UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIEROS ELECTRÓNICOS

TEMA:

CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL HÍBRIDO OMNIDIRECCIONAL

AUTORES:

JHONNY FABRICIO ORTEGA NOROÑA
LUIS MANOLO YAPO PILLAJO

TUTOR:

JUNIOR RAFAEL FIGUEROA OLMEDO

Quito, marzo del 2017

CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR

Nosotros Jhonny Fabricio Ortega Noroña, Luis Manolo Yapo Pillajo, con documentos de identificación N° 178334947 y N° 1723360903, respectivamente manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: "Construcción de un robot móvil híbrido omnidireccional", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

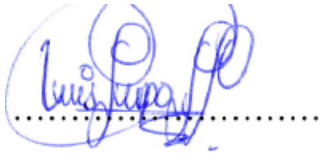
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores reservamos los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Nombre: Jhonny Fabricio Ortega Noroña

Cedula: 1718334947

Fecha: Marzo del 2017



Nombre: Luis Manolo Yapo Pillajo

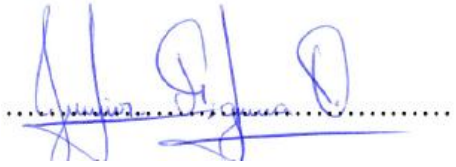
Cedula: 1723360903

Fecha: Marzo del 2017

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, Construcción de un robot móvil híbrido omnidireccional realizado por Jhonny Fabricio Ortega Noroña y Luis Manolo Yapo Pillajo, obteniendo un producto que cumple con los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Marzo del 2017



Ing. Junior Rafael Figueroa Olmedo MSc.

Cédula de identidad: 0802820183

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme fuerza y fe para creer lo que me parecía difícil de terminar. Y de manera especial a mis padres pues ellos fueron los principales cimientos para la culminación de esta etapa en mi vida, quienes me brindaron apoyo, cariño y en especial confianza ya que nunca dejaron de creer en mí. A los miembros de mi familia quienes estuvieron pendientes de toda mi etapa de estudio, animándome y apoyándome a seguir adelante. A mi hermano por estar siempre a mi lado apoyándome como amigo en toda circunstancia, siempre eres al que cuento todo y confió en ti como en nadie, gracias por todo y a pesar de las peleas somos hermanos y siempre estaremos juntos.

Tu ayuda ha sido fundamental en esta etapa final de mis estudios, has estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos de mí vida. Este proyecto no fue para nada fácil, pero siempre estuviste motivándome y ayudándome con tus mensajes de amor y confianza en mí. Muchas gracias amor.

Luis Manolo Yapo Pillajo

Dedico este proyecto de titulación a Dios por ser el principal conductor de mi vida y traerme hasta este lugar. A toda mi familia: a mis padres, hermanos y hermana, quienes son en mi vida la principal motivación, y fueron el motor en mi día a día durante la trayectoria de mi carrera y durante el desarrollo de este proyecto de titulación. A mis amigos quienes has sabido apoyarme en mis buenos y malos momentos y muchas veces darme buenos consejos. Una dedicatoria especial a mi madre, quien ha sido la principal fuente de motivación, quien me ha brindado apoyo incondicional tanto económicamente como moralmente, a la mujer quien es mi mayor ejemplo, pues supo enseñarme el significado del esfuerzo y trabajo duro.

Jhonny Fabricio Ortega Noroña

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios por darnos la fuerza y permitirnos continuar y culminar con una etapa más, la de realizarnos como profesionales. A nuestros padres quienes han sido pilares fundamentales en el trayecto de nuestras vidas, tanto personal como académica, A nuestros profesores, lo cuales han formado en nosotros hombres preparados y listos para enfrentar el mundo y a nuestro tutor, el Ingeniero Junior Figueroa quien confió en nosotros y nos supo guiar en el camino para desarrollar éste proyecto de la mejor manera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DEL AUTOR i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTO iv
ÍNDICE DE CONTENIDO v
ÍNDICE DE FIGURAS viii
ÍNDICE DE TABLAS x
RESUMEN xi
ABSTRACT xii
INTRODUCCIÓN xiii
CAPÍTULO 1 1
ANTECEDENTES 1
1.1 Tema 1
1.2 Planteamiento del problema 1
1.3 Justificación del trabajo 1
1.4 Objetivos 2
1.4.1 Objetivo general 2
1.4.2 Objetivos específicos 2
CAPÍTULO 2 3
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 3
2.1 Robot Móviles 3
2.1.1 Robots Móviles Omnidireccionales 4
2.1.2 Tipos de ruedas 4
2.1.2.1 Rueda Universal 5
2.1.2.2 Rueda Mecanum 5
2.1.3 Modos de Locomoción de un Robot Móvil de Cuatro Ruedas Mecanum 6
2.2 Cinemática de un Robot Móvil 8
2.2.1 Modelo Cinemático de un Robot Móvil Omnidireccional de Cuatro Ruedas Mecanum 8
2.4 Robot Móviles Manipuladores 12
2.4.1 Método Cinemático de Denavit – Hartenberg 13
2.4.2 Modelo Cinemático Inverso de un Robot Manipulador 16

2.4.3 Modelamiento de Robots Móviles Manipuladores 18
2.4.3.1 Modelo General Cinemático 18
CAPÍTULO 3 22
DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE Y HARDWARE 22
3.1 Hardware Mecánico 22
3.1.1 Chasis y Carcasa 22
3.1.1.1 Diseño de la Carcasa 22
3.1.1.2 Construcción de la Carcasa 23
3.1.2 Acoples Motor-Rueda 25
3.1.2.1 Diseño de los Acoples Motor-Rueda 25
3.1.2.2 Construcción de los Acoples Motor-Llanta 25
3.1.3 Diseño y Construcción del Hardware para las Tarjetas Raspeberry 26
3.2 Hardware Electrónico 27
3.2.1 Tarjeta de Control Master 28
3.2.2 Tarjeta de Control Auxiliar 28
3.2.2.1 Diseño Tarjeta de Control Auxiliar 28
3.2.2.2 Construcción de la Tarjeta de Control Auxiliar 32
3.2.3 Tarjeta de Control Arduino Mega 2596 33
3.2.4 Comunicación entre Tarjetas 33
3.3 Encoders 34
3.4 Desarrollo del Software 34
3.4.1 Diseño del Software 34
3.4.1.1 Tareas de la Tarjeta Raspberry Pi3 Maestra 34
3.4.1.2 Tareas de Tarjeta de Control Auxiliar 35
3.4.1.3 Tareas de Tarjeta Raspberry Pi3 Extra 35
3.4.1.4 Tareas de la Interfaz Gráfica de Usuario 35
3.4.1.5 Mensajes de Datos 36
3.4.1.5.1 Mensajes para el Maestro (MM) 36
3.4.1.5.2 Mensajes para el Esclavo (ME) 37
3.4.2 Codificación e Implementación de Software 37
3.4.2.1 Raspberry Pi3 Maestra 38
3.4.2.2 Raspberry Pi3 Esclavo -Pantalla Touch Screen 38
3.4.2.3 Tarjeta de Control Auxiliar 39

3.4.2.4 Arduino 40
3.4.2.5 Interfaz Gráfica 41
CAPÍTULO 4 43
ANÁLISIS DE RESULTADOS 43
4.1 Pruebas Hardware Mecánico 43
4.2 Pruebas de las Tarjetas de Control 43
4.2.1 Comunicación Raspberry pi3 Maestra - Interfaz 44
4.2.2 Comunicación Raspberry pi3 Maestra – Tarjeta de Control Auxiliar 46
4.2.3 Comunicación Arduino Mega – PC 47
4.3 Pruebas de Distancia de la Comunicación Inalámbrica 47
4.4 Pruebas de Movimiento 48
4.4.1 Autónomo 48
4.4.2 Inalámbrico 49
4.5 Sensores y Módulos Especiales 50
4.5.1 Encoders 50
4.5.2 Modulo GPS 52
4.5.3 Giroscopio 52
4.6 Manual de procedimientos de prácticas 53
4.6.1 Práctica 1: Caracterización del Robot Móvil Hibrido Omnidireccional 54
4.6.2 Práctica 2: Utilización de los sensores ultrasónicos acoplados al robot móvil omnidireccional tipo hibrido 54
4.6.3 Práctica 3: Creación de botones en la interfaz gráfica y envió de caracteres 54
4.6.4 Práctica 4: Movimientos Omnidireccionales del Robot 54
4.6.5 Práctica 5: Elaboración de un proceso que muestre el funcionamiento de la plataforma móvil y el brazo mecánico del robot 55
CONCLUSIONES 56
RECOMENDACIONES 57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Robots Móviles Omnidireccionales. 4
Figura 2.2. Rueda universal omnidireccional. 5
Figura 2.3. Rueda Mecanum Omnidireccional. 6
Figura 2.4. Diseño móvil omnidireccional. 7
Figura 2.5. Modos de locomoción de un robot móvil omnidireccional. 7
Figura 2.6. Modos de locomoción en el plano 2-D. 8
Figura 2.7. Modelo cinemático omnidireccional. 9
Figura 2.8. Modelo Industrial del Robot Kuka Youbot. 13
Figura 2.9. Diseño de un eslabón robótico. 14
Figura 2.10. Parámetros de Denavit-Hartenberg. 14
Figura 2.11. Sistemas de coordenadas de la cadena cinemática robótica. 16
Figura 2.12. Características geométricas del modelo general cinemático. 19
Figura 3. 1. Diseño interno del robot 23
Figura 3.2. Diseño del robot. 23
Figura 3.3. Prototipo impreso en 3D. 24
Figura 3.4. Procedimiento del acabado final de la carcasa. 24
Figura 3.5. Diseño acople-rueda-motor. 25
Figura 3.6. Rueda mecanum y bocín impreso en 3D. 26
Figura 3.7. Diseño del hardware de las tarjetas Raspberry en 3D. 26
Figura 3.8. Hardware Final de las tarjetas. 27
Figura 3.9. Diagrama general del hardware electrónico. 28
Figura 3.10. Diseño de la tarjeta auxiliar final en proteus. 30
Figura 3.11. Diseño del circuito PCB. 31
Figura 3.12. Tarjeta de control auxiliar en 3D. 32
Figura 3.13. Tarjeta de control auxiliar terminada. 33
Figura 3.14. Comunicación inalámbrica de las tarjetas. 33
Figura 3.15. Estructura general del software de la tarjeta Raspberry maestro. 38
Figura 3.16. Estructura general del software de la tarjeta Raspberry esclavo. 39
Figura 3.17. Función principal de la tarjeta de control auxiliar. 40
Figura 3.18. Función principal de la tarjeta de control auxiliar. 41

Figura 3.19. Diseño de la interfaz gráfica del usuario. 42
Figura 4.1. Robot Móvil Omnidireccional Tipo Hibrido Estructura Mecánica Final. 43
Figura 4.2. Interfaz gráfica. 45
Figura 4.3. Transmisión de video en tiempo real visualizada en la interfaz gráfica. 46
Figura 4.4. Prueba de funcionamiento de la interfaz gráfica. 47
Figura 4.5. Touch screen raspberry. 48
Figura 4.6. Prueba de funcionamiento, evasión de obstáculos. 49
Figura 4.7. Prueba de funcionamiento del robot. 49
Figura 4.8. Aspecto de funcionamiento de la interfaz gráfica. 50
Figura 4.9. Prueba de funcionamiento de los encoders. 51
Figura 4.10. Prueba de funcionamiento de los encoders (45^{o}). 51
Figura 4.11.Prueba de localización del robot. 52
Figura 4.12. Prueba de campo, módulo acelerómetro. 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Pines de conexiones de la tarjeta auxiliar. 30
Tabla 3.2. Comandos de operación. 37

RESUMEN

En este apartado se describe la construcción y las características técnicas de funcionamiento de los actuadores, sensores, tarjetas de control y módulos especiales a emplear en el robot explorador hibrido omnidireccional. El robot está compuesto por una plataforma móvil omnidireccional y un brazo robótico de 5 grados de libertad con una pinza, los cuales se los puede utilizar de manera individual si así se lo requiere. El prototipo está basado en la imagen de un robot industrial conocido como los Kuka youBot, el robot tiene como característica de manejarse sobre superficies planas con desniveles de hasta el 10% de su longitud horizontal.

El robot omnidireccional será controlado inalámbricamente, con la manipulación directa de un operador que contará con el apoyo de un software amigable, el cual permitirá un fácil manejo del robot. La construcción del robot, parte de un diseño previamente dimensionado para la ubicación correcta de los elementos electrónicos, el hardware se realizó en impresión en 3D y el diseño fue realizado en el software Inventor.

Se realizará las respectivas pruebas de funcionamiento para verificar su viabilidad, además el robot pretende servir de soporte en aplicaciones robóticas en el campo de la investigación dentro de la carrera de la ingeniería electrónica.

ABSTRACT

This section describes the construction and technical characteristics of actuators, sensors, control cards and special modules to be used in the omnidirectional hybrid scanning robot. The robot consists of an omnidirectional mobile platform and a robotic arm of 5 degrees of freedom with a clamp from which they can be used individually if required. The prototype is based on the image of an industrial robot known as the Kuka youBot, has as a characteristic of the maneuver on flat surfaces with unevenness of up to 10% of its horizontal length.

The robot will be controlled wirelessly, with the direct manipulation of an operator that contours with the support of a friendly software, which allows an easy handling of the robot. The construction of the robot starts from a design previously mentioned, the hardware was realized in the impression in 3.D and the design was realized in the software Inventor.

The respective functional tests will be carried out to verify the feasibility, in addition to the robot that serves as support in robotic applications in the field of research within the electronic engineering career.

INTRODUCCIÓN

Una de las ramas de la ingeniería moderna que más se ha desarrollado en la actualidad es la robótica, gracias al avance vertiginoso del conocimiento en esta área de la ciencia y de la técnica se han podido construir robots cada vez más sofisticados y con una mayor precisión en sus movimientos. Actualmente se tienen robots diseñados para mantenerse estáticos y otros que son de tipo exploradores. Para lograr todo esto, no solo se requieren componentes mecánicos y electrónicos ensamblados que respondan a las diversas y cambiantes necesidades, también es necesario contar con los modelos matemáticos que permita controlar los diversos sistemas y sean el fundamento en la toma de decisiones.

El robot móvil hibrido omnidireccional pretende agregar un mayor conocimiento al desarrollo de la robótica móvil y manipuladora, donde los investigadores, profesores y estudiantes desarrollarán nuevas ideas, ya que consta con un software y hardware bastante amigable que permita el trabajo del mismo.

El Capítulo 1, se encuentra los antecedentes que constituye el planteamiento del problema, justificación del proyecto, objetivos generales y específicos.

El Capítulo 2, se encuentra la fundamentación teórica referente al proyecto desarrollado.

El Capítulo 3, se encuentra el desarrollo y construcción del software y hardware.

El Capítulo 4, se encuentra el análisis de resultados que se adquirido durante el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 1
ANTECEDENTES

1.1 Tema

Construcción de un robot móvil híbrido omnidireccional

1.2 Planteamiento del problema

Después de haber realizado una observación interna a los laboratorios de la Carrera de Electrónica de la UPS – Sede Quito Campus Sur se ha llegado a determinar que existen dos tipos de robots móviles: HUMANOIDE Y ROBOTINO; destacando la utilización de dos robotinos de Festo los cuales son destinados al uso en las prácticas de la materia de Electiva II (Robótica), los mismos que por su diseño no pueden ser utilizados donde existe la manipulación directa de objetos.

El presente proyecto propone la construcción de un robot explorador hibrido omnidireccional con la característica de manejarse sobre superficies planas con desniveles de hasta el 10% de su longitud horizontal.

El proyecto pretende servir de soporte en aplicaciones robóticas en el campo de la investigación dentro de la carrera de Ingeniería Electrónica.

1.3 Justificación del trabajo

El desarrollo de este proyecto técnico tiene como finalidad la construcción de un robot móvil omnidireccional tipo hibrido, el cual será empleado para la realización de nuevas aplicaciones robóticas y futuros proyectos de investigación.

La implementación de éste robot didáctico permitirá a los estudiantes poner en práctica los conocimientos adquiridos en las aulas de clases, además de experimentar con innovadoras aplicaciones, contando con un conjunto de librerías de software que se desarrollarán como parte de este proyecto.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Construir un robot móvil híbrido omnidireccional para el laboratorio de robótica de la carrera de ingeniería electrónica de la UPS que permita implementar nuevos algoritmos de control.

1.4.2 Objetivos específicos

- Construir la estructura mecánica del robot tomando en consideración las condiciones y restricciones de movilización, para que navegue libremente en un entorno con superficie plana.

- Seleccionar los diferentes componentes electrónicos del robot, para que el sistema sea flexible y pueda adaptase a diferentes aplicaciones de control.

- Desarrollar e implementar un conjunto de librerías para la adquisición, procesamiento y control de información con la tarjeta electrónica seleccionada.

- Diseñar un conjunto de actividades prácticas relacionadas con la operación del robot.

CAPÍTULO 2
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo describe los fundamentos matemáticos necesarios para realizar el modelamiento cinemático y dinámico del robot móvil manipulador tipo omnidireccional.

Además, se va a realizar una descripción de las características técnicas y de funcionamiento de los actuadores, sensores, tarjetas de control y módulos especiales a emplear en este proyecto, apoyado con literatura especializada.

2.1 Robot Móviles

Los robots móviles son robots que pueden moverse desde un lugar a otro autónomamente, esto es, sin la asistencia externa de un operador humano. A diferencia de la mayoría de los robots industriales que pueden moverse solamente en un área de trabajo específica, los robots móviles tienen la característica especial de moverse libremente dentro de un espacio de trabajo predefinido para alcanzar sus objetivos deseados.

Esta capacidad de movilidad hace que sean adecuados para un gran repertorio de aplicaciones en entornos estructurados y no estructurados. Los robots móviles se distinguen entre robots móviles con ruedas (WMRs) y robots móviles con patas (LMRs).

Los robots móviles también incluyen vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y vehículos submarinos autónomos (AUVs). Los WMRs son muy populares porque son apropiados para aplicaciones típicas con estructuras mecánicas no tan complejas y con bajo consumo de energía. Los robots con patas son adecuados para las tareas en entornos no comunes como por ejemplo escaleras, montones de escombros, etc. Por lo general, los sistemas con dos, tres, cuatro o seis patas son de interés general, pero también existen muchas otras posibilidades de configuración. (Tzafestas)

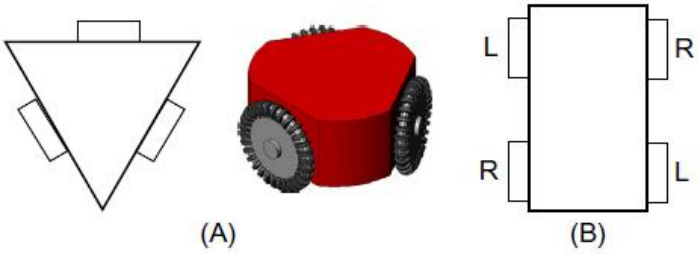
Los robots móviles también incluyen manipuladores móviles, ya sean acoplados sobre robots con ruedas o con patas, equipados con uno o más manipuladores ligeros para realizar varias tareas.

2.1.1 Robots Móviles Omnidireccionales

Un robot omnidireccional posee máxima maniobrabilidad en el plano, es decir, puede moverse en cualquier dirección sin necesidad de rotar o reorientarse, a diferencia de otros tipos de robots que requieren girar y cambiar de dirección para llegar a un punto deseado.

Este tipo de robots pueden ser construidos usando tres, cuatro o más ruedas omnidireccionales como se muestra en la Figura 2.1. Los robots móviles con tres ruedas usan ruedas universales, las cuales tienen un ángulo de rodillo de 90º como se muestra la Figura 2.1. Los robots móviles omnidireccionales de cuatro ruedas usan ruedas tipo mecanum como en la configuración mostrada en la Figura 2.3.

Figura 2.1. Robots Móviles Omnidireccionales.



Grafica de Robots Móviles Omnidireccionales. (A) Caso de tres ruedas (B) Caso de cuatro ruedas, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Los robots de tres ruedas poseen control y dirección simple, pero estabilidad limitada mientras que los de cuatro ruedas presentan mecánica y controles complejos pero mayor estabilidad y tracción.

2.1.2 Tipos de ruedas

Los tipos de ruedas usadas en robots móviles omnidireccionales son:

2.1.2.1 Rueda Universal

Ofrece una combinación de movimiento restringido y no restringido durante el giro. Contiene pequeños rodillos alrededor de su diámetro exterior que se montan perpendicular al eje de rotación de la rueda. De esta manera la rueda puede rodar en la dirección paralela al eje de la rueda, además de la rotación de una rueda normal.

Figura 2.2. Rueda universal omnidireccional.

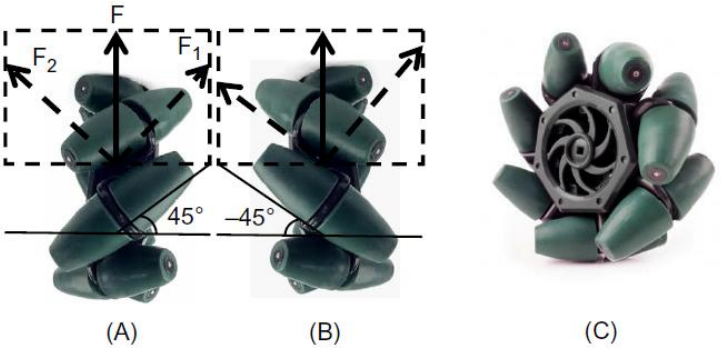
Diseños de la rueda universal, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

2.1.2.2 Rueda Mecanum

Es similar a la rueda universal, excepto que los rodillos están montados en un ángulo α que no sea 90º, por lo general $\pm$ 45º, en la Figura 2.3 A y 2.3 B muestra la rueda omnidireccional como se ve desde la parte inferior (a través de una mesa de cristal). La fuerza F producida por la rotación de la rueda actúa sobre el suelo a través del rodillo que tiene contacto con el suelo (se supone suficientemente plano y sin irregularidades).

En este rodillo, la fuerza se descompone en una fuerza F1 paralelo al eje del rodillo y una fuerza F2 perpendicular al eje del rodillo. La fuerza perpendicular al eje del rodillo produce una pequeña rotación de los rodillos (velocidad $\boldsymbol{v_r}$), pero la fuerza paralela al eje del rodillo ejerce una fuerza sobre la rueda y por lo tanto sobre el vehículo resultando en la velocidad central $\boldsymbol{v_h}$. La velocidad actual $\boldsymbol{v_t}$ del vehículo es la combinación de $\boldsymbol{v_h}$ y $\boldsymbol{v_r}$.

Figura 2.3. Rueda Mecanum Omnidireccional.



Rueda mecanum con α = 45º (rueda izquierda), (B) rueda mecanum con α = - 45º (rueda derecha), y (C) rueda mecanum actual, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

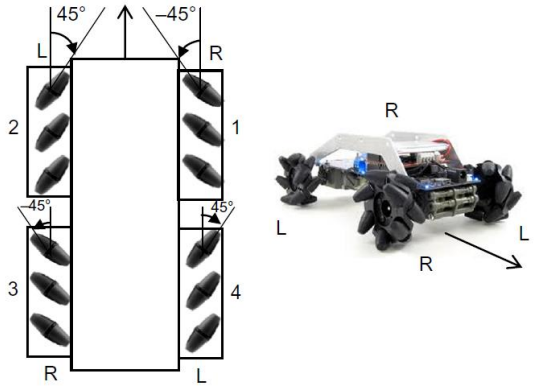
Como dato histórico, se puede mencionar que la rueda mecanum fue inventada por el ingeniero sueco Bengt Ilon en 1973 durante su trabajo en la compañía sueca Mecanum AB, por esta razón, también se la conoce como rueda llon o rueda sueca.

2.1.3 Modos de Locomoción de un Robot Móvil de Cuatro Ruedas Mecanum

Las cuatro ruedas de un robot omnidireccional tienen una distribución típica como se observa en la Figura 2.4. De las cuatro ruedas dos de ellas son conocidas como ruedas zurdas (lado izquierdo L) y las otras dos ruedas diestras (lado derecho R). Las ruedas zurdas tienen un ángulo de rodillo α = 45° y las diestras un ángulo α = - 45º.

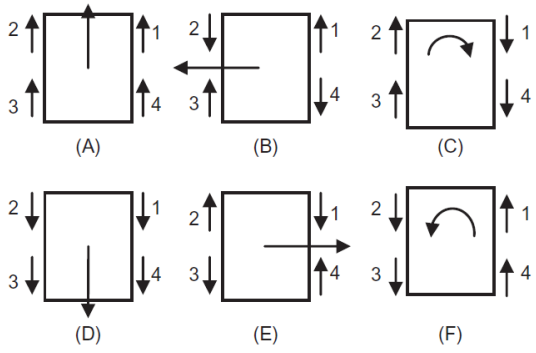
En la Figura 2.5 se muestra los seis movimientos básicos de un robot móvil omnidireccional de cuatro ruedas, etiquetados como: (A) movimiento hacia adelante, (B) deslizamiento a la izquierda, (C) giro en sentido horario, (D) de movimiento hacia atrás, (E) deslizamiento a la derecha y (F) giro en sentido anti-horario. Las flechas a la izquierda y el lado derecho del vehículo muestran la dirección de movimiento de las ruedas correspondientes.

Figura 2.4. Diseño móvil omnidireccional.



Configuración estándar de un robot móvil omnidireccional de cuatro ruedas mecanum, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Figura 2.5. Modos de locomoción de un robot móvil omnidireccional.

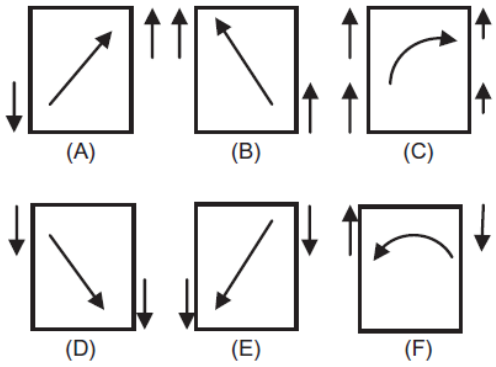


Modos básicos de locomoción de un Robot Móvil Omnidireccional con cuatro ruedas mecanum, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Las flechas sobre la plataforma del vehículo muestran las direcciones del movimiento del WMR, es decir para la dirección hacia adelante del vehículo todas las ruedas deben moverse hacia adelante (como se muestra en la Figura 2.5 A), para el deslizamiento a la izquierda las ruedas 1, 3 deberían moverse hacia adelante y las ruedas 2, 4 hacia atrás y su opuesto para el deslizamiento hacia la derecha.

Las locomociones mostradas en la Figura 2.5 se obtienen si todas las ruedas se mueven a la misma velocidad. Mediante la variación de la magnitud de velocidad de las ruedas se puede realizar movimientos en cualquier dirección en el plano 2-D. En la Figura 2.6 se muestran unos pocos casos de locomoción en planos 2D.

Figura 2.6. Modos de locomoción en el plano 2-D.



Modos de locomoción en planos 2-D (A) Hacia adelante diagonal-derecha (B) Hacia adelante diagonal-izquierda (C) Curva derecha (D) Hacia atrás diagonal-derecha, (E) Hacia atrás diagonal-izquierda y (F) Curva izquierda, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

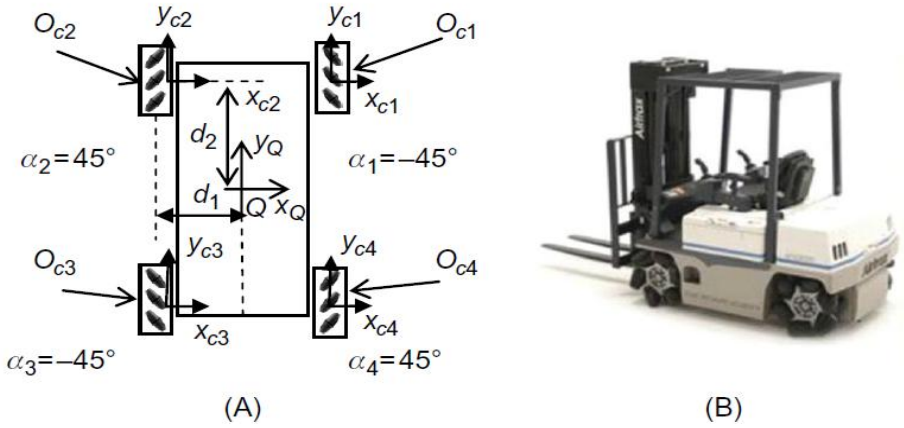
2.2 Cinemática de un Robot Móvil

La cinemática del robot se encarga de estudiar y analizar la configuración de los robots en su espacio de trabajo, las relaciones entre sus parámetros geométricos, así como las limitaciones impuestas en sus trayectorias. Las ecuaciones cinemáticas dependen de la estructura geométrica del robot, por ejemplo, un robot fijo puede tener una estructura cartesiana, cilíndrica, esférica o articulada y un robot móvil puede tener uno, dos, tres o más ruedas, con o sin restricciones en su movimiento. El estudio de la cinemática es un requisito previo fundamental para el estudio de la dinámica, las características de estabilidad y el control del robot. Se recomienda revisar previamente los contenidos de la sección 2.2 del libro "Introduction to Movile Robot Control" en la cual se trata el tema de cinemática directa e inversa de un robot, puesto que la nomenclatura que se va a utilizar en este apartado está basada en ese texto.

2.2.1 Modelo Cinemático de un Robot Móvil Omnidireccional de Cuatro Ruedas Mecanum

Se considera las 4 ruedas del robot móvil omnidireccional de la Figura 2.7, donde las ruedas mecanum tienen rodillos en ángulos de ±45º. Se encuentran cuatro ruedas en el sistema de coordenadas que son: O_{ci} (i = 1, 2, 3, 4). Y la velocidad angular $\dot{\boldsymbol{q}}_i = [\dot{\theta}_{ix}, \dot{\theta}_{ir}, \dot{\theta}_{iz}]$ de la rueda i tiene 3 componentes:

Figura 2.7. Modelo cinemático omnidireccional.



Robot Móvil Mecanum de 4 ruedas (A) Geometría Cinemática (B) Robot Móvil Real de Cuatro Ruedas Mecanum, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

$\dot{\theta}_{ix}$: velocidad de rotación alrededor del eje central.

$\dot{\theta}_{ir}$: velocidad de rotación del rodillo *i*.

$\dot{\theta}_{iz}$: velocidad de rotación de la rueda alrededor del punto de contacto.

El vector velocidad de la rueda $\boldsymbol{v}_{ci} = [\dot{x}_{ci}, \dot{y}_{ci}, \dot{\phi}_{ci}]^{\mathrm{T}}$ en coordenadas O_{ci}, está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{ci} \\ \dot{y}_{ci} \\ \dot{\phi}_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_i.sin\alpha_i & 0 \\ R_i & -r_i.cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ix} \\ \dot{\theta}_{ir} \\ \dot{\theta}_{iz} \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.1)}$$

para i = 1, 2, 3, 4, donde R_i, es el radio de la rueda, r_i es el radio del rodillo y α_i el ángulo del rodillo. El vector velocidad del robot $\dot{\boldsymbol{p}}_Q = [\dot{x}_Q, \dot{y}_Q, \dot{\phi}_Q]^{\mathrm{T}}$ en el sistema de coordenadas Ox_Qy_Q es:

$$\dot{\boldsymbol{p}}_Q = \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\phi_{ci}^Q & -sin\,\phi_{ci}^Q & d_{ciy}^Q \\ sin\,\phi_{ci}^Q & cos\,\phi_{ci}^Q & d_{cix}^Q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ci} \\ \dot{y}_{ci} \\ \dot{\phi}_{ci} \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.2)}$$

donde ϕ_{ci}^{Q} denota el ángulo de rotación (orientación) del sistema de coordenadas O_{ci} con respecto a Qx_Qy_Q y d_{ciy}^{Q}, d_{cix}^{Q} son las traslaciones de O_{ci} con respecto a Qx_Qy_Q. Introduciendo la ecuación 2.1 en 2.2 y se obtiene:

$$\dot{\boldsymbol{p}}_Q = \boldsymbol{J}_i \dot{\boldsymbol{q}}_i \qquad (i = 1, 2, 3, 4) \qquad \text{Ec. (2.3)}$$

donde $\dot{\boldsymbol{q}}_i = \left[\dot{\theta}_{ix},\ \dot{\theta}_{ir},\ \dot{\theta}_{iz}\right]^T$, y

$$\boldsymbol{J}_i = \begin{bmatrix} -R_i.sin\,\phi_{ci}^{Q} & r_i.sin(\phi_{ci}^{Q} + \propto_i) & d_{ciy}^{Q} \\ R_i.cos\,\phi_{ci}^{Q} & -r_i.cos(\phi_{ci}^{Q} + \propto_i) & -d_{cix}^{Q} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.4)}$$

donde $\boldsymbol{J}_i$ es la matriz Jacobiana de la rueda *i*, la cual es cuadrada e invertible. Si todas las ruedas son idénticas (excepto para la orientación de los rodillos), los parámetros cinemáticos del robot en la configuración mostrada en la Figura 2.10 serian:

$$\begin{aligned} &R_i = R,\ r_i = r,\ \phi_{ci}^{Q} = 0 \\ &\left|d_{cix}^{Q}\right| = d_1,\ \ \left|d_{ciy}^{Q}\right| = d_2 \\ &\propto_1 = \propto_3 = -45^o,\ \ \propto_2 = \propto_4 = 45^o \end{aligned} \qquad \text{Ec. (2.5)}$$

Entonces, las matrices Jacobianas (2.79) resultantes son:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & -r\sqrt{2}/2 & d_2 \\ R & -r\sqrt{2}/2 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & r\sqrt{2}/2 & d_2 \\ R & -r\sqrt{2}/2 & -d_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} 0 & -r\sqrt{2}/2 & -d_2 \\ R & -r\sqrt{2}/2 & -d_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad J_4 = \begin{bmatrix} 0 & r\sqrt{2}/2 & -d_2 \\ R & -r\sqrt{2}/2 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.6)}$$

El movimiento de Urano resulta de los movimientos simultáneos de las ruedas. Para modelar el movimiento se combina las ecuaciones de movimiento de las cuatro ruedas para formar la ecuación compuesta del movimiento del robot.

$$\begin{bmatrix} I \\ I \\ I \\ I \end{bmatrix} \bar{R}_{\dot{\boldsymbol{P}}R} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & J_3 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{q}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{q}}_3 \\ \dot{\boldsymbol{q}}_4 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.7)}$$

$$\boldsymbol{A}_o \bar{R}_{\dot{P}R} = \boldsymbol{B}_o \dot{\boldsymbol{q}} \qquad \text{Ec. (2.8)}$$

donde $\boldsymbol{I}$ es una matriz de identidad (3 x 3), $\boldsymbol{A_o}$ es una matriz (12 x 3), $\boldsymbol{B_o}$ es una matriz diagonal por bloques (12 x 12) y $\dot{\boldsymbol{q}}$ es la composición del vector velocidad de la rueda. Las 12 ecuaciones de las ruedas deben resolverse simultáneamente para caracterizar el movimiento del robot móvil.

El movimiento del robot es producido por el movimiento simultáneo de todas las ruedas. En términos de $\dot{\theta}_{ix}$ (es decir, las velocidades angulares de las ruedas alrededor de sus ejes) el vector velocidad $\dot{\boldsymbol{p}}_Q$ está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{d_1+d_2} & \frac{-1}{d_1+d_2} & \frac{-1}{d_1+d_2} & \frac{1}{d_1+d_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1x} \\ \dot{\theta}_{2x} \\ \dot{\theta}_{3x} \\ \dot{\theta}_{4x} \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.9)}$$

El vector velocidad del robot $\dot{\boldsymbol{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x}, & \dot{y}, & \dot{\phi} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ en el sistema de coordenadas global se obtiene como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\phi & -sin\,\phi & 0 \\ sin\,\phi & cos\,\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.10)}$$

donde ϕ es el angulo de rotación del sistema de coordenadas de la plataforma Qx_Qy_Q alrededor del eje z, que es ortogonal a *Oxy* y invirtiendo las ecuaciones (2.9) y (2.10) se

obtiene el modelo cinemático inverso, el cual proporciona las velocidades angulares $\dot{\theta}_{ix}(i = 1, 2, 3, 4)$ de las ruedas alrededor de sus ejes necesarias para obtener la velocidad deseada.

$\dot{\boldsymbol{p}} = [\dot{x},\ \dot{y},\ \dot{\phi}]^{\mathrm{T}}$ del robot

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1x} \\ \dot{\theta}_{2x} \\ \dot{\theta}_{3x} \\ \dot{\theta}_{4x} \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & (d_1 + d_2) \\ 1 & 1 & -(d_1 + d_2) \\ -1 & 1 & -(d_1 + d_2) \\ 1 & 1 & (d_1 + d_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.11)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\phi}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\ \phi & sin\ \phi & 0 \\ -sin\ \phi & cos\ \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.12)}$$

2.4 Robot Móviles Manipuladores

Los robots móviles manipuladores (MMs) son sistemas robóticos que constan de brazos articulados (manipuladores) montados en una plataforma móvil holonómica o no holonómica. Estos son capaces de alcanzar y trabajar sobre los objetos que inicialmente están fuera del espacio de trabajo del brazo articulado. Por lo tanto, los MMs son idóneos para muchas aplicaciones y en la actualidad constituyen el cuerpo principal de los robots industriales.

El Kuka youBot es un robot manipulador móvil omnidireccional desarrollado especialmente para fines académicos y de investigación. Consiste en una plataforma móvil omnidireccional en el que está instalado un brazo de robot de cinco ejes con una pinza de dos dedos, una de las principales ventajas del robot KuKa youBot es que cuenta con una computadora abordo que usa el sistema operativo Ubuntu, cuenta con una API (Application Programming Interface) desarrollada en C++, además se puede usar con ROS (Robot Operating System) brindando así una mayor flexibilidad para desarrollar aplicaciones con este robot.

Figura 2.8. Modelo Industrial del Robot Kuka Youbot.

Robot Móvil Manipulador Kuka youBot, (Mirelez-Delgado).

Uno de los principales y más desafiantes problemas en la investigación de los MMs es el diseño de controladores precisos para todo el sistema. Debido a la fuerte interacción y el acoplamiento del subsistema de la plataforma móvil y el brazo manipulador montado sobre la plataforma.

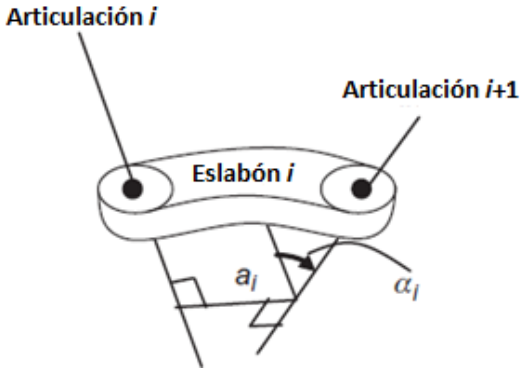
Se necesita una coordinación adecuada entre los respectivos controladores, sin embargo, también hay disponibles métodos de diseño unificados de control que tratan a todo el sistema utilizando el modelo de estado completo del Manipulador Móvil (MM).

2.4.1 Método Cinemático de Denavit – Hartenberg

El método Denavit Hartenberg proporciona un procedimiento sistemático para la determinación de la posición y orientación del efector final de un manipulador robótico de *n*-articulaciones. (Tzafestas)

Considerando un eslabón *i* que se encuentra entre las articulaciones i y $i+1$ de un robot, tal y como se muestra en Figura 2.9.

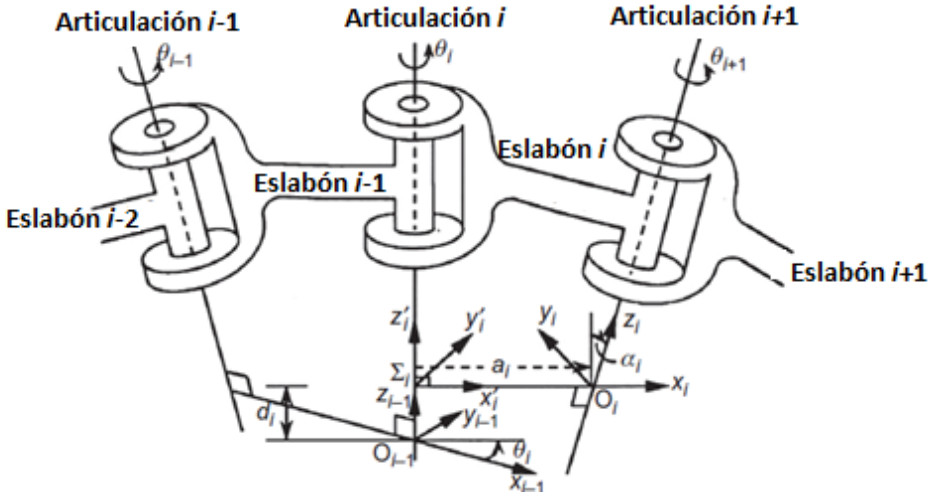
Figura 2.9. Diseño de un eslabón robótico.



Eslabón robótico entre las articulaciones i y $i+1$, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Cada eslabón es descrito por la distancia a_i entre los ejes i y $i+1$ de las dos articulaciones (posiblemente no paralelos) y el ángulo α_i de rotación desde el eje i al eje $i+1$ con respecto a la normal común de los dos ejes. Cada articulación (prismática o rotativa) es accionada por un motor (de traslación o de rotación) que produce el movimiento del eslabón i. En general, el brazo robótico tiene n articulaciones y $n+1$ eslabones. La relación funcional del efector final y los desplazamientos de las articulaciones puede ser determinada utilizando el convenio de parámetros que se muestran en la Figura 2.10, conocidos como parámetros de Denavit Hartenberg.

Figura 2.10. Parámetros de Denavit-Hartenberg.



Parámetros robóticos de Denavit-Hartenberg, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Estos parámetros se refieren a la posición relativa de los sistemas de coordenadas $O_{i-1}x_{i-1}y_{1-1}z_{i-1}$ y $O_i x_i y_i z_i$, y son los siguientes:

- En base a lo anterior, la transferencia del sistema $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ al sistema $O_i x_i y_i z_i$ se puede realizar en cuatro pasos:
- Paso 1: Rotación del sistema $i-1$ alrededor del eje z_{i-1} con un ángulo θ_i.
- Paso 2: Traslación del sistema $i-1$ a lo largo del eje z_{i-1} de d_i.
- Paso 3: Traslación del eje rotado x_{i-1} (que ahora coincide con x_i) a lo largo de la normal común de a_i.
- Paso 4: Rotación alrededor de x_i con un ángulo α_i.

Denotando por $\mathbf{A}_i^*$ el resultado de los pasos 3 y 4 y por $\mathbf{A}_*^{i-1}$ el resultado de los pasos 1 y 2, el resultado global de los pasos 1 hasta el 4 está dado por:

$$\mathbf{A}_i^{i-1} = \mathbf{A}_i^* \ \mathbf{A}_*^{i-1}$$

$$= \begin{bmatrix} cos\,\theta_i & -sin\,\theta_i\, cos\alpha_i & sin\,\theta_i\, sin\,\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\,\theta_i & \cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\,\theta_i sin\alpha_i & a_i\, sin\,\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.13)}$$

donde $\mathbf{A}_i^{i-1}$ representa la posición y orientación del sistema *i* con respecto al sistema $i-1$. Las tres primeras columnas de $\mathbf{A}_i^{i-1}$ contienen los cosenos directores de los ejes del sistema *i*, mientras que la cuarta columna representa la posición del sistema O_i. En general, el desplazamiento de la articulación *i* se denota como q_i, donde se tiene:

q_i=θ_i para la articulación de revolución.
q_i=d_i para la articulación prismática.

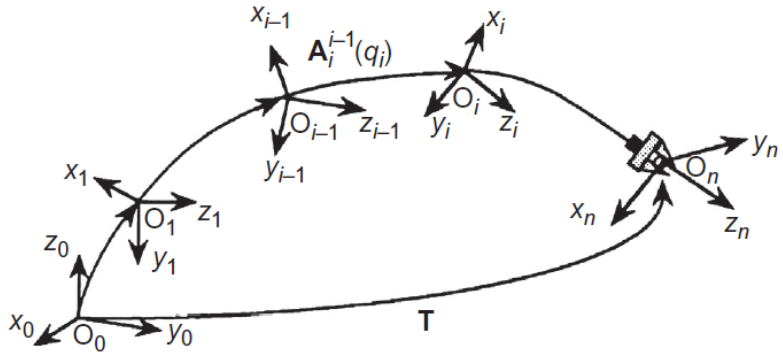
La posición y orientación del eslabón *i* con respecto al eslabón $i-1$ está en función de q_i, es decir, $\mathbf{A}_i^{i-1}\,(q_i)$.

La ecuación cinemática de un brazo robótico da la posición y orientación del último eslabón con respecto al sistema de coordenadas de la base y obviamente contiene todas las variables generalizadas $q_1, q_2, \dots, q_n$ de las articulaciones. En la Figura 2.11 se muestra pictóricamente los sistemas de coordenadas consecutivos desde la base hasta el efector final de la cadena cinemática robótica.

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1^0(q_i)\mathbf{A}_2^1(q_2) \dots \mathbf{A}_n^{n-1}(q_n) \qquad \text{Ec. (2.14)}$$

Entonces se representa la posición y la orientación del efector final (que es el último eslabón con respecto a la base).

Figura 2.11. Sistemas de coordenadas de la cadena cinemática robótica.



Representación gráfica de la posición del efector final y la orientación de la matriz **T** 4x4, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

2.4.2 Modelo Cinemático Inverso de un Robot Manipulador

En el problema de la cinemática directa se encuentra **T** conociendo los valores de $q_1, q_2, \dots, q_n$. En el problema de cinemática inversa se realiza lo contrario es decir, teniendo en cuenta **T** determinamos $q_1, q_2, \dots, q_n$ mediante la ecuación (2.14) con respecto a $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

La ecuación cinemática directa (2.14) se puede escribir en forma vectorial:

$$\mathbf{X = f\,(q)} \qquad \text{Ec. (2.15)}$$

Donde **X** es el vector de seis dimensiones y se tiene:

$$\mathbf{X}= \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \dots \\ \varphi \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \ \varphi = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} \qquad \text{Ec. (2.16)}$$

De la posición del efector final **p** y orientación φ , **f** es una función vectorial de columna no lineal de seis dimensiones:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \qquad \text{Ec. (2.17)}$$

Por lo tanto, la ecuación de cinemática inversa es:

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{X}) \qquad \text{Ec. (2.18)}$$

donde $\mathbf{f}^{-1}(.)$ denota la función inversa habitual de $\mathbf{f}(.)$.

Un método práctico y sencillo para invertir la ecuación cinemática. (2.14) es la siguiente. Se parte de:

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1^0(\mathbf{q}_1)\mathbf{A}_2^1(\mathbf{q}_2) \dots \mathbf{A}_6^5(\mathbf{q}_6)$$

Y se obtiene la siguiente secuencia de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}_1^0)^{-1}\mathbf{T} &= \mathbf{T}_6^1 \\ (\mathbf{A}_2^1)^{-1}(\mathbf{A}_1^0)^{-1}\mathbf{T} &= \mathbf{T}_6^2 \\ (\mathbf{A}_3^2)^{-1}(\mathbf{A}_2^1)^{-1}(\mathbf{A}_1^0)^{-1}\mathbf{T} &= \mathbf{T}_6^3 \\ (\mathbf{A}_4^3)^{-1}(\mathbf{A}_3^2)^{-1}(\mathbf{A}_2^1)^{-1}(\mathbf{A}_1^0)^{-1}\mathbf{T} &= \mathbf{T}_6^4 \\ (\mathbf{A}_5^4)^{-1}(\mathbf{A}_4^3)^{-1}(\mathbf{A}_3^2)^{-1}(\mathbf{A}_2^1)^{-1}(\mathbf{A}_1^0)^{-1}\mathbf{T} &= \mathbf{T}_6^5 \end{aligned} \qquad \text{Ec. (2.19)}$$

Los elementos del lado izquierdo de estas ecuaciones son funciones de los elementos de **T** y de las primeras variables $i-1$ del robot. Los elementos del lado derecho son constantes o funciones de las variables $q_1,\ q_{1+1}, \dots, q_6$.

De cada ecuación matricial se obtiene 12 ecuaciones, es decir una ecuación para cada uno de los elementos de los cuatro vectores $\boldsymbol{n}$, $\boldsymbol{o}$, $\boldsymbol{a}$ y $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{x}_0$. De estas ecuaciones se puede determinar los valores de $q_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ del robot.

Aunque la solución del problema de cinemática directa es única, esto no es así para el problema de cinemática inversa, debido a la presencia de funciones trigonométricas. En algunos casos la solución se puede encontrar analíticamente, pero en general la solución solo puede ser encontrada aproximadamente utilizando algún método numérico aproximado y el ordenador. Además, si el robot tiene más de seis grados de libertad, existirá un número infinito de soluciones para $q_i (i = 1, 2, \dots, n; n > 6)$ que conducen a la misma posición y orientación del efector final.

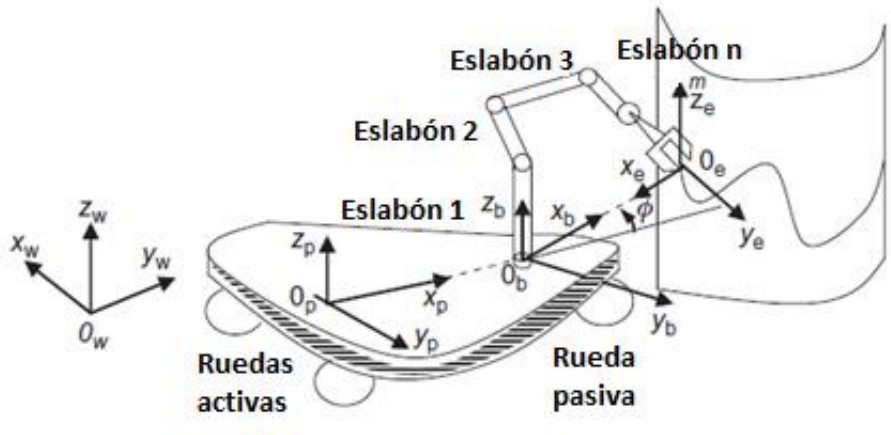
2.4.3 Modelamiento de Robots Móviles Manipuladores

Los modelos cinemáticos y dinámicos totales de un Robot Móvil Manipulador son complejos y fuertemente acoplados combinando los modelos de la plataforma móvil y el robot manipulador fijo. Hoy en día, los robots móviles manipuladores son usados con tracción diferencial, triciclo, tipo coche y plataformas omnidireccionales las cuales ofrecen máxima maniobrabilidad.

2.4.3.1 Modelo General Cinemático

Si se considera el robot móvil de la Figura 2.12 el cual tiene una plataforma de tracción diferencial y un manipulador robótico multi-eslabón.

Figura 2.12. Características geométricas del modelo general cinemático.



Características geométricas de un robot móvil manipulador con la plataforma de tracción diferencial, (Spyros G. Tzafestas, 2014).

Se tiene los siguientes cuatro sistemas de coordenadas:

$O_w x_w y_w z_w$ es el sistema de coordenadas global,
$O_p x_p y_p z_p$ es el sistema de coordenadas de la plataforma,
$O_b x_b y_b z_b$ es el sistema de coordenadas de la base del manipulador,
$O_e x_e y_e z_e$ es el sistema de coordenadas del efector final.

Entonces, la posición/orientación del efector final del manipulador con respecto a $O_w x_w y_w z_w$ está dada por (hacer énfasis en la ecuación (2.14)):

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_p^w \mathbf{A}_b^p \mathbf{A}_e^b \qquad \text{Ec. (2.20)}$$

Donde se obtiene:

$\mathbf{A}_p^w$ es la matriz de transformación a partir de O_w a $\mathbf{O}_p$,
$\mathbf{A}_b^p$ es la matriz de transformación a partir de O_p a O_b ,
$\mathbf{A}_e^b$ es la matriz de transformación a partir de O_b a O_e .

En la forma vectorial, el vector posición/orientación del efector final $\boldsymbol{x}_e^w$ en coordenadas globales tiene la forma de:

$$\mathbf{x}_e^w = \mathbf{F}(\mathbf{q}) \qquad \text{Ec. (2.21)}$$

donde:

$\mathbf{q} = [\mathbf{p}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$

$\mathbf{p} = [x, y, \phi]^T$ (Configuración de la plataforma)

$\boldsymbol{\theta} = \left[\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_{n_m}\right]^{\mathrm{T}}$ (Configuración del manipulador)

Entonces, derivando al tiempo se obtiene la ecuación:

$$\dot{\mathbf{x}}_e^w = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}}\right)\dot{\mathbf{p}} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right)\dot{\boldsymbol{\theta}} \qquad \text{Ec. (2.22)}$$

donde $\dot{\mathbf{p}}$ esta dada por el modelo cinemático de la plataforma (Se recomienda revisar previamente los contenidos de la sección 6.1 del libro "Introduction to Movile Robot Control"):

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{G}(\mathbf{p})\,\mathbf{u}_p\,, \quad \mathbf{u}_p \in R^2 \qquad \text{Ec. (2.23a)}$$

y $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ por el modelo cinemático del manipulador. Suponiendo que el manipulador es de libre restricción, se describe:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{u}_m \qquad \text{Ec. (2.23b)}$$

donde $\mathbf{u}_m$ es el vector de comandos articulados del manipulador. Combinando las ecuaciones. (2.22), (2.23a), y (2.23b) se obtiene el modelo cinemático general del robot móvil manipulador:

$$\dot{\mathbf{x}}_e^w(t) = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}}\right)\mathbf{G}(\mathbf{p})\mathbf{u}_p + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right)\mathbf{u}_m \qquad \text{Ec. (2.24a)}$$

$$= \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{u}(t)$$

entonces:

$$\mathbf{u}(t) = \left[\mathbf{u}_p^T(t), \mathbf{u}_m^T(t)\right]^{\mathrm{T}} \in R^{2+n_m}$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \left[\mathbf{J}_{\mathrm{p}}(\mathbf{q})\mathbf{G}(\mathbf{q}) \vdots \mathbf{J}_m(\boldsymbol{\theta})\right] \qquad \text{Ec. (2.24b)}$$

$$\mathbf{J}_p(\mathbf{q}) = \partial\mathbf{F}/\partial\mathbf{p}$$

$$\mathbf{J}_m(\mathbf{q}) = \partial\mathbf{F}/\partial\boldsymbol{\theta}$$

La ecuación (2.24a) representa el modelo cinemático total del robot móvil manipulador desde las entradas a las variables del efector final.

En realidad, en el presente caso el sistema está sujeto a las restricciones no holonómicas.

$$\mathbf{M}(\mathbf{p})\dot{\mathbf{p}} = 0, \quad \mathbf{M}(\mathbf{p}) = [-\sin\phi, \cos\phi, 0, \dots, 0] \qquad \text{Ec. (2.25)}$$

donde $\dot{\mathbf{p}}$ no puede ser eliminado por integración. Por lo tanto**,** $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ debe involucrar una fila que represente esta restricción. Debido a la dimensionalidad $2 + n_m$ del vector de entrada de control $\mathbf{u}(t)$ que es menor que el número total $3 + n_m$ de variables (grados de libertad) a ser controladas, el sistema siempre esta sub-actuado.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE Y HARDWARE

Este capítulo describe el procedimiento realizado para el desarrollo del robot móvil omnidireccional, tanto de la parte mecánica como de la parte electrónica y programación.

3.1 Hardware Mecánico

Se iniciará por el diseño de la parte mecánica ya que es muy importante para que el robot muestre características robustas y desempeñe un mejor funcionamiento. Se tomó como modelo al robot Kuka YouBot que se le puede apreciar en la Figura 2.14.

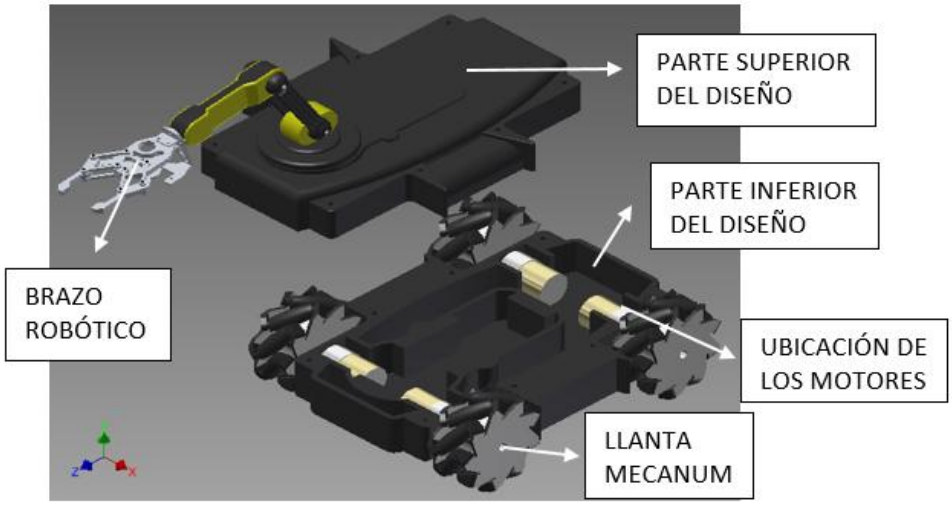
3.1.1 Chasis y Carcasa

El chasis es la parte mecánica del robot, donde se acoplan los elementos electrónicos y mecánicos, el mismo que debe cumplir con las características de ser robusto y liviano, de tal manera que se puedan usar motores de menor potencia y abaratar costos.

3.1.1.1 Diseño de la Carcasa

Para el diseño de la carcasa se tomó en cuenta el espacio ocupado por los motores, el brazo mecánico comercial y todos los elementos y tarjetas electrónicas. El diseño de la carcasa fue realizado en el Software Inventor, en la Figura 3.1 se aprecia el diseño interno del robot con la ubicación de los motores y brazo robótico, de la misma manera en la Figura 3.2 se observa el diseño completo del robot omnidireccional realizado en el Software Inventor.

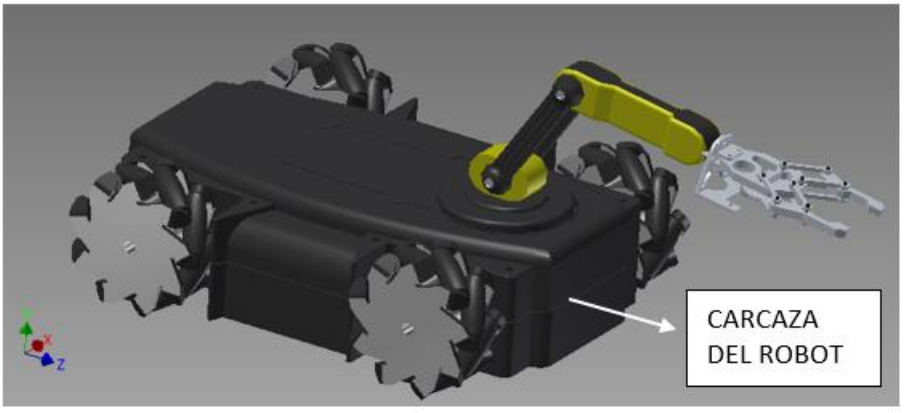
Figura 3. 1. Diseño interno del robot.



Diseño interno del prototipo realizado en el software inventor.

En la Figura 3.2 se muestra el diseño completo del robot omnidireccional con sus diferentes componentes.

Figura 3.2. Diseño del robot.

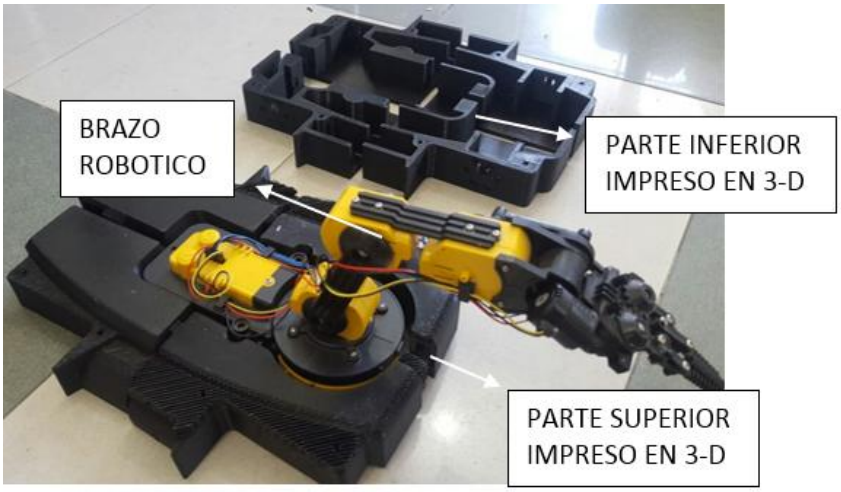


Robot omnidireccional creado en inventor.

3.1.1.2 Construcción de la Carcasa

Para la construcción de la carcasa se determinó que fuera en impresión 3D, como es mostrado en la Figura 3.3, la misma permite un mejor acabado y tomando en consideración que el diseño contaba con varios detalles curvos, ya que al realizarlos con otro tipo de material y con otro método de construcción sería complicado obtenerlos.

Figura 3.3. Prototipo impreso en 3D.



Impresiones del prototipo de la parte superior e inferior en 3D.

El acabado de impresión 3D no tiene una superficie completamente lisa y quedan residuos de material PLA (material de impresión en 3D, revisar anexo 2), por lo que la carcasa fue lijada, masillada y pintada para la obtención de un terminado estéticamente profesional, tal como se muestra en la Figura 3.4B.

Figura 3.4. Procedimiento del acabado final de la carcasa.

Demostración del trabajo mecánico para la obtención de un acabado profesional. A) Masillado y lijado de la parte superior e inferior B) Carcasa final realizada con pintura automotriz.

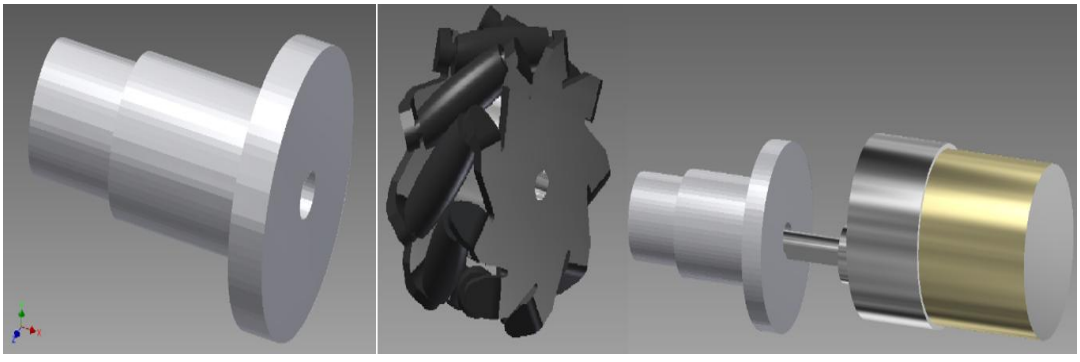
3.1.2 Acoples Motor-Rueda

Los acoples corresponden a la parte mecánica entre la rueda y el motor, los cuales se realizaron con el método de la impresión 3D, de esta manera se intentó ganar tiempo y reducir costos, ya que el material de impresión es flexible y no se rompe fácilmente y es ideal para remplazar partes mecánicas de acero en aplicaciones robóticas.

3.1.2.1 Diseño de los Acoples Motor-Rueda

De la misma manera los diseños de los acoples motor-rueda se realizó en el software Inventor después de haber tomado las medidas necesarias para su diseño.

Figura 3.5. Diseño acople-rueda-motor.



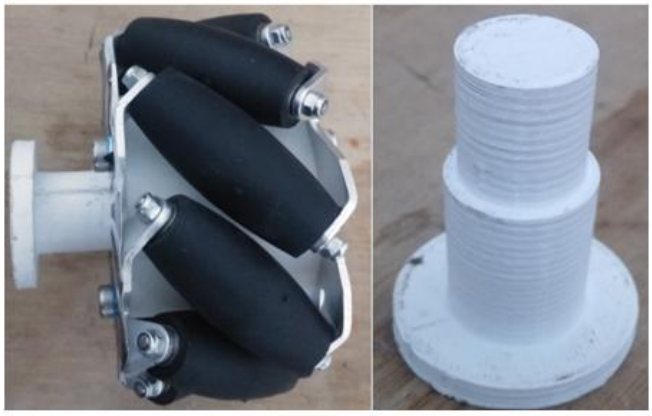
A B

Diseños realizados en el software Inventor. A) Diseño del bocín para el acople de la rueda-motor B) Simulación de los diseños para la ubicación acople-rueda-motor.

3.1.2.2 Construcción de los Acoples Motor-Llanta

Después del diseño de los acoples y examinar el material de las llantas se tomó la decisión de que la construcción sería en impresión 3D, ya que los acoples están sujetados bajo presión y pegamento, evitando así daños al material de las llantas como se observa en la Figura 3.6.

Figura 3.6. Rueda mecanum y bocín impreso en 3D.

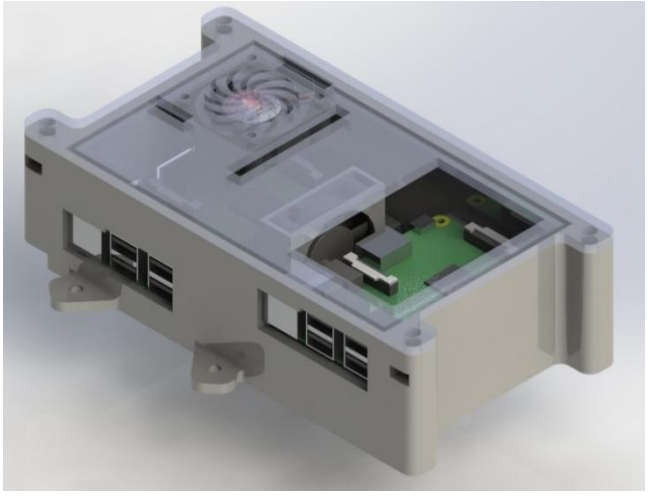


A) Instalación del bocín realizado a la medida de la rueda. B) Bocín realizado con impresión 3D.

3.1.3 Diseño y Construcción del Hardware para las Tarjetas Raspeberry

Para el diseño de la carcasa de almacenamiento de las tarjetas Raspberrys se consideró sus dimensiones tal y como se puede observar en la Figura 3.7, de la misma forma se tomó en cuenta la ubicación y las dimensiones en donde se las colocaría, en este caso se las ubicó en la parte superior-trasera de la carcasa del robot. El diseño fue realizado en el Software Inventor ya que brinda facilidad de manejo.

Figura 3.7. Diseño del hardware de las tarjetas Raspberry en 3D.



Carcaza realizada en el software inventor.

Figura 3.8. Hardware Final de las tarjetas.

Acabado automotriz final de la carcasa para las tarjetas.

Para la construcción de la carcasa de las tarjetas se tomó la decisión que se realice en impresión 3D, debido a que consta con varios detalles de gran relevancia y este permite tener mejores acabados. En la Figura 3.8 se puede observar la carcasa física de las tarjetas.

3.2 Hardware Electrónico

Este apartado muestra la elaboración del hardware electrónico necesario para cumplir con el desarrollo del proyecto, en el que se detalla el tratamiento de las señales, la elaboración de tarjetas y los diagramas de conexiones entre los elementos. Destacando la estructura de la red para que exista una transmisión de envío y recepción de datos óptima.

Figura 3.9. Diagrama general del hardware electrónico.

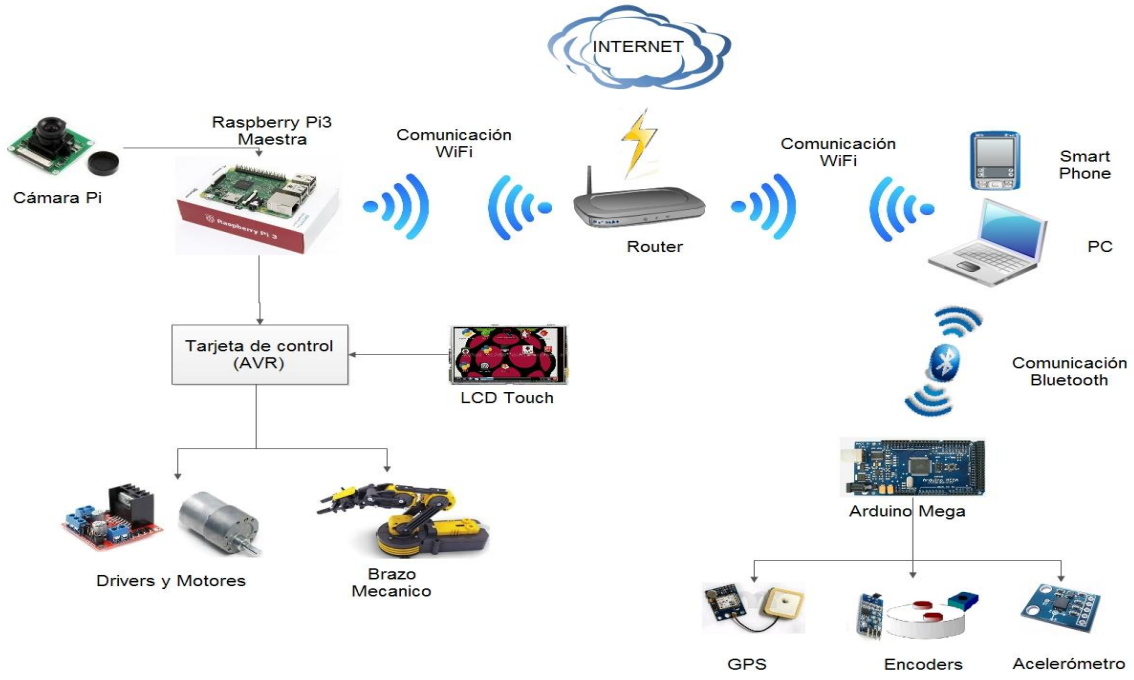


Diagrama total de funcionamiento electrónico.

3.2.1 Tarjeta de Control Master

Para el caso de la elaboración del robot se tomó la decisión de usar la tarjeta Raspberry Pi3 como tarjeta de control master, cuyas especificaciones técnicas se detallan en el Anexo 2. La Tarjeta de control Raspberry será la encargada de enviar los datos hacia la tarjeta de control auxiliar permaneciendo en constante comunicación y asegurando el buen desempeño del robot.

3.2.2 Tarjeta de Control Auxiliar

Además de la tarjeta de control Raspberry fue necesaria la elaboración de una tarjeta de control auxiliar (la cual trabaja como esclava), debido a la gran cantidad de puertos usados por los módulos, sensores y actuadores necesarios para el funcionamiento del robot. Para disminuir gastos se decidió usar una tarjeta de control de diseño propio.

3.2.2.1 Diseño Tarjeta de Control Auxiliar

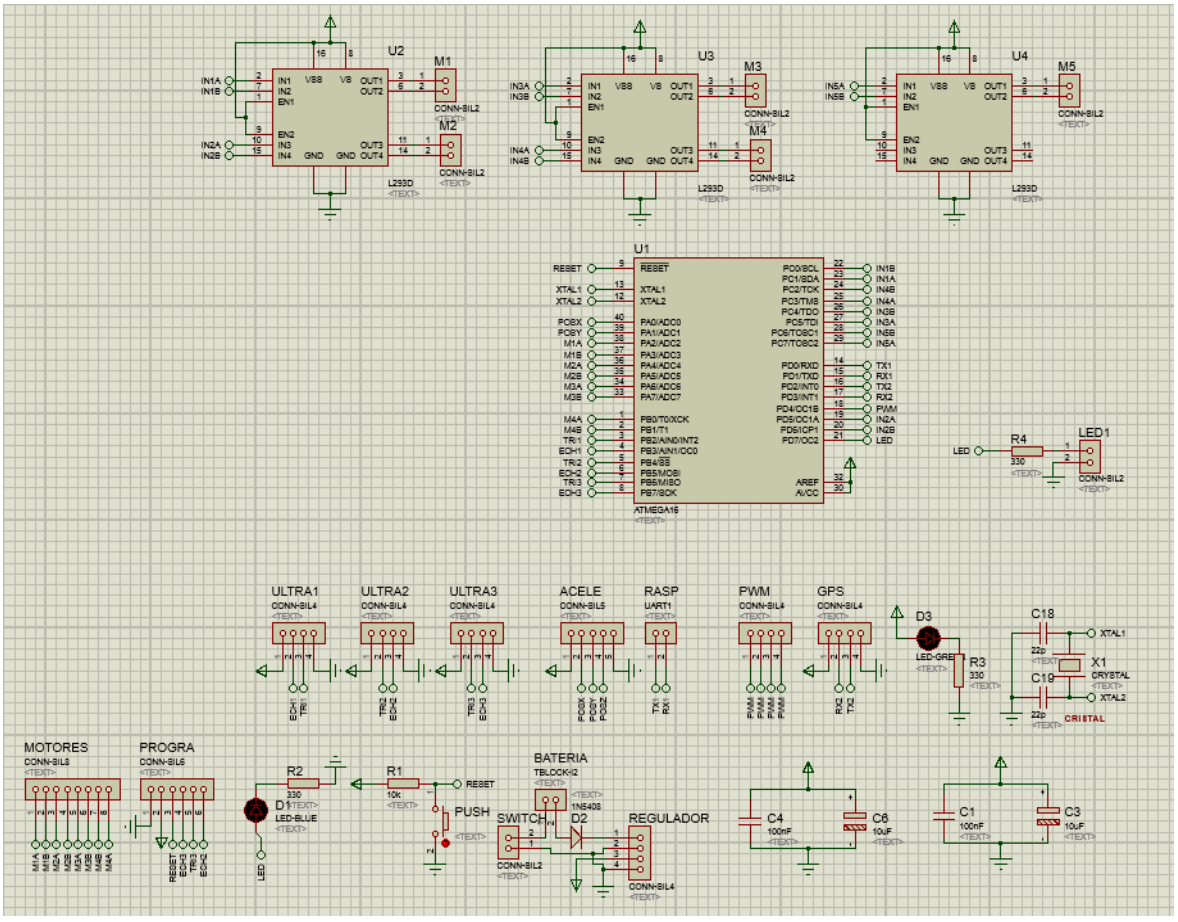
Para el diseño de la tarjeta de control esclava se utilizó el software Proteus, el cual por su fácil manejo y robustez permite la elaboración de cualquier tipo de circuito electrónico.

Para iniciar el diseño de la tarjeta es necesario dimensionar el microcontrolador a utilizar, tomando en cuenta el número de puertos, entre los cuales están: entradas, salidas, puertos de comunicación y puertos análogos. Para satisfacer la cantidad de pines necesarios requeridos se eligió el microcontrolador Atmega164p, de Atmel, el cual posee 40 pines.

Después de elegir el microcontrolador se realiza la simulación en ISIS de Proteus. Para esto se iniciará con la alimentación de todo el sistema, para lo cual se ha utilizado una batería lipo de 14.7V a 4 A conectada a un conversor de voltaje DC-DC step down el cual en su salida brindará los 5 voltios necesarios para la alimentación de la tarjeta y sus elementos.
La tarjeta de control auxiliar tiene conectada como entradas tres sensores ultrasónicos HC-SR04 los cuales determinan la presencia de un objeto en un rango de 2cm a 400cm y están conectados a los pines del puerto B como se muestra en la Figura 3.10.

Para la parte de los motores, cinco pertenecen al brazo robótico comercial y se utilizó tres circuitos integrados LM293 para realizar el control de cada uno de los grados de libertad del mismo. Y para el control de los cuatro motores de las llantas se utilizó dos drives L298N, los mismos que están interactuando directamente con la tarjeta de control auxiliar tal como se muestra en la Figura 3.10.

Figura 3.10. Diseño de la tarjeta auxiliar final en proteus.



Simulación de conexión de la tarjeta auxiliar.

En la Tabla 3.1 se muestra los pines de conexión que tiene el microcontrolador de la tarjeta auxiliar con los componentes electrónicos que conforma el robot.

Tabla 3.1. Pines de conexiones de la tarjeta auxiliar.

AVR PIN	CONEXIÓN	AVR PIN	CONEXIÓN
1	Motor llanta 1 izquierda	18	PWM
2	Motor llanta 1 derecha	19	Motor base 1
3	Motor llanta 2 izquierda	20	Motor base 2
4	Motor llanta 2 derecha	21	Led
5	Motor llanta 3 izquierda	22	Motor hombro 1

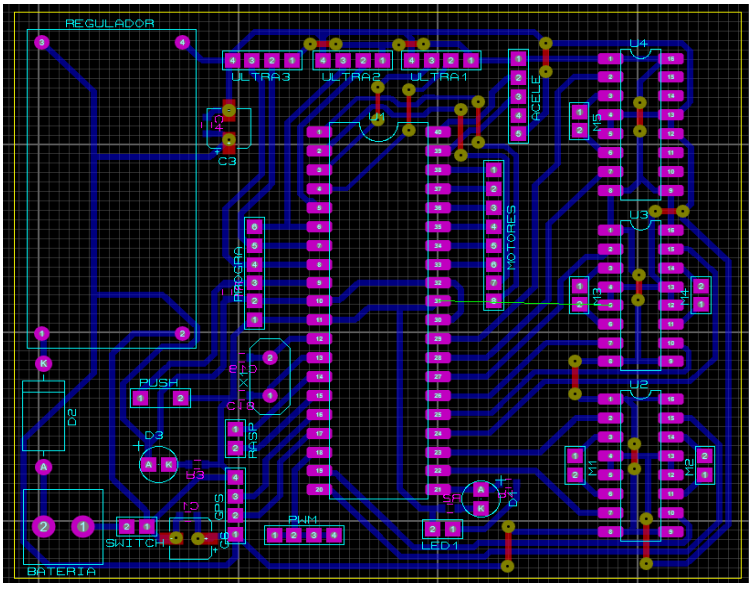
Continuación de la Tabla 3.1.

6	Motor llanta 3 derecha	23	Motor hombro 2
7	Motor llanta 4 izquierda	24	Motor codo 1
8	Motor llanta 4 derecha	25	Motor codo 2
9	Reset	26	Motor muñeca 1
12	Cristal	27	Motor muñeca 2
13	Cristal	28	Griper abrir
14	Tx1 (Rx Raspberry)	29	Griper cerrar
15	Rx1 (Tx Raspberry)	30	VCC
16	Tx2 (Rx Programadora)	32	VCC
17	Rx2 (Tx Programadora)		

Tabla indicadora de conexiones.

Para el diseño del circuito PCB se realizó con la herramienta de proteus ARES, el cual permite colocar el diagrama PCB de cada uno de los elementos utilizados y realizar el ruteado de las pistas de forma manual o automáticamente con la opción auto-router.

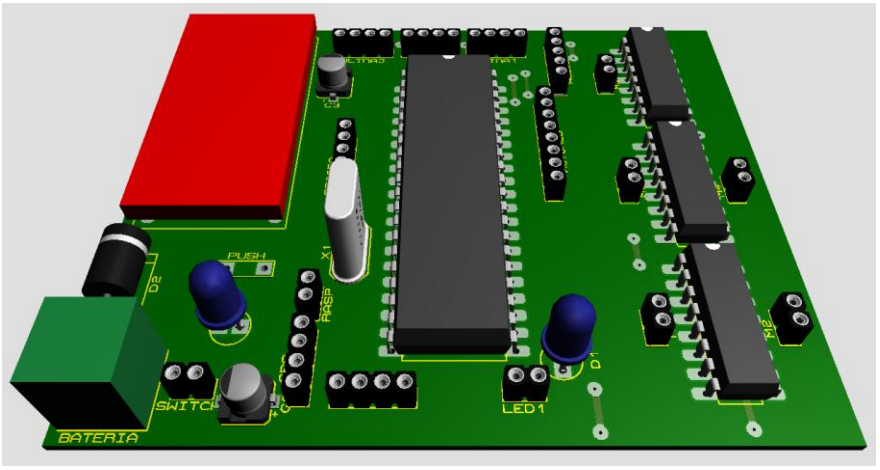
Figura 3.11. Diseño del circuito PCB.



Diseño final de la tarjeta auxiliar en ARES.

Después de realizar el circuito PCB se puede visualizar la tarjeta de control auxiliar en 3D, como se observa en la Figura 3.12.

Figura 3.12. Tarjeta de control auxiliar en 3D.



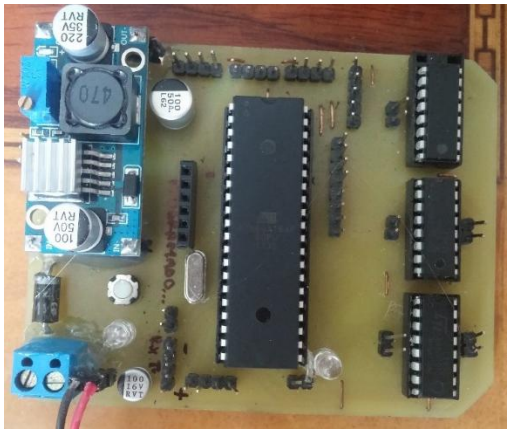
Diseño final de la tarjeta de control auxiliar en 3D.

3.2.2.2 Construcción de la Tarjeta de Control Auxiliar

La construcción del hardware electrónico se realizó mediante un procedimiento de diseño, grabado y erosionado de la misma, para esto se realizó el diseño previo en ARES que se muestra en la Figura 3.11. Se imprimió el diseño en hoja de papel fotográfico con el fin de estampar en la baquelita previamente limpiada, luego se procedió a limpiar el revelado de la placa para esto se lo realiza con una brocha en un recipiente con ácido (cloruroferrico), hasta que solo quede las pistas que se necesitan para el conexionado de los elementos de la tarjeta de control auxiliar.

Realizado el proceso de erosión del cobre, se procede a la parte final del acabado de la placa, el cual es, perforar la placa, soldar los elementos electrónicos en la placa y por último se verifica que no exista corto-circuitos en la tarjeta de control auxiliar. En la Figura 3.13 se muestra el acabado final de la tarjeta de control auxiliar.

Figura 3.13. Tarjeta de control auxiliar terminada.



Hardware final con elementos electrónicos incorporados.

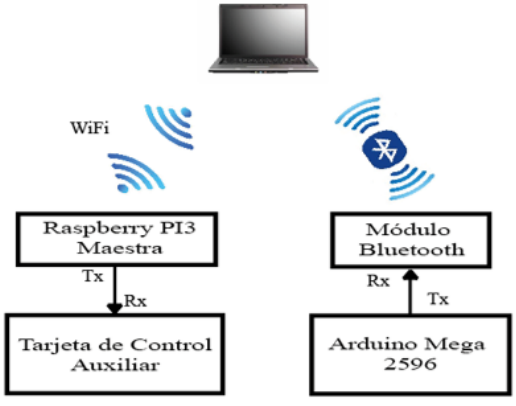
3.2.3 Tarjeta de Control Arduino Mega 2596

Por la falta de pines en la tarjeta auxiliar y por el uso de módulos especiales: GPS, acelerómetro y encoders, se decidió usar un arduino mega 2560 para la conexión de los mismos, cuyas especificaciones técnicas se detallan en el Anexo 2.

3.2.4 Comunicación entre Tarjetas

Para la comunicación se utilizaron los pines del puerto serial UART (transmisión Tx y recepción Rx) de cada una de las tarjetas usadas, tal y como se muestra en la Figura 3.14: de la misma manera se muestran los módulos requeridos para la comunicación

Figura 3.14. Comunicación inalámbrica de las tarjetas.



Configuración de la conectividad entre la tarjeta maestro y los módulos especiales.

3.3 Encoders

En el prototipo se tomó la decisión de usar los encoders cuyo funcionamiento se basan en sensores de efecto hall, es muy importante debido a que se necesita saber las revoluciones que se encuentra cada rueda del robot con esto se garantizó tener información exacta de la posición en la que se encuentra el prototipo, las especificaciones técnicas del encoder se detallan en el Anexo 2.

3.4 Desarrollo del Software

Este capítulo detalla cada uno de los pasos realizados para el desarrollo e implementación de los algoritmos de control para las tarjetas raspberry PI3 maestra, raspberry PI3 touch, tarjeta auxiliar, arduino mega 2560 y la interfaz de usuario.

3.4.1 Diseño del Software

El robot móvil hibrido omnidireccional cuenta con dos sistemas de locomoción (autónoma e inalámbrica), los cuales son seleccionados a través de la pantalla touch conectada a una raspberry PI3 extra. El modo inalámbrico permite el uso de la interfaz de usuario para el control de cada uno de los movimientos de los motores, tanto de la parte móvil como del brazo robótico mientras que el modo automático permite al robot detectar y evadir obstáculos. De la misma manera el robot consta con una aplicación extra que visualiza la posición del robot en longitud y latitud, la velocidad de cada uno de los motores, el ángulo de inclinación del robot tanto en el eje Y como en el eje X y la rotación en el eje Z.

3.4.1.1 Tareas de la Tarjeta Raspberry Pi3 Maestra

- Actuar como servidor Web.
- Recibir y procesar los datos provenientes de la interfaz de usuario de forma inalámbrica.
- Enviar los datos procesados a la tarjeta de control auxiliar.

3.4.1.2 Tareas de Tarjeta de Control Auxiliar

Activar los estados de funcionamiento (autónomo, inalámbrico) de acuerdo a la selección realizada por el usuario en la pantalla touch. Efectuar los procesos de locomoción, previamente programados según el dato recibido, enviado por la Raspberry pi3 maestra.

3.4.1.3 Tareas de Tarjeta Raspberry Pi3 Extra

Enviar el dato de selección en la pantalla touch a la tarjeta de control auxiliar.

3.4.1.4 Tareas de la Interfaz Gráfica de Usuario

El robot consta con dos interfaces gráficas una de control y otra de visualización. La interfaz gráfica de control fue realizada en un archivo html, de tal manera que al trabajar con la tarjeta Raspberry pi3 como servidor web, ésta actúa como página web a la cual se accede por medio de una dirección ip asignada por el servidor si la conexión es inalámbrica o directamente a la ip de la tarjeta Rapberry pi3 si la conexión es alámbrica.

Datos a visualizar:

- Video en tiempo real de la parte frontal del robot.
- Comandos a enviar

Plataforma móvil

- Adelante
- Atrás
- Izquierda
- Derecha
- Diagonal adelante derecha
- Diagonal atrás izquierda
- Diagonal adelante izquierda
- Diagonal atrás derecha
- Giro derecha en su propio eje
- Giro izquierdo en su propio eje

Brazo robótico

- Movimiento base
- Movimiento hombro
- Movimiento codo
- Movimiento muñeca
- Movimiento griper

Procesos

- Movimientos omnidireccionales del robot.
- Transporte de objetos.

La interfaz gráfica de visualización fue realizada en el software Visual Basic con una comunicación bluetooth entre la PC y la tarjeta arduino mega 2560. La misma consta con una ventana que permite la selección del puerto COM asignado al módulo bluetooth incorporado al robot.

Datos a visualizar:

- Inclinación de la superficie por donde se desplaza el robot.
- Ubicación del robot (latitud y longitud).
- Velocidad de cada uno de los motores de las llantas del robot.
- Petición de velocidad de las llantas (Encoders).

3.4.1.5 Mensajes de Datos

Son líneas de caracteres ASCII que se transporta desde la interfaz de usuario a las tarjetas de control y viceversa.

3.4.1.5.1 Mensajes para el Maestro (MM)

La tarjeta Raspberry pi3 maestra recibe los datos enviados de forma inalámbrica a través de la interfaz de usuario para que éste los direccione a la tarjeta de control auxiliar y se ejecuten las respectivas acciones tal y como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comandos de operación.

COMANDO	CARÁCTER
Adelante	A
Atrás	D
Izquierda	B
Derecha	C
Diagonal adelante derecha	G
Diagonal atrás izquierda	H
Diagonal adelante izquierda	F
Diagonal atrás derecha	I
Giro derecha en su propio eje	K
Giro izquierda en su propio eje	J
Detenerse plataforma móvil	E
Movimiento base izquierda	V
Movimiento base derecha	W
Movimiento hombro arriba	T
Movimiento hombro abajo	U
Movimiento codo arriba	R
Movimiento codo abajo	S
Movimiento muñeca arriba	P
Movimiento muñeca abajo	Q
Abrir griper	N
Cerrar griper	O
Proceso 1	Z
Proceso 2	X

Tabla de variables que acciona cada comando fue programado por los desarrolladores del proyecto.

3.4.1.5.2 Mensajes para el Esclavo (ME)

En este caso la tarjeta auxiliar trabaja de acuerdo a la opción seleccionada con la pantalla touch. Al activar el modo inalámbrico la tarjeta auxiliar recibe de la Raspberry pi 3 maestra los datos de accionamiento de cada uno de los motores del robot, tanto de la plataforma móvil como del brazo robótico.

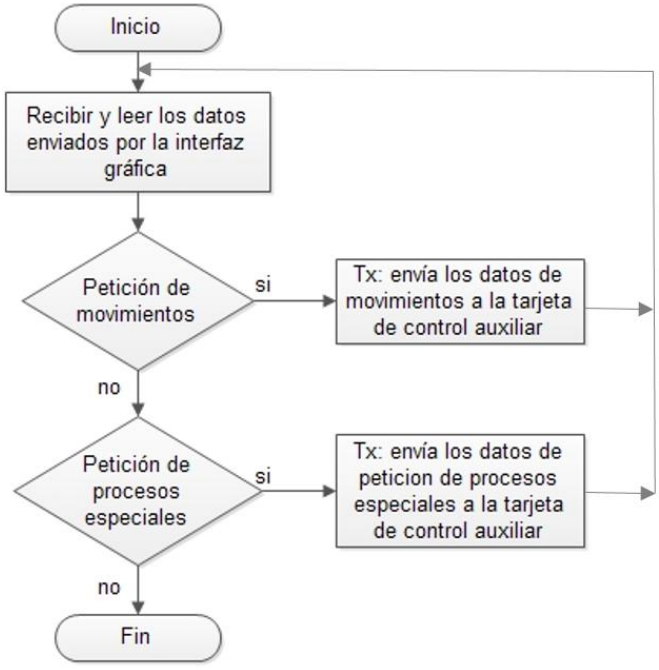
3.4.2 Codificación e Implementación de Software

A continuación, se muestra el funcionamiento de cada uno de los algoritmos implementados en las respectivas tarjetas de control y aplicaciones.

3.4.2.1 Raspberry Pi3 Maestra

En la figura 3.15 se aprecia el modo de trabajo de la tarjeta raspberry pi3 maestra, la cual recibe los datos de la interfaz de forma inalámbrica y los envía de forma alámbrica a la tarjeta de control auxiliar para el respectivo accionamiento de los actuadores del robot.

Figura 3.15. Estructura general del software de la tarjeta Raspberry maestro.

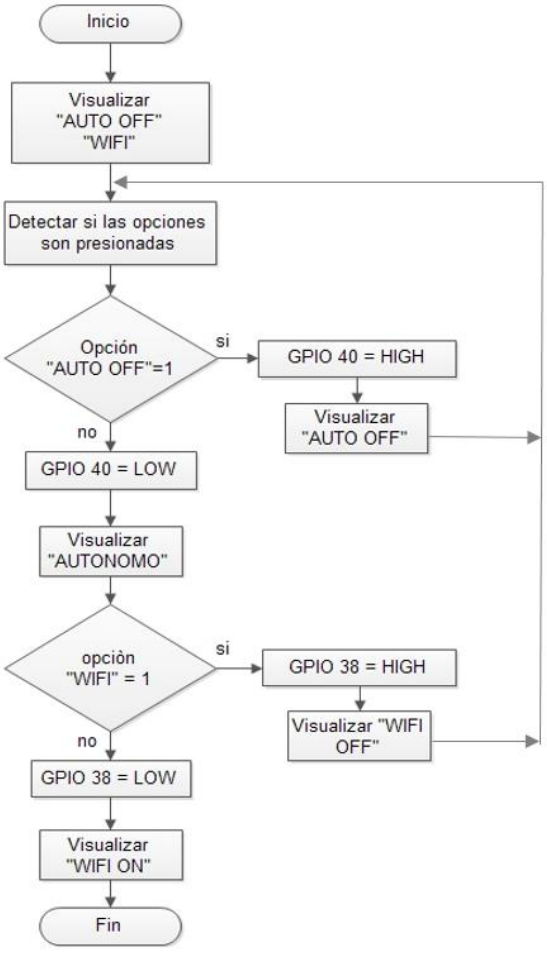


Representación gráfica del algoritmo de la tarjeta Raspberry maestro.

3.4.2.2 Raspberry Pi3 Esclavo -Pantalla Touch Screen

La figura 3.16 muestra el funcionamiento del algoritmo de la tarjeta Raspberry pi3 extra utilizado para el desarrollo de la aplicación touch, que permite la selección del modo de funcionamiento del robot (Autónomo o Inalámbrico).

Figura 3.16. Estructura general del software de la tarjeta Raspberry esclavo.

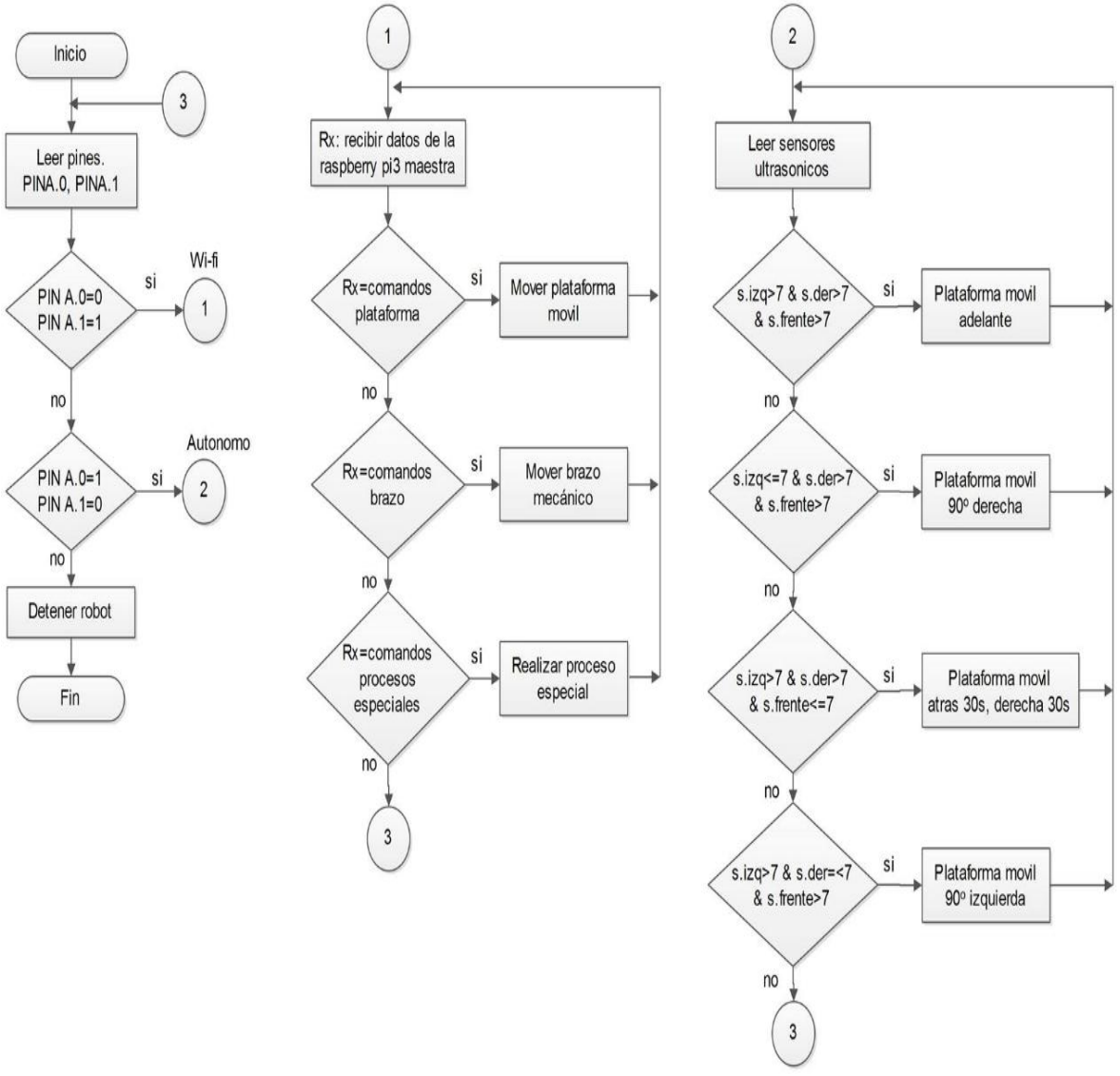


Representación gráfica del algoritmo de la tarjeta Raspberry esclavo.

3.4.2.3 Tarjeta de Control Auxiliar

En la Figura 3.17 se muestra la función desempeñada por la tarjeta de control auxiliar al recibir los datos de la maestra y activar la parte móvil y manipulador del robot o pedir los datos de los módulos especiales al arduino mega.

Figura 3.17. Función principal de la tarjeta de control auxiliar.

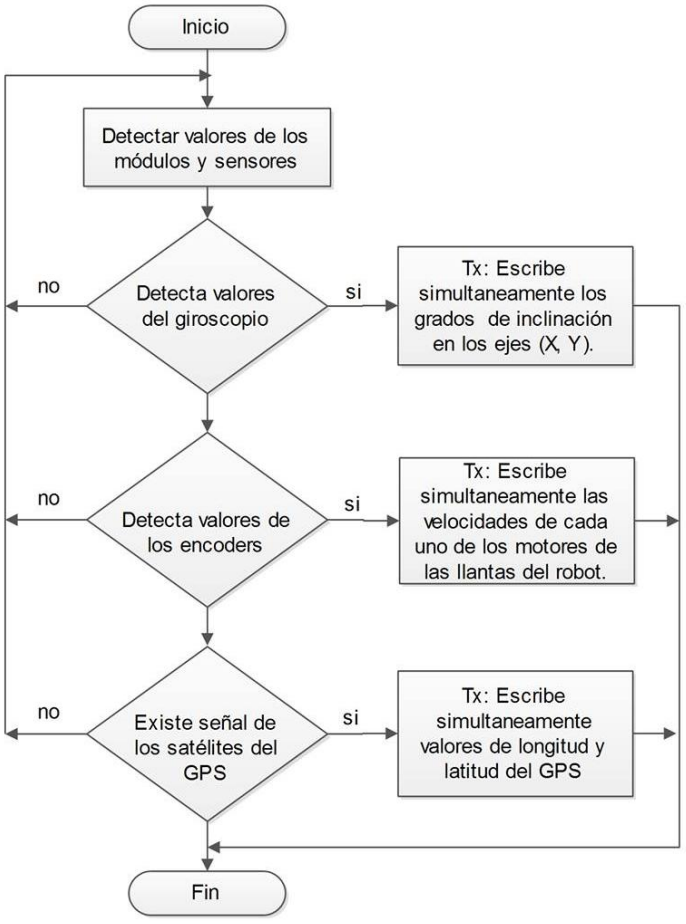


Representación gráfica del algoritmo de la tarjeta de control auxiliar.

3.4.2.4 Arduino

La Figura 3.18 muestra el trabajo realizado por el arduino mega cuando la tarjeta de control auxiliar recibe los datos de los módulos especiales y éste responde a la raspberry pi3 maestra.

Figura 3.18. Función principal de la tarjeta de control auxiliar.



Representación gráfica del algoritmo del arduino mega.

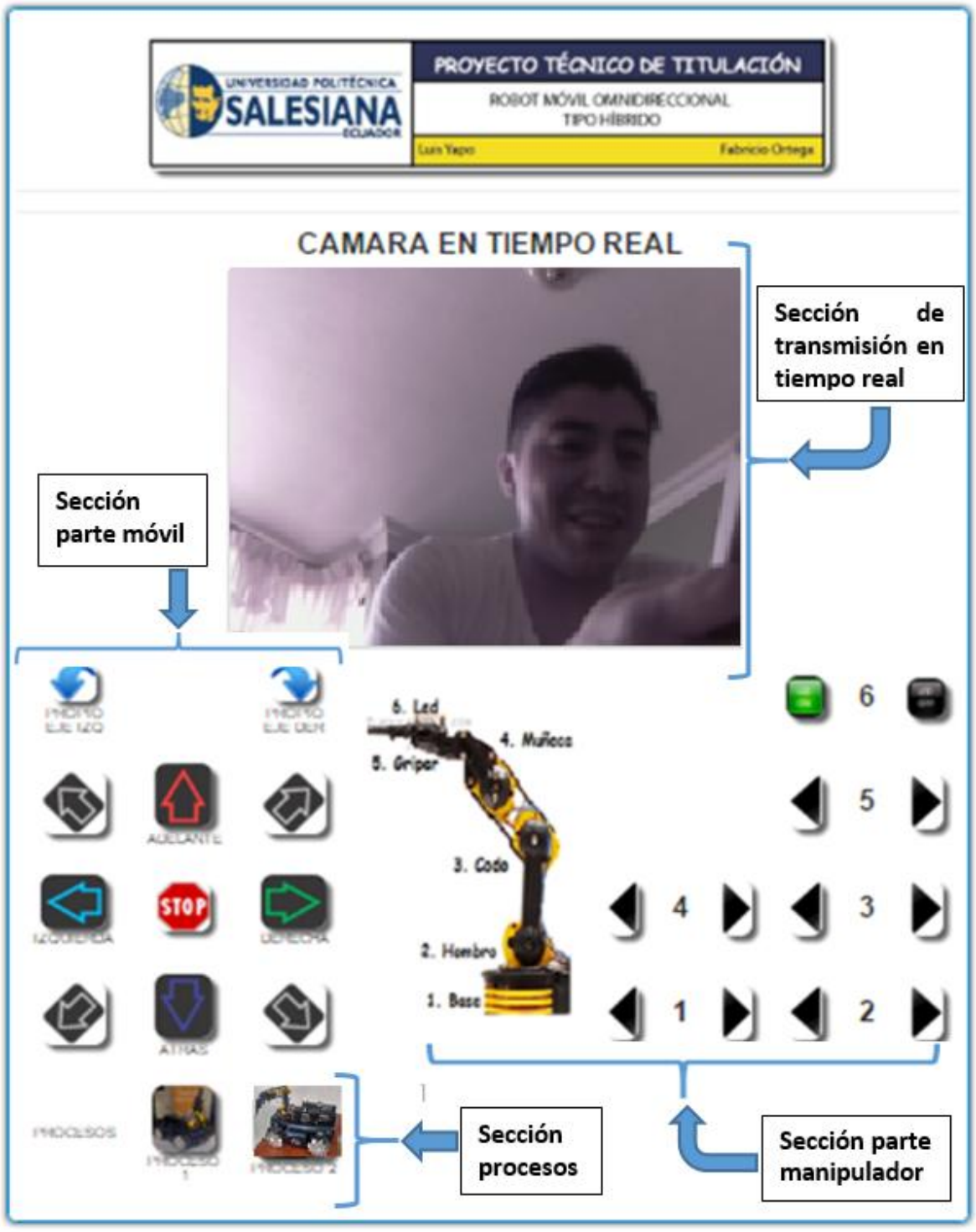
3.4.2.5 Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica del usuario está compuesta por botones indicadores que realizan la función de enviar los distintos comandos de operación de la tarjeta maestro hacia la tarjeta auxiliar, para que realice la respectiva ejecución de control del robot. En la Figura 3.19 se muestra la interfaz gráfica del usuario con las diferentes secciones que la componen.

La interfaz gráfica está compuesta de secciones como:

- Sección para el funcionamiento de la parte móvil.
- Sección para el funcionamiento del parte manipulador.
- Sección para la visualización de imagen en tiempo real.
- Sección para la ejecución de los procesos del robot.

Figura 3.19. Diseño de la interfaz gráfica del usuario.



Interfaz gráfica compuesta por secciones.

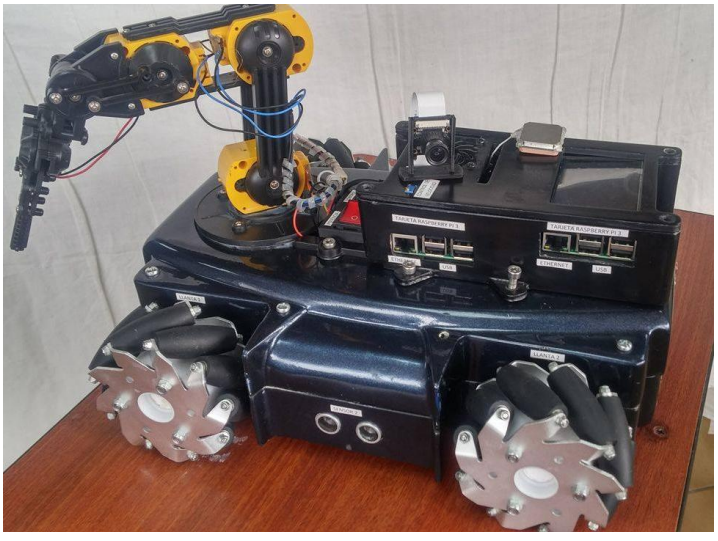
CAPÍTULO 4
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo describe cada una de las pruebas realizadas durante y al final de la construcción del robot además de los análisis posteriores a ellas, comprobando de esta manera el funcionamiento de sus aplicaciones.

4.1 Pruebas Hardware Mecánico

Al inicio del proyecto se tomó como referencia el robot de la empresa Kuka, llamado Youbot, del cual se realizó el diseño en el software Inventor de acuerdo al brazo mecánico, los motores, llantas, elementos mecánicos y electrónicos adquiridos, para que éstos se acoplen tanto fuera de la estructura como dentro de ella. En la Figura 4.1 se aprecia el robot terminado.

Figura 4.1. Robot Móvil Omnidireccional Tipo Hibrido Estructura Mecánica Final.



Prototipo de chasis final.

4.2 Pruebas de las Tarjetas de Control

Para realizar la prueba de comunicación entre las tarjetas se dividió las actividades en tres partes:

- Comunicación raspberry pi3 maestra – interfaz
- Comunicación raspberry pi3 maestra – tarjeta de control auxiliar
- Comunicación arduino mega – PC

4.2.1 Comunicación Raspberry pi3 Maestra - Interfaz

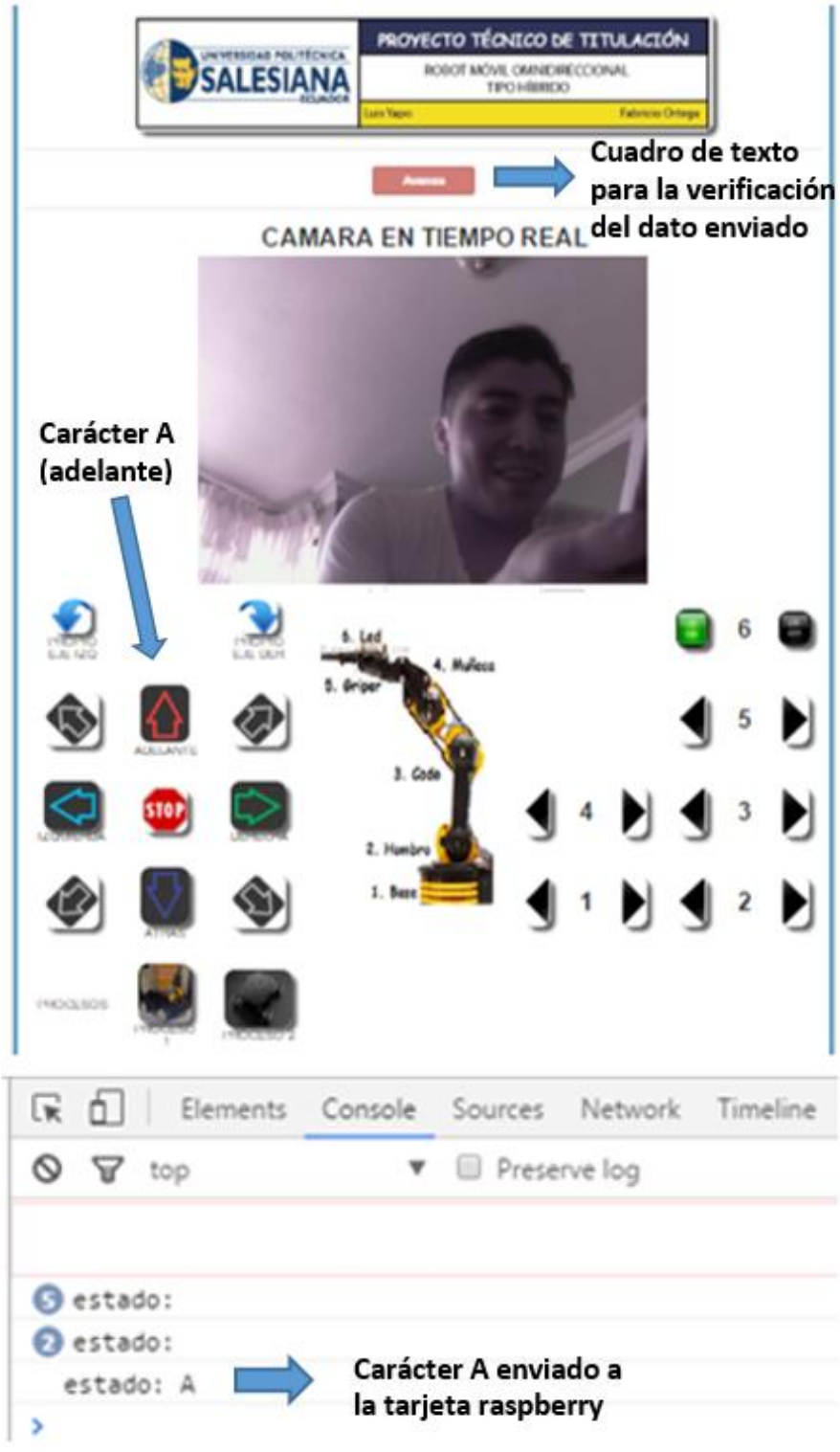
En esta prueba se verifica el funcionamiento de la comunicación inalámbrica y el correcto envió de datos desde la interfaz hacia la Raspberry pi3 maestra.

Como se mencionó en el Capítulo 3, la tarjeta Raspberry pi3 trabaja como servidor web, por lo que la interfaz gráfica fue realizada en una página web. Del mismo modo ésta posee un módulo wifi incluido que permite la comunicación inalámbrica con cualquier dispositivo inteligente.

En ésta prueba se debe comprobar que la interfaz gráfica realizada en la Raspberry pi3 maestra debe aparecer en un dispositivo inteligente de forma inalámbrica y que al presionar los botones se verifique que la maestra está recibiendo los caracteres de acuerdo a la Tabla 3.1 del Capítulo 3. Para esto es necesario que la Raspberry pi3 y el dispositivo estén en la misma red. En el Anexo 3, se da a conocer la forma para realizar éste procedimiento.
Para el envío y recepción de datos es muy importante que la Raspberry pi3 tenga todos los permisos activados, para esto se coloca el comando “sudo chmod ugo+rwx /dev/ttyS0” en el terminal de la misma.

En la Figura 4.2 se puede observar que al presionar el botón adelante se envía el carácter “A” de la interfaz del usuario, el mismo que es recibido por la Raspberry pi3 y enviado a la tarjeta auxiliar para la ejecución de control de la parte móvil y la parte manipuladora del robot.

Figura 4.2. Interfaz gráfica.



Parte superior Boton “adelante” presionado en la interfaz gráfica. Parte inferior Carater A recibido por la raspberry pi3.

Del mismo modo la interfaz cuenta con una ventana de visualización la cual muestra la transmisión en video de la cámara en tiempo real. Si se va a utilizar la cámara por primera vez es necesaria la activación de la interfaz para la misma. En el manual de usuario se muestra el procedimiento para activar dicha interfaz.

La Figura 4.3 se muestra la transmisión de video en tiempo real de la cámara conectada a la raspberry pi3, en la interfaz gráfica del usuario de forma inalámbrica.

Figura 4.3. Transmisión de video en tiempo real visualizada en la interfaz gráfica.

Prueba de funcionamiento de la cámara.

4.2.2 Comunicación Raspberry pi3 Maestra – Tarjeta de Control Auxiliar

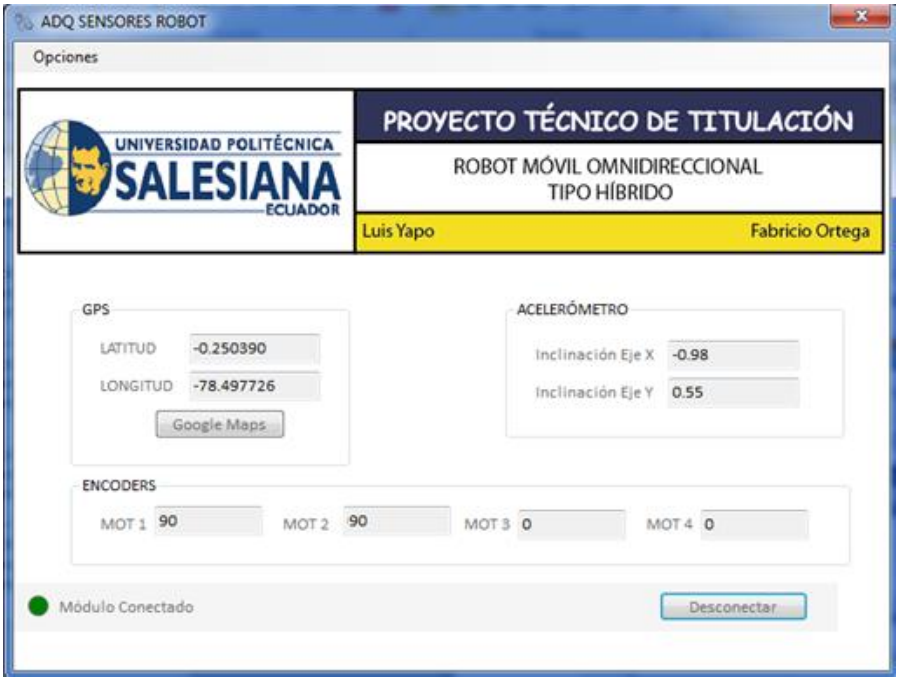
Esta comunicación es de forma alámbrica y se utilizó los puertos seriales de cada una de las tarjetas tal y como se mostró en la Figura 3.14 del capítulo 3 anterior. Para comprobar su funcionamiento se procede a presionar los botones de movimiento de la interfaz gráfica para que a través de la raspberry pi3 maestra lleguen a la tarjeta auxiliar y ésta realice la acción del botón presionado.

4.2.3 Comunicación Arduino Mega – PC

Para esta comunicación fue necesario la incorporación de un módulo bluetooth a la electrónica del robot, de la misma manera se usó una computadora con dicho módulo incorporado.

La interfaz cuenta con el botón “Conectar” que permite la conexión del arduino con la PC, la misma que al realizarse exitosamente muestra el mensaje “Módulo Conectado” y automáticamente los valores de los módulos especiales aparecerán en tiempo real tal como se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.4. Prueba de funcionamiento de la interfaz gráfica.



Interfaz conectada.

En el Anexo 3 se muestra el procedimiento para realizar la conexión mencionada.

4.3 Pruebas de Distancia de la Comunicación Inalámbrica

Para comunicaciones inalámbricas es recomendable colocar los módulos de radiación de señales fuera de la estructura del robot, por lo que se tomó la decisión de crear una caja extra en la parte superior del robot para la colocación de la tarjeta raspberry pi3.

Del mismo modo se colocó el módulo bluetooth lo más cerca posible a la superficie del robot. De ésta manera se garantiza que estos módulos tengan un mayor radio de cobertura, al momento de realizar las pruebas se logró alcanzar una distancia de 10 metros para el módulo WiFi y 30 metros para el modulo Bluetooth.

4.4 Pruebas de Movimiento

Después de comprobar el funcionamiento del hardware, de las tarjetas electrónicas y la comunicación entre ellas se procede a realizar la prueba de movilidad del robot, para esto se ha dividido a la prueba en dos partes.

- Autónomo
- Inalámbrico

Las mismas que pueden ser seleccionadas a travez de una pantalla touch incorporada al robot, tal como se muestra en la Figura 4.6.

Figura 4.5. Touch screen raspberry.

Opciones de Selección en la Pantalla Touch Para el Tipo de Locomoción del Robot.

4.4.1 Autónomo

Para esta opción se ha realizado la programación respectiva en la tarjeta de control auxiliar, la misma que es activada al seleccionar la opción “AUTONOMO” en la pantalla touch. Esta opción le da al robot la habilidad de detectar y evadir obstáculos, el proceso del robot es detectar los obstáculos que se presente en el entorno de navegación y evadir en un lapso de tiempo óptimo para que no sufra daño la estructura como se muestra en la Figura 4.6.

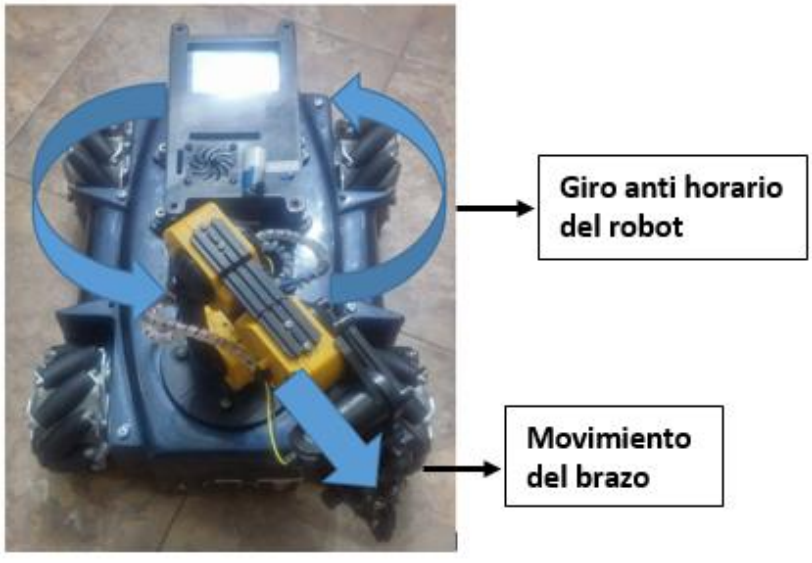
Figura 4.6. Prueba de funcionamiento, evasión de obstáculos.

Comportamiento del robot al detectar la presencia de un objeto (Objeto Detectado al Frente y un Costado).

4.4.2 Inalámbrico

En esta opción el robot realiza todas las acciones ordenadas por el usuario a través de la interfaz gráfica, las mismas que fueron previamente programadas en la tarjeta de control auxiliar. En la Figura 4.7 se aprecia el control inalámbrico de los movimientos del robot tanto de la estructura móvil como del brazo robótico incorporado.

Figura 4.7. Prueba de funcionamiento del robot.



Control inalámbrico del prototipo.

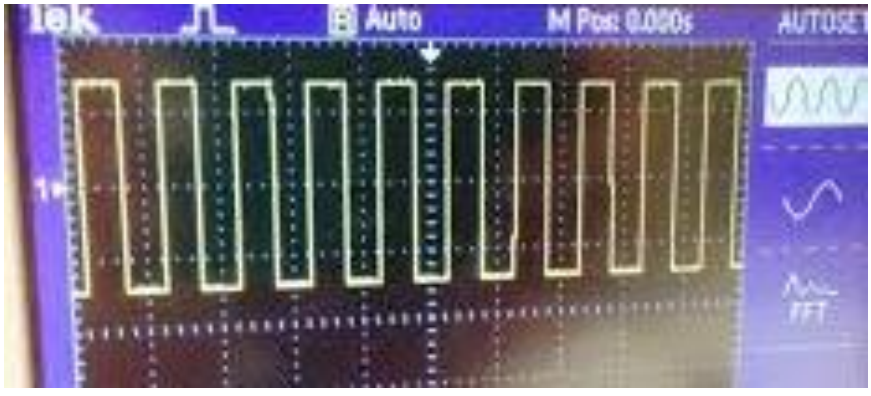
4.5 Sensores y Módulos Especiales

Además de tener el manejo de todos los posibles movimientos tanto de la estructura móvil como del brazo mecánico, el robot cuenta con módulos y sensores especiales a los cuales después de acondicionar sus señales se les realizaron pruebas para verificar su correcto funcionamiento, las cuales se muestran a continuación.

4.5.1 Encoders

Después de construir los encoders, se continuó con las mediciones de las señales obtenidas a través de un osciloscopio, se realizó el mismo procedimiento para los cuatro encoders elaborados.

Figura 4.8. Aspecto de funcionamiento de la interfaz gráfica.



Lectura de Señales de los Encoders.

En la figura 4.9 se puede visualizar los pulsos obtenidos de los encoders, en la interfaz gráfica muestra las velocidades en RPM de los motores de las llantas del robot móvil omnidireccional.

Movimiento adelante. La interfaz muestra la velocidad de los motores activados para éste movimiento, en este caso cuatro motores, tal como se muestra en la Figura 4.9.

Figura 4.9. Prueba de funcionamiento de los encoders.

Prueba 1 encoders. a) Movimiento del Robot, b) Velocidad de los motores mostrados en la interfaz.

Movimiento Diagonal. La interfaz gráfica muestra la velocidad de los motores activados para este movimiento, en este caso dos motores, tal como se muestra en la Figura 4.10.

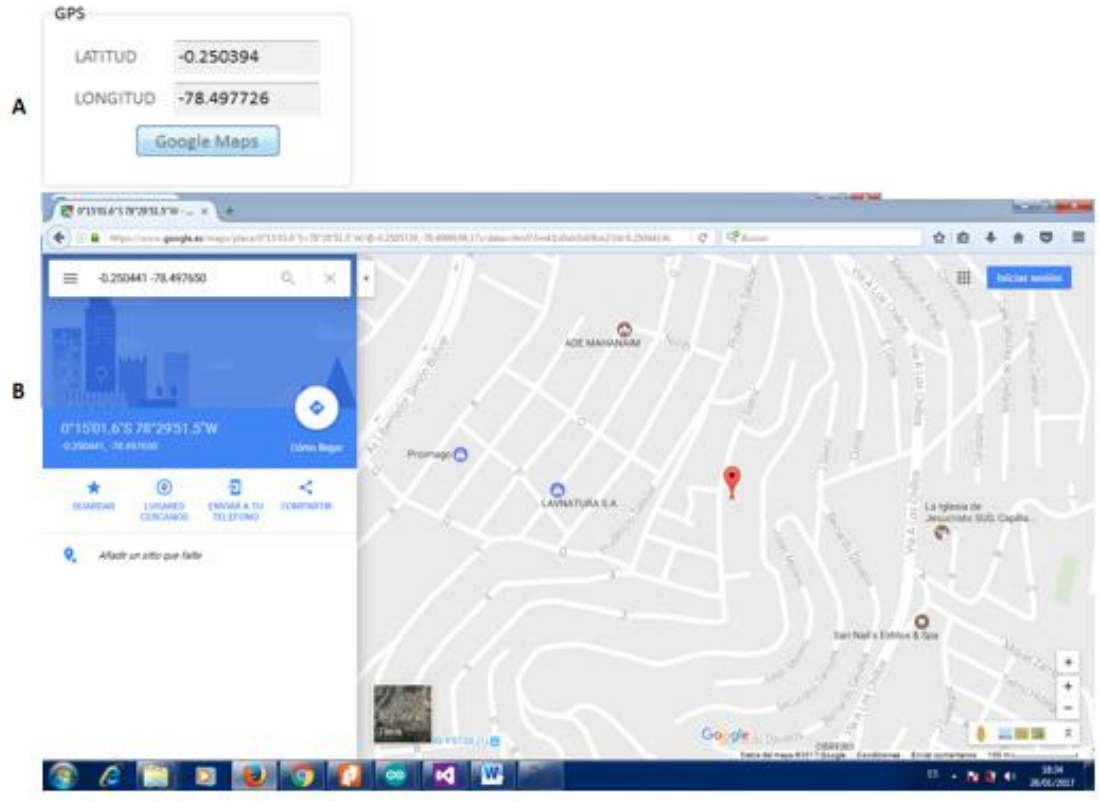
Figura 4.10. Prueba de funcionamiento de los encoders (45º).

Prueba 2 encoders. a) Movimiento del Robot (45º), b) Velocidad de los motores mostrados en la interfaz.

4.5.2 Modulo GPS

De la misma forma la interfaz gráfica muestra la información adquirida por el GPS, el cual después de obtener la señal satelital muestra los valores de longitud y latitud. La interfaz además posee la opción de abrir la ubicación del robot con la aplicación google maps, al presionar un botón.

Figura 4.11.Prueba de localización del robot.



Interfaz Gráfica con los Valores de Longitud, Latitud y Botón "Google Maps" Activado b) Ubicación del robot en google maps.

4.5.3 Giroscopio

El robot al tener un tipo de movimiento omnidireccional es necesario que la superficie por la que éste se trasporta sea plana para lo que se ha incorporado el módulo giroscopio. Para verificar su funcionamiento la interfaz muestra los ángulos de elevación en los ejes (X, Y)

Figura 4.12. Prueba de campo, módulo acelerómetro.

Variación de los ángulos de inclinación del robot en los ejes (X, Y). a) Robot en superficie plana, b) robot en superficie inclinada eje X, c) Robot superficie inclinada Eje Y

4.6 Manual de procedimientos de prácticas

Después de realizar las respectivas pruebas de hardware, software y módulos especiales, se procedió a elaborar un manual de procedimientos de prácticas del robot omnidireccional, el cual ayudara a potencializar las cátedras relacionadas a la robótica. Atreves del manual de procedimientos de practicas el investigador o estudiante podrá realizar la caracterización, programación y realización de nuevas aplicaciones para los procesos de control del robot (se recomienda revisar el anexo 3), por lo tanto es importante seguir el plan diseñado de prácticas que esta detallado en el Anexo 4 el cual consta con un formato específico para el desarrollo y funcionamiento de las diferentes aplicaciones del robot, Además cada una de éstas prácticas servirá de guía al estudiante en el proceso académico de aprendizaje..

4.6.1 Práctica 1: Caracterización del Robot Móvil Hibrido Omnidireccional

En el desarrollo de esta práctica el estudiante analiza específicamente aspectos físicos del prototipo, ya sean estos componentes mecánicos o electrónicos documentando en una tabla cada una de sus especificaciones técnicas. Finalizada la práctica el estudiante conoce cada uno de los componentes del robot, teniendo una idea de las posibles aplicaciones programables en el mismo. En el anexo 4 se muestra la hoja guía de la práctica mencionada.

4.6.2 Práctica 2: Utilización de los sensores ultrasónicos acoplados al robot móvil omnidireccional tipo hibrido

Después de conocer cada uno de los componentes, el siguiente paso es el uso y programación de los mismos, para lo cual en dicha práctica el estudiante comprenderá el funcionamiento del modo autónomo del robot haciendo uso de los sensores ultrasónicos incorporados en cada lado de la carcasa del mismo. Para realizar dicho procedimiento el estudiante debe seguir la guía de prácticas que se encuentra en el anexo 4, donde se detallan los objetivos y cada uno de los pasos para cumplirlos.

4.6.3 Práctica 3: Creación de botones en la interfaz gráfica y envió de caracteres

Al trabajar con una página web como interfaz gráfica es necesario que para futuras aplicaciones el estudiante pueda modificar la misma, por esta razón se desarrolló ésta práctica que permitirá que el estudiante conocer los lenguajes de desarrollo HTML y PHP para creación de nuevo pulsadores animaciones o inserción de imágenes a la interfaz. En el anexo 4 se muestra la guía para el desarrollo de dicha práctica.

4.6.4 Práctica 4: Movimientos Omnidireccionales del Robot

Realizar un proceso que permita visualizar todos los movimientos omnidireccionales del robot haciendo uso de la interfaz gráfica de control inalámbrico para la activación de dicho proceso. En el anexo 4 se muestra la guía para el desarrollo de dicha práctica.

4.6.5 Práctica 5: Elaboración de un proceso que muestre el funcionamiento de la plataforma móvil y el brazo mecánico del robot

Realizar un proceso que permita visualizar los accionamientos de los motores del robot, tanto de la parte móvil como del brazo mecánico, haciendo uso de la interfaz gráfica de control inalámbrico para la activación de dicho proceso. Crear un botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico que permita el envío de un carácter y hacer uso del botón creado en la práctica 3. En el anexo 4 se muestra la guía para el desarrollo de dicha práctica.

Gracias a la información recogida de las pruebas realizadas, se puede afirmar que los sistemas de locomoción tanto de la estructura móvil como del brazo robótico funcionan sin inconvenientes del mismo modo los módulos y sensores especiales incorporados al robot móvil omnidireccional hibrido.

CONCLUSIONES

- El robot se lo utilizará como una plataforma de estudio en la carrera de Ingeniería electrónica y en los campos relacionados con la robótica para que los estudiantes logren desarrollar habilidades que les permitan potencializar los conocimientos adquiridos.

- Para asegurar un buen desplazamiento sobre las superficies y considerando el peso de los elementos a incorporar al robot, se determinó que el material idóneo para la construcción de la plataforma móvil es la impresión 3D. Además de permitir un acabado detallista es un material robusto y capaz de cumplir con los requerimientos de movilidad del robot que se requiere para la etapa de pruebas.

- El sistema de movilidad del robot, navegó libremente en un entorno de superficie plana porque en las pruebas realizadas se observó los desplazamientos del prototipo, además de los diferentes movimientos omnidireccionales en la cual se pudo verificar que la plataforma móvil del robot cuenta con diez grados de libertad asegurando de esta manera una muy buena movilidad sobre las superficies planas

- El sistema es flexible y adaptable porque tiene una plataforma completamente abierta a los investigadores y puede ser modificable por el usuario permitiéndole tener total libertad para realizar las diferentes aplicaciones de control del robot.

- El hardware electrónico y mecánico fue diseñado y construido de tal manera que sea escalable, es decir que este puede estar sujeto a modificaciones y mejoras, para esto el robot consta con cierto número de puertos para futuras aplicaciones específicas.

- Para el desarrollo de actividades académicas se realizó un conjunto de prácticas relacionadas con la caracterización, uso, y programación del robot móvil omnidireccional de tal manera que el estudiante tenga además de una plataforma de aprendizaje practico, una guía de manipulación.

RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo de proyectos relacionados con la construcción de robots, es recomendable avanzar simultáneamente tanto por la selección de los elementos electrónicos y su circuitería, así como con el diseño de la estructura mecánica, de tal manera que no exista problemas por falta de espacio, enredos y confusiones en el cableado, si usted no tiene conocimiento sobre estos temas pues es muy importante que investigue y tome asesoría de una persona experta en el tema.

- El brazo mecánico incorporado al hardware de robot, es un brazo comercial de control a lazo abierto, es decir el sistema no es retroalimentado, por lo que no existe un control independiente exacto, por esto se recomienda para futuras mejoras cambiar el brazo mecánico por uno con sistema de control a lazo cerrado de tal manera que exista un mayor grado de exactitud en las aplicaciones de manipulación de objetos.

- En el caso de los módulos especiales la comunicación y el envío de datos del arduino a la PC es constante por lo que se recomienda trabajar con una velocidad de sincronización alta para asegurar una mejor apreciación de los datos recopilados por los sensores y módulos especiales, ya que al no ser de esta manera el buffer de almacenamiento de la interfaz gráfica de la PC transmitiría los datos de forma más lenta de la que le llega, por lo que se estarían mostrando valores atrasados,

- Para una mejor recepción de los datos del GPS es recomendable tener al robot en un entorno abierto ya que de esta forma recibiría la señal de los satélites e menor tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arduino. (s.f.). ArduinoBoardMega Arduino.

Carlos, S. (s.f.). Brazo Robotico de 5GDL con un Sistema de Control Modificable por el Usuario para fines de Investigación en Ingeniería Robótica.

Electrónico, S. (30 de 5 de 2012). Sensor de efecto hall.

ELECTRONILAB. (s.f. de s.f. de 2014). Módulo LM2596 Convertidor de Voltaje DC-DC

Factory, G. (s.f. de Marzo de 2015). Sensor Ultrasonico Módulo HC-SR04.

Heinerth Romero, J. C. (s.f.). Diseño y Construcción de un Robot Hexápodo tipo Rhex para la Exploración de ambientes Inflamables Controlado Vía Inálambrica.

Mirelez-Delgado, F. (s.f.). Control Servovisual de un Kuka youBot.

NEXUSrobot. (s.f.). Microrobo Mecanum wheels(Ilon wheel).

Orlando. (s.f.). HetPro.

Perez, D. d. (s.f.). DiegoPerezDeDiego SENSORES DE DISTANCIA POR ULTRASONIDOS.

Sánchez, R. G. (s.f.). Robótica_Móvil, AER Automática Robótica y Electrónica.

Teslabem. (S.F. de s.f. de 2015). modlo-gps-serial-neo-6m T.bem.

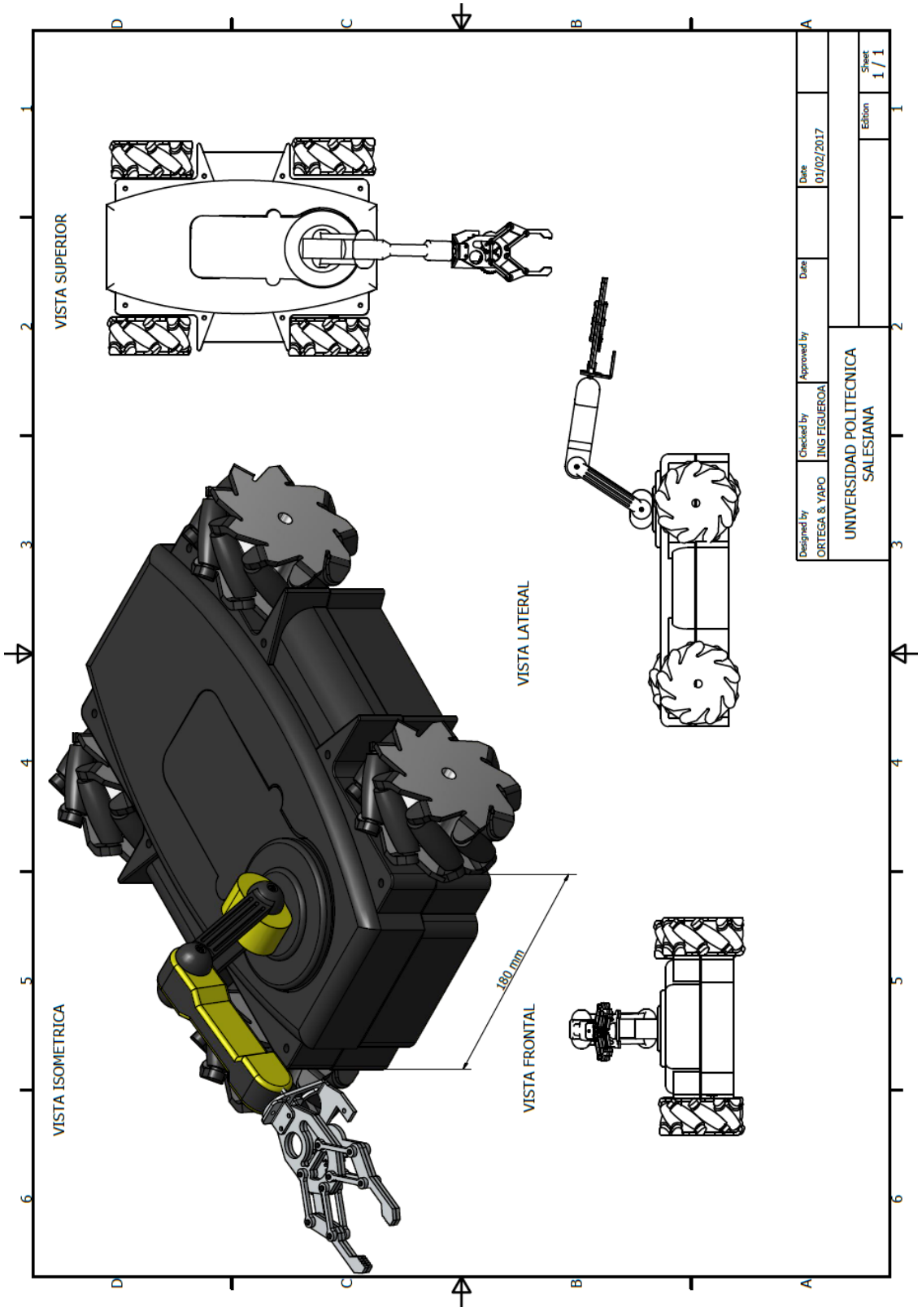
Tzafestas, S. G. (s.f.). Introduction to Mobile Robot Control (1 ed.). Waltham: Elsevier.

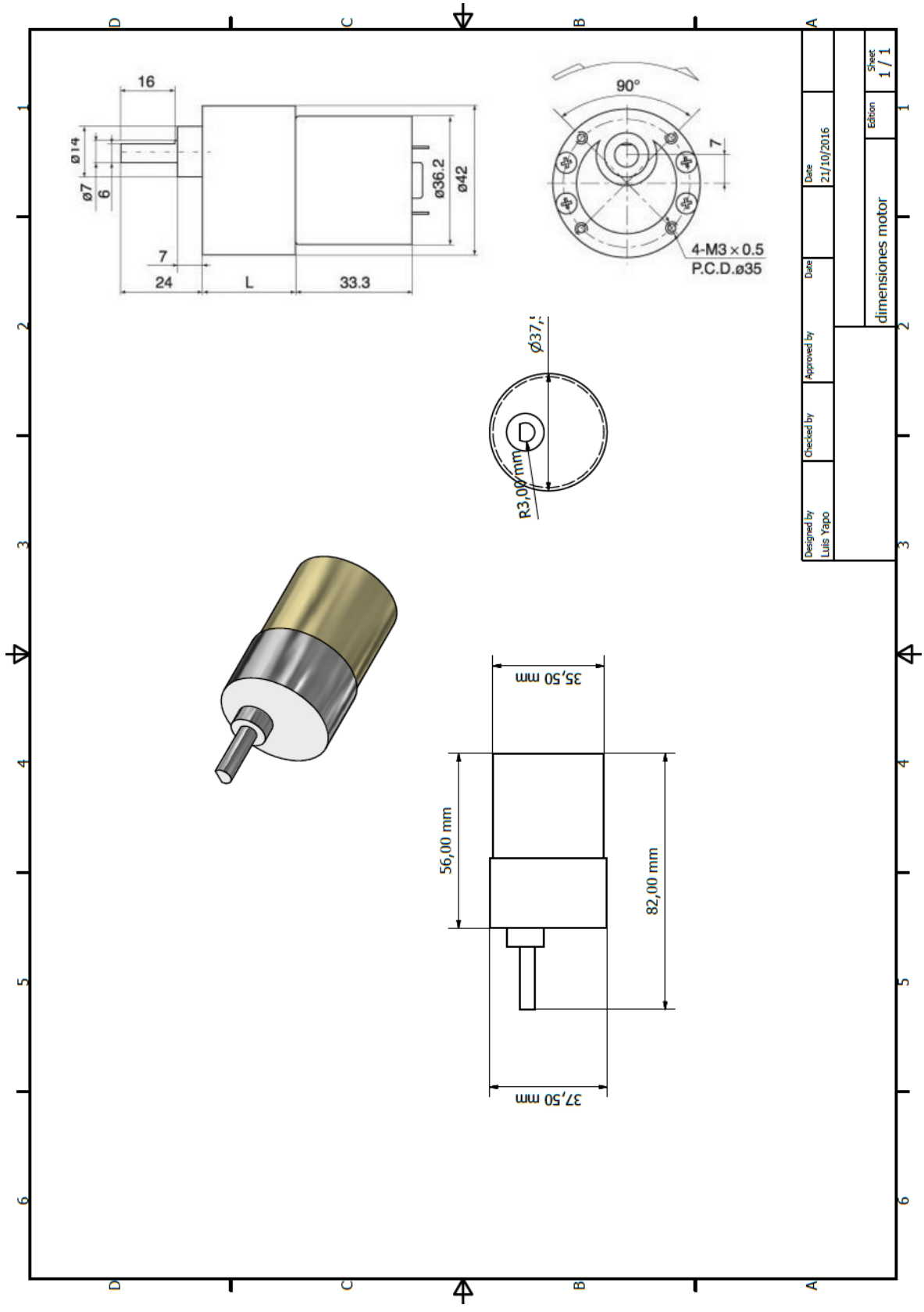
Vistronica. (s.f. de s.f. de 2016). Módulo L298N para Control de Motores Tienda Virtual de Electronica.

Yaguana Villamarin, S. E. (s.f.). Automatizacion y Monitoreo de un Brazo Robotico para la Manipulacion, Transporte y Clasificacion de piezas en un Area de trabajo.

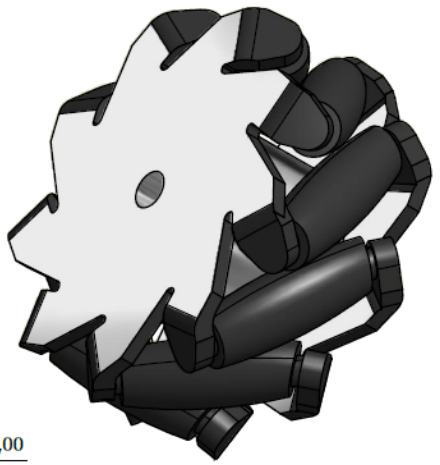
ANEXOS

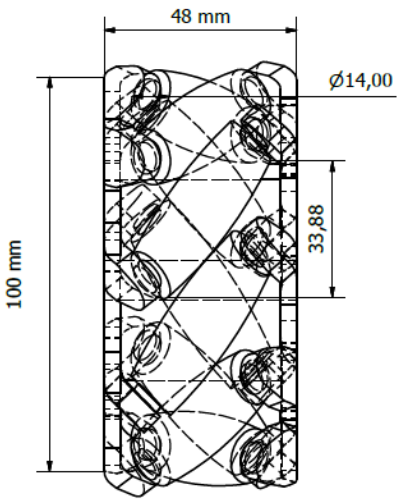
Anexo 1. Dimensiones del diseño

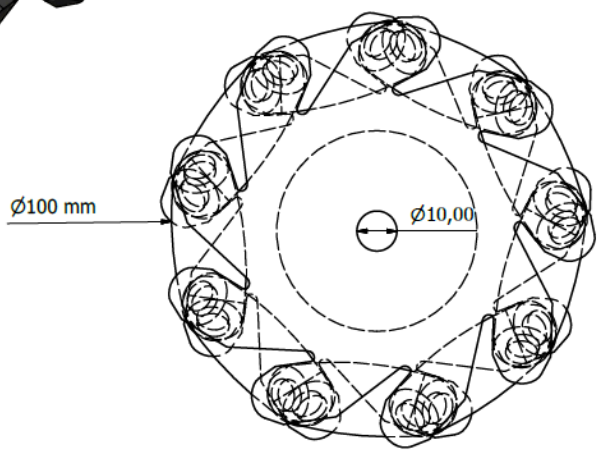



16
ø14
ø7
6
7
24
L
33.3
ø36.2
ø42
90°
7
4-M3 × 0.5
P.C.D.ø35
R3,00 mm
35,50 mm
56,00 mm
82,00 mm
37,50 mm
Designed by
Luis Yapo
Checked by
Approved by
Date
Date
21/10/2016
Edition
Sheet
1 / 1
dimensiones motor

LLANTA MECANUM







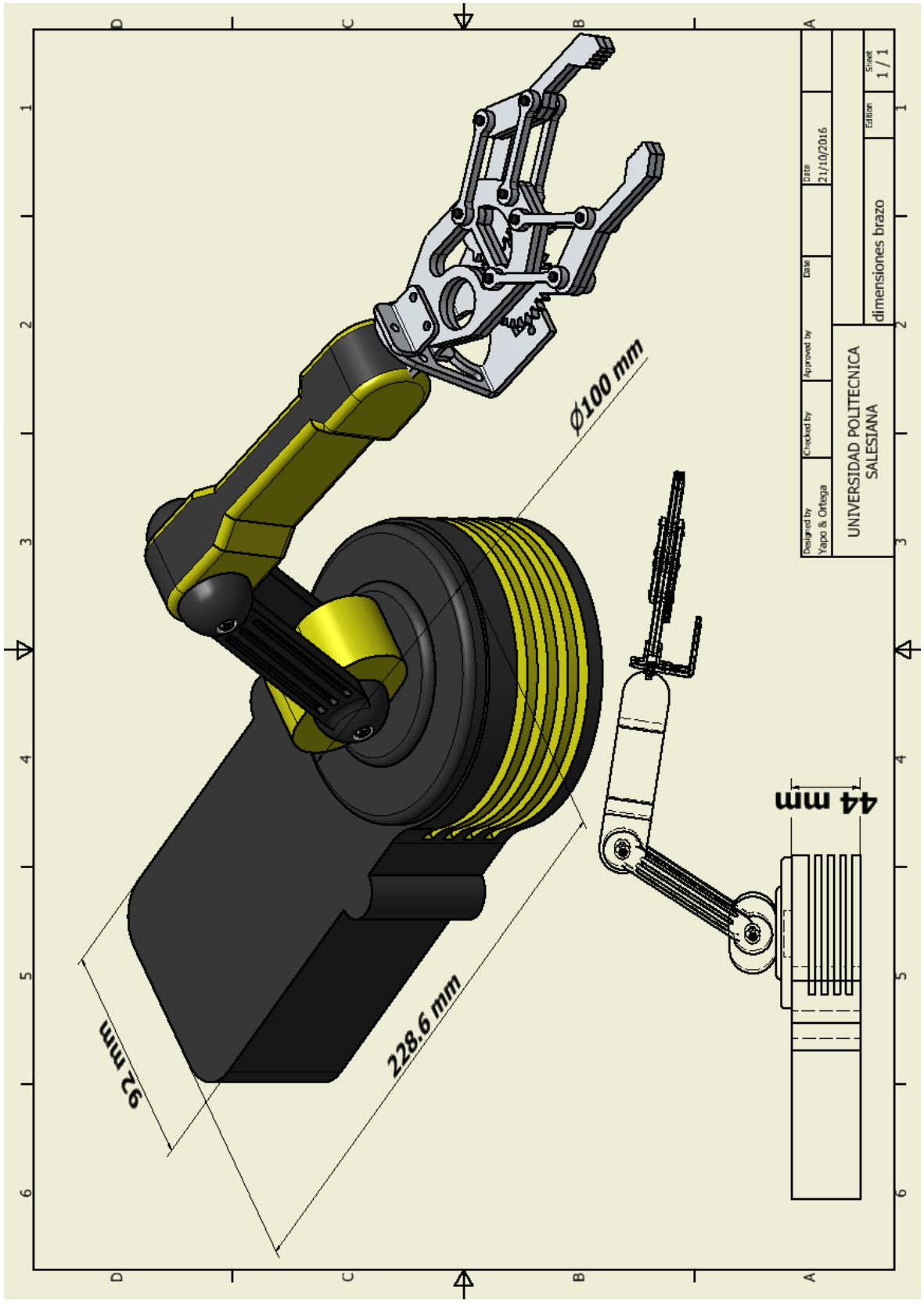
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
Yapo & Ortega					21/10/2016	

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

dimensiones llantas

Edition

Sheet 1 / 1


Ø100 mm
228.6 mm
92 mm
44 mm
UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
dimensiones brazo
Designed by Yaipo & Ortega
Checked by
Aproved by
Date
21/10/2016
Edition
Sheet 1 / 1

Anexo 2. Descripción de los materiales utilizados en el proyecto técnico.

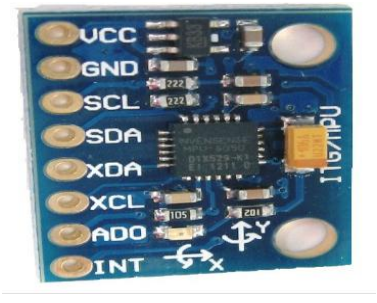
Sensor Efecto Hall 44E

Este sensor se lo utiliza como encoder, para la visualización de la velocidad de cada rueda del robot móvil omnidireccional por medio de una serie de pulsos al momento que detecta un campo electromagnético con un imán, el mismo que se encuentra montado en cada rueda del prototipo. El sensor produce un voltaje de salida, el cual es proporcional al producto de la corriente y la fuerza del campo magnético. De tal manera que si conocemos la corriente y la fuerza del campo magnético, el sensor nos permite realizar la detección de metales.

Descripción	
Pin 1	Vcc
Pin 2	Dout
Pin 3	Aout
Pin 4	Gnd

Acelerómetro ADXL-335

El circuito integrado MPU-6050 contiene un acelerómetro y giroscopio MEMS en un solo empaque. Cuenta con una resolución de 16-bits, lo cual significa que divide el rango dinámico en 65536 fracciones, estos aplican para cada eje X, Y y Z al igual que en la velocidad angular. El sensor es ideal para diseñar control de robótica, medición de vibración, sistemas de medición inercial (IMU), detector de caídas, sensor de distancia y velocidad, y muchas cosas más.

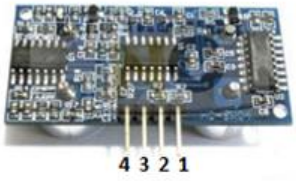


Sensor ultrasónico HC-SR04

El HC-SR04 es un sensor de distancia es capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra, dicho objeto es detectado en un rango de 2 a 450 cm. El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición, donde se tiene un receptor que emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos se destaca por su bajo consumo, gran precisión y bajo precio.

Características técnicas del sensor ultrasónico HC-SR04

Características		**Pines deconexión**
Dimensiones del circuito	43x20 x 17 mm	VCC
Tensión de alimentación	5 Vcc	
Frecuencia de trabajo	40 KHz	Trig (Disparo de ultrasonido)
Rango máximo	4.5 m	
Rango mínimo	1.7 cm	Echo (Recepción de ultrasonido)
Duración mínima del pulso de disparo	10 µS	
Duración del pulso eco de salida (nivel TTL)	100-25000 µS	GND
Tiempo mínimo de espera	2m mS	



Descripción	
Pin 1	Vcc
Pin 2	Trig
Pin 3	Echo
Pin 4	GND

Motor reductor DC ZGB37RG

Especificaciones del motor reductor DC

Especificaciones	
Tensión nominal	24V DC
Corriente nominal	0.33A
Velocidad de salida	120 rpm
Par nominal	11.3Kg.cm
Diámetro del eje	6mm/0.236"
Diámetro de la parte de caja de cambios	37mm/1.456"
Diámetro de la parte del motor	37mm/1.4"
Longitud total (aprox)	77mm/3.03"
Material	Metal, componentes electrónicos
Peso	183g

Características técnicas del motor reductor DC

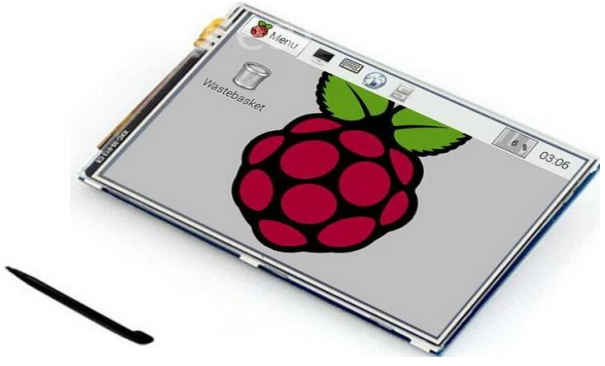
Datos técnicos					
Voltaje (VDC)	24V	24V	24V	24V	24V
Modelo del motor	35g	50g	50g	50g	50g
Relación de reducción	1/516	1/227	1/148	1/95	1/47.5
Caja de cambios (longitud mm)	30.5	29.5	26.5	26.5	24.5
Velocidad sin carga (rpm)	6	20	30	50	100
Velocidad nominal (rpm)	4.2	14	21	35	70
Par nominal (Kg.cm)	15	13	8.6	4.8	2.6
Corriente nominal (AMP)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

Brazo robótico OWI 535

El OWI-535 brazo robótico es un kit robótico a control remoto en una configuración angular. Cada motor posee una caja de cambios , el OWI-535 cuenta con cinco grados de libertad: la muñeca con un movimiento de 120°, el codo con un movimiento de 300°, el hombro con un movimiento de 180°, la base con un movimiento de 270° y el griper con una apertura de agarre de 0 - 4.5cm. Cuando una de las cajas de cambio encuentra una resistencia excesiva al movimiento, se produce un ruido que avisa que debe detener el movimiento del brazo en esa dirección. Además posee un led que iluminara lo que la pinza está sosteniendo, el led blanco está montado en la "mano" del brazo.

Raspberry Pi B B 4 " + PI2 Touch Screen

La pantalla táctil LCD se utiliza en el proyecto para visualizar una interfaz hombre-máquina ideal y mostrar un sistema operativo donde permite escoger las opciones de locomoción del robot (autónomo, inalámbrico), diseñada especialmente para la tarjeta de control raspberry utilizada en el proyecto.



Características técnicas de la Touch Screen Raspberry

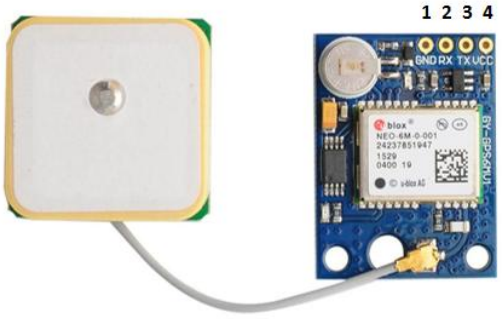
Interface			Parámetros
Pin No	**Símbolo**	**Descripción**	
1, 17	3.3V	Entrada de alimentación positiva	Tipo de LCD: TFT
2, 4	5V	Entrada de alimentación positiva	Interfaz LCD, SPI
3, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 15,16	NC	NC	Tipo de pantalla: Resistiva
6, 9, 14, 20, 25	GND	Tierra	Colores: 65536
11	TP_IRQ	Panel táctil de .	Luz de fondo: Led
18	LCD_RS	Selección de registro de datos / instrucciones	Resolución: 480x320(pixeles)
19	LCD_SI/TP_SI	Entrada de datos SPI de LCD / panel táctil	Relación de aspecto: 4:3
21	TP_SO	Salida de datos SPI de panel táctil	Consumo de energía: TBD
22	RST	Reset	
23	LCD_SCK/TP_SCK	reloj SPI de LCD	Luz de fondo: TBD
24	LCD_CS	Selección de chip LCD	Temperatura de funcionamiento: ° C
26	TP_CS	Selección de chip panel táctil	

Modulo GPS NEO-6M

Modulo GPS con antena de cerámica su fuente de alimentación universal de 3V-5V, consta con una súper señal y una EEPROM que guarda los parámetros de configuración de datos. La velocidad del módulo por defecto es de 9600 y tiene un led indicador de señal.

Características básicas del módulo GPS NEO-6M

Dimensiones	
Orifico de montaje	3mm
Tamaño del módulo	23mm x 30mm
Tamaño de la antena	25mm x 25mm
Longitud del cable	50mm



Características	
Pin 1	GND
Pin 2	Rx
Pin 3	Tx
Pin 4	VCC

Raspberry PI Infrared IR Night Vision Surveillance Camera

El módulo de la cámara es un diseño complemento para la Raspberry Pi, sus dimensiones son alrededor de 25mm x 24mm x 9mm y su peso es poco más de 3gr. El modulo se conecta por medio de un bus de 15 pines, a la interfaz de serie exclusivo de 15 pines MIPI cámara (CSI). El autobús CSI es capaz de velocidades de datos muy altas, y se lleva exclusivamente datos de píxeles al procesador BCM2835. El sensor de la cámara tiene una resolución de 5 megapíxeles y tiene un lente de foco fijo a bordo. En términos de imágenes fijas, la cámara es capaz de imágenes estáticas de resolucion 2592 x 1944 píxeles, y también es compatible con 1080p30, 720p60 y 640x480p60 / 90 grabación de vídeo.

Tarjeta de Control Raspberry PI3

Se escoge a la raspberryPi como controlador del sistema, es un pequeño ordenador de placa reducida con arquitectura ARM tipo procesador de bajo costo, es muy similiar a la versión anterior Pi2 y su utilización es dirigida a utilizar en robótica o en automatizaciones, el sistema operativo de la Pi3 actualmente puede correr sistemas Linux que soporten procesadores ARM además la raspberry posee los elementos necesarios para la intercomunicación con las tarjetas esclavas que se utilizan en el robot, en la Figura 28 se puede observar la tarjeta de control utilizada.

Características de la Raspberry Pi3 Modelo B

Raspberry Pi 3 Modelo B	
CPU	Procesador a 1,2 GHz de 64 bits con cuatro núcleos ARMv8
GPU	Broadcom VideoCore IV
Memoria (SDRAM)	1 GB (compartidos con la GPU)
Puertos USB	4
Entradas de video	Conector MIPI CSI que permite instalar un módulo de cámara desarrollado por la RPF
Salidas de video	Conector RCA (PAL y NTSC), HDMI, interfaz DSI para panel LCD
Salidas de audio	Conector de 3.5 mm, HDMI
Almacenamiento integrado	MicroSD
Conectividad	Ethernet (RJ-45) 802.11n Wireless LAN. Bluetooth 4.1.
Periféricos	17 x GPIO y un bus HAT ID
Consumo energético	800 mA, (4.0 W)
Fuente de alimentación	5 V a 2A vía Micro USB o GPIO header
Dimensiones	85.60mm × 53.98mm
Sistemas operativos	GNU/Linux: Debian (Raspbian), Fedora (Pidora), Arch Linux (Arch Linux ARM), Slackware Linux.

Ruedas mecanum (rueda Ilon)

Mecanum Wheel también son conocidas como ruedas ilon Es una rueda convencional con una serie de rodillos unidos a su circunferencia, estos rodillos que tienen un eje de rotación a 45 ° con respecto al plano de la rueda en un plano paralelo a el eje de rotación de la rueda. Dependiendo de cada dirección individual de la rueda y la velocidad, la combinación resultante de todas estas fuerzas produce un vector fuerza total en cualquier dirección deseada permitiendo así que la plataforma se mueva libremente en la dirección del vector de fuerza resultante.

Especificaciones básicas de las ruedas mecanum

Descripción	Diámetro de la rueda	Radio de la rueda	No. De rodillos	Tipo de material	Material del rodillo	Peso neto	Capacidad de carga
Rueda derecha mecanum	100mm	50mm	9	Aleación de aluminio	Caucho	400gr	15kg
Rueda izquierda mecanum	100mm	50mm	9	Aleación de aluminio	Caucho	400gr	15kg

Batería Lipo 4000MAH

La batería de Polímero de Litio de 14.8V o más conocidas como baterías lipo es una parte muy esencial en el robot ya que permite un correcto funcionamiento de todos los componentes conectados a la misma, sus conectores son de tipo banana y de balanceo JST-XH 2S, tiene una alta capacidad de descarga 20-30c continuos, muy ligeras (455gr) y de gran rendimiento, sus medidas son 143 x 51 x 33 mm.

Filamento PLA

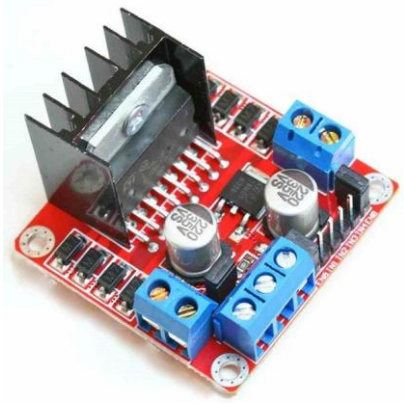
EL PLA es el material con el que se realizó la carcasa del robot y los bocines de cada rueda, con el método de la impresión 3d, la cual nos da una gran facilidad para obtener un acabado profesional de la estructura.

Driver de motores DC de 2 canales.

El driver L298N es un dispositivo que permite controlar el sentido de funcionamiento de motores a una corriente de salida por canal de hasta 2A. Además, este módulo consta con un disipador de calor y sus características de diseño permiten un rendimiento anti-interferencia excepcional, puede llegar a trabajar hasta con un nivel de tensión de entrada de 46V. Este módulo tiene gran capacidad de filtrado de ruido, cuenta con un diodo de protección ante corriente inversa, haciendo que su funcionamiento sea más estable y fiable.

Características técnicas del driver L298N

Controlador L298/ Doble Puente H	
Interfaz de potencia	7V~46V
Corriente máxima	2A por canal
Voltaje de control	5V
Nivel de entrada de señal de control	Nivel alto 2.3V <= Vin <= Vss Nivel bajo: -0.3V <= Vin <= 1.5 V
Corriente de control	36mA
Potencia de salida	5W
Luces indicadoras	Encendido, control, dirección
Temperatura de operación	-20°C~+135°C



Conversor de voltaje DC-DC LM2596 (Step Down)

El regulador de voltaje DC-DC (step down) permite tener un voltaje regulado a partir de una fuente de alimentación con un voltaje superior para regularlo a un voltaje de salida deseable. Es perfecto para el uso con microcontroladores, módulos, Arduino, PICs, Raspberry Pi, drivers para leds, servomotores, etc.

Características básicas del regulador de voltaje LM2596

Regulador LM2596	
Voltaje de entrada	De 4.5v a 40V
Voltaje de salida	De 1.5v a 35V
Corriente de salida	3A (Máximo)
Peso	15Gr aprox.
Frecuencia de switching	150 KHz
Dimensiones	43*20*14mm

Características	
Pin 1	Output -
Pin 2	Output +
Pin 3	Input +
Pin 4	Input -

Anexo 3. Manual de usuario.

ENCENDIDO DEL ROBOT

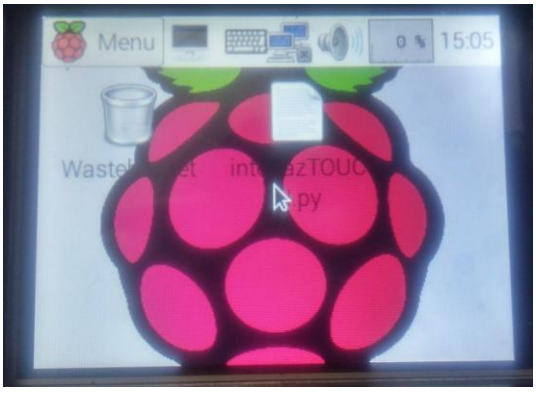
Para encenderlo, el robot consta con dos interruptores: uno activa la parte de control (Tarjetas electrónicas) y el otro la parte de potencia (Motores).

Nota: Para evitar accidentes se debe encender la parte de control primero y realizar las configuraciones necesarias en las tarjetas.

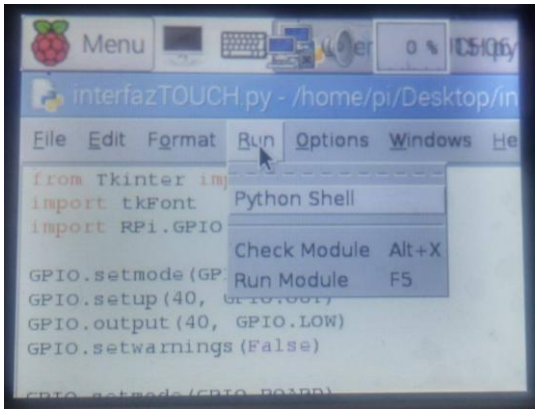
CONFIGURACIÓNES BASICAS

Pantalla Touch

Para poner en macha la aplicación de la patala touch, el usuario debe acceder al archivo del escritorio llamado “Interfaz TOUCH py”



Seleccionar la opción “Run” y a continuación la opción “Run Module”



La aplicación de selección de tipo de locomoción del robot aparecerá enseguida.

Acceso a Tarjeta Raspberry pi3 Maestra

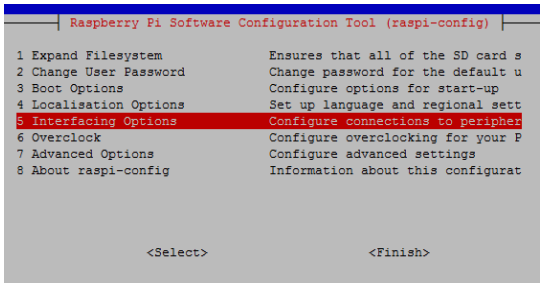
Para acceder a la tarjeta raspberry pi3 es necesario que el usuario disponga de un cable ethernet y el software putty, ya que el acceso se lo hacer por el terminal de raspberry.

Ejecutar Putty e ingresar la dirección de la IP de la tarjeta, para este caso es:169.254.187.76

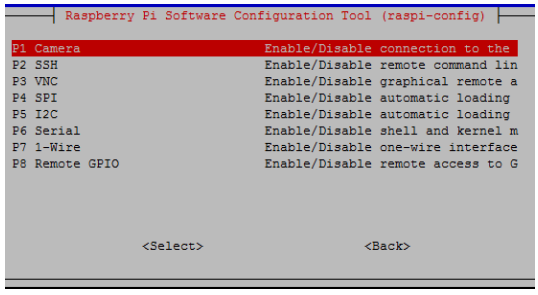
Acceder con el usuario “pi” y la contraseña “raspberry”

Activación de Interfaz de Cámara pi

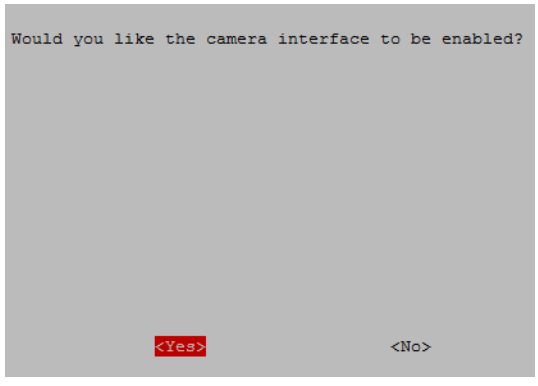
Si se usa la cámara por primera vez es necesaria la activación de la interfaz para la misma, para lo cual en el terminal de la raspberry se coloca el comando "sudo raspi-config", a continuación, aparece una ventana donde se selecciona la opción "5 Interfacing options",



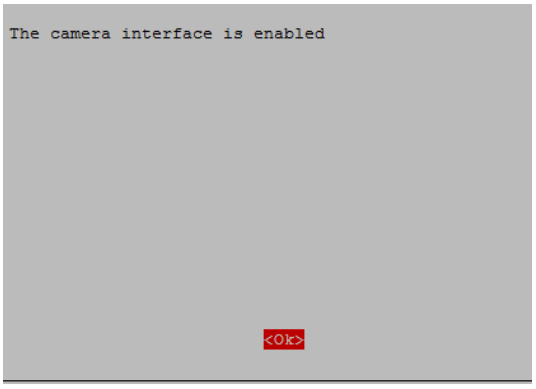
Simultáneamente se selecciona la opción "camera"



y a continuación la opción habilitar "enable"



Aparecerá un mensaje mostrando que la interfaz de la cámara ha sido habilitada.



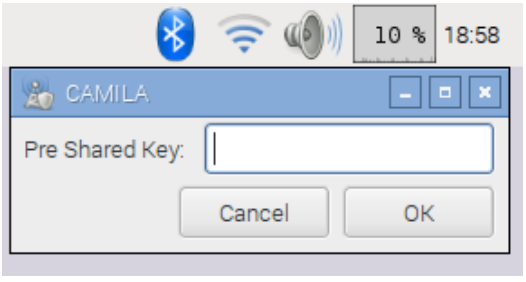
Para que los cambios sean efectuados se recomienda apagar y volver a encender la raspberry pi3. Para apagar la tarjeta de una forma segura se usa el comando "sudo shutdonw –h now"

Conexión inalámbrica Raspberry pi3 – Interfaz Grafica

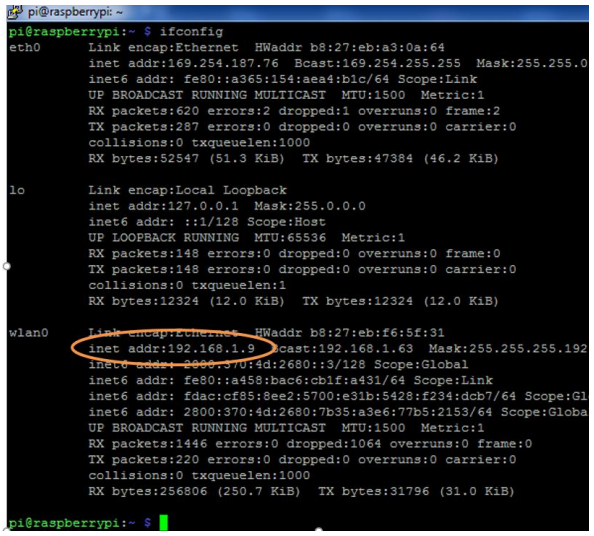
Este proceso se debe realizar cada vez que el usuario desee conectar a una red inalámbrica nueva, para esto la tarjeta debe estar conectada a una pantalla, un mouse y un teclado.

En el escritorio de la tarjeta, acercar el mouse al icno de WiFi y verificar las redes disponibles.

Seleccionar la red a la que el usuario desee conectarse y escribir la clave de acceso.



Ahora que la tarjeta esta en red, se verifica la dirección IP a la que direcciono la interfaz gráfica, para eso se ejecuta el comando “ifconfig”.

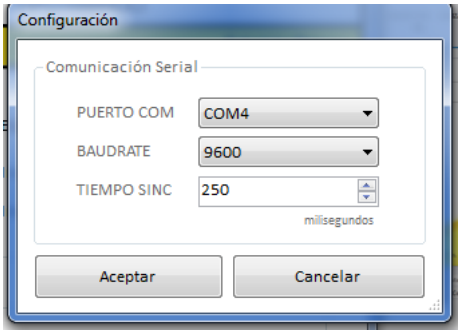


Colocar la IP en el buscador de la PC o de cualquier dispositivo inteligente, la página que contiene la interfaz se cargará en pocos segundos.

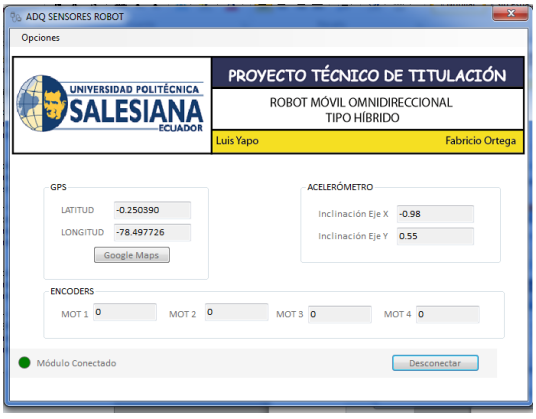
Para el envío y recepción de datos es muy importante que la raspberry tenga todos los permisos activados para esto se coloca el comando “sudo chmod ugo+rwx /dev/ttyS0” en el terminal de la tarjeta.

Comunicación Aduino Mega - PC

La interfaz gráfica cuenta con una ventana de configuración, que permite la selección del puerto COM asignado al módulo bluetooth del robot, la velocidad de transmisión (9600) y la velocidad de sincronización (dato variable, según las características de la computadora).



Al tener una conexión exitosa aparecerá el mensaje "Modulo Conectado" y automáticamente los valores de los módulos especiales aparecerán en tiempo real.



Carga de Baterias

El robot movil onmidireccional consta con dos baterías: 14.7V a 4A de 4 celdas para la parte de potencia y 11.1V a 2,2A de 3 celdas para la parte de control.

Con las baterías a plena carga y un uso moderado, el robot funciona un tiempo aproximado de 01h30min.

Para la mayor seguridad se recomienda colocar los cables de conexión de las celdas y conectarlos a los tester de medición, de esta manera se verificará el estado de las baterías.

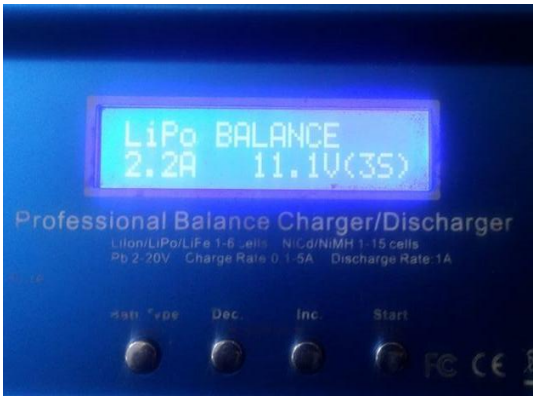
Para realizar la carga de las baterías realice los siguientes pasos.

1. Tener a la mano el cargador y los cables de conexión.

2. Conectar los cables principales y de las celdas según la etiqueta y los colores al cargador y el robot.

3. Encender el cargador y seleccionar el tipo de batería. (Lipo 3S 11.1V 2.2A)

4. Aceptar la selección y confirmar la carga. Al terminar la carga, balancear la batería con la opción Balance.



5.Repetir los pasos 3y 4 para la batería de 14.7V a 4A.

Anexo 4. Manual de procedimientos de prácticas

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td>REVISION 1/1</td><td>Página 1 de 5</td></tr>
<tr><td colspan="2">UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR</td><td colspan="2">MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE PRÁCTICAS</td></tr>
<tr><td>LABORATORIO</td><td colspan="3">Electrónica</td></tr>
<tr><td>CARRERA</td><td colspan="3">Ingeniería Electrónica</td></tr>
<tr><td>SEDE</td><td colspan="3">Quito - Campus Sur</td></tr>
</table>

1. DATOS INFORMATIVOS

a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA: Robótica

b. No. DE PRÁCTICA: 1

c. NÚMERO DE ESTUDIANTES POR MÓDULO:

d. NOMBRE INSTRUCTOR: Ing. Johanna Celi. Ing. Junior Figueroa

e. TIEMPO ESTIMADO: 2 horas

2. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA: Caracterización del Robot Móvil Hibrido Omnidireccional.

b. OBJETIVO GENERAL:

Realizar la caracterización de cada uno de los componentes del robot móvil omnidireccional tipo hibrido, tanto de su parte electrónica como su parte mecánica, detallando y especificando cada una de las características técnicas, para asegurar un mejor manejo del mismo.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Definir los componentes electrónicos que constituyen el robot, detallando cada una de sus características técnicas y de funcionamiento, para comprender el funcionamiento de los mismos y sus posibles aplicaciones.

Conocer el modo de funcionamiento del robot móvil omnidireccional, conexiones, advertencias, etc., para evitar posibles fallos en el sistema por falta de información.

d. ENUNCIADO

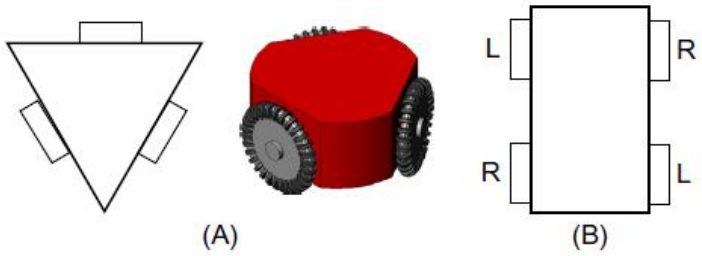
Mediante la observación detallada del robot móvil híbrido omnidireccional y con la ayuda del diagrama electrónico del mismo, realizar la caracterización de cada uno de sus componentes mecánicos y del mismo modo de sus elementos electrónicos.

e. MARCO TEÓRICO

Un robot omnidireccional es un robot que posee máxima maniobrabilidad en el plano, es decir, puede moverse en cualquier dirección sin necesidad de rotar o reorientarse, a diferencia otros tipos de robots que requieren girar y cambiar de dirección para llegar a un punto deseado.

Este tipo de robots pueden ser construidos usando tres, cuatro o más ruedas omnidireccionales como se muestra en la Figura 1.

Robots Móviles Omnidireccionales.



Grafica de Robots Móviles Omnidireccionales. (A) Caso de tres ruedas (B) Caso de cuatro ruedas

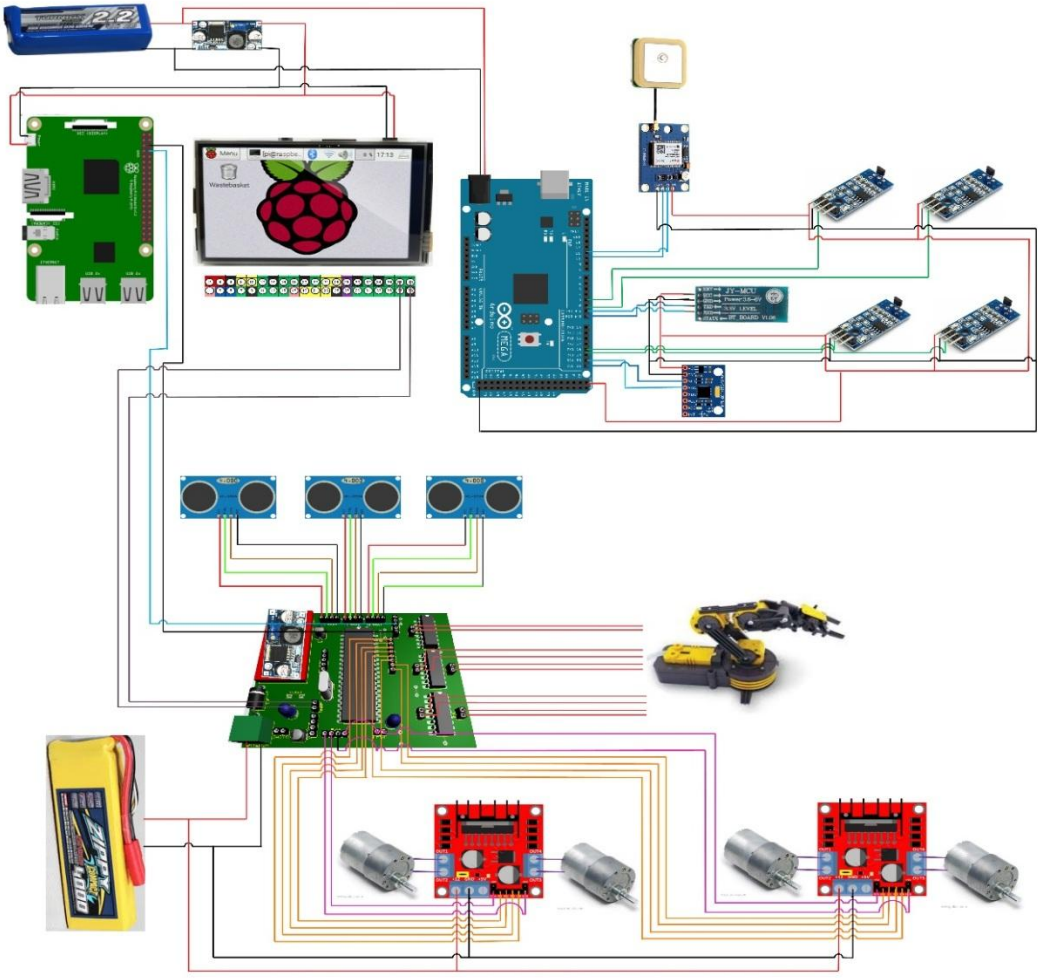
Por otra parte, un robot hibrido aquel que une dos sistemas robóticos en uno solo, en este caso, un brazo mecánico acoplado a la plataforma móvil omnidireccional de cuatro ruedas, tal como se muestra en la Figura 2.
Con el robot móvil híbrido omnidireccional se ha combinado la característica del brazo mecánico que es la manipulación de objetos, con la de la plataforma móvil, la cual permite un desplazamiento omnidireccional gracias a sus llantas especiales mecanum.

Robot Móvil Híbrido Omnidireccional.

Las cuatro ruedas de un robot omnidireccional tienen una distribución típica como se muestra en la Figura 2. De las cuatro ruedas, dos de ellas son conocidas como ruedas zurdas (lado izquierdo L) y las otras dos ruedas diestras (lado derecho R). Las ruedas zurdas tienen un ángulo de rodillo $\alpha = 45°$ y las diestras un ángulo $\alpha = -45º$.

Además del hardware mecánico visible, el robot cuenta con varios elementos electrónicos, tarjetas de control, sensores, actuadores y módulos especiales en su interior, cada uno de ellos cumpliendo funciones específicas para el buen desempeño del mismo. Para una mejor comprensión en la Figura 3 se muestra el diagrama electrónico del robot.

Diagrama Electrónico del Robot Móvil Híbrido Omnidireccional.



f. MARCO PROCEDIMENTAL

1. Observe detalladamente el hardware mecánico del robot y determine cada uno de sus componentes claramente visibles.
2. Verifique con el diagrama eléctrico del robot los elementos electrónicos internos del mismo.
3. Desarrolle una tabla de especificaciones técnicas para los componentes electrónicos y mecánicos encontrados en el hardware del robot.

g. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE) Robot móvil híbrido omnidireccional y diagrama eléctrico

h. REGISTRO DE RESULTADOS

Elemento	Característica

1. DATOS INFORMATIVOS

a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA: Robótica

b. No. DE PRÁCTICA: 2

c. NÚMERO DE ESTUDIANTES POR MÓDULO:

d. NOMBRE INSTRUCTOR: Ing. Johanna Celi, Ing. Junior Figueroa

e. TIEMPO ESTIMADO: 2 horas

2. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA: Utilización de los sensores ultrasónicos acoplados al robot móvil omnidireccional tipo hibrido.

b. OBJETIVO GENERAL:

Realizar una aplicación electrónica donde se evidencie la utilización de los sensores ultrasónicos para que el robot tenga la capacidad de detectar y evadir obstáculos.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Definir las configuraciones necesarias para el uso de los sensores ultrasónicos acoplados al chasis del robot y conectados a la tarjeta de control auxiliar, de tal manera que el estudiante determine de mejor manera el algoritmo a utilizar para el uso de los mismos.

Utilizar el software de Bascom AVR para la respectiva programación de la tarjeta de control auxiliar.

d. ENUNCIADO

Mediante el uso de los sensores ultrasónicos acoplados a los extremos del robot, realizar un algoritmo que permita al robot detectar y evadir obstáculos.

Realizar la programación en el modo de locomoción autónomo, el mismo que es seleccionado con la pantalla touch.

e. MARCO TEÓRICO

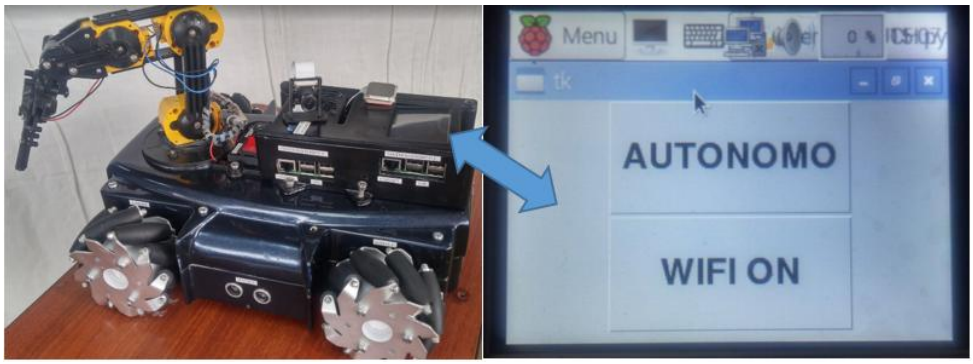
El HC-SR04 es un sensor de distancia es capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra, dicho objeto es detectado en un rango de 2 a 450 cm. El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición, donde se tiene un receptor que emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos se destaca por su bajo consumo, gran precisión y bajo precio.

Características técnicas del sensor ultrasónico HC-SR04

Características		**Pines de conexión**
Dimensiones del circuito	43x20 x 17 mm	VCC
Tensión de alimentación	5 Vcc	
Frecuencia de trabajo	40 KHz	Trig (Disparo de ultrasonido)
Rango máximo	4.5 m	
Rango mínimo	1.7 cm	Echo (Recepción de ultrasonido)
Duración mínima del pulso de disparo	10 µS	
Duración del pulso eco de salida (nivel TTL)	100-25000 µS	GND
Tiempo mínimo de espera	2m mS	

Sistemas de Locomoción

El robot consta con dos sistemas de locomoción, uno autónomo y otro inalámbrico. El robot consta con aplicación en la pantalla touch que permite la selección del modo de locomoción requerido.



Para aplicaciones de locomoción y procesos la programación debe ser cargada al AVR de la tarjeta de control auxiliar ya que a ésta están conectados los sensores ultrasónicos HC-SR04. Para este caso en particular la programación se la debe realizar dentro de la función de autónomo.

f. MARCO PROCEDIMENTAL

1. Realice el diagrama de flujo para el algoritmo que implementará en el microcontrolador según el enunciado propuesto.
2. Desarrolle en el compilador Bascom AVR la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
5. Programe el microcontrolador de la tarjeta de control auxiliar del robot y realice las pruebas de funcionamiento.

g. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE) Robot móvil omnidireccional tipo hibrido, laptop, programadora AVR.

h. REGISTRO DE RESULTADOS

ENUNCIADO	Funcionamiento	
	Correcto	Incorrecto
El robot Detecta los obstáculos de su frente		
El robot Detecta los obstáculos de su parte lateral izquierda		
El robot Detecta los obstáculos de su parte lateral derecha		
El robot Detecta los obstáculos de su partes combinadas.		

1. DATOS INFORMATIVOS

a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA: Robótica

b. No. DE PRÁCTICA: 3

c. NÚMERO DE ESTUDIANTES POR MÓDULO:

d. NOMBRE INSTRUCTOR: Ing. Johanna Celi, Ing. Junior Figueroa

e. TIEMPO ESTIMADO: 2 horas

2. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA: Creación de botones en la interfaz gráfica y envió de caracteres.

b. OBJETIVO GENERAL:

Crear un nuevo botón en la interfaz gráfica del control inalámbrico del robot que permita el envió de un caracter desde la interfaz hacia la raspberry pi3 maestra, para la futura creación de un nuevo proceso con dicho botón.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Investigar el tipo de lenguaje de programación utilizado en la creación de la interfaz gráfica del control inalámbrico del robot para familiarizarse con el mismo y poder realizar futuras modificaciones, si el caso lo amerita.

Definir las configuraciones necesarias para la creación de un botón en la interfaz gráfica del control inalámbrico del robot para él envió de un carácter que pueda ser usado para futuras aplicaciones o procesos.

d. ENUNCIADO

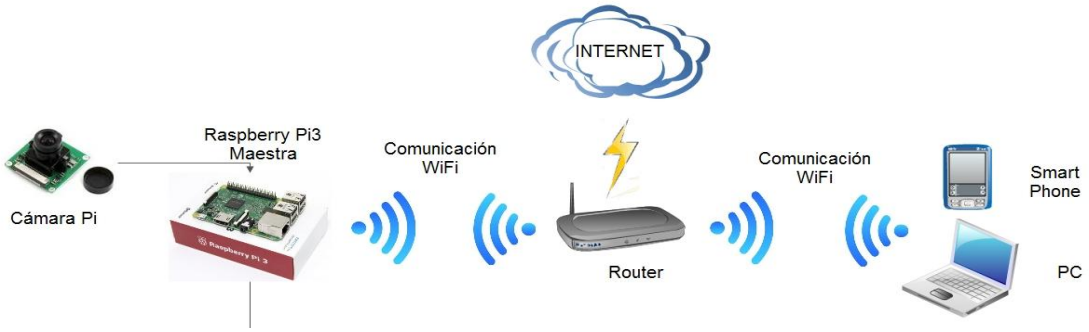
Mediante la investigación del lenguaje de programación usado en la interfaz gráfica de control inalámbrico del robot, crear un botón que permita él envió de un carácter hacia la raspberry pi3.

El botón creado deberá animarse al momento la interfaz gráfica detecte la acción de presión que define su accionamiento.

En la interfaz gráfica de control se debe visualizar el carácter enviado con el botón creado, el mismo que haciendo uso de la opción "herramienta para desarrolladores" ubicada en las configuraciones del navegador utilizado.

e. MARCO TEÓRICO

Raspberry pi 3 es básicamente una computadora, que al tener incorporado un módulo wifi, permite usarla como un servidor web, como es el caso del robot móvil hibrido omnidireccional, que para el control de sus actuadores posee una interfaz gráfica realizada en una página web. El desarrollo de la página web ha sido desarrollada en un archivo HTML y en un archivo PHP.



Estructura de red del Robot

f. MARCO PROCEDIMENTAL

1. Investigue el lenguaje de programación usado para la creación de páginas Web.
2. Determine la carpeta que contenga el archivo html de la interfaz gráfica.
3. Use los comandos para la creación y dimensionamiento del nuevo botón, para esto es necesario que cuente con imágenes previamente descargadas y almacenadas en la tarjeta raspberry pi3. (Marco teórico)
4. Determine la carpeta que contenga el archivo php de la interfaz gráfica.
5. Colocar los comandos que permitan el envió de un caractér al presionar el botón creado.
6. Con la opción “herramientas para desarrolladores” verificar si el botón creado envía el caracter seleccionado por el estudiante.

g. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE)

Robot móvil híbrido omnidireccional, cable ethernet, computador.

h. REGISTRO DE RESULTADOS

ENUNCIADO		ESTADO	
		Si	No
Aparece un nuevo botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico			
La ventana de la opción “Herramienta para desarrolladores” muestra el carácter enviado al presionar el botón creado			
Se observa la animación del botón creado al ser activado.			
Hubo modificaciones en los botones existentes			

1. DATOS INFORMATIVOS

a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA: Robótica

b. No. DE PRÁCTICA: 4

c. NÚMERO DE ESTUDIANTES POR MÓDULO:

d. NOMBRE INSTRUCTOR: Ing. Johanna Celi, Ing. Junior Figueroa

e. TIEMPO ESTIMADO: 2 horas

2. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA: Movimientos Omnidireccionales del Robot.

b. OBJETIVO GENERAL:

Realizar un proceso que permita visualizar todos los movimientos omnidireccionales del robot haciendo uso de la interfaz gráfica de control inalámbrico para la activación de dicho proceso.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Conocer las características de los robots móviles omnidireccionales de cuatro ruedas para una mejor comprensión y uso del prototipo.

Crear un botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico que permita el envío de un carácter, o hacer uso del botón creado en la práctica No3, para la activación del proceso a realizar.

Realizar el programa para la tarjeta de control auxiliar que permita activar los movimientos omnidireccionales del robot siguiendo una secuencia determinada por el ingeniero encargado de la práctica.

d. ENUNCIADO

Mediante un botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico, permitir la activación de un proceso que muestre todos los movimientos omnidireccionales del robot.

Usar la tarjeta de control auxiliar para cargar el programa que muestre el proceso de todos los movimientos omnidireccionales del robot, el mismo que debe ser activado de forma inalámbrica por el estudiante desde la interfaz gráfica.

e. MARCO PROCEDIMENTAL

1. Realice el diagrama de flujo para los algoritmos que implementará tanto en el microcontrolador como en el lenguaje programación gráfico según el enunciado propuesto.
3. Desarrolle en el compilador Bascom AVR la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
4. Desarrolle en la interfaz gráfica instalado sobre el PC la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
5. Programe la tarjeta de control auxiliar y realice las pruebas de funcionamiento.

f. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE)

Robot móvil omnidireccional tipo híbrido, cable ethernet, programadora AVR, computador.

g. REGISTRO DE RESULTADOS

ENUNCIADO	Funcionamiento	
	Correcto	Incorrecto
Existe conexión inalámbrica entre la PC y el robot		
El robot cumplió con el proceso planteado.		
Se pudo observar todos los movimientos omnidireccionales del robot.		
Cuantos movimientos omnidireccionales posee el robot.		

1. DATOS INFORMATIVOS

a. MATERIA / CÁTEDRA RELACIONADA: Robótica

b. No. DE PRÁCTICA: 5

c. NÚMERO DE ESTUDIANTES POR MÓDULO:

d. NOMBRE INSTRUCTOR: Ing. Johanna Celi, Ing. Junior Figueroa

e. TIEMPO ESTIMADO: 2 horas

2. DATOS DE LA PRÁCTICA

a. TEMA: Elaboración de un proceso que muestre el funcionamiento de la plataforma móvil y el brazo mecánico del robot.

b. OBJETIVO GENERAL:

Realizar un proceso que permita visualizar los accionamientos de los motores del robot, tanto de la parte móvil como del brazo mecánico, haciendo uso de la interfaz gráfica de control inalámbrico para la activación de dicho proceso.

c. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Crear un botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico que permita el envío de un carácter, o hacer uso del botón creado en la práctica No3, para la activación del proceso a realizar.

Realizar el programa para la tarjeta de control auxiliar que permita activar los motores del robot siguiendo una secuencia determinada por el ingeniero encargado de la práctica.

d. ENUNCIADO

Mediante un botón en la interfaz gráfica de control inalámbrico, permitir la activación de un proceso que muestre el movimiento de la plataforma móvil y la manipulación de objetos con el brazo mecánico.

Usar la tarjeta de control auxiliar para cargar el programa que muestre el proceso designado por el ingeniero tutor, el mismo que debe ser activado de forma inalámbrica desde la interfaz gráfica.

e. MARCO PROCEDIMENTAL

1. Realice el diagrama de flujo para los algoritmos que implementará tanto en el microcontrolador como en el lenguaje programación gráfico según el enunciado propuesto.
2. Desarrolle en el compilador Bascom AVR la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
3. Desarrolle en la interfaz gráfica instalado sobre el PC la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
4. Realice en el entorno gráfico instalado sobre el PC la programación necesaria en base de su diagrama de flujo, para cumplir con el enunciado propuesto.
5. Programe la tarjeta de control auxiliar y realice las pruebas de funcionamiento.

f. RECURSOS UTILIZADOS (EQUIPOS, ACCESORIOS Y MATERIAL CONSUMIBLE)

Robot móvil híbrido omnidireccional, cable ethernet, programadora AVR, computador.

g. REGISTRO DE RESULTADOS

ENUNCIADO	Funcionamiento	
	Correcto	Incorrecto
Tiene implementada la aplicación HMI sobre cualquier entorno de desarrollo gráfico.		
Existe la comunicación RS-232.		
Se visualizan los botones de encendido y apagado en el GLCD.		
Funcionan los botones de encendido y apagado.		
Se observa la animación (ON/OFF) de los botones de encendido y apagado.		
Se observa la variación de la velocidad del motor.		
Se observa el cambio de giro del eje del motor.		
Ejercicio planteado.		