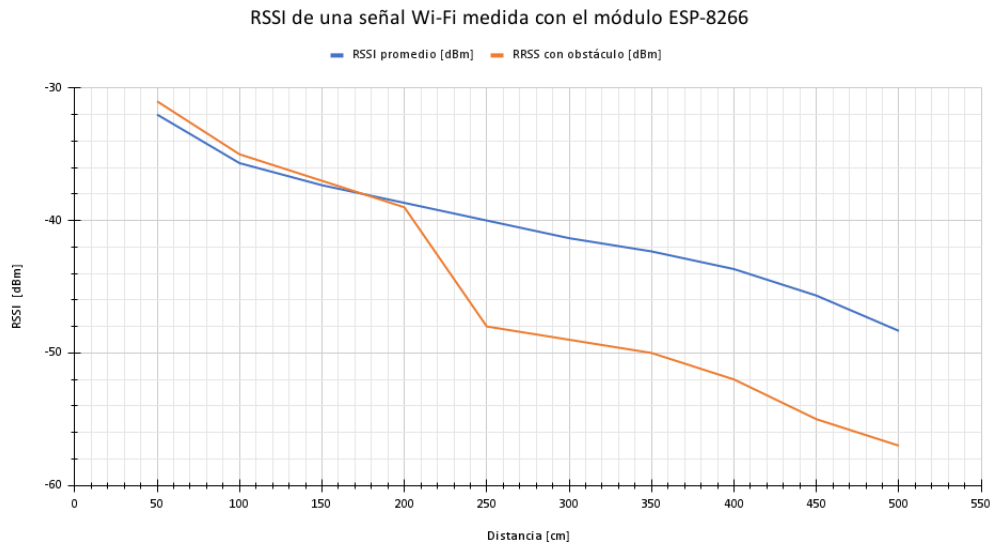


Figura 5.10: RSSI de la señal medida en presencia de una pared en la propagación de la señal. comparación con la distancia teórica.

Distancia [cm]	RSSI promedio [dBm]	Distancia estimada [cm]	Error relativo [%]
50	-32.00	60.86	21.71
100	-35.67	100.00	0.00
150	-37.33	125.33	16.45
200	-38.67	150.13	24.93
250	-40.00	179.85	28.06
300	-41.33	215.44	28.19
350	-42.33	246.69	29.52
400	-43.67	295.52	26.12
450	-45.67	387.47	13.90
500	-48.33	556.03	11.21

Tabla 5.5: Distancia estimada utilizando el valor de RSSI medido con el módulo ESP8266.

En la siguiente Figura 5.11 se observa la gráfica de la distancia teórica y el valor de RSSI medido, en color naranja, en comparación con la distancia estimada utilizando el RSSI medido, línea en azul.

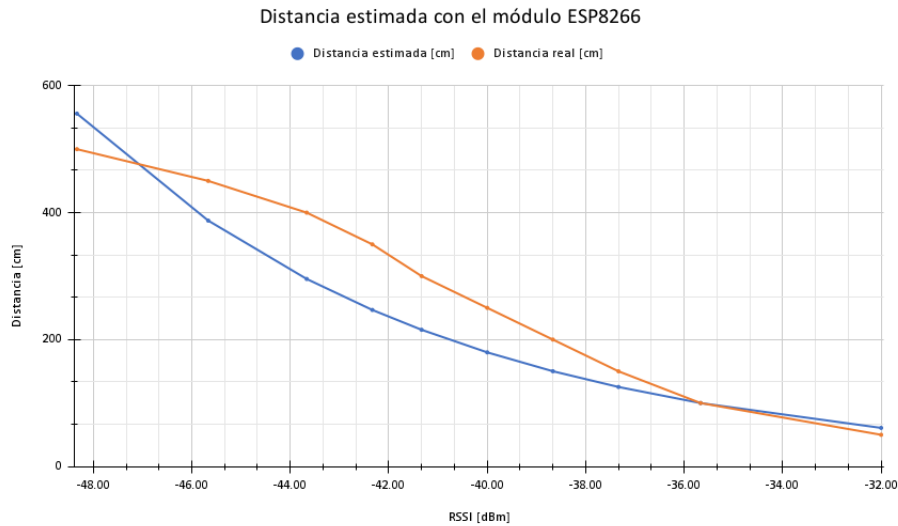


Figura 5.11: Distancias estimadas utilizando el valor de RSSI medido.

