



Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Automática

Diseño y montaje de un robot para la navegación odométrica

Autor: Eduardo Beira Rosabal

Tutores: MSc. Ing. Michel Sanz Pérez
MSc. Ing. David Díaz Martínez.

Santiago de Cuba

2016

Pensamiento

Agradecimientos

Dedicatoria

Resumen

Los robots móviles cubren una gran variedad de campos. El movimiento es una característica importante de los autómatas móviles, la evitación de obstáculo y en especial el seguimiento de trayectorias son dos comportamientos muy importantes que deben ser considerados en el proceso de desarrollo de Vehículos Autónomos Terrestres.

El objetivo principal del “carro” es el desplazamiento hacia un punto en el eje de coordenadas (x;y) indicado por el usuario mediante comunicación inalámbrica empleado el módulo ESP8266 que se comunica con la unidad central de procesamiento constituida por la placa Arduino UNO. Este microcontrolador tiene programado un algoritmo geométrico basado en la técnica de Odometría para trazar la trayectoria fijada y alcanzar el destino final.

En el presente documento se describe el desarrollo de un sistema de localización de un robot móvil, estimando su posición y orientación mediante el uso de la técnica odométrica. Se detallan todos los componentes que integran el sistema, su diseño, programación e implementación. También se documentan los resultados de algunos experimentos realizados, en vistas a verificar la fiabilidad del sistema de localización.

Abstract

Mobile robots cover a variety of fields. The movement is an important feature of mobile robots, obstacle avoidance and especially the trajectory tracking are two very important behaviors that should be considered in the development of Autonomous Land Vehicle.

The main objective of the "car" is the shift towards a point on the axis of coordinates (x, y) set by the user by wireless communication using ESP8266 module that communicates with the central processing unit constituted by the Arduino UNO. This microcontroller has scheduled a geometric algorithm based on odometry technique to trace the trajectory set and reach the final destination.

In this document the development of a location system of a mobile robot is described, estimating its position and orientation by using the odometry technique. All components in the system design, programming and implementation are detailed. The results of some experiments are also documented, in order to verify the reliability of the location system.

Listado de abreviaturas

JIRA Japanese Industrial Robotics Association

RIA Robot Industries Association

RMR Robots Móviles de Ruedas

AGV Autonomous Ground Vehicles

PWM Pulse Width Moduler

PLL (Phased Locked Loop)

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1. Generalidades sobre los Robots móviles y su manipulación.....	6
1.1. Robótica. Concepto	6
1.2 Tipos de Robot.....	7
1.3 Elementos funcionales de control en robótica.....	9
1.3.1 Estructura mecánica	9
1.3.2 Control de movimientos.....	10
1.3.3 Grados de libertad.....	11
1.4 Actuadores	11
1.4.1 Actuadores hidráulicos	12
1.4.3 Actuadores eléctricos.....	13
1.5 Tipos de Motores	14
1.5.1 Motores de DC (Corriente Directa).....	14
1.5.2 Servomotores	15
1.5.3. Motores paso a paso	16
1.6 Robótica Móvil.....	20
1.6.1 Tipos de Locomoción.....	21
1.6.2 Clasificación de los robots según su configuración.	22
1.7 Navegación.....	26
1.7.1. Tipos de mapas	28
1.7.2 Odometría.....	30
1.8 Plataforma Arduino.....	33
1.8.1. Historia de su evolución.	34
Conclusiones Parciales	35
Capítulo 2. Descripción del diseño y montaje del robot para navegación odométrica.....	36
2.1.1.2 Arduino Motor Shield (L298N).....	38
<i>Especificaciones</i>	38
• Voltaje de la lógica de Control: 5V (del Arduino).....	38

Lista de Figuras.

Figura 1. Tipos de Robot.....	9
Figura 2. Diagrama del control de un robot a lazo abierto.....	10
Figura 3. Diagrama del control del robot a lazo cerrado.....	10
Figura 4. Representación de coordenadas.....	11

Introducción

A través de la historia el hombre ha soñado con seres capaces de realizar movimientos y hasta comportarse parecido a animales y hasta seres humanos; en el fondo el ser humano lo que piensa es librarse de tareas indeseables, peligrosas o demasiados tediosas, lo que llevo al surgimiento de la robótica. Por siglos, el ser humano ha construido máquinas que imitan partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses, ellos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, estos fueron los primeros inicios de la robótica. Los inicios de la robótica actual empezaron con las empresas textiles, por medio de máquinas programables con tarjetas perforadas.

El término robótica procede de la palabra robot que significa en checo servidumbre. La robótica es, por lo tanto, la ciencia o rama de la ciencia que se ocupa del estudio, desarrollo y aplicaciones de los robots. Los robots hicieron su primera aparición en la mente prolífica de los escritores de ciencia ficción.

Ya en el siglo XIX se describían las notables ventajas de unas máquinas que iban destinadas a servir al hombre en multitud de tareas ingratas. Sin embargo, las imaginativas perspectivas del desarrollo de los robots se quedaron en su versión de "ficción", ya que el componente de "ciencia" tuvo que esperar hasta el comienzo de la década de los cincuenta del siglo pasado para ver su aplicación tecnológica en la industria. Pero en su corta evolución hasta hoy en día, la robótica ha pasado a ser una realidad imprescindible en el mundo de la producción industrial, y también en nuevas aplicaciones en sectores no industriales.

La primera vez que se habló de estos seres utilizando el término actualmente reconocido fue en una obra checoslovaca publicada en 1917 por Kare IKapek, en la que dio lugar al término robot, y se propago a partir de 1920 por medio de su famosa obra teatral RUR (Rossum's Universal Robots). En esta obra Kapek habla de la deshumanización del hombre en un medio tecnológico; a diferencia de los robots actuales estos no eran de origen mecánico, sino más bien creados a través de medios químicos, y estos robots perfectos terminan por no cumplir con su papel de servidores y se rebelan contra sus dueños.

El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, y la tecnología en sensores han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50's del siglo pasado. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

Los microrobots han tenido un auge en los últimos años por la reducción de costos de sus componentes y la facilidad de adquirirlos, hoy en día son utilizados por las industrias, las universidades y cualquier persona con un interés en ellos.

Los robots móviles cubren una gran variedad de campos, entre los cuales se incluyen trabajos subterráneos, tareas submarinas, misiones espaciales, exploración planetaria, vigilancia e intervención de seguridad, desactivación de explosivos, operación en zonas radioactivas, aplicaciones militares y otros muchos. En todas estas áreas la justificación más importante para el uso de la robótica es la dificultad o imposibilidad de intervención humana, bien directa o teleoperada.

El movimiento es una característica importante de los autómatas móviles, la evitación de obstáculos y seguimiento de trayectorias tienen un gran impacto en cómo reaccionan las personas y perciben un Sistema Autónomo. Éstos son dos comportamientos muy importantes que deben ser considerados en el proceso de desarrollo de Vehículos Autónomos Terrestres, AGV (del inglés Autonomous Ground Vehicles). Un AGV es un vehículo con la habilidad para manejarse por sí mismo a nivel de tierra.

La evitación de obstáculos es una disciplina de la robótica que tiene el objetivo de mover vehículos con base en la información sensorial. El uso de esta parte delantera de métodos para los métodos clásicos (el camino planificando) es una alternativa natural cuando el panorama es dinámico con un comportamiento imprevisible. En estos casos, las afueras no permanecen invariables, y así la información sensorial se usa para detectar los cambios consecuentemente adaptándose moviéndose.

La navegación autónoma en medios ambientes llenos de obstáculos siempre ha presentado un reto considerable. Solucionar este problema permitiría producir autómatas móviles que puedan moverse de un lado a otro y completar tareas como limpiar cuartos, ayudar a encontrar personas en situaciones de desastre y muchas otras misiones, sin el riesgo de poner en peligro otras vidas humanas.

Para una navegación efectiva, el robot debe poder percibir y trazar un mapa que represente con exactitud el entorno que lo rodea. Es también absolutamente crítico para el éxito de misión que el robot identifique exitosamente todos los obstáculos a su alrededor.

En modo seguimiento de trayectoria, el vehículo está viajando a lo largo de un camino aprendido de memoria bajo el control completo de una computadora. Si durante este proceso detecta algunos obstáculos nuevos en el camino, la rutina de evitación de obstáculo debería encontrar una ruta nueva alrededor del obstáculo y entonces debería volver en el camino.

Algunos autómatas móviles también usan sensores diversos de ultrasonido o infrarrojos para ver obstáculos. Estos sensores funcionan de manera similar a la ecolocalización animal. El robot manda una señal de luz infrarroja o sonora. Entonces detecta la reflexión de la señal. El robot halla que esta distancia para los obstáculos a merced de cuánto tiempo requiere la señal para rebotar de regreso.

Algunos autómatas avanzados también usan vista estérea. Dos cámaras proveen al robot de percepción de profundidad. El software de reconocimiento de imagen entonces les da la habilidad para localizar, clasificar objetos diversos. Los autómatas también usan sensores del olor y sonidos para ganar conocimiento acerca de sus entornos.

El continuo crecimiento del campo de la robótica en sentido general y en específico del seguimiento de trayectorias ha causado que muchas universidades ofrezcan las clases y los programas en el campo de robótica que combina elementos de Ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica e informática. Adicionalmente, el aprendizaje basado en proyectos es una parte importante del diseño de una disciplina. Por esa razón, muchas universidades usan autómatas educativos montados sobre plataformas experimentales. Estos autómatas se construyen para

realizar funciones básicas como seguimiento de línea y la evitación de obstáculos. Los estudiantes entonces pueden programar, diseñar, perfeccionar y entender el funcionamiento de estos sistemas.

La universidad de Oriente no es la excepción, desde hace algunos años se ha venido introduciendo la asignatura de robótica dentro del plan de estudios de la Carrera de Automática y cada año son más los trabajos y avances que se hacen relacionados con robots manipuladores, seguidores de línea, etc., Pero hasta el momento ha sido casi nulo el trabajo que se ha hecho en el área específica del seguimiento de trayectoria.

En base a lo antes expuesto, para la realización de este trabajo se plantea como **problema de la investigación** la carencia en la carrera de Automática de medios para la docencia de la asignatura de robótica. Para ello se define como **objeto de la investigación** a los Robots autónomos móviles. El **objetivo es** diseñar e implementar un Robot Móvil para navegación odométrica empleando la plataforma Arduino. Es por esto que el **campo de acción** es la robótica móvil. Para ello se plantea como **hipótesis** que si se implementa físicamente un Robot Móvil para navegación odométrica empleando la plataforma Arduino el departamento podrá disponer de un medio de aprendizaje para los estudiantes de Automática en la asignatura de Robótica.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes *tareas de investigación*:

1. Analizar el principio de físico de trabajo de los principales componentes utilizados en la confección del robot.
2. Analizar las características y modos de programación de la plataforma Arduino para el control del robot.
3. Realizar el montaje, programación y pruebas experimentales de funcionamiento del dispositivo
4. Analizar los resultados y emitir conclusiones.

Métodos y técnicas empleados en la investigación:

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas y métodos empíricos: Observación, encuesta y entrevista.
3. Método histórico lógico.
4. Método de análisis y síntesis.
5. Métodos experimentales: Programación.

Capítulo 1. Generalidades sobre los Robots móviles y su manipulación.

En este capítulo se realiza una breve descripción de la robótica, los tipos de robot y su clasificación haciendo énfasis en los robots móviles ya que son éstos los que ocupan el interés del presente trabajo. Se describen los principales actuadores empleados en esta rama tecnológica detallando los que serán empleados en este trabajo; los motores paso a paso, sus características, principio y modos de funcionamiento y conexiones. Por último se fundamenta la técnica de la navegación odométrica y su uso en la robótica móvil de ruedas.

11. Robótica. Concepto

La robótica es una ciencia o rama de la tecnología, que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren del uso de inteligencia. La misma es esencialmente pluridisciplinaria y se apoya en gran medida en los progresos de materias como la mecánica, la informática y computación, así como de otras disciplinas de vanguardia tales como el reconocimiento de patrones y la inteligencia artificial.

Existen muchas definiciones de la palabra *robótica*, en cada una de ellas encontramos algunos aspectos destacados:

La Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA del inglés Japanese Industrial Robotics Association) define la robótica como los dispositivos capaces de moverse de modo flexible, análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, lo que permite la realización de operaciones en respuesta a órdenes recibidas por humanos.

La RIA (del inglés Robot Industries Association) define al robot como: “un manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover cargas, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variadas y programadas”.

1.2 Tipos de Robot

Los dispositivos y mecanismos que pueden agruparse bajo el concepto de Robots son muy diversos y, por lo tanto, es difícil establecer una clasificación coherente de los mismos que resista un análisis crítico y riguroso. Los robots, con base en su arquitectura, se pueden subdividir en los siguientes grupos: (a) poliarticulados, (b) móviles, (c) androides, (d) zoomórficos e (e) híbridos. (Ver Figura 1.1).

Poliarticulados:

En este grupo están los Robots de muy diversa forma y configuración cuya característica común es la de ser básicamente sedentarios (aunque excepcionalmente pueden ser guiados para efectuar desplazamientos limitados) y estar estructurados para mover sus elementos terminales en un determinado espacio de trabajo según uno o más sistemas de coordenadas y con un número limitado de grados de libertad. En este grupo se encuentran los manipuladores, los Robots industriales, los Robots cartesianos y se emplean cuando es preciso abarcar una zona de trabajo relativamente amplia o alargada, actuar sobre objetos con un plano de simetría vertical o reducir el espacio ocupado en el suelo. Ejemplo: los cartesianos, industriales o manipuladores.

Móviles:

Son Robots con gran capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores. Estos Robots aseguran el transporte de piezas de un punto a otro de una cadena de fabricación. Guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.

Androides:

Son Robots que intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemática del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin utilidad práctica, y destinados,

fundamentalmente, al estudio y experimentación. Uno de los aspectos más complejos de estos Robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del Robot.

Zoomórficos:

Los Robots zoomórficos, que considerados en sentido no restrictivo podrían incluir también a los androides, constituyen una clase caracterizada principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos. A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción es conveniente agrupar a los Robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores.

El grupo de los Robots zoomórficos no caminadores está muy poco evolucionado. Los experimentados efectuados en Japón basados en segmentos cilíndricos biselados acoplados axialmente entre sí y dotados de un movimiento relativo de rotación. Los Robots zoomórficos caminadores multípedos son muy numerosos y están siendo experimentados en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos terrenos, piloteando o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas. Las aplicaciones de estos Robots serán interesantes en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes.

Híbridos:

Por último, los Híbridos corresponden a aquellos de difícil clasificación, cuya estructura se sitúa en combinación con algunas de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o yuxtaposición. Por ejemplo, robots articulados y con ruedas (conjunción) o un cuerpo formado por un carro móvil y de un brazo semejante al de los robots industriales (yuxtaposición).



Figura 1. Tipos de Robot.

En la presente investigación solo se profundizará en los robots móviles, pues son los de interés para la misma y constituyen un área de gran importancia dentro de la robótica en la actualidad que gana más adeptos cada día tanto del mundo científico, las instituciones educacionales como en la industria moderna.

1.3 Elementos funcionales de control en robótica

1.3.1 Estructura mecánica

En términos anatómicos un robot requiere un cerebro, sentidos, un torrente sanguíneo y músculos apropiados para su funcionamiento. Los elementos equivalentes en términos de componentes podrían ser un sistema de control, dispositivos de medición, un generador de potencia eléctrica, hidráulica o neumática, un manipulador y posiblemente un sistema para trasladarse.

Los robots deben tener una estructura mecánica para mover un objeto, y también deben tener una parte llamada actuador final. El actuador final de un robot es el sujetador o mano, o herramienta montada al final del brazo del robot.

1.3.2 Control de movimientos

Dada una estructura particular, será necesario determinar los movimientos requeridos de cada parte del mecanismo para que el actuador final pueda ser movido a la posición requerida y orientación en el espacio.

Dos tipos de control pueden ser usados en diferentes partes del robot, dependiendo del tipo de los actuadores usados. Un control de lazo abierto se muestra en la Figura 2. No se toma ninguna medida en la posición de salida, así que este control depende exclusivamente de la buena calibración y de un comportamiento confiable del actuador.

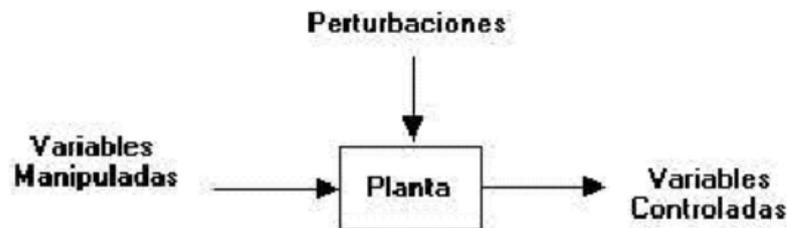


Figura 2. Diagrama del control de un robot a lazo abierto

En el lazo cerrado mostrado en la figura 1.3, la posición de salida es sensada y realimentada para dar una señal de error que es usada para manejar el actuador.

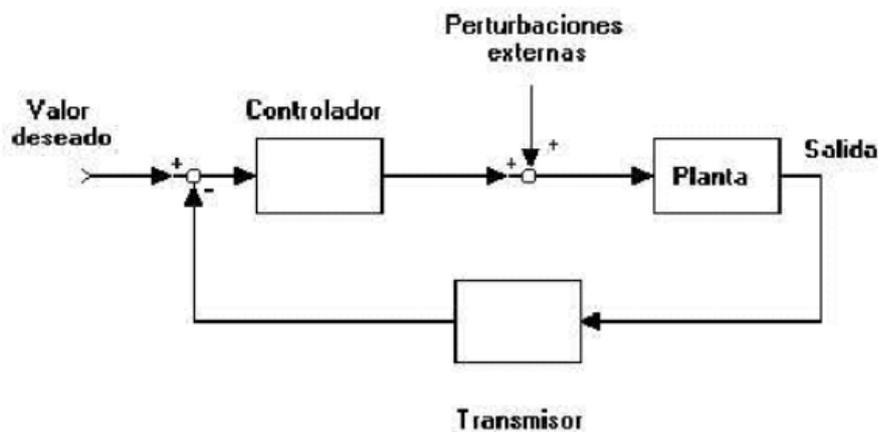


Figura 3. Diagrama del control del robot a lazo cerrado.

El desempeño debe ser bueno bajo diferentes condiciones de operación, tales como cambios en la carga, variaciones en el comportamiento del sistema mecánico del robot, cambios en la fricción, y variaciones en las condiciones ambientales, por ejemplo cambios en la temperatura. Para hacer efectivo el sistema de control, los actuadores deben usarse para manipular las partes elementales de la estructura

mecánica. Si se usa el lazo cerrado, deben haber sensores para medir el estado de las posiciones en las uniones. Algunas veces las señales de velocidad y aceleración son medidas directamente. Los requerimientos para altas velocidades y aceleraciones, y mayor precisión, requieren un estudio del comportamiento dinámico del robot.

1.3.3 Grados de libertad

Seis parámetros son necesarios y suficientes para definir la posición y orientación de un objeto en general en tres dimensiones. La posición del objeto puede ser definida en coordenadas espaciales relativas a un mismo punto de referencia. Otras alternativas son definir la posición en coordenadas cilíndricas o esféricas. Estos esquemas se muestran en la figura 1.4.

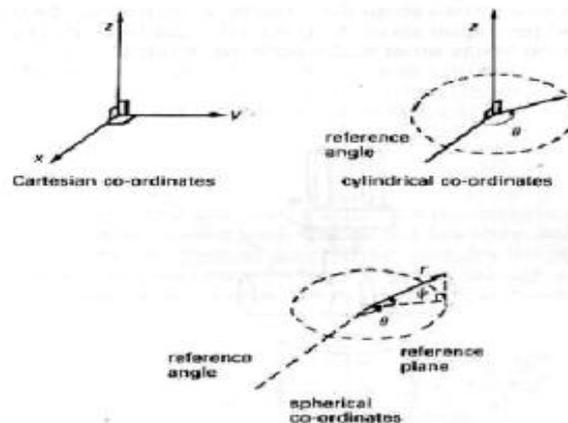


Figura 4. Representación de coordenadas.

1.4 Actuadores

Los actuadores son los dispositivos encargados de efectuar acciones físicas ordenadas por algún sistema de control. Esta acción física puede ser un movimiento lineal o un movimiento circular según sea el caso.

El proceso bajo control, la acción que se tiene que llevar a cabo y la velocidad con que ésta deba realizarse, son factores que influyen en la clase de actuador que se ha de utilizar. Generalmente se consiguen tres tipos de actuadores: los hidráulicos, los eléctricos y los neumáticos, los cuales se explican a continuación.

1.4.1 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos son los que han de utilizar un fluido a presión, generalmente un tipo de aceite, para que el robot pueda movilizar sus mecanismos. Los actuadores hidráulicos se utilizan para robots grandes, los cuales presentan mayor velocidad y mayor resistencia mecánica.

Para las aplicaciones que exijan una carga útil pesada (por lo general, mayor de 5 Newtons y tan alta como 1000 Newtons), el dispositivo hidráulico es el sistema a elegir. Los altos índices entre potencia y carga, la mayor exactitud, la respuesta de mayor frecuencia con un desempeño más suave a bajas velocidades y el amplio rango de velocidad, son algunas de las ventajas del acondicionamiento hidráulicos sobre los actuadores neumáticos.

La presión es aplicada de la misma manera que la neumática en un émbolo que se encuentra dentro de un compartimiento hermético. Este se encuentra acoplado mecánicamente a un vástago que se mueve linealmente de acuerdo a la presión aplicada. Los cálculos para la fuerza ejercida por un cilindro hidráulico son las mismas que para los cilindros neumáticos.

Sin embargo, poseen una diferencia fundamental; el cilindro hidráulico del mismo tamaño que el neumático produce una mayor fuerza. Las principales aplicaciones la podemos encontrar en máquinas troqueladoras, en cargadores y en maquinarias pesada para obras civiles.

1.4.2 Actuadores neumáticos

Este tipo de actuador trabaja bajo los mismos principios del actuador hidráulico. Se utiliza aire en vez de aceite, y típicamente este suministra alrededor de 6 a 7 bares provenientes desde los pistones. Su gran problema es la compresibilidad del aire lo cual le impide una alta precisión.

Dentro de sus ventajas están: son pocos costosos, sus componentes son confiables y de mantenimiento sencillo, son limpios y pueden utilizarse en situaciones donde el riesgo de una explosión impediría el uso de electricidad, entre otras características.

1.4.3 Actuadores eléctricos

Se le da el nombre de actuadores eléctricos cuando se usa la energía eléctrica para que el robot ejecute sus movimientos. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad.

Los sistemas de acondicionamiento eléctrico han llegado a ser los que más predominan en los ambientes robóticos industriales. Aunque no proporcionan la velocidad o la potencia de los sistemas hidráulicos, los dispositivos eléctricos ofrecen una mayor exactitud y repetitividad, necesitan de un menor espacio de piso y, como consecuencia, son muy adecuados para el trabajo preciso, como el ensamblaje.

Por lo general, los robots se pueden accionar con un acondicionamiento eléctrico, por medio de los motores paso a paso o de los servomotores. En la actualidad, los motores paso a paso predominan en los robots “instructores” pequeños, los cuales se emplean en las instituciones educativas o en los ambientes de laboratorios automatizados.

Una salida de un motor paso a paso consiste en incrementos de movimiento angular discreto iniciado por una serie de pulsos eléctricos discretos. Los robots dirigidos por un motor paso a paso se utilizan para aplicaciones de trabajo ligero, debido a que una carga pesada puede ocasionar una pérdida de pasos y la subsecuente inexactitud.

Los servomotores de corriente continua proporcionan un control excelente con los requisitos de mantenimiento mínimos. El control del momento de torsión es posible si, respectivamente, se controlan el voltaje o la corriente que se aplican al motor. Las ventajas que tales motores ofrecen incluyen un momento de torsión elevado, un tamaño pequeño de estructura y una carga ligera, así como una curva de velocidad lineal, lo cual reduce el esfuerzo computacional.

Los actuadores de solenoide utilizan el principio de la atracción electromagnética para producir el movimiento mecánico. La mayor ventaja es su velocidad de respuesta, ya que el movimiento es casi instantáneo al flujo de corriente eléctrica.

Sin embargo una de sus desventajas es su tamaño comparado con la fuerza que produce. En el momento que se energiza la bobina, el campo magnético creado por ésta, hace que la armadura se deslice hacia ella, logrando con esto, que el vástago presente un movimiento lineal igual al de la armadura. Cuando la bobina se desenergiza, el resorte hace que el vástago regrese a su posición de reposo.

1.5 Tipos de Motores

Por definición, el motor eléctrico es un dispositivo electromotriz, es decir, que convierte la energía eléctrica en energía motriz. Todos los motores disponen de un eje de salida para acoplar un engranaje, una rueda, una polea o cualquier mecanismo capaz de transmitir el movimiento creado por el motor. La etapa de elección de un motor puede ser una tarea muy complicada según las limitaciones de nuestro proyecto, si tenemos en cuenta todas las características que definen al motor. Éstas son: tamaño, peso, velocidad (revoluciones por minuto, RPM), torque (kilogramo por centímetro) tensión y, la más sensible: el costo. En la actualidad, existen diferentes tipos de motores, que se describen a continuación.

1.5.1 Motores de DC (Corriente Directa)

Son los motores más comunes y que casi todos conocen (Figura 5). El funcionamiento del motor se basa en la acción de campos magnéticos opuestos que hacen girar el rotor (eje interno) en dirección opuesta al estator (imán externo o bobina). De este modo, si sujetamos la cubierta del motor por medio de soportes o bridas, el rotor con el eje de salida será lo único que girará. Para cambiar la dirección de giro en un motor de corriente continua, tan sólo debemos invertir la polaridad de su alimentación eléctrica. Un detalle importante es que, casi siempre, se utilizan acompañados de un sistema de engranajes que reducen la velocidad y proporcionan mayor fuerza, dado que este tipo de motores carece de esta cualidad. Es conveniente conseguir el conjunto completo porque las adaptaciones son complicadas y pocas veces se obtienen muy buenos resultados.



Figura 5. Motor de DC

1.5.2 Servomotores

El servo es un pequeño pero potente dispositivo que dispone en su interior de un pequeño motor con un reductor de velocidad y un multiplicador de fuerza (Figura 6). También cuenta con un pequeño circuito eléctrico encargado de gobernar el sistema. El recorrido del eje de salida es de 180° en la mayoría de ellos, pero se puede modificar con facilidad para tener un recorrido libre de 360° y, entonces, actuar como un motor común.

El control de posición lo efectúa el servo en forma interna mediante un potenciómetro que va conectado en forma mecánica al eje de salida. Éste controla un PWM (Pulse Width Modulator, modulador de ancho de pulsos) interno para compararlo con la entrada PWM externa del servo, mediante un sistema diferencial y así, modificar la posición del eje de salida hasta que los valores se igualen y el servo se detenga en la posición indicada.

