

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

“Diseño y Construcción de un Robot Móvil para el Mapeo de Entornos”

TRABAJO RECEPCIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA:

MIGUEL ÁNGEL FELICIANO MUÑOZ

DIRECTOR DEL TRABAJO RECEPCIONAL
ING. AMARANTO DE JESÚS DÁVILA JÁUREGUI

MÉXICO, D.F. ABRIL 2012

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos.

En primer lugar agradezco a mis papas y a mis hermanas, de todo corazón por su confianza, apoyo y paciencia para concluir mis estudios.

En segundo lugar agradezco al director del trabajo Mtro. Amaranto de Jesús Dávila Jáuregui su valiosa ayuda, estímulo y asesoramiento en el desarrollo del trabajo. Así como a la Mtra. Diana Aurora Cruz Hernández y a todos los profesores de la academia de ingeniería del plantel casa libertad por el apoyo durante mi formación académica.

Finalmente agradezco el apoyo económico recibido por el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México (ICYT), a través del proyecto “Espacio Virtual de Aprendizaje para el fortalecimiento del pensamiento lógico matemático y la creatividad (ESPEC)”; así mismo vaya mis agradecimientos a todos aquellos que hicieron posible la realización de este trabajo.

ÍNDICE

CAPITULO I. PRELIMINARES

1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.2.1. Hipótesis.....	3
1.2.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Metodología.....	6
1.5. Alcances y limitaciones.....	7

CAPITULO II. ANTECEDENTES

2.1. Robótica Móvil.....	8
2.1.1. Aspectos generales.....	9
2.2. Tipos de locomoción para robots móviles con llantas.....	12
2.2.1. Ackerman.....	12
2.2.2. Triciclo.....	13
2.2.3. Síncrona.....	14
2.2.4. Ruedas Suecas.....	14
2.2.5. Diferencial.....	15
2.3. Otros tipos de Locomoción	
2.3.1. Locomoción por patas.....	16
2.3.2. Locomoción por cintas deslizantes.....	17
2.3.3. Robots Voladores y acuáticos.....	17

CAPITULO III. ARQUITECTURA DEL ROBOT MOVIL

3.1. Descripción General.....	19
3.2. Sistema Electro-Mecánico.....	20
3.2.1. Descripción del sistema de Locomoción.....	21
3.2.2. Descripción de los Motores.....	22
3.3. Sistema Electrónico.....	24
3.3.1 Sistema de Sensado.....	24
3.3.1.1. Sistema de Odometría.....	26
3.3.1.1.1 Encoder Incremental ENC1J.....	27
3.3.1.1.2. Potenciómetro.....	29
3.3.1.1.3.PIC6f886.....	30
3.3.1.1.4. Tarjeta electrónica para el encoder tráiler.....	33
3.3.1.1.5. Implementación del algoritmo de odometría...34	
3.3.1.2. Sistema de detección de obstáculos.....	36
3.3.1.2.1. Sensor ultrasónico.....	37
3.3.1.2.1.1. Caracterización del sensor.....	39
3.3.1.2.2. Sistema Electromecánico del sensor.....	45
3.3.1.2.2.1 .Servomotor.....	46
3.3.1.2.2.2. Sensor infrarrojo.....	50
3.3.1.2.3. Fuente conmutada de alta eficiencia.....	52
3.3.2. Sistema de control para motores.....	54
3.3.3 Sistema de comunicaciones	
3.3.3.1.Comunicacion Zigbee.....	56
3.3.4. Descripción de la Unidad de procesamiento central.....	57
3.3.5. Sistema de energía	
3.3.5.1. Batería.....	58
3.3.5.2. Fuente de voltaje para el sistema digital.....	60

CAPITULO IV. MODELADO MATEMÁTICO DEL ROBOT MOVIL

4.1. Modelo matemático del robot móvil, estimación geométrica.....	61
4.2. Modelo por Matrices de Rotación y Traslación.....	67
4.3. Control de Velocidad de Motores.....	69

4.3.1 Control PID.....	71
4.3.2. Sintonización de las Tarjetas de Control (Método de Ziegler-Nichols).....	72
4.4. Algoritmos para la navegación	
4.4.1. Seguimientos de contornos.....	77
4.4.2. Recorridos Aleatorios.....	79
4.4.3. Control Remoto.....	80

CAPITULO IV. PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Trayectorias rectas.....	83
5.2 Trayectorias con giros y curvas.....	85
5.3 Seguimientos de contornos.....	87
5.4 Recorridos aleatorios y Control Remoto.....	89

CAPITULO VI. CONCLUSIONES.....92

Bibliografía.....	98
-------------------	----

CAPÍTULO 1

Preliminares

Este trabajo presenta el diseño e implementación del hardware y software de un robot móvil, para realizar recorridos de exploración de entornos, el cual se desarrolló en el marco del proyecto ESPEC, financiado por el ICyT.

El robot cuenta con sistemas electrónicos compuestos por un elemento sensor, una unidad de procesamiento y en algunos casos un dispositivo actuador que en conjunto controlan su comportamiento, cuenta también con un sistema de comunicaciones que permite la transmisión de información obtenida por el robot en sus recorridos, además de una unidad central de procesamiento basada en un microcontrolador que se encarga de coordinar a todo el sistema electromecánico, de sensado y comunicaciones. En este capítulo se da una introducción a la robótica móvil, describiendo de forma general las principales características del prototipo construido, la metodología seguida y los objetivos a alcanzar.

1.1. Introducción

Un robot móvil puede definirse como un sistema electromecánico que tiene la capacidad de desplazarse de forma autónoma sobre un espacio o ambiente de trabajo (fabrica, taller, laboratorio, casa, pasillo, bosque, etc.). Entendiendo a la autonomía del robot, como la capacidad de éste para determinar su curso de acción (a través de actuadores), mediante un proceso de razonamiento implementado (algoritmo de decisión basado en la información de los sensores que le permiten percibir el entorno), casi siempre utilizando un control de lazo cerrado, en lugar de seguir una secuencia fija de instrucciones [1].

La robótica móvil es un campo joven, que ha venido ganado popularidad, debido a investigaciones y misiones donde los ambientes hostiles no permiten el acceso a los humanos, un ejemplo son los llamados robots exploradores (rovers) que son utilizados para misiones en el espacio. La NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) ha lanzado múltiples exploradores como el *Rover Sojourner*, lanzado en diciembre de 1996, perteneciente al programa *Mars Pathfinder Mission*, el explorador fue diseñado básicamente para explorar la superficie de marte, la tecnología que mostraba era un módulo de aterrizaje y un explorador robótico. *Rover Sojourner* devolvió una gran cantidad de información e imágenes del planeta rojo, aunque la mayoría de las veces estos exploradores no regresan a la tierra y se pierden en el espacio los datos enviados son de gran utilidad para la investigación científica [2].

Los sistemas móviles autónomos no solo tienen aplicación en exploración espacial, actualmente se les ha dado una gran cantidad de usos que van desde guías de turistas, ayuda en hospitales y oficina, hasta transporte de materiales y herramientas en un ambiente de trabajo controlado.

1.2. Planteamiento del problema.

Los robots móviles requieren de un sistema propio de navegación que les permita la planificación de trayectorias, además de tener la capacidad de esquivar obstáculos para alcanzar su objetivo. Para tales fines el robot debe contar con un sistema de sensores (internos o externos) que le permitan percibir el entorno que lo rodea.

Uno de los principales problemas en la robótica móvil es la estimación de la posición y orientación del robot dentro del ambiente en el que se encuentra, este problema típicamente se ha resuelto por medio de sistemas odométricos, los cuales generalmente consisten en obtener la posición del robot mediante encoders incrementales ligados a las ruedas del robot.

Las fallas en los sistemas odométricos se derivan casi siempre de los deslizamientos que presentan las llantas al estar acoplados a los actuadores del robot, así

como a su dependencia con el desgaste de la ruedas y las características del terreno, por otro lado es una de las alternativas más económicas y fiables para trayectorias cortas y terrenos planos, por lo que es necesario implementar una alternativa que permita disminuir estas fallas al máximo, manteniendo un bajo costo.

Otra de las necesidades sustanciales de los robots móviles autónomos es la recopilación e integración de la información que percibe de su entorno, con la finalidad de generar mapas del ambiente donde se encuentra, que le servirán posteriormente en la planificación de trayectorias óptimas, independientemente del objetivo o aplicación de alto nivel a la que este destinado el robot. La localización exacta de éste así como su capacidad para identificar obstáculos a lo largo de su trayectoria son por tanto condiciones indispensables para lograr un mapeo e identificación del entorno con un grado de exactitud aceptable.

1.2.1. Hipótesis.

El diseño, la construcción y control de un robot móvil capaz de navegar de forma autónoma en un ambiente desconocido con la finalidad de explorar y realizar un mapeo de su entorno, utilizando un sistema de odometría y sensado, puede realizarse con materiales de bajo costo, y fácil adquisición, logrando una precisión aceptable.

Este robot móvil podrá tener diversas aplicaciones que van desde la prueba de algoritmos para experimentación y aplicación didáctica, hasta la exploración de ambientes no estructurados y la vigilancia de áreas públicas.

1.2.2. Justificación.

La robótica educativa, también llamada robótica pedagógica es una disciplina que tiene por objeto la generación de ambientes de aprendizaje basados fundamentalmente en la actividad de los estudiantes. Es decir, ellos pueden concebir, desarrollar y poner en práctica diferentes proyectos que les permiten resolver problemas y les facilita al mismo

tiempo, ciertos aprendizajes. La robótica pedagógica se ha desarrollado como una perspectiva de acercamiento a la solución de problemas derivados de distintas áreas del conocimiento como las matemáticas, la computación, las ciencias naturales y experimentales, la tecnología y en general las ciencias de la información y la comunicación, entre otras. Uno de sus factores más interesantes es que la integración de estas diferentes áreas del conocimiento se da de manera natural.

En el marco del proyecto denominado “ESPEC: Espacio virtual de aprendizaje para el fortalecimiento del pensamiento lógico-matemático y la creatividad”, debido a lo atractivo que resulta el tema de la robótica para los jóvenes se propone utilizarla como estrategia dentro del sistema, con la finalidad de aprovechar los beneficios que su uso conlleva.

Brindando además una plataforma que acerque a los estudiantes de la UACM a realizar investigación sobre las diversas áreas de la robótica móvil, mediante la implementación de un robot que pueda desplazarse en un ambiente de trabajo, siendo controlado remotamente desde internet a través de una interfaz web. En este ambiente de aprendizaje innovador los usuarios podrán controlar y probar algoritmos en prototipos reales que son representaciones de la realidad tecnológica circundante. El robot desarrollado en el presente proyecto contará con las características necesarias que permitan su incorporación a este sistema.

Así mismo un robot instrumentado de tal forma que sea capaz de recorrer áreas de forma autónoma y enviar datos de su entorno y localización, permitiría su utilización en diversas aplicaciones en beneficio de la sociedad, por ejemplo un robot de servicio puede cuidar un lugar haciendo uso de sus sensores, “patrullar” espacios, reconocer situaciones anormales o movimientos considerados como sospechosos, grabarlos y alertar, ya sea en lugares públicos como parques o escuelas, o en ambientes controlados hasta cierto punto como empresas o naves industriales.

Un sistema robótico autónomo terrestre, como el que se plantea en este proyecto, debe contener características especiales como un sistema de locomoción con ruedas, orugas o patas que permitan trasladarse sobre la superficie, debe contar con un sistema de

percepción del entorno, un sistema de localización, así como un sistema que permita recolectar e integrar toda la información de manera eficiente. Por otro lado también es necesario considerar un alto rendimiento energético es decir debe circular de forma autónoma durante horas, dotado de un sistema de comunicación a una estación de mando o base donde se esté monitoreando tanto la zona como al robot mismo.

La implementación de un robot móvil requiere de la aplicación de un conjunto de conocimientos y disciplinas (matemática, física, electrónica, control, software) que implica la creación de un agente inteligente capaz de procesar información y establecer un comportamiento determinado ante distintas situaciones que se le presente.

Por tanto el desarrollo del robot móvil que se plantea ayudará a fortalecer los trabajos de investigación en robótica en la universidad, incentivando el desarrollo de proyectos y desarrollo de tecnología, servirá además como plataforma para futuras investigaciones en diversos campos de la ingeniería como control automático, inteligencia artificial y desarrollo de software.

1.3. Objetivos

Construir un Robot móvil capaz de desplazarse en ambientes desconocidos de forma autónoma o controlado remotamente, el robot estará provisto de sensores para la percepción de su entorno y un sistema de odometría, a través del cual será posible construir un mapa del entorno y ubicar la posición del robot en todo momento.

El robot móvil deberá cumplir las siguientes especificaciones:

- Sistema de tracción diferencial con tracción en las 4 ruedas.
- Sistema de sensores que le permitan identificación del medio para realizar evasión de obstáculos.
- Sistema de odometría que permita estimar la posición del robot durante todo su recorrido con una resolución de al menos diez centímetros.

- Sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de la información obtenida por los sensores y el sistema odométrico.

1.4. Metodología

La metodología a seguir inicia con un análisis del problema y la búsqueda de probables soluciones.

Investigar y analizar el estado del arte en robots móviles, así como sistemas de navegación y exploración de ambientes desconocidos.

Investigar y analizar técnicas de odometría y sensado de entornos.

Elaborar una lista de especificaciones y requerimientos técnicos, que permitan cubrir los objetivos planteados.

Implementar un diseño mecánico sencillo pero funcional, con restricciones y parámetros que cumplan con el objetivo.

Determinar un modelo matemático del robot móvil que permita probar y visualizar gráficamente la ubicación del robot a partir de los datos sensados.

Realizar pruebas de cada uno de los subsistemas electrónicos para verificar su funcionamiento. Una vez verificados de forma individual se realizarán pruebas del sistema completo.

Realizar pruebas de validación, que verifiquen el desempeño y permitan establecer alternativas de rediseño.

1.5. Alcances y limitaciones.

Este proyecto está enfocado al desarrollo de un sistema electromecánico completo aplicando la teoría básica sobre robótica, y en general los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales.

El proyecto abarca desde el diseño completo del robot y de algunas de las tarjetas electrónicas de control, hasta su implementación y pruebas de desempeño.

Se considera que el robot se mueve sobre una superficie casi plana y lisa.

Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.

Debido a la configuración mecánica (diferencial de cuatro ruedas) existe deslizamiento de las llantas.

Robot considerado como sólido rígido (no hay flexión).

Se implementan algoritmos básicos de control que permitan verificar el desempeño del robot durante recorridos de exploración autónoma y controlada remotamente.

Este trabajo desarrolla las condiciones necesarias para la generación de mapas sin llegar a construirlos.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

En este capítulo se exponen los antecedentes generales sobre robótica móvil, así como la descripción de las principales configuraciones cinemáticas; lo cual permitirá sentar las bases para el entendimiento de la estructura del robot móvil que se desarrolla en este proyecto y que se describe en capítulos posteriores.

2.1. Robótica Móvil.

Un robot es un sistema electro-mecánico, autónomo, reprogramable, que desempeña tareas de forma automática, ya sea con supervisión humana directa, o a través de un programa predefinido, utilizando un conjunto de reglas que definen la inteligencia del robot. [3].

Generalmente los robots desempeñan tareas que suplen, equiparan o apuntalan el trabajo humano, como ensamble en líneas de manufactura, manipulación de objetos peligrosos, exploración, etc. La inteligencia del robot comúnmente reside en una computadora o un microcontrolador, que ejecuta un algoritmo de control (líneas de programa), este algoritmo determina las acciones a seguir dependiendo del sistema sensorial (percepción del entorno). Las acciones que dicta el cerebro de los robots son , en la mayoría de los casos, realizadas por actuadores¹ que mueven extremidades o impulsan al robot.

La principal característica de un robot móvil es que usa un sistema de locomoción,

¹Un actuador es un dispositivo de potencia (energía hidráulica, neumática o eléctrica) que produce la entrada (activación) para la planta (proceso) de acuerdo con la señal de control. A fin de que la señal de la salida se aproxime a la señal de entrada de referencia. [4].

como ruedas, orugas, patas, etc., que impulsan, transportan o posicionan al robot en un espacio determinado.

2.1.1. Aspectos Generales.

Los robots móviles pueden desempeñarse en ambientes estructurados o no estructurados, aunque en ambos casos deben enfrentarse con incertidumbres. Como incertidumbres se consideran: lecturas erróneas o corruptas de los sensores, errores introducidos al posicionar el vehículo al comienzo de la trayectoria para iniciar su movimiento, deslizamientos provocados por la aparición de fuerzas laterales, etc. En ambientes no estructurados la incertidumbre se presenta al trasladarse desde un punto A hasta un punto B de forma aleatoria. Los robots móviles que operan en ambientes estructurados pueden presentar incertidumbres en el seguimiento de una trayectoria predefinida, pues el error que se genera es acumulativo, esto permite distinguir que las prioridades en el estudio y desarrollo de la robótica móvil están firmemente orientadas en las áreas de sensado y raciocinio de la posición e identificación de objetos.

Históricamente los primeros intentos de construir maquinas autónomas se basaron en el concepto de sistema realimentado y lazo de control. En 1969 SRI International, (entonces conocido como Stanford Research Institute) desarrollo SHAKEY, un sistema robótico que en 1970, la revista “Life Magazine” se refirió a él como la “primera persona electrónica” en un artículo [5]. SHAKEY el sistema robótico que puede considerarse el primer sistema móvil autónomo de propósito general, estaba dotado de un escáner, cámara de visión y sensores táctiles binarios. Debido a las limitaciones en computación el control de SHAKEY se realizaba mediante una computadora externa con una conexión por radio frecuencia entre robot y computadora (ver figura 2.1).

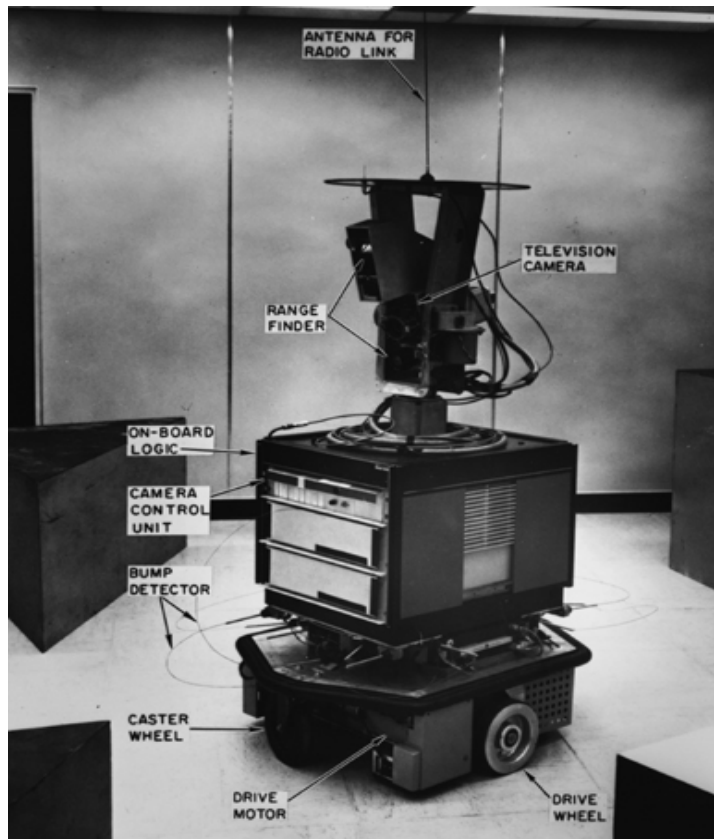


Figura 2.1. SHAKEY, (*Artificial Intelligence Center; Stanford Research Institute*). [5]

Después de SHAKEY los avances más representativos fueron en el terreno de los sistemas digitales, lo que propició un amplio aumento de la capacidad de computo, esto a su vez permitió a principios de los 90 el desarrollo de los primeros robots domésticos, robots insectoides, exploraciones en terrenos de difícil acceso mediante vehículos móviles no tripulados, así como las exploraciones de Marte, por ejemplo, el sistema autónomo móvil llamado “HELPMATE”, es un robot móvil que realiza el transporte de materiales, busca y realiza tareas. Este robot navega de forma autónoma entre edificios a través de pasillos de interconexión y utiliza la radio para comunicarse con el ascensor (ver figura 2.2). Mediante sensores de presencia obtiene información para seguir por los pasillos y llegar con éxito a su destino. Además de contar con la capacidad de trazar una ruta que rodee obstáculos que

podieran surgir en el camino, para esto se utiliza un sistema de visión frontal para ayudar en la navegación mediante puntos de referencia [6].



Figura 2.2. HELPMATE, (*Helpmate Robotics, Inc.*).[6].

Así pues, los robots móviles con ruedas poseen características particulares que los hacen aptos para una determinada tarea. Dependiendo del quehacer se determina las particularidades estructurales del robot que van desde el tipo de rueda, el sistema de locomoción (tracción y dirección), forma física del robot, características sensoriales, etc. Las particularidades del robot determinan a su vez la clasificación del mismo.

Por tanto, los vehículos robóticos con ruedas son una solución sencilla y eficiente, para conseguir movilidad en terrenos libres de obstáculos, permitiendo conseguir velocidades relativamente altas. Por el contrario, la locomoción mediante ruedas presenta poca eficiencia en terrenos blandos, además no es posible adaptarse al terreno modificando el margen de estabilidad [7]. Uno de los problemas más importantes de los robots móviles con ruedas es el deslizamiento, el cual surge en el rodamiento de las llantas y depende de las características

del terreno; también pueden presentarse vibraciones. Las vibraciones y el deslizamiento son un problema debido a que generan errores en la estimación de la posición y desplazamiento lineal del robot.

2.2. Tipos de locomoción para robots móviles con llantas.

La clasificación de robots móviles con ruedas es complicada debido a la cantidad de criterios que implican. Los criterios más comunes son maniobrabilidad, deslizamiento, libertad de movimiento, rigidez, estabilidad, entre otros. Estos criterios determinan las características mecánicas y morfológicas de las partes que conforman el robot, como tipo de ruedas y su disposición en la estructura mecánica (locomoción). Por tanto la precisión y rapidez con que el robot móvil debe alcanzar su destino, implica tener un sistema de tracción confiable y un sistema de dirección que dé maniobrabilidad al robot para lograr una estructura mecánica estable. En general los robots móviles distribuyen sus sistemas de tracción y dirección sobre los ejes de sus ruedas de acuerdo a los requerimientos de velocidad y características del terreno. A continuación se presentan las configuraciones en cuanto a tipo de locomoción más comunes.

2.2.1. Ackerman.

Esta configuración es utilizada en vehículos de cuatro ruedas convencionales. De hecho, vehículos robóticos para exteriores resultan normalmente de la modificación de automóviles o vehículos más pesados, figura 2.3. Este sistema de locomoción tiene ruedas delanteras que giran, dando dirección al vehículo; para eliminar el deslizamiento las prolongaciones de los ejes de las ruedas delanteras intersecan en un punto sobre la prolongación del eje de las ruedas traseras como se muestra en la figura 2.3.

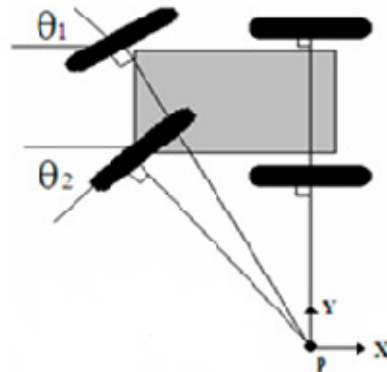


Figura 2.3.Locomoción de Ackerman.

2.2.2. Triciclo.

En esta configuración la rueda delantera sirve tanto para la tracción como para el direccionamiento, figura 2.4. El eje trasero, con ruedas es pasivo y las ruedas se mueven libremente. La maniobrabilidad es mayor que en la configuración anterior pero presenta problemas de estabilidad en terrenos difíciles, debido a la pérdida de tracción, en el centro de gravedad cuando el vehículo se desplaza por una pendiente. Este tipo de locomoción es óptima para vehículos en terrenos pavimentados debido a la estructura mecánica y a que la electrónica de control es sencilla, su tratamiento cinemático resulta de interés en áreas específicas del control. En cuanto a aplicaciones industriales esta configuración es apta para el transporte de cargas pesadas a baja velocidad.

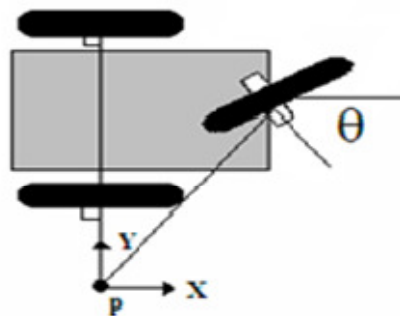


Figura 2.4. Locomoción de triciclo.

2.2.3. Síncrona.

Consiste en la actuación simultánea de todas las ruedas que giran de forma síncrona, la transmisión se consigue mediante coronas de engranaje, figura 2.5. Esta configuración presenta motores separados para la traslación y la rotación que simplifica el control en línea recta. Tiene mejor funcionalidad mecánica que otras configuraciones. La principal desventaja que presenta es un diseño complejo y difícil implementación.

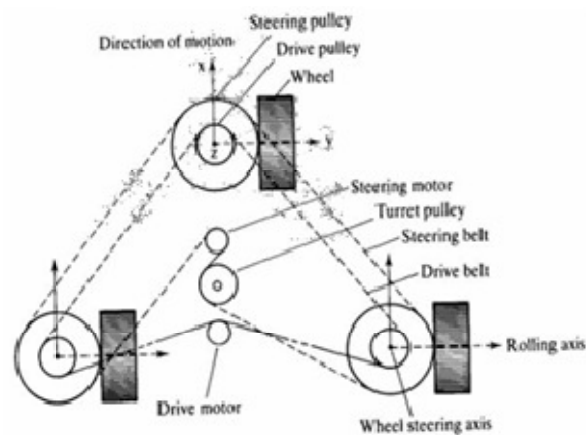


Figura 2.5. Locomoción síncrona.

2.2.4. Ruedas Suecas (omnidireccionales).

Otra configuración consiste en el empleo de ruedas especiales, tales como las llamadas *ruedas suecas* que permiten conseguir el movimiento omnidireccional de un vehículo; los vehículos que usan este tipo de llantas presentan diseños complejos, mayor libertad de movimiento y aunque se reducen restricciones cinemáticas el movimiento en línea recta se vuelve complejo por la mecánica de los mismos, figura 2.6.

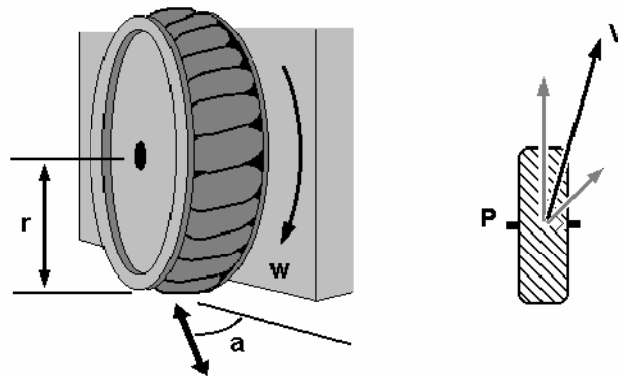


Figura 2.6. Locomoción con ruedas suecas.

2.2.5. Diferencial.

El direccionamiento diferencial viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales, así mismo la tracción se consigue con estas mismas ruedas, figura 2.7. Para la estabilidad suelen agregarse dos ruedas adicionales pasivas, no hay ruedas directrices, este sistema es un diseño simple, fácil de implementar, y tiene la desventaja, sobre todo en el control para seguimientos de trayectorias rectas. Esta configuración es usualmente utilizada en vehículos robóticos para interiores o en superficies planas. Este robot también es uno de los más utilizados en laboratorios de investigación y desarrollo de tecnología, de igual forma es una configuración muy utilizada en sistemas robóticos comerciales.

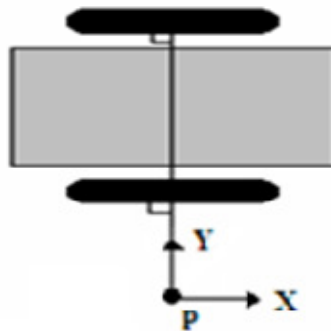


Figura 2.7. Locomoción diferencial.

2.3. Otros tipos de locomoción.

Algunos otros robots móviles utilizan otros tipos de locomoción como es el uso de orugas, patas o ruedas especiales.

2.3.1. Locomoción por patas.

Permiten aislar el cuerpo del robot del terreno donde se encuentra, los robots que utilizan este tipo de locomoción emplean únicamente puntos discretos de soporte, por lo que la estabilidad es mayor si las patas se adaptan a un polígono de soporte, por tanto la omnidireccionalidad y el deslizamiento es menor, Figura 2.8. Las principales desventajas que presenta el uso de patas con respecto a las ruedas son la complejidad en los mecanismos y mayor consumo de energía, por tanto la complejidad es mayor en la planificación, la estabilidad y el control. Para aumentar la estabilidad se utilizan más de cuatro patas, (robots insectos) sin embargo la tendencia a crear sistemas bípedos como androides ha propiciado una amplia investigación en este tipo de locomoción.



Figura 2.8. Robot de cuatro patas con control adaptable, propiedad de *Cornell University*.

2.3.2. Locomoción por cintas de deslizamiento.

Para robots que funcionan en un entorno con una superficie plana las cintas de deslizamiento u orugas son una opción probable debido a que las cintas permiten al robot un control muy sencillo, la mecánica del mismo también es sencilla, y el principal inconveniente de las cintas es su ineficiencia, en el consumo de energía, y en la navegación debido a que se produce deslizamiento sobre el terreno al avanzar y girar. Debido a que la navegación se basa en el conocimiento del punto en que se encuentra el robot y el cálculo de posiciones futuras con el error cercano a cero, las cintas acumulan un error tan grande que hace que la navegación sea complicada.

2.3.3. Robots aéreos y acuáticos.

En tareas de recolección de datos, mantenimiento e inspección en entornos naturales, donde el acceso de humanos es casi imposible, se hace uso de herramientas como los robots aéreos y acuáticos. Se han conseguido grandes avances en sus sistemas motrices, pero sus capacidades de procesamiento de información y su aplicabilidad a tareas reales sigue siendo limitada en la mayoría de los casos. El problema principal radica en la realización autónoma de las maniobras adecuadas y la reactividad necesaria para adaptarse a los cambios del entorno [7].

Hay un factor fundamental a tener en cuenta, la gravedad, en los robots terrestres este factor no es importante debido a que son apoyados sobre el suelo, pero en robots aéreos la atracción gravitacional es el principal factor a vencer.

Los robots aéreos tienen diferentes sistemas de desplazamiento, hélices o turbinas, tradicionalmente son aviones o helicópteros, las configuraciones pueden ser varias, pero el principio en el que se basan todas es el desplazamiento del aire.

Los robots acuáticos, usan el agua como medio de transporte. Tienen 6 grados de libertad porque se puede mover en 3 dimensiones diferentes, al igual que los robots aéreos.

La atracción gravitacional es un factor que pierde relevancia debido a la densidad del agua y al flujo de agua desplazado por el cuerpo del robot. Un aspecto importante es el ensamblaje del robot debe ser estanco y resistente a la corrosión. Estos robots utilizan motores con hélices, turbinas con paletas de dirección o aletas.

CAPÍTULO 3

Arquitectura del Robot Móvil

En este capítulo se describe la estructura general del robot móvil, así como las características electromecánicas y electrónicas del mismo, se presenta una descripción general de los dos grandes sistemas que conforman al robot: sistema electromecánico y sistema electrónico.

3.1. Descripción General.

El robot móvil, realiza recorridos en superficies planas, identificando y evadiendo obstáculos que se presenten durante su recorrido reportando su posición y las lecturas de los sensores, en cada instante de muestreo. Aunque las superficies en donde se desplazará el robot en su mayoría se espera sean planas, el robot tiene la capacidad de atravesar terrenos con ciertas irregularidades para que pueda tener un abanico más amplio de aplicaciones. El robot es capaz de identificar objetos mayores a un cubo de 20 cm por lado, además de ser capaz de reportar su posición con una resolución de al menos 10 cm. La estructura principal del robot no es mayor a un cubo de 50 cm por lado.

La arquitectura del robot móvil es básicamente la conjunción de dos sistemas: sistema electro-mecánico y sistema electrónico. El sistema electromecánico consiste de una base móvil con tracción tipo diferencial de cuatro ruedas con una transmisión con cadenas de rodillos y motores de alto torque. El sistema eléctrico esta subdivido en múltiples etapas que contemplan desde la batería, el microcontrolador hasta los dispositivos de sensado, ver Figura 3.1.

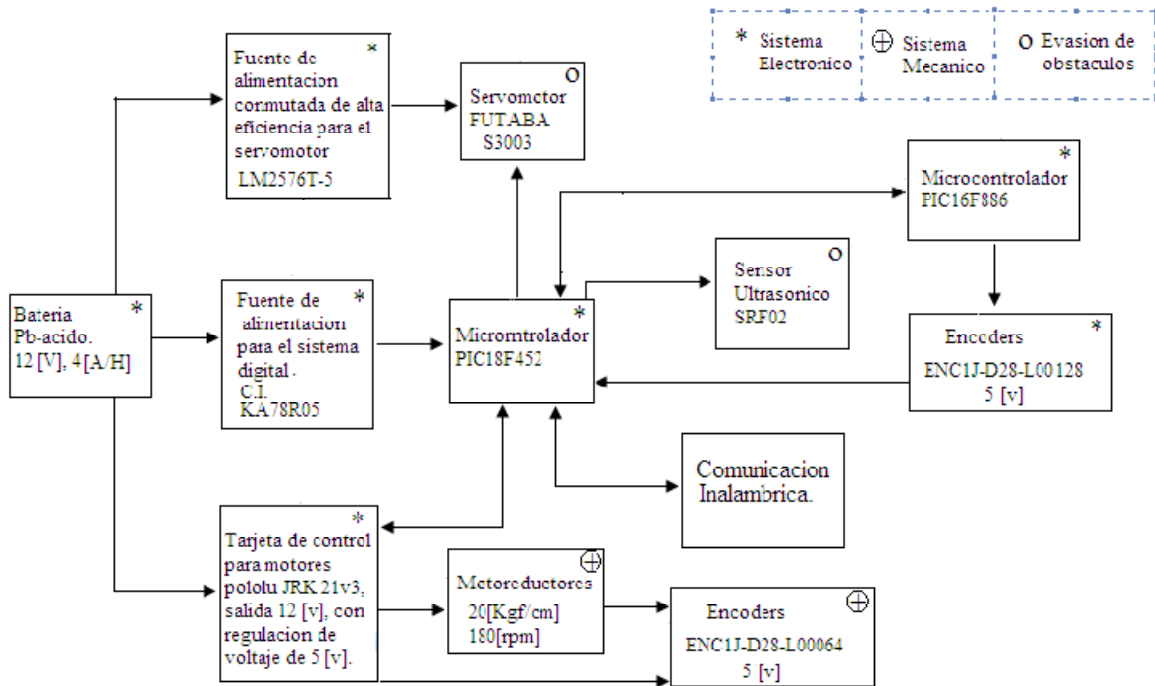


Figura 3.1. Diagrama de Bloques del Robot Móvil.

3.2. Sistema Electro-Mecánico.

La estructura del robot móvil es ligera, con el espacio necesario para contener los módulos operativos de control y potencia, con ejes que soportan las llantas y al mismo tiempo una plataforma donde se soportan tanto los motores como la batería que alimenta a todo el robot.

El material utilizado para la construcción de la estructura mecánica es variado desde madera para la plataforma, barras de aluminio como ejes, nylamid¹, etc. A continuación se detallan algunas características de la estructura mecánica.

¹ Es un plástico de ingeniería a base de nylon. Dada la tenacidad de nylon, su bajo coeficiente de fricción y resistencia a la abrasión, es un material sustituto para una amplia variedad de materiales como metales. Su peso es 7 veces menor al del bronce. Al utilizar el nylamid se reducen los requisitos de lubricación, se elimina la corrosión y mejora la resistencia al desgaste, además proporciona una buena amortiguación del ruido.

3.2.1. Tipo de locomoción.

El tipo de locomoción seleccionada, debido a las características requeridas y a que resulta interesante su estudio por sus particularidades, es de tipo diferencial con tracción en las cuatro llantas, la cual permitirá al robot desplazarse tanto en superficies lisas como en terrenos relativamente irregulares.

Típicamente un robot móvil con locomoción diferencial cuenta con un par de ruedas con tracción, y una o dos ruedas pasivas adicionales, para el balance del vehículo, (véase sección 2.3).

El desplazamiento y direccionamiento de sistemas diferenciales se determinan por el movimiento independiente de cada una de las ruedas de tracción. La diferencia principal que presenta este diseño con respecto al que mencionamos en la sección 2.3, es que cuenta con cuatro ruedas, por lo que no necesita ruedas adicionales para estabilización, dos llantas alineadas están dispuestas sobre los ejes delantero y trasero, las cuales se mueven simultáneamente mediante una transmisión con cadena y a su vez otro par configurado de la misma forma está paralela a éstas (ver figura 3.2.a).

La estructura del robot es muy sencilla, consta de dos plataformas rectangulares de 35 x 18 centímetros colocadas una sobre la otra con un espacio de 7 centímetros, la estructura inferior sirve de base para el sistema de tracción y la batería. La estructura superior proporciona soporte a las tarjetas electrónicas del robot.

Las llantas están montadas sobre dos ejes paralelos a una distancia de 25 cm transversales al robot, cada uno soporta dos llantas con tracción. Las llantas tienen 6" de diámetro por 2" de ancho, su eje de rotación mide ½" de diámetro. Cada una de las llantas tienen un cople construido de nylamid que permite la inserción de un engrane de 13 pasos (ver figura 3.2.b), de igual forma los motores tienen acoplados a sus ejes un engrane de 18 pasos. El sistema de transmisión se completa con una cadena de rodillos que transmite el movimiento de los motores hacia cada una de las llantas.

La velocidad máxima que alcanzan los motores es 180 rpm, la relación de la transmisión, reduce la velocidad de las llantas del robot a un máximo de 108 rpm. Si consideramos que el sistema mecánico, permite el desplazamiento por el contacto superficial o fricción con la superficie, entonces el robot se desplaza una distancia de $D = \pi * d$ pulgadas por vuelta, en donde d es el diámetro de las llantas del robot, es decir de 18.84" o 0.478536 metros por vuelta.

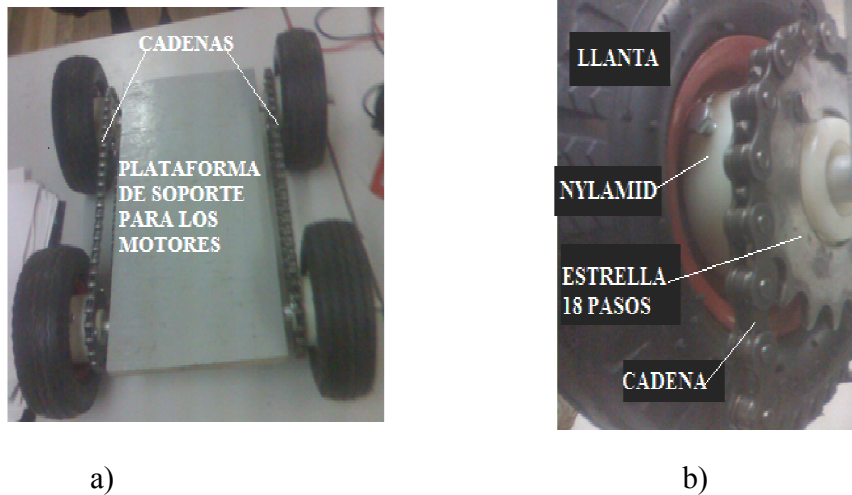


Figura 3.2. Sistema de locomoción. a) tracción y direccionamiento diferencial, b) acople de cadena y llanta.

3.2.2. Descripción de los motores.

El motor de DC, es un tipo de máquina que convierte energía eléctrica en mecánica. Los motores de DC son una opción frecuentemente empleada en la industria, debido a que el control de la mayoría de sus variables es relativamente sencillo de implementar por lo que tienen aplicaciones principalmente en control y automatización de procesos.

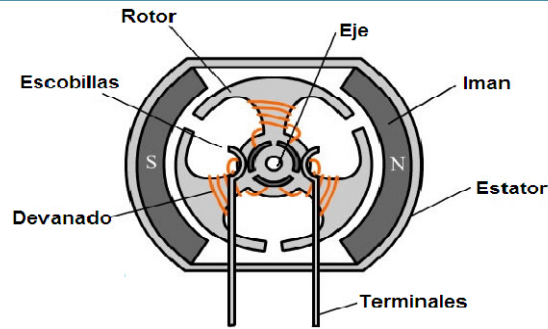


Figura 3.3. Motor de DC, parte internas.

Las máquinas cuyo movimiento sea generado por un motor eléctrico necesitan que la velocidad de dicho motor se adapte a las necesidades de velocidad requeridas y a factores como la potencia mecánica, potencia térmica, rendimientos mecánicos (estáticos y dinámicos) necesarios para el buen funcionamiento de la máquina. La adaptación del motor se realiza generalmente con sistemas de transmisión, éstos comúnmente son cajas de engranes montados sobre el eje o caña del motor que adaptan la velocidad y potencia mecánica, estas cajas se denominan, reductores de velocidad.

Los motores utilizados en este proyecto son denominados Motorreductores, básicamente son sistemas de dos componentes: motor de corriente continua (DC), y reductor de velocidad con engranes. Las ventajas de usar Motorreductores son la regulación tanto de la velocidad como de la potencia transmitida (alto torque), mayor eficiencia en la transmisión de la potencia suministrada por el motor y mayor rigidez en el montaje.

Los Motorreductores empleados y sus principales características se presentan a continuación:


Material: Metal	Torque: 20 kgf*cm	Voltaje: 12V a 24V DC constantes entre terminales	
Eje: Acero	Velocidad sin Carga: 180± 10% rpm	Relación de Reducción:	
Dirección de Rotación: bidireccional	Temperatura de Operación: -10°C ~ +60°C	Corriente con Carga: 7.5 A	
Caja de Engranajes: Plástica	Humedad Soportada: 20% ~ 70%	Corriente sin Carga: 0.52 A Max.	

Figura 3.4. Motorreductor de alto torque y sus características.

3.3. Sistema Electrónico.

En este apartado se detalla la mayor parte de los componentes electrónicos del robot móvil, los subsistemas que conforman a éste son:

- Sistema de sensado.
- Sistema de control para los motores.
- Sistema de comunicaciones inalámbricas.
- Unidad de procesamiento (microcontrolador).
- Sistema de Energía.

3.3.1 Sistema de Sensado

La localización exacta del robot así como su capacidad para identificar obstáculos a lo largo de su trayectoria son condiciones indispensables para lograr realizar un mapeo con un grado de exactitud aceptable, e influirá significativamente en la planificación de trayectorias óptimas que el robot realice, independientemente del objetivo o aplicación de alto nivel a la que este destinado el robot.

Como se mencionó anteriormente el sistema de locomoción con el que cuenta el robot presenta una gran incertidumbre al tratar de ubicar su posición por medios odométricos directos ya que las llantas presentan un deslizamiento significativo cuando el robot cambia de dirección. De la misma forma debido a su tracción en las cuatro ruedas el deslizamiento del robot nunca es el mismo pues depende del tipo de superficie en la que se encuentra.

Debido a los requerimientos fue necesario implementar un sistema de odometría de bajo costo con una resolución de al menos 10 cm, y que no resulte afectado por los deslizamientos que presentan las llantas durante el movimiento del robot.

Se efectuó un análisis y búsqueda de alternativas que permitieran alcanzar estos requerimientos, encontrando que la estimación de la posición se realiza básicamente mediante dos tipos de estimadores: estimadores explícitos y basados en la percepción del entorno. Los estimadores explícitos proporcionan la posición directamente partir de medidas sin que exista un procesamiento de información para interpretar el entorno. La estimación se realiza por medio de dispositivos internos (codificadores, Giroscopios, brújulas, etc.), o por triangulación utilizando estaciones de transmisión de RF, ubicadas en lugares conocidos distantes del vehículo y sin ningún tipo de información exterior.

Los llamados estimadores basados en la percepción del entorno, emplean sensores que suministran información sobre éste a partir de la cual se infiere la localización del robot móvil mediante la comparación de esta información con otros datos conocidos del entorno como pueden ser marcas de localización en algunos puntos del ambiente.

Los estimadores basados en la percepción del entorno se descartaron para el uso de este proyecto, debido a que el objetivo del robot es navegar en un ambiente completamente desconocido y obtener información sobre el entorno. En cuanto a los estimadores explícitos se encontraron diversas opciones como brújulas electrónicas, acelerómetros hasta sistemas GPS, sin embargo estos sistemas tienen alto costo y necesitan un procesamiento de información avanzado, sin alcanzar la resolución deseada.

Por lo anterior, se optó por un sistema de odometría de bajo costo, fácil implementación y mayor exactitud para aplicaciones en interiores y recorridos cortos, [8][9].

3.3.1.1. Sistema de Odometría.

La estimación odométrica es una técnica antigua que tiene por objeto estimar la posición y orientación de un vehículo a partir del número de vueltas de las ruedas, una de las grandes ventajas de estos sistemas son la simplicidad, altas tasas de muestreo y exactitud para tramos cortos.

Conociendo la longitud de la circunferencia de una rueda multiplicándola por el número de vueltas, es posible estimar cuanto se ha desplazado la llanta del robot de la siguiente forma:

Donde D es la distancia recorrida, N es el número de vueltas de las llantas y d es el diámetro de las llantas.

La estimación odométrica es un proceso con mucho error asociado, debido a la acumulación del error en cada periodo de muestreo, puesto que el robot está en una posición con una probabilidad de error asociada, es decir que el desplazamiento tiene asociado un error y al no tener referencias o marcas sobre la trayectoria que permitan establecer la posición exacta durante ciertos periodos, el error se acumula a lo largo del desplazamiento. Este error se debe a múltiples factores, por ejemplo diámetros desiguales de las ruedas, desalineamiento de ejes, resolución finita de los codificadores, así como la uniformidad de los suelos, presencia inesperada de objetos y sobre todo a los deslizamientos. Particularmente la locomoción de este robot presenta grandes deslizamientos en sus llantas, cuando esté gira dificultando estimar su posición a partir del desplazamiento de sus llantas.

Como una solución viable, considerando que el robot se desplazará en ambientes interiores y que su objetivo principal es didáctico y de investigación, se propuso un sistema

odometrico externo al robot el cual consta básicamente de un par de ruedas adicionales con encoders incrementales que giran libremente al ser tirados por el robot, evitando los deslizamientos provocados por el acoplamiento entre un actuador y la llanta, un potenciómetro en el punto en donde se unen las estructuras del robot y del encoder, así como un microcontrolador que realiza las funciones: decodificación de los pulsos, identificación del ángulo entre los ejes longitudinales del robot y del sistema odometrico externo (en lo posterior se denota como *Encoder Tráiler*, ver figura 3.5). A continuación se describe los componentes y la estructura que conforma el Encoder Tráiler.

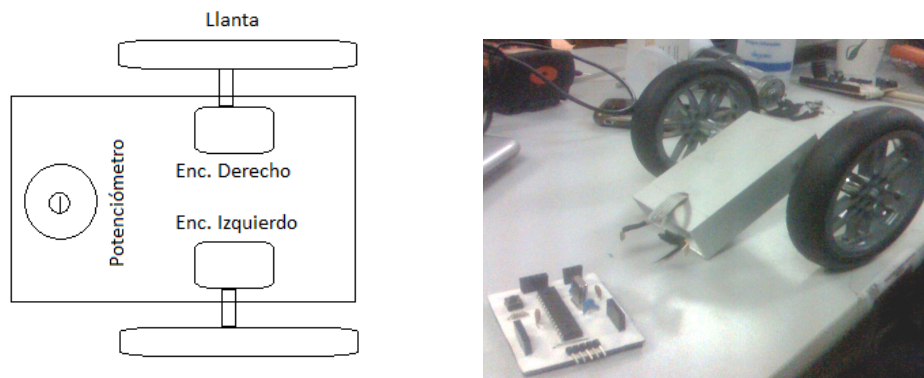


Figura 3.5. Sistema odometrico adicional.

3.3.1.1.1. Encoder Incremental óptico ENC1J.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar una variable física y transformarla a una magnitud eléctrica cuantificable. Otros dispositivos, como los transductores, responden a estímulos provenientes de la señal a estimar y pueden transformar su energía a una magnitud no necesariamente eléctrica. Ambos dispositivos son empleados en el proyecto, tanto en el sistema odometrico como en el control de velocidad, los cuales se describen a continuación.

El encoder es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de pulsos digitales. Los pulsos generados pueden ser utilizados para estimar desplazamientos y velocidades angulares. Las aplicaciones principales de estos sensores se encuentran en maquinas, herramientas, robots, sistemas de motores, aparatos de medición y control.

En el encoder tráiler, la detección del movimiento angular se realiza mediante la rotación de un disco con marcas transparentes y opacas repartidas a lo largo de su área (ver figura 3.6). Los receptores tienen la tarea de detectar las variaciones en la intensidad del haz de luz que se producen con el desplazamiento del disco convirtiéndolas en las correspondientes variaciones eléctricas, los receptores están montados en la base del encoder llamada también estator.

Un sistema lógico permite determinar desplazamientos a partir de un origen, con base en el número de pulsos generados por el encoder y determinan el sentido de giro, a partir del desfase entre las señales. Para tener una señal cuadrada ésta debe ser procesada electrónicamente. Para incrementar la calidad y estabilidad de las señales, el sistema de lectura se efectúa generalmente de manera diferencial, comparando dos señales casi idénticas, pero desfasadas 90° con base a la diferencia de las dos señales, eliminando de este modo las interferencias definidas de modo común porque están superpuestas de igual manera en toda la forma de onda y al mismo tiempo identificando el sentido de giro del motor.

Las dos señales son denominadas “canal A” y “canal B”, con la lectura de un solo canal se dispone de la información correspondiente a la velocidad de rotación, mientras que si se capta también la señal B, es posible determinar el sentido de rotación con base en la secuencia de pulsos producidos por ambas señales (ver figura 3.6).

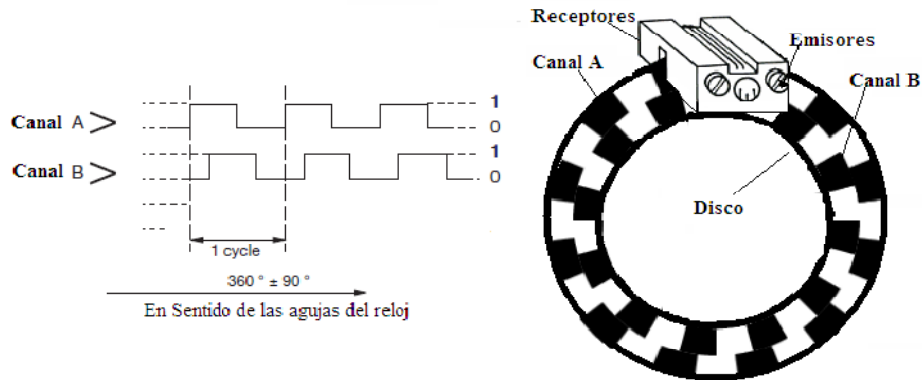


Figura 3.6. Encoder Óptico Incremental.

La precisión de los encoders incrementales depende de diferentes factores mecánicos y eléctricos, como la excentricidad del disco y de los rodamientos, el error introducido por la electrónica de lectura, imprecisiones de tipo óptico, etc. Así mismo la resolución del encoder depende del número de divisiones del rotor, es decir del número de pulsos por revolución.

El encoder incremental utilizado en este proyecto es el EC1J-D28-L00064, algunas de sus características se presentan en la Figura 3.7. Un sensor de este tipo está montado sobre cada una de las llantas del encoder tráiler.

Dos canales de salida.....90° de desfase entre ellos.
Resolucion.....de 25 a 256 CPR.
Voltaje de Alimentacion.....5VDC.
Corriente de Entrada.....25mA.
Potencia de Consumo.....136mW.
Angulo Mécanico.....360° Continuos.
Ancho de Pulso(G.E).....180°+45° Typ.



Figura 3.7. Encoder Óptico Incremental, ENC1J-D28-L00064.

3.3.1.1.2. Potenciómetro

Es un dispositivo electromecánico que representa una resistencia variable, para esto cuenta con un eje móvil o cursor que se desplaza a lo largo de una superficie que representa una resistencia de valor constante, este eje divide la resistencia en dos, cuyos valores se complementan y cuya suma tendrá siempre el valor de la resistencia total.

Los potenciómetros son comúnmente usados en sistemas de baja corriente pues no disipan potencia, estos dispositivos se usan como divisores de voltaje ya que al hacer pasar una corriente por éste se genera una diferencia de potencial en cada una de las resistencias, como se muestra en la figura 3.8, el potencial V_o es dividido en dos tensiones de menor cantidad, pero que cumplen la restricción de resistencia anteriormente descrita. Estos dispositivos son capaces de medir la posición angular y pequeños desplazamientos de posición lineal. Uno de estos dispositivos se utiliza en el punto de unión entre el encoder tráiler y el vehículo de tracción, se utiliza para medir la posición angular del encoder tráiler con respecto al robot.

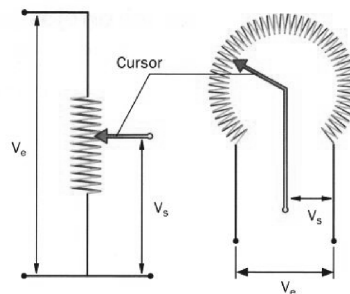


Figura 3.8. Potenciómetro.

3.3.1.1.3. Microcontrolador PIC16F886

Un microcontrolador es básicamente un chip que contiene los componentes de una computadora pero con prestaciones reducidas, contiene las tres unidades funcionales básicas: UCP (Unidad Central de Procesamiento), unidad de memoria y módulos de entrada y salida; así como periféricos especializados para aplicaciones dedicadas de control.

Se determino usar un microcontrolador de la familia PIC debido a que se adecua para el propósito de este proyecto, en cuanto a costo, accesibilidad, prestaciones de memoria, facilidad de programación, cantidad de recursos disponibles para el desarrollo, etc. Además el conocimiento fundamental (*know-how*) sobre este tipo de microcontrolador fue determinante para su uso.

Los microcontroladores PIC de Microchip, son circuitos integrados de alta escala de integración, con arquitectura Harvard. La memoria de programa está estructurada en 12, 14 o 16 bit mientras que la memoria de datos en 8 bits.

Estos microcontroladores al tener memoria para datos e instrucciones separadas, ejecutan las instrucciones de modo segmentado (*pipeline*) lo que les permite procesar la instrucción anterior mientras se busca la siguiente, en este tipo de procesadores la mayoría de las instrucciones (excepto las de salto) se ejecutan en un solo ciclo de instrucción, lo que los hace más rápidos con respecto a microcontroladores con arquitecturas Von Neumann.

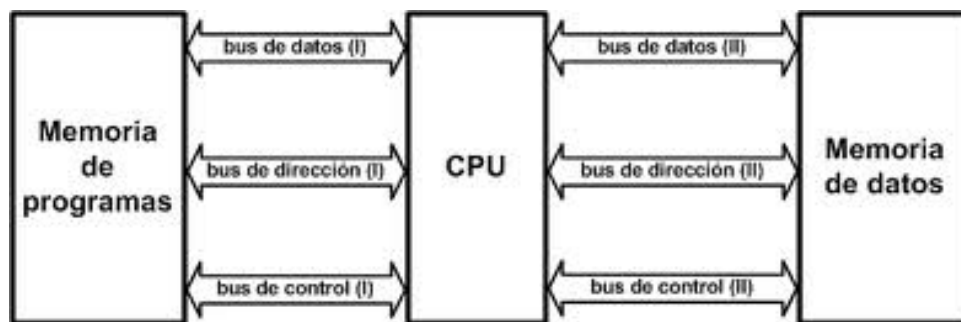


Figura 3.9.Diagrama un microcontrolador con arquitectura Harvard.

El set de instrucciones de estos microcontroladores es reducido (RISC)², varía para cada familia entre 33 y 83 instrucciones. Poseen una memoria volátil (RAM) para almacenar datos y otra de tipo flash para el código, cuentan con una memoria de datos no volátil (EEPROM). La programación de estos dispositivos se realiza mediante ICSP (*in Circuit Serial Programming*), comunicación serial compuesta principalmente por una línea de datos y otra de reloj.

Estos dispositivos cuentan con temporizadores de 8/16 bits, módulos de comunicación síncrona y asíncrona USART, EUSART, comparadores de voltaje, módulos de captura y comparación PWM, controladores LCD, periférico MSSP para comunicaciones I²C y SSP, control de motores y soporte de interfaz USB.

El microcontrolador PIC16F886 es el circuito integrado, encargado de realizar la decodificación de los pulsos generados por el encoder así como registrar el valor de la lectura del potenciómetro para determinar el ángulo al que se encuentra el encoder con respecto al robot. Una vez procesados los datos los envía al microcontrolador PIC18F452 cada vez que éste se los requiere. Las características principales del PIC16F886 se muestran en la figura 3.10.

El procesador del encoder tráiler envía los datos en forma serial al microcontrolador principal mediante comunicación asíncrona usando el modulo USART (por sus siglas en ingles *Universal Synchronous Asynchronous Reciever Transmitter*) a una velocidad de 115200 bauds, ambos microcontroladores usan este modulo interno, para “comunicarse” entre ellos.

² RISC (*reduced instruction set computer*) es una computadora con un set de instrucciones fijo y determinado por una longitud constante..

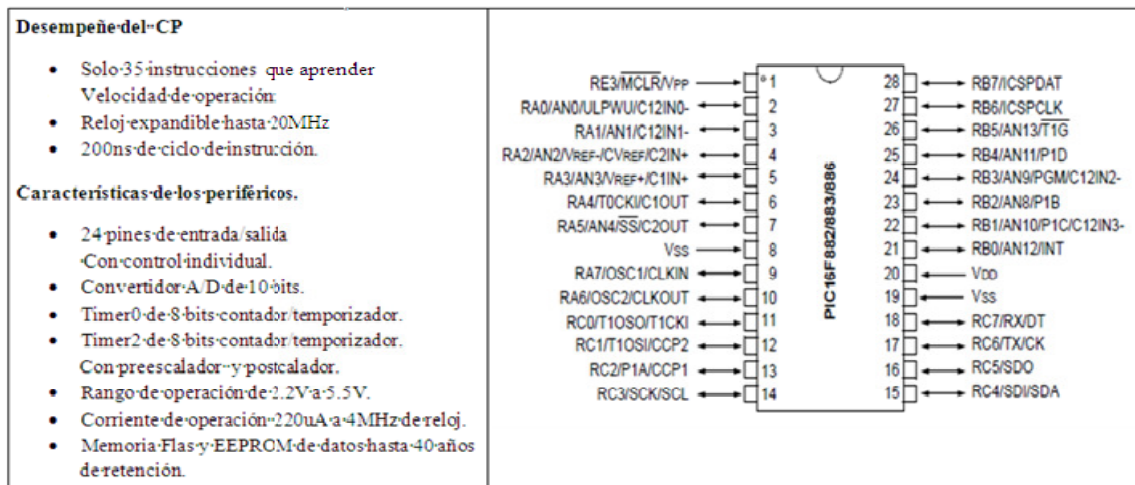


Figura 3.10. Descripción general del PIC16F886.

3.3.1.1.4. Tarjeta Electrónica para el Encoder Tráiler.

La tarjeta electrónica desarrollada (ver figura 3.11) consta de cinco pines destinados a cada uno de los encoders incrementales del tráiler. Los pines son (5V, GND, Canal A, Canal B, Canal Z). Los canales de los encoder son entradas del puerto B del PIC16F886. El puerto B es un conjunto de 8 bits bidireccionales, puede configurarse como entrada o salida digital dependiendo de la configuración del registro TRSIB. El puerto B tiene una característica importante, que es la capacidad de detectar cambios en el estado de cada uno de los pines (bits) mediante interrupción, esta característica, es útil al desarrollar el algoritmo de control del encoder tráiler, ya que permite identificar de manera asíncrona los pulsos generados por los encoder sin la necesidad de verificarlos por polo lo cual resultaría bastante ineficiente.

El potenciómetro del encoder está conectado a un canal del convertidor analógico digital a través del cual se estimará el ángulo del encoder tráiler con respecto al robot.

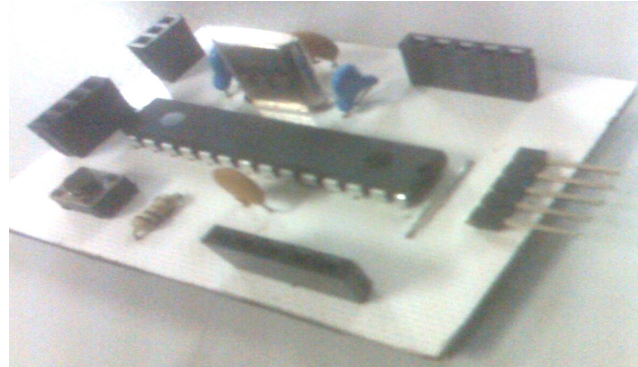
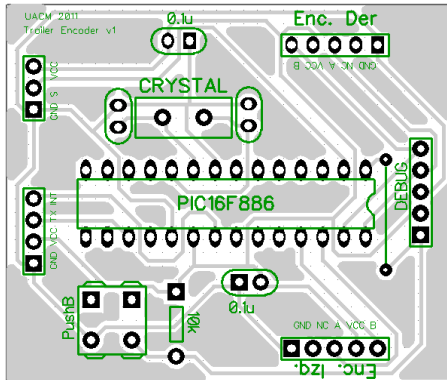


Figura 3.11 Tarjeta de sistema odometrico.

3.3.1.1.5. Implementación Digital del Algoritmo de Odometría.

Como se menciona en la sección 3.3.1.1.2, los encoder rotatorios producen dos señales cuadradas, las cuales están desfasadas en 90° una con respecto a la otra, teniendo una representación de secuencia lógica. La figura 3.8, muestra los dos posibles casos que pueden presentarse durante el giro de la llanta del robot ya sea que el eje del encoder gire hacia la derecha (Sentido Horario, SH) o el eje gire a la izquierda (Sentido Anti-Horario, SAH). Al leer la dirección en sentido horario tiene una secuencia de números (01, 00, 10, 11) que es diferentes en cuanto a la dirección SAH (01, 11, 10, 00). Se puede reconocer estas secuencias como código Gray, por análisis de la figura 3.12, se distingue el hecho de que sólo un bit cambia en cualquier transición.

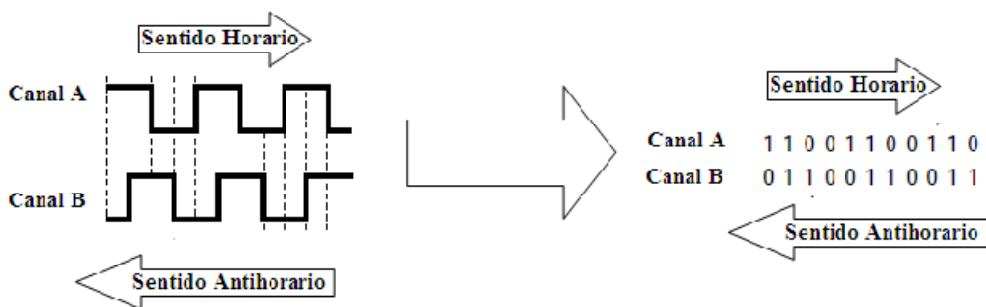


Figura 3.12. Encoder incremental, Canal A y Canal B, secuencia lógica.

Un método que utiliza una propiedad del código Gray, es elegir cualquier par de números de la secuencia de SH y SAH que se muestra en la figura 3.8; por ejemplo, los dos primeros: 10, 11, se calcula el OR exclusivo (XOR) del bit de la derecha del primer número con el bit de izquierda del segundo número. En este caso sería $0 \text{ XOR } 1 = 1$.

Al probar esto para cualquier par de números de la SH, siempre obtendrá 1. Ahora se invierte el orden de la pareja de números: 11, 10. El XOR del primer bit del número de la derecha con el segundo bit del número de la izquierda ($1 \text{ XOR } 1 = 0$). Para cualquier par de números de la SAH se producirá un 0.

Aprovechando estas características se programó un algoritmo que detecta los pulsos generados por los encoder así como la dirección del giro, dato que es almacenado en una variable y enviado al microcontrolador principal. El algoritmo que se siguió se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.13.

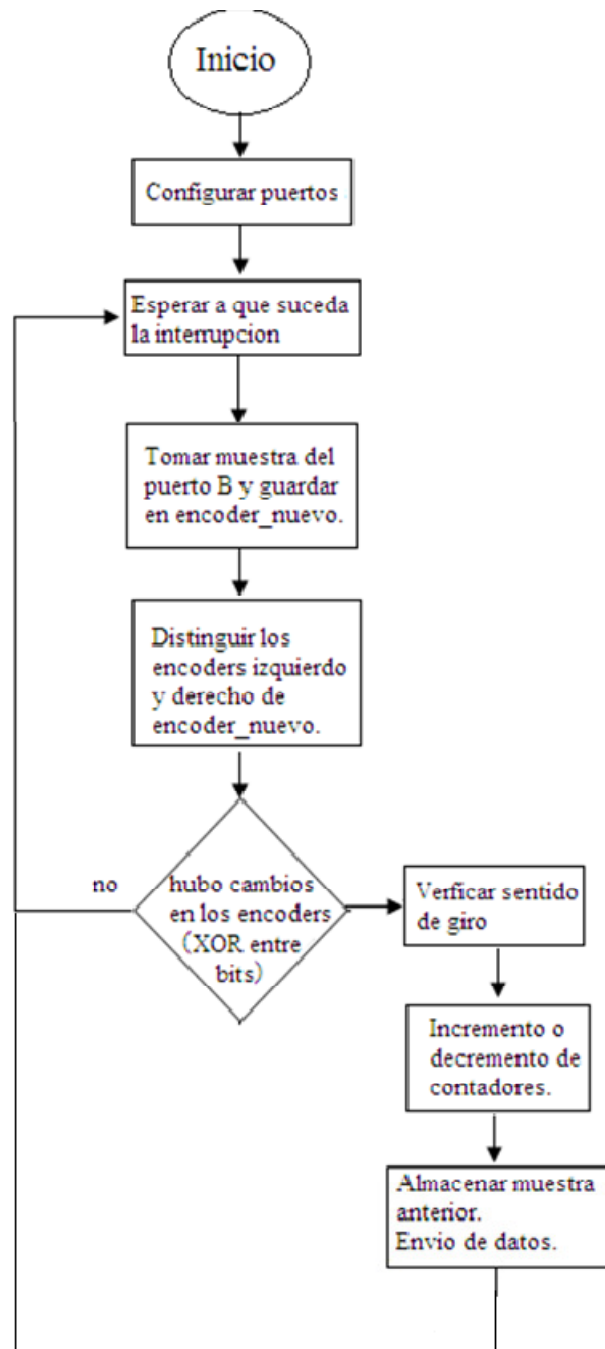


Figura 3.13. Diagrama de flujo del algoritmo de control, para el sistema odometrico.

3.3.1.2. Sistema de Detección de Obstáculos.

Al desplazarse y trasladarse el robot tiene la capacidad de evadir obstáculos estáticos. Basados en el rango y resolución, el tipo de objetos que se puedan presentar en la trayectoria y el tipo de ambiente, se eligió el sistema sensorial; decidiendo utilizar sensores ultrasónicos e infrarrojos, buscando siempre la disponibilidad comercial y manteniendo un costo lo más bajo posible.

El sistema de detección de obstáculos básicamente cuenta con dos componentes, sensores ultrasónicos y sensores infrarrojos. Por los resultados obtenidos durante la caracterización, el sistema de sensado ultrasónico básicamente se utiliza para identificar objetos a largas distancias en la parte frontal del robot y el sensado infrarrojo se utiliza para el seguimiento de contornos, a continuación se detallan características de estos sistemas.

3.3.1.2.1 Sensor Ultrasónico

El sensor ultrasónico es un transductor electro-acústico, frecuentemente un transductor cerámico de tipo piezoeléctrico. Este tipo de materiales cuando se deforman, generan dentro de sí mismos, una carga eléctrica. Este efecto es reversible, puesto que al aplicar una carga al transductor, éste se deformará mecánicamente. La forma del movimiento efectuado depende de la forma y orientación del sensor con respecto a los ejes de los cristales. Un elemento piezoeléctrico que se emplea para convertir el movimiento de éste, en señales eléctricas, se considera como generador de carga y de forma general se modela como un capacitor, debido a que la deformación mecánica genera una carga, y ésta se convierte en voltaje que aparece entre los extremos del transductor.

Si aplicamos un voltaje, en los extremos del cristal, este sufre cambios en sus dimensiones, lo que ocasiona un cambio de presión en el medio que lo rodea (el aire), y viceversa, al ser sometido el cristal a un cambio de presión aparecen cargas eléctricas en sus extremos, donde se crea una diferencia de potencial. Por lo que este tipo de transductor puede funcionar como emisor ó receptor ultrasónico.

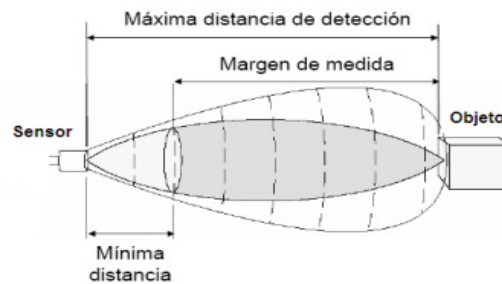


Figura 3.14. Sensor ultrasónico.

Los sensores ultrasónicos para la medición de distancia, constan básicamente de un transmisor que emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectado por un receptor, este efecto también conocido como sonar se puede encontrar en seres vivos como los murciélagos. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora

El sensor utilizado es el SRF02, este dispositivo utiliza el modo de difusión tipo eco, y su patrón de radiación se muestra en la figura 3.15, este componente es un transductor ultrasónico montado en una pequeña tableta PCB. Las características técnicas de sensor SRF02 son las siguientes:

Voltaje:	5v
Corriente:	4mA
Frecuencia:	40KHz
Rango Mínimo:	17 - 18 cm
Rango Máximo:	6 m
Resolución:	3 – 4 cm
Ganancia:	Control Automático
Comunicación:	I2C, Serial
Calibración:	Automática al encender

Unidades de salida: μs , cm, pulgadas

Dimensiones: 24mm w, 20 mm d, 17mm h

Una de las ventajas que tiene este sensor en su sistema de comunicación es la posibilidad de conectar hasta 16 sensores de este tipo por medio del bus I2C, lo cual permitirá agregar más sensores en un trabajo futuro si se considera necesario.

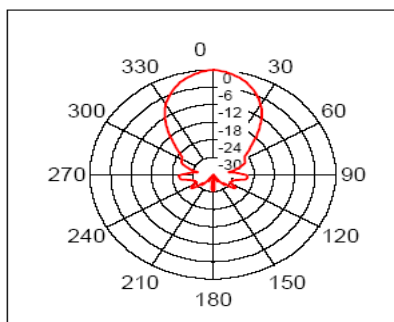


Figura 3.15.Sensor SRF02.

Este sistema cuenta con comandos que incluyen la posibilidad de enviar una ráfaga ultrasónica en un ciclo de recepción de 65ms, el SRF02 utiliza un transductor único para la transmisión y recepción por lo que el intervalo mínimo es mayor que otros transductores duales.

3.3.1.2.1.1 Caracterización del Sensor.

Las ondas ultrasónicas son reflejadas por la mayoría de los objetos sólidos, sin embargo la reflexión es atenuada dependiendo de varios parámetros, incluyendo la impedancia acústica del aire y del objeto, difusión causada por la textura del objeto, ángulo de incidencia de la onda con respecto a la superficie del objeto y apertura del haz acústico. La figura 3.16 muestra estos efectos.

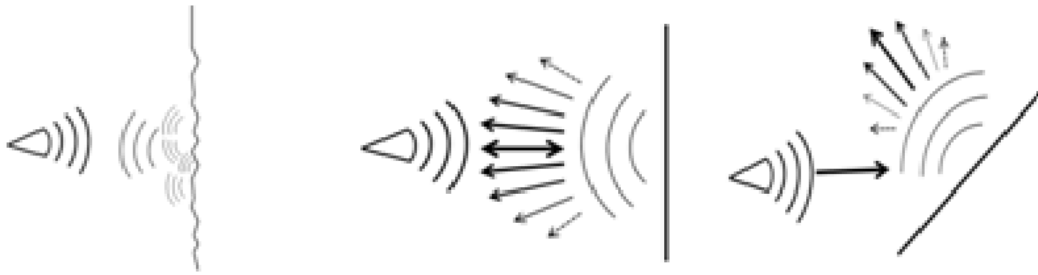


Figura 3.16 a) Difusión causada por la textura, b) Ángulo pequeño de incidencia (máxima reflexión), c) Ángulo de incidencia muy grande (mínima reflexión).

Para caracterizar al sensor y verificar su funcionamiento se realizaron pruebas de distancia, de reflexión y de apertura del haz.

Para poder determinar los rangos de detección del sensor con ángulos de incidencia cero se registraron las lecturas tomadas por el sensor al hacer incidir el haz sobre un cubo de 10 cm fabricado de madera, posicionando el objeto justo frente al sensor y alejándolo ortogonalmente 1 cm cada vez hasta la distancia que deja de detectar el sensor. Se tomaron dos lecturas para cada posición y se promediaron para obtener un valor en cada punto. Los resultados se muestran en la figura 3.17.

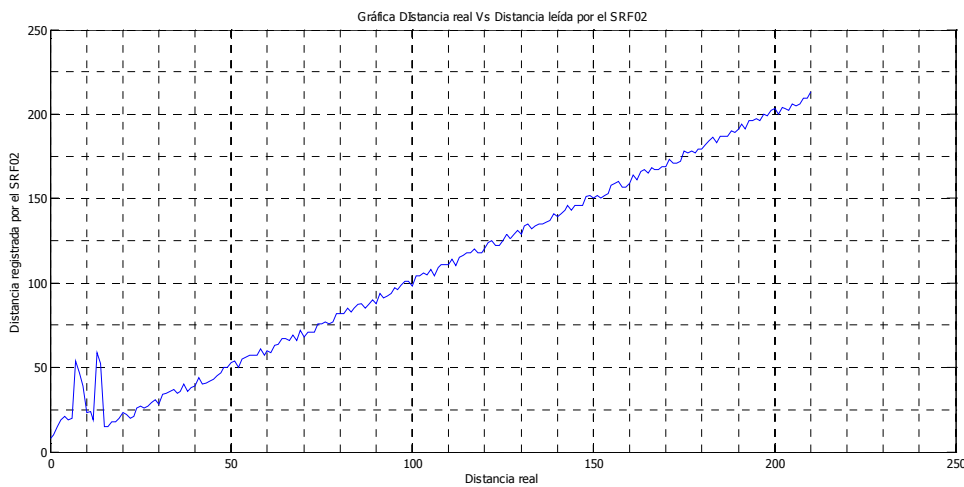


Figura 3.17 Gráfica de detección para ángulo de incidencia cero.

En esta gráfica (Figura 3.17) se puede observar que para distancias menores a 16 cm, las lecturas del sensor son incorrectas, una vez pasados los 16 cm, la salida del sensor es la esperada, vemos que se comporta de forma lineal. Obteniendo el porcentaje de error en la lectura (Figura 3.18), se observa que después de los 16 cm de distancia el porcentaje de error es prácticamente cero (0.09%). Teniendo el sensor un buen desempeño para la determinación de distancias con ángulos de incidencia cercanos a cero y logrando detectar al objeto de prueba hasta los 211 cm de distancia.

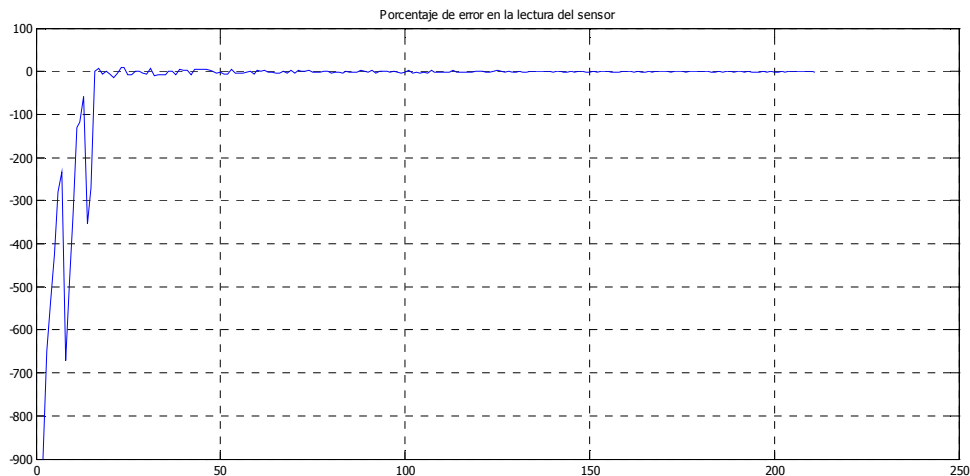


Figura 3.18 Porcentaje de error en la lectura del SRF02.

Para verificar el desempeño del sensor cuando el ángulo de incidencia del haz sobre la superficie es diferente de cero se colocó el objeto de prueba a una distancia de 80 cm modificando el ángulo (θ) con respecto al sensor como se muestra en la figura 3.19. El ángulo se fue incrementando hasta que el sensor dejó de registrar la lectura de la distancia. Nuevamente se tomaron 2 lecturas para cada ángulo y se promediaron para obtener un solo valor.

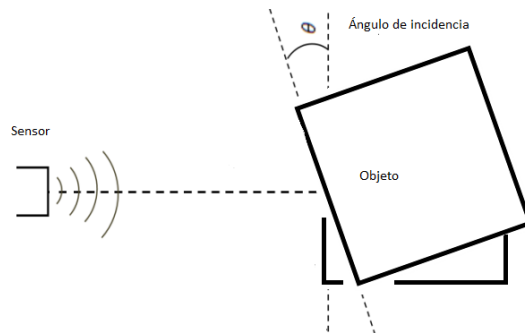


Figura 3.19 Prueba de reflexión

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos durante la prueba de reflexión. Se puede observar que a partir de los 25 grados la lectura es incoherente para ambos lados y que el comportamiento del sensor es simétrico. De acuerdo a esta tabla si se tiene un ángulo de incidencia mayor a 15 grados la lectura puede ser errónea.

ángulo (θ)	Lectura
25	400
20	200
-15	81
-10	81
-5	80
0	81
5	80
10	81
15	81
20	210
25	590

Tabla 1. Resultados de la prueba de reflectividad

Se realizaron pruebas para determinar cómo influye la apertura del haz sobre las lecturas del sensor, para esto se colocó el objeto de prueba a 80 cm frente al sensor y se fue desplazando de izquierda a derecha en línea recta, (figura 3.20a). Se pudo observar en este caso que después de alcanzar los 15 grados en la incidencia del haz con respecto a la superficie las lecturas son erróneas, sin embargo girando el objeto manteniendo la cara principal perpendicular al haz se logran obtener lecturas con un mínimo error hasta los 25 grados aproximadamente. Los resultados se muestran en la tabla 2.

ángulo (θ)	Lectura
30	190
25	79
20	78
-15	80
-10	81
-5	80
0	81
5	80
10	80
15	81
20	79
25	78
30	178

Tabla 2. Resultados de prueba de detección con objeto perpendicular al haz ultrasónico

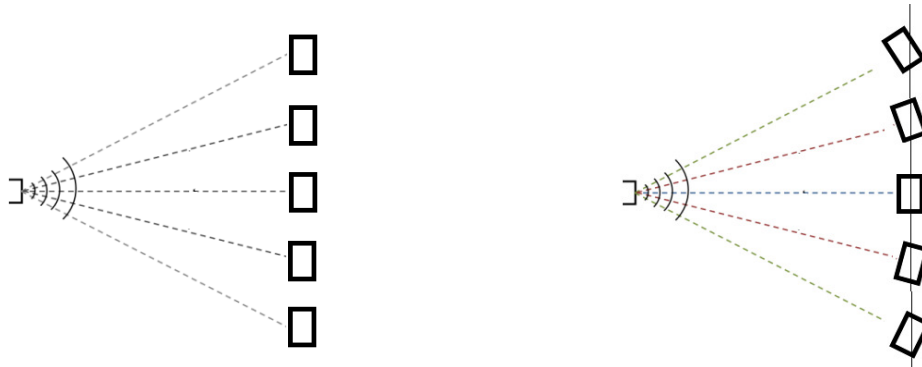


Figura 3.20. a) Prueba de apertura moviendo el objeto en línea recta, b) Manteniendo el objeto perpendicular al haz.

Las pruebas realizadas a los sensores mostraron que las ondas rebotan en todos los objetos en un ambiente de laboratorio (paredes, ventanas, muebles de oficina, sillas, etc.). Se observó que los factores que afectan notablemente el desempeño del sensor son el ángulo de incidencia de la onda y la apertura del haz acústico.

El haz de este sensor tiene una forma cónica, la potencia de la onda es mucho menor en las orillas del patrón de radiación por lo que los mejores resultados en la medida se obtienen cuando el ángulo de incidencia es cercano a cero.

Se detectó que en ocasiones el sensor falla en detectar objetos que son muy pequeños y están cercanos o de mediano tamaño pero están cerca del límite de detección. Llegando a la conclusión de que esto se debe a que la energía acústica detectada por el sensor es proporcional a la superficie percibida por el sensor e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del objeto. Figura 3.21.

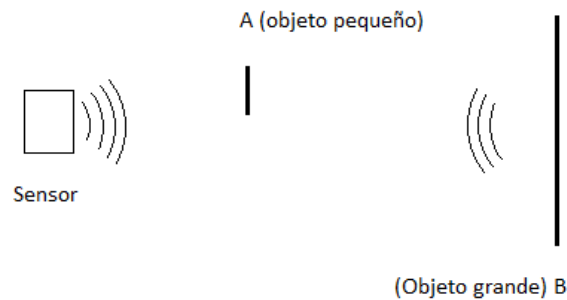


Figura 3.21. Objeto pequeño no detectado a pesar de estar cerca debido a su tamaño

Cuando se tienen ángulos de incidencia muy grandes, la onda regresada se vuelve indetectable debido a dos causas. Figura 3.22

- La onda reflejada rebota varias veces en objetos paralelos lo que provoca lecturas a distancias aparentes
- La onda reflejada continúa viajando hasta que se desvanece sin ser detectada.

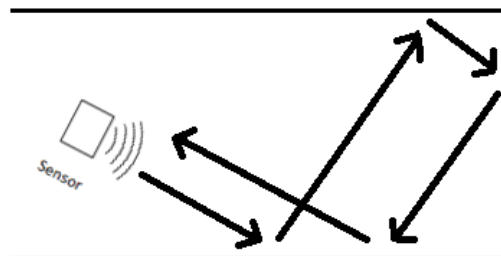


Figura 3.22 Lectura de una distancia aparente

3.3.1.2.2. Sistema Electromecánico del Sensor.

En la mayoría de los robots móviles que cuentan con un sensado ultrasónico, se colocan al menos tres sensores en la parte frontal para tener una mejor cobertura de sensado y asegurar que se detecten todos los objetos con los que se puede encontrar el robot, entre más grande sea el robot es necesario tener un ángulo de sensado más grande. Con la finalidad de mantener el bajo costo en este proyecto se utilizará un solo sensor pero se le dotará de la

capacidad de girar para tener una cobertura más grande, por lo que se le agregará un servomotor sobre el cual estará montado el sensor. Ver figura 3.23.

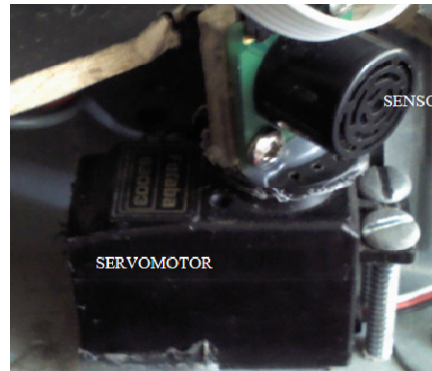


Figura 3 23. Sensor ultrasónico sobre la base del servomotor.

3.3.1.2.2.1. Servomotor

Un servomotor es un dispositivo que tiene un eje controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal de control. Mientras la señal de control esté presente en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular, cuando la señal cambia, la posición angular de los engranes cambia. Los servos que se usan en mini robots generalmente son motores pequeños, con circuitería de control interna. .

El dispositivo donde está montado el sensor ultrasónico es el servomotor FUTABA 3003, tiene integrado una caja de reducción con engranes y un control que posiciona al motor mediante una señal de nivel TTL de 50Hz (periodo 20ms), con PWM (Pulse Width Modulation³), el rango de movimiento es de 0° a 180°. Un extremo se alcanza con un pulso de 2.3ms, y otro extremo con 0.3ms, ver figura 3.24.

³ PWM (Pulse Width Modulation) es la modulación por ancho de pulso es una técnica donde varia el ciclo de trabajo, $D = \text{Ton} / \text{Toff}$ (Ton, tiempo de encendido, Toff, tiempo de apagado) de una señal periódica para transmitir información o para control, en nuestro caso varia de 1.5% a 11.5%.

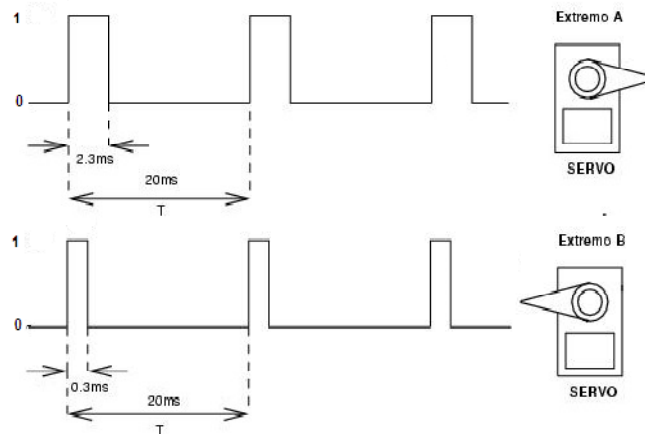


Figura.3.24. Señales de control para el servomotor Futaba 3003, de 20ms de periodo.

Para generar la señal de control para el servomotor se usa dos módulos timers del microcontrolador PIC18F452; la señal se genera a partir de un periodo de 20ms y de acuerdo a la imagen de la figura 6.4, se generan tres pulsos es decir tres posiciones en, 60°, 90° y uno de 120°, que equivalen a pulsos de 0.76ms, 1.3ms y 1.56ms respectivamente.

La posición central o neutral se encuentra en 90°, a partir de esta posición colocamos el sensor a 45° sobre el motor, como se muestra en la figura 3.24, esto permite tener una detección de objetos con un alcance de 16cm a 2.5 metros aproximadamente en la parte frontal; haciendo un barrido de $\pm 45^\circ$ a partir de la posición neutral, de igual forma en los laterales se tiene una detección con un alcance similar sin embargo pueden generarse errores por el ángulo de incidencia del haz ultrasónico..

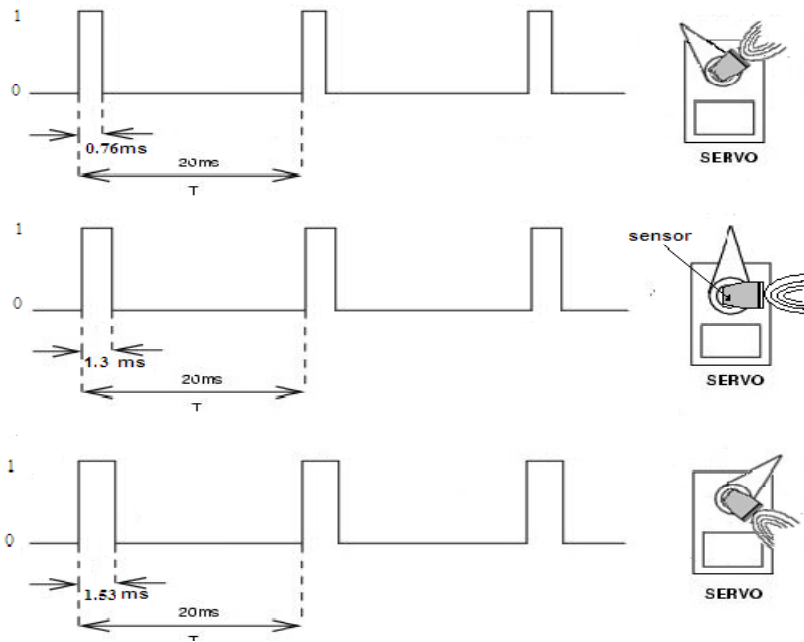


Figura 3.24. Señal de 20ms de periodo, con Ancho de pulso de 0.3 a 2.3 ms.

En la figura 3.24 también se muestra los pulsos que se generan para las posiciones del servo, es decir el barrido ultrasónico. Como se menciona anteriormente la señal se genera con la conjunción de dos módulos timers del microcontrolador PIC18F452: TIMER0 Y TIMER2. Ambos módulos son contadores, con distinta capacidad, el TIMER0 se configura para que indique cuando se alcance 1.12ms, 1.6ms, y 2.13ms.ver figura 3.25.

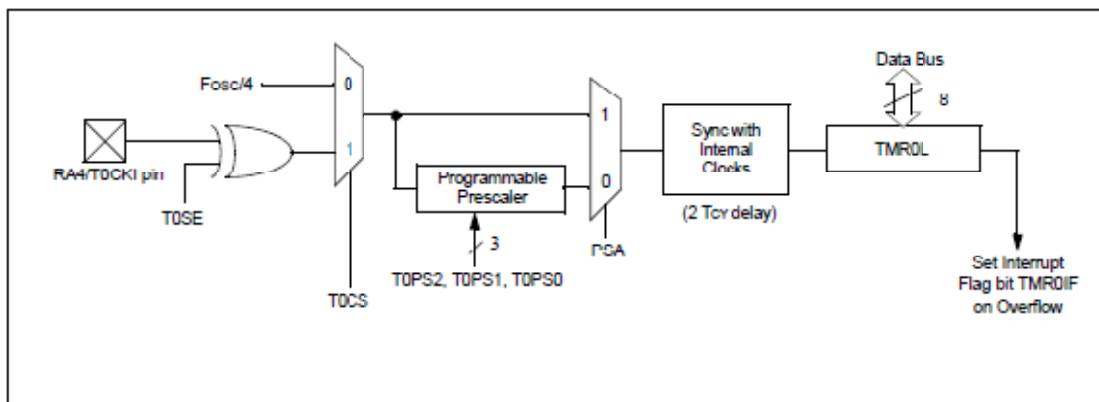


Figura 3.25. Diagrama de bloques de configuración del timer0.

El TIMER2, es un contador que cuenta con un registro especial para comparación, este modulo se configura con apoyo del diagrama que se muestra en la figura 3.26 Para generar un periodo de aproximadamente 20ms. se configura el prescaler y postcaler con valores de 16, en ambos casos, la bandera TMR2IF indica cuando se alcanza el valor de tiempo de 26.21ms, al inicio de cada periodo del TMR2 se desactiva y activa el TIMER0 con un valor precargado que permitirá posicionar al servo en cada ciclo. Cabe señalar que además el periodo de tiempo del TIMER2 se toma de referencia para otras actividades del microcontrolador. La secuencia lógica se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.27.

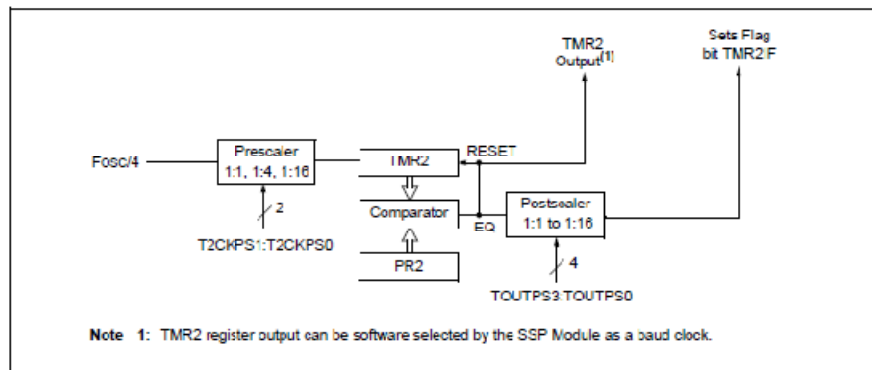


Figura 3.26. Diagrama de bloques de configuración del timer2.

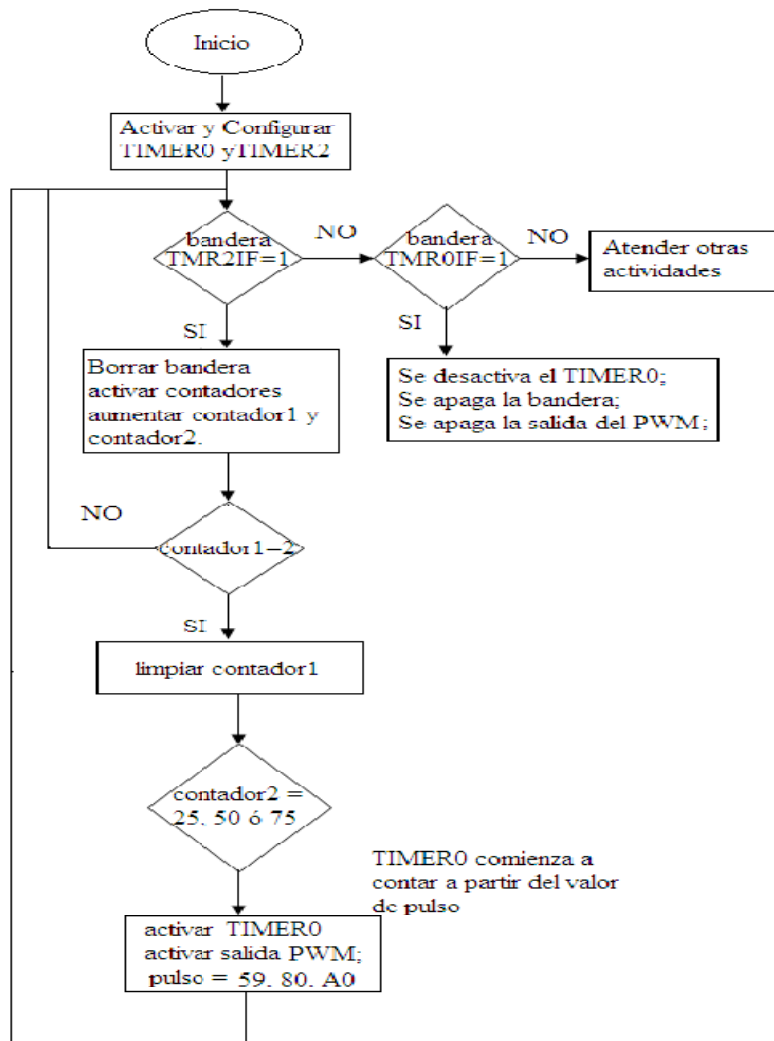


Figura 3.27. Diagrama de flujo del algoritmo de control del servo para giros del sensor ultrasónico.

3.3.1.2.2.2. Sensor Infrarrojo.

El GP2Y0A02YK0F es un dispositivo compuesto de una combinación de un fotodetector y un emisor infrarrojo, así como una unidad de procesamiento de la señal. Este sensor tiene la ventaja sobre otro tipo de sensores reflectivos de no ser afectado por la reflectividad del material, se decidió utilizar éste sensor debido a que tiene una resolución mayor que el SRF02 y un menor alcance (10 cm) , éste se utilizará para el seguimiento de contornos.



Figura 3.28. Sensor infrarrojo

Una de las desventajas de éste es que su salida no es muy lineal, sin embargo si se obtiene el inverso de la distancia la salida es lineal en casi todo el rango útil del sensor. En la figura 3.29.a se observa la respuesta del sensor para distancias de 0 hasta 150 cm, la figura 3.29.b muestra el inverso de la distancia y se observa cómo se obtiene una relación aproximadamente lineal.

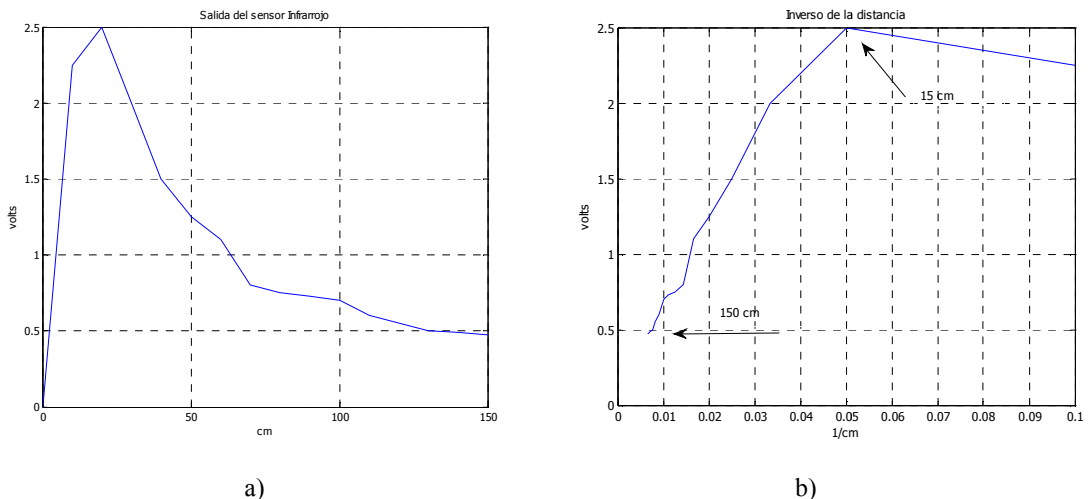


Figura 3.29. Respuesta del sensor para una distancia entre 0 y 150 cm.

3.3.1.2.2 Fuente de alimentación de alta eficiencia.

El servomotor que mueve al sensor frontal tienen un alto consumo de corriente (1 ampere a 5 volts); adicionalmente serán integrados al robot otro tipo de sensores, como una cámara IP, el consumo de esta cámara típicamente es oscila entre 1.2 y 1.5 amperes; en consecuencia es necesaria incluir una fuente de voltaje que pueda suministrar al menos tres amperes de corriente, debido a que los reguladores que incluye la tarjeta de control (78KA05) entregan una corriente máxima de un ampere.

Los convertidores DC-DC o fuentes conmutados, son un tipo de fuentes de alimentación de voltaje, que trabajan en alta frecuencia, debido a que los circuitos de potencia (transistores), conmutan a una frecuencia mucho mayor que la de variación de las formas de onda de entrada y salida del convertidor. Se emplean filtros pasa-bajos para eliminar los componentes armónicos no deseados. Un transistor funge como interruptor, deben controlarse para conducir y bloquear. Ver figura 3.30.

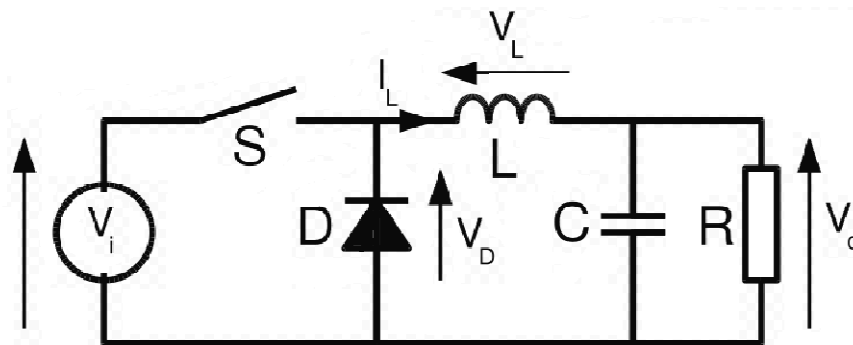


Figura 3.30. Convertidor DC DC, Step-Down (Buck).

En la figura 3.30 se muestra un switch (S), pero éste elemento en realidad es un transistor de alta frecuencia por lo regular del tipo MOSFET, este tipo de fuente es conocido también como convertidor Buck, o Step-Down, debido a que tiene un nivel de tensión menor al de la entrada, este tipo de fuentes alcanzan eficiencias mayores del 80%.

Las fuentes de alimentación conmutadas a diferencia de las fuentes lineales son fuentes de voltaje eficientes, debido a que solo entregan la energía que necesita la carga por lo que la disipación de es menor. El dispositivo que utilizado para el diseño de la fuente conmutada es el regulador conmutado LM2576-5, este es un switch que incluye un bloque interno de control, con un voltaje de salida fijo a 5 volts; trabaja a 52KHz, cuenta con protección térmicas y contra sobrecorrientes, sólo se deben agregar un mínimo de componentes externos (capacitor, inductor y diodo) que dependen del máximo voltaje de entrada a la fuente y el máximo consumo de corriente.

Para el cálculo de los componentes se usa los siguientes parámetros:

Capacitor: debido a que este dispositivo tiene una salida de tensión fija de 5V, el fabricante recomienda 100uF, para el capacitor de entrada.

Inductor: los parámetros de este elemento son la corriente de carga tensión den entrada y salida.

$$(1) \quad I_{p(max)} = I_{Load(max)} + \frac{(V_{in} - V_{out})t_{on}}{2L}$$

$$(2) \quad t_{on} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \frac{1.0}{f_{osc}}$$

$$(3) \quad V_{out} = 5V, V_{in} = 12, f_{osc} = 25KHz, I_{load(max)} = 3A, I_{p(max)} = 3.3A.$$

Donde $I_{p(max)}$ es la corriente pico que estimamos que sostendrá el inductor, $I_{load(max)}$ corriente de carga máxima, V_{in} y V_{out} , tensión de entrada y salida, respectivamente, el t_{on} es el tiempo que dura encendido el switch. Así el inductor esta en el rango de los 100uH.

Diodo: deberá ser capaz de soportar al menos 1.25 veces más que el voltaje de entrada, además de ser un diodo de recuperación rápida, es decir alta frecuencia y soportar 3A de carga por lo que se uso el 1N5822 se adecuo al proyecto. Así los parámetros se establecieron como se muestran en la siguiente figura.

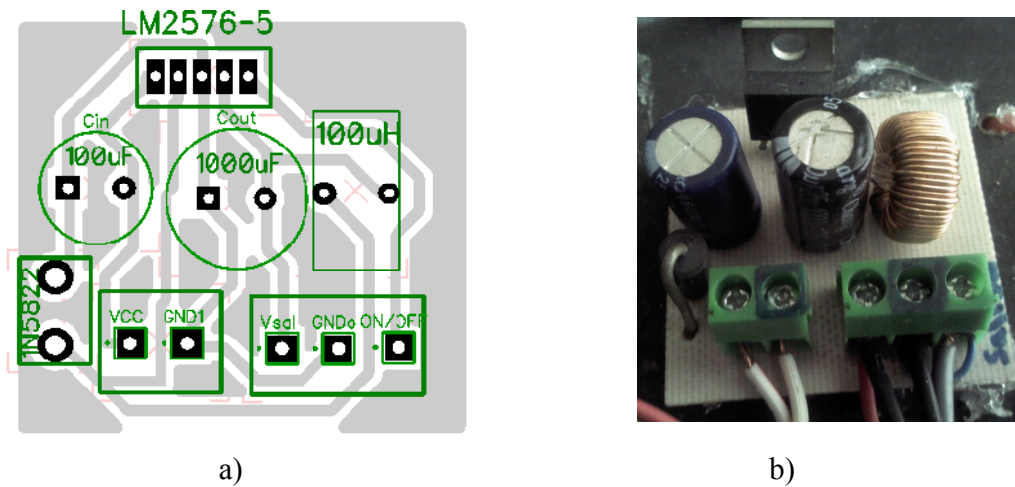


Figura 3.31. Fuente de alimentación para el servo y otros elementos sin sobrepasar 3A, a) diseño electrónico, b) implementación.

3.3.2. Sistema de control para los motores.

Un sistema es un conjunto de elementos que interactúan con el fin de desempeñar uno o varios objetivos bien establecidos. En ingeniería los sistemas de interés suelen ser denominados como *procesos*, *plantas* o simplemente *dispositivos*. En nuestro caso el dispositivo de interés son los motores. Si un dispositivo no es capaz de cumplir con un determinado objetivo por sí solo, entonces una alternativa a este problema consiste en complementar al sistema con un componente extra cuya finalidad sea generar una señal de comando (variable de control) que, al ser aplicada al dispositivo, lo lleve a alcanzar el objetivo establecido. Este “sistema extendido” se denomina *sistema de control*. El dispositivo complementario se denomina *controlador* y suele ser construido de forma tal que la señal de control se genere a partir de información extraída directamente del dispositivo (variables de salida).

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se implementaban principalmente con componentes analógicos, posteriormente se desarrollaron

los microprocesadores, que se integraban con dispositivos de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso para desarrollar sistemas de lógica discreta. En la actualidad, los circuitos integrados, han podido incluir en un solo chip un sistema digital completo para fines de control.

El control de velocidad de los motores se realiza con la tarjeta Pololu JRK 21V3 de *POLOLU Robotics and Electronics*, la cual es ideal para aplicaciones con motores corriente directa de bajo consumo, es capaz de controlar motores de 3A y soporta picos de 5A. Esta tarjeta tiene cuatro tipos de comunicación:

- Interfaz directa con a una PC mediante USB.
- Interfaz serial asíncrona para conexión directa con microcontroladores o cualquier otro controlador embebido.
- Control mediante interfaz análoga de 0-5V.
- Interfaz por ancho de pulso, PWM (Pulse Width Modulation).

Las principales características de esta se muestran en la figura 3.32.

Specifications

	Jrk 21v3
Motor channels:	1
Operating voltage:	5-28 V
Continuous output current:	3 A
Peak output current:	5 A
Auto-detect baud rate range:	300 - 115,200 bps
Available fixed baud rates:	300 - 115,200 bps
Available PWM frequencies:	20 kHz, 5 kHz
Reverse voltage protection?:	Yes
USB connector style:	USB Mini-B

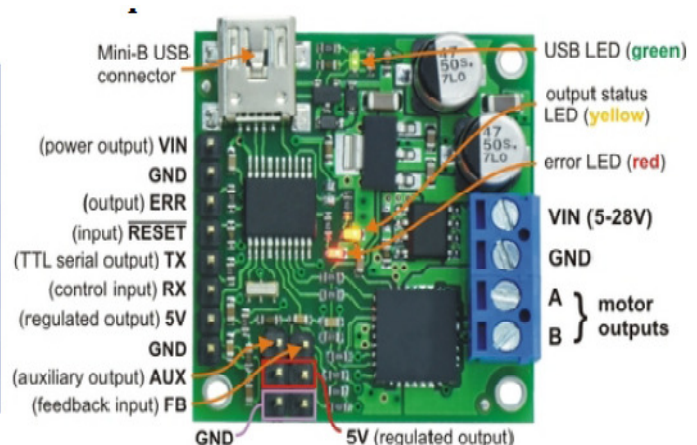


Figura 3.32. Pololu JRK 21v3 y sus características.

En el capítulo 4 se especificará con más detalle la configuración de esta tarjeta.

3.3.3. Sistema de Comunicaciones

El robot cuenta con un módulo de comunicación inalámbrica basada en el protocolo IEEE 802.15.4, ZigBee, este módulo de comunicaciones de alta velocidad permite establecer una comunicación entre el robot y una base de control remoto (PC).

3.3.3.1. Comunicación ZigBee

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación de redes inalámbricas de baja tasa de datos de corto alcance. Está dirigido principalmente para realizar aplicaciones cuando la tasa de transmisión es relativamente baja y se requiere de una alta eficiencia energética.

El estándar de redes inalámbricas de ZigBee se posiciona en un mercado que no es cubierto por otras tecnologías inalámbricas, ya que la mayoría de los estándares inalámbricos tratan de conseguir altas velocidades de datos lo cual conlleva un consumo energético alto, ZigBee tiene como objetivo cubrir las bajas tasas, ya que está enfocado al control y al monitoreo inalámbrico. Mientras que otras tecnologías inalámbricas están diseñadas para trabajar durante horas o quizás días con baterías, ZigBee es un protocolo que está diseñado para trabajar durante años.

La comunicación entre la microcomputadora principal y el módulo de comunicaciones ZigBee se realiza utilizando los módulos USART. Se establece una velocidad de comunicación de 9600 bauds, una velocidad relativamente baja pero que nos permite tener una mayor inmunidad al ruido. Otro factor que influyó en la selección de esta velocidad fue la necesidad de multiplexar la USART del microcontrolador principal para poder comunicarse con los otros dispositivos que utilizan este módulo.

3.3.4. Descripción de la Unidad de Procesamiento Central

El microcontrolador PIC18F452 es la unidad principal que se encarga de coordinar las tareas de los demás dispositivos, este PIC muestra características análogas con su similar PIC16F886, sin embargo al ser un dispositivo de gama alta cuenta con más capacidades de procesamiento y características en sus periféricos, la figura 3.33 resume algunas características del microcontrolador PIC18F452 así como la disposición de pines.

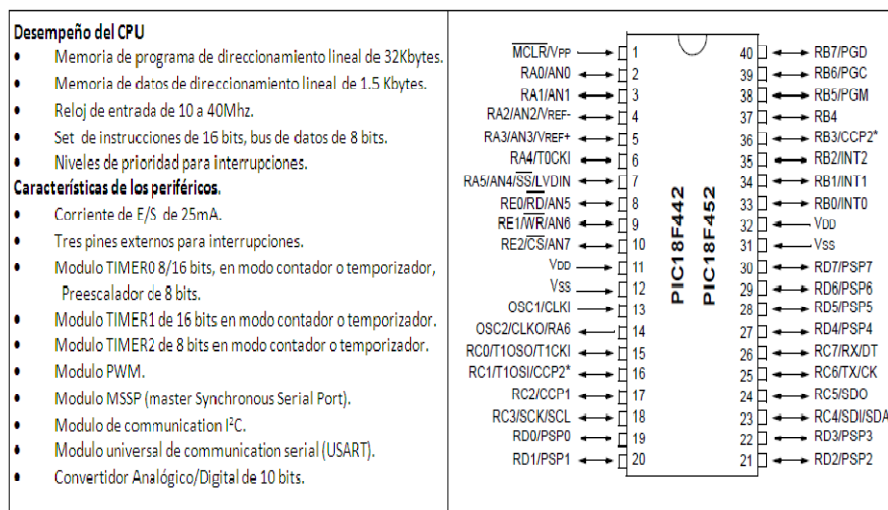


Figura 3.33. PIC18F452, disposición de pines y sus características.

La figura 3.34 muestra el PCB que alberga al procesador del robot, ésta tarjeta cuenta con todos los conectores necesarios para recibir y enviar las señales de control y de sensado.

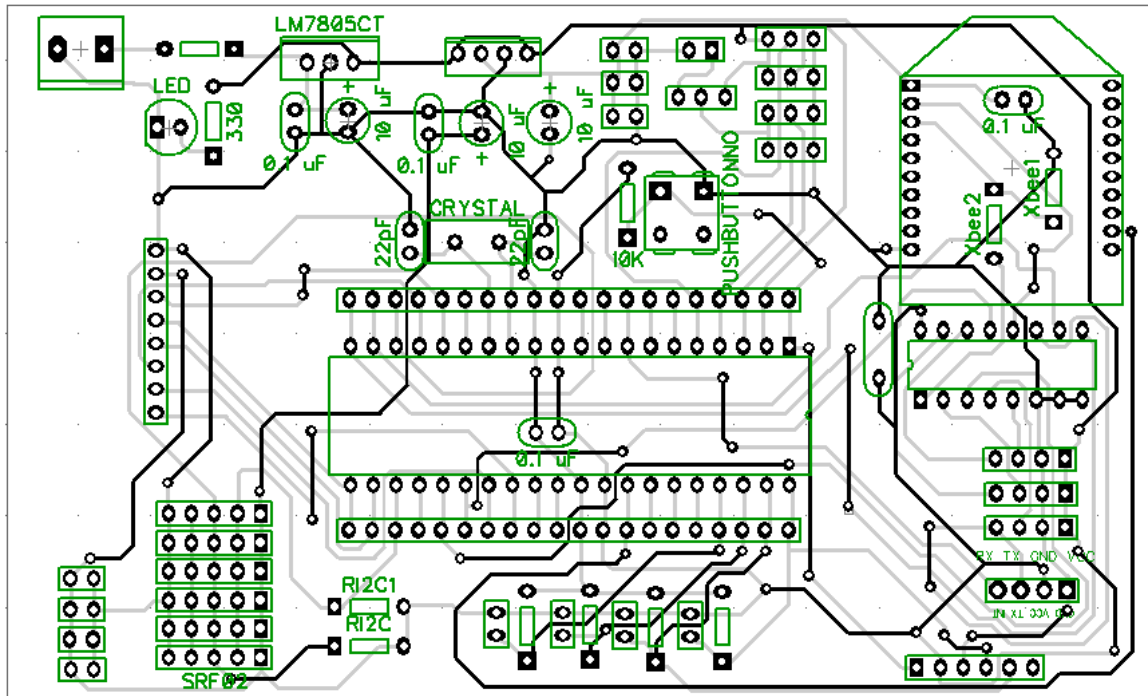


Figura 3.34. Tarjeta electrónica de control principal, PIC18F452.

3.3.5. Sistema de Energía.

La fuente de alimentación de los robots depende de la aplicación a la que están destinados. Por tanto si el robot tiene que desplazarse autónomamente, se alimentará seguramente con batería eléctrica recargable, mientras que si no requiere desplazarse, o sólo lo debe hacer mínimamente, se puede alimentar mediante corriente alterna a través de algún tipo de *convertidor*. En los robots didácticos se pueden emplear baterías comunes, y en los de muy bajo consumo algún panel solar. .

3.3.5.1. Batería.

La batería de acido-plomo (Pb-Acido) permite que el robot móvil opere con una autonomía de aproximadamente de 3 horas, en pleno funcionamiento. Este tipo de batería es uno de los más usados en el presente, dado su bajo costo y la gran disponibilidad. La batería

de Pb-Acido, está compuesta de dos electrodos, hechos de plomo y el electrolito es una solución de agua destilada y ácido sulfúrico. Cuando la batería está cargada, el electrodo positivo tiene un depósito de dióxido de plomo y el negativo es plomo. Al descargarse, la reacción química que se desencadena hace que la terminal positiva y negativa, estén contenidos en un depósito de sulfato de plomo. El electrolito interviene en forma activa en el proceso electroquímico, variando la proporción de ácido en la solución que depende del estado de carga de la batería. Cuando la batería está descargada, la cantidad de ácido en la solución disminuye. Si la batería está cargada, la cantidad de ácido en la solución aumenta, monitoreando la concentración del ácido se puede determinar el estado de carga de la batería.

Existen varios parámetros que determinan las características de las baterías, como la cantidad de energía que puede almacenar, la máxima corriente que puede entregar (descarga) y la profundidad de descarga que puede sostener. La cantidad de energía que puede ser acumulada por una batería está especificada por el número de watt/horas (Wh) de la misma. La capacidad de una batería de sostener un régimen de descarga está dada por el número de amper/horas (Ah). El número de Ah de una batería es un valor que se deriva de un régimen de descarga especificado por el fabricante. De igual forma una batería que está cargada y permanece inactiva, independientemente de su tipo, pierde su carga con el tiempo. Este fenómeno es conocido como autodescarga. La rapidez de la descarga depende de la temperatura ambiente y del tipo de batería. La batería que usada se muestra en la figura 3.35.



Figura 3.35. Batería sellada recargable de ácido-plomo de 12V, 4Ah. Fuente: Tienda Steren.

3.3.5.2. Fuente de Voltaje para el Sistema Digital.

El dispositivo utilizado para la fuente de voltaje para alimentar el sistema lógico (microcontrolador PIC18F452 y Sistema Odometrico: PIC16F886), es un regulador lineal denominado KA78R05. Este dispositivo cuenta con cuatro terminales (IN, GND, OUT, Vdis), entrega a la salida 5V, tiene la capacidad de soportar cargas de hasta 1A.

El encapsulado utilizado es el TO220, por lo general el más común en aplicaciones de baja potencia, aunque también se encuentra en encapsulados pequeños de montaje superficial. El voltaje de alimentación debe ser superior 1 o 2 volts al voltaje que entrega el regulador y menor a 35 volts. El dispositivo posee como protección un limitador de corriente por cortocircuito, y además, otro limitador por temperatura que puede reducir el nivel de corriente. La aplicación más común para este dispositivo es para alimentar dispositivos TTL. Existen otros tipos de reguladores lineales de 5V, como LM7805, pero la diferencia es que el KA78R05 es de bajo voltaje de barrera alrededor de 0.5V, además cuenta con un pin especial (Vdis) que permite activar o desactivar el dispositivo por el usuario en algún momento.

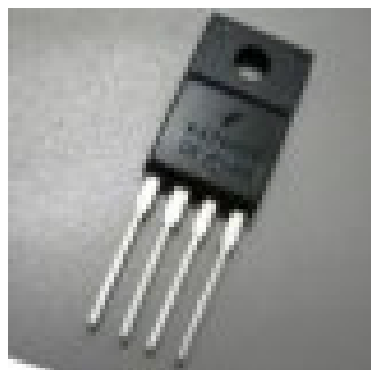


Figura 3.36. Regulador lineal LM7805T, encapsulado TO220.

CAPÍTULO 4

Modelo Matemático del Robot Móvil.

En este capítulo se presenta el análisis y los fundamentos matemáticos básicos para la composición de un modelo cinemático del robot móvil que permita estimar su posición con respecto a un sistema de referencia fijo; el modelo se obtiene y se valida mediante dos técnicas, utilizando propiedades geométricas y matrices de rotación, todo el cálculo se realiza con base en a las lecturas del encoder tráiler.

4.1 Modelo Matemático del Robot Móvil, Estimación Geométrica.

Para obtener los modelos se utilizan los movimientos de rotación y traslación del encoder tráiler, de tal forma que con el avance absoluto de éste, se estima la posición y orientación del vehículo de tracción (robot).

Partiendo de un sistema de referencia fijo, denotado como $[A]$, en dos dimensiones, que representa las coordenadas universales del sistema, cualquier punto en este plano cartesiano tiene un vector asociado P^A , entonces, este vector tiene una representación de dos componentes, de la siguiente manera: $P^A = [P_x, P_y]^T$, ver figura 4.1. De este modo, si consideramos al encoder tráiler y al robot móvil como cuerpos sólidos podemos visualizarlos como puntos en el plano.

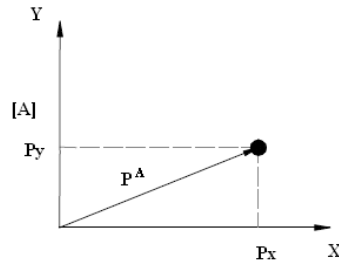


Figura 4.1. Sistema coordenado.

Por otro lado para poder obtener la ubicación del encoder tráiler se deben monitorear continuamente los dos encoders. La figura 4.2 muestra la distancia recorrida por el encoder tráiler cuando es tirado por el robot. Si conocemos:

- | | |
|-----------------|---|
| $r = 4.75 [cm]$ | <i>radio de las llantas</i> |
| $b = 12.5 [cm]$ | <i>distancia entre las llantas</i> |
| $ppr = 255$ | <i>pulsos por revolución de las llantas</i> |
| ei | <i>número de pulsos durante la medida del encoder izquierdo</i> |
| ed | <i>número de pulsos durante la medida del encoder derecho</i> |

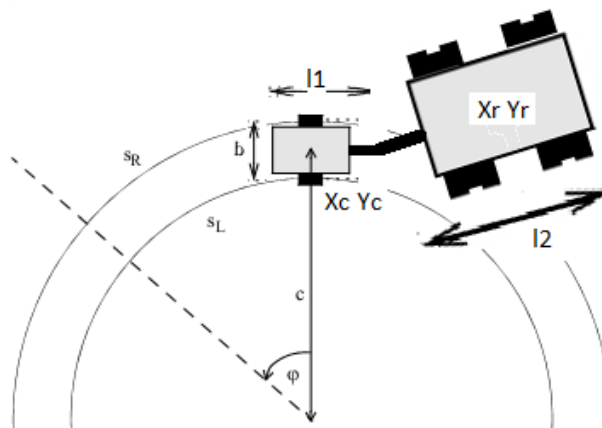


Figura 4.2 Desplazamiento del encoder tráiler.

Primero determinamos los valores S_l y S_r en centímetros, las cuales son las distancias recorridas por las llantas, izquierda y derecha, respectivamente. Dividiendo los pulsos medidos entre el número de pulsos por revolución podemos obtener el número de revoluciones que la llanta ha dado durante ese periodo de muestreo. Multiplicando este valor por la circunferencia de las llantas tenemos la distancia recorrida en centímetros:

$$(1) \quad S_l = 2 * \pi * r * \frac{ei}{ppr} = 2 * \pi * 4.75 * \frac{ei}{255} ,$$

$$(2) \quad S_r = 2 * \pi * r * \frac{ed}{ppr} = 2 * \pi * 4.75 * \frac{ed}{255} ,$$

La distancia que viaja el centro del encoder tráiler está dada por:

$$(3) \quad S = \frac{S_l + S_r}{2} ,$$

Estas ecuaciones nos permiten conocer la distancia recorrida por el encoder tráiler, sin embargo aún no tenemos información de la rotación que el encoder tráiler ha sufrido como consecuencia de los desplazamientos de las llantas. Para obtener este desplazamiento podemos definir a S_r y S_l como la distancia recorrida por el encoder tráiler sobre una parte de la circunferencia que define su trayectoria (φ en radianes) multiplicado por los radios de giro de cada llanta. Si consideramos que c es el radio de giro del centro del encoder, entonces durante un giro hacia la izquierda el radio de giro de la llanta derecha es $c+b/2$, mientras que el radio de giro de la llanta izquierda es $c-d/2$. Ambos círculos tienen el mismo centro. Entonces:

$$(4) \quad S_r = \varphi(c + d / 2)$$

$$(5) \quad S_l = \varphi(c - d / 2)$$

Restando las ecuaciones anteriores tenemos:

$$(6) \quad \varphi = \frac{Sr - Sl}{d},$$

La ecuación (6) nos permite saber la rotación que el encoder tráiler ha sufrido como consecuencia de los desplazamientos. Debe notarse que esta rotación solo es la que sufrió el encoder durante un periodo de muestreo, para poder determinar la rotación total que el tráiler ha sufrido durante todo su recorrido debemos incluir un las rotaciones anteriores, entonces:

$$(7) \quad \varphi = \varphi_{k-1} + \frac{Sr - Sl}{d},$$

La cual nos permite determinar la rotación total del encoder tráiler durante su recorrido.

Finalmente usando (6) y (3) podemos determinar la posición exacta del centro del encoder tráiler para cada instante de muestreo mediante

$$(8) \quad Xc = S * \cos(\varphi)$$

$$(9) \quad Yc = S * \sin(\varphi)$$

Nuevamente si deseamos ubicar al robot durante todo su recorrido debemos tomar en cuenta las posiciones anteriores por lo que tenemos:

$$(10) \quad Xc = Xc_{k-1} + S * \cos(\varphi)$$

$$(11) \quad Yc = Yc_{k-1} + S * \sin(\varphi)$$

Las ecuaciones 6, 10 y 11 nos permiten estimar la posición del encoder tráiler en un sistema de referencia global durante todo su recorrido solo con la información de los pulsos generados por los encoders durante cada periodo de muestreo.

Ahora es posible relacionar geoméricamente la posición y rotación del encoder tráiler con el robot móvil que tira de él.

En la figura 4.3, la posición del encoder en el sistema principal tiene coordenadas X_c , Y_c ; al tiempo t , en ese mismo instante se puede determinar la posición X_r y Y_r ; del vehículo de tracción, φ es la rotación del encoder tráiler y γ es el ángulo que se forma entre los ejes longitudinales del encoder y el robot, el cual está determinado por el potenciómetro que existe en el vértice de este ángulo.

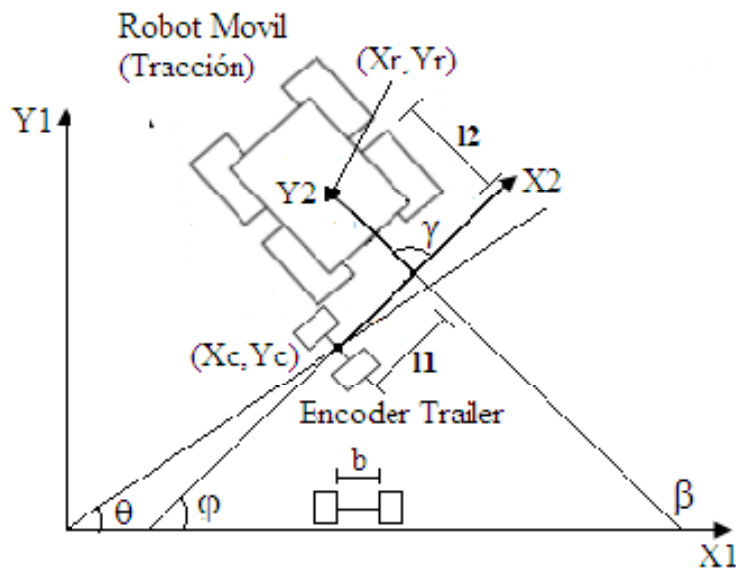


Figura 4.3. Posición del robot móvil, con base al encoder tráiler.

Como se aprecia en la figura 4.3 se colocó un segundo sistema denotado como [B] en el centro de masa del robot móvil, en donde Y_2 está alineado con la dirección del robot es decir, ubicado en la orientación del robot.

Suponiendo en primera instancia vectores unitarios para ambos sistemas, ($A=[X_1, Y_1]^T$ $B=[X_2, Y_2]^T$), se dice que los vectores unitarios de [B] en [A] estarían expresados como:

$$(12) \quad X_B^A = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$(13) \quad Y_B^A = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$(14) \quad R_B^A = \begin{bmatrix} X_B^A & Y_B^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Las expresiones anteriores se deben a que los ejes de [B] están “rotados” con respecto a [A]. De igual forma, para expresar las coordenadas del robot (X_r , Y_r) en el sistema universal, primero se debe expresar el origen del sistema de coordenadas [B] en coordenadas de los ejes de [A], para esto será necesaria una traslación de ejes. Primero suponemos que los ejes de [B] son coincidentes con los de [A], esto sucede cuando el robot móvil se mueve sin cambiar de orientación y sucede que el origen de [B] en [A], (O_B^A), se define como:

$$(15) \quad O_B^A = [O_{x_B}^A + O_{y_B}^A]$$

Entonces cualquier punto en ambos sistemas está relacionado por las coordenadas:

$$(16) \quad \begin{aligned} O_x^A &= [O_x^B + O_{xorgB}^A]^T \\ O_y^A &= [O_y^B + O_{yorgB}^A]^T \end{aligned}$$

Los componentes del vector (16) pueden sumarse por que los vectores tienen la misma dirección. Estas ecuaciones definen la traslación del sistema de coordenadas [B] sobre el sistema [A].

De esta forma podemos definir la posición del robot como el producto de una rotación y una traslación, la composición de los términos rotación y traslación para hacer coincidir los ejes (ecuaciones 1 a 16), expresa las coordenadas de la cinemática del robot.

Finalmente, de la figura 4.3, note que en el “traslado” al sistema principal, de las coordenadas X_r y Y_r , se debe incluir términos, como l_1 y l_2 que son longitudes constantes, así como la posición inicial donde comienza el avance del robot móvil, de este modo se tiene:

$$(17)$$

(18)

4.2. Modelo por Matrices de Rotación y Traslación.

Como se menciona en la sección anterior una rotación puede entenderse como: una función que traslada un vector de su espacio euclidiano original a otro espacio euclidiano, en este nuevo espacio el vector tiene una representación única; de igual forma podemos trasladar un conjunto de vectores mediante una matriz homogénea.

En robótica de manipuladores se usa las propiedades matemáticas de las matrices homogéneas, para determinar la cinemática del robot, la cual se construye a partir de cuatro elementos: variable de articulación, longitud del eslabón, giro y desfase (offset) del eslabón.

Suponiendo que la trayectoria del carro de tracción (robot móvil) puede verse como una cadena cinemática, la posición final del robot móvil (centro de masa), podría ser entonces vinculada con las cuatro variables cinemáticas antes mencionadas, y desarrollar un modelo cinemático directo si suponemos que las trayectorias que sigue el carro transcurren en un lapso lo suficientemente pequeño para considerarlas como segmentos de rectas, es decir como vectores. Además el robot se mueve en un plano euclidiano tal que el eje X es perpendicular al eje Z y además se intersecan. Por este motivo podremos despreocupar la coordenada en Z. véase figura 4.4.

Entonces l_0 puede ser el primer eslabón y θ_1 es la variable de articulación asociada a ese eslabón, la longitud se calcula fácilmente, porque se conoce la posición del encoder tráiler, entonces las otras dos variables son cero para este eslabón. Con esta información, se genera una matriz homogénea para este “eslabón” y así para cada “eslabón” de la cadena cinemática.

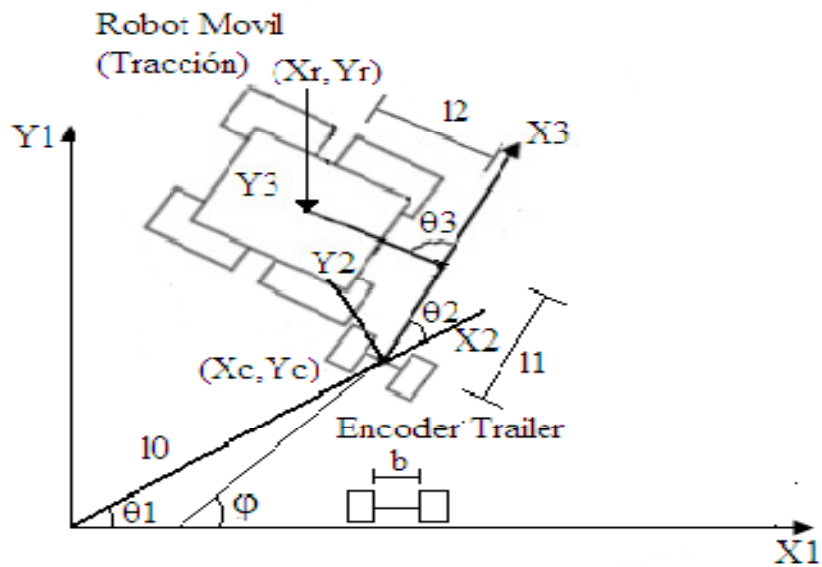


Figura 4.4. Cadena cinemática de la trayectoria del robot móvil.

$$(19) \quad l0 = \sqrt{(Xc^2 + Yc^2)}$$

$$(20) \quad l1 = 6.5$$

$$(21) \quad l2 = 28$$

$$(22) \quad A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\text{sen}(\theta_1) & 0 & l0 \cdot \cos(\theta_1) \\ \text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & e \cdot \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(23) \quad A_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & l0 \cdot \cos(\theta_2) \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & e \cdot \text{sen}(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(24) \quad A_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 10*\cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & e*\sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(25) \quad A_0^3 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3$$

Así las coordenadas del centro del robot móvil, se calculan en el vector de posición de la matriz homogénea .

$$(26) \quad X_r = (\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2))*\cos(\theta_3) \\ + (-\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2) - \sin(\theta_1)*\cos(\theta_2))*\sin(\theta_3) \\ + \cos(\theta_1)*\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2) + \cos(\theta_1)$$

$$(27) \quad Y_r = (\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2))*\cos(\theta_3) \\ + (\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2))*\sin(\theta_3) \\ + \sin(\theta_1)*\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2) + \sin(\theta_1)$$

4.3. Control de Velocidad de Motores

Antes de analizar el control de velocidad de los motores se definen algunos aspectos básicos:

Planta: se refiere a un equipo o a una parte del mismo (por ejemplo un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor, un motor) el cual tiene como objetivo ejecutar una operación particular.

Perturbaciones: las perturbaciones son señales que producen una afectación negativa sobre la salida de un sistema, si la perturbación se genera dentro del sistema se designa como interna, mientras que señales que se generan fuera del sistema son una perturbación externa.

Control realimentado: el control realimentado hace referencia a una operación que frente a perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre una señal de referencia y una señal de salida de un sistema.

Así el control de velocidad es un sistema de control de lazo cerrado que tiene como retroalimentación la lectura de un sensor que estima proporcionalmente la velocidad del motor, las señales que genera el sensor son señales eléctricas, como un tren de pulsos o una señal de voltaje proporcional a la velocidad. En la figura 4.5 el sistema retroalimenta la señal de velocidad a la entrada, $Y(s)$, , al integrar esta variable, se obtiene la posición $C(s)$ para control de la planta, la señal $e(s)$ es el error, es decir la diferencia entre la señal deseada $R(s)$ y $C(s)$, el controlador usa este error para generar la señal de control $u(s)$.

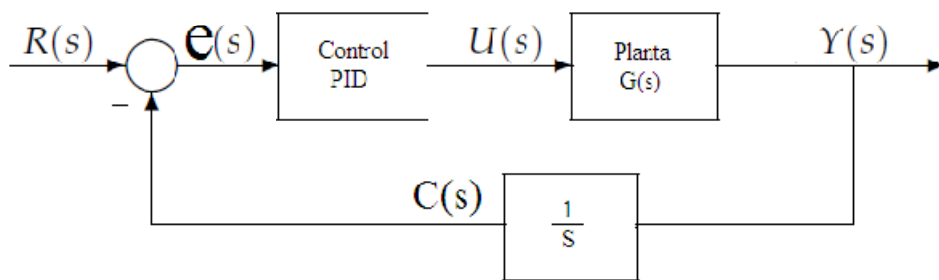


Figura 4.5. Control de lazo cerrado.

El encoder incremental que utilizamos es el ENC1J-L00128L, como se menciona en apartados anteriores el encoder genera dos señales de nivel TTL, pero solo es útil una sola señal para una para nuestro objetivo. Recordemos que nuestra planta son los motorreductores de 12V.

4.3.1 Control PID

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que está limitado el rango de plantas que puede controlar en forma satisfactoria, o que no pueden ser controladas con un PID.

Cuenta con tres acciones de control: proporcional (P), Integral (I), y derivativo (D). La acción proporcional da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = K_p * e(t)$ donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero se desempeña de forma limitada y con un error permanente (offset). De igual forma la integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento, por tanto:

$$(28) \quad u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero. De igual forma la acción derivativa se define mediante:

$$(29) \quad u(t) = K_p e(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K_p , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

4.3.2. Sintonización de las Tarjetas de Control (Método de Ziegler Nichols).

La tarjeta de control JRK 21V3 tiene un modulo PID, que permite que la tarjeta sea parte de un sistema de control en el cual la salida es constantemente ajustada para alcanzar el objetivo de control (target), el sistema de lazo cerrado que desempeña la tarjeta se muestra en la siguiente figura:

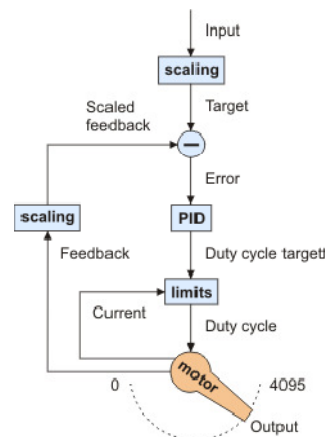


Figura 4.6. Diagrama de control.

En el diagrama de la figura 4.6, cada flecha representa un número medido o calculado por la tarjeta JRK 21V3, y las cajas azules representan los cálculos internos que se producen en cada período estimado por el modulo PID. El período del modulo PID se puede establecer en incrementos de 1 ms. El control de lazo cerrado de la figura se ejecuta en cada ciclo del control PID, el JRK21V3 realiza los cálculos siguientes para determinar el comportamiento del motor:

- El error se calcula como la diferencia del Scaled Feedback y el Target, ($\text{error} = \text{Scaled Feedback} - \text{Target}$; figura 4.6).
- El algoritmo PID, es representado por tres términos que se suman: proporcional (P, proporcional al error), integral (I, proporcional a la suma acumulada de los errores en

el tiempo), y derivativo (D, proporcional a la diferencia del error en relación con el último período PID.). Estas tres constantes de proporcionalidad son los parámetros más importantes que determinan el comportamiento del sistema de control. El resultado es un algoritmo PID que es aplicado al error, es un número entre -600 a 600 llamado *Duty Cycle Target*, (ver figura 4.6).

- Reducción del *Duty Cycle Target*, se reduce de acuerdo a diversos límites configurables, incluyendo aceleración, y los límites máximos de ciclo de trabajo aplicados al motor. La intención de los límites es evitar que el sistema se dañe. El valor resultante se convierte en el ciclo de trabajo (*Duty Cycle*, ver figura 4.6) del PWM (modulación por ancho de pulso) aplicado al motor. Un valor de 600 corresponde al ciclo de trabajo del 100%, y un valor 0 corresponde al ciclo de trabajo del 0% o apagado.

La parametrización de la tarjeta se realiza con la PC, se realiza mediante el software propio de la marca, figura 4.7, en la pestaña del software existe un menú llamado *Input* y *Feedback*. En el menú *Input* establecemos los valores de entrada, asociada al pin Rx, establecemos un valor máximo y mínimo, esto valores están comprendidos entre 0 y 4094, siendo 4094 la velocidad máxima. El software permite configurar múltiples parámetros, entre estos máximo ciclo de trabajo del motor, máxima corriente, valor máximo y mínimo de la entrada, por mencionar algunos. En la pestaña *Feedback*, permite crear control de lazo abierto o lazo cerrado, además permite establecer el tipo de retroalimentación, ya sea dada por una señal digital (pulsos) o analógica.

Para nuestro caso usaremos el modo *Digital Frequency*, ya que tenemos montados los encoders incrementales ENC1J-L00128L, utilizamos solo una señal generada por el encoder. En el modo *Digital Frequency*, la retroalimentación (*Feedback*) utiliza el número de pulsos detectados en el pin Rx, durante cada período de muestreo del PID, establecido por el usuario. La medida de la velocidad de realimentación, está deberá estar entre un valor 0 y

4094. La tarjeta JRK utiliza este valor para calcular el *Scaled Feedback* (ver figura 4.6), este es una representación de la salida del sistema de control completo.

En las pruebas realizadas el motor alcanza la velocidad máxima en la cuenta de 2630, el motor se encuentra detenido en 2049, y comienza a girar en sentido opuesto por debajo de ese valor, siendo la máxima cuenta en 1468, como velocidad máxima en sentido inverso, así mismo se establece una retroalimentación digital (pulsos del encoder incremental), con un valor máximo de 2180.

Una vez configurados los límites del JRK21V3, como prueba se somete la planta (motor 12V, 150 rpm, 300mA, 14Kg/cm) a una señal cuadrada que representaría un control on-off, es decir máxima velocidad (2630), y detención (2049). Al realizar las pruebas se obtuvo la grafica de la figura 4.8, donde se aprecia la respuesta del motor, el pulso se ve afectado por la exigencia que requiere el motor, la señal de control que genera el driver es incapaz de alcanzar a la señal de entrada.

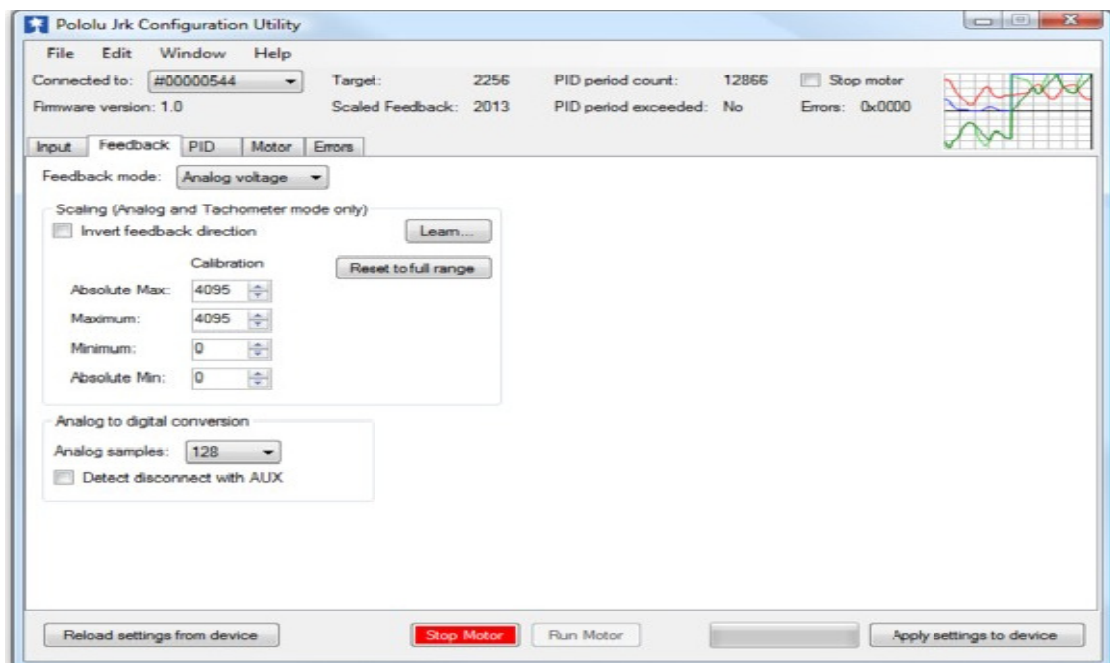


Figura 4.7. Software Pololu JRK Configuration utility. Pestaña de retroalimentación.

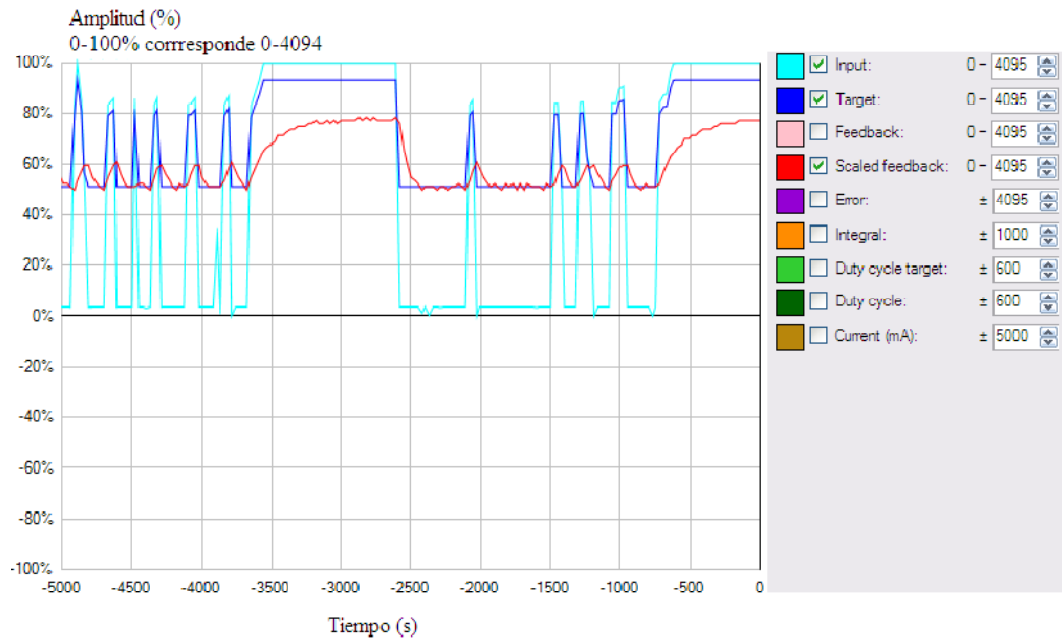


Figura 4.8. Motorreductor de 12V, sometido a un control on-off.

La señal de color azul claro es la señal de prueba de entrada, la cual lleva el motor a máxima velocidad, cero, máxima velocidad en sentido contrario, la señal de color azul marino es el objetivo (Target) se limita entre 2049 y 2630, es decir una velocidad entre 0-150rpm. La señal roja denominada *Scaled Feedback* es el resultado de los cálculos que el controlador realiza, y que a su vez se aplica al motor, esta señal presenta dos parámetros importantes, una es el tiempo de asentamiento de 18.6ms, y una amplitud de 63%.

Estos parámetros son importantes para la sintonización y optimización de las constantes PID, del controlador Pololu JRK 21V3. Las constantes proporcional, integral y derivativa, pueden moverse en la pestaña PID del software sí como el periodo de muestreo del que se habla en secciones anteriores.

La sintonización es un proceso complicado que puede ser abordado de diversas maneras. Para este caso se utilizara el método de Ziegler-Nichols.[4].

Procedimos del siguiente modo:

- Ajustamos el máximo ciclo de trabajo, límites de corriente, adquisición de la señal y otros parámetros a valores razonables para la operación de alto rendimiento.
- Aumentamos el coeficiente proporcional hasta llegar al punto $P= 1.2T/L$ donde $L= 18.6\text{ms}$, $T= 0.62= 2625$, así el valor proporcional lo situamos cercano a 4.21.
- Teniendo en cuenta que el sistema no llega a un error de cero utilizando sólo el término proporcional. Utilizamos el término integral para conseguir un acercamiento del *Scaled Feedback* al *Target*, ajustamos el valor Integral cercano a $I = 2L = 2(18.6\text{ms}) = 0.038$, esta corrección arrastra el error más cerca a cero.
- El coeficiente derivativo hace que el tiempo de asentamiento sea menor así $D = 0.5L = 0.093$, aumentando este valor se muestra una clara disminución del error.

Una vez configurada la tarjeta de control podemos observar en la figura 4.9, que el *Target* es alcanzado por la señal de control, el error es menor al 5% en estado estable, así mismo el *scaled feedback* se nota un efecto de inercia del motor que para efectos de este trabajo está dentro de lo permitido.

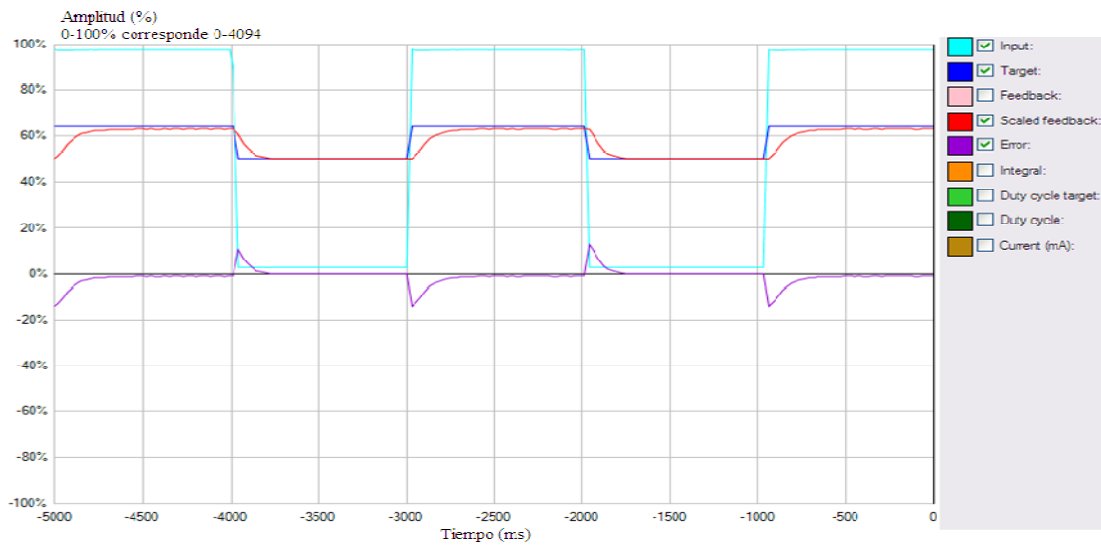


Figura 4.9. Motorreductor de 12V, sometido a una referencia de tren de pulsos.

4.4. Algoritmos para la navegación

La navegación se puede definir como la capacidad de un vehículo para desplazarse de forma autónoma desde una posición inicial hasta una posición final, evitando obstáculos que se presenten en el recorrido.

4.4.1. Seguimientos de contornos

Una de las técnicas utilizadas para la exploración es el seguimiento de contornos, este seguimiento se realiza siempre por uno de los costados del robot.

Con esta técnica básica se obtiene una aproximación del área de trabajo donde se desplaza el robot, identificando la posición de éste en cada periodo de muestreo; considerando que el eje longitudinal que cruza el centro del robot se encuentra alejado d centímetros sobre el costado de seguimiento, la posición del objeto (pared por ejemplo) estará dada por la siguiente ecuación.

$$(30) \quad P = \begin{bmatrix} \cos(\phi - 90)px - \text{sen}(\phi - 90)py + Xr \\ \text{sen}(\phi - 90)px + \cos(\phi - 90)py + Yr \end{bmatrix}$$

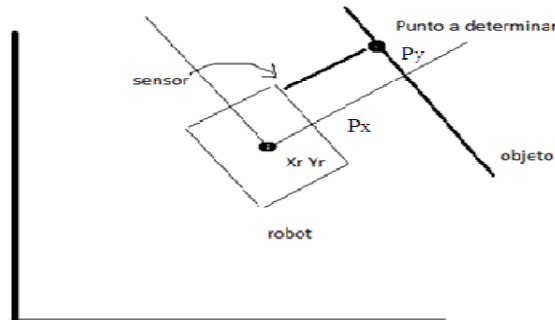


Figura 4.10. Seguimiento de contornos.

Donde P es el punto estimado en el que se encuentra el contorno, P_x y P_y , son las coordenadas de dicho punto, que se determinan a partir de las lecturas del sensor infrarrojo, y del centro del robot en el sistema local; con las coordenadas globales del mismo (X_r, Y_r) , se obtiene la rotación de la ecuación 30.

Para cumplir con la tarea de seguimiento de contornos, se crea un sistema de lazo cerrado que tiene una entrada y una salida; la entrada es la distancia a la que se encuentra el robot móvil con respecto al objeto, esta distancia obtenida por el sensor infrarrojo que se encuentra en el costado izquierdo del robot, y la salida es el cambio de la velocidad de la llanta derecha del robot.

Con el fin de corregir la posición del robot la velocidad de la rueda izquierda se mantiene constante a 40% de la velocidad máxima, y la velocidad de la rueda derecha cambia dependiendo de la distancia a la que se encuentra la pared.

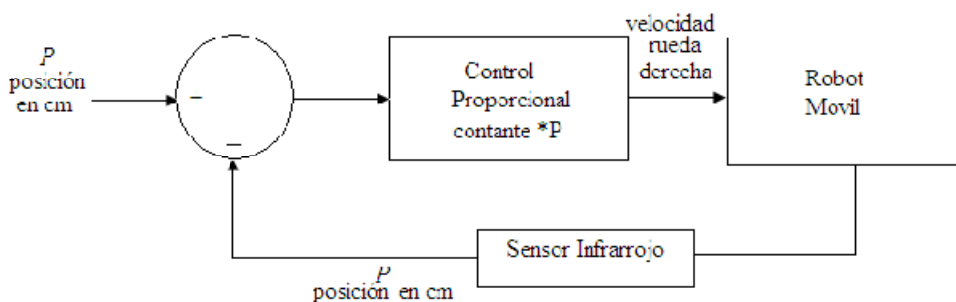


Figura 4.10. sistema de control de lazo cerrado.

La diferencia entre el valor del sensor infrarrojo y la distancia deseada al objeto constituye el error para el sistema de control. La señal de control es la velocidad de la llanta derecha, la cual disminuye si el robot se acerca al objeto que sigue, por otro lado la velocidad se incrementa si el robot se aleja del mismo. La sintonización del controlador proporcional se realizó experimentalmente.

4.4.2. Recorridos Aleatorios

El robot tiene la capacidad de realizar recorridos aleatorios, en este modo, el móvil se desplaza en el entorno sin una trayectoria definida evadiendo obstáculos. En este tipo de recorridos, a diferencia del seguimiento de contornos el robot puede desplazarse en ambientes totalmente abiertos, es decir sin ningún tipo de pared.

El algoritmo de navegación para los recorridos aleatorios se ilustra en la 4.11. La principal desventaja que presenta este modo, es que puede recorrer solo un área repetidamente sin llegar a recorrer todo el ambiente, lo que puede durar un tiempo indeterminado.

El modulo de transmisión inalámbrica ZigBee, transmite constantemente datos de los objetos que detecta el robot y los datos de su posición determinada por el encoder tráiler, con esta información es posible generar mapas y se puede tener una aproximación del entorno. El algoritmo implementado para este tipo de recorridos es sencillo y tiene la finalidad de validar el diseño del robot y sus sistemas de sensado.

4.4.3. Control Remoto.

Además de los modos de operación autónoma anteriores, es posible controlar de forma remota al robot utilizando la comunicación inalámbrica, ZigBee. En este modo el robot identifica cuatro comandos básicos adelante, atrás, izquierda y derecha, enviados desde el una computadora o cualquier otro dispositivo que cuente con un modulo USART y tenga conectado un transmisor Xbee. Los comandos reconocidos por el robot son: 'w' (avanza durante 1 segundo), 'a' (giro izquierda durante 500 ms), 'd' (giro derecha durante 500 ms), 's' (retrocede durante 1 segundo).

El algoritmo de control para este modo se puede observar en el siguiente diagrama de flujo de la figura 4.12.: De la misma forma que en los modos anteriores es posible monitorear la posición del robot durante su recorrido utilizando la información del encoder tráiler.

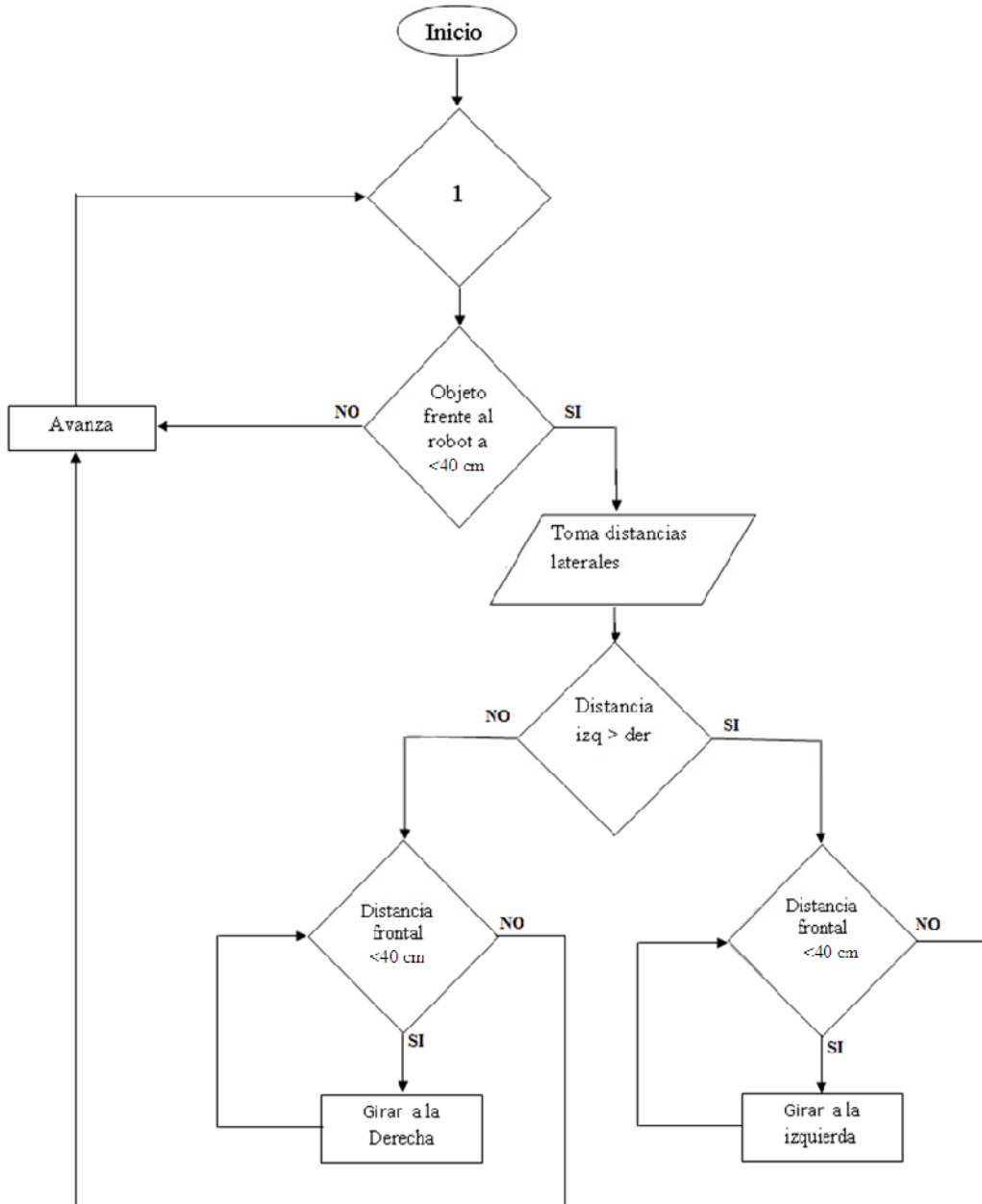


Figura 4.11. Diagrama de flujo del algoritmo de navegación aleatoria.

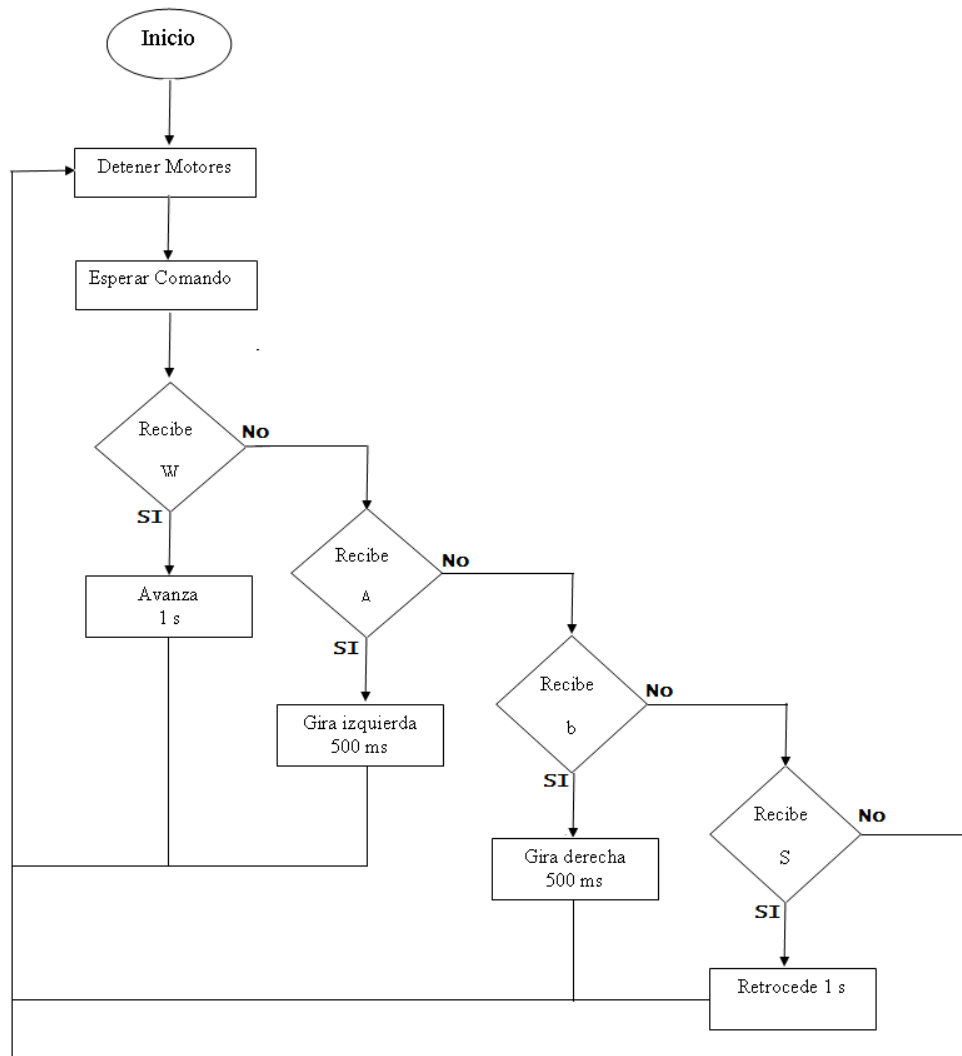


Figura 4.12. Diagrama de flujo del algoritmo de navegación por control remoto.

CAPÍTULO 5

Pruebas y Análisis de Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al robot móvil.

Primero se analiza el desempeño del sistema de estimación de la posición del robot. Iniciando con trayectorias rectas y trayectorias con curvas. Con los datos obtenidos durante el recorrido del robot móvil se genera la trayectoria seguida por el robot y la trayectoria reportada por éste en MatLab y se comparan los resultados.

5.1 Trayectorias rectas

Se inicio con un recorrido en línea recta para verificar que lo sistemas operen de forma adecuada. La prueba inicial consistió en colocar un marcador sobre el encoder tráiler para ir dibujando sobre una superficie blanca la trayectoria recta que describe, y al mismo tiempo graficar los datos correspondientes de su posición, el robot se desplaza a una velocidad de 30 cm/s, obteniendo la figura 5.1.

En dicha figura se puede observar que existe un desplazamiento del encoder hacia la izquierda, de aproximadamente 2.0 cm, esto se debe a que existen un pequeño desalinamiento en el eje que tira del tráiler, debido a que no se encuentra totalmente perpendicular al eje transversal del robot.

Se observa también que ambas graficas representan el centro de masa tanto del encoder tráiler como del robot. Por tanto el recorrido del móvil inicia 35 cm (corresponde a la línea solida) adelante del encoder (trayectoria con cruces) lo cual es correcto ya que

es la distancia que existe del centro del encoder al centro del robot, cuando ambos se encuentran alineados.

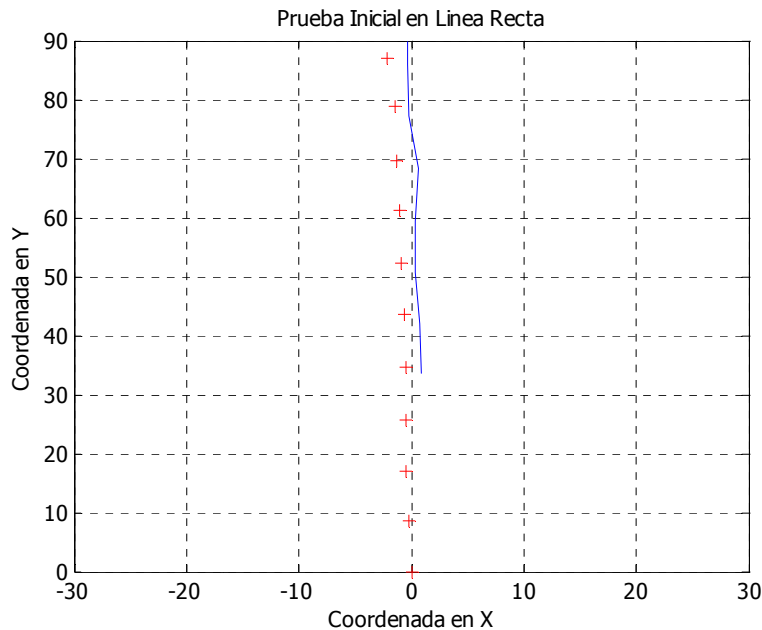


Figura 5.1. Grafica de la estimación de posición del robot móvil en una trayectoria recta.

Por otra lado alineando de forma correcta los ejes del encoder y del robot, repitiendo el experimento podemos observar que los centros de masa de ambos vehículos coinciden en la trayectoria que siguen, además se tiene una resolución de aproximadamente 9 cm, cabe señalar que se toman las lecturas de los encoders con un periodo de muestreo de 300 ms; esta resolución puede aumentarse de dos formas, aumentando la frecuencia de muestreo o disminuyendo la velocidad.

En la figura 5.2b se puede observar la trayectoria que dibujó el robot sobre un papel de prueba (este método es recomendado en la referencia [9]), la cual se considera como la trayectoria real. Se pudo observar también que el robot no describe una recta fielmente debido a que posiblemente existió deslizamiento en la rueda izquierda del robot por lo que la trayectoria está ligeramente recorrida hacia la izquierda.

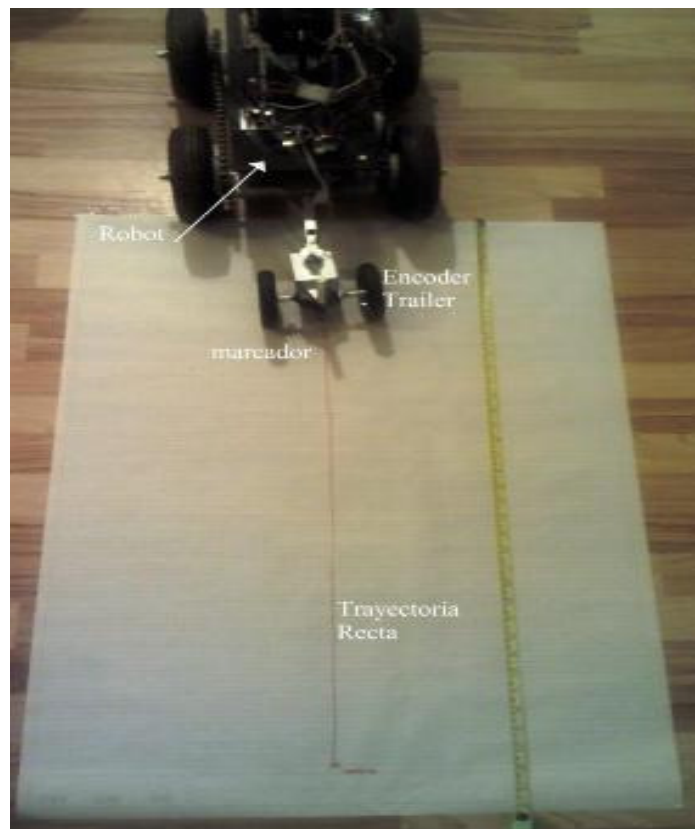
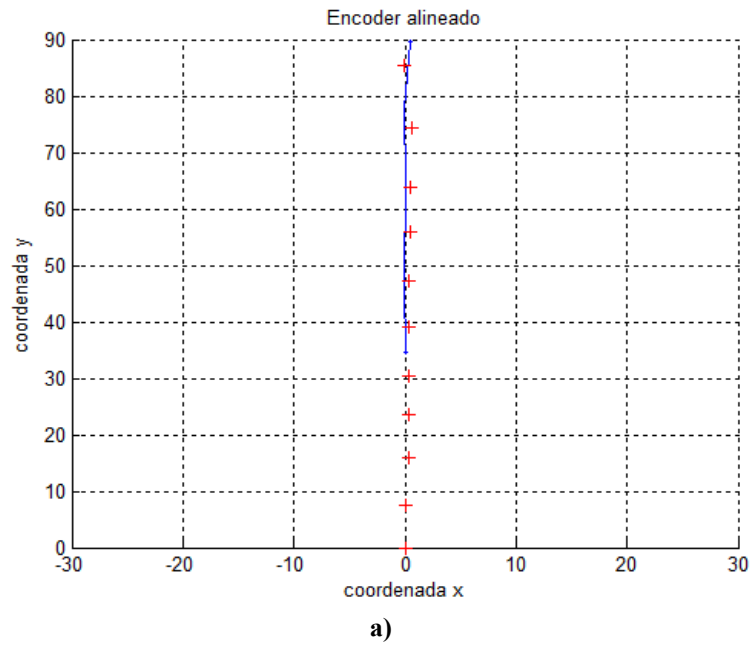


Figura 5.2. Trayectoria real en line recta.

5.2 Trayectorias con giros y curvas

La siguiente prueba realizada fue una trayectoria en escuadra o en L, el robot recorre 80 cm en línea recta aproximadamente, después la rueda derecha se detiene para que la diferencia de velocidad gire al robot hacia la derecha como se muestra en la figura 5.3, (trayectoria real). Y con estos datos del recorrido se generan las graficas de la figura 5.4. Cabe señalar que dichas graficas se generan a partir de los dos modelos obtenidos en la sección 1 del capítulo 4.

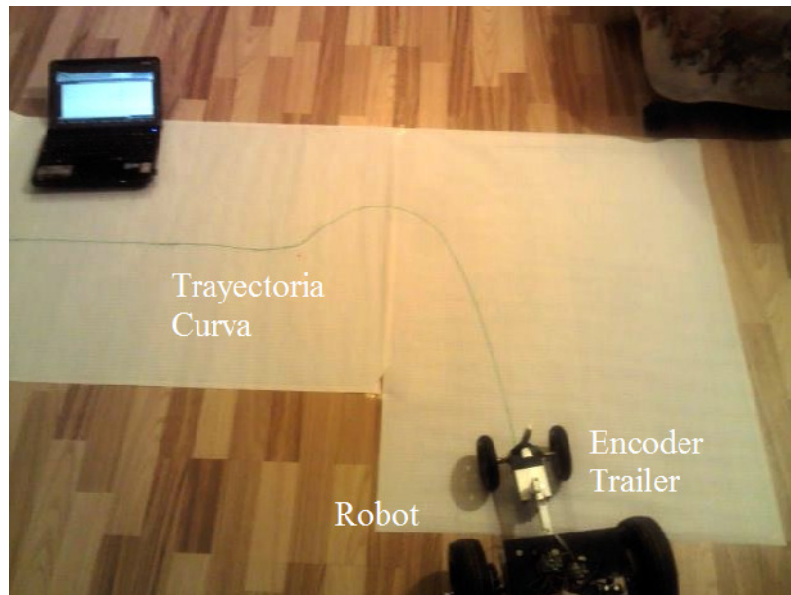
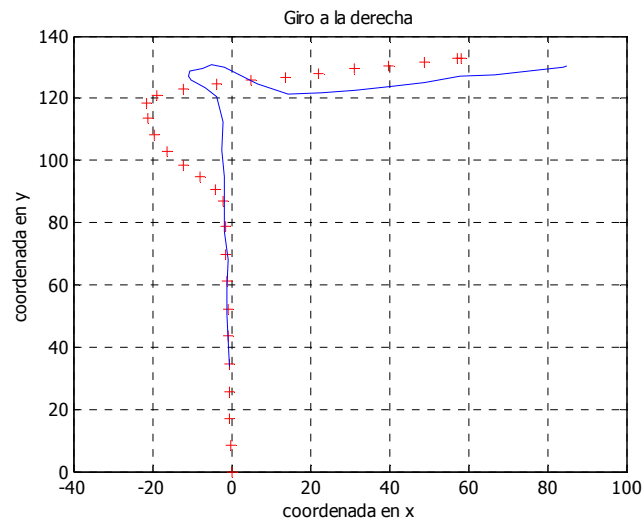
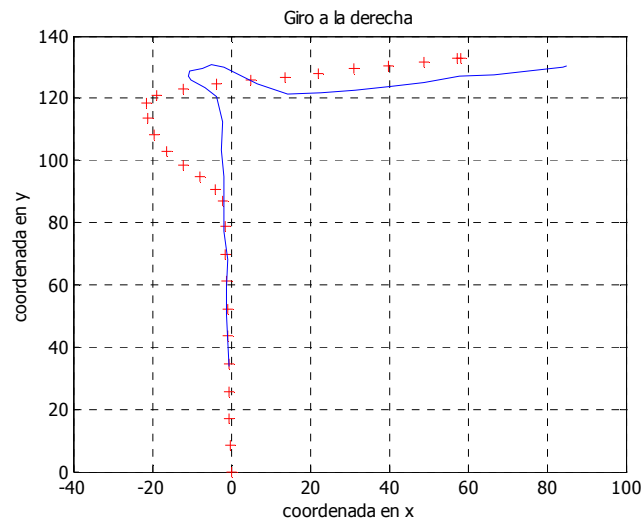


Figura 5.3. Trayectoria real con giro a la derecha.

Como se aprecia en la figura 5.4 ambas graficas son idénticas por tanto las ecuaciones que se generaron para el modelo geométrico son validas y ambas pueden integrarse posteriormente para un algoritmo de control para el seguimiento de trayectorias. Note también que el centro de masa del robot presenta deslizamientos al dar el giro sin embargo el encoder tráiler no registra estos deslizamientos por lo que la grafica presenta una curva suave.



a)



b)

Figura 5.4. a) Modelo 1, estimación geométrica, b) Modelo 2, estimación con matriz homogénea.

5.3 Seguimientos de contornos

Para el seguimiento de contornos, se utilizó el sensor infrarrojo para detectar la distancia a la que se encuentra el robot con respecto al objeto paralelo, y el sensor ultrasónico para detectar objetos frente al robot. Esta prueba se realizó con una pared de prueba en escuadra, la figura 5.5 muestra la gráfica que describe la trayectoria que sigue

el robot para este caso, nótese en dicha figura la línea negra, que representa a la pared., teniendo en cuenta que el encoder tráiler se representa por la línea punteada. El seguimiento se realiza principalmente con las lecturas del sensor infrarrojo.

En este modo de operación note que el robot sigue fielmente la pared y su trayectoria se describe correctamente solo con las lecturas del encoder tráiler, pudiendo con esto estimar de manera aproximada la forma de la pared, y por tanto con estos datos se puede generar un mapa del entorno.

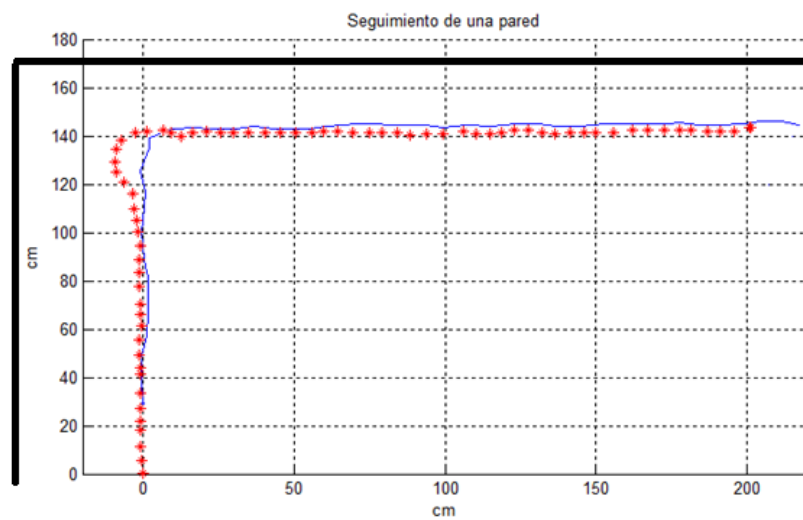


Figura 5.5. Grafica del seguimiento de contornos.

Así mismo en la grafica de la figura 5.6 se muestra la misma pared pero con un obstáculo de aproximadamente de 35 cm pegado a la pared, note que el objeto en esta grafica puede verse como un contorno mas, debido a que el sensor ultrasónico detecta al objeto de frente al robot, por lo que gira hacia el lado contrario.

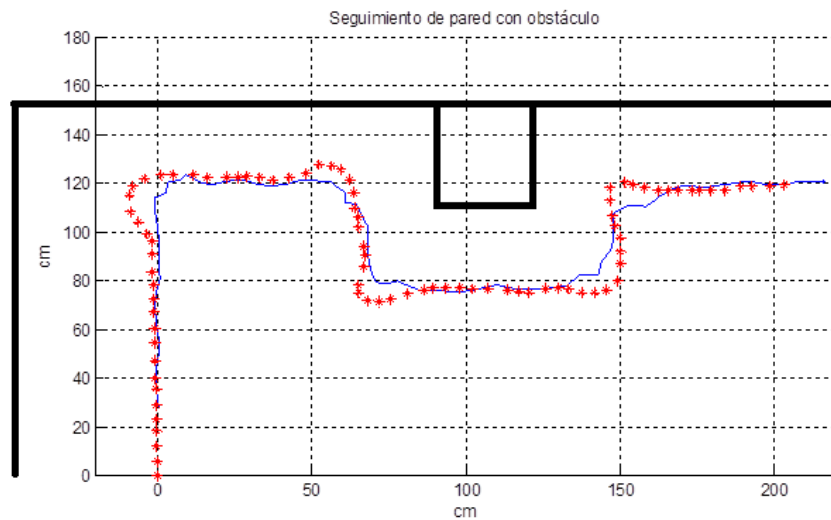


Figura 5.6. Seguimiento de contornos con un obstáculo pegado a la pared,

Por otro lado en la figura 5.7 se presenta un caso donde el robot entra en conflicto, la prueba se realizó en un hueco de 45cm de ancho por 20 cm de profundidad, , note en la figura el dibujo del hueco, éste es estrecho con respecto al ancho del robot, por tanto al seguir la pared de lado izquierdo, el sensor ultrasónico no detecta la pared cercana a él, ya que el ángulo de incidencia del haz ultrasónico es grande y no es detectada la pared cercana al robot, éste sigue su camino y colisiona con la pared.

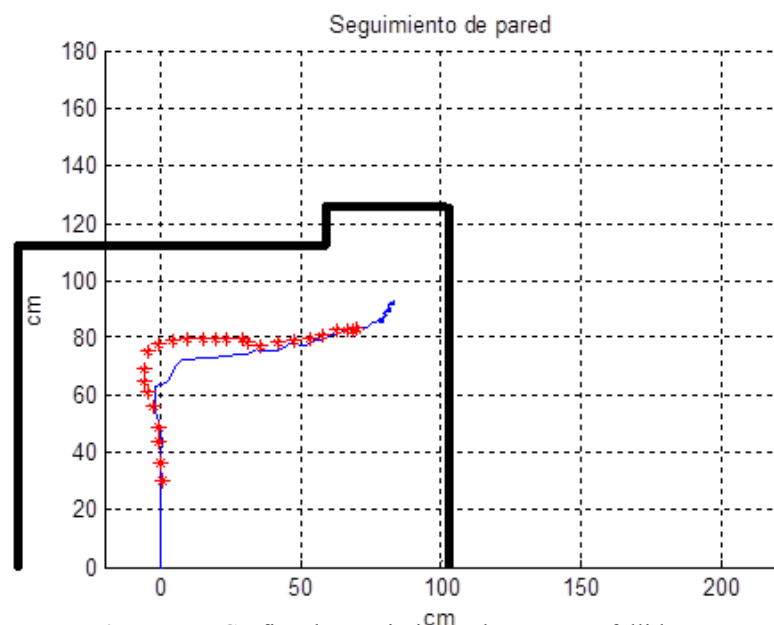


Figura 5.7. Grafica de seguimiento de contorno fallido.

5.4 Recorridos aleatorios y Control Remoto

En este apartado se presenta los resultados de los recorridos aleatorios y con control remoto.

En la figura 5.8 se puede observar la trayectoria generada por el robot en la modalidad de recorridos aleatorios, se puede observar que el robot recorre un área rectangular con un obstáculo representado por la figura roja. Se observa que el móvil sigue patrones rectangulares que se desfasan hasta que se encuentra con el obstáculo y cambia el patrón de la trayectoria seguida. Utilizando los datos de la trayectoria se puede estimar la forma del área que recorre el robot.

En la figura 5.9 se puede observar la trayectoria recorrida por el robot cuando es controlado remotamente, pudiendo estimar todo su recorrido, siendo posible controlar el robot aún sin tener un contacto visual con éste siempre y cuando se conozca el área en donde se mueve (teniendo un plano). Se puede observar que cuando el robot llega a una pared se detiene aunque se le envíen comandos de avance, gracias al sistema de sensado.

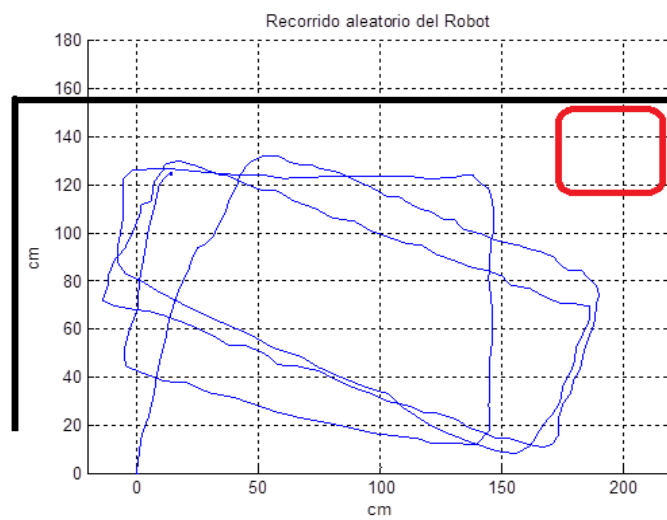


Figura 5.8. Grafica de navegación aleatorio.

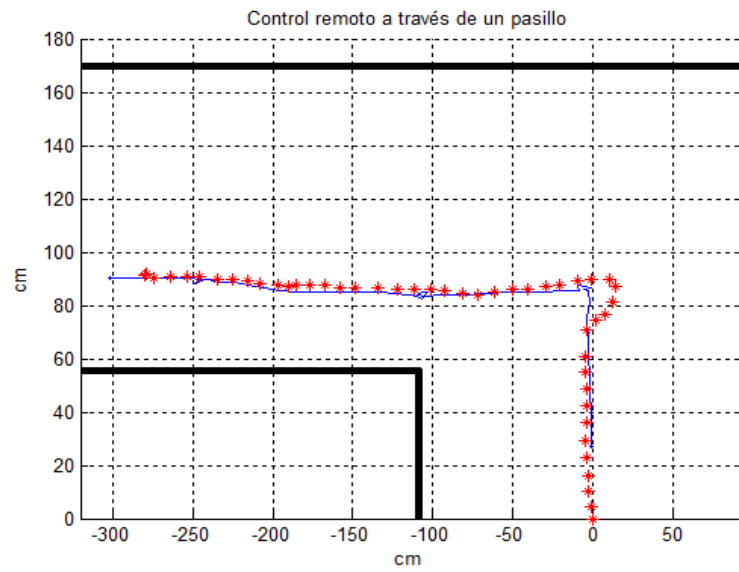


Figura 5.9. Grafica de navegación por control remoto.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

La estimación de la posición y orientación de un robot móvil, así como el reconocimiento del entorno es uno de los aspectos más importantes en el control y navegación autónoma del robot. El saber con exactitud estos datos en todo instante permite desarrollar tareas como la planificación de caminos y trayectorias, evitar obstáculos, seguimiento patrones, etc.

Recientemente los sistemas GPS han sido muy utilizados para estimar la posición de vehículos sin embargo éste sistema tienen resoluciones que van de uno a tres metros en la localización; existen sistemas GPS que en combinación con el uso de brújulas electrónicas y acelerómetros alcanzan mayor resolución sin embargo el costo aumenta notablemente.

La utilización del sistema odometrico a través del encoder tráiler permite estimar la posición del robot e identificar la trayectoria seguida por éste con muy buena resolución; aproximadamente nueve centímetros, solamente limitada por la velocidad de comunicación, inalámbrica, en pruebas mediante comunicación cableada alcanzó una resolución de 2 centímetros.

El encoder tráiler resuelve eficientemente los problemas de estimación debidos principalmente a deslizamientos en la llantas, sin embargo resta movilidad al robot, ya que tiene un buen desempeño sólo en superficies planas y es necesario implementar algoritmos que le permitan al robot retroceder sin dañar el encoder tráiler, ya que por su mecánica el encoder tiende a quedar debajo del robot, sin embargo los objetivos planteados en cuanto a resolución, costo, superficies de desplazamiento y aplicación que se le dará al robot, se logran mediante éste sistema de odometría el cual resultó ser muy confiable y de bajo costo.

El robot cuenta con un solo sensor ultrasónico y un sensor infrarrojo para identificar su entorno, logrando un desempeño suficiente para navegar exitosamente en superficies planas. Lo cual implica una reducción del costo del robot en comparación con otros prototipos equivalentes que implementan arreglos de al menos tres sensores frontales y al menos dos laterales, elevando el costo y el consumo de energía.

Al utilizar un sensor ultrasónico de bajo costo se tienen limitantes en cuanto al tiempo de sensado ya que el mismo transductor emite y recibe el ultrasonido y el mismo sensor se encarga de tomar las lecturas frontales y laterales, así como en el rango mínimo de detección y resolución. En particular las dos últimas no permiten un adecuado desempeño en el seguimiento de contornos, limitantes que fueron resueltas mediante la inclusión de un sensor infrarrojo con mayor resolución y un rango de detección mínimo de 10 centímetros, al utilizar este sensor para el seguimiento de contornos el robot es capaz de seguir una superficie paralela a él a una distancia de 15 centímetros de separación. Por otro lado el sensor ultrasónico se dedicó exclusivamente a la detección y evasión de obstáculos.

La combinación del sistema odometrico con el sistema de sensado del entorno (sensor infrarrojo y ultrasonido) y la implementación de seguimiento de contornos, recorridos aleatorios o control remoto es posible estimar de forma burda un mapa del entorno tan sólo estimando la posición del robot durante su recorrido. La implementación de un algoritmo de control y navegación y el procesamiento de datos específicamente para el mapeo de entornos queda como trabajo futuro.

Respecto a la implementación mecánica del robot se logró un prototipo robusto, con suficiente movilidad y tracción para desplazarse eficientemente sobre superficies planas o con ligeras irregularidades y diversos materiales como cemento, madera, tierra firme, pasto y tezontle, aumentado las posibilidades de aplicación del robot. Debido a la tracción en las cuatro ruedas y a la configuración diferencial tiene problemas de deslizamiento en las llantas al realizar giros lo cual dificulta la estimación de su posición por odometría directa en sus motores o llantas.

Se observó que la configuración diferencial con tracción en las cuatro ruedas para la implementación de algoritmos de seguimiento de trayectorias implica tener que implementar algoritmos de control con diferentes variables en donde se tiene que incluir la incertidumbre provocada por el deslizamiento de las llantas, presencia de obstáculos, etc., dificultando su diseño e implementación mediante métodos de control tradicionales, por lo que la mayoría de los controladores implementados para este tipo de robots se basan en técnicas de control no lineal y algoritmos inteligentes, como redes neuronales, lógica difusa, etc. El diseño y puesta en marcha del sistema odometrico propuesto permite en un futuro desarrollar cualquier técnica de navegación de las mencionadas anteriormente.

El modelo cinemático obtenido permite estimar con exactitud la posición del robot en todo momento conociendo sólo el desplazamiento del encoder tráiler y el ángulo que guarda este con respecto al robot. Se modeló geoméricamente y mediante matrices homogéneas, obteniendo resultados idénticos para ambos modelos, sin embargo se determinó que el modelo mediante matrices homogéneas representa una carga de procesamiento muy grande para el microcontrolador, a diferencia de las ecuaciones obtenidas por geometría las cuales resultaron ser menos complejas para al ser procesadas por éste.

El sistema de comunicación serial entre el microcontrolador principal y los diversos módulos de sensado y control representó un problema en este proyecto, debido a que el PIC18F452 cuenta con sólo un módulo UART; éste módulo debe comunicarse con las dos tarjetas de control de los motores, el encoder tráiler y el módulo ZigBee.

Cada una de estos módulos tiene requerimientos de velocidades, codificación de datos y tiempos de respuesta distintos lo que provoca errores de comunicación principalmente en las tarjetas de control de motores y el módulo ZigBee. Como una solución se emparejaron las velocidades de comunicación de todos los módulos a 9600 bauds, velocidad a la que todos los subsistemas mostraron un buen desempeño, y se propuso el multiplexado de la USART del microcontrolador, debido a esto y a la carga computacional que lleva el microcontrolador el tiempo de respuesta bajó notablemente, logrando la resolución requerida (10 centímetros) en la estimación de la posición, con un

periodo de muestreo de 300 [ms] a una velocidad de 30 [cm/s]. A velocidades más altas de muestreo se pierden datos en la comunicación, y a velocidades de desplazamiento mayores se logra estimar la trayectoria del robot pero no se obtiene la resolución deseada.

Gracias al sistema de transmisión de datos, es posible la implementación de diversas aplicaciones futuras para el robot, ya que permite ser un sistema tele operado, con la ventaja de que al tener sensores incorporados puede identificar y discriminar comandos en situaciones en las que no se puedan ejecutar, por ejemplo si el operador envía el comando de avanzar pero el robot detecta obstáculo enfrente no ejecutará este comando.

En cuanto a su incorporación al sistema ESPEC, el robot permitirá a los usuarios probar sus habilidades de programación en un dispositivo real, además de lo atractivo que resulta el poder visualizar su comportamiento de forma real y no solo a nivel de salida de datos.

En el sistema ESPEC se incorporó al robot una cámara y se desarrolló una interfaz web que permita el control del robot casi desde cualquier parte y con cualquier dispositivo inteligente que soporte HTML. Además de servir para descargar al robot de la tarea del procesamiento de todos los datos adquiridos al enviarlos a un servidor, el cual puede devolver información hacia el robot derivada del procesamiento de estos.

Las pruebas mostraron que los módulos ZigBee utilizados, son una buena alternativa, ya que tienen buen desempeño, alcanzan grandes distancias, y su consumo es bajo, además de ser muy estables y robustos.

Las mejoras que considero se pueden plantear para la construcción mecánica son; hacer mas alto el eje del encoder tráiler, lo cual implicaría mejoramiento en cuanto al retroceso, es decir avance hacia atrás. Así también adherir sensores ultrasónicos con lo cual se mejora la identificación de obstáculos. Esto es necesario debido a que el robot presenta dificultades para desplazarse en aéreas pequeñas.

El desarrollo de este proyecto, me dio la oportunidad de enfrentar los retos que implica la implementación de un prototipo real, desde el análisis de los requerimientos, bosquejo del prototipo, adquisición de materiales para la construcción hasta la puesta en marcha del sistema completo, y así como sustentar la implementación mediante la parte teórica.

BIBLIOGRAFÍA

[1].Silva, R. & Hernández M.(2008).Telematike issn1856-4194. *Modelado y Control de un Robot Móvil tipo Newt, en la tarea de seguimiento de trayectoria.*

[2].National Aeronautics and Space Administration.(1999). NASA, Mars Pathfinder Mission, Rover Sojourner. Recuperado 25 de febrero, 2011, de <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/rover.html>.

[3].Spong, M.W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M.,(2006). *Robot Modeling and Control*, John Wiley and Sons.

[4].Ogata, K.(1998).*Ingenieria de control Moderna*.México.Prenice Hall.

[5]. SRI, International. (2011). *Artificial Intelligence Center*, SHAKEY. Recuperado 1 de marzo, 2011, de <http://www.ai.sri.com/shakey/>.

[6].Helpmate Robotics, Inc. (1999).*Robot Navigation Technology*. Recuperado marzo 5, 2011, de <http://statusreports.atp.nist.gov/reports/91-01-0034.htm>.

[7].Ollero, B. A. (2007). *Robotica Manipuladores y Robots Móviles* . México: Alfaomega.

[8].Zhejun F., Johann B., Wehe D., and Yoram K. (1995). *Experimental Evaluation of an Encoder Trailer for Dead-reckoning in Tracked Mobile Robots*. Department of Nuclear Engineering. The University of Michigan. Proceedings of the 10th IEEE international Symposium on Intelligent Control.

[9]. Borenstein, J. (1994). *Internal Correction of Dead-reckoning Errors With the Smart Encoder Trailer*. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)-Advanced Robotic Systems and the Real World, Munich, Germany. The University of Michigan.

- [10]. Morris, M. Mano.(1991).*Ingeniería de Control Computacional, Diseño del Hardware*. México: Prentice Hall.
- [11]. Balcells J. & Romeral J. L..(1997). *Automatas Programmable* .México. Marcombo.
- [12].Escolano, F.; Cazorla, M. A.; Alfoso, M.I. y Lozano, M.A. (2003). *Inteligencia Artificial: modelos, técnicas y areas de aplicación*. España. Internacional Thomson Ediciones Spain Paranino, S.A.
- [13]. Crowly, L. James. (1995). *Mathematical Foundations of Navigation and Perception For an Autonomous Mobile Robot*. Tutorial presentado por International Workshop on Reasoning with Uncertainty in Robotic, University of Amsterdam.
- [14].Jones, Joseph L.(1999). *Mobile Robots, Inspiration to Implementation*. E.U. 2º ed,
- [15].Leonard, J. Jhin, Durrant-Whyte F. Hugh. (1992). *Directed Sonar Sensing For Mobile Robot Navigation*. E.U. Kluwer Academic Publiser.
- [16].Gracia, C, Luis I. (2002). *Modelo Matemático y Control de Robots Móviles con Ruedas*. Tesis Doctoral no Publicada de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad politécnica de Valencia. España.
- [17].Mota, N. Ivan, H. (2008). *Robot Movil en dos modos: Autonomo Seguidor de línea y no autónomo controlado por Radio frecuencia*. Tesis de Ingeniería Electrónica no publicada, Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F., México.
- [18]. Perez, L. Joel & Vargas, A. Javier. (2008). *Robot Móvil Autónomo controlado por Microcontrolador y Radio frecuencia*. Tesis de Ingeniería Electrónica no publicada, Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F-México.

[19]. Muñoz, D. Nelson & Andrade, A. Carlos. (2006). *Diseño y construcción de un robot móvil orientado a la enseñanza y la investigación*. Tesis de Ingeniería Electrónica no publicada, Universidad de Antioquia. Medellín-Colombia.

[20]. McComb, Gordon & Predko, Mike. (2006). *The Robot Builder's Bonanza*. 3° ed. E.U. Mc Graw Hill.

[21]. F. Reyes C., J. Cid M., J. Méndez M., G. Villegas R., F. Porras S. *diseño, modelado y construcción de un robot móvil*. Facultad de Ciencias de la Electrónica, Grupo de Robótica y Control. Departamento de Microelectrónica Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad de Puebla.

[22]. Baño, A. Alberto & Pujol, O. Albert. (2003). *Análisis y Diseño del control de posicionamiento de un robot móvil con tracción diferencial*. Tesis no publicada de ingeniería electrónica, Univertat Rovira Virgill.

[23]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CINVESTAV (2010). Inventan brazo contra bombas. Recuperado 25 de febrero, 2011, de [http://www.cinvestav.mx/Difusi%C3%B3n/Cinvestavenlaprensa/Noticias/Inventanbrazoc ontrabombas.aspx?SkinSrc=\[G\]Skins/_default/imprimir_interna&ContainerSrc=\[G\]Containers/_default/No%20Container](http://www.cinvestav.mx/Difusi%C3%B3n/Cinvestavenlaprensa/Noticias/Inventanbrazoc ontrabombas.aspx?SkinSrc=[G]Skins/_default/imprimir_interna&ContainerSrc=[G]Containers/_default/No%20Container).