Universidad de Málaga

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

Proyecto Fin de Carrera

Sistema de recarga de energía de robots móviles con ROS

Autor: Jaime Vera Durán
Director: Dr. J. Manuel Gómez de Gabriel

Titulación: Ingeniero Industrial

Málaga, junio 2016

A mi familia,
a la que se lo debo todo.

Agradecimientos

No podía terminar de escribir esta memoria sin dar las gracias a todas las personas que, de una forma u otra, me han ayudado y apoyado durante todos los años que he pasado en la universidad y durante la realización de este proyecto que culmina esta bonita etapa.

En primer lugar, tengo que agradecer a toda mi familia todo el apoyo recibido y en especial a mis padres, por enseñármelo todo y por sus esfuerzos incansables para permitirme poder estudiar y realizar otras tantas actividades durante todo este tiempo.

Igualmente, mi agradecimiento a mis amigos de Ardales, porque siempre están ahí. También para todos aquellos con los que forjé una fuerte amistad en Campillos, que aunque lo tengamos difícil por la distancia, todos hacemos grandes esfuerzos para poder vernos siempre que es posible. Y a Merche, por apoyarme durante tanto tiempo.

Y como no podía ser de otra manera, también tengo que dar las gracias a los compañeros de la universidad y otros tantos amigos que he conocido durante esta etapa. En especial, a David Acosta, Daniel Casares y Daniel Arribere, por ser quienes más tiempo han compartido conmigo durante este tiempo, pero también por ser los mejores compañeros fuera y dentro de la universidad. También especial mención a todos los miembros de la asociación de estudiantes SAII, con los que he pasado mucho tiempo trabajando duro, pero también compartiendo buenos momentos y aprendiendo lo que en las clases no se enseña.

Además, quería aprovechar para dar las gracias a Tully Foote, creador del TurtleBot y manager de ROS en OSRF, por invitarme al ROSCon, la conferencia anual internacional sobre ROS. No sólo me permitió conocer a otros ingenieros, empresas y proyectos de todo el mundo, sino que me ayudó a disfrutar aún más mientras trabajaba en este proyecto.

Y finalmente, no podía dejar de dar las gracias al director de este proyecto, Jesús M. Gómez de Gabriel, por haberme dirigido este trabajo con el que tanto he aprendido y por su ayuda en todo lo que ha estado en sus manos. Igualmente,

el agradecimiento al Laboratorio de Telerobótica y Sistemas Interactivos TaIS-Lab, al departamento de Sistemas y Automática y a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, por haberme facilitado el uso de sus instalaciones y por la aportación de todo el material necesario para el desarrollo de todo el trabajo.

Resumen

Este proyecto describe el diseño e implementación de un sistema de recarga de energía para robots móviles con ROS. El sistema de localización diseñado se basa en luces infrarrojas y el control de los distintos sensores, motores y emisores infrarrojos se realiza con tarjetas Arduino. Se describe el diseño, la fabricación y el montaje de todos los elementos del sistema para su funcionamiento en un robot ya existente, así como las modificaciones electrónicas necesarias y la sustitución del sistema de alimentación. El control de alto nivel y las comunicaciones con las tarjetas Arduino se realiza con un ordenador con el sistema ROS. Para el control de todo el sistema, se diseñan e implementan todos los algoritmos de bajo y alto nivel.

Índice general

Agradecimientos **iv**

Resumen **vi**

Lista de figuras **xi**

Lista de tablas **xvi**

1. Introducción **1**

1.1. Introducción 1

1.2. Motivación y trabajos previos 3

1.3. Objetivos 3

1.4. Plan de trabajo 4

1.5. Estructura del documento 5

2. Robots móviles **7**

2.1. Introducción 7

2.2. Tipos de robots móviles terrestres 7

2.2.1. Robots con ruedas 8

2.3. Ejemplos de robots 10

2.4. Conclusión 16

3. Características del robot móvil **17**

3.1. Introducción 17

3.2. Cinemática 17

3.3. Características del robot móvil 19

3.4. Conclusión 27

4. Sistemas de localización **28**

4.1. Introducción 28

4.2. Estudios de sistemas de localización 28

4.2.1. Sistemas clásicos de navegación marítima 29

4.2.2. Sistemas de localización modernos 30

4.3. Sistemas de localización en sistemas de recarga 31

4.3.1. Enfilación 31

4.3.2. Sistemas de luces infrarrojas 33

4.3.3. Reconocimiento de imágenes / AGVs 34

4.4. Conclusiones 35

5. Diseño del sistema de codificación para localización **37**

5.1. Introducción 37

5.2. Luz infrarroja 37

5.2.1. Emisores y receptores infrarrojos 39

5.3. Códigos para señales infrarrojas 40

5.3.1. Protocolos estándar 40

5.3.2. Otras codificaciones 42

5.4. Diseño del código 43

5.5. Sistema de zonas 45

5.6. Conclusiones 48

6. Implementación del sistema de localización 49

6.1. Introducción 49

6.2. Componentes electrónicos 49

6.3. Circuitos electrónicos 52

6.4. Prototipos 59

6.5. Conclusiones 66

7. Sistema de alimentación y carga 68

7.1. Introducción 68

7.2. Sistema de alimentación 68

7.3. Estación de carga 73

7.4. Conclusiones 79

8. Programación de bajo nivel 81

8.1. Introducción 81

8.2. Estación de carga - Emisores 81

8.3. Robot móvil - Receptores 84

8.4. Robot móvil - MD23 y SFR08 87

8.5. Conclusiones 89

9. Programación de alto nivel 91

9.1. Introducción 91

9.2. Funcionamiento de ROS 91

9.3. Conceptos 93

9.4. Archivos 95

9.5. Algoritmos 97

9.6. Conclusión 100

10. Experimentos y conclusiones **105**

10.1. Introducción 105

10.2. Experimentos 105

10.3. Líneas futuras de trabajo 108

10.4. Conclusiones 111

Bibliografía **113**

ANEXOS **117**

Planos **118**

A. Código del programa del Arduino que controla los emisores IR **124**

B. Código del programa del Arduino que controla los receptores IR **128**

C. Código del programa del Arduino que controla la tarjeta MD23 y los sensores ultrasónicos **135**

D. Código del archivo package.xml **143**

E. Código del archivo CMakeList.txt **145**

F. Código del archivo control.launch **151**

G. Código del archivo listener.py **152**

Índice de figuras

1.1. Robot quirúrgico da Vinci. *Fuente:* [17] 2

1.2. Modelo S de Tesla Motors. *Fuente:* [36] 2

2.1. Tipos de ruedas convencionales. *Fuente:* [34] 9

2.2. Rueda Mecanun o sueca. *Fuente:* [34] 9

2.3. TurtleBot 2. *Fuente:* [39] 12

2.4. Robot Create. *Fuente:* [18] 12

2.5. Freight. *Fuente:* [10] 13

2.6. Ridgeback. *Fuente:* [8] 13

2.7. AGVS de Robotnik. *Fuente:* [33] 14

2.8. Husky. *Fuente:* [8] 14

2.9. Robot PIERO. *Fuente:* [12] 15

2.10. Robot con comportamientos sociales. *Fuente:* [38] 16

3.1. Movimientos de un vehículo con tracción diferencial. *Fuente:* [32] 18

3.2. Modelo cinemático de velocidades. *Fuente:* [25] 18

3.3. Modelo del control cartesiano. *Fuente:* [25] 19

3.4. Motor EMG30. *Fuente:* [28] 20

3.5. Controladora MD23. *Fuente:* [31] 22

3.6. Sensor ultrasónico SRF08. 23

3.7. Alcance del sensor ultrasónico SRF08. *Fuente:* [29] 24

3.8. Modelos de Arduino UNO. *Fuente:* [2] 25

3.9. Batería de plomo-ácido instalada bajo la plataforma móvil. . . . 26

4.1. Señales a babor y estribor. *Fuente:* [24] 29

4.2. Sistema de enfilación náutica. *Fuente:* [7] 30

4.3. Balizas de enfilación náutica. *Fuente:* [43] 30

4.4. Esquema de las luces de guía. *Fuente:* [7] 32

4.5. Sistema de recarga basado en la enfilación náutica. *Fuente:* [7] . . 32

4.6. Modelo Roomba de iRobot. *Fuente:* [19] 34

4.7. Cortacésped Robomow. *Fuente:* [30] 34

4.8. Robot Oculus Prime. *Fuente:* [45] 35

5.1. Espectro luz infrarroja. *Fuente:* [1] 38

5.2. Señal modulada a 38 kHz. *Fuente:* [6] 40

5.3. Mensaje con el protocolo NEC. *Fuente:* [37] 42

5.4. Código personalizado. 44

5.5. Código para cada uno de los emisores. 45

5.6. Señales superpuestas. 45

5.7. Regiones creadas por dos emisores. 47

5.8. Regiones creadas por tres emisores. 47

6.1. Ángulos e intensidad del haz emitido por el led IR. 51

6.2. Diagrama de bloques del circuito del receptor TSOP4838. *Fuente:* [9] 52

6.3. Conexión de un emisor. 52

6.4. Señal modulada a 38 kHz. 53
6.5. Conexión de 3 emisores. 54
6.6. Esquema de la conexión de 3 emisores. 54
6.7. Señales emitidas por dos emisores. 55
6.8. Señales emitidas por dos emisores. 55
6.9. Conexión del circuito de comprobación. 56
6.10. Esquema de la conexión del circuito de comprobación. 56
6.11. Comparación de las señales emitidas y recibidas. 57
6.12. Comparación de las señales emitidas y recibidas. 57
6.13. Conexión de un receptor. 58
6.14. Conexión de un receptor y led RGB. 59
6.15. Esquema de conexión de un receptor y led RGB. 59
6.16. Conexión de receptores. 60
6.17. Esquema de conexión de receptores. 60
6.18. Esquema de la colocación de los receptores frontales. 62
6.19. Montaje de los receptores sobre el frontal del robot. 62
6.20. Montaje de la pieza impresa sobre el frontal. 63
6.21. Montaje de otro de los prototipos de la pieza frontal. 64
6.22. Esquema del rebote de las señales. 64
6.23. Montaje final de la pieza frontal. 65
6.24. Instalación de los receptores IR en la pieza frontal. 65
6.25. Detalle de la instalación de los soportes para los receptores laterales. 66
6.26. Esquema de la colocación de los 4 receptores infrarrojos. 66
6.27. Montaje electrónico de los emisores. 67
6.28. Instalación de los tubos retráctiles sobre los emisores. 67

7.1. Batería original de plomo-ácido. 70

7.2. Circuito de protección RS-03 V1.0. 71

7.3. Esquema del montaje del circuito de protección RS-03 V1.0. *Fuente:* [20] 71

7.4. Módulo de las baterías con el circuito de protección. 72

7.5. Módulo de las baterías instalado en la plataforma. 73

7.6. Vista inferior de la plataforma. 74

7.7. Voltímetro instalado en un lateral de la plataforma. 74

7.8. Robot aspirador con conexiones frontales. *Fuente:* [4] 75

7.9. Estación de carga del Roomba con conexiones bajo la plataforma. *Fuente:* [19] 75

7.10. Estación de carga de robot Freight de Fetch Robotics con conector frontal. *Fuente:* [10] 76

7.11. Vista trasera del soporte y los conectores. 77

7.12. Vista frontal del soporte y los conectores. 78

7.13. Vista frontal de la estación de carga. 79

7.14. Vista del montaje de los componentes en el interior de la estación de carga. 79

7.15. Vista de las conexiones interiores de los contactos frontales. . . . 80

7.16. Vista del robot junto a la estación de carga. 80

8.1. Algoritmo de la función Encendido_Led_IR. 83

8.2. Algoritmo del programa que controla los emisores IR. 85

8.3. Lecturas realizas para la recepción de los códigos. 86

8.4. Algoritmo del programa que controla los receptores. 88

8.5. Ejemplo del bus de datos I2C. *Fuente:* [26] 89

8.6. Algoritmo del programa que controla la tarjeta MD23 y los sensores ultrasónicos. 90

9.1. Logos de ROS y OSRF. *Fuente:* [23] 92

9.2. Ejemplo de dos nodos. *Fuente:* [44] 94

9.3. Esquema de la jerarquía de los elementos del sistema. 97

9.4. Estructura de grafos del sistema. 98

9.5. Diagrama de flujo del programa principal. 100

9.6. Diagrama de flujo del estado Búsqueda. 101

9.7. Diagrama de flujo del estado Localizado-Lejos. 102

9.8. Diagrama de flujo del estado Localizado-Cerca y el estado Carga y desconexión. 103

9.9. Diagrama de flujo del algoritmo principal simplificado. 104

10.1. Visor rqt que muestra todos los topicos y sus valores. 107

10.2. Vista del robot acercándose a la estación de carga. 108

10.3. Vista del robot conectado a la estación de carga. 108

Índice de tablas

3.1. Pines del motor MG30 21

3.2. Características del motor MG30 21

3.3. Características técnicas del Arduino UNO 25

3.4. Características técnicas del Toshiba Satellite C55-A-1EF 26

3.5. Características técnicas de la batería de plomo-ácido 26

6.1. Características técnicas del emisor TSAL 6400 50

6.2. Características técnicas del receptor TSOP4838 51

7.1. Características de las baterías de Ion-Litio 70

9.1. Estructura genérica de los archivos en ROS 95

9.2. Estructura de los archivos en ROS 96

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En la actualidad las tecnologías para diseñar y construir robots son mejores y más baratas que nunca [15]. Además de la mayor potencia de los microprocesadores, dispositivos como nuevos sensores 3D, acelerómetros y giroscopios permiten realizar tareas complejas como la navegación autónoma de forma mucho más sencilla. Estos avances han permitido el desarrollo de robots con funcionalidades muy distintas, tanto dentro como fuera del ámbito industrial. Un ejemplo a destacar con características muy específicas en lo referente a la precisión de sus movimientos es el último modelo del robot quirúrgico teleoperado da Vinci [17], mostrado en la figura 1.1. Respecto a robots móviles, se pueden destacar los avances producidos en los drones destinados a realizar diferentes tareas, los desarrollos de robots domésticos y personales o el aumento de las ventas de vehículos eléctricos. Un modelo de vehículo totalmente eléctrico a destacar es el modelo S de Tesla Motors mostrado en la figura 1.2.

Según algunos informes, como los publicados por The Robot Report y Boston Consulting Group [15], en el año 2015, los fondos destinados a startups dedicadas a la robótica se han triplicado respecto a los del año anterior, y el mercado global de robots se duplicará en menos de 10 años. Sin embargo, a pesar del aparente rápido avance tecnológico, hay un cierto estancamiento en campos como la electrónica digital o la tecnología espacial [16]. Pero el caso más destacable de este estancamiento es la búsqueda de las llamadas super baterías. El último gran avance en este campo se produjo hace 25 años cuando Sony desarrolló y comercializó la primera batería recargable de Ion-Litio en 1991. Aunque desde entonces las baterías hayan mejorado, sus características en lo referente a la capacidad, volumen, peso y precio siguen limitando la evolución de la

Figura 1.1: Robot quirúrgico da Vinci. *Fuente:* [17]

Figura 1.2: Modelo S de Tesla Motors. *Fuente:* [36]

robótica móvil, los vehículos eléctricos u otros dispositivos inteligentes, como los denominados *wearables*.

A pesar de todas las limitaciones referentes a las baterías, gracias a la combinación de talento, dinero y apoyo de empresas y gobiernos, en un futuro cercano se esperan mejoras en las baterías, pero probablemente no sean extremadamente mejores a las actuales [16] Por ello, además de investigar para mejorar las baterías, es interesante estudiar otros campos que aumenten la autonomía de los robots. Uno de estos campos es el ahorro del consumo de energía por parte de todos los componentes electrónicos de los robots, así como todo lo relacionado con el control mediante software para reducir el consumo mediante movimientos o trayectorias energéticamente más eficientes. Otras soluciones son la propia generación de energía mediante paneles fotovoltaicos o robots que sustituyen sus propias baterías de forma autónoma. Sin embargo, un sistema que resuelve estos problemas para una gran cantidad de robots móviles es la utilización de sistemas de recarga automática. Aunque existen sistemas de recarga inalámbrica que cargan las baterías mientras el robot se mueve, sus usos están limitados a robots con funcionalidades muy concretas. Un sistema más flexible es el basado en estaciones de recarga en las que los robots se conectan a un sistema de alimentación de forma totalmente autónoma. Estos sistemas permiten que un

robot esté funcionando de forma ininterrumpida sin ninguna acción humana, sin embargo, la solución en la que un robot detecta y se conecta a dichas estaciones no es un problema trivial. El presente documento ilustra el desarrollo del diseño e implementación de un sistema de recarga automático para robots móviles.

1.2. Motivación y trabajos previos

En el Laboratorio de Telerobótica y Sistemas Interactivos del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga se encuentran disponibles distintos robots móviles con los que se han desarrollado trabajos previos. Uno de ellos es el robot PIERO, una plataforma educativa diseñada para realizar prácticas de control y automática en distintas asignaturas.

Otro de los robots disponibles es el resultado de un proyecto final de carrera [21] denominado "Robot móvil con comportamientos sociales" y realizado por Antonio Martín Arrabal. En dicho proyecto se realizó el diseño del robot que está basado en una plataforma móvil que se controla con ROS (Robot Operating System) e implementa funcionalidades de navegación y detección de personas. Posteriormente, Rubén Triviño Juárez utilizó la plataforma para realizar un trabajo fin de grado [38] denominado "Navegación en Edificios Públicos Mediante SLAM" en el que estudia su comportamiento durante la navegación en el interior de edificios en distintas situaciones usando el sistema de localización y mapeo simultáneo denominado SLAM (Simultaneous Localization And Mapping).

Este robot está formado por una plataforma a la que se le pueden incorporar multitud de dispositivos permitiendo desarrollar nuevas aplicaciones. Sin embargo, el uso de baterías limita sus posibles aplicaciones en lo referente al consumo de energía y el tiempo máximo de funcionamiento. Por ello, será el robot que se utilice como base para el desarrollo de todo el trabajo del presente proyecto.

1.3. Objetivos

De entre todas las mejoras posibles para aumentar la capacidad de autonomía de un robot, el sistema de carga automática permite que un robot pueda estar funcionando de forma continua excepto cuando se encuentre recargando sus baterías. Aún así, si el sistema es totalmente automático, no requiere de ninguna intervención humana. Por ello, el principal objetivo del presente proyecto es el diseño e implementación de un sistema de recarga de energía para robots móviles.

Para lograr cumplir el objetivo principal habrá que realizar las siguientes

tareas:

- Desarrollar un sistema que permita al robot localizar la estación de carga y conectarse a ella de forma totalmente autónoma para recargar sus baterías.
- Se diseñará y fabricará la estación de carga que suministra la energía, así como los conectores y demás componentes que sean necesarios instalar en el robot móvil.
- Se estudiarán distintos tipos de robots a los que se puede aplicar el sistema y se analizarán las modificaciones y mejoras necesarias para instalar y probar el sistema en el robot móvil con comportamientos sociales disponible en el laboratorio.
- Se incorporarán nuevos controladores y sensores al robot y se estudiará la mejora de su sistema de alimentación.
- Se diseñarán todos los algoritmos de bajo y alto nivel necesarios para controlar el movimiento del robot, ya sea para la navegación autónoma de forma segura evitando obstáculos, así como para el seguimiento de las trayectorias necesarias para conectarse a la estación de carga. La implementación de los algoritmos de alto nivel se realizará con el sistema ROS.
- Se tendrá como objetivo secundario obtener la máxima adaptabilidad del sistema para ser instalados en otros robots similares, así como el uso de herramientas de software libre para que el sistema pueda ser implementado y mejorado de forma completamente libre.

1.4. Plan de trabajo

El plan de trabajo se organizará de la siguiente forma:

1. Estudio de distintos tipos de robots móviles.
2. Análisis de las características del robot elegido.
3. Mejoras en el sistema de baterías y su sistema electrónico de control.
4. Estudio de sistemas de localización en robótica móvil y en sistemas de recarga.
5. Diseño e implementación de un sistema de localización.
6. Diseño mecánico y electrónico de la estación de carga.
7. Diseño de algoritmos y programación de bajo nivel.

8. Diseño de algoritmos y programación de alto nivel con ROS.
9. Realización de experimentos y verificación del sistema.

1.5. Estructura del documento

En este apartado se pretende describir la estructura global del presente documento, explicando brevemente el contenido de cada uno de sus capítulos y anexos.

En el capítulo 2 se procede con una clasificación de los diferentes tipos de robots terrestres, analizando los robots con ruedas y sus posibles configuraciones de tracción. Se realizan descripciones de robots comerciales y de modelos que se encuentran disponibles en el laboratorio.

La descripción del robot elegido para la realización de este proyecto se realiza en el capítulo 3. En primer lugar se introduce la cinemática del robot y posteriormente se realiza un estudio de todas las características y componentes del robot.

El capítulo 4 contiene el estudio de distintos tipos de localización, aplicándolos a la robótica móvil y comparando sus ventajas e inconvenientes. Tras analizar los distintos modos de localización, se elige el más adecuado para desarrollar el sistema requerido, basado en señales infrarrojas.

A lo largo del capítulo 5 se desarrolla el diseño del sistema de localización elegido en el capítulo anterior. Se estudian los distintos protocolos para envío de señales infrarrojas y se desarrolla un sistema propio de codificación.

El capítulo 6 describe la implementación del sistema diseñado, enumerando los diferentes componentes electrónicos requeridos, los circuitos electrónicos para su control y el análisis de distintos prototipos.

En el capítulo 7 se desarrollan las mejoras realizadas en el sistema de alimentación del robot, explicando la sustitución de las baterías por otras más modernas y analizando sus ventajas. También se estudian los tipos de conectores para la conexión entre el robot móvil y la estación de carga, se realizan los diseños de las piezas en 3D y se describe la ejecución de su montaje.

Durante los capítulos 8 y 9 se describen los diferentes algoritmos para el control de bajo y alto nivel. Por un lado, se desarrolla el control de bajo nivel de los diferentes dispositivos electrónicos como son las tarjetas Arduino que controlan el movimiento, y la emisión y recepción de señales infrarrojas y por otro lado, se realiza el control de alto nivel general del sistema con ROS.

Posteriormente, en el capítulo 10, se describen los experimentos más significativos realizados durante todo el desarrollo del trabajo y se detallan algunas de las posibles líneas futuras de trabajo que se pueden realizar tras este proyecto. Finalmente se enumeran los objetivos cumplidos y se realizan las conclusiones oportunas.

Al final del documento se encuentra la bibliografía utilizada para la realización del proyecto y los diferentes anexos. En primer lugar se muestran los planos de las piezas diseñadas para la construcción de la estación de carga y otros componentes que se instalan en la plataforma móvil. Finalmente se encuentran los anexos con los códigos de los programas para las tres tarjetas Arduino y los códigos de todos los archivos creados en el sistema ROS.

Capítulo 2

Robots móviles

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza un estudio de los distintos tipos de robots que pudieran hacer uso de un sistema de recarga de energía. En el caso de los robots terrestres con ruedas, se analizan los distintos tipos de ruedas y las configuraciones de tracción que permiten. Por otro lado, se analizan tanto las opciones comerciales que se pueden encontrar en el mercado, así como el material del que se dispone en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Se estudian sus configuraciones y diseños para poder desarrollar un sistema que funcione correctamente sobre el robot elegido, pero a su vez se valoran parámetros generales de todos ellos para la posible adaptación e implementación del sistema en otros robots.

2.2. Tipos de robots móviles terrestres

En la actualidad existen numerosos modelos comerciales de robots que se pueden encontrar fácilmente en el mercado. Dejando a un lado otros robots móviles, sin puntos de apoyo como pueden ser los drones o cualquier otro robot aéreo o acuático, según su sistema de apoyo y contacto con el suelo, se pueden clasificar generalmente en los siguientes grupos:

- Robots con patas

  Las configuraciones de robots con patas pueden ser muy distintas. Los robots con múltiples patas son adecuados para terrenos muy irregulares.

Los robots bípedos y humanoides también están desarrollando grandes avances, aunque el control de su estabilidad es más complejo según la superficie en la que se muevan. Sus inconvenientes principales son el alto consumo energético, el alto número de grados de libertad y la complejidad que conlleva su control.

- Robots orugas

  En general, los robots orugas, conocidos también por sistemas de locomoción por cintas de deslizamiento, son utilizados en superficies muy irregulares. Su principal ventaja es la facilidad de control. Entre sus desventajas destacan los malos resultados de odometría y su alto consumo energético en los giros.

- Robots con ruedas

  Los robots con ruedas igualmente pueden tener configuraciones muy distintas. Existen robots con diferentes número y distribución de sus ruedas, así como distintos tipos de ruedas.

- Otros

  Asimismo, fuera de las categorías anteriores existen otros tipos de robots. Cabe nombrar los robots conocidos como robots gusanos o robots serpientes, que aunque también tienen contacto con el suelo o cualquier otra superficie, quedan fuera de las opciones que se estudian para diseñar el sistema de recarga.

2.2.1. Robots con ruedas

Existen distintos tipos de ruedas según su número de grados de libertad o según los ejes de rotación de la propia rueda respecto a la plataforma del robot. Según las ruedas de las que disponga un robot, que pueden ser todas iguales o de diferente tipo, se logran obtener unas características diferentes respecto al movimiento que pueden realizar. Una clasificación clásica [34] de los tipos de ruedas según sus grados de libertad es la siguiente:

- Ruedas convencionales

  Dejando a un lado la rueda fija, la clasificación de ruedas convencionales incluye a otros tipos según el eje de rotación vertical con respecto a la propia rueda. En la figura 2.1 se muestran 3 ejemplos. Tienen dos grados de libertad, la rotación alrededor del eje del plano que contiene a la rueda y la rotación respecto al eje vertical, que puede estar centrado o descentrado. A pesar de disponer de sólo dos grados de libertad, posibilitan desplazamientos omnidireccionales si su posición en el robot es la adecuada.

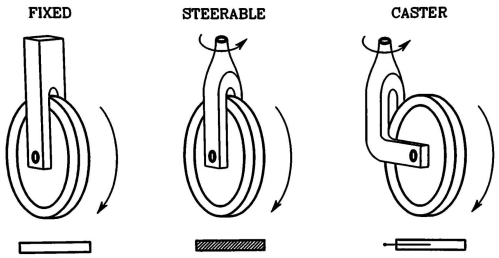

Figura 2.1: Tipos de ruedas convencionales. *Fuente:* [34]

- Ruedas especiales

  Las ruedas especiales son aquellas que tienen 3 grados de libertad. Su movimiento se basa en la idea de tener dos componentes, una componente activa que proporciona la tracción en una dirección y una componente pasiva en una dirección distinta. Esto permite que sea posible el movimiento lateral. Gracias a este 3º grado de libertad respecto a las ruedas anteriores, el robot puede alcanzar cualquier punto con una trayectoria recta. Entre los diferentes tipos que existen, se destacan las ruedas universales, las ruedas esféricas y las ruedas de Mecanum (o suecas). En la figura 2.2 se muestra una imagen de la rueda Mecanum.

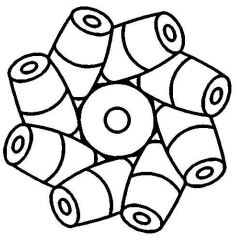

Figura 2.2: Rueda Mecanun o sueca. *Fuente:* [34]

Según la posición y tipos de ruedas de las que dispone el robot, se obtienen distintas configuraciones, dando lugar a robots con características variadas, como pueden ser la estabilidad y la maniobrabilidad. A continuación se describen las configuraciones más importantes:

- Triciclo

  Esta configuración está formada por dos ruedas traseras fijas y una delantera motriz con orientación variable, que es la que determina el movimiento aportando tanto la fuerza motriz como la dirección según su ángulo de

orientación. El control es sencillo, pero tiene limitaciones mecánicas, ya que no puede desplazarse lateralmente.

- Ackerman

  Este caso está configurado con dos ruedas traseras fijas, igual que la configuración de triciclo, pero dispone de dos ruedas delanteras motrices y de orientación variable. Su mayor ventaja es la estabilidad, permitiendo usarse en terrenos más irregulares o a mayores velocidades. Entre sus inconvenientes destacan las limitaciones mayores incluso que en el caso del triciclo con respecto al control y la maniobrabilidad.

- Diferencial

  La configuración de tipo diferencial está formada por dos ruedas fijas motrices y al menos, una tercera rueda que sirve de apoyo para asegurar su estabilidad, normalmente ruedas cástor. El control del movimiento se realiza asignando diferentes velocidades a cada una de las ruedas motrices. Aunque este sistema tampoco permite el desplazamiento lateral, sí puede girar sobre sí mismo y alcanzar cualquier punto en cualquiera de las direcciones. Gracias a ello, este sistema ofrece una gran maniobrabilidad, así como un sencillo control e implementación. Sus principales desventajas son la pérdida de tracción en terrenos poco lisos y los malos resultados de odometría al deslizar alguna de sus ruedas.

- Síncrona

  Este sistema está formado por 3 ruedas motrices y orientables que giran a la misma velocidad y en la misma dirección. Para su control, se utilizan dos motores cada uno con un su sistema de transmisión. Uno de ellos es el encargado del giro y avance de las ruedas y el otro el encargado de orientar las tres ruedas a la vez. El control del sistema es sencillo, ya que se controlan por separado la velocidad y el giro, permitiendo además moverse en cualquier dirección.

- Omnidireccionales

  Los sistemas omnidireccionales se basan en el uso de 3 ruedas omnidireccionales o suecas orientadas con un ángulo de 120º entre ellas. Su desventaja principal es la complejidad del control, pero este sistema permite moverse en cualquier dirección sin ninguna restricción cinemática.

2.3. Ejemplos de robots

Analizando las características de los diferentes tipos de robots descritos anteriormente, se podría plantear diseñar una base de recarga, por ejemplo, para robots con patas. Sin embargo, los usos y aplicaciones de este tipo de robots son más específicos, su control es más complejo y en general, no están diseñados para

realizar tareas autónomas durante mucho tiempo en el que necesiten recargarse automáticamente. Otra de las razones es que los robots con múltiples patas además están diseñados generalmente para exteriores en los que se encuentran superficies muy irregulares. El caso de los robots bípedos con apariencia humana, entre los que podemos encontrar algunos de tipo destinado al uso doméstico, quedan fuera del alcance de este proyecto por la complejidad y coste de esos sistemas.

El caso de los robots oruga igualmente podría ser interesante y su control es más fácil. Pero sin embargo, no son tan eficientes y están pensados para ser usados en terrenos difíciles y en exteriores, en los que tener un sistema de recarga automática no siempre será útil. Por ello, finalmente se decide centrar el estudio en los robots con ruedas, en general, por la gran flexibilidad que aportan, por ser los más adecuados para usos interiores, por el fácil control, por la gran cantidad de modelos que existen y por las numerosas utilidades que pueden tener tanto en aspectos industriales como en ambientes domésticos.

A continuación se describen algunos ejemplos de robots móviles con ruedas que podemos encontrar en el mercado o en el laboratorio, tanto de uso doméstico, educativo o industrial.

Robots comerciales

- TurtleBot

  TurtleBot [39] es un robot de bajo coste con software de código abierto, e igualmente, hardware abierto. Está destinado principalmente para usos educativos y de investigación, y no sólo es compatible con ROS, sino que existen numerosos tutoriales para aprender ROS que lo usan como ejemplo. Sus diseñadores colaboraron con los creadores de ROS. El robot se puede adquirir tanto en la versión final ensamblada, así como en kits para ser montados o personalizados como el usuario prefiera. Existen dos versiones, la primera basada en el robot Create de iRobot [18], que se describe a continuación, y la segunda basada en la base de Yujin Kobuk. El modelo TurtleBot 2 se muestra en la figura 2.3.

- Create de iRobot

  Basado en el famoso aspirador Roomba [19], esta versión es programable y está especialmente diseñada para el desarrollo y la investigación en la robótica. Usa un protocolo de comunicación propio y además se puede aumentar su potencia de procesamiento con sistemas Arduino o Raspberry Pi. En la figura 2.4 se muestra una imagen del robot Create.

- Freight de Fetch Robotics

  Freight [10] es un robot diseñado para uso industrial en establecimientos de almacenamiento y es mucho más robusto que los robots anteriores.

Figura 2.3: TurtleBot 2. *Fuente:* [39]

Figura 2.4: Robot Create. *Fuente:* [18]

Son autónomos, sus funciones de navegación están muy desarrolladas y además se pueden comunicar unos con otros. También están diseñados para funcionar con ROS y utilizar las numerosas librerías que existen para controlar el robot. Su imagen se observa en la figura 2.5.

- Ridgeback de Clearpath

  El modelo Ridgeback de Clearpath [8] es un robot muy parecido al descrito anteriormente, funciona también con ROS y su plataforma puede ser utilizada tanto para transportar cargas como para instalar manipuladores que realicen cualquier otra función. Se muestra una imagen de este robot en la figura 2.6.

Figura 2.5: Freight. *Fuente:* [10]

Figura 2.6: Ridgeback. *Fuente:* [8]

- AGVS de Robotnik

  Este es otro tipo de robot industrial que comercializa la compañía española Robotnik [33] y se muestra en la figura 2.7, dentro de la clasificación de robots AGV (Automated Guided Vehicle). Existen numerosos tipos de robots con bases similares pero con diferentes características que lo hacen más adecuados para determinadas actividades. Pueden usar tanto cámaras de visión o láser, como guiarse por señales, cables o imanes debajo del suelo. Este modelo, que soporta cargas de hasta 500 kg, se basa en la detección de imanes y además tiene dos cámaras para la detección de personas.

- Husky de Clearpath

  Este robot, mostrado en la figura 2.8 y también de la compañía Clearpath [8], es sólo un ejemplo de robot de cuatro ruedas dentro de la gran cantidad de robots de este tipo que se puede encontrar en el mercado. En este caso, es de un tamaño medio, muy robusto, con ruedas fijas y destinado a trabajos de investigación, exploración o vigilancia en el exterior. Se le

Figura 2.7: AGVS de Robotnik. *Fuente:* [33]

pueden instalar numerosos sensores de todo tipo, como cámaras o sistemas GPS, pero también manipuladores de tamaño medio.

Figura 2.8: Husky. *Fuente:* [8]

En la categoría de robots de 4 ruedas se encuentran modelos de muy distintas características, desde robots muy pequeños con características muy especiales a vehículos con capacidad para transportar personas o grandes cargas. En su mayoría están diseñados para recorrer distancias mayores que los que se han descrito primero, y como consecuencia, con baterías de mayor capacidad. Además, en muchos de los casos son destinados a operar en espacios abiertos y exteriores. Por todo ello, la necesidad de un sistema de recarga autónomo tiene mayor aplicación en casos de robots de tamaño medio que tienen baterías de limitada capacidad y que trabajan en espacios interiores y dimensiones reducidas.

Robots disponibles en el laboratorio

- Robot PIERO

PIERO es una plataforma robótica móvil diseñada por profesores e investigadores del departamento de ingeniería de sistemas y automática de la Universidad de Málaga. Su sistema de trasmisión es de tipo diferencial con dos ruedas cástor para asegurar su estabilidad. Se controla con una tarjeta Arduino Mega y está especialmente diseñado para realizar prácticas con Arduino y el paquete Simulink del software Matlab. Se muestra una imagen de este robot en la figura 2.9

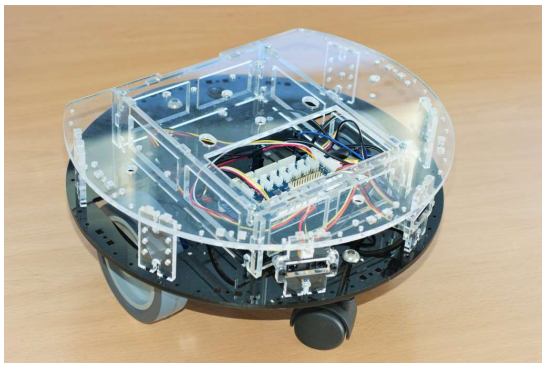

Figura 2.9: Robot PIERO. *Fuente:* [12]

- Robot con comportamientos sociales

  Como ya se ha introducido en el apartado de trabajos previos del capítulo anterior, además de PIERO, el robot móvil con comportamientos sociales es otra de las plataformas que se encuentra disponible en el departamento. Este robot se basa en una plataforma de mayores dimensiones y mayor robustez que PIERO y dispone de dos ruedas motrices y dos de apoyo, constituyendo una configuración de tracción direccional. La estructura del robot permite realizar numerosas modificaciones sobre el modelo original y dispone de suficiente espacio para incorporar nuevos dispositivos, como otros sensores y controladores. Por lo tanto, la utilización de esta plataforma como punto de partida facilita el trabajo, ya que evita tener que diseñar al completo un nuevo robot móvil. En lugar de realizar el diseño inicial de un robot teniendo en cuenta los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema de recarga, el hecho de utilizar un modelo ya existente obliga a diseñar dichos componentes de forma que sea fácilmente adaptables a otros robots de similares características. En la figura 2.10 se muestra una imagen del robot original al que se le realizarán las modificaciones necesarias para el desarrollo de este trabajo.

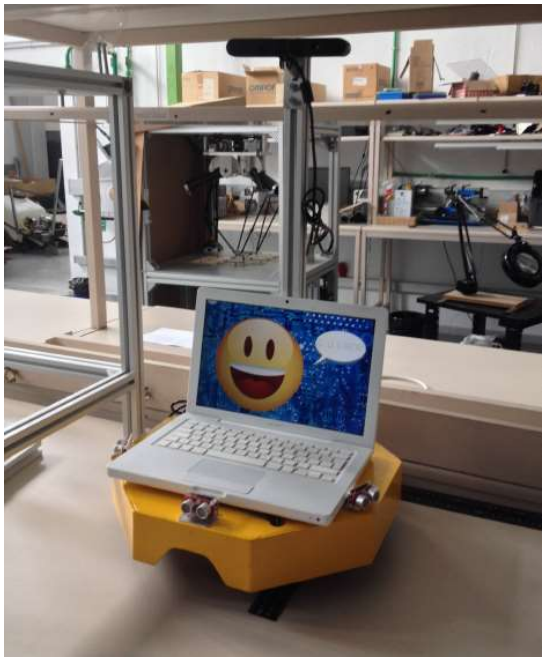

Figura 2.10: Robot con comportamientos sociales. *Fuente:* [38]

2.4. Conclusión

A lo largo de este capítulo se han descrito los principales tipos de robots que existen, analizando especialmente los robots terrestres. Dentro de la categoría de robot terrestres con ruedas, se ha realizado un estudio de los diferentes tipos de ruedas y los sistemas de tracción que se pueden configurar según el número y tipo de ruedas de las que dispongan los robots. Además se ha realizado un estudio de diferentes robots comerciales y otros robots disponibles para la realización de este proyecto. Dichos análisis permiten conocer las necesidades que pueden tener distintos tipos de robots según sus configuraciones en lo referente a los sistemas de recarga que pudieran ser diseñados para ellos. En el siguiente capítulo se describe detalladamente el robot elegido para la realización de este proyecto.

Capítulo 3

Características del robot móvil

3.1. Introducción

En este capítulo se realiza una descripción del robot con comportamientos sociales que se ha usado para la realización de todo el trabajo. En primer lugar se describe la plataforma, su sistema de tracción y la cinemática correspondiente al control que gobierna este tipo de robots. Igualmente se estudian las características y el funcionamiento de los componentes electrónicos, como son la controladora de los motores, la tarjeta Arduino y los sensores ultrasónicos. Finalmente se describe el ordenador utilizado para el control del robot para este proyecto, así como el sistema de alimentación del que disponía originalmente.

3.2. Cinemática

El robot con comportamientos sociales, mostrado en la figura 2.10, está basado en una plataforma con dos ruedas fijas motrices y dos ruedas de apoyo de tipo cástor. Por lo tanto, la configuración de la tracción del robot es de tipo diferencial. En los vehículos con esta configuración, el giro de cada rueda es independiente de la otra y el movimiento del robot se produce asignando diferentes velocidades a cada rueda. Si las dos ruedas giran a la misma velocidad y en el mismo sentido, el vehículo se mueve hacia adelante o hacia atrás en línea recta. Si las ruedas giran a la misma velocidad, pero en distinto sentido, el vehículo rota sobre sí mismo, pudiendo rotar en una u otra dirección según

los sentidos de cada rueda. Finalmente, en el caso de que se le asignen distintas velocidades a cada rueda, el vehículo se mueve hacia delante o hacia atrás a la vez que realiza un giro. Los distintos casos de movimientos según los giros de cada una de las ruedas se representan en la figura 3.1.

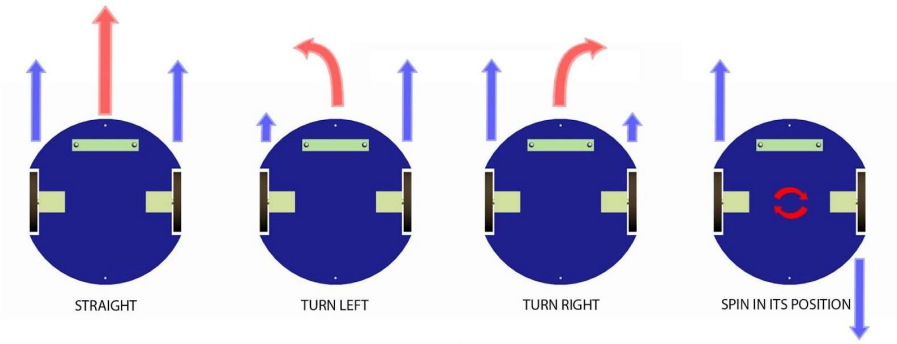

Figura 3.1: Movimientos de un vehículo con tracción diferencial. *Fuente:* [32]

En la figura 3.2 se muestra el diagrama del modelo cinemático de velocidades locales para un robot genérico de tipo diferencial [25]. Las velocidades de cada rueda, V_1 y V_2, se denominan velocidades articulares y las velocidades V (V_y) y W son las velocidades cartesianas.

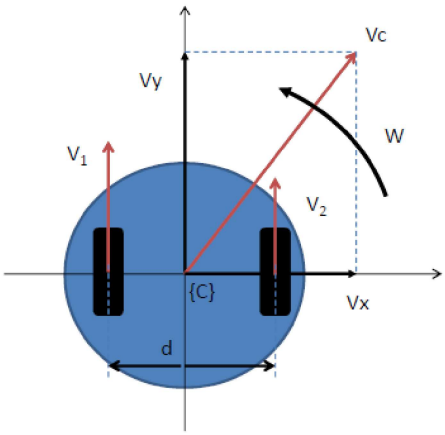

Figura 3.2: Modelo cinemático de velocidades. *Fuente:* [25]

Por lo tanto, el control del movimiento del robot se puede realizar controlando las velocidades articulares o las velocidades cartesianas. Según el sistema de control de los motores, se podrá hacer de una u otra manera, existiendo tarjetas controladoras que permiten elegir cualquiera de los dos tipos de velocidades que

se desea fijar. Las relaciones entre las velocidades cartesianas y las velocidades articulares son las siguientes:

$$V_x = 0$$
$$V_y = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$
$$W = \frac{(V_2 - V_1)}{d}$$

$$V = V_y$$

$$V_1 = V - \frac{dW}{2}$$
$$V_2 = V + \frac{dW}{2}$$

Usando el jacobiano directo o el jacobiano inverso se pueden obtener unas velocidades a partir de las otras. En la figura 3.3 se muestra un diagrama de bloques en el que las referencias de velocidades del robot se fijan mediante las velocidades cartesianas. Mediante el jacobiano inverso se calculan las velocidades articulares deseadas y por otro lado se obtienen las velocidades articulares reales que proporcionan los encoders de cada motor. Con el jacobiano directo se transforman las velocidades reales articulares en cartesianas, pudiendo realizar el control comparando de esta forma las velocidades cartesianas deseadas con las velocidades cartesianas reales.

Figura 3.3: Modelo del control cartesiano. *Fuente:* [25]

3.3. Características del robot móvil

A continuación se introducen los principales componentes del robot original. Se realiza una descripción de cada uno de ellos y se detallan las características

técnicas más importantes. También se describe el ordenador utilizado para la realización de este proyecto, que aunque no es el ordenador que se usó en su diseño original, es de similares características.

Plataforma

El sistema de tracción es de tipo diferencial, usando dos ruedas con sus respectivos motores y dos ruedas de tipo cástor que sirven para dar mayor estabilidad a la plataforma. Para evitar problemas de deslizamiento de las ruedas motrices, hay una pequeña diferencia de altura entre estas y las ruedas cástor, con la finalidad de evitar tales problemas en pequeños desniveles. La base tiene forma octogonal de circunferencia circunscrita de 44 cm de diámetro y está fabricada con un tablero de contrachapado de 1 cm de grosor. Los laterales son de contrachapado de 3.5 mm de grosor y 7 cm de altura. Las ruedas tienen un diámetro de 10 cm y 26 mm de espesor.

Motores EMG30

Las ruedas motrices del robot están acopladas directamente a dos motores de corriente continua EMG30 alimentados a una tensión de 12 voltios. Estos motores incluyen una reductora 30:1 y un encoder basado en un sensor de efecto Hall que proporciona el número de revoluciones que cada rueda efectúa. En la figura 3.4 se muestra una imagen del motor con sus correspondientes cables de conexión.

Figura 3.4: Motor EMG30. *Fuente:* [28]

La alimentación y envío de datos se realiza a través de un conector JST de 6 pines, cuya asignación se muestra en la tabla 3.1.

Nº	Color	Conexión
1	Violeta	Pin B del sensor Hall
2	Azul	Pin A del sensor Hall
3	Verde	Tierra del sensor Hall
4	Marrón	Alimentación del sensor Hall
5	Rojo	Alimentación del motor
6	Negro	Tierra del motor

Tabla 3.1: Pines del motor MG30

Sus características técnicas más importantes se recogen en la tabla 3.2.

Tensión nominal	12 V
Par nominal	1.5 kg/cm
Velocidad nominal	170 rpm
Potencia nominal	4.22 W
Pulsos del encoder por vuelta	360
Reducción	30:1

Tabla 3.2: Características del motor MG30

Controladora MD23

El módulo MD23 es una controladora dual muy robusta especialmente diseñada para funcionar con los motores EMG30. Funciona bajo el protocolo I2C, sólo necesita 12 voltios para su alimentación y puede suministrar hasta 3 amperios a cada motor. Estos motores pueden ser controlados independientemente o en modo combinado. En la figura 3.5 se muestra la placa electrónica de la controladora.

Los registros a los que se puede acceder a través del bus I2C se detallan a continuación:

- Registro Speed1: Existen varios modos de controlar los motores. En cualquiera de los modos individuales este registro indica la velocidad y sentido de uno de los motores. En los modos combinados, corresponde a la velocidad y sentido de los dos motores.
- Registro Speed2/Turn: Dependiendo igualmente del modo que se utilice, afectará a los dos motores o sólo al segundo motor. En el caso individual define la velocidad y sentido del segundo motor, y en el caso combinado define el giro del siguiente modo:

  Motor speed1 = speed - turn Motor speed2 = speed + turn

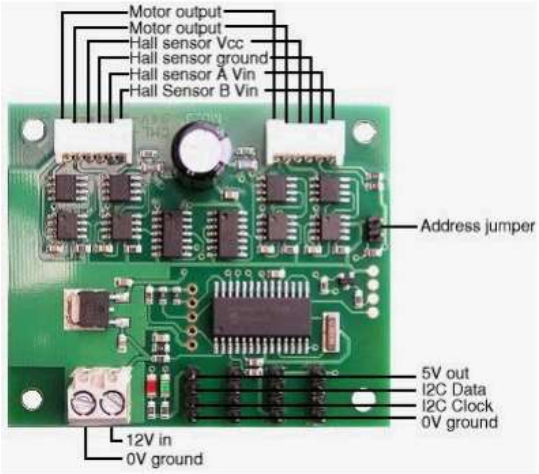

Figura 3.5: Controladora MD23. *Fuente:* [31]

- Registros Encoders: Son registros de sólo lectura que proporcionan los valores de odometría de cada motor. A cada motor le corresponde un array de 4 bytes, dando lugar a un entero de 32 bits.

- Registro Battery volts: La controladora facilita a través de este registro la tensión que se le está suministrando. Es de sólo lectura y su valor es 10 veces la tensión en voltios de la batería.

- Registros Motor current: Facilitan la lectura del valor medio de la corriente que consume cada uno de los motores. Su valor es 10 veces la intensidad en amperios.

- Registro Software Revision: Es de sólo lectura y proporciona la versión de software del controlador.

- Registro Acceleration Rate: Es un registro opcional que sirve para controlar la aceleración máxima que se produce cuando se modifican los registros de velocidad. La transición de una velocidad a otra se realiza de forma escalonada. El valor por defecto es 5 y realiza el cambio de la máxima velocidad en un sentido al otro en 1.25 segundos.

- Registro Mode: El registro Mode selecciona el modo de operación que el usuario requiere. Las opciones que pueden ser escritas en dicho registro son las siguientes:

  -0: Es el modo por defecto. El valor 0 es interpretado como la velocidad máxima en sentido inverso, 128 como la velocidad nula y 255 como la velocidad máxima hacia adelante.

-1: Equivalente al anterior modo, pero en este caso con valores enteros con signos. Se escribe -128 para la velocidad máxima inversa, 0 para la velocidad nula y 127 para la velocidad máxima hacia adelante.

-2: Este modo es el correspondiente al control combinado de los dos motores. Speed1 define la velocidad de los dos motores, y Speed2/Turn el giro. Los valores de velocidad se interpretan al igual que el modo 0.

-3: Al igual que el modo 2, se controlan los motores de forma combinada, pero en este caso la velocidad se define con valores enteros con signos, al igual que el caso del modo 1.

- Registro Command: Los valores enviados a este registro modifican algunos de los parámetros de funcionamiento de la controladora, como por ejemplo, la puesta a cero del contador de los encoders.

Sensores ultrasónicos SRF08

El robot dispone de 3 sensores ultrasónicos instalados sobre la base, uno frontal y dos laterales, que sirven para detectar obstáculos. El sensor tiene dos modos de funcionamiento, el primero es el modo de medición de distancia individual, en el que cada uno de los sensores mide por separado y el modo red neuronal, diseñado para obtener la información de múltiples ecos a la vez. Los sensores funcionan bajo el protocolo I2C y los registros a los que se pueden acceder se muestran la figura 3.6.

Figura 3.6: Sensor ultrasónico SRF08.

El módulo tiene 5 pines, de los cuales uno de ellos no se conecta por estar destinado a programar el microchip que controla el sensor y las comunicaciones. Entre los otros conectores se encuentran los dos que alimentan el sensor con una tensión de 5 voltios y otros dos destinados al envío de datos según el protocolo I2C. Entre los comandos posibles, destacan los que inician la medición en metros, pulgadas o microsegundos, correspondientes a los valores en decimal 80, 81 y

82. Para cambiar la dirección I2C de cada sensor se utilizan los comandos 160, 165 y 170.

Según la hoja de características del fabricante, la distancia máxima de detección es de 11 metros. Este rango puede reducirse escribiendo un determinado valor en el registro Range, midiendo, por ejemplo, hasta 1 o 6 metros, para hacer posible lecturas más rápidas y continuas. Los ángulos de detección en los que el sensor funciona correctamente se muestran en la figura 3.7.

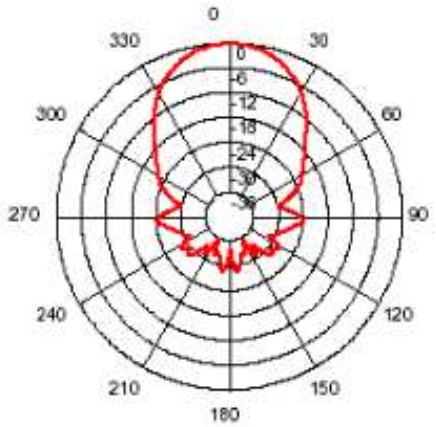

Figura 3.7: Alcance del sensor ultrasónico SRF08. *Fuente:* [29]

Arduino UNO

El modelo UNO es el más conocido de toda la gama de Arduino. UNO es una placa con un microcontrolador y con toda la circuitería de soporte necesaria, incluyendo un puerto USB-Serie y 14 pines. Los pines se pueden configurar como entradas y salidas y se pueden conectar a cualquier dispositivo que envíe o reciba señales digitales entre 0 y 5 voltios, con una intensidad máxima de 40 mA tanto de entrada como de salida. También dispone de pines analógicos y 6 de los pines son también salidas PWM. Según el microcontrolador, existen dos tipos, uno con el controlador ATMEGA en formato DIP y otro en formato SMD, tal y como se pueden ver en la figura 3.8

La alimentación se puede realizar a través del propio cable USB que suministra 5 voltios o mediante una fuente externa que proporcione una tensión entre 6 y 12 voltios. En el segundo caso, se puede alimentar a través de un conector de 2,1 mm o a través de los pines V_{in} y GND señalados en la placa.

Figura 3.8: Modelos de Arduino UNO. *Fuente:* [2]

Además de las características técnicas mostradas en la tabla 3.3, es de notable importancia la posibilidad de establecer comunicaciones a través del bus I2C.

Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de operación	5V
Tensión de entrada (recomendado)	7-12V
Tensión de entrada (límite)	6-20V
Pines de entradas/salidas digitales	14 (6 PWM)
Pines de entradas/salidas PWM	6
Pines de entradas analógicas	6
Intensidad en pines de entrada/salida	20 mA
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328P)
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
Largo	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Tabla 3.3: Características técnicas del Arduino UNO

Ordenador portátil

El ordenador portátil se trata del modelo Satellite C55-A-1EF de la marca Toshiba. Sus características principales se muestran en la tabla 3.4.

Pantalla	15.4 pulgadas retroiluminada LED
Procesador	Intel Core i5 3230M
Número de núcleos	2
Velocidad/frecuencia	2.6 GHz
RAM	4 GB DDR3 1600 MHz
Tarjeta gráfica	Intel HD Graphics 1792 MB compartidos
Disco duro	500 GB
Batería/Autonomía	6 celdas/3:45 horas
Peso	2.38 kG

Tabla 3.4: Características técnicas del Toshiba Satellite C55-A-1EF

Sistema de alimentación

El diseño original de la plataforma móvil dispone de una batería de plomo-ácido para alimentar a la controladora MD23, una tarjeta Arduino y sus dos motores, tal y como se muestra en la figura 3.9. Las principales características de la batería se muestran en la tabla 3.5.

Figura 3.9: Batería de plomo-ácido instalada bajo la plataforma móvil.

Marca	Shimastu
Modelo	NP 7-12
Tensión	12 V
Capacidad	7 Ah
Tensión de carga	14,4 - 15 V
Intensidad de carga	2,5 A máx

Tabla 3.5: Características técnicas de la batería de plomo-ácido

Aunque el laboratorio dispone de más baterías de este tipo, así como otras

más modernas, en el capítulo 7 se realizará un estudio sobre los distintos tipos de baterías para analizar las posibles mejoras que se puedan incorporar al sistema de alimentación del robot.

3.4. Conclusión

En los diferentes apartados de este capítulo se ha descrito el robot que será utilizado como base para desarrollar e implementar el sistema para cubrir los objetivos de este proyecto. Se ha detallado su sistema de tracción y la cinemática de este, así como los principales dispositivos de control y los sensores que incorpora. En los próximos capítulos se estudiarán los posibles sistemas de localización y recarga, y posteriormente se describirán las modificaciones necesarias a realizar en la plataforma inicial, ya sea añadiendo nuevos dispositivos o cambiando algunos de ellos.

Capítulo 4

Sistemas de localización

4.1. Introducción

En este capítulo se describe la teoría de sistemas clásicos de localización usados en la navegación marítima, así como métodos modernos que hacen uso de distintas tecnologías para tareas de posicionamiento y navegación. Posteriormente se estudian y analizan sistemas de localización basados en los métodos anteriores que permiten al robot localizar la estación de carga y conectarse a ella. También se detallan las características de algunos robots que hacen uso de estos sistemas y se analizan sus ventajas e inconvenientes. Finalmente se decide, basándose en los ejemplos anteriores, el sistema que se desea diseñar e implementar para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto.

4.2. Estudios de sistemas de localización

En este apartado se describen distintos modos de localización y posicionamiento, detallando la base teórica de los sistemas clásicos de navegación marítima, así como sistemas modernos de localización basados en distintas tecnologías. Se analizan sus características y se exponen sus ventajas en comparación con el resto de sistemas.

4.2.1. Sistemas clásicos de navegación marítima

En navegación marítima existen numerosos sistemas de ayuda a la navegación, algunos desarrollados gracias a tecnologías modernas como radares o posicionamiento por satélites y otros basados en sistemas más sencillos que se establecen sobre técnicas utilizadas por los primeros navegantes en la Antigüedad.

El caso más sencillo es el de un faro marítimo, torres instaladas en el litoral marítimo y con una potente luz intermitente para ser visible durante la noche. En todos los casos sirven para hacer ver a los navegantes la proximidad de tierra firme, bien sea para ayudar a navegar cerca de la costa y evitar encallar, o para indicar y facilitar el camino hacia un puerto. Las lámparas de los faros incluyen lentes de fresnel que giran 360 grados alrededor de las lámparas con una determinada velocidad, consiguiendo que cada faro tenga un patrón distinto de luz e intervalos que permitan ser reconocidos inequívocamente por los marinos.

Además del caso anterior en el que sólo hay una referencia, otros sistemas de ayuda a la navegación se basan en dos elementos en lugar de uno sólo. Estas referencias pueden ser boyas, luces de diferentes colores u otros elementos fijos.

Uno de estos sistemas se basa en la utilización de dos luces de diferente color, indicando de esta manera, por ejemplo, la ruta a seguir para el acercamiento a un puerto. Según el sistema de balizamiento convencional que afecta a España (hay dos zonas internacionales diferentes), las señales a babor son de color rojo y las de estribor de color verde, tal y como se muestra en la figura 4.1. Conociendo este sencillo código de colores, un barco puede guiarse dejando a cada lado las luces correspondientes y cruzar un canal o llegar a un puerto sin dificultad.

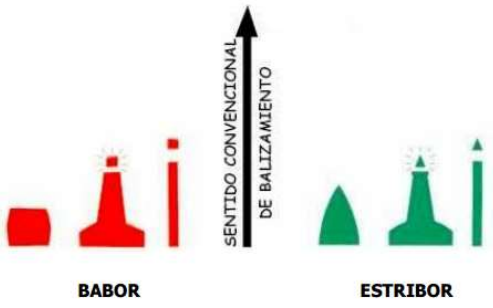

Figura 4.1: Señales a babor y estribor. *Fuente:* [24]

El siguiente sistema de ayuda de navegación que hace uso de dos elementos, es el conocido como enfilación náutica. En este caso, el sistema se basa en guiarse por la línea recta que forman dos elementos fijos, tal y como se muestra

en la figura 4.2 con lo cual se trata de alinear la embarcación justo en frente de esos dos elementos, que pueden ser naturales, como un edificio o una montaña, o artificiales, generalmente formadas por dos balizas, una anterior y otra posterior de mayor altura. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo.

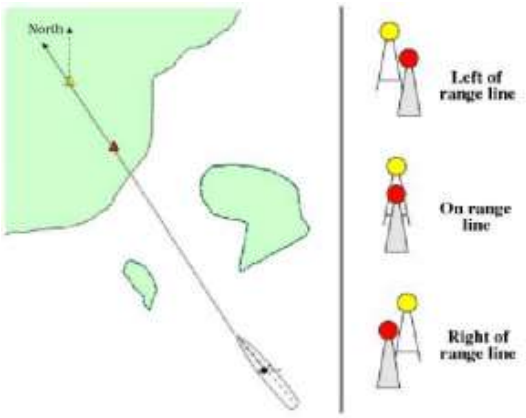

Figura 4.2: Sistema de enfilación náutica. *Fuente:* [7]

Figura 4.3: Balizas de enfilación náutica. *Fuente:* [43]

4.2.2. Sistemas de localización modernos

En la actualidad existen diferentes sistemas de localización y ayuda a la navegación que son más o menos adecuados para cada aplicación. Entre todos ellos destaca la tecnología basada en el GPS, que permite conocer la posición en cualquier punto de la Tierra si se recibe la señal de 4 o más satélites. Su precisión es de unos pocos metros, pero con el sistema de GPS diferencial se consiguen posicionamientos con sólo unos centímetros de error.

Sin embargo, el sistema GPS está indicado para uso en exteriores, por lo

que existen otros sistemas conocidos como Sistemas de Posicionamiento en Interiores (en inglés, IPS, Indoor Positioning System) que permiten realizar un posicionamiento en el interior de edificios. Estos sistemas se basan también en la triangulación de distintos nodos fijos, que pueden ser etiquetas que se leen desde el robot móvil con algún tipo de sensor o también pueden ser nodos que emiten una determinada señal que recibe y descodifica el propio robot para calcular su posición respecto a ellas.

Igualmente se puede utilizar el reconocimiento de imágenes sin la necesidad de tener más de un punto de referencia. Usando una cámara se puede reconocer una única imagen con un determinado patrón que sirva de guía para lograr que el robot se desplace a un determinado lugar.

Otro sistema más sofisticado es el denominado SLAM, basado en la localización y mapeo simultáneos, es decir, en la navegación autónoma en un entorno desconocido, en el que el robot o vehículo construye un mapa del lugar a la vez que calcula su trayectoria. Para ello hacen uso de cámaras 3D, escáneres láser u otros tipos de sensores.

4.3. Sistemas de localización en sistemas de recarga

A continuación se describen algunos ejemplos de sistemas de localización que utilizan robots de distinto tipo que disponen de estaciones de carga. Estos robots usan sistemas basados en los métodos explicados anteriormente para localizar la estación de carga y conectarse a ella satisfactoriamente. Además se analizan las ventajas e inconvenientes de cada sistema.

4.3.1. Enfilación

Este ejemplo utiliza como base el método de navegación de enfilación náutica ya explicado anteriormente. La estación de carga está formada por una base donde se encuentran los conectores y un mástil con dos luces localizadas a distinta distancia y altura sobre la base, tal y como se muestra en la figura 4.4. Por otro lado, el robot dispone de una cámara capaz de detectar las luces desde una determinada distancia. El software que controla el movimiento del robot detecta y analiza la posición de las dos luces, que al encontrarse a diferentes alturas, el robot reconoce si la estación de carga se encuentra a su derecha o izquierda según la posición de estas. Según sea el caso, el robot realizará los movimientos necesarios y girará en uno u otro sentido hasta encontrar la línea recta que une las dos luces en el plano del suelo. Si el software reconoce que una luz se encuentra justo sobre la otra en una línea vertical, el robot está alineado

con la estación de carga y tan sólo tiene que avanzar en línea recta para llegar hasta ella. En la figura 4.5 se muestra el robot realizando el acercamiento a la estación de carga.

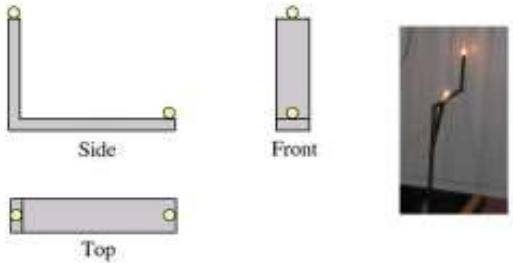

Figura 4.4: Esquema de las luces de guía. *Fuente:* [7]

Figura 4.5: Sistema de recarga basado en la enfilación náutica. *Fuente:* [7]

El funcionamiento teórico del sistema es sencillo y una de sus ventajas es el

bajo coste del sistema, basado, en este caso, en dos lámparas halógenas y una webcam. Sin embargo, para calcular las distancias y planear correctamente la trayectoria óptima para realizar la conexión a la estación es necesario un procesador capaz de analizar imágenes. Otra desventaja son los problemas causados por los cambios de la iluminación ambiental que puedan hacer que no se detecten correctamente las lámparas. Por otro lado, las luces tienen que situarse a una determinada altura y distancia entre ellas, por lo que no es posible crear una estación de carga más pequeña o compacta.

4.3.2. Sistemas de luces infrarrojas

Este sistema es uno de los más utilizados en robots de tipo doméstico y está basado en el método de navegación con luces o balizas de distinto color. La estación de carga dispone de varios emisores infrarrojos que emiten su señal para ser detectadas por el robot. En lugar de disponer las luces a distintas alturas como en el método anterior, cada led infrarrojo emite una señal con un patrón distinto, lo que equivale a tener luces o balizas de distintos colores en el caso del sistema clásico de navegación marítima. El robot tiene instalados distintos sensores alrededor de su plataforma que reciben dichas señales y con el software adecuado las descodifica y analiza para permitirle conocer su posición respecto a la estación de carga.

El ejemplo más conocido es el de los robots aspiradores, siendo el modelo Roomba de iRobot el más popular, que se muestra en la figura 4.6. Existen varias versiones de este modelo y las diferentes marcas que fabrican robots similares usan sistemas basados en la misma tecnología.

Dentro del ámbito doméstico, existen otros robots como pueden ser el cortacésped de la imagen 4.7. Igualmente, la segunda versión del TurtleBot basado en la plataforma Kobuki descrita en el capítulo anterior también hace uso de este sistema.

La gran ventaja de este sistema es el coste, aún menor que el caso anterior, ya que se basa en el envío y recepción de señales infrarrojas. Tanto los emisores como los receptores infrarrojos son dispositivos muy económicos, y además, son muy pequeños, por lo que se pueden instalar en un espacio reducido consiguiendo una estación de carga muy compacta y robusta. Además permite instalar los sensores sobre cualquier tipo de plataforma móvil con unas modificaciones mínimas de diseño. Sin embargo, el control del envío y recepción de las señales necesita de un sistema electrónico que controle los patrones y las frecuencias de estas señales. Por lo cual, no sólo el robot necesita de un sistema de reconocimiento, sino que la estación de carga también es necesario que disponga de un dispositivo electrónico para controlar los leds infrarrojos. Otra desventaja son los errores producidos por las reflexiones de las señales sobre algunas superficies que actúan como espejos.

Figura 4.6: Modelo Roomba de iRobot. *Fuente:* [19]

Figura 4.7: Cortacésped Robomow. *Fuente:* [30]

4.3.3. Reconocimiento de imágenes / AGVs

Los vehículos denominados AGVs también pueden utilizar el reconocimiento de imágenes, pero lo más común es que se basen en el guiado magnético o por balizas, siguiendo trayectorias fijas. Además, existen modelos diseñados para trabajar ininterrumpidamente sin pausas para cargar sus baterías, por lo que sus sistemas de alimentación disponen de estaciones para el intercambio de baterías.

Un modelo similar a los casos anteriores, pero que usa el reconocimiento de imágenes únicamente para detectar la estación de carga es el robot Oculus

Prime, mostrado en la figura 4.8. Dispone de una cámara de video que graba a su alrededor y sobre la estación de carga se instala una imagen con un determinado patrón reconocible. A través del software, el robot reconoce la imagen y controla su movimiento hasta lograr conectarse a la estación.

Figura 4.8: Robot Oculus Prime. *Fuente:* [45]

Su principal ventaja es que la estación es totalmente pasiva, es decir, no necesita ni electrónica ni ningún tipo de emisor. En su contra, el control del reconocimiento de imágenes es complejo y necesita de un procesador más potente. La iluminación ambiente cambiante o la luz directa del sol pueden producir que el robot no detecte correctamente el patrón de la imagen y además no puede funcionar en espacios oscuros o de noche sin iluminación artificial. También existe una limitación producida por los ángulos máximos de visión, ya que en los laterales de la estación la imagen no se reconoce correctamente. Igualmente sus diseñadores avisan de que está programado para realizar varios intentos de conexión en el caso de que no lo logren en el primer acercamiento. Respecto a su tamaño, la necesidad de disponer de un panel con un patrón de un cierto tamaño sobre la estación impide que se pueda diseñar de forma tan compacta como el caso anterior.

4.4. Conclusiones

Tras el estudio de los diferentes sistemas de localización, analizando sus ventajas e inconvenientes, se decide desarrollar un sistema basado en luces infrarrojas. Este sistema es muy adecuado para aplicaciones de robótica en interiores ya que la plataforma puede emitir sus señales hasta distancias de varios metros alrededor de la estación de carga, siendo más que suficiente para estos casos. Además las limitaciones provocadas por la iluminación no son importantes, per-

mitiendo incluso funcionar perfectamente en espacios oscuros sin iluminación artificial extra.

Por un lado, aunque la estación de carga requiere un sistema electrónico para controlar las señales que emiten los leds infrarrojos, esto no es un inconveniente respecto al tamaño o volumen de la propia estación. Todos los componentes son de tamaño reducido, por lo que la caja que soporte todos los elementos necesarios tanto para el control de leds como para los conectores que alimentan al robot, permite un diseño flexible que se puede adaptar a distintos tipos de plataformas móviles. Además, no necesita de ningún elemento extra, como pueden ser los mástiles en el caso del robot que usa las luces a distintas alturas para orientarse, por lo que la caja podrá ser diseñada para ser fabricada casi en su totalidad en impresoras 3D.

Por otro lado, los sensores que se instalan en la plataforma son de tamaño muy reducido, por lo que también permite una instalación adaptable a distintos tipos de plataformas móviles. En este caso, la electrónica que controla estos receptores puede ser independiente, con algún controlador específico para tal tarea, o si es posible y así se desea, aprovechar la electrónica de la que dispone el robot móvil.

Por todo ello, este sistema tiene un bajo coste, los componentes se pueden adquirir fácilmente y gracias a la impresión 3D, podrá ser fabricado sin dificultad. Además es adaptable a cualquier robot móvil de características similares, pudiéndose realizar pequeñas modificaciones sin alterar su funcionamiento básico. En los otros casos se necesitaría una cámara web colocada a una determinada altura y posición, sin embargo, en este sistema, los receptores infrarrojos apenas alteran el diseño externo de la plataforma, y la electrónica de control se puede situar según las necesidades de cada caso.

Capítulo 5

Diseño del sistema de codificación para localización

5.1. Introducción

En este capítulo se describe el desarrollo llevado a cabo para diseñar el sistema de localización elegido. Tras el estudio de los distintos sistemas teóricos o implementados en distintos robots comerciales o en investigación, se procede a diseñar un sistema propio basado en el sistema de luces infrarrojas. Por un lado, se describen los componentes electrónicos utilizados y se estudian los distintos protocolos de codificación de las señales infrarrojas. Finalmente se diseña el sistema de códigos que permite que cada receptor reconozca la señal de cada uno de los emisores.

5.2. Luz infrarroja

La luz infrarroja es un tipo de luz que no podemos ver a simple vista, es decir, es un tipo de radiación electromagnética y térmica con una longitud de onda mayor que la luz visible y menor que las microondas. Este tipo de onda se relaciona normalmente con el calor, ya que cualquier cuerpo emite este tipo de radiación si se encuentra a una temperatura mayor de 0 Kelvin, es decir, -273,15 grados Celsius (cero absoluto). Por ello, los equipos de visión nocturna se basan en la detección de este tipo de radiación cuando la cantidad de luz visible es

insuficiente para ver los objetos, observándose los de mayor temperatura como los más brillantes. Sus aplicaciones en astronomía también son muy extensas, utilizándose detectores de calor para descubrir estrellas u otros cuerpos que se mueven en la oscuridad y que no pueden ser observados de otro modo.

Sus ondas electromagnéticas están en el rango de 0,7 a 100 micrómetros y se clasifican en ondas cortas, media rápidas, medias y largas. En la figura 5.1 se muestra el espectro de las ondas infrarrojas y su clasificación.

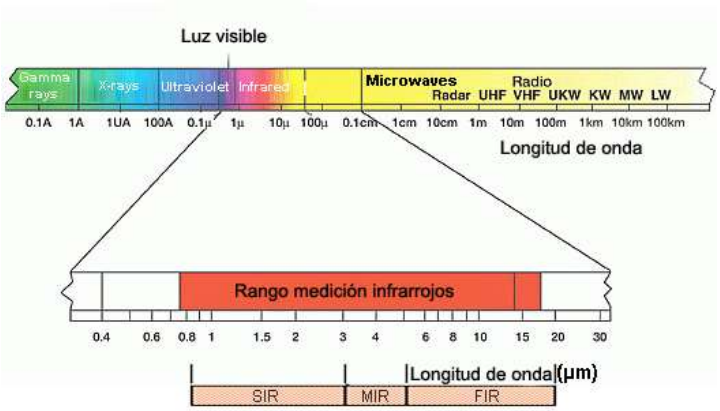

Figura 5.1: Espectro luz infrarroja. *Fuente:* [1]

Sin embargo, este tipo de radiación además de ser emitida de forma natural por cuerpos calientes, también puede producirse por diodos emisores de luz y algunos láseres. En este caso, los usos en el sector industrial son numerosos. Por ejemplo, se utilizan emisores infrarrojos en aplicaciones de secado de pinturas, termofijación de plásticos, precalentamiento de soldaduras o templado y laminado de vidrios, entre otras. Otro de sus usos en robótica es la detección de obstáculos, existiendo módulos que contienen un emisor y un receptor formando un pequeño ángulo entre ellos, en los que el receptor recibe la señal enviada por el emisor si esta rebota sobre alguna superficie cercana. Pero entre sus aplicaciones más comunes destacan principalmente las comunicaciones, donde uno de los usos más conocidos es el de los mandos a distancia de aparatos electrónicos como pueden ser una televisión o un reproductor digital. Aunque se han utilizado también para comunicaciones de corta distancia entre ordenadores u otros dispositivos electrónicos, la aparición de otros sistemas de comunicaciones más fiables y rápidos ha limitado sus usos en este tipo de aplicaciones.

5.2.1. Emisores y receptores infrarrojos

Los leds infrarrojos son componentes con dos patillas que, como cualquier diodo, sólo permiten el paso de corriente en un sentido, y además emiten luz infrarroja. Aunque el espectro infrarrojo es mucho mayor, los leds infrarrojos emiten luz con una longitud de onda en torno a los 1000 nm con un ancho de banda de 50 nm, es decir, producen una onda entre 950 y 1050 nm.

Como ya se ha comentado, los leds emiten luz que no es visible al ojo humano. Por lo tanto, los receptores infrarrojos están diseñados para recibir este tipo de luz. Sin embargo, como se ha descrito anteriormente, la radiación de cualquier otro objeto caliente, como puede ser una bombilla tradicional o la propia luz del sol también contiene radiación infrarroja. Por ello, los sensores infrarrojos también reciben esta luz como señal infrarroja, por lo que no es posible diferenciar cuál es la enviada por un emisor infrarrojo de la emitida por otros cuerpos calientes. Para evitar este inconveniente, se hace uso de un protocolo diseñado para comunicaciones entre dispositivos infrarrojos. Dicho protocolo se basa en el envío de señales moduladas a una determinada frecuencia, que permite la diferenciación de frecuencias de otras fuentes de origen natural. Normalmente se utiliza la modulación a 38 kHz, pero existen distintos protocolos y modulaciones a distintas frecuencias que los fabricantes utilizan en sus dispositivos, siendo las más comunes las frecuencias de 36 kHz, 37.5 kHz, 38 kHz y 40 kHz.

El envío de señales de comunicación mediante infrarrojos se basa únicamente en el envío de señales digitales a nivel bajo o alto, es decir, 0 o 1, no permitiendo ningún valor intermedio. Cuando se envía un pulso de una determinada duración en nivel alto, este pulso se modula en pulsos de duración más corta, enviando una serie de pulsos en alto y bajo, en el caso más común, a 38 kHz. Esta frecuencia equivale a 26,316 microsegundos, es decir, un pulso en nivel alto se divide en pulsos en nivel alto y bajo de unos 13 microsegundos cada uno. En el caso de que se envíe un pulso en bajo, la modulación no se produce, enviando simplemente la señal a nivel bajo. En la figura 5.2 se muestran la señal que se desea enviar y la señal modulada a la frecuencia de 38 kHz.

Con respecto a los sensores infrarrojos, se tratan de dispositivos que actúan como fotocélulas que filtran la luz que reciben, dejando pasar sólo la luz infrarroja. Su funcionamiento es el mismo que una fotocélula común, equivalente a una resistencia variable, dejando pasar más o menos corriente entre sus dos patillas según la intensidad de la radiación recibida. En el caso de este tipo de dispositivo de únicamente dos patillas, es necesario el filtrado de la señal y su demodulación posterior. Sin embargo, en el mercado se encuentran disponibles receptores infrarrojos diseñados para trabajar a una determinada frecuencia. Este tipo, además del propio sensor de luz infrarroja, incorpora un circuito de control interno que filtra y demodula la señal acorde con la frecuencia para la que ha sido diseñado, evitando la necesidad de usar componentes externos al propio componente. En estos casos, el receptor consta de 3 patillas, dos de ellas

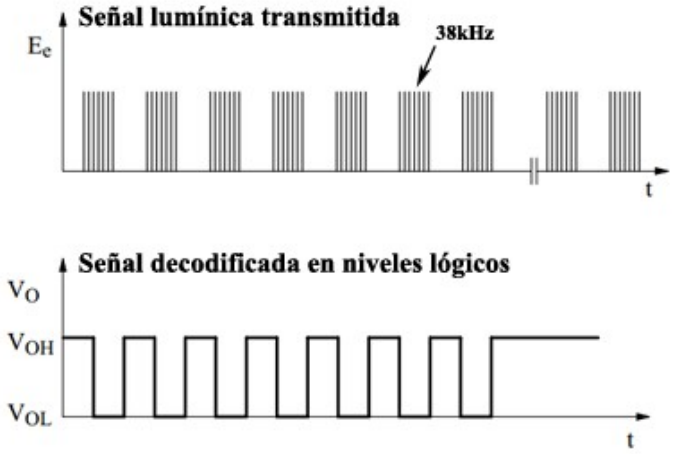

Figura 5.2: Señal modulada a 38 kHz. *Fuente:* [6]

para su alimentación y la tercera actúa de salida. En el caso de recibir la señal modulada mostrada en la segunda de las imágenes mostradas en la figura 5.2, la salida de este tipo de receptor sería similar a la mostrada en la primera, con una tensión en la patilla de salida cercana a la tensión de alimentación del propio receptor.

5.3. Códigos para señales infrarrojas

A continuación se analizan diferentes opciones que existen para diseñar un código para las señales de cada uno de los emisores. Uno de los protocolos más conocidos por su extendida utilización en los mandos a distancia universales es el conocido como protocolo NEC, pero también son muy comunes los protocolos SIRC de Sony o el RC-5 de Philips, adoptado por otras muchas marcas. A continuación se describe su funcionamiento y se analizan sus ventajas e inconvenientes. Por otro lado, se estudia la posibilidad de diseñar una codificación propia, bien tomando algunos de los protocolos como base o diseñando todo el sistema desde cero.

5.3.1. Protocolos estándar

En primer lugar, se va a proceder a la descripción del sistema NEC, por ser el protocolo más usado en los mandos universales. Su funcionamiento se basa en el envío de una serie de pulsos, que constan de 0 y 1 que se codifican de la

siguiente manera:

- 0 lógico: pulso de 562,5 us seguido de un espacio de 562,5 us, con un tiempo de transmisión total de 1,125 ms.
- 1 lógico: pulso de 562,5 us seguido de un espacio de 1,6875 ms, con un tiempo de transmisión total de 2,25 ms.

El código enviado está formado por la siguiente cadena de pulsos:

1. Un pulso de 9 ms.
2. Una pausa de 4,5 ms.
3. La dirección del dispositivo receptor (8 bits).
4. El inverso lógico de la dirección.
5. El comando (8 bits).
6. El inverso del comando.
7. Un pulso de 562,5 us.

El primer pulso de 9 ms y el último pulso sirven para detectar el inicio y el final del código enviado. La dirección del dispositivo receptor sirve para asociar un dispositivo con un determinado mando a distancia, o con una determinada orden si un mando se utiliza para distintos dispositivos. El comando es una serie de 8 bits que corresponde a la acción que se quiere enviar al dispositivo receptor. El envío del código inverso lógico, tanto de la dirección como del comando, sirven para detectar errores, pero además tiene otra funcionalidad. Como se ha visto anteriormente, el 0 lógico y el 1 lógico tienen distintas duraciones, por lo que al enviar distintos códigos del mismo número de bits, se obtendrían distintas duraciones de códigos. Al enviar tanto el código de la dirección y el comando, y sus correspondientes inversos se consigue que la duración total del código enviado siempre sea la misma, concretamente de 67,5 ms.

En la figura 5.3 se muestra la serie de pulsos correspondientes al envío de la dirección 00000000 y el comando 10110101.

Los otros dos protocolos nombrados anteriormente se diferencian en distintos aspectos. Por un lado, el protocolo SIRC dispone de 3 versiones distintas, según el número de bits del mensaje enviado. Igual que el protocolo NEC, consta de un pulso que indica el comienzo del código, y posteriormente envía los bits correspondientes al comando y luego la dirección. Sin embargo, no envía los códigos inversos. La duración del bit que representa al 1 lógico es el doble que

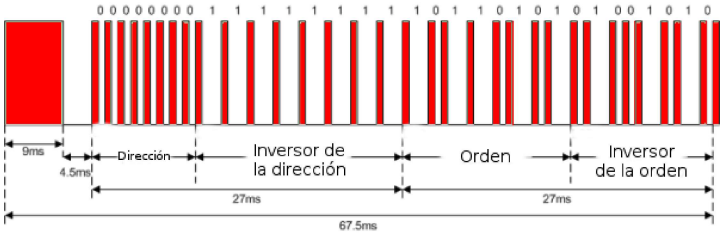

Figura 5.3: Mensaje con el protocolo NEC. *Fuente:* [37]

la del 0 lógico, por lo cual, la duración total del código dependerá del comando y la dirección.

El protocolo RC-5 está diseñado para funcionar a 36 kHz y en este caso, la duración de los bits correspondientes al 0 lógico y al 1 lógico es la misma. El inicio del código está formado por dos bits que siempre son igual a 1 seguidos de un bit que se invierte cada vez que se pulsa una de las teclas.

Por lo tanto, aunque existen importantes diferencias entre los distintos protocolos, comparten ciertas similitudes. En los tres casos, se envía un código que define el inicio del envío del código completo, y dos códigos principales, la dirección y el comando. Sin embargo, se diferencian con respecto a la duración de los dos posibles bits lógicos y el envío del código lógico inverso.

La ventaja del uso de alguno de estos protocolos es que basta con elegir una determinada secuencia de 0 y 1 para los códigos de la dirección y el comando, sin tener que diseñar desde cero la secuencia de los distintos códigos, ni los pulsos de inicio, ni la duración de los bits lógicos. Además, otra de las ventajas es que el código para realizar las comunicaciones con estos protocolos está bien desarrollado y documentado y se encuentra disponible para ser utilizado en tarjetas Arduino.

5.3.2. Otras codificaciones

A pesar de las ventajas de usar protocolos con mensajes formados por códigos establecidos, la comunicación a través de señales infrarrojas para localizar al robot no necesita de un código tan extenso. Con unos pocos de bits es suficiente para la aplicación que se desarrolla en el presente proyecto, con lo que el código puede ser de una duración menor, pudiendo enviar más códigos en el mismo tiempo. Así pues, un código propio puede ser más corto y sencillo, y por lo tanto, también puede facilitar la programación de la electrónica que controle dicha comunicación o aprovechar mejor su limitada potencia para enviar códigos a una frecuencia mayor. Por otro lado, en nuestra aplicación se necesita que distintos receptores reciban la señal enviada por distintos emisores a la vez. Los

protocolos estudiados no están diseñados para funcionar en estos casos, con lo que sincronizar los envíos de distintas señales y procesar las señales superpuestas de varios emisores a la vez no es trivial.

Aún en el caso de usar codificación propia, las opciones son múltiples. Una de ellas es basarse en alguno de los protocolos anteriormente detallados, o en la combinación de varios de ellos. La codificación para los bits lógicos y el pulso de inicio podrían usarse exactamente igual que en dichos protocolos, o también se podría usar el mismo modelo modificando, por ejemplo, los tiempos de cada uno de los bits. Por lo tanto, una de las opciones es diseñar el código de tal forma que se envíe un pulso que indica el inicio, después una pausa de una determinada longitud y finalmente un número de bits codificados de una determinada manera, siendo suficiente un código de 2 bits en el caso de que no se tengan más de 4 emisores.

Sin embargo, ya que no se necesita usar ninguno de esos protocolos por la simplicidad del código que se necesita enviar, otra opción es diseñar un sistema de códigos sin basarse en ninguno de esos sistemas. En este caso no es necesario que el código enviado esté formado por una determinada secuencia de bits anteriormente definidos tal y como se realiza en los protocolos estudiados. Es decir, en lugar de una secuencia de 0 y 1 lógicos definidos de una determinada manera, se puede diseñar un código de una duración total fija que consta de pulsos y pausas de distintas duraciones arbitrarias, correspondiendo cada uno de esos códigos a un comando. Las distintas secuencias de distintos números de pulsos y pausas, también de distintas duraciones, permite la creación de un gran número de códigos personalizados. En este caso, la electrónica del receptor tiene que comparar las secuencias recibidas con los patrones de señales definidos previamente, en lugar de realizar la conversión a un código binario directamente. Para ello, se define un vector de tiempos para cada comando, formado por las duraciones de los pulsos y de las pausas de forma consecutiva. Es decir, el primer valor del vector es el tiempo del primer pulso, después el tiempo de la pausa que le sigue, después de nuevo el tiempo del siguiente pulso y así con todos los pulsos y pausas hasta el final del código. Cuando el receptor recibe el código, la electrónica de control guarda en un vector los tiempos de los pulsos y pausas recibidos hasta detectar el final del código. Una vez recibido al completo, realiza una comparación con los patrones de código que tiene guardados, que se corresponden a los códigos enviados. Si el código recibido es equivalente al patrón guardado, con un determinado margen de error para cada uno de los tiempos, se procede a ejecutar el comando que corresponda con tal código.

5.4. Diseño del código

Con el envío de un código con únicamente 2 bits se pueden detectar hasta 4 emisores distintos, suficiente para el sistema que se trata de desarrollar. Para

ello es necesario definir el pulso de inicio y la secuencia de pulsos, pausas y duración de la señal correspondiente a el 0 lógico y al 1 lógico. Sin embargo, se decide crear un código personalizado en el que no se definen tales valores lógicos. El código se compone de un pulso inicial de una duración fija establecida que sirve para detectar el inicio del envío del código. Posteriormente se produce una pausa también de una duración establecida. Seguidamente se envían una serie de pulsos personalizados para cada emisor con una duración total fija, y finalmente se produce una pausa de una duración también determinada que indica el final del código. La figura 5.4 muestra un ejemplo de un código personalizado.

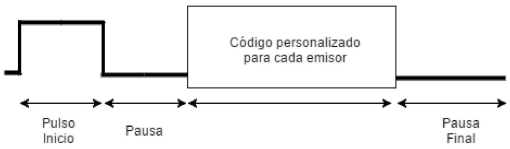

Figura 5.4: Código personalizado.

La solución adoptada para que las señales de los distintos sensores puedan ser recibidas al mismo tiempo y no haya superposiciones de las diferentes señales se explica a continuación. Por un lado, todos los emisores están sincronizados, es decir, todos comienzan la emisión del su propio código al mismo tiempo. A su vez, como la duración de los códigos de cada emisor es la misma, igualmente acaban el envío del código al mismo tiempo. Así pues, el pulso inicial, la pausa que le sigue y la pausa final están sincronizadas y son emitidos al mismo tiempo por todos los emisores. Por otro lado, el código personalizado para cada emisor no puede superponerse con el de otro emisor durante un pulso. Es decir, cuando uno de los emisores envía un pulso durante la emisión de su código personalizado, el resto de emisores tiene que encontrarse durante alguna de sus pausas.

El caso más sencillo para resolver este problema es que cada emisor emita un único pulso cuando los demás no están emitiendo ninguno. Así pues, al inicio del código completo, todos los emisores emiten un pulso de igual duración al mismo tiempo y luego les sigue una pausa. A continuación uno de los emisores emite un pulso mientras los otros siguen sin emitir. Posteriormente este emisor deja de emitir, se produce otra pausa establecida y a continuación emite sólo el segundo emisor mientras los demás están en la pausa. Así hasta que todos los emisores emitan un pulso particular en un determinado momento. Finalmente se produce una pausa en todos los emisores para indicar el final del código. Este proceso se repite de forma continuada mientras el sistema esté en funcionamiento.

Para el caso de tres emisores, las señales de cada uno de ellos se representan en la figura 5.5.

Hay que recordar que, aunque los pulsos se han representado como un pulso a un nivel alto constante, en las transferencias de códigos infrarrojos, estos pulsos

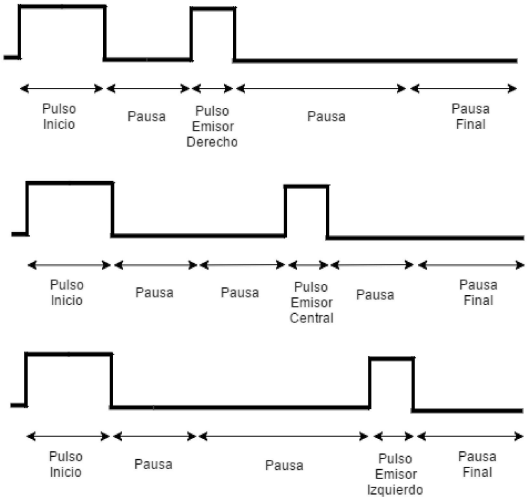

Figura 5.5: Código para cada uno de los emisores.

están modulados a 38 kHz, es decir, están formados por pulsos y pausas de unos 13 microsegundos.

Sin embargo, la salida obtenida en los receptores es la correspondiente a las señales ya filtradas y demoduladas. Por lo tanto, si los tres emisores están funcionando correctamente y un receptor recibe las tres señales a la vez, la superposición de estas tiene la forma mostrada en la figura 5.6.

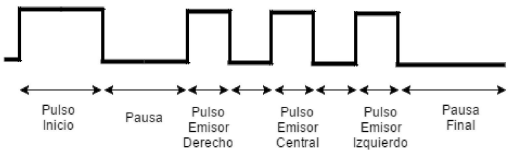

Figura 5.6: Señales superpuestas.

5.5. Sistema de zonas

El sistema de localización basado en luces infrarrojas se basa en la utilización de distintos emisores infrarrojos que emiten su luz en una zona determinada. El robot detecta estas señales con sus receptores y posteriormente realiza las operaciones programadas para el acercamiento a la estación.

Entre las distintas posibilidades que existen para el diseño de este sistema, la opción más básica es la de usar un único emisor. Este emisor crea una región alrededor de la base desde la que se puede recibir su señal. Con un sistema adecuado en la instalación de los receptores, el robot es capaz de detectar la dirección desde la que proviene dicha señal. Con lo cual, este sistema es válido para localizar la posición de la estación, sin embargo, es necesario que el robot siga una trayectoria determinada para conectarse a la estación. Los conectores del robot móvil y los de la estación tienen que conectarse de forma segura y estable, con lo cual, la dirección del movimiento del robot cerca de la estación tiene que seguir una línea perpendicular al frontal de la estación, para que los conectores del robot y de la estación se aproximen de forma paralela y realicen una conexión correcta. Con el sistema de sólo un emisor, el robot es incapaz de calcular el ángulo en el que tiene que conectarse a la estación e igualmente es incapaz de saber a qué distancia se sitúa de esta.

La siguiente opción es la utilización de dos emisores. En este caso, si los dos emisores se instalan a la misma altura, pero separados por una pequeña distancia entre ellos, la recta perpendicular a la línea que une los dos focos determina la dirección que tiene que seguir el robot para conectarse en el ángulo deseado. Igualmente, las regiones en las que se puede recibir la señal se pueden controlar de distintas formas. La dirección del haz de los emisores se puede controlar instalando los emisores con un determinado ángulo entre ellos, en lugar de orientarlos de forma paralela. El alcance de las señales emitidas es una de las características que se encuentran en las fichas técnicas de los distintos modelos de emisores, por lo que también puede controlarse este parámetro. Igualmente, con cierta limitación, se puede hacer uso de resistencias variables para controlar la intensidad que consumen los emisores. El ángulo del haz emitido también es una de las características que identifica a los distintos modelos de emisores, pero también se puede limitar dicho ángulo tapando algún lateral, o por ejemplo, introduciendo el emisor en un cilindro de una determinada longitud.

Pero la mayor ventaja de usar dos emisores es la creación de 3 regiones determinadas. Por un lado se crean dos zonas correspondientes a las dos señales individuales de cada emisor y una tercera región donde se superponen las dos señales. Instalados de una forma correcta, esta zona de señales superpuestas corresponderá a la región central en la que se encuentra la línea de aproximación que el robot móvil debe seguir. En la figura 5.7 se muestra la estación de carga y las regiones creadas por la emisión de las señales infrarrojas de dos emisores.

Con la adicción de un tercer emisor, se consigue duplicar el número de zonas si se sitúa correctamente. Instalándolo de forma que su señal tenga un alcance menor, pero que abarque un ángulo mayor que los otros dos emisores, se crea una región cercana a la estación y al superponerse a las anteriores zonas, divide a estas en dos regiones, una cercana y otra lejana, creando finalmente 6 zonas perfectamente definidas. Este caso se representa en la figura 5.8

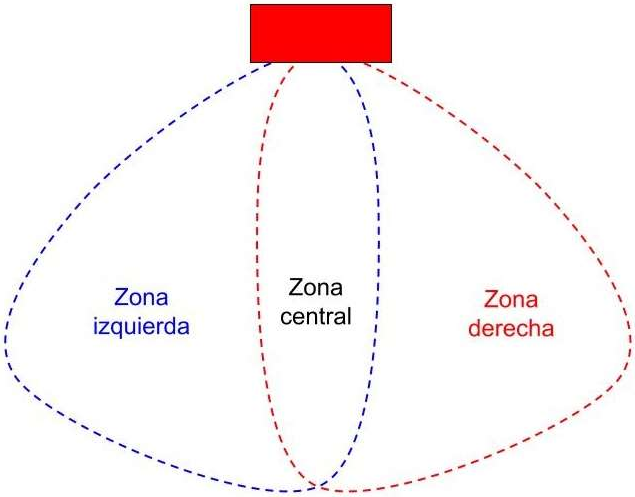

Figura 5.7: Regiones creadas por dos emisores.

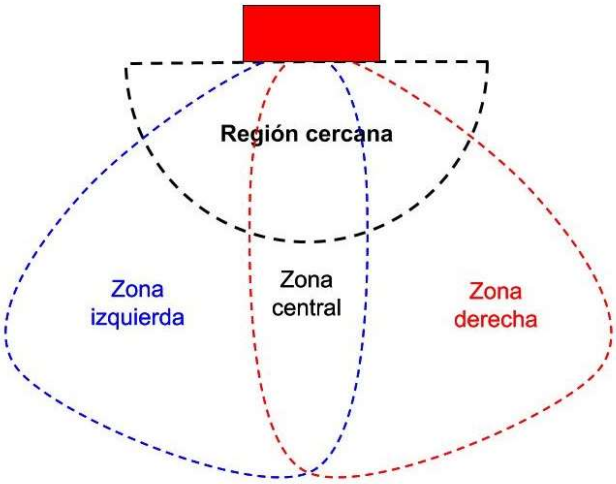

Figura 5.8: Regiones creadas por tres emisores.

Estas separaciones entre las zonas cercanas y lejanas son útiles por varias razones. Además de ayudar a conocer la distancia a la que se encuentra la estación, sirve para indicar al robot que realice movimientos más lentos y precisos cuando se encuentre en la región central cercana, con el objetivo de conectarse a la estación de una forma más precisa y segura.

5.6. Conclusiones

En este capítulo se han detallado las características de las señales emitidas por leds infrarrojos y se han introducido los dispositivos que envían y reciben este tipo de señal. Posteriormente se han estudiado los protocolos más comunes utilizados para codificar señales infrarrojas y enviar mensajes de código binario. Se ha diseñado un sistema propio de codificación de señales infrarrojas y finalmente se ha desarrollado el sistema de zonas que es posible crear con dos o tres emisores infrarrojos. En el siguiente capítulo se procede a diseñar e implementar el sistema basado en señales infrarrojas que modula, envía, recibe y decodifica los mensajes según el sistema diseñado en este capítulo.

Capítulo 6

Implementación del sistema de localización

6.1. Introducción

En este capítulo se procede a implementar el sistema de localización diseñado en el capítulo anterior. Primero se describen los componentes electrónicos que permiten tanto la emisión como la recepción de los mensajes que se han descrito previamente. Posteriormente se detallan los montajes electrónicos para realizar diferentes pruebas de cada uno de los circuitos y se comprueba el correcto funcionamiento del envío y la recepción de los mensajes codificados. Finalmente se estudian los distintos prototipos diseñados para realizar la recepción de las señales desde el robot móvil y la determinación de la posición del robot respecto a la estación de carga.

6.2. Componentes electrónicos

A continuación se describen los componentes utilizados para el diseño del sistema elegido, así como su montaje electrónico, ya sea en el caso de la estación de carga o en la plataforma móvil.

Estación de carga

La estación de carga consta de una caja dónde se instalan distintos elementos. Por un lado, destacan los conectores que hacen contacto con los conectores del robot móvil. Los distintos tipos de conectores posibles, así como su estudio y diseño se explican en el siguiente capítulo. Por otro lado, la estación dispone de componentes electrónicos que son los que permiten que el robot detecte dónde se encuentra y pueda realizar los movimientos necesarios para conectarse a la estación para cargar sus baterías.

Este sistema, como ya se ha explicado, está basado en luces infrarrojas. Estas luces son leds infrarrojos que emiten su señal alrededor de la estación, y como también se ha analizado en el estudio de los diferentes sistemas de localización, requiere de electrónica para realizar el control de las señales emitidas. Para tal control, se hará uso de tarjetas Arduino. Su elección se debe a su bajo coste y su fácil programación, además de la gran cantidad de manuales disponibles, así como la numerosa comunidad de usuarios que comparten proyectos e ideas.

El emisor que se utiliza es el TSAL 6400. Entre la gran variedad de emisores de este tipo, para elegir este modelo se han tenido en consideración distintas características. Entre ellas destacan la tensión e intensidad de funcionamiento así como el alcance y ángulo de la señal emitida. En la tabla 6.1 se muestran algunas características técnicas y en la figura 6.1 se muestra un esquema de los ángulos que alcanza su señal.

Fabricante	Vishay Semiconductors
Modelo	TSAL 6400
Longitud de onda	940 nm
Tensión máxima	5 V
Intensidad máxima	100 mA
Diámetro	0.5 cm
Ángulo de media intensidad	$\pm 25^{o}$

Tabla 6.1: Características técnicas del emisor TSAL 6400

Plataforma móvil

La plataforma móvil tendrá instalados receptores infrarrojos estratégicamente localizados que le permiten recibir la señal que emite la estación. Según los receptores que reciban cada una de las señales, el robot conocerá dónde se encuentra respecto a la estación y calculará los movimientos que tiene que realizar para proceder al acercamiento hacia esta. El receptor infrarrojo que se utiliza es el modelo TSOP4838. Está diseñado para trabajar a la frecuencia de 38 kHz y

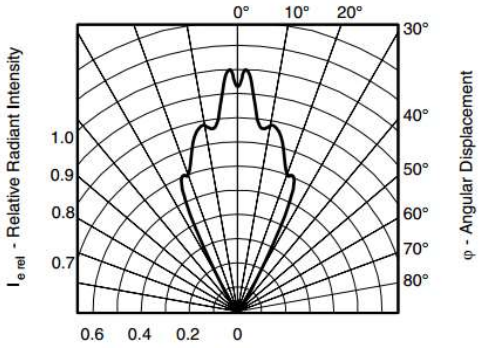

Figura 6.1: Ángulos e intensidad del haz emitido por el led IR.

dispone de control interno proporcionando a su salida la señal filtrada y demodulada. En la tabla 6.2 se muestran algunas de sus principales características.

Fabricante	Vishay Semiconductors
Modelo	TSOP 4838
Frecuencia	38 kHz
Tensión alimentación	2.5 - 5.5 V
Intensidad máxima	0.9 mA
Distancia transmisión	45 m
Ángulo de recepción	±45º

Tabla 6.2: Características técnicas del receptor TSOP4838

En la figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques del circuito del receptor y a continuación se describen sus principales componentes:

- PIN: sensor de infrarrojos (foto-diodo), convierte la señal luminosa incidente en señal eléctrica.
- AGC (control automático de ganancia): proporciona una señal de salida constante. Si la señal de entrada es pequeña, aumenta la ganancia y viceversa.
- Band Pass (filtro paso banda): filtra las frecuencias no deseadas (Ej: luz visible).
- Demodulator (demodulador): recupera la información transportada por la onda portadora.
- Transistor: invierte la señal. Si del demodulador sale un 1, la salida se conecta a masa. Por lo tanto, si no recibimos nada, la salida va a ser 5V.

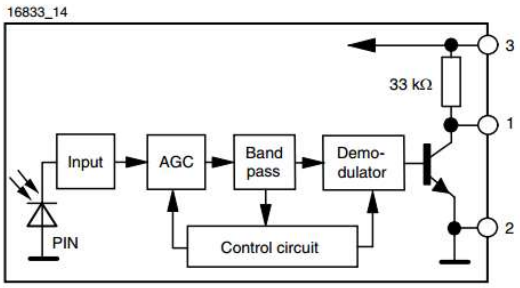

Figura 6.2: Diagrama de bloques del circuito del receptor TSOP4838. *Fuente:* [9]

6.3. Circuitos electrónicos

Emisores

Para la realización de las primeras pruebas del sistema de localización se usaron placas protoboard en las que se probaron los componentes y los distintos circuitos. En primer lugar, se realizaron pruebas con un solo emisor, conectándolo igual que un led normal, es decir, con el cátodo (patilla corta) a tierra y el ánodo (patilla larga) a una resistencia que lo conecta a una de las salidas digitales del Arduino. El montaje se muestra en la figura 6.3.

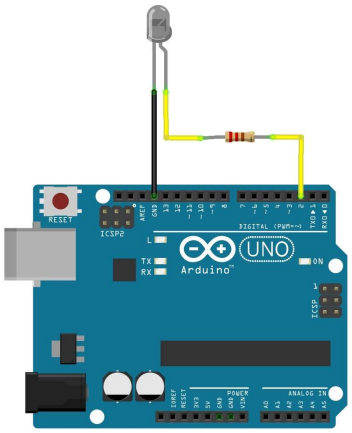

Figura 6.3: Conexión de un emisor.

Para la programación del envío y recepción de códigos se ha utilizado el IDE oficial de Arduino, sin embargo, la alta frecuencia requerida impide poder

realizar la programación con los comandos más básicos y comunes del lenguaje utilizado para la programación de las tarjetas Arduino. Como se explicará en detalle en el capítulo 8 sobre la programación de estas tarjetas, ha sido necesaria usar una programación basada en el código nativo del microchip que incorpora el Arduino para que sea capaz de modular, enviar y recibir las señales con la frecuencia requerida.

Una vez montado el circuito y diseñado el código, se comprobó el funcionamiento del envío de una señal infrarroja modulada a la frecuencia de 38 kHz. Para ello se utilizó el osciloscopio, conectando cada una de las conexiones de la sonda a las dos patillas del emisor. En la figura 6.4 se observa la señal modulada durante un pulso en alto, observándose el envío de pulsos y pausas consecutivas de 13 microsegundos. Como se puede observar, los dos cursores de medida se encuentran al inicio de dos pulsos consecutivos, con lo que la diferencia entre estas dos medidas marca el periodo de la modulación, correspondiente a 26 microsegundos y 38,46 kHz.

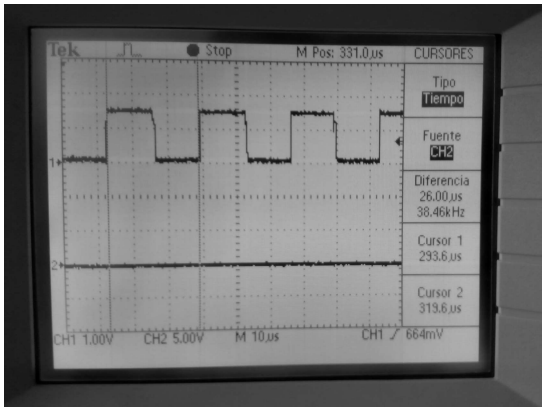

Figura 6.4: Señal modulada a 38 kHz.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la modulación, se procedió a montar el circuito para controlar, en lugar de un único emisor, tres emisores a la vez. Estos tres emisores se conectaron a tres de las salidas digitales del Arduino, y al igual que el caso de un único elemento, con resistencias de 220 ohms. Al emisor central además se le conecta una resistencia variable para controlar la intensidad que circula por él con el objetivo de regular el alcance de su señal. La limitación del alcance también es posible usando un emisor con características técnicas diferentes. En la figura 6.5 se muestra un diagrama del montaje de los emisores en la tarjeta Arduino, y en la figura 6.6 se muestra el esquema electrónico.

Tras ejecutar el montaje electrónico, se continuó con la programación del Arduino para enviar los códigos diseñados en el capítulo anterior. Como ya se

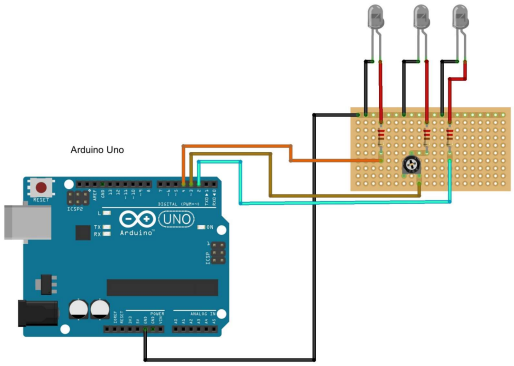

Figura 6.5: Conexión de 3 emisores.

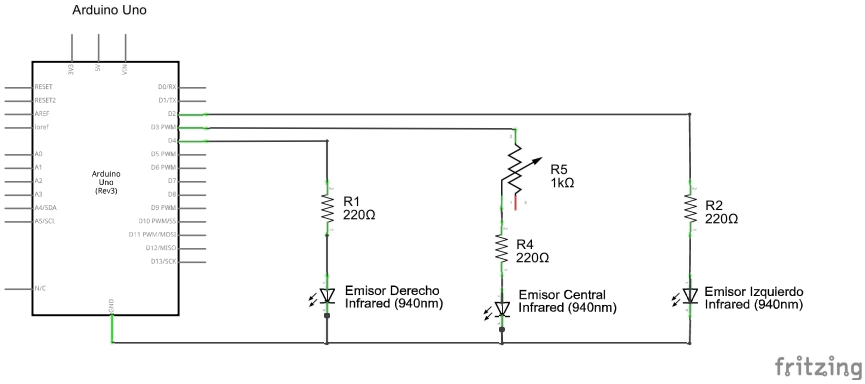

Figura 6.6: Esquema de la conexión de 3 emisores.

explicaba, cada led infrarrojo emite una señal distinta a la de los otros dos. En la figura 6.7 se muestran las señales de dos emisores en la pantalla del osciloscopio. Se observa que las dos señales están compuestas por un pulso en alto de la misma duración y que se produce exactamente al mismo tiempo, correspondiente al pulso de inicio, seguido de un pulso más corto pero en instantes distintos para cada emisor. Posteriormente se produce de nuevo el pulso de inicio.

En la figura 6.8 se muestran las señales de los mismos emisores pero en una escala mayor de tiempo, dónde se pueden observar la consecución de la serie de códigos de cada emisor.

Con el uso del osciloscopio, se realizaron numerosas pruebas con distintas duraciones de los pulsos de los códigos diseñados y se comprobó la validez del sistema teórico diseñado previamente.

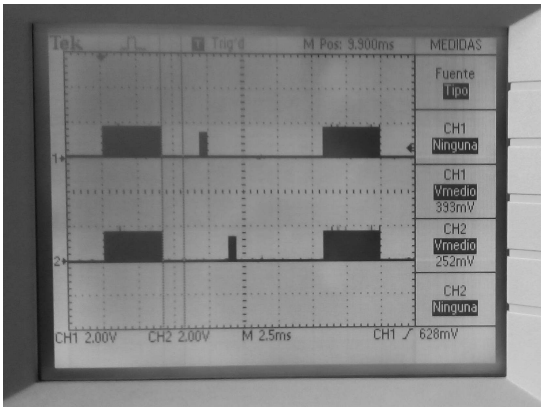

Figura 6.7: Señales emitidas por dos emisores.

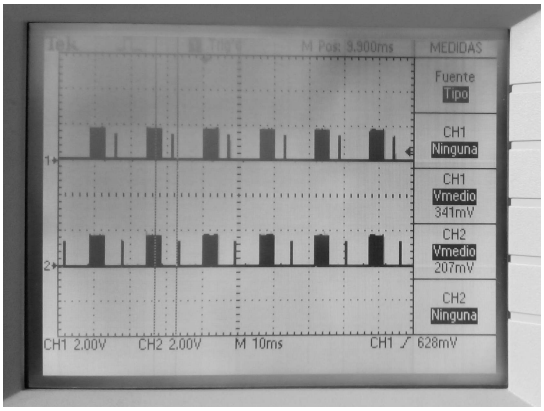

Figura 6.8: Señales emitidas por dos emisores.

Receptores

Posteriormente se diseñó un pequeño circuito receptor para comprobar rápidamente que se están emitiendo señales desde los emisores, aunque sólo nos muestra si se recibe señal o no, independientemente de la codificación que tengan sus mensajes. Este sencillo circuito se ha utilizado durante todas las pruebas para comprobar errores y también para determinar el alcance de las señales de los emisores. El circuito está formado por un receptor infrarrojo, una resistencia, una pequeña batería de 4,8 voltios y un led. El circuito, que se muestra en la figura 6.9, sirve para comprobar que se está recibiendo una señal infrarroja modulada a 38 kHz. El receptor tiene 3 patillas, dos de ellas para su alimentación y la tercera es la salida. La tensión de esta salida es 0 cuando el receptor reciba una señal infrarroja modulada a la frecuencia para la que está diseñado,

y tendrá una tensión cercana a la de su alimentación cuando no reciba ninguna señal. Por ello, el led, para que se ilumine cuando se recibe la señal, se conecta al polo positivo de la pila y a la patilla de salida del receptor tal y como se muestra en la figura 6.10.

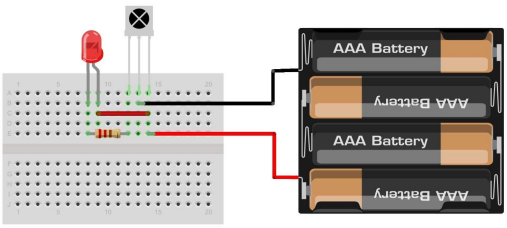

Figura 6.9: Conexión del circuito de comprobación.

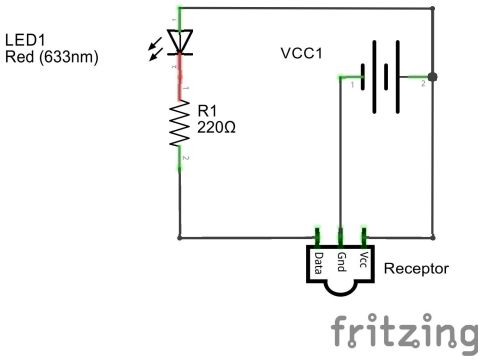

Figura 6.10: Esquema de la conexión del circuito de comprobación.

Usando este simple circuito y las sondas del osciloscopio se realizaron pruebas de la recepción correcta de los códigos. Por un lado, se conectó una de las sondas a uno de los emisores conectados a la placa Arduino, y por otro, se conectó la segunda sonda al receptor del circuito descrito anteriormente. De esta forma se puede analizar la señal recibida por el sensor. En la figura 6.11 se muestra tal comprobación, en la que se observa la señal de un emisor y debajo, la señal del receptor recibiendo las señales de los 3 emisores. Se observa también que los pulsos enviados aparecen en la pantalla como un bloque negro porque la señal está formada por pulsos modulados a 38 kHz, mientras que la señal recibida está demodulada y se observa sólo una línea correspondiente a un valor constante. Hay que notar que la señal de la salida del receptor está invertida.

En la figura 6.12, se muestra de nuevo el mismo ensayo con una escala

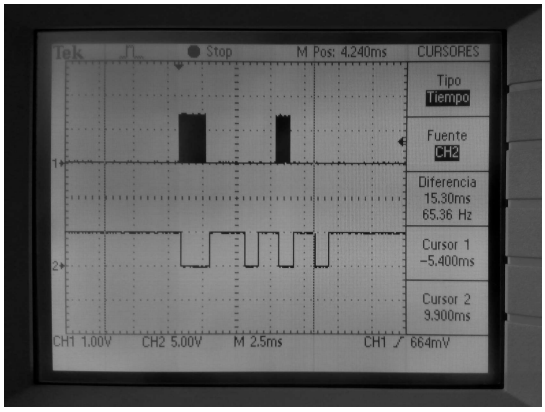

Figura 6.11: Comparación de las señales emitidas y recibidas.

de tiempo menor, en la que se observan los pulsos de 13 microsegundos de la modulación que se produce en el envío de las señales. Por otro lado, se observa que la salida del receptor filtra y demodula esas señales, produciendo un pulso en alto de la duración correcta.

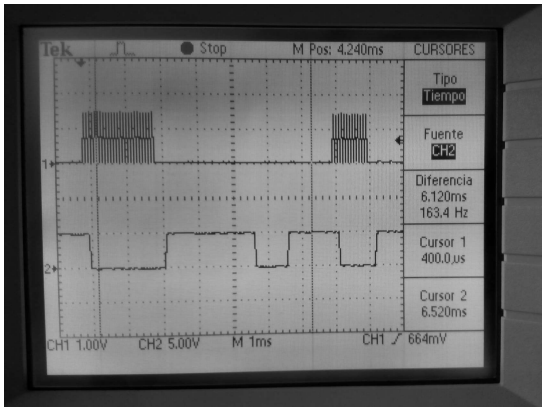

Figura 6.12: Comparación de las señales emitidas y recibidas.

Tras realizar pruebas con el circuito anterior, se procede a controlar un receptor del mismo tipo sobre una tarjeta Arduino Uno. El montaje se realiza alimentando el receptor con una de sus patillas a 5 V y otra a tierra. La tercera patilla se conecta a una de las entradas digitales de la tarjeta, tal y como se muestra en la figura 6.13.

La programación de esta placa Arduino para la recepción de señales se realiza de nuevo en el IDE oficial de Arduino y se comprueba usando el monitor serie del propio IDE, que usa la comunicación serial para enviar mensajes desde la

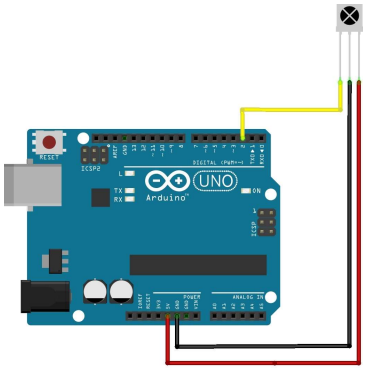

Figura 6.13: Conexión de un receptor.

placa Arduino al ordenador a través del cable USB. De esta forma, podemos ver en la pantalla del ordenador distintos tipos de mensajes que enviamos desde el Arduino. También se modificó el circuito anterior añadiendo un led RGB conectado a tres salidas digitales del Arduino tal y como se muestra en la figura 6.14. Para realizar pruebas a velocidades más altas de lo que se puede leer en pantalla, se programó el Arduino para que encendiese el led RGB según las señales que recibiese. Estos leds tienen 4 patillas, una se conecta a tierra y las otras tres se conectan a salidas digitales de la placa. Según la tensión de esas tres patillas, el led muestra alguno de los colores primarios si se alimenta una única patilla o combinaciones de estos si se alimenta más de una. En el caso de recibir la señal de sólo uno de los tres emisores, se muestra uno de sus tres colores básicos, ya sea el rojo, el verde o el azul. Si recibe dos de las señales, se muestra el color formado por los dos primarios. En el caso de recibir las tres señales, corresponde a la luz blanca, es decir, la suma de los tres colores primarios. Con este sencillo método también es posible determinar las distintas regiones alrededor de la estación de carga donde sólo llega una señal o la superposición de varias. Los diferentes algoritmos diseñados y comprobados para el control de la recepción de señales también se detallarán en el siguiente capítulo. El esquema eléctrico se muestra en la figura 6.15.

Finalmente se procede a realizar el montaje de la placa y su programación con más de un receptor. Se realizaron pruebas con 2 y 3 receptores, que se situaron en distintas posiciones sobre el robot. Además se utilizaron distintos sistemas para controlar los ángulos en los que los receptores recibían las señales, que se explicarán más tarde. La solución adoptada finalmente consta de 4 receptores, dos laterales y dos centrales en el frontal del robot.

El montaje de los 4 receptores en la placa Arduino se realiza como se muestra en las figuras 6.16 y 6.17. Su programación se basa en el caso anterior, pero realizando lecturas de los 4 receptores a la vez. Los problemas que ello acarrea y las distintas soluciones se describen en el capítulo 8.

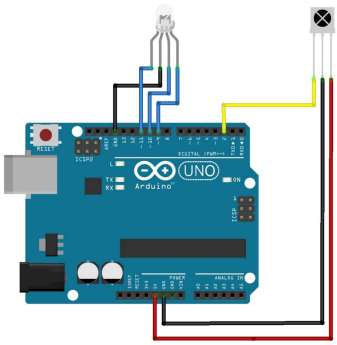

Figura 6.14: Conexión de un receptor y led RGB.

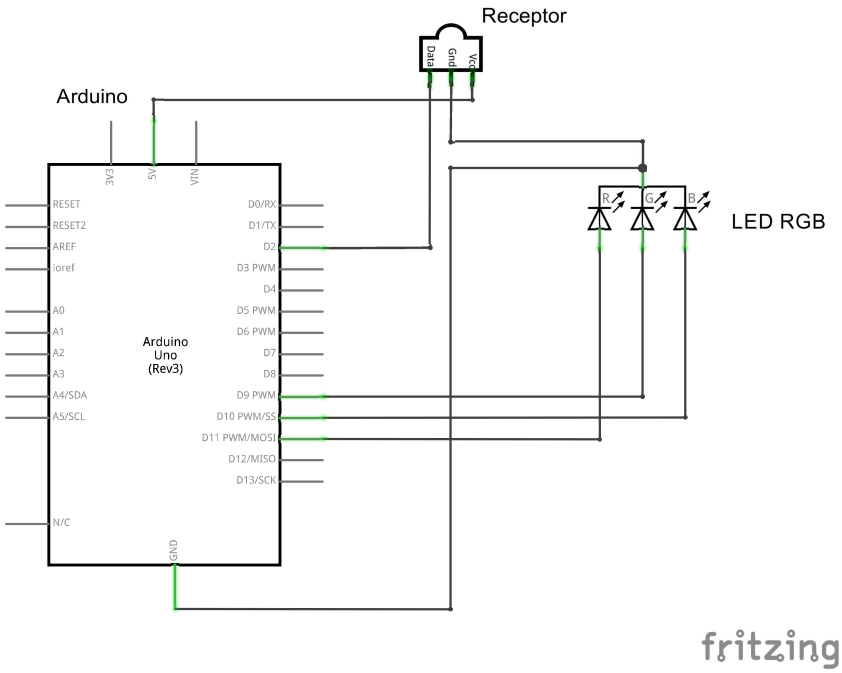

Figura 6.15: Esquema de conexión de un receptor y led RGB.

6.4. Prototipos

El primer prototipo se realizó para comprobar un sistema de seguimiento basado en el funcionamiento de un robot sigue-líneas o en los seguidores solares.

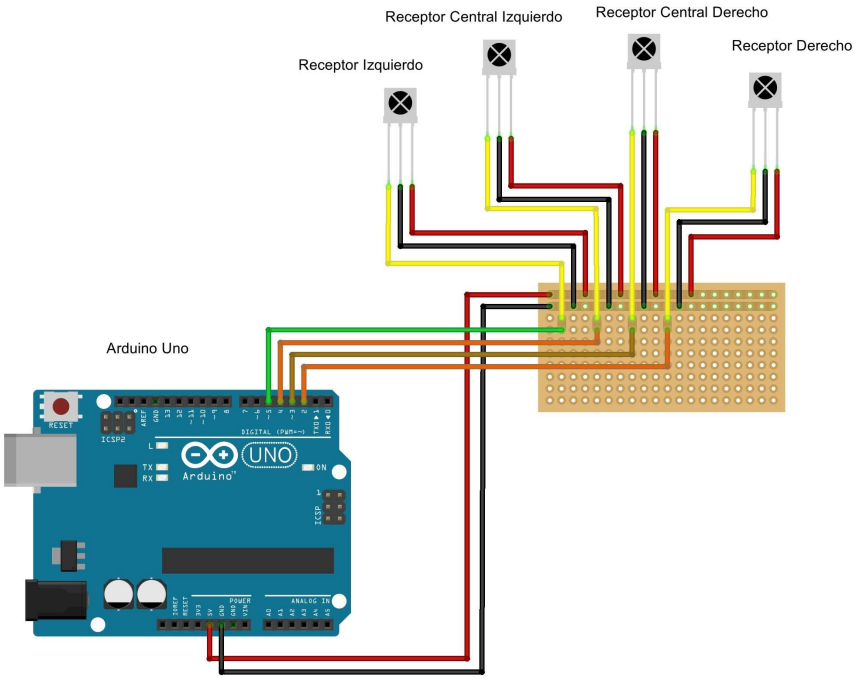

Figura 6.16: Conexión de receptores.

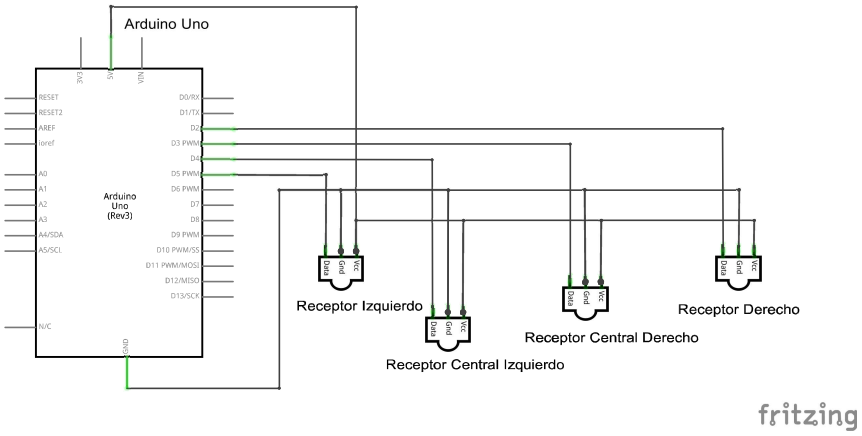

Figura 6.17: Esquema de conexión de receptores.

El objetivo de un robot sigue-líneas es recorrer una línea negra dibujada sobre un suelo blanco. Estos robots disponen de dos sensores situados debajo del robot que detectan si se encuentran sobre la línea, de color negro, o fuera de ella, detectando el color blanco. En el caso de que los dos sensores detecten el color negro, el robot avanza hacia adelante. En el caso de que el sensor derecho detecte el blanco y el sensor izquierdo el negro, el robot gira a la izquierda hasta conseguir que los dos sensores se encuentren sobre la línea negra de nuevo. En el caso contrario, el giro se realiza hacia la derecha de la misma forma.

Los seguidores solares tienen un funcionamiento similar y se utilizan para orientar placas solares con el mejor ángulo posible para recibir la máxima radiación posible que proviene del sol. En este caso, en lugar de disponer de una línea negra sobre un fondo blanco, se trata de un sistema que sigue un punto situado en el infinito. El sistema puede estar formado por 2 ejes, para el cual se necesitan 4 sensores que reciben la señal desde distintos ángulos. Pero también son comunes los sistemas con sólo movimiento en un eje, ya sea el eje azimutal, el polar o el horizontal, para los que son válidos dos sensores.

Así pues, el sistema a desarrollar para cumplir el principal objetivo del presente proyecto se basa en la recepción de señales emitidas por unos leds infrarrojos que, al igual que el sol, pueden considerarse puntos en el infinito. Por otro lado, el avance y giro del robot móvil se asemeja al sistema del sigue-líneas, ya que según detecte la señal a la izquierda o derecha del frontal del robot, este realizará un avance con un pequeño giro en uno u otro sentido. Este sistema da lugar a que el robot se acerca a la estación de carga realizando un avance en zigzag, pero si se ajustan las velocidades de avance y giro, así como los ángulos en los que se reciben las señales, el giro a uno y otro lado puede ser muy leve. Aunque los emisores se consideran como puntos fijos en el infinito, la superposición de las distintas señales delante de la estación de carga define diferentes zonas y regiones tal y como se explicaba en capítulos anteriores. Al disponer de los emisores derecho e izquierdo y tener definida la región en la que se superponen dichas señales, se simula tener una línea negra virtual que es la que debe seguir el robot.

Para las pruebas con el primer prototipo se colocaron dos receptores en el frontal del robot y se instaló una barrera física entre ellos con la intención de regular los ángulos desde los que reciben las señales. En la figura 6.18 se muestra tal esquema.

En primer lugar se programó el sistema para seguir una única señal, por lo que el robot se dirigía desde cualquier posición hasta la señal del emisor correspondiente. Se realizaron distintas pruebas con distintos tamaños para la barrera situada entre los dos receptores, tal y como se muestra en la figura 6.19.Posteriormente, se procedió a diseñar una pieza con un programa de CAD para posteriormente imprimir la pieza en plástico en una impresora 3D. El montaje del primer prototipo de esta pieza se muestra en la figura 6.20.

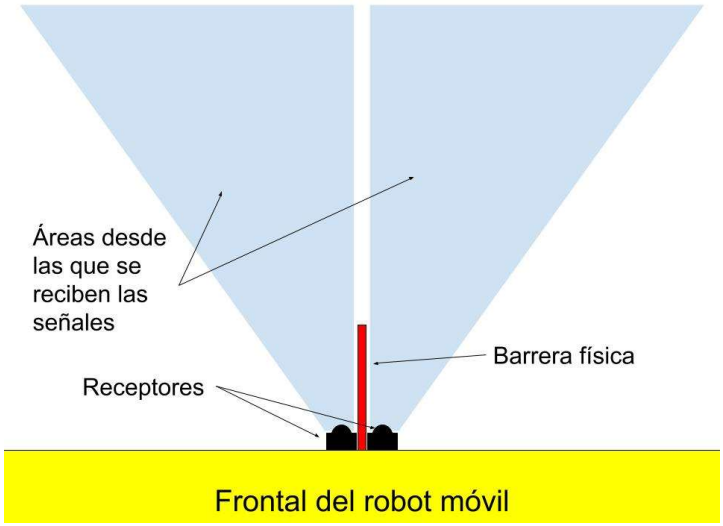

Figura 6.18: Esquema de la colocación de los receptores frontales.

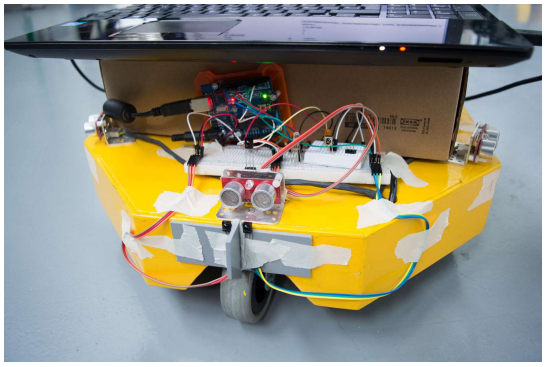

Figura 6.19: Montaje de los receptores sobre el frontal del robot.

El programa utilizado para realizar todos los diseños en 3 dimensiones ha sido el software libre FreeCAD y para la impresión de las piezas se ha utilizado una impresora 3D de las que se encuentran disponibles en el laboratorio del departamento. El material usado para las todas las impresiones ha sido plástico de tipo PLA de diámetro 2.85 mm ($\pm$0.05 mm). Se han utilizado plásticos de distintos colores y la temperatura de extrusión recomendada es de 200-220 ºC para todos ellos. Los planos de todas las piezas diseñadas en FreeCAD se muestran en el capítulo de planos.

Tras comprobar y ajustar distintos parámetros del control del movimiento del robot para conseguir el seguimiento de una única señal infrarroja, se procedió a

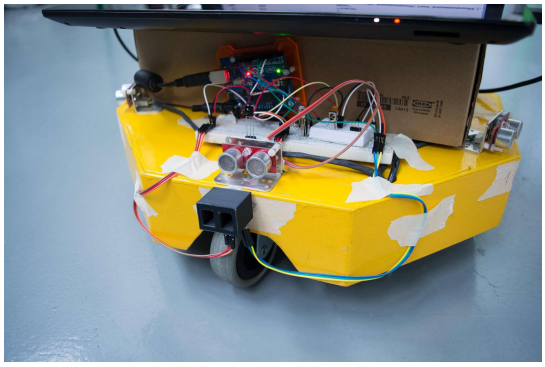

Figura 6.20: Montaje de la pieza impresa sobre el frontal.

diseñar el siguiente modelo. Se programó el sistema para que cada uno de los receptores siguiera una señal distinta, es decir, uno de los sensores comprobaba si recibía la señal del emisor derecho y el otro la del emisor izquierdo. Con este sistema se consigue que el robot se acerque a la estación de forma frontal, limitando los ángulos en los que el robot avanza para conectarse. Para que este modo de acercamiento funcionase correctamente, se realizaron diferentes pruebas en las que se regulaban los ángulos en los que estaban dirigidos los emisores de la estación de carga, así como el ángulo del haz emitido.

También se modificó la primera pieza impresa en plástico, aumentando los ángulos laterales desde los que podía recibir las señales y se diseñó la zona de la barrera entre los dos receptores con un pequeño ángulo en lugar de ser una pared recta, con la finalidad de mejorar los movimientos del robot en la zona más cercana a la estación. Esta pieza se muestra en la figura 6.21. Al usar los emisores derecho e izquierdo como guías, que están separados por una pequeña distancia uno del otro, con este sistema se conseguían movimientos más precisos.

Sin embargo, tras realizar diferentes pruebas, se descarta este sistema, entre otras razones, porque las señales rebotan en las paredes internas de las piezas impresas, con lo que el sensor percibe la señal aún cuando no se encuentra en una posición con el ángulo teórico que le permite recibir la señal. Esta situación se representa en el esquema de la figura 6.22.

Finalmente, se opta por la opción de colocar una pared simple entre los dos receptores dejando abiertos los laterales a fin de evitar el rebote de las señales. En la figura 6.23 se muestra la pieza final, que incluye los huecos para colocar los dos receptores y también los taladros para dos tornillos que harán la función de conectores, tal y como se explicará posteriormente. La instalación de los receptores en la parte trasera de la pieza se muestra en la figura 6.24.

Finalmente, se diseñan y se imprimen unos pequeños soportes para los re-

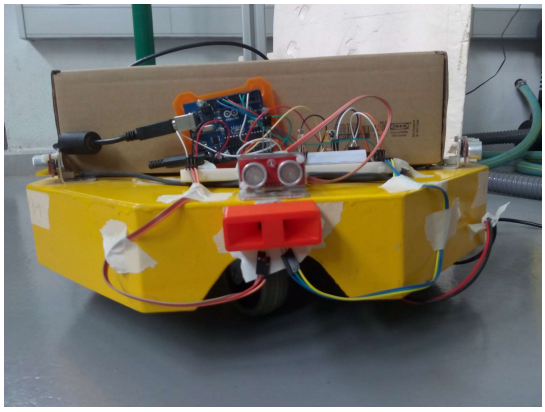

Figura 6.21: Montaje de otro de los prototipos de la pieza frontal.

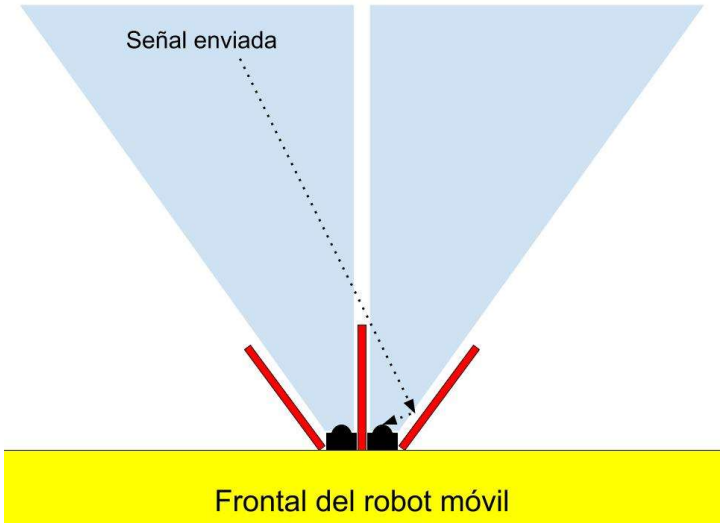

Figura 6.22: Esquema del rebote de las señales.

ceptores laterales. Para colocarlos, se realiza un pequeño taladro en los laterales de la plataforma móvil para dejar pasar las patillas y realizar las conexiones en el interior. Dichos soportes se muestran en la figura 6.25 y un esquema de la colocación de los 4 receptores sobre la plataforma se muestra en la figura 6.26.

Igualmente se modificaron los ángulos de las señales emitidas, colocando un pequeño cilindro alrededor de los emisores, con los que las diferentes regiones de cada señal o las correspondientes a la superposición de varias quedaban mejor definidas. Estos cilindros se realizaron con un tubo de plástico termoretráctil

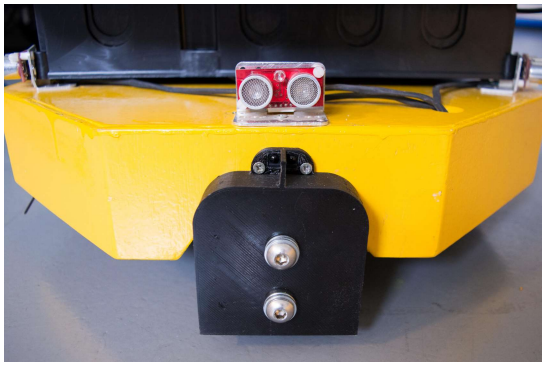

Figura 6.23: Montaje final de la pieza frontal.

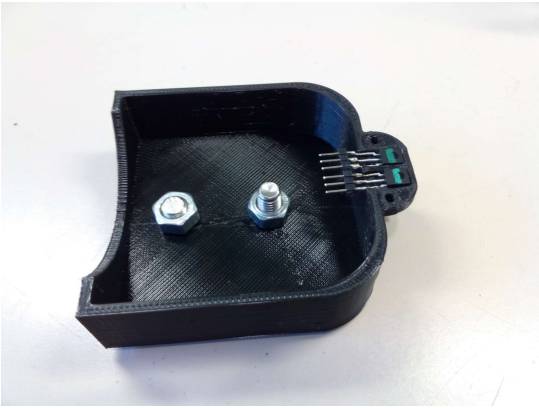

Figura 6.24: Instalación de los receptores IR en la pieza frontal.

que facilita su fijación a los emisores. En la figura 6.27 se muestra el montaje inicial de los emisores sobre la placa de prototipado, donde se observan el emisor central y dos emisores a cada lado. Los que se sitúan en el exterior sólo se utilizan para realizar pruebas, por lo que no son necesarios en el montaje final. En la figura 6.28 se muestra la misma imagen del montaje electrónico con los tubos instalados en los emisores laterales.

De este modo queda establecido el sistema que finalmente se adopta, a falta de realizar numerosas pruebas modificando únicamente aspectos en la programación del código que controla los movimientos del robot en cada una de las regiones definidas.

Figura 6.25: Detalle de la instalación de los soportes para los receptores laterales.

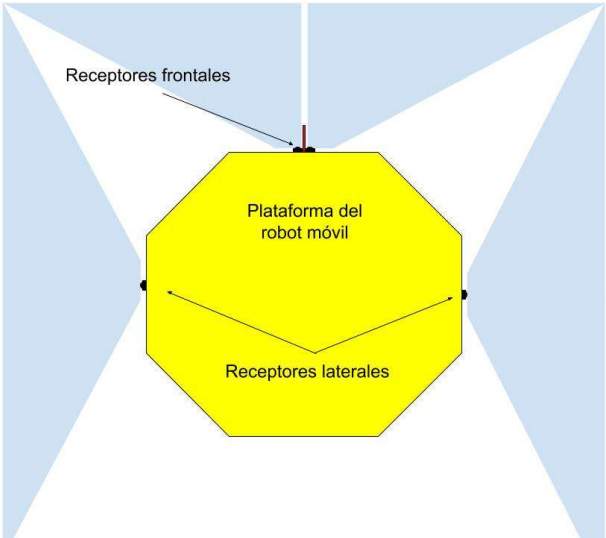

Figura 6.26: Esquema de la colocación de los 4 receptores infrarrojos.

6.5. Conclusiones

En este capítulo se ha desarrollado la implementación del sistema de localización diseñado en el capítulo anterior, describiendo los diferentes componentes electrónicos y el montaje de los distintos circuitos que se han probado. Se han realizado comprobaciones individuales de la correcta codificación de los mensajes mediante el uso del osciloscopio. Una vez comprobado el circuito que envía las señales como el que las recibe, se ha procedido a diseñar distintos prototipos de piezas impresas en 3D para el sistema de seguimiento de las señales. Final-

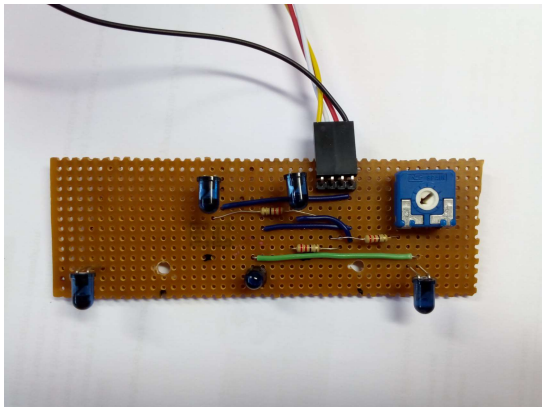

Figura 6.27: Montaje electrónico de los emisores.

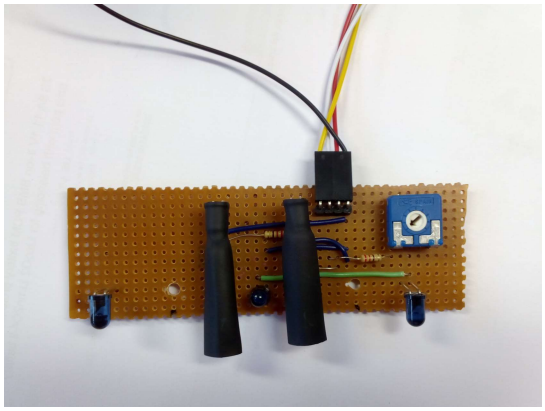

Figura 6.28: Instalación de los tubos retráctiles sobre los emisores.

mente, tras el estudio y análisis de los diferentes prototipos, se decide el sistema que mejor funciona para implementarlo e instalarlo en el robot definitivo.