En esta posición, el motor del servo deja de consumir corriente y sólo circula una pequeña cantidad hasta el circuito interno. Si en ese momento forzamos el servo (al mover el eje de salida con la mano), el control diferencial interno lo detecta y manda la corriente necesaria al motor para corregir la posición. Para controlar un servo, tenemos que aplicar un pulso de duración y una frecuencia específicos. Todos los servos disponen de tres cables: dos para la alimentación y uno para aplicar el tren de pulsos de control que harán que el circuito de control diferencial interno ponga el servo en la posición indicada por la anchura del pulso. Los servomotores son una muy buena alternativa, ya que traen integrado un sistema reductor que nos ahorrará

dolores de cabeza a la hora de buscar fuerza. La desventaja para algunas aplicaciones es que, en general, son lentos. Se utilizan mucho en los automóviles y aviones radiocontrolados, principalmente para accionar el mecanismo que les da la dirección.



Figura 6. Servomotores

1.5.3. Motores paso a paso

Los motores paso a paso (PAP) son motores diseñados específicamente para poder controlar su posición angular con precisión (ver figura 1.7). En ellos se ha primado el posicionamiento antes que la posibilidad de girar libremente a grandes velocidades. En este tipo de motores, para que el eje rote, se aplique una secuencia determinada de señales digitales. Esta secuencia está constituida por diferentes pasos en un orden específico y cada vez que la secuencia de control incrementa o decrementa un paso, el motor incrementa o decrementa un valor fijo en su posición angular. El valor de ese incremento estará determinado por el tipo de secuencia que el motor haya recibido y por las características constructivas del motor.

Otra diferencia con los motores tradicionales es que en los motores paso a paso, el torque o esfuerzo que pueden aplicar al eje del mismo es mayor cuanto menor es la velocidad de giro. Esto implica que un motor paso a paso en reposo energizado puede mantener su posición angular aún ante determinados esfuerzos tangenciales. En los motores tradicionales esto no es posible, si el motor es energizado gira, y si es desenergizado no puede sostener ningún esfuerzo en su eje, a menos claro, que sea aplicado algún tipo de mecanismo de freno.

Los motores paso a paso, como todo motor, son en esencia un convertidor electromecánico, que transforma la energía eléctrica en mecánica; pero de un modo tan peculiar que constituye en la actualidad una categoría aparte. En efecto,

mientras que un motor convencional gira libremente al aplicar una tensión comprendida dentro de ciertos límites, el motor paso a paso está concebido de tal manera que gira un determinado ángulo proporcional a la "codificación" de tensiones aplicadas a sus entradas.



Figura 1.7: Motor paso a paso

Principio de funcionamiento.

En el diseño de los motores paso a paso existen una serie de bobinados eléctricos dispuestos en orden alrededor de un rotor conformado por una serie de imanes permanentes. Se dividen en dos tipos diferentes de acuerdo a su diseño.

Los que poseen además magnetización permanente en el núcleo de los bobinados y los que no la poseen. Los primeros pueden distinguirse de los segundos porque al intentarlos girar se percibe como una resistencia al giro que se escalona en pequeños saltos, mientras que en los segundos el rotor gira libremente como si se tratase de un motor convencional. Los de magnetización permanente a su vez se dividen principalmente en dos tipos:

Unipolares: son tal vez los motores PAP más extendidos actualmente. Son más económicos que los bipolares pero el esfuerzo que pueden soportar en igualdad de condiciones es menor. Son más simples de operar que los bipolares ya que se necesita sólo energizar en el orden correcto uno o más de sus bobinados. Poseen dos bobinados principales con un punto central en cada uno. Se reconocen generalmente por poseer 6 o 5 cables de control. En el caso que posean sólo 5 cables de control, implica que los dos puntos medios de los bobinados fueron unidos en un cable común. Se denominan unipolares porque los bobinados son energizados con una tensión de la misma polaridad siempre.

Bipolares: son los motores más utilizados cuando es necesario un gran rendimiento, pero suelen no encontrarse en dispositivos de bajo coste. Debido a que la excitación

de sus dos bobinados es más compleja que en los unipolares, suelen estar acotados a proyectos de envergadura o maquinaria de control numérico. Se reconocen por poseer cuatro cables de control. Algunos motores paso a paso de buena construcción pueden funcionar como unipolares o bipolares según fuese necesario. Se denominan bipolares porque sus bobinados son energizados en forma alternada con polaridades opuestas.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- De imanes permanentes
- De reluctancia variable
- Híbridos.

Los primeros, de imanes permanentes, están básicamente constituidos por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes, y por un cierto número (generalmente cuatro) de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. El rotor, que posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator.

Toda la conmutación (excitación de las bobinas) debe ser externamente manejada por un controlador y, habitualmente, los motores y controladores están diseñados para que el motor pueda ser mantenido en una posición o rotar en uno u otro sentido. En los motores de reluctancia variable, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas de estator. No contiene, por tanto, imanes permanentes. Los motores híbridos combinan el modo de funcionamiento de los dos anteriores.

En los motores paso a paso la señal de control consiste en trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número discreto de grados. Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Dentro de los motores paso a paso de imán permanente existen dos tipos, bipolares y unipolares. Estos últimos suelen tener 8, 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno. Este tipo se

caracteriza por ser más simple de controlar. Un esquema sencillo de este tipo de motores se muestra en la figura 2, para el caso de un motor unipolar de 6 cables.

Para determinar que cables corresponden a cada bobinado basta probar con un multímetro que cables poseen entre si la resistencia indicada en el motor como resistencia característica del bobinado. En ambos casos la secuencia de control es idéntica, lo que es notoriamente distinto es el circuito encargado de trasladar esa secuencia en señales que le permitan al motor operar.

Ejemplos de circuitos de control fáciles de construir para estos motores pueden encontrarse en la literatura especializada, páginas Web y en este mismo sitio.

Los datos más relevantes a conocer de un motor son:

- **Voltaje de trabajo:** Es la tensión a la que debe operar el motor en condiciones ideales. Operarlos por debajo de ese valor reduce el esfuerzo que el motor puede realizar y operarlos a mayor voltaje puede destruirlos o reducir su vida útil.
- **Resistencia de los bobinados:** es el dato que indica cuanta corriente circulará por cada bobinado, determinando en forma indirecta el torque del motor. Es importante conocer cuál es esta corriente para determinar si nuestro circuito es capaz de controlar el motor.
- **Precisión o grados por paso:** indica cuantos pasos es necesario aplicar desde la secuencia de control para que el rotor complete una vuelta exacta. Comúnmente se los encuentra de 500, 200, 96, 48, 24 y 4 pasos por vuelta. Cuanto mayor sea el número de pasos necesarios, mayor será la precisión del motor a la hora de posicionar el rotor en determinada posición.
- **Torque del motor:** está determinado por las dimensiones constructivas del motor, el voltaje de trabajo y la resistencia de los bobinados. El torque determina a cuanto esfuerzo puede someterse el motor manteniendo la precisión secuencia de conteo/posición del rotor.

1.6 Robótica Móvil

Un robot móvil es un sistema electromecánico capaz de desplazarse de un punto a otro en un determinado espacio de trabajo. En él se identifican diversos subsistemas de percepción, planificación, control de movimientos y locomoción que interactúan entre sí.

El uso de robots móviles está justificado en aplicaciones en las que se realizan tareas molestas o arriesgadas para el trabajador humano. Entre ellas, el transporte de material peligroso, las excavaciones mineras, la limpieza industrial o la inspección de plantas nucleares son ejemplos donde un robot móvil puede desarrollar su labor y evita exponer, gratuitamente, la salud del trabajador.

Otro grupo de aplicaciones donde este tipo de robots complementa la actuación del operador lo componen las labores de vigilancia, de inspección o asistencia a personas incapacitadas. Asimismo en aplicaciones de teleoperación, donde existe un retraso sensible en las comunicaciones, resulta interesante el uso de vehículos con cierto grado de autonomía.

Se entiende como autonomía de un robot móvil, al dominio que tiene éste para determinar su curso de acción, mediante su propio proceso de razonamiento (basado en sensores que le permiten percibir el espacio de trabajo), en lugar de seguir una secuencia fija de instrucciones.

Los robots móviles se caracterizan por su capacidad de desplazarse de forma autónoma en un entorno desconocido o conocido sólo parcialmente. El grado de autonomía depende en gran medida de la facultad del sistema para percibir, abstraer el entorno y convertir la información obtenida en órdenes, de tal modo que, aplicadas sobre los actuadores del sistema de locomoción, garanticen la realización eficaz de su tarea. De este modo, las dos grandes características que lo alejan de cualquier otro tipo de vehículo son:

Percepción: Determina la relación del robot con su entorno de trabajo, mediante el uso de sensores.

Razonamiento: Determina las acciones que se han de realizar en cada momento, según el estado del robot y su entorno, para alcanzar las metas asignadas.

1.6.1 Tipos de Locomoción

De acuerdo al tipo de locomoción que emplean los robots móviles para desplazarse, se clasifican en tres categorías:

- Robots Móviles de Ruedas (RMR).
- Robots Móviles de Patas.
- Robots Móviles de Orugas.

Se define como Robot Móvil con Ruedas al sistema electromecánico controlado, que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo, y que es capaz de trasladarse de forma autónoma a una meta preestablecida en un determinado espacio de trabajo. (Silva et al., 2007).

La mayoría de los robots móviles que se construyen utilizan ruedas para su locomoción. Esto se debe a que los RMR son más eficientes en energía que los de patas o de orugas en superficies lisas y firmes.

Estos además requieren un número de partes menor y menos complejas, en comparación con los otros dos tipos, lo que permite que su construcción sea más fácil. Adicionalmente, el control de las ruedas es menos complejo que la actuación de las patas o de las orugas.

Existen cuatro clases de ruedas principales (Goris, 2005), las cuales se diferencian ampliamente en su cinética, y por ende la elección del tipo de rueda tiene un gran impacto en la cinética general del robot móvil. Estos tipos de ruedas son: (a) rueda estándar, (b) rueda castor, (c) de bola o rueda esférica y (d) rueda omnidireccional. (ver figura 1.8).



Figura 1.8: Tipos de rueda usadas en un RMR

1.6.2 Clasificación de los robots según su configuración.

La configuración da respuesta a cómo se mueve el robot en su entorno y hacia dónde puede dirigirse. La misma incluye la forma física del robot así como un modelo de cómo el robot puede moverse en su entorno. Este movimiento, para los robots de tierra, se describe en términos de rotación (cómo gira) y de traslación (cómo se mueve hacia delante y hacia atrás).

Las configuraciones pueden ser holonómicas o no holonómicas. En el primer caso el robot holonómico puede moverse en cualquier dirección, mientras que el no-holonómico presenta limitaciones en este sentido.

Existen diferentes tipos de configuraciones (Silva et al., 2007; Houston, s/a; Nourbakhsh y Siegwart, 2004), de acuerdo a la cantidad de ruedas, el tipo y el arreglo o lugar donde se ubiquen las mismas en el robot móvil, estando estos tres aspectos muy relacionados. En la presente investigación solo se estudiarán las configuraciones más comunes que aparecen en los robots móviles con ruedas (RMR) mostradas en la figura 1.9.

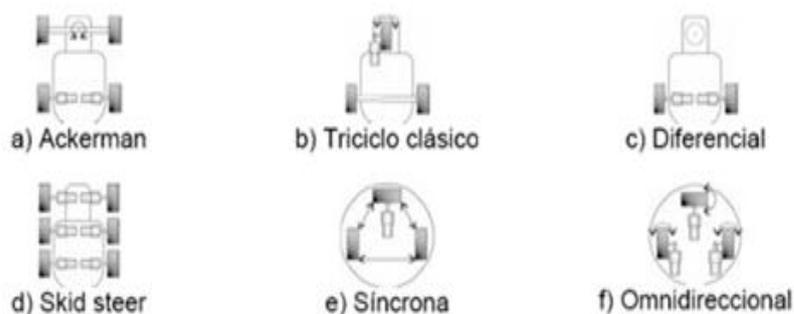


Figura 1.9: Tipos de configuración en los Robots Móviles con ruedas

A) Ackerman o tipo carro.

El robot de configuración Ackerman es similar a un auto, pues es un vehículo de cuatro ruedas: dos ruedas traseras fijas de tracción y dos ruedas delanteras de dirección.

Al igual que un carro, el robot con configuración Ackerman es no-holonómico y no puede moverse hacia al lado de manera instantánea, sino que tiene que ejecutar una serie de movimientos para poder ir hacia esa dirección. Esto no es un gran problema en las áreas despejadas, pero en entornos con obstáculos estos movimientos resultan muy difíciles de realizar.

La ventaja de este tipo de robot es que es más estable y separa la función de dirección de la función de rotación. Además en este diseño las ruedas de dirección no son motrices, y no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto. Sin embargo, tiene la desventaja de ser mecánicamente más complicado y, por ende, los tipos de movimientos son significativamente más complicados también.

B) Triciclo.

El robot triciclo es similar al Ackerman y presenta las mismas limitaciones de movimiento: no puede moverse hacia al lado de manera instantánea. La diferencia más notable entre ambos es que el triciclo solo tiene una rueda delantera de dirección que es a su vez de tracción, por lo que es menos estable. También el triciclo es mucho más simple mecánicamente, porque el carro necesita alguna unión entre las ruedas de dirección. Las dos ruedas traseras son fijas y giran a merced del empuje proporcionado por la delantera.

Al igual que el Ackerman, en este diseño no es necesario controlar la velocidad de las ruedas para que el robot se mantenga recto, lo cual es una ventaja respecto al diferencial, por otro lado tiene la desventaja de poseer un radio de giro que es dado de forma idéntica al del tipo Ackerman.

C) Diferencial.

Tanto desde el punto de vista de la programación como de la construcción, el diseño diferencial es uno de los sistemas de locomoción menos complicados. El robot

puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas dependiendo de las velocidades a que giren sus ruedas. El robot de configuración diferencial consiste en dos ruedas que se manejan de forma independiente. Estas ruedas están alineadas y, usualmente, se ubican en el centro del robot. El robot gira alrededor del punto que se encuentra a la misma distancia de cada rueda. Si las ruedas están localizadas en el centro del robot, este puede girar en el lugar sin trasladarse.

Generalmente, al robot diferencial se le añaden una o dos ruedas de apoyo en un diseño triangular o romboidal para mejorar su estabilidad. El diseño triangular puede no ser suficiente dependiendo de la distribución de pesos del robot, y el romboidal puede provocar inadaptación al terreno si éste es irregular, lo que puede exigir alguna clase de suspensión.

Otro elemento importante en el diseño de estos robots es que la velocidad debe ser controlada dinámicamente, o sea, debe existir un medio de monitorizar y cambiar la velocidad del motor mientras el robot avanza, pues para que el robot se mueva en línea recta sus ruedas tienen que girar a la misma velocidad y cuando los motores encuentran diferentes resistencias las velocidades de los motores varían y el robot gira incluso aun cuando se le haya ajustado inicialmente para que vaya recto. De esta manera la simplicidad del diseño queda minimizada por la complejidad del sistema de control de la velocidad; no obstante la reducción de la complejidad mecánica en detrimento de la complejidad de la electrónica y del software es frecuentemente una elección más barata y fiable.

D) SkidSteer.

Los robots con esta configuración son similares a un tanque: tienen gran cantidad de ruedas a los lados que no giran o usan esteras. Para que este tipo de robot gire, las ruedas de un lado tienen que ir hacia delante y las del otro hacia atrás, lo que posibilita que el robot se mueva más o menos en el lugar.

La ventaja de estos robots móviles es que, generalmente, pueden moverse mejor en los terrenos accidentados que aquellos robots con otras configuraciones, pues los robots que usan esteras tienen mayor contacto con el suelo lo que puede mejorar su maniobrabilidad en terrenos accidentados comparado con los diseños anteriores.

La principal desventaja de esta configuración es que debido a la gran cantidad de deslizamiento durante un giro, el centro exacto de rotación del robot es difícil de predecir y el cambio exacto de posición y orientación también está sujeto a variaciones, dependiendo del tipo de fricción con el suelo. Por ello, la estimación de la posición haciendo uso de la odometría en estos robots es altamente imprecisa.

E) Síncrona.

En la configuración síncrona sus ruedas (generalmente tres), que están enclavadas de modo que siempre apuntan en la misma dirección, son tanto de dirección como de movimiento. También tiene dos motores: uno que guía (dirige) las ruedas y otro que las hace girar.

Con este diseño, el robot es capaz de trasladarse en cualquier dirección sin rotar su chasis, pues para cambiar de dirección gira simultáneamente todas sus ruedas alrededor de un eje vertical pero su chasis sigue apuntando en la misma dirección que tenía. En ocasiones, que el chasis no gire puede constituir una limitación. Si el robot tiene una parte delantera, presumiblemente donde se concentran sus sensores, se tendrá que arbitrar un procedimiento para que su cuerpo se oriente en la misma dirección que sus ruedas.

F) Omnidireccional.

(Figueredo, Torres y Fresneda, 2010) definen los robots de configuración omnidireccional como aquellos que tienen movilidad para cualquier dirección (holonómico) desde un punto cualquiera en un plano y que no necesitan girar antes de comenzar a moverse, es decir, pueden moverse en cualquier dirección bajo cualquier orientación.

A diferencia de los otros tipos de configuración que no pueden ejecutar desplazamientos laterales, los robots omnidireccionales pueden controlar cada uno de los tres grados de libertad independientemente; lo cual constituye una importante ventaja, pues disminuye la complejidad del sistema de control y permite un movimiento más rápido y preciso.

Este tipo de robots generalmente hace uso de las ruedas omnidireccionales, donde todas son motrices o de tracción y ninguna de dirección. Este tipo de ruedas al ser accionadas giran sobre sí mismas, pero tienen también rodillos (ver Figura 1.1) que

no son motorizados pero que giran libremente sobre las ruedas con un ángulo determinado. Un arreglo muy usado es el de tres ruedas omnidireccionales de 90 grados (en relación al ángulo giro de los rodillos) alrededor de la circunferencia del robot. Ajustando las velocidades de cada rueda un robot de este tipo puede rotar, o trasladarse libremente, ir hacia delante, hacia atrás y realizar giros.

1.7 Navegación

Se define navegación como la metodología (o arte) que permite guiar el curso de un robot móvil a través de un entorno con obstáculos. Existen diversos esquemas, pero todos ellos poseen en común el afán por llevar el vehículo a su destino de forma segura. La capacidad de reacción ante situaciones inesperadas debe ser la principal cualidad para desenvolverse, de modo eficaz, en entornos no estructurados. Las tareas involucradas en la navegación de un robot móvil son: la percepción del entorno a través de sus sensores, de modo que le permita crear una abstracción del mundo; la planificación de una trayectoria libre de obstáculos, para alcanzar el punto destino seleccionado; y el guiado del vehículo a través de la referencia construida. De forma simultánea, el vehículo puede interactuar con ciertos elementos del entorno. Así, se define el concepto de operación como la programación de las herramientas de a bordo que le permiten realizar la tarea especificada.

Realizar una tarea de navegación para un robot móvil significa recorrer un camino que lo conduzca desde una posición inicial hasta otra final, pasando por ciertas posiciones intermedias o submetas. El problema de la navegación se divide en las siguientes cuatro etapas:

- *Percepción del mundo*: Mediante el uso de sensores externos, creación de un mapa o modelo del entorno donde se desarrollará la tarea de navegación (González, 2002).
- *Planificación de la ruta*: Crea una secuencia ordenada de objetivos o submetas que deben ser alcanzadas por el vehículo. Esta secuencia se calcula utilizando el modelo o mapa de entorno, la descripción de la tarea que debe realizar y algún tipo de procedimiento estratégico.
- *•Generación del camino*: En primer lugar define una función continua que interpola la secuencia de objetivos construida por el planificador.

Posteriormente procede a la discretización de la misma a fin de generar el camino.

- *Seguimiento del camino:* Efectúa el desplazamiento del vehículo, según el camino generado mediante el adecuado control de los actuadores del vehículo (Martínez, 1.994).

Estas tareas pueden llevarse a cabo de forma separada, aunque en el orden especificado. La interrelación existente entre cada una de estas tareas conforma la estructura de control de navegación básica en un robot móvil (Shin y Singh, 1.990) y se muestra en la figura 1.10.

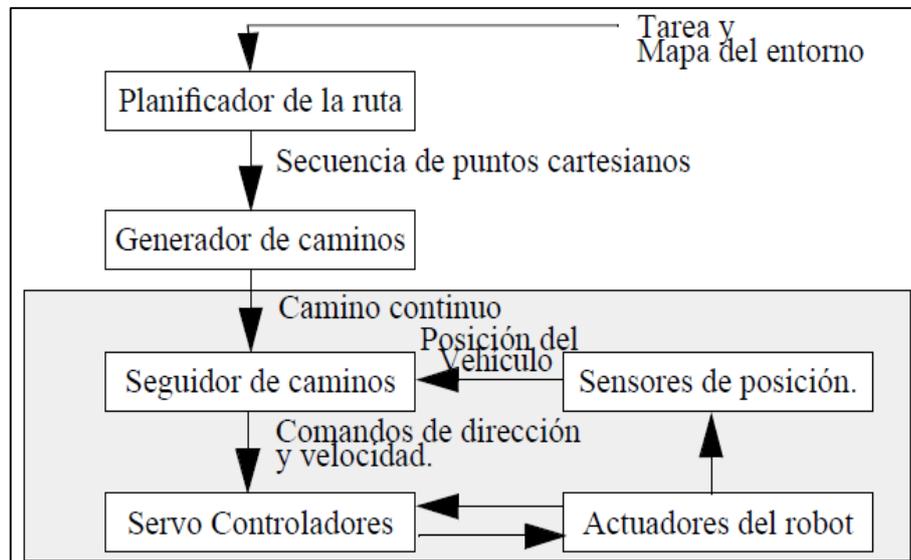


Figura 1.10: Relación entre las tareas para la navegación

En el esquema dispuesto en la figura se parte de un mapa de entorno y de las especificaciones de la tarea de navegación. De estos datos se realiza la planificación de un conjunto de objetivos representados como una secuencia de puntos cartesianos dispersos que definen la ruta. Dicho conjunto cumple los requisitos de la tarea impuesta asegurándose de que la ruta asociada está libre de obstáculos.

Mediante el uso del generador del camino se construye la referencia que utilizará el seguidor de caminos para generar los comandos de direccionamiento y velocidad que actuarán sobre los servocontroladores del vehículo. Por último, mediante el uso de los sensores internos del vehículo (sensores de posición) en conjunción con técnicas odométricas, se produce una estimación de la posición actual (Cox, 1.991)

la cual será realimentada al seguidor de caminos. La complejidad del sistema necesaria para desarrollar esta tarea depende principalmente del conocimiento que se posea del entorno de trabajo. Mediante el uso adecuado del mismo se puede construir un camino que cumpla los requisitos impuestos por la tarea de navegación, sin que el vehículo colisione con algún elemento del entorno.

1.7.1. Tipos de mapas

Para efectuar navegación lo más común es disponer de un *mapa*, aunque no necesariamente. Mapa es cualquier tipo de representación del entorno en la memoria del robot. A partir de un mapa, se puede determinar un camino apropiado entre dos puntos deseados, lo cual será más o menos complejo según haya sido la representación escogida. Por último, habrá que seguir ese camino.

Veamos en primer lugar los tipos de mapas que se usan normalmente. Primeramente están los basados en información sensorial, con dos tipos:

- Mapas de marcas en el terreno (landmarks): son localizaciones particulares fácilmente identificables por el sistema sensorial del robot (cierta esquina, un grupo de objetos bien visibles o tubos de neón, etc.) que actúan como marcas relevantes (*landmarks*). Se representan como nodos de un grafo (que pueden tener características asociadas, para garantizar su identificación unívoca), los cuales se unen por los arcos que normalmente representan la accesibilidad (si existe arco entre dos nodos, el robot puede desplazarse directamente de uno a otro de los *landmarks* a los que los nodos representan). Estos arcos pueden también estar etiquetados con características del recorrido como distancia, dirección, tiempo de tránsito, etc
- Mapas de ocupación: se basan en representar el terreno como una retícula, regular o no, cada una de cuyas casillas contiene un valor útil para el robot, que suele ser la certitud de ocupación, es decir, qué grado de creencia tiene el robot sobre el estado de una determinada casilla, desde -1 (es seguro que está libre) hasta +1 (es seguro que está ocupada) pasando por 0 (no hay evidencia en ningún sentido). Estos mapas se pueden construir por métodos visuales, mediante la toma de imágenes por un par estéreo de cámaras (o

una sola que va a bordo del robot y se sitúa en varias posiciones), a partir de las proyecciones de puntos límite de un objeto.

Los mapas también se pueden clasificar de acuerdo a lo que almacenan:

- Mapas de espacio libre: al igual que en los mapas de marcas, la estructura de almacenamiento elegida es también el grafo, pero esta vez cada nodo representa un punto de parada donde el robot pueda detenerse para explorar el entorno mediante sus sensores. Los arcos son líneas rectas que el robot pueda recorrer entre estos puntos sin encontrar obstáculos; evidentemente, limitarán a los posibles obstáculos.
- Mapas de objetos: Como su nombre indica, lo que se almacena en ellos son los objetos (obstáculos) que el robot puede encontrar en su trayectoria, de varios modos; los más normales son considerar al objeto como un polígono, y almacenar su punto central y la extensión máxima en una serie de direcciones desde él; otro modo es caracterizarlo como una de entre un conjunto de figuras geométricas dadas, y dar su posición y la orientación de un eje propio de esa figura.
- Mapas compuestos: almacenan tanto información de objetos como de espacio libre. Una posibilidad es dividir el espacio en regiones arbitrarias, pero conocidas, e indicar en cada una de ellas si está totalmente libre, totalmente ocupada, o parcialmente ocupada. Otra alternativa es una retícula de puntos con un indicador de estado en cada punto, y una lista de a cuáles de los puntos adyacentes se puede acceder directamente; la retícula puede hacerse más o menos densa, en función del tamaño del robot.
- Quadrees: Dividen el espacio mediante una retícula, y proceden por subdivisión recursiva de la misma, mientras la celda resultante sea subdividible, siendo el criterio el que no tenga toda ella el mismo carácter de ocupación.

Una vez se tienen los mapas, el siguiente paso consiste en definir cómo un robot móvil es capaz de saber en qué punto del mapa se encuentra. Para ello, se puede recurrir a la información aportada por los dos tipos posibles de sensores: *internos* y *externos*. Los principales procedimientos para la autolocalización son:

- **Balizas:** son marcas de fácil localización instaladas en lugares conocidos, que el robot es capaz de detectar con sus sensores, y respecto a las cuáles se sitúa. Pueden ser marcas visuales (tubos de neón, o bandas de colores), o emisores de infrarrojos, cada uno emitiendo una señal modulada con un código conocido. Estas señales pueden ser recogidas por una óptica apropiada y proyectadas sobre una cámara CCD o un array de fotodiodos, que sirve para determinar la dirección de la que proceden. Conociendo al menos dos de éstas direcciones (aunque pueden ser más) y las posiciones absolutas de las balizas es posible determinar por triangulación la posición del robot. (ver figura 1.11).
- **Odometría:** a partir del conocimiento de la velocidad de las ruedas resulta posible conocer la velocidad instantánea del robot respecto a un sistema externo. Para ello se pueden instalar sensores de posición angular (normalmente, codificadores ópticos) en cada rueda. Conocido el vector velocidad, la posición en un instante puede obtenerse mediante integración.

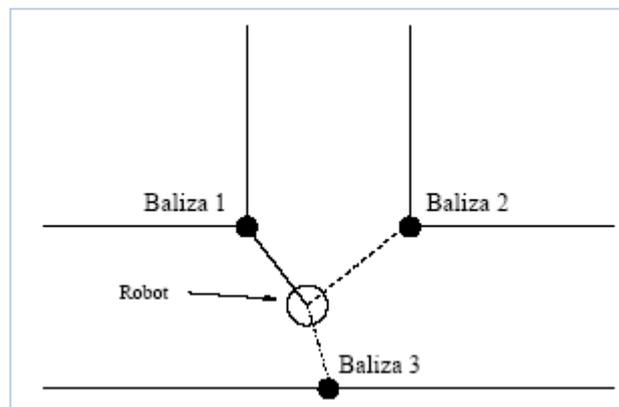


Figura 1.11: Método de autocalización por baliza

1.7.2 Odometría.

La odometría es el estudio de la estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación. Para realizar esta estimación se usa información sobre la rotación de las ruedas para estimar cambios en la posición a lo largo del tiempo.

Los robots móviles usan la odometría para estimar (y no determinar) su posición relativa a su localización inicial. Es bien sabido que la odometría proporciona una

buena precisión a corto plazo, es barata de implantar, y permite tasas de muestreo muy altas. Sin embargo la idea fundamental de la odometría es la integración de información incremental del movimiento a lo largo del tiempo, lo cual con lleva una inevitable acumulación de errores.

En concreto, la acumulación de errores de orientación, causa grandes errores en la estimación de la posición, los cuales van aumentando proporcionalmente con la distancia recorrida por el robot. A pesar de estas limitaciones, muchos investigadores están de acuerdo en que la odometría es una parte importante del sistema de navegación de un robot, y que debe usarse con medidas del posicionamiento absolutas para proporcionar una estimación de la posición más fiable.

La odometría se basa en ecuaciones simples que se pueden implementar fácilmente y que utilizan datos de encoders situados en las ruedas del robot. Sin embargo, la odometría también está basada en la suposición de que las revoluciones de las ruedas pueden ser traducidas en un desplazamiento lineal relativo al suelo.

Esta suposición no tiene una validez absoluta. Un ejemplo extremo es cuando las ruedas patinan: si por ejemplo, una rueda patina sobre una mancha de aceite y la otra no, entonces el encoder asociado registrará revoluciones en la rueda, a pesar de que éstas no correspondan a un desplazamiento lineal de la rueda. Además de este ejemplo hay muchas otras razones más sutiles por las cuales se pueden producir imprecisiones en la traducción de las lecturas del encoder de la rueda a un desplazamiento lineal. Todos estos errores se pueden agrupar en dos categorías: errores sistemáticos, y errores no sistemáticos.

Tipos de errores

Entre los errores sistemáticos destacan:

- Los diámetros de las ruedas no son iguales.
- La media de los diámetros de las ruedas difieren del diámetro de fábrica de las ruedas.
- Mal alineamiento de las ruedas.
- Resolución discreta (no continua) del encoder.
- La tasa de muestreo del encoder es discreta.

Entre los errores no sistemáticos se encuentran:

- Desplazamiento en suelos desnivelados.
- Desplazamiento sobre objetos inesperados que se encuentren en el suelo.
- Patinaje de las ruedas debido a:
 - Suelos resbaladizos.
 - Sobre-aceleración.
 - Derrapes (debidos a una rotación excesivamente rápida).
 - Fuerzas externas (interacción con cuerpos externos).
 - No hay ningún punto de contacto con el suelo.

Una clara distinción entre errores sistemáticos y no sistemáticos es de gran importancia a la hora de reducir los errores en la odometría. Por ejemplo, los errores sistemáticos son específicamente graves, porque se acumulan constantemente. En muchas superficies no rugosas de entornos interiores, los errores sistemáticos contribuyen muchos más a los errores en la odometría que los errores no sistemáticos. Sin embargo, en superficies que agarran bien con irregularidades significativas, son los errores no sistemáticos los que predominan.

El problema de los errores no sistemáticos es que pueden aparecer inesperadamente (por ejemplo cuando el robot pasa por encima de un objeto que se encuentra en el suelo), y pueden causar errores muy grandes en la estimación de la posición. Cabe destacar que muchos investigadores han desarrollado algoritmos para estimar la incertidumbre en la posición de un robot que utiliza odometría. Según estos enfoques, cada posición calculada por el robot está rodeada por una *elipse de error* característica, la cual indica la región de incertidumbre para la posición actual del robot.

Estas elipses crecen a medida que la distancia recorrida aumenta, a no ser que un sistema de estimación de la posición absoluto reduzca el crecimiento de la incertidumbre y por lo tanto ponga a cero el tamaño de la *elipse de error*. Estas técnicas de estimación del error se basan en estimación de parámetros derivados de los errores sistemáticos, puesto que la magnitud de los errores no sistemáticos es siempre impredecible.

1.8 Plataforma Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (bootloader) que corre en la placa (figura 1.12).

Desde octubre de 2012, Arduino se usa también con microcontroladores CortexM3 de ARM de 32 bits, que coexistirán con las más limitadas, pero también económicas AVR de 8 bits. ARM y AVR no son plataformas compatibles a nivel binario, pero se pueden programar con el mismo IDE de Arduino y hacerse programas que compilen sin cambios en las dos plataformas. Eso sí, los microcontroladores CortexM3 usan 3.3V, a diferencia de la mayoría de las placas con AVR que usan mayoritariamente 5V. Sin embargo ya anteriormente se lanzaron placas Arduino con Atmel AVR a 3.3V como la Arduino Fio y existen clónicos de Arduino Nano y Pro como Meduino en que se puede conmutar el voltaje.

Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

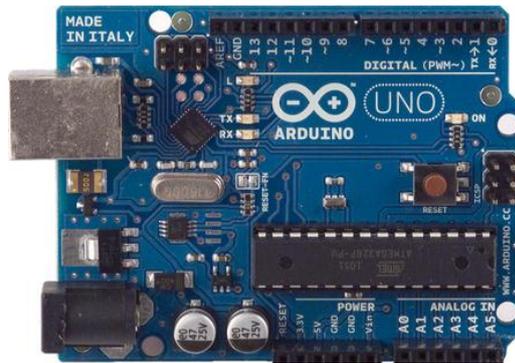


Figura 1.12: Placa Arduino UNO

1.8.1. Historia de su evolución.

El primer prototipo fue desarrollado en el instituto IVRAE, pero aún no se llamaba Arduino. Nació como un proyecto educativo por el año 2005 sin pensar que algunos años más tarde se convertiría en líder del mundo DIY (Do It Yourself). Su nombre viene del nombre del Bar di Re Arduino donde Massimo Banzi pasaba algunas horas, el cual a su vez viene del nombre de un antiguo rey europeo por el año 1002. Banzi dice que nunca surgió como una idea de negocio, es más nació por una necesidad de subsistir ante el eminente cierre del Instituto de diseño Interactivo IVREA en Italia.

Es decir, al crear unos productos open hardware (de uso público) no podría ser embargado. Es más hoy en día Arduino tiene la difícil tarea de subsistir comercialmente y continuar en continuo crecimiento. Hasta la fecha se han vendido más de 250 mil placas en todo el mundo sin contar las versiones clones y compatibles.

Hoy en día con Arduino se pueden fabricar infinidad de prototipos y cada vez su uso se viene expandiendo más. Desde cubos de led, sistemas de automatización en casa (domótica), integración con Internet, displays Twitter, kit analizadores de ADN. Google ha apostado por el proyecto y ha colaborado en el Android ADK (AccessoryDevelopment Kit), una placa Arduino capaz de comunicarse directamente con smartphones Android para obtener las funcionalidades del teléfono (GPS, acelerómetros, GSM, bases de datos) y viceversa para que el teléfono controle luces, motores y sensores conectados de Arduino.

Para la producción en serie de la primera versión se tomaron en cuenta algunas consideraciones: Economía (no mayor a 30 Euros), debía ser Plug and Play, utilizaron el color azul para marcar una diferencia con las placas convencionales y trabajar en todas las plataformas (Mac, Windows y Linux).

Uno de los primeros proyectos fue un reloj alarma, el cual no se apagaría hasta que no te pararas de la cama. Tom Igoe, profesor y padre de la computación física se unió al proyecto luego que se enterara del mismo a través de la web. Él ofreció su apoyo para desarrollar el proyecto a grandes escalas. Varias universidades como Stanford y Carnegie Mellon y el MIT usan Arduino en sus campus. En la feria MakerFair del 2011 se presentó la primera placa Arduino 32 bit para trabajar tareas más pesadas. Entre ellas se presentó la impresora en 3D de MakerBot capaz de imprimir en resina cualquier modelo en 3D.

Conclusiones Parciales

- Se explicaron los elementos fundamentales a tener en cuenta en el campo de la robótica, las diferentes clasificaciones de los robots y dentro de éstos, las generalidades de los móviles de ruedas.
- Se hizo una descripción de los principales tipos de motores empleados como actuadores en la robótica móvil profundizando en el funcionamiento y características de los motores paso a paso.
- Se expusieron los aspectos esenciales de los métodos de navegación existentes en robótica, los tipos de mapas y la técnica de odometría.

Capítulo 2. Descripción del diseño y montaje del robot para navegación odométrica.

Introducción

En este capítulo se realizará una descripción de todos los pasos a seguir para el diseño y construcción del robot así como las características técnicas de los componentes del sistema así como la interconexión entre ellos. Se brindará información sobre su estructura mecánica y eléctrica y se describirá el proceso de generación de trayectoria para la navegación del robot hacia el punto fijado por el usuario.

2.1 Diseño y construcción del robot

La primera etapa para la construcción del robot es el diseño de la estructura. El sistema está compuesto una unidad central de procesamiento, una batería para garantizar la autonomía, un elemento encargado de la transmisión y recepción de la información desde la PC y un elemento actuador encargado de la tracción compuesto por un motor paso a paso y un driver para su manejo (ver figura 2.1). Todos estos equipos van montados encima de un chasis de acrílico en compañía de otros elementos auxiliares.

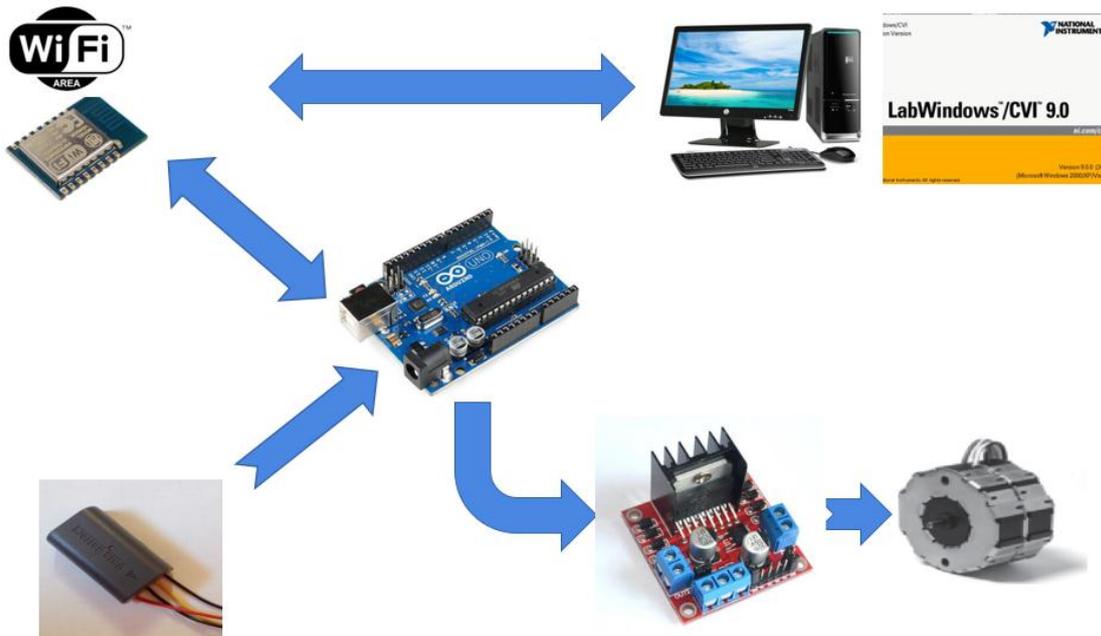


Figura 2.1: Estructura general del sistema

2.1.1 Componentes del sistema

2.1.1.1 Tarjeta Electrónica Arduino UNO rev 3

El robot cuenta con una tarjeta electrónica Arduino UNO que controla y administra todo el sistema (figura 2.2). Es una placa electrónica basada en el microprocesador ATmega328 y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Cuenta con 14 entradas / salidas digitales pines (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP, y un botón de reinicio. El Uno difiere de todas las placas anteriores en que no utilizan el chip controlador USB FTDI serie.

Este controlador recibe la señal del módulo de comunicación inalámbrica y mediante una serie de algoritmos programados generará una señal de control que actuará sobre los motores para generar el movimiento deseado.

Especificaciones:

Microcontrolador: ATmega328

Voltaje de operación: 5V

Voltaje de alimentación recomendado: 7-12V

Máximo Voltaje de alimentación (no recomendado): 20V

Pines digitales de I/O: 14 (de los cuales 6 proveen salida PWM)

Pines de entrada analógica: 6

Corriente DC por pin I/O: 40 mA

Corriente de directa por el pin 3.3V: 50 mA

Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de 0.5 KB usado por el bootloader

SRAM: 2 KB (ATmega328)

EEPROM: 1 KB (ATmega328)

Velocidad de reloj: 16 MHz



Figura 2.2: Arduino UNO

2.1.1.2 Arduino Motor Shield (L298N)

Este shield permite manejar 1 canales para motores de paso a paso. Usa el chip L298N el cual entrega una corriente a las salida de 2 A por cada canal. El control de velocidad ese lleva a cabo a través del PWM convencional que puede ser obtenido de los pines 3, 4, 5, 6, 7, 8 para cada motor respectivamente del Arduino como se muestra en las tablas 2.1 y 2.2. Este shield puede ser alimentado directamente desde el Arduino o desde una fuente externa. Es altamente recomendable usar una fuente de alimentación externa (figura 2.3). En nuestro alimentamos con una fuente de 7 V 500 mA, para que los motores tengan un consumo independiente.

Especificaciones

- Voltaje de la lógica de Control: 5V (del Arduino)
- Voltaje de manejo de motor: 4.8~35V (de Arduino o Fuente Externa)
- Corriente de alimentación de la lógica I_{ss} : $\leq 36\text{mA}$
- Corriente de alimentación del motor I_o : $\leq 2\text{A}$
- Máximo consumo de potencia: 25W ($T=75^\circ\text{C}$)
- Control de velocidad mediante PWM o PLL

- Nivel de la señal de Control:
 - Alto: $2.3\text{ V} \leq V_{in} \leq 5\text{ V}$
 - Bajo: $-0.3\text{ V} \leq V_{in} \leq 1.5\text{ V}$

El shield soporta los modos de control PWM y PLL (Phased Locked Loop). El PWM usa E1 y E2 para generar la señal PWM.

- PWRIN: Fuente externa
- VIN: Alimentación del Arduino

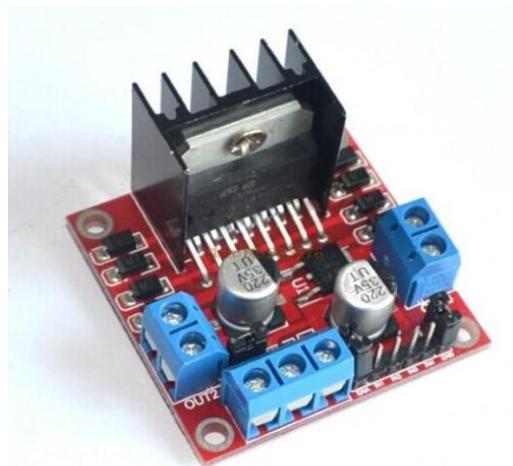


Figura 2.3: Shield de control de motores DC y paso a paso

Tabla 2.1 Tabla de la verdad de la señal de control

E1	M1		E2	M2	
L	X	Motor 1 Deshabilitado	L	X	Motor 2 Deshabilitado
H	H	Motor 1 Reversa	H	H	Motor 2 Reversa
PWM	X	PWM Control de Velocidad	PWM	X	PWM Control de Velocidad

Tabla 2.2 Modo PWM

Pin	Función
Digital 4	Motor 1 Control de dirección
Digital 5	Motor 1 Control de PWM
Digital 6	Motor 2 Control de PWM
Digital 7	Motor 2 Control de dirección

El modo de control PWM (figura 2.4) es usado para simular diferentes valores de voltaje acotados por el ajuste del voltaje aplicado a lo largo del nivel del motor para garantizar la velocidad.

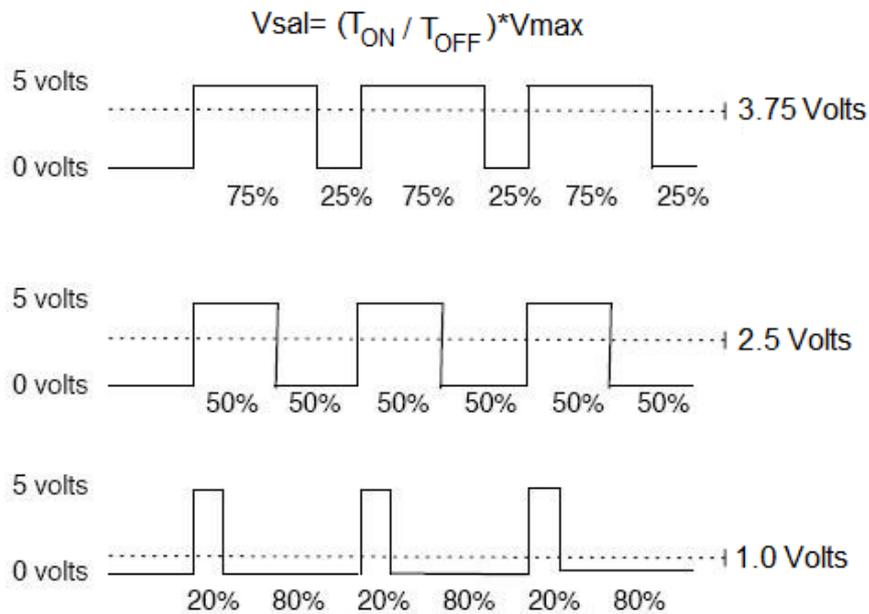


Figura 2.4: Método de control de velocidad mediante PWM

El núcleo de todo el sistema del driver es el integrado **L298N** (figura 2.5). El mismo contiene 4 drivers pushpull que pueden ser usados independientes o más comúnmente, como 2 puentes completos. Cada drivers es controlado por una lógica TTL en la entrada y cada par de drivers está equipado con una entrada de habilitación con la cual controla cada puente completo

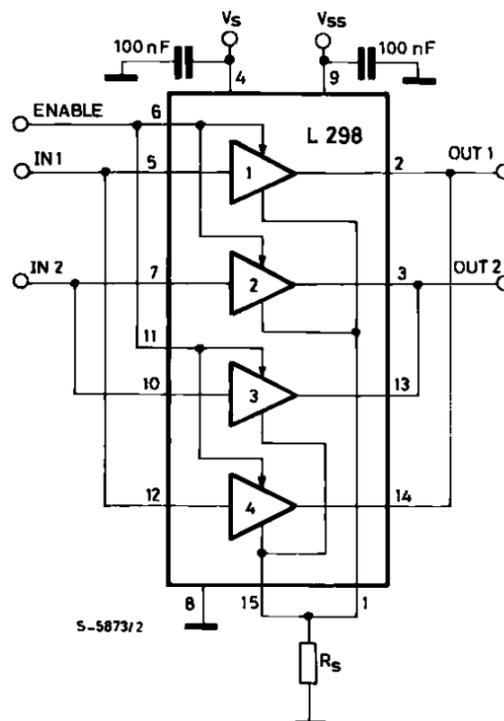


Figura 2.5 Diagrama de conexiones de L298N

2.1.1.3 Motor Paso a Paso UFD

Para la locomoción del robot se usa un motor paso a paso bipolar de la marca alemana Sanyo (figura 2.6).

Datos Técnicos

Dimensiones $\varnothing 54 \times 28$

Angulo de paso 7.5°

Operación a temperatura: $-15 \dots +55 \text{ }^\circ\text{C}$

Resistencia Térmica: 13 K/W

Protección: IP 40 de acuerdo a DIN EN 60529

Peso: 180 g

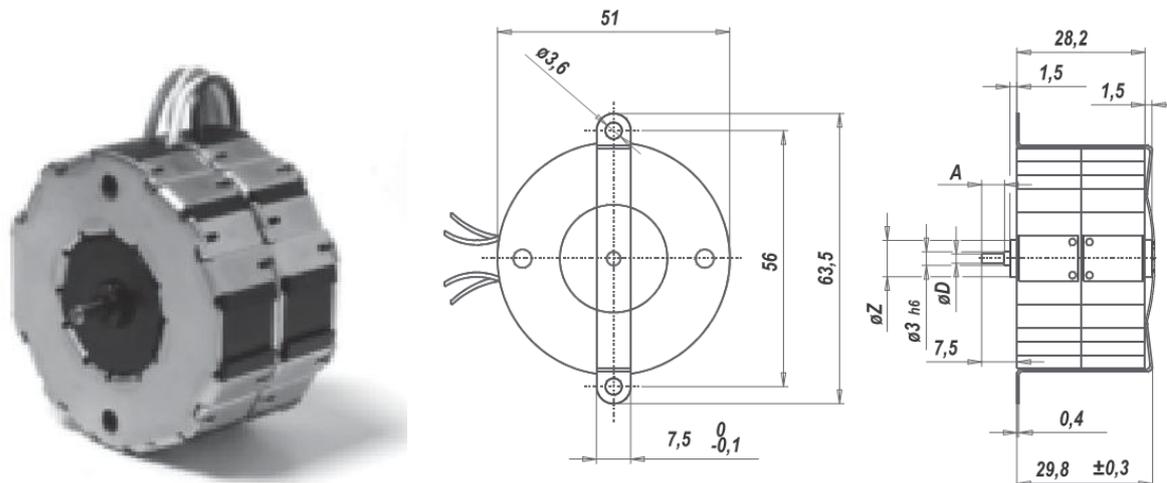


Figura 2.6: Motor paso a paso UFD a) Motor físico b) Dimensiones

Tabla 2.3 Otros datos técnicos de motor paso a paso

Rated voltage U_N	V	6	12	24
Resistance per winding R_{20}	Ω	9.5	52	250
Holding torque M_H	cNm	6.4		
Detent torque M_S	cNm	0.45		
Rotor inertia J_R	gcm^2	14.4		

2.1.1.4 Módulo de comunicación Wi-Fi ESP8266. (figura 2.7)

El punto destino es introducido por el usuario de manera inalámbrica desde la PC. Esto se hace empleando el módulo ESP8266 que de manera sencilla permite la comunicación entre la placa Arduino y la PC mediante protocolo Wi-Fi (ver figura 2.7).

Características:

- Procesador interno de 32 bits a 80 MHz y se le puede subir hasta 160Mhz.
- 80K de memoria DRAM.
- 1 Mb de memoria Flash para nuestros programas.
- Stack TCPIP WIFI a 2.4 Ghz.
- 30 Metros de alcance teórico.
- 16 pines GPIO programables disponibles.
- Full TCPIP stack incluido
- Gestión completa del WIFI con amplificador incluido.
- Regulador y unidad de alimentación incluidos.
- Consumo en reposo <10 mW.
- Soporta antena externa para mayor alcance.
- Soporta el bus SPI.
- 1 entrada analógica



Figura 2.7 Módulo Wi-Fi ESP8266

2.1.1.5 Batería para alimentación

Para garantizar una completa autonomía del sistema, la energía es suministrada por una batería recargable LI-ION. Esta batería pertenece a la marca JVC con modelo BN-808U. Su autonomía es de 730 mAh y brinda un voltaje de 7.2V.

2.1.2 Estructura mecánica

El robot móvil posee las siguientes características, las cuales se ven reflejadas en las vistas de las figuras 2.8 y 2.9. Una estructura resistente, poco peso, fácil de maniobrar, y fácil acceso a conectores, botones, sensores, motores, etc. Está compuesta por una chasis doble de acrílico reforzado de 13.8cmX11cm que constituye la base principal donde se le adhieren los dos motores y la rueda omnidireccional, este último fijados con flejes de aluminio para ganar en cuanto a peso. Para el acople de las ruedas traseras de radio de 3.2cm y perímetro de 21cm de material plástico revestido con goma para obtener una buena tracción se construyó una pieza basada en dos prisioneros para evitar movimientos indeseados entre la rueda y el eje del motor así como barra que sostiene a los dos motores de sus cajas reductoras para evitar que el peso del robot móvil haga abrirse los mismos temiendo como distancia desde el centro de las ruedas de 18.8cm y como medio del eje central a 8.4cm del extremo de ambas ruedas y a 8.3cm del punto central al eje de la rueda omnidireccional. Teniendo en cuenta el tamaño del chasis y la variedad de componentes indispensable para el buen funcionamiento del robot se construye una plataforma de dos niveles. El primer nivel fue construido con un acrílico simple de 7.2cmX9.9cm con una altura de 4cm respecto al segundo nivel donde fue ubicada la placa Arduino UNO y el Shield Ethernet y en el segundo nivel de 5.5cmX10cm fueron ubicados los Driver L298N para el control de los motores de paso. Otra característica importante que ofrece el robot es su tamaño, que es adecuado para programar la plataforma desde un PC y desplazarse en una superficie tan reducida como un escritorio, tanto en operación autónoma como “teleoperada” (remota supervisada). Además, posee una arquitectura abierta y

expansible, de tal manera que a futuro permite adaptar módulos adicionales de sensores, actuadores y otros dispositivos.

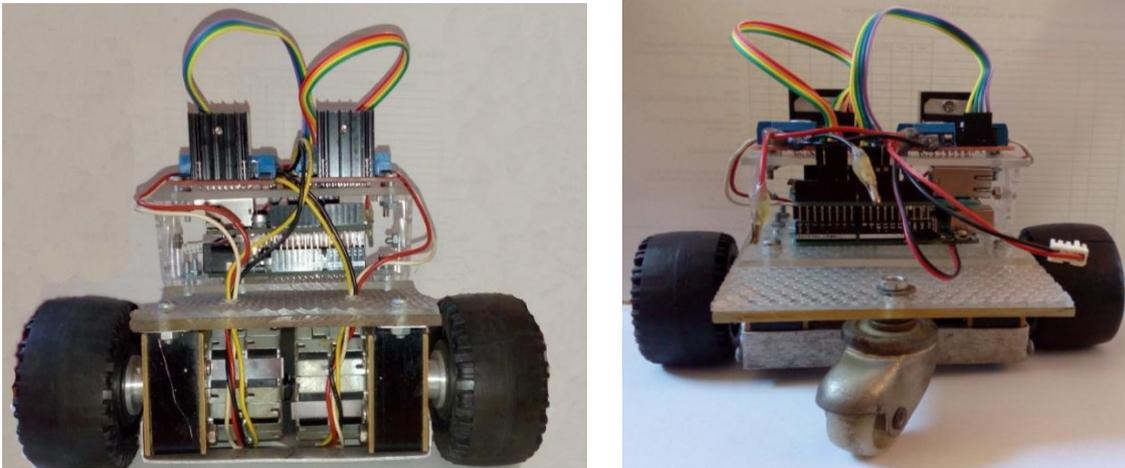


Figura 2.8: Robot finalizado a) Vista Posterior b) Vista Frontal.

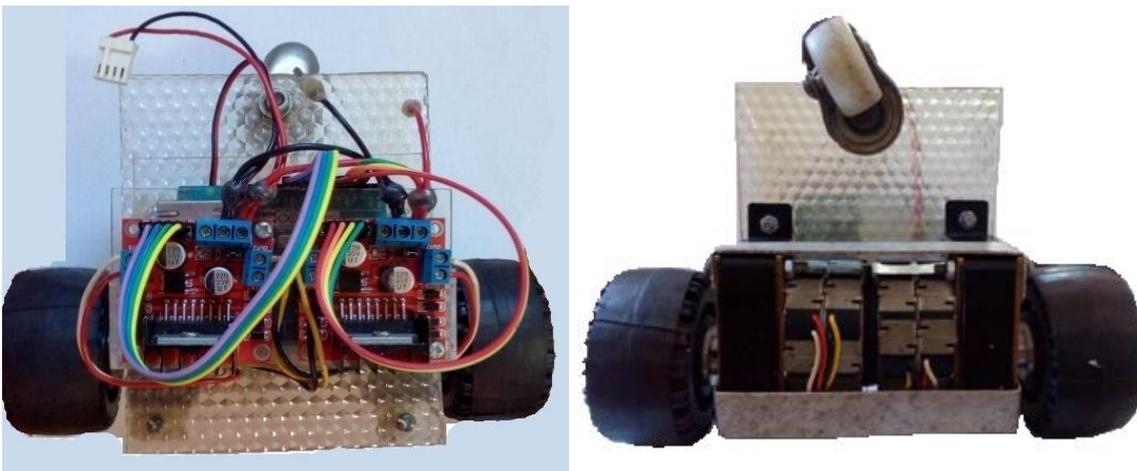


Figura 2.9: Robot finalizado a) Vista Superior b) Vista Inferior.

2.2 Comunicación con la PC

Como se mencionó anteriormente los puntos al cual se va a dirigir el robot serán enviados vía WiFi. Para ello el robot está dotado de un módulo WiFi ESP8266 que permanecerá esperando la presencia de un cliente para comenzar una comunicación TCP/IP. Una vez que se detecta la presencia de un cliente comienza la transmisión de información identificando los valores IP de cada uno respectivamente. Ahora bien para lograr enviar un punto al robot se desarrolló una interfaz gráfica en LabVIEW donde se le entran los valores en configuración (x; y).

2.3 Generación de Trayectoria Geométrica

En este trabajo, interesa la posición del robot en el plano, es decir, estimar el vector (x, y, θ) . Aquí hay dos palabras: estimación y relativa.

Se habla de estimación de posición ya que saber a ciencia cierta la posición de un robot móvil es sencillamente imposible ya que los métodos usados para calcular esa posición no tienen una precisión absoluta. La única forma de obtener información de un robot móvil y su entorno es a través de los sensores. Sobre la información dada por esos sensores se usan modelos matemáticos y cálculos más o menos complejos, pero nada puede remediar el hecho de que se está trabajando sobre medidas hechas a partir de ciertos sensores. Esas medidas nunca se librarán de errores.

Aunque todas las posiciones sean relativas a un marco de referencia y no exista uno privilegiado en el universo (principio de la relatividad), en robótica sí que se privilegia a un marco concreto: a las llamadas coordenadas del mundo. Las posiciones que se dan respecto a las coordenadas del mundo, son a veces llamadas posiciones absolutas. Las posiciones estimadas a partir de la odometría no tienen nada que ver con las coordenadas del mundo, ya que son relativas al punto de inicio.

Se define como punto de inicio aquel punto en el que se comienza a calcular la posición mediante odometría $(0, 0)$. Es aquel punto en el que se enciende el robot y empieza a correr el programa que estima la posición. Hay que tener en cuenta que este punto de inicio puede estar en cualquier punto del entorno y no siempre debe coincidir con un punto conocido.

Una vez que el robot alcanza el punto final, entonces éste pasa a ser su nuevo punto de posición inicial $(0, 0)$ independientemente del ángulo en el cual haya quedado respecto al entorno.

El punto destino se le introduce como comando por el usuario desde la PC en la forma de vector de posición $[x, y]$ donde las unidades de medida están dadas en centímetros (cm). El punto destino será la intersección en el plano de estos dos valores. Aquí es muy importante tener en cuenta en cuál de los cuatro cuadrantes del eje cartesiano se encuentra el punto destino. Vale destacar que existen los casos

prohibitivos que consisten en todos los puntos que se encuentren dentro de la circunferencia que el robot traza para orientarse.

Una vez calculado el ángulo que hay que girar, se debe determinar la cantidad de pasos necesarios para que el motor se oriente hacia ese ángulo. La distancia entre las dos ruedas es de 18.8 cm, éste es también el radio de la circunferencia que se forma girando el robot 360° alrededor de una de sus ruedas como punto central.

El perímetro de esta circunferencia sería:

$$P = 2 * \pi * r \quad (2.1)$$

$$P = 2 * 3.14 * 18.8 \text{ cm}$$

$$P = 118.06 \text{ cm}$$

Es decir, para girar 360° se debe recorrer una distancia de 118.06 cm en una de las ruedas.

Se puede establecer la siguiente relación:

$$s = \frac{\mu * P}{360^\circ} \quad (2.2)$$

Donde:

s: distancia a recorrer por una de las ruedas [cm]

P: perímetro de la circunferencia de giro [cm]

μ : ángulo de giro

El perímetro de la rueda $P = 21 \text{ cm}$. Se conoce por resultados experimentales que 1296 pasos del motor es una revolución completa de la rueda por lo cual, para esa cantidad de pasos, el robot se desplaza 21 cm. De aquí se establece una relación básica basada también en la regla de tres para determinar la cantidad de vueltas necesarias para recorrer una distancia determinada.

$$N_p = \frac{s * 1296}{P} \quad (2.3)$$

Donde:

N_p : número de d pasos

s: distancia del punto destino en línea recta [cm]

P: perímetro de la rueda [cm]

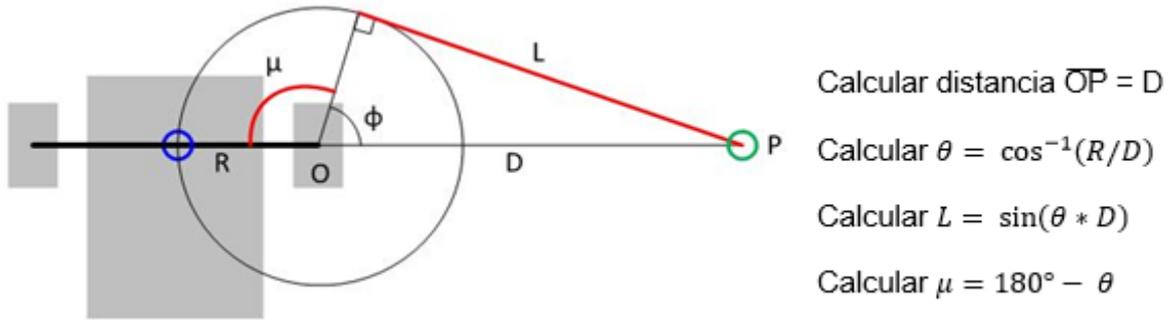


Figura 2.11: Caso III. Girar eje X positivo

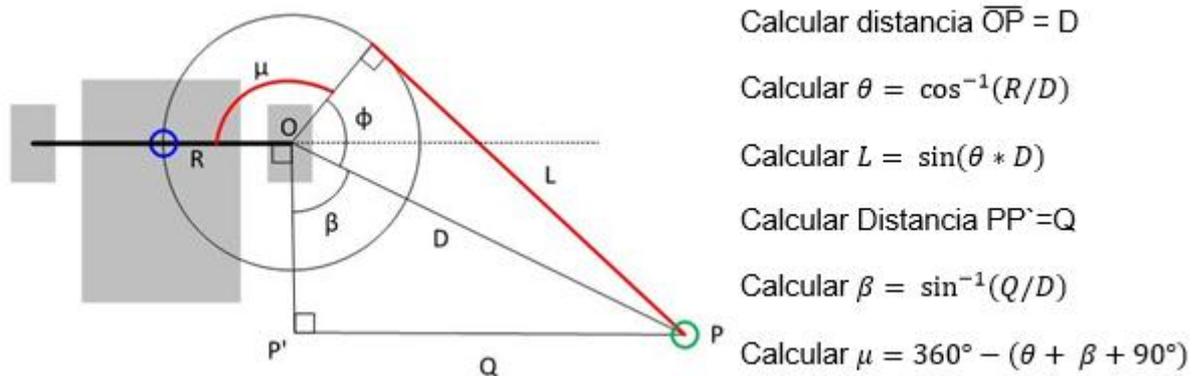


Figura 2.12: Caso 4 Girar cuadrante IV

Vale decir que si el punto fijado se encuentra en los cuadrantes I y II o el eje Y negativo, el robot gira hacia la derecha y si se encuentra en los cuadrantes II o III gira hacia la izquierda. Por lo tanto los restantes casos (Anexos 2-9) presentan equivalencias en el cálculo de μ como se enumera a continuación:

Caso V: Girar eje Y negativo = Caso III: Girar eje X positivo

Caso VI: Girar cuadrante III = Caso IV: Girar cuadrante IV

Caso VII: Girar eje X negativo = Caso III: Girar eje X positivo

Caso VIII: Girar cuadrante II = Caso II: Girar cuadrante I

2.3 Determinación de errores

Para la determinación de los errores de posición que se cometen cada vez que la rueda da n vueltas completas hasta llegar al punto destino, se hicieron 30 mediciones para trayectoria en línea recta y 30 para giros angulares en aras de

aumentar la fiabilidad estadística de las mediciones. Los resultados se muestran en las tablas 2.4 y 2.5 respectivamente.

Tabla 2.4 Resultados para mediciones en línea recta

Vueltas	Val medio	Refer	Δ	DE*
1	21,13	20,7	0,426	0,034
2	41,50	41,4	0,095	0,020
3	62,57	62,1	0,473	0,040
4	83,66	82,8	0,865	0,051
5	104,56	103,5	1,063	0,217

Tabla 2.5 Resultados para mediciones de ángulos

μ	Val medio	Refer	Δ	DE*
90	90,70	90	0.7	0,4472
180	182,55	180	2.55	0,5144

DE* Desviación estándar.

Como se puede apreciar, en ambos casos, el error va aumentando a medida que aumenta la distancia o el ángulo pero no existe una relación lineal entre éstas variables. Debido a esto las correcciones se hicieron de manera aproximada. Se considera que por cada vuelta se comete un error de aproximadamente 0.43 cm en defecto, es decir que en la mayoría de los casos se queda esta cantidad por debajo del punto final.

Aplicando la fórmula 2.3 se obtiene:

$$N_p = \frac{0.43 * 1296}{21}$$

$$N_p = 26.5$$

$$N_p \sim 26$$

Esta cantidad de pasos se le adiciona a la que inicialmente se tenía para completar una revolución para de esta manera corregir el error.

$$N_{pf} = 1296 + 26$$

$$N_{pf} = 1322$$

Por lo que el número de pasos final (N_{pf}) con el cual se considera que la rueda da una revolución completa es 1322. Teniendo esto en cuenta se modificó la programación del robot para de esta manera tratar de minimizar el error.

2.4 Resultados experimentales con los errores corregidos

Una vez aplicadas las correcciones se realizaron otra serie de pruebas en las cuales se le fijan al robot diferentes posiciones del punto destino en los cuadrantes antes mencionados y se comparan esta nuevas posiciones finales que alcanza el robot con las logradas antes de realizar las correcciones (figuras 2.13-2.15).

Las gráficas dan una idea general de cómo queda finalmente el grado de dispersión de los errores una vez aplicadas las correcciones. En todos los casos se considera que es bastante aceptable ya que la diferencia entre el punto final alcanzado y el punto destino fijado por el usuario nunca sobrepasa 1 cm.

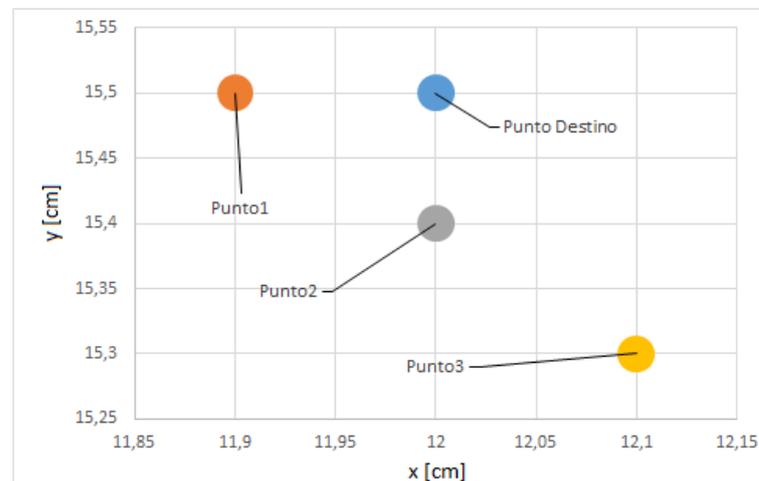


Figura 2.13: Resultados pruebas cuadrante I

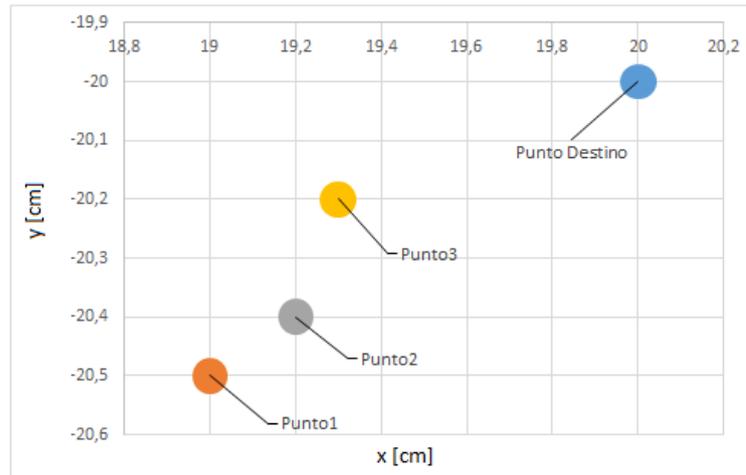


Figura 2.14: Resultados pruebas cuadrante IV

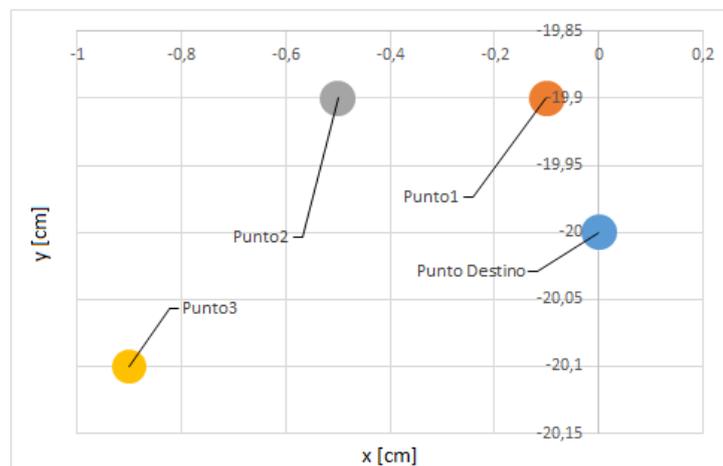


Figura 2.15 Resultados pruebas eje y negativo

Conclusiones parciales

Se ha logrado la selección adecuada de los componentes necesarios para la construcción y de un robot móvil que garanticen el posicionamiento del mismo empleando la técnica de odometría. El robot ensamblado cumple con los requisitos indispensables de peso, movilidad, autonomía, tracción y comunicación con el exterior. Se demostró que ante la ausencia de sensores que indiquen la posición del robot dentro de un marco de referencia, el método de la odometría resulta efectivo para la traza de trayectorias y el guiado del robot hacia un punto destino. También se hizo énfasis en calcular

las diferencias de distancia entre el punto de referencia y el punto final real alcanzado mediante la realización de numerosas pruebas experimentales.

Conclusiones Generales

Al término de la presente investigación se arriba a las siguientes conclusiones:

- El robot móvil diseñado e implementado para navegación odométrica servirá de apoyo a la docencia en la disciplina de control, principalmente en la asignatura de robótica.
- El método de generación de trayectoria geométrica resulta adecuado para la navegación odométrica, sobre todo, considerando que no se tiene información del entorno.
- El cálculo de la desviación media cuadrática en los desplazamientos lineal y angular permitió conocer el intervalo de confianza en que se mueve el error casual.
- La conversión de la distancia lineal y angular al número de pulsos necesarios para su orientación y desplazamiento se realizó tanto por la vía teórica como experimental permitiendo un ajuste más fino.
- La comunicación inalámbrica a través de la red WiFi permite al robot móvil desplazarse libremente sin necesidad de ningún cableado con el PC.
- La navegación odométrica constituye una técnica simple y de poco costo computacional, sin embargo por sí sola no es capaz de corregir los posibles errores, de manera que debe emplearse en conjunto con otras técnicas de navegación.

Recomendaciones

Con vista a futuros trabajos sobre el tema se recomienda:

- Perfeccionar las prestaciones de la interfaz gráfica creada en LabView que permita la interacción con el robot de manera inalámbrica para obtener información en “tiempo real” de la posición del robot durante la navegación.
- Dotar al robot con un sensor ultrasónico que permita detectar y evitar obstáculos en su trayectoria al punto de destino.
- Combinar la odometría con otro método de navegación que permita corregir los errores.
- Agregar un módulo webcam para la captura en “tiempo real” de imágenes del recorrido y su transmisión a un dispositivo supervisor

Bibliografía

Arkin, R. C. (1989) "Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation." *The International Journal of Robotics Research*, August, pp. 92-112.

Badal, S., Ravela, S., Draper, B., and Hanson, A. (1994). A practical obstacle detection and avoidance system. In *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*.

Borenstein, J. and Koren, Y. (1998). "Obstacle Avoidance With Ultrasonic Sensors." *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. RA-4, No. 2, pp. 213-218.

Borenstein, J. and Koren, Y. (1989). "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 5, Sept./Oct. pp. 1179-1187.

Busch I, J. (1998). *Electromechanical Sensors and Actuators*. Mechanical Engineering Series, Springer, Diciembre.

Coulter, R. (1992). *Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January.

Dudek, G and Jenkin, M. (2000). "Computational Principles of Mobile Robotics", Cambridge University Press, New York.

Erickson, R, W., Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. 2ª ed., Springer, Enero.

Everett, H, R. (1995). *Sensors for Mobile Robots: Theory and Application*, AK Peters, Ltd., June.

Fraden, J. (2003). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer; 3ª ed. Diciembre.

Goris, K. (2005). *Autonomus Mobile robot mechanical desifn*. Theseelektrotechnisch ingenieur, Vrije Universiteit, Brussel.

González, V.R. (2002): *Fundamentos de Robótica*. En: http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/index.htm. Consultado en: abril 2011.

Housten, D. (2003). *Learning Roomba: Student's Guide Module 2 Robot Configurations*.

Jnaneshwar D, Mrinal K and Sharad N, (2012). "Obstacle Avoidance for a Mobile Exploration Robot with Onboard Embedded Ultrasonic Range Sensor", PES Institute of Technology, Bangalore.

Khatib, O. (1985). "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots." 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, March 25-28, St. Louis, pp. 500-505.

Kinsky, P., Zhou, Q. (2013). "Obstacle Avoidance Robot." Major Qualifying Project Report, Worcester Polytechnic Institute, Project Number: YR-11E1.

Lamiroux, F and Bonnafous, D. (2002). "Reactive trajectory deformation for non-holonomic systems: Application to mobile robots," in IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington D.C, May, pp. 3099–3104.

Meijer, G (2008). Smart Sensor Systems, Wiley-Interscience.

Philippsen, R. (2004). "Motion Planning and Obstacle Avoidance for Mobile Robots in Highly Cluttered Dynamic Environments", Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

Pons, J, L. (2005). Emerging Actuator Technologies: A Micromechatronic Approach. John Wiley & Sons, Mayo.

Seyfarth, A., Geyer, H., Guenther, M and Blickhan, R. (2002). A movement criterion for running, Journal of Biomechanics 35(5), pp 649-655.

Siegwart, R and Nourbakhsh, I. (2004). Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press.

Silva, R; García, J.R; Barrientos, V.R; Molina, M.A; Hernández, V.M; Silva, G. (2007). Una panorámica de los robots móviles (state-of-the-art of the movable wheels robots).

Torres, M. (2008). Sensores y Actuadores para Robótica – Apuntes del Curso, Santiago, Chile.

Torres, M.O. (2010). Planificación y Generación de trayectorias para robot móvil recolector de objetos. Tesis de Maestría en Informática Industrial y Automatización. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

Tzou, H, S., Fukuda, T. (1993). Precision Sensors, Actuators and Systems (Solid Mechanics and Its Applications). Kluwer Academic Publishers, Enero.

Anexos

Anexo 1A: Código del programa: Función para determinar el cuadrante

```
if (x==0&& y>0)
  caso1 ();
else if (x>0&& y>0)
  caso2 ();
else if (x>0&& y==0)
  caso3 ();
else if (x>0&& y<0)
  caso4 ();
else if (x==0&& y<0)
  caso5 ();
else if (x<0&& y<0)
  {x=x*-1;
  y=y*-1;
  caso4 ();
  bandera =1 ;}
else if (x<0&& y==0)
  {x=x*-1;
  caso3 ();
  bandera=1 ;}
else if (x<0&& y>0)
  {x=x*-1;
  y=y*-1;
  caso2 ();
  bandera=1;}
```

Anexo 1B: Código del programa: Función para mover los motores

```
if (bandera==0)
{
  for (int i=0; i < A*18; i++)
    stepper.step (-1);
}
else
{
  for (int i=0; i < A*18; i++)
    stepper2.step (1);
}
delay(100);
for (int i=0; i < L*62 ; i++)
{
  stepper.step(-1);
  stepper2.step(1);
}
bandera=0;
}
```

Anexo 1C: Código del programa: Función para calcular ángulo y desplazamiento

```

// CASO 1 //
void caso1 ()
{ L=y;
  A=0;}
// CASO 2 //
void caso2 ()
{
  D=sqrt((x - 8.2)*(x - 8.2)+ y*y);
  L=sqrt(D*D - 8.2*8.2);
  phi=acos(8.2/D); // radianes
  beta=asin(y/D); // radianes
  A=180 - 57.32*(phi+beta);
}
// CASO 3 //
void caso3 ()
{
  D=x - 8.2;
  L=sqrt(D*D - 8.2*8.2);
  phi=acos(8.2/D);
  A=180 - (phi*57.32);
}
// CASO 4 //
void caso4 ()
{
  D=sqrt(y*y + (x-8.2)*(x-8.2));
  L=sqrt(D*D - 8.2*8.2);
  phi=acos(8.2/D);
  beta=asin((x - 8.2)/D);
  A=360 - ((phi+beta)*57.32 + 90);
}
// CASO 5 //
void caso5 ()
{
  D=sqrt(8.2*8.2 + y*y);
  L=sqrt(D*D - 8.2*8.2);
  phi=acos(8.2/D);
  A=360 - 2*phi*57.32 ;
}

```

Anexo 2: Mediciones en línea recta antes de la corrección

No.	1	2	3	4	5
1	21,2	41,5	62,6	83,6	105,7
2	21,15	41,5	62,5	83,7	104,5
3	21,1	41,5	62,55	83,7	104,55
4	21,2	41,5	62,6	83,7	104,6
5	21,1	41,55	62,6	83,7	104,5
6	21,1	41,5	62,6	83,7	104,5
7	21,15	41,45	62,6	83,7	104,55
8	21,15	41,5	62,5	83,65	104,55
9	21,1	41,5	62,5	83,65	104,5
10	21,1	41,5	62,6	83,65	104,5
11	21,15	41,45	62,55	83,7	104,5
12	21,1	41,5	62,6	83,7	104,6
13	21,1	41,5	62,6	83,7	104,5
14	21,1	41,5	62,6	83,7	104,5
15	21,1	41,5	62,6	83,7	104,5
16	21,1	41,5	62,6	83,7	104,5
17	21,15	41,5	62,6	83,7	104,5
18	21,1	41,5	62,55	83,7	104,5
19	21,1	41,45	62,6	83,7	104,6
20	21,15	41,5	62,6	83,7	104,55
21	21,1	41,5	62,6	83,65	104,6
22	21,1	41,5	62,5	83,65	104,5
23	21,1	41,5	62,5	83,7	104,5
24	21,1	41,5	62,55	83,7	104,5
25	21,15	41,45	62,6	83,6	104,5
26	21,1	41,5	62,6	83,6	104,55
27	21,15	41,5	62,6	83,6	104,5
28	21,2	41,5	62,6	83,6	104,5
29	21,15	41,5	62,5	83,5	104,55
30	21,15	41,5	62,6	83,6	104,5

Anexo 3: Mediciones angulares antes de la corrección

No.	90	180	270	360
1	91	182	274	369
2	91,5	183	275	370
3	91	182	274	369,5
4	91	183,5	274	370
5	91	182,5	274,5	369
6	91	183	275	369
7	91	182	275	370
8	91	182,5	275	370
9	90	183	274	369
10	91	182	274	369
11	91	182,5	274	369
12	91	183	274	369,5
13	90,5	182	274	369,5
14	90	182	274,5	369
15	91	183	274	370
16	91	183	274	370
17	91	183	274,5	369
18	90,5	183,5	275	370
19	90	182	274,5	370
20	90,5	182	274	370
21	90	183	274,5	369
22	90	182,5	274,5	369
23	91	183	274	369
24	90,5	182	274,5	369,5
25	91	183	274	369,5
26	90	182,5	273,5	369,5
27	90	182	274	370
28	90,5	182	274,5	370
29	91	182	274	369,5
30	91	183	274,5	369,5