Posteriormente de obtener la variación de la distancia estimada entre el robot móvil y un punto de acceso de la señal Wi-Fi, se realizó la estimación de la posición del robot móvil utilizando 3 AP. Estos fueron ubicados en coordenadas estratégicas, tal como se muestra en la Figura 5.12, con el área propuesta para realizar las pruebas correspondientes, considerando las pérdidas en el RSSI y la estimación de las distancias.

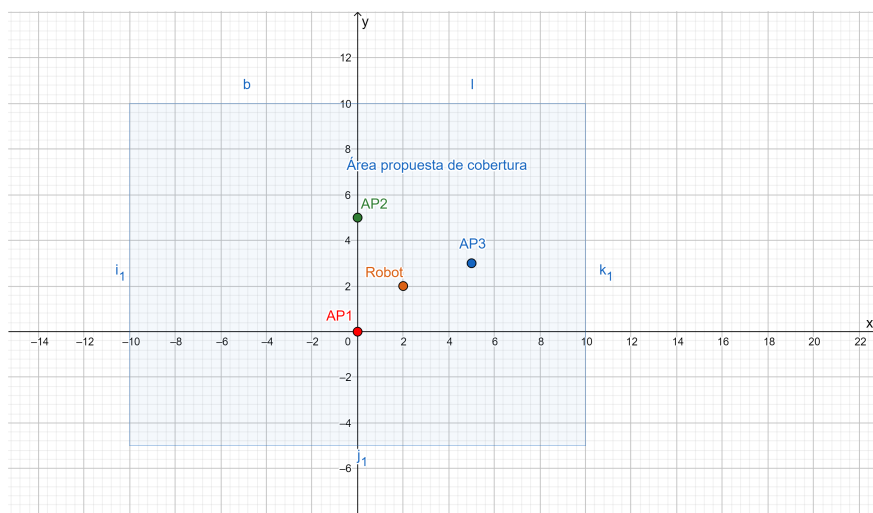


Figura 5.12: Esquema propuesto para los AP's y región de prueba.

Se realizaron 4 casos, en los cuáles se estimó la posición del robot móvil y su error relativo, considerando las coordenadas de los 3 AP's, mostrando en la Tabla 5.6 e ilustrados en la Figura 4.6, las cuáles son de suma importancia porque los cálculos del algoritmo para estimar la posición, ver ecuación 3.17 y 3.18, son con base en dichas coordenadas que se mantienen siempre constantes.

AP1		AP2		AP3	
Coordenada	Valor [m]	Coordenada	Valor [m]	Coordenada	Valor [m]
a1	0	a2	0	a3	5
b1	0	b2	5	b3	3

Tabla 5.6: Coordenadas propuestas para los AP's.

En la siguiente Tabla 5.7, se pueden observar los resultados obtenidos de la posición estimada del robot móvil, obteniendo en el peor de los casos un error promedio del 25.35%, el cual represento una variación de 1 m, sin embargo en el mejor de los casos se obtuvo un error relativo del 6%, el cual representa una aproximación muy buena.

Estimación de diferentes posiciones del robot móvil				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
X teorica [m]	2	3	5	-2
Y teorica [m]	2	7	5	4
d1 estimada [m]	2.1	8.3	7.8	3.9
d2 estimada [m]	2.52	2.6	5.3	1.65
d3 estimada [m]	2.25	3.57	1.8	6.74
X estimada [m]	1.95	3.79	5.70	-1.87
Y estimada [m]	2.31	8.71	5.78	3.75
% Error relativo en X	2.4	26.2	13.9	6.4
% Error relativo en Y	15.3	24.5	15.5	6.3

Tabla 5.7: Resultados obtenidos de la estimación de la posición del robot móvil.

A continuación se muestran en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16, la ilustración de los resultados de los casos de prueba. Se ilustra las distancias estimadas en cada caso por el robot móvil, la posición real (En color naranja) y la posición estimada (En color azul).

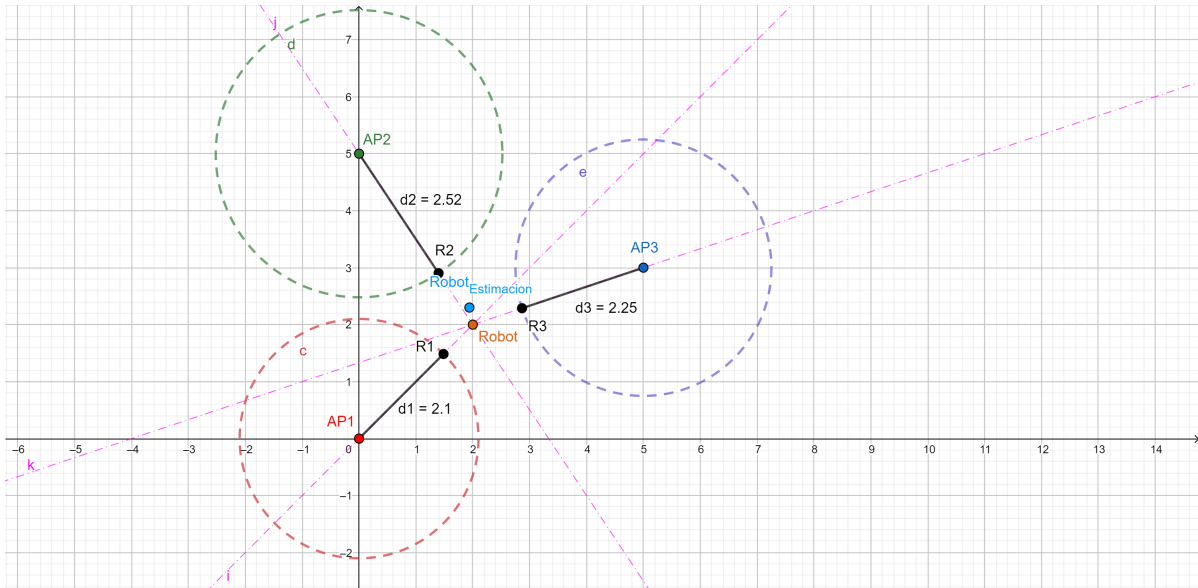


Figura 5.13: Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 1.

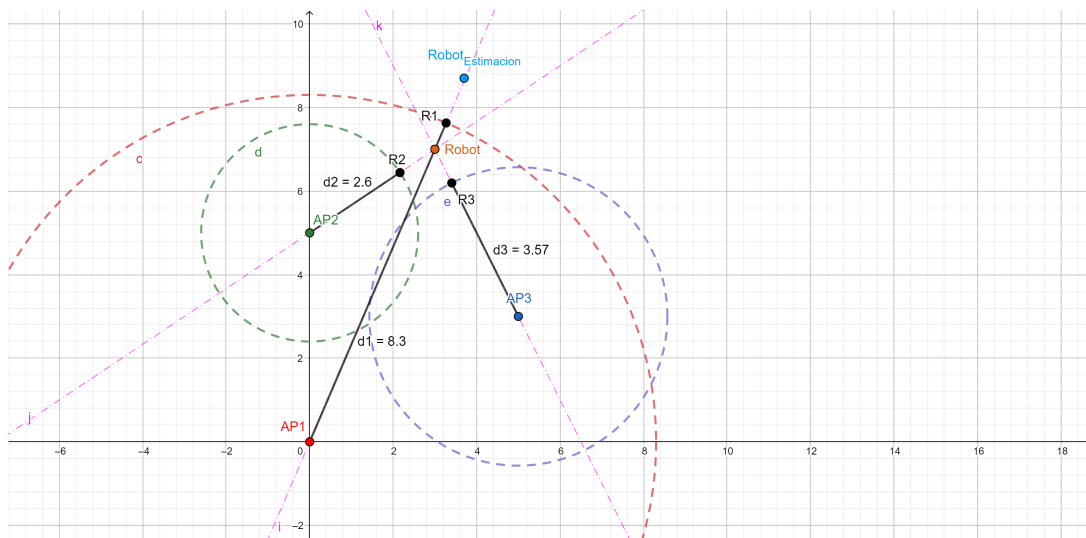


Figura 5.14: Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 2.

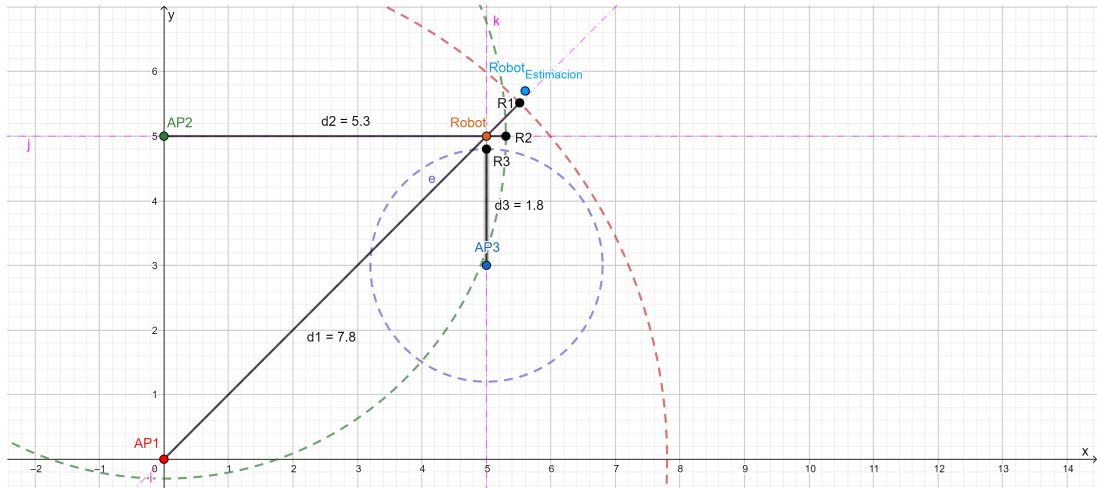


Figura 5.15: Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 3.

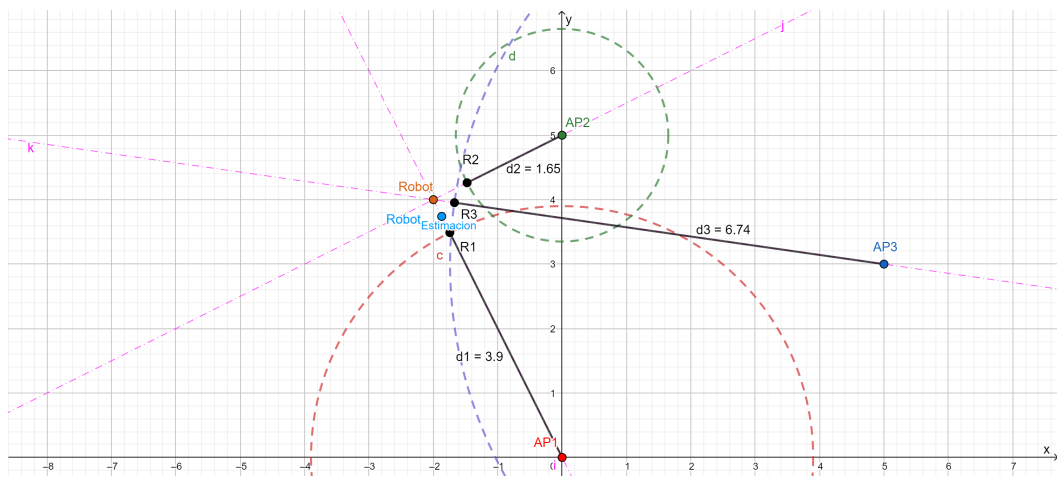


Figura 5.16: Resultados de la estimación de la posición del robot móvil para el caso 4.

5.2. Conclusiones finales

Con base en la pruebas realizadas de la experimentación y caracterización de los sensores, del sistema electrónico para el control de velocidad y verificación de la carga del paquete, se observó que ha funcionado correctamente, cumpliendo con las funciones requeridas, sin embargo, existieron algunas diferencias con el diseño teórico, debido a que el sensor infrarrojo, que cumple con la función de detección de la presencia de una paquete, presentó variabilidad en su lectura cuando el paquete se encontraba en la distancia máxima y mínima de detección.

En cuanto al sensor de fuerza uno de los principales problemas fue la respuesta no lineal de su resistencia, causando un error máximo del 10 % en la masa estimada del paquete, debido a la linealización realizada por el método de los mínimos cuadrados, sin embargo, los resultados pueden ser mejorados con éxito, si aproximamos la respuesta del sensor mediante un modelo polinomial de orden 5, pero se mantuvo la decisión de elegir un modelo lineal, ya que cumplió con nuestras especificaciones además de resultar un modelo accesible.

Con respecto a la implementación del modulo para la estimación de la posición del robot móvil, presentó en cierto casos, problemas de variabilidad en la medición del RSSI de la señales Wi-Fi, puesto que en presencia de objetos, el RSSI tiene una pérdida considerable, sin embargo, este error en la medición, puede reducirse, calculando un factor de corrección n con base en nuestras mediciones. Finalmente se obtuvo un promedio de error relativo del 22.2 % en presencia de obstáculos, sin embargo, para disminuir dicho error, se realizaron más muestras para obtener un modelo de distribución y así mejorar el algoritmo de estimación, cumpliendo con nuestras especificaciones.

También se resalta el hecho que, el diseño detalle realizado de la arquitectura del robot móvil, con base a una metodología de diseño para el desarrollo de productos, definiendo especificaciones y funciones a realizar cada bloque, ayudará a realizar un desarrollo global del sistema, que se definió como un trabajo a futuro por cuestiones de alcance del proyecto y confinamiento social, provocado por el virus SARS-CoV-2. La extensa investigación, uso de una metodología de diseño, experimentación y análisis de los resultados obtenidos, que se mantuvieron dentro del margen propuesto, son bases importantes para una futura implementación global del robot móvil.

Finalmente la conclusión global de este trabajo, es que toda la investigación referente a las tecnologías para el ordenamiento de paquetes, presentada en el estado del arte, nos permitió establecer los requerimientos para un problema del ordenamiento de paquetes e iniciar un proceso de diseño, comenzando con el marco teórico, donde se expuso la base científica respecto a los robots móviles y algoritmos de posicionamiento que son utilizados en proyectos de la misma índole. Todo esto dio fundamento a la realización de un diseño para una arquitectura del robot móvil, con especificaciones basadas en requerimientos específicos para concluir con la experimentación de algunos bloques del robot móvil, donde los resultados experimentales, fueron favorables.

5.3. Trabajo a futuro

La experimentación basada en ciertos bloques individuales, resultará de gran ayuda para realizar el desarrollo global del robot móvil, tomando en cuenta los resultados obtenidos para su complementación con otros bloques, ya que en este trabajo no se pudo concretar dicho fin, por el límite de tiempo propuesto y alcance. A continuación se sugieren algunos desarrollos que se podrían llevar a cabo para apoyar el desarrollo y finalización del presente trabajo.

- Diseño, configuración y programación de una interfaz de comunicación inalámbrica con el uso de tecnologías más precisas.
- Desarrollo de una interfaz para la comunicación con el usuario y el robot móvil, haciendo uso de una pantalla de a bordo con tecnología táctil.
- Mejora de los métodos estadísticos y uso de modelos no lineales para una mejor aproximación de los resultados.
- Mejora de los algoritmos de control, aplicando métodos de programación más complejos.

Capítulo 6

Bibliografía

1. R. Krug et al., "The Next Step in Robot Commissioning: Autonomous Picking and Palletizing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 546-553, Enero 2016.
2. Kimura, N., Ito, K., Fuji, T., Fujimoto, K., Esaki, K., Beniyama, F., Moriya, T. (2015). "Mobile dual-arm robot for automated order picking system in warehouse containing various kinds of products" 2015 *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 332.
3. W. Sai Kit and C. Venkatratnam, "Pick and place mobile robot for the disabled through voice commands," 2016 2nd *IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, Ipoh, 2016, pp. 1-4.
4. C. K. Nagendra Guptha, M. G. Bhaskar and V. Meghasree, "Design of IoT Architecture for order picking in a typical warehouse," 2018 3rd *International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bengaluru, India, 2018, pp. 50-53.
5. K. Hernandez, B. Bacca and B. Posso, "Multi-goal Path Planning Autonomous System for Picking up and Delivery Tasks in Mobile Robotics," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 2, pp. 232-238, Feb. 2010.
6. H. Yoshitake, R. Kamoshida and Y. Nagashima, "New Automated Guided Vehicle System Using Real-Time Holonic Scheduling for Warehouse Picking," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1045-1052, April 2019.
7. Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier, Hoja de datos, consultado el 5 de abril del 2022 en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad623.pdf>
8. Tiva™ TM4C1294NCPDT Microcontroller, Hoja de datos, consultado el 2 de febrero del 2022, en: <https://www.ti.com/product/TM4C1294NCPDT>
9. Amazon Robotics utiliza Amazon SageMaker para permitir la inferencia de ML a escala, consultado el 10 de Noviembre del 2021, en: <https://aws.amazon.com/es/solutions/case-studies/amazon-robotics-case-study/>

10. LATOMBE, Jean-Claude Robot Motion” Boston Planning Kluwer Academic Publisher, 1991.
11. GROOVER, M, M, Weiss Robótica industrial: tecnología, programación y aplicaciones” México Mc-Graw Hill, 1999.
12. DANIEL W. HART, .Electrónica de potencia”, México Pretince Hall, 2001, cap. 6.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Anexo 1. Programación del sensor de proximidad en lenguaje C

7.2. Anexo 2. Programación del sensor de fuerza en lenguaje C

7.3. Anexo 3. Programación del algoritmo de control de movimiento

7.4. Anexo 4. Programación del algoritmo de estimación de la posición