



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

“CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL USANDO UN SBC (SINGLE- BOARD COMPUTER) PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE DE INSUMOS MÉDICOS EN EL CENTRO DE SALUD TIPO C LIZARZABURU EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA.”

Trabajo de titulación
Tipo: Dispositivo tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

AUTORA: VÁSCONEZ CHAGÑAY IVONNE CAROLINA

TUTOR: Ing. PAUCAR SAMANIEGO JORGE LUIS

Riobamba – Ecuador
2018

©2018, Vásquez Chagnay Ivonne Carolina

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: “CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL USANDO UN SBC (SINGLE- BOARD COMPUTER) PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE DE INSUMOS MÉDICOS EN EL CENTRO DE SALUD TIPO C LIZARZABURU EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”, de responsabilidad de la señorita IVONNE CAROLINA VÁSQUEZ CHAGÑAY, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Washington Luna Encalada. DECANO FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	_____	_____
Ing. Freddy Chávez Vásquez. DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES	_____	_____
Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____
Ing. Wilson Baldeón López. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____

“Yo, **IVONNE CAROLINA VÁSCONEZ CHAGÑAY**, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**”.

Ivonne Carolina Vásconez Chagñay

060409658-6

DEDICATORIA

A mi familia por su amor y apoyo brindado a lo largo de mi carrera universitaria, por enseñarme y guiarme a crecer como profesional y ser humano. A mi novio y amigos que me acompañaron durante esta etapa culminando con éxito este sueño tan anhelado.

Ivonne Carolina

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a mi familia y novio, por su guía y apoyo para cumplir mis metas y motivarme a seguir luchando por mis sueños. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que me ha permitido forjar una sólida formación académica, a través de la experiencia y conocimiento de sus docentes. A mis maestros por su constancia y su entrega con cada uno de sus estudiantes, de manera muy especial al Ing. Jorge Luis Paucar y al Ing. Wilson Baldeón por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Ivonne Carolina

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

2D	Dos Dimensiones
3D	Tres Dimensiones
A	Amperio
Ah	Amperios por hora
ASCII	American Standard Code Information Interchange
Cm	Centímetros
DC	Direct Current
Fps	Frames por segundo
GPIO	General Purpose Input/Output
GUI	Graphical User Interface
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HIGH	Estado alto de señal digital
IFR	Federación Internacional de Robótica
INEN	Servicio ecuatoriano de normalización
IR	Infrarrojo
Kg	Kilogramos
LCD	Liquid Crystal Display
LiPO	Polímero de litio
LOW	Estado bajo de señal digital
MAIS	Modelo de Atención Integral de Salud Familiar, Comunitario e Intercultural
MKR	Muratec Keio Robot
Mm	Milímetros
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor
MPS	Ministerio de Salud Pública
PC	Personal computer
PCB	Placa de Circuito Impreso
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RGB	Red, Green, Blue
SBC	Single Board Computer
ToF	Time of Flight
USB	Universal serial bus
V	Voltaje

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
 CAPITULO I	
1. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO	5
1.1 Robótica.....	5
1.2 Robot de servicio.....	5
1.3 Morfología del robot.....	8
<i>1.3.1. Arquitectura</i>	<i>8</i>
<i>1.3.2. Sistemas de locomoción</i>	<i>9</i>
<i>1.3.2.1. Análisis comparativo de configuraciones cinemáticas.....</i>	<i>10</i>
<i>1.3.3. Sistema sensorial.....</i>	<i>11</i>
<i>1.3.4. Sistema de navegación</i>	<i>12</i>
<i>1.3.4.1. Odometría.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.5. Sistema de control.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.5.1. Controlador PID.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.6. Sistema de alimentación</i>	<i>15</i>
<i>1.3.7. Apariencia externa.....</i>	<i>15</i>
1.4 Visión artificial.....	16
<i>1.4.1. Técnicas de obtención de imágenes 3D.....</i>	<i>16</i>
<i>1.4.2. Procesamiento de imágenes binarias.....</i>	<i>16</i>
<i>1.4.2.2. Detección de bordes: Método Canny.....</i>	<i>18</i>
1.5 Componentes electrónicos y mecánicos del robot.....	18
<i>1.5.1. Single Board Computer</i>	<i>19</i>
<i>1.5.1.1 Análisis comparativo de Single Board Computer</i>	<i>19</i>

1.5.2.	Tarjetas de desarrollo Arduino	20
1.5.2.1.	Análisis comparativo de tarjetas de desarrollo arduino	20
1.5.3.	Motores DC	21
1.5.4.	Driver de Motores Dual	21
1.5.4.1.	Análisis comparativo driver para motores.....	21
1.5.5.	Sensores	22
1.5.5.1.	Encoder.....	22
1.5.5.2.	Sensor de distancia	23
1.5.5.3.	Sensor de visión.....	24
1.5.6.	Batería.....	25
1.6	Comunicación serial	25

CAPITULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO.....	26
2.1.	Descripción general del prototipo.....	27
2.2.	Requerimientos del robot móvil.....	27
2.3.	Concepción universal del diseño de <i>hardware</i> del prototipo.....	27
2.4.	Arquitectura de <i>Hardware</i>.....	28
2.5.	Selección de dispositivos de <i>hardware</i> para la construcción del prototipo.....	29
2.5.1.	Dispositivos de obtención de datos.....	30
2.5.1.1.	Sensor Kinect.....	30
2.5.1.2.	Sensor Ultrasónico	30
2.5.1.3.	Sensor infrarrojo	31
2.5.1.4.	Encoder Incremental.....	31
2.5.2.	Dispositivo de procesamiento.....	32
2.5.2.1.	Single-Board Computer Raspberry Pi 3 Model B.....	33
2.5.3.	Dispositivos de control	33
2.5.3.1.	Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560.....	33
2.5.3.2.	Puente H, Módulo de control doble canal MOSFET	34

2.5.4.	<i>Visualización de rostro e interfaz</i>	34
2.5.4.1.	<i>Pantalla Samsung LCD 14.1"</i>	35
2.5.5.	<i>Actuadores eléctricos</i>	35
2.5.5.1.	<i>Motor DC</i>	36
2.5.5.2.	<i>Cerradura eléctrica</i>	36
2.5.4.	<i>Sistema de alimentación</i>	37
2.5.4.1.	<i>Batería LiPO</i>	37
2.5.4.2.	<i>Regulador de voltaje LM2596</i>	38
2.6.	<i>Esquema de conexión electrónica</i>	38
2.6.1.	<i>Tabla de terminales</i>	39
2.6.2.	<i>Diseño de PCB</i>	40
2.7.	<i>Diseño Estructural del prototipo</i>	41
2.7.1.	<i>Cabeza</i>	42
2.7.2.	<i>Chasis</i>	43
2.8.	<i>Construcción del prototipo</i>	44
2.8.1.	<i>Implementación del cuerpo</i>	44
2.8.2.	<i>Implementación del sistema de locomoción</i>	45
2.8.2.1.	<i>Selección de Ruedas</i>	45
2.8.2.2.	<i>Colocación de los sensores encoder</i>	47
2.8.3.	<i>Implementación base</i>	47
2.9.	<i>Apariencia externa</i>	49
2.9.1.	<i>Rostro</i>	49
2.10.	<i>Selección de rutas</i>	49
2.10.1	<i>Dimensiones y programación de las rutas</i>	50
2.11.	<i>Diseño de Software</i>	51
2.11.1.	<i>Herramientas de software</i>	51
2.11.1.1.	<i>Sistema operativo Raspbian</i>	51
2.11.1.2.	<i>Python 2.7</i>	52
2.11.1.3.	<i>Tkinter</i>	52

2.11.1.4. <i>OpenCV</i>	52
2.11.1.5. <i>Libfreenect</i>	52
2.11.1.6. <i>Ide Arduino</i>	52
2.11.2. <i>Desarrollo de Software en Python</i>	52
2.11.2.1. <i>Detección de obstáculos</i>	53
2.11.3. <i>Desarrollo de Software en Arduino</i>	54
2.11.3.1. <i>Lectura de encoders incrementales</i>	55
2.11.3.2. <i>Detección lateral</i>	56
2.11.3.3. <i>Análisis odométricos</i>	57
2.11.3.4. <i>Control de motores</i>	58
2.11.3.5. <i>Controlador PID</i>	59
2.11.4. <i>Desarrollo de Software Interfaz de usuario</i>	61

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS	63
3.1. Pruebas de precisión del prototipo	63
3.1.1. <i>Prueba de medición de distancia con sensores ultrasónicos</i>	63
3.1.2. <i>Prueba de medición de distancia con encoders</i>	66
3.1.3. <i>Prueba de reconocimiento con sensor Kinect</i>	69
3.2. Pruebas de error de desplazamiento	71
3.3. Pruebas de tiempo	73
3.4. Cálculo de rendimiento de batería del prototipo	76
3.5. Grado de aceptación y beneficio del prototipo	77
3.6. Análisis de costos	79
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Comparación de características de Robot Portadores en Centros de Salud.	8
Tabla 2-1 Escala de valoración de dificultad.	11
Tabla 3-1 Evaluación de complejidad de sistemas de locomoción con ruedas.	11
Tabla 4-1 Comparación de características de Single Board Computer	19
Tabla 5-1 Comparación de características de Placas de desarrollo Arduino.....	20
Tabla 6-1 Comparación de características de Driver para motores.....	22
Tabla 1-2. Características de pantalla LCD.....	35
Tabla 2-2. Características de los motores.....	36
Tabla 3-2. Consumo de dispositivos del prototipo.....	37
Tabla 4-2. Terminales de conexión de Raspberry Pi 3.....	39
Tabla 5-2. Terminales de conexión de Arduino.....	40
Tabla 6-2. Características del cuerpo.....	45
Tabla 7-2. Características de las ruedas.	45
Tabla 8-2. Características de la base implementada.	48
Tabla 9-2. Características de la base implementada.....	58
Tabla 1-3. Mediciones de distancia con sensores ultrasónicos.	63
Tabla 2-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.	65
Tabla 3-3. Mediciones de distancia con encoders.	66
Tabla 4-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.	68
Tabla 5-3. Muestras tomadas con el sensor Kinect.	69
Tabla 6-3. Mediciones de desplazamiento al punto de destino.....	71
Tabla 7-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.....	72
Tabla 8-3. Mediciones de tiempo del prototipo en recorrido.....	74
Tabla 9-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.	75
Tabla 10-3. Duración de batería.	77
Tabla 11-3. Respuesta a la primera pregunta.....	77
Tabla 12-3. Respuesta a la segunda pregunta.....	78
Tabla 13-3. Respuesta a la tercera pregunta.	78
Tabla 14-3. Respuesta a la cuarta pregunta.....	78
Tabla 15-3. Costo del prototipo.	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Robot Tug	6
Figura 2-1: Robot Pyxis HelpMat	6
Figura 3-1: Robot MKR.....	7
Figura 4-1: Robot Hospi	7
Figura 5-1: Configuración Ackerman	9
Figura 6-1: Configuración triciclo.....	9
Figura 7-1: Configuración diferencial	10
Figura 8-1: Configuración omnidireccional	10
Figura 9-1: Desplazamiento odométrico.	12
Figura 10-1: Operación de erosión.....	17
Figura 11-1: Operación de dilatación.....	17
Figura 12-1: Modulación por ancho de pulso	21
Figura 13-1: Disposición de un encoder relativo	23
Figura 14-1: Disposición de un encoder absoluto	23
Figura 15-1: Sensor Ultrasónico.	24
Figura 16-1: Sensor Kinect a. Vista externa b. Vista interna	24
Figura 1-2: Fases de desarrollo del prototipo.....	26
Figura 1-2: Fases de desarrollo del prototipo.....	27
Figura 2-2: Diagrama general del prototipo.....	28
Figura 3-2: Diagrama de bloques de la etapa de detección de obstáculos.....	29
Figura 4-2: Diagrama de bloques de la etapa de navegación.....	29
Figura 5-2: Sensor Kinect	30
Figura 6-2: Sensor Ultrasónico.....	31
Figura 7-2: Sensor Infrarrojo QRD1114.....	31
Figura 8-2: Encoders.	31
Figura 9-2: Disco Óptico.	32
Figura 10-2: Señales de los canales A y B.	32
Figura 11-2: Raspberry Pi 3 Model B.....	33
Figura 12-2: Arduino MEGA 2560.	34
Figura 13-2: Módulo de control doble canal MOSFET.....	34
Figura 14-2: Pantalla Samsung LCD.....	35
Figura 15-2: Motor DC.	36
Figura 16-2: Cerradura eléctrica.....	37

Figura 17-2: Batería LiPO.....	38
Figura 18-2: <i>Regulador de voltaje LM2596.</i>	38
Figura 19-2: Diagrama de conexión electrónica del prototipo.	39
Figura 20-2: PCB para etapa de control. a) Diagrama esquemático b) Vista 3D.....	40
Figura 21-2: Distancias mínimas de trabajo parado.	41
Figura 22-2: Ancho de los pasillos del centro de salud.	41
Figura 23-2: Vista general del diseño.....	42
Figura 24-2: Diseño de cabeza.	42
Figura 25-2: Diseño de la base.	43
Figura 26-2: Vista frontal y posterior del diseño de cuerpo.	43
Figura 27-2: Diagrama del proceso de construcción del cuerpo.....	44
Figura 28-2: Ruedas del prototipo.	46
Figura 29-2: Acople en nylon motor-rueda.....	46
Figura 30-2: Motor con acople para rueda.....	46
Figura 31-2: Encoder y disco óptico acoplados al motor.....	47
Figura 32-2: Rodamiento 6206R5.....	47
Figura 33-2: Estructura metálica y motores.....	48
Figura 34-2: Base implementada.....	48
Figura 35-2: Rostro del prototipo.	49
Figura 36-2: A) Ruta de farmacia a Hospitalización. B) Ruta a procedimientos.....	50
Figura 37-2: Ruta extra en azul.....	50
Figura 38-2: Distancias por tramos para las rutas.....	51
Figura 39-2: Intensidad de pixeles mostrados en imagen de profundidad.....	53
Figura 40-2: Diagrama de flujo de la detección de obstáculos.....	54
Figura 41-2: Diagrama de flujo de lectura de encoders.	56
Figura 42-2: Diagrama de flujo de la detección lateral.	57
Figura 43-2: Diagrama del controlador PID.....	59
Figura 44-2: Parámetros del controlador PID.	59
Figura 45-2: Comportamiento de la planta con los parámetros obtenidos.	60
Figura 43-2: Diagrama de flujo de la detección lateral.....	62
Figura 1-3: Prueba de medidas obtenidas con sensor ultrasónico.....	64
Figura 2-3: Prueba de medidas con sensor Kinect.....	70

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Dispersión de medidas obtenidas con sensores ultrasónicos.....	66
Gráfico 2-3: Dispersión de medidas obtenidas con los encoders.....	69
Gráfico 3-3: Respuesta del sensor Kinect.....	70
Gráfico 4-3: Dispersión de medidas obtenidas con el desplazamiento del prototipo.....	73
Gráfico 5-3: Dispersión de medidas obtenidas en la prueba de tiempo.....	76

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se centra en la construcción de un robot móvil con configuración diferencial, que se encarga de transportar insumos médicos dentro del Centro de Salud tipo C Epoch-Lizarzaburu, con la finalidad de alivianar el trabajo y optimizar el tiempo del personal en actividades de mayor relevancia. Previo a la construcción del prototipo se estudió los componentes mecánicos y electrónicos que conforman el prototipo; la construcción del prototipo se hizo en fibra de vidrio por su resistencia y durabilidad. La implementación se basó en visión artificial para la detección de obstáculos estáticos y dinámicos; para este fin se utilizó un sensor Kinect y una SBC Raspberry Pi 3, la mismo que se encarga de la adquisición y procesamiento de imágenes del entorno del robot. En conjunto se desarrolló un sistema odométrico basado en las ecuaciones que rigen la cinemática diferencial del robot y encoders que establecen la posición y velocidad; junto al sistema de control de locomoción se encargan de la navegación del robot de manera autónoma. Para optimizar el procesamiento de datos se utilizó un Arduino Mega que se encarga de la navegación del prototipo, con comunicación serial con la Raspberry Pi. Se consideró el diseño interactivo del robot que facilite la inserción del robot al personal del Centro de Salud dotándole de un rostro que lo asemeje a una persona. Las pruebas se realizaron en base a observaciones muestrales no poblacionales, aplicando métodos estadísticos de inferencia que dieron como resultado de desplazamiento del ± 2.38 cm con respecto a la distancia real, una precisión de ± 0.26 cm, y un retardo de tiempo de 0.04 segundos en su ruta. Se recomienda para trabajos futuros el uso de galgas en los compartimientos para determinar en donde se encuentra la carga; optimizando las funciones y la autonomía del prototipo.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA>, <ROBÓTICA>, <VISIÓN ARTIFICIAL>, <DISEÑO CAD >, <SENSOR KINECT >, <ODOMETRÍA>.

ABSTRACT

The present titling work focuses of the mobile robot construction with differential configuration, which is responsible for transporting medical supplies within the Health Center Type C Epoch-Lizarzaburu, in order to lighten the work and optimize the personal time in most relevant activities. Before the construction of the study prototype of the mechanical and electronic components that make up the prototype; the construction of the prototype was made in fiberglass for its strength and durability. The implementation was based in artificial vision for the detection of static and dynamic obstacles; for this purpose, a Kinect sensor and an SBC Rasperry Pi 3 were used, which is responsible for the acquisition and processing of images of the environment of the robot. As a whole, an odometric system was developed based on the equations that govern the differential kinematics of the robot and encoders that establish the position and speed; together with the locomotion control system, they are responsible for robot navigation autonomously. To optimize data processing, an Arduino Mega was used to navigate the prototype, with serial communication with the Raspberry Pi. It was considered the robot interactive design that facilitates the insertion of the robot to the staff of the Health Center giving it with a face that resembles it to a person. The tests were performed based on non-population sample observations, applying statistical inference methods that resulted in a displacement of ± 2.38 cm with respect to the real distance, an accuracy of ± 0.26 cm and a time delay of 0.04 seconds in its route. It is recommended for future work the use of gauges in the compartments to determine where the load is located; optimizing the functions and autonomy of the prototype.

KEY WORDS: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>, <ELECTRONIC ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <<ROBOTICS>, <ARTISTIC VISION>, <CAD DESIGN>, <KINECT SENSOR>, <ODOMETRY>

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Ministerio de Salud del Ecuador, el Modelo de Atención Integral de Salud Familiar, Comunitario e Intercultural busca responder de manera más efectiva a las necesidades de las personas, familias y comunidades, contribuyendo a mejorar su calidad de vida. En Riobamba, el centro de salud tipo C Espoch - Lizarzaburu, mantiene dicho modelo (MAIS), y beneficia directamente al 11% de la población local, con un total de 28.072 personas. (Ministerio Salud Pública, 2015).

La idea para el desarrollo del prototipo planteado en el presente trabajo surge del concepto fundamental de un robot, siendo un sistema electromecánico dotado con un cierto grado de inteligencia y autonomía, reprogramable y aplicado para diversas tareas consideradas tediosas o peligrosas para el ser humano. (Gavilanez, 2016).

Entonces, el planteamiento para el desarrollo del prototipo surge de la oportunidad de brindar un servicio de calidad y más eficiente, incorporando un ente robótico al personal del Centro Médico tipo C Espoch-Lizarzaburu como asistente para transportar insumos médicos en el establecimiento, con el fin de optimizar el tiempo del personal en actividades de mayor relevancia.

El desarrollo involucra un amplio estudio teórico, diseño estructural, implementación, además de la ejecución de pruebas para validar el correcto funcionamiento. El *hardware* del prototipo está conformado por un conjunto de sensores, actuadores y controlador, y el *software* se encarga del procesamiento para detección de obstáculos y control de rutas. La funcionalidad del prototipo está limitada a ser un robot asistente el cual debe cumplir únicamente con las indicaciones que recibe. El personal encargado debe abastecer con los insumos necesarios e indicar el destino de los mismos, siendo estos los departamentos con mayor demanda de insumos médicos en el establecimiento. Durante el trayecto de entrega el prototipo debe mantener su trayectoria evadiendo obstáculos que puedan presentarse, y precautelando la integridad y seguridad de su encomienda.

ANTECEDENTES

En la actualidad, la robótica autónoma plantea una relación humano-máquina, donde las personas puedan obtener múltiples beneficios, estableciendo un nuevo campo de robótica: Robots de servicio. En el campo del cuidado de la salud, los robots asistentes, portadores o mensajeros en

centros de salud se utilizan para facilitar el trabajo diario, cuya finalidad es movilizarse en el interior de la edificación como guía de pacientes o transportando insumos.

En Estados Unidos se emplea los robots *Pyxis HelpMate*, marca registrada de Cardinal Healt Inc., en varios centros de salud. Sin embargo, no es el único modelo implementado en centros de salud del país, también se emplea *TUG* un robot desarrollado por la compañía Aethon. En el 2010, en la universidad Keio, ubicada en Yokoham, Japón, se desarrolló *Muratec Keio Robot* (MKR). Como estos existen otros robots desarrollados por empresas privadas que cumplen con la misma función de transportar insumos médicos dentro de las instalaciones del centro médico, dejando más tiempo a los empleados para cumplir con labores de relevancia; aumentando la eficiencia y la seguridad de los trabajadores.

En Ecuador, el Ministerio de Salud Pública (MSP) en fin de promover su Modelo de Atención Integral en Salud ha construido y repotenciado centros de salud a nivel nacional, sin embargo de la totalidad de hospitales y centros médicos públicos únicamente el Hospital Carlos Andrade Marín ha incorporado tecnología robótica en sus instalaciones con el robot *Da Vinci*, un robot teleoperado cuya función es ayudar al cirujano realizar operaciones de alto riesgo con mayor precisión y exactitud, y los robots *Armeo Spring* y *Lokomat* facilitan la recuperación de funciones de la motricidad y movilidad de extremidades en pacientes con traumas cráneo encefálico. (Gallegos, 2016).

JUSTIFICACIÓN

Justificación Teórica

Según la Federación Internacional de Robótica (IFR), un robot de servicio es un robot que opera de forma parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura. (*Robótica de Servicios*, 2014).

Existen robots de servicio a nivel mundial para aplicaciones y estudios científicos muy variados, pero en muchos de los casos estos robots se encuentran en fase investigativa y solo se encuentra una o dos unidades, y difícilmente se pueden adquirir por su elevado costo. Sin embargo, según datos publicados por WorldRobotics, de la Federación Internacional de Robótica, a nivel mundial el número de robots de servicios es de 49000 hasta finales de 2007 entre robots para uso profesional, 3.4 millones para uso doméstico y 2 millones de robots para entretenimiento personal.

En total, se han vendido cerca de 5,5 millones de robots de servicios. Donde solo un 9% se ha destinado al uso en aplicaciones médicas y hospitalarias. (*Robótica de Servicios*, 2014).

En Ecuador, con la aplicación del Modelo de Atención Integral de Salud Familiar, Comunitario e Intercultural ha incrementado la demanda de atención en 64.6% según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, realizada por el Ministerio De Salud Pública y el Instituto Nacional de Estadística y Censos. (*Ecuador en cifras*, 2015). Con estas estadísticas se ha incrementado el número de establecimientos y personal para cumplir con la atención a los pacientes. Teniendo como resultado 364 centros con atención en modalidad ambulatoria, 39 establecimientos en modalidad ambulatoria intensiva y 5 hospitales especializados. (Paredes, 2017).

En la ciudad de Riobamba, y con el fin de abastecer con el derecho de la ciudadanía a la salud se han inaugurado tres nuevos establecimientos del 2015 al día de hoy, que mantienen el modelo M.A.I.S. El Centro de Salud Tipo C Espoch-Lizarzaburu tiene la capacidad para atender 28.072 personas brindando atención en: medicina general, medicina familiar, consulta especializada en ginecología y pediatría, salud oral, salud mental, obstetricia, emergencia 24 horas, maternidad de corta estancia, laboratorio, promoción de la salud, terapia respiratoria y farmacia. Para cumplir con todos los servicios cuenta con un total de personal de 128 personas, de entre los cuales 64 son profesionales de la salud, además cuenta con personal administrativo, de seguridad, y limpieza. (Ministerio Salud Pública, 2015).

Justificación Aplicativa

Con el notable incremento de atención en los Centros de Salud Pública a nivel nacional y local, se plantea la inserción de un ente robótico que busca enfocar el trabajo del personal médico en tareas de relevancia y dedicar el uso del robot en el transporte y entrega de medicamentos e insumos médicos entre los departamentos de mayor demanda del Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu.

El prototipo debe desempeñarse en el Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu, siendo esta institución una construcción de una sola planta y de libre acceso entre todos sus departamentos con el fin de mejorar la atención a la ciudadanía. Para que el prototipo cumpla con su función debe contar con los componentes electrónicos y mecánicos necesarios, como sensores y actuadores conectados a un sistema de control, el mismo que se encarga del procesamiento de datos y la toma de decisiones. Este sistema debe comunicarse con los motores cuya función es ejecutar las decisiones para convertirlas en operaciones.

El prototipo inicia su trayectoria cuando el personal encargado de farmacia coloca los insumos en uno de los compartimientos del robot e indica el destino, para ello el prototipo cuenta con una interfaz para el usuario. Durante la trayectoria al destino establecido el robot debe evadir obstáculos que puedan presentarse mientras precautela la integridad de los insumos. El desarrollo del prototipo no solo involucra un alto conocimiento teórico para la construcción y programación del mismo, también exige conocimientos para el diseño mecánico y estructural.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Implementar un robot móvil capaz de desplazarse en un ambiente hospitalario de una sola planta de libre acceso, con obstáculos estáticos y dinámicos a fin de llegar a su destino, cumpliendo con la entrega de insumos médicos.

Objetivos específicos:

- Establecer la morfología del robot móvil en base a estudios realizados para adaptarlo al ambiente al que se introducirá a cumplir con su labor.
- Implementar el robot móvil con la correcta combinación de dispositivos mecánicos y electrónicos que garanticen el correcto desempeño al evadir obstáculos y llegar a su destino sin afectar la integridad de los insumos médicos en el transporte de los mismos.
- Determinar la precisión, tiempo y el error de desplazamiento del robot móvil.
- Realizar pruebas experimentales capaces de validar el funcionamiento del robot basado en los indicadores de precisión, desplazamiento y tiempo.

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Robótica

La robótica, conforme ha evolucionado la tecnología se ha constituido en un importante campo de estudio; dedicado al diseño, implementación, construcción y programación de robots capaces de cumplir con una tarea específica con la cual han sido creados. Siendo el resultado de la fusión de varias disciplinas como: mecánica, electrónica, inteligencia artificial, control y programación. (Jardón Huete, 2006).

1.2 Robot de servicio

Las nuevas aplicaciones de la robótica para la realización de tareas cotidianas, en ambientes variantes y no estructurados dan lugar al concepto de robótica de servicio. Existen factores a considerar con un robot de servicio: un entorno variable e imprevisible, una aplicación específica, y la interacción con personas con las cuales debe existir contacto físico.

1.2.1. Aplicaciones en ambientes hospitalarios

En las últimas décadas el uso de robot en centros de salud se ha incrementado por su aplicabilidad y utilidad al suplir ciertas tareas no relevantes para el personal médico o para mejorar sus habilidades en situaciones de alto riesgo, como es el caso de los robots cirujanos. A pesar del incremento de investigaciones en el campo de la robótica aplicada a la medicina no se ha podido ampliar la población de robots en hospitales debido a su alto costo, y la inversión en recursos humanos y materiales para el desarrollo y comercialización. Entre las aplicaciones comunes de equipos robóticos en ámbitos hospitalarios y de salud se describen:

- Portadores
- Farmacéuticos
- Robot Teleoperado
- Cirugía Tele asistida
- Robot para rehabilitación y exoesqueletos

1.2.2. Robots Portadores existentes

El robot planteado para la construcción en el presente trabajo de investigación se ubica en la clasificación de *robots portadores*, estos también son llamados robots de mensajería, su función es transportar cosas por las instalaciones del hospital. (allonrobots.com, 2013). A nivel mundial existen varias empresas dedicadas al diseño y creación de diferentes versiones de estos robots, y en algunos de los casos ya se encuentran operando en centros de salud. Sin embargo, a nivel nacional no existen entes robóticos en dicha categoría, debido a su elevado costo o inexistente producción en territorio nacional.

- **Tug**

El robot Tug, desarrollado por la empresa Aethon se ha desempeñado como un robot de entrega de medicamentos en unidades de atención a pacientes en las instalaciones de diferentes centros médicos. (Swedberg, 2010).



Figura 1-1: Robot Tug

Fuente: <http://bit.ly/2qAPVnv>

- **Pyxis HelpMat**

Pyxis HelpMate, marca registrada de Cardinal Healt Inc., conocido como un robot de mensajería robótica transportando productos farmacéuticos, muestras de laboratorio, y más insumos hospitalarios, entre los departamentos de soporte y enfermería. (O'Keefe, 2003).



Figura 2-1: Robot Pyxis HelpMat

Fuente: <https://go.nasa.gov/2qA6CcE>

- ***Muratec Keio Robot***

En el 2010, en la universidad Keio, ubicada en Yokoham, Japón, se desarrolló *Muratec Keio Robot* (MKR) un robot omnidireccional para aplicaciones de transporte en el ámbito hospitalario usado para la transferencia de equipaje, especímenes, y otros materiales. (Takahashi *et al.*, 2010).



Figura 3-1: Robot MKR.

Fuente: <http://bit.ly/2HsGmKI>

- ***Hospi***

Un robot construido y distribuido por la empresa Panasonic cuya función es transportar cosas pequeñas de un lugar a otro con un aspecto más amigable, al igual de muchos de sus similares necesita modificaciones estructurales en los centros médicos para poder movilizarse sin inconveniente. (Ackerman, 2014).



Figura 4-1: Robot Hospi

Fuente: <https://goo.gl/4UZJqK>

1.2.3. Análisis comparativo de Robots Portadores existentes

Luego de la descripción de robots portadores se presenta un análisis comparativo en la tabla 1-1, donde se describen las características de mayor relevancia de los robots portadores, cuyo desempeño se aplica en ambientes hospitalarios.

Tabla 1-1 Comparación de características de Robot Portadores en Centros de Salud.

Robot	Tug	Pyxis Helpmate	MKR	Hospi
Características				
Dimensiones	Ancho: 570 mm Fondo: 1164 mm Alto: 1227 mm	Ancho: 1828 mm Fondo: 1828 mm Alto: 1828 mm	Ancho: 550 mm Fondo: 550 mm Alto: 1200 mm	Ancho: 630 mm Fondo: 725 mm Alto: 1386 mm
Locomoción	Omnidireccional	Diferencial	Omnidireccional	Diferencial
Autonomía	10 Horas Carga intermitente	3 Horas	1 Horas	9 Horas
Peso	120 Kg	272 Kg	70 Kg	170Kg
Capacidad	635 kg	91 Kg	33 Kg	20 Kg
Velocidad	0.762 m/seg	0.5 m/seg	1 m/seg	1 m/seg
Costo	\$140000	\$95000	\$75000	\$100000

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

1.3 Morfología del robot

La morfología define la forma y estructura del robot, y estas a su vez condicionan su funcionamiento, prestaciones y campo de aplicación. (“Morfología de los robots industriales”, 2005, p.1). Para determinar la morfología de un robot es necesario conocer su arquitectura y sus sistemas estructurales como funcionales. Otro factor relevante para la morfología de un robot es el grado de interacción del robot y las personas, siendo también importante el aspecto del robot.

1.3.1. Arquitectura

La arquitectura de un robot se define por la tarea a realizar y el entorno de operación, para el actual trabajo de investigación se establece una arquitectura de tipo móvil que pueda desplazarse de un punto a otro punto sin dificultad. Un robot móvil es una máquina con la autonomía de desplazarse en un entorno conocido o desconocido parcialmente, basado en un sistema de tracción con ruedas, orugas o patas. Los sistemas de locomoción o tracción con ruedas, por su adaptabilidad a terrenos difíciles y efectividad son los más usados, sin embargo, la combinación de estas presenta una amplia variedad de robots móviles caracterizados por su maniobrabilidad. (Bambino, 2008).

1.3.2. Sistemas de locomoción

El sistema se basa en el entorno de operación del prototipo, estructurado o no estructurado, para interiores o exteriores. Un entorno estructurado presenta obstáculos estáticos y características físicas particulares, mientras un entorno no estructurado presenta un entorno dinámico con cambios impredecibles. (Bambino, 2008). Las configuraciones con ruedas para sistemas de locomoción más comunes se presentan a continuación:

- Ackerman

Este sistema usa cuatro ruedas y el centro de guiado del vehículo se ubica a la mitad del eje de las ruedas delanteras o de tracción, su limitación está en la maniobrabilidad. (Ollero, 2001,p.28). El sistema de locomoción ackerman se aplica en vehículos convencionales por su estabilidad y se ilustra en la figura 5-1.

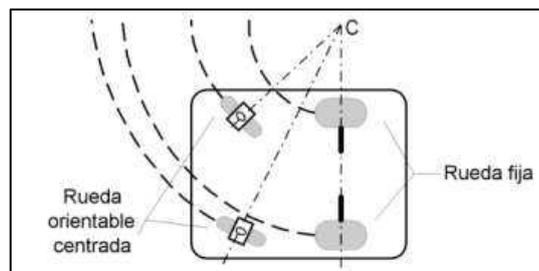


Figura 5-1: Configuración Ackerman

Fuente: (Bambino, 2008, p.22), Disposición de las ruedas

- Triciclo

Consta de tres ruedas, donde la orientación y la tracción están establecida por la rueda delantera, mientras las ruedas traseras le brindan estabilidad y constituyen el eje guía. Posee mejor maniobrabilidad pero menor estabilidad en pendientes y terrenos difíciles. En la figura 6-1 se muestra el sistema de locomoción triciclo.

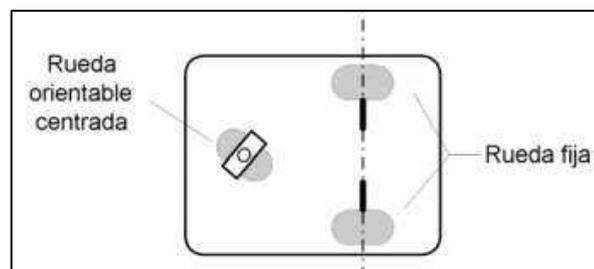


Figura 6-1: Configuración triciclo

Fuente: (Bambino, 2008, p.21.), Disposición de las ruedas

- Diferencial

Basa su control en la variación de velocidad de las ruedas laterales siendo estas también las ruedas de tracción, y comúnmente suele usarse una o más ruedas de soporte para mantener la estabilidad. (Ollero, 2001,p.30). El sistema diferencial es el más usado en robots móviles para interiores por su estabilidad y fácil maniobrabilidad, la configuración del sistema diferencial se ilustra en la figura 7-1.

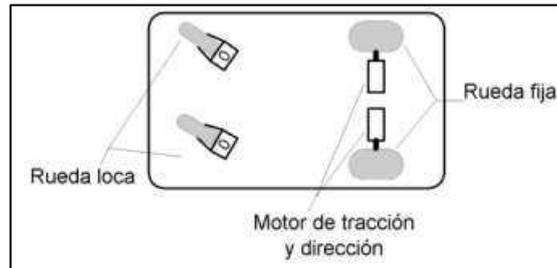


Figura 7-1: Configuración diferencial

Fuente: (Bambino, 2008, p.23.), Disposición de las ruedas

- Omnidireccional

La locomoción omnidireccional, permite al vehículo desplazarse en todas las direcciones y girar en su propio eje. Puede ser de tres o cuatro ruedas siendo el segundo más estable y con mayor tracción, exige mayor control, consumo de energía y por ende costos. El sistema de locomoción omnidireccional se ilustra en la figura 8-1.

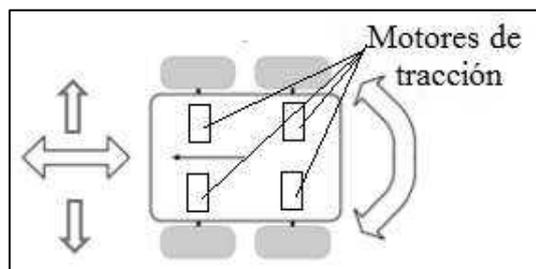


Figura 8-1: Configuración omnidireccional

Fuente: (Bambino, 2008, p.20), Disposición de las ruedas

1.3.2.1. Análisis comparativo de configuraciones cinemáticas

Luego de la descripción de los sistemas de locomoción con diversas combinaciones de ruedas se ha estimado el grado de complejidad de los mismos, estableciendo una ponderación con el rango de 1 a 3 según la escala Likert. En la tabla 2-1 se establece la escala de valoración de complejidad para cada configuración cinemática estudiada según las ponderaciones.

Tabla 2-1 Escala de valoración de dificultad.

Dificultad baja	Dificultad media	Dificultad alta
1	2	3
0-33%	34-66%	67-100%

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

El cálculo de la ponderación se basa en la ecuación 1.

$$P = \frac{\sum N_i}{T_i} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

N_i = Nivel de incidencia

T_i = Total de incidencias

El nivel de incidencias de cada característica de configuraciones cinemáticas con ruedas de sistemas de locomoción se encuentra en la tabla 3-1. Según de los resultados obtenidos en la evaluación de complejidad, la configuración diferencial presenta la ponderación más baja ubicándose como una configuración de dificultad media, tanto en control como implementación, además de ser de bajo costo.

Tabla 3-1 Evaluación de complejidad de sistemas de locomoción con ruedas.

Características	Ackerman	Triciclo	Diferencial	Omnidireccional
Control de posición	2	1	1	3
Implementación	2	2	1	3
Maniobrabilidad	3	2	2	1
Estabilidad	1	2	1	1
Costo	2	2	1	3
Total de incidencias	10	9	6	11
Ponderación total	66.67%	60%	40%	73.33%

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

1.3.3. Sistema sensorial

Los sistemas funcionales forman las partes operativas de un robot, entre estos está el sistema sensorial, como análogos a los sentidos humanos, incluso los sentidos cinestésico y kinestésico encargados del equilibrio y los movimientos del cuerpo humano. (Bambino, 2008, p.26).

El sistema sensorial de un robot le ayuda a obtener una percepción del entorno del robot y de sí mismo, entonces se clasifican a los sensores como:

- Propioceptivos o internos: suministran información del estado interno del robot, como posición, dirección, sentido y velocidad.
- Exteroceptivos o externos: determinan el estado del robot en función del entorno.

1.3.4. Sistema de navegación

El sistema de navegación de un robot móvil le permite moverse interpretando su entorno, se basa en sistemas de estimación como los sensores internos del robot, estaciones de transmisión cercanas al entorno, marcas o mapas. La forma más simple es estimar la trayectoria a partir de medidas internas mediante sistemas odométricos. (Bambino, 2008, p.31).

1.3.4.1. Odometría

Para que un robot móvil pueda generar trayectorias y evitar obstáculos, requiere la capacidad de determinar su localización, posición y orientación con respecto a un sistema de referencia absoluto. La odometría es una técnica cuya función es calcular la posición y orientación de un vehículo con la cantidad de revoluciones de la rueda mediante sensores propioceptivos. (Bambino, 2008, p.32). El robot va de un punto a otro punto en un instante de tiempo, variando su ángulo de inclinación en $\Delta\theta$ y recorriendo una distancia que resulta de la medición de pulsos marcados por cada rueda del robot, como se ve en la figura 9-1.

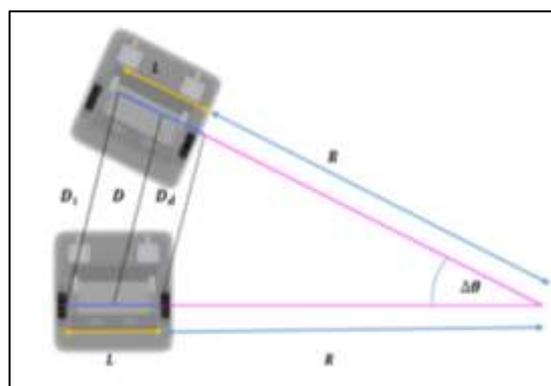


Figura 9-1: Desplazamiento odométrico.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Una vez censado el desplazamiento del robot en cada motor se realiza una conversión de movimiento angular a movimiento lineal. Esta conversión se realiza con la ecuación 2 y 3,

conociendo el número de pulsos generados con el recorrido de la rueda derecha e izquierda respectivamente.

$$D_d = \frac{2*\pi*R}{N} x P_{der} \quad (2)$$

$$D_i = \frac{2*\pi*R}{N} x P_{izq} \quad (3)$$

Donde:

D_d = Distancia lineal recorrida por la rueda derecha.

D_i = Distancia lineal recorrida por la rueda izquierda.

R = Radio de la rueda.

N = Número de pulsos en una revolución.

P_{der} = Número de pulsos en la rueda derecha en un periodo de tiempo.

P_{izq} = Número de pulsos en la rueda izquierda en un periodo de tiempo.

Una vez conocida la distancia lineal recorrida por cada rueda en un periodo de tiempo determinado, se puede conocer el desplazamiento lineal del centro del robot y el ángulo girado con las ecuaciones que rigen la cinemática diferencial del prototipo. Las ecuaciones 4 y 5 se deducen de la imagen 9-1.

$$\Delta\theta = \frac{D_i}{R} \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \frac{D_d}{R+L} \quad (5)$$

Donde:

D_d = Distancia lineal recorrida por la rueda derecha.

D_i = Distancia lineal recorrida por la rueda izquierda.

R = Radio de la rueda.

$\Delta\theta$ = Ángulo de inclinación.

L = Distancia entre ruedas motrices.

Igualando las ecuaciones 4 y 5, y despejando R se obtiene la ecuación 6:

$$R = \frac{L*D_i}{D_d - D_i} \quad (6)$$

Reemplazado la ecuación 6 en la ecuación 4 y despejando $\Delta\theta$ como resultado la ecuación 7:

$$\Delta\theta = \frac{D_d - D_i}{L} \quad (7)$$

Para determinar el desplazamiento y orientación el robot tomado desde el centro del prototipo, se despeja las ecuaciones basadas en la imagen 9-1. Teniendo como resultado la ecuación 8 para determinar la distancia recorrida.

$$D = \frac{D_d + D_i}{2} \quad (8)$$

La ecuación 9 se obtiene al reemplazar las ecuaciones 2 y 3 en la ecuación 7 para el cálculo del ángulo de inclinación.

$$\Delta\theta = \frac{2*\pi*R}{N*R} (D_d - D_i) \quad (9)$$

Conocido el desplazamiento lineal es fácil obtener a partir de trigonometría los desplazamientos en X y Y, como se describe en las ecuaciones 10, y 11 respectivamente.

$$\Delta x = \frac{\pi*R}{N} (D_d - D_i) * \cos(\theta) \quad (10)$$

$$\Delta y = \frac{\pi*R}{N} (D_d - D_i) * \sin(\theta) \quad (11)$$

1.3.5. Sistema de control

El sistema de control asume la toma de decisiones como respuesta a información generada por el sistema sensorial, siendo resultado de estímulos externos y/o internos del robot. La calidad y cantidad de información suministrada por los sensores permite un control estable sobre las trayectorias del robot móvil, minimizando oscilaciones y evitando colisiones hasta su destino. (Bambino, 2008).

1.3.5.1. Controlador PID

Este controlador robusto, es el controlador en retroalimentación más utilizado en la industria. En su forma más básica integra tres parámetros de ajustes: la ganancia K , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d . El comportamiento del control PID se describe en la ecuación 12. (Astrom y Hagglund, 1995).

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (12)$$

Donde $u(t)$ es el control variable y $e(t)$ es el error, resultante de la diferencia entre el valor de referencia y la salida del sistema. El control variable es la suma de P proporcional al error, I correspondiente a la integral del error y D correspondiente a la derivada del error.

- Acción proporcional

El control proporcional puro se expresa en la ecuación 13, donde u_b es un sesgo o reset, es proporcional al error, cuando el error alcance un valor de cero el controlador toma el valor de sesgo u_b . El valor u_b se puede ajustar manualmente para que el error de control estacionario sea cero en un punto de referencia dado.

$$u(t) = Ke(t) + u_b \quad (13)$$

- **Acción integral**

Su función es asegurar que la salida del proceso coincida con el punto de referencia en estado estable. Con la acción integral un error positivo incrementa la señal de control y un error negativo lo minimiza, sin importar el tamaño del error. La acción integral se expresa en la ecuación 14.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (14)$$

- **Acción derivativa**

Su propósito es mejorar la estabilidad del sistema en lazo cerrado. El controlador derivativo resulta de la derivada del error absoluto multiplicada por el valor de la constante derivativa, esta acción minimiza las oscilaciones en el sistema. La estructura básica del controlador se describe en la ecuación 15.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

1.3.6. Sistema de alimentación

Es el encargado de proveer energía y la autonomía al prototipo durante el desarrollo de actividades para las cuales ha sido previamente programado. Suele estar compuesto por placas solares, generadores o baterías, recargables, con una elevada tasa de descarga, de bajo costo y peso. (Misiego López, 2015).

1.3.7. Apariencia externa

La interacción frecuente de personas y máquinas ha creado una nueva tendencia en la robótica, robots asistentes con un aspecto amigable. Un estudio realizado en Seattle analiza las reacciones iniciales de visitantes, pacientes y personal médico a un robot portador en un ambiente hospitalario. Los resultados del estudio afirman que la coexistencia con el ser humano está relacionada con el tiempo y familiaridad con el robot, de las primeras impresiones se denominó al robot como un total extraño, extraterrestre o máquina. (Ljungblad *et al.*, 2012). El desarrollo de nuevas tecnologías busca incrementar el contacto entre robots y personas con productos interactivos, que aporten seguridad y fiabilidad con un conjunto de sensores que le permita una adecuada toma de decisiones y control en sí mismos. A pesar de la asistencia de robots en ciertos centros de salud, no es común encontrarse con uno, y para facilitar la inserción de un ente robótico en contacto con personas se recomienda un diseño robusto, seguro, innovador e interactivo que facilite la interacción eficiente y placentera con el usuario.

1.4 Visión artificial

Es una disciplina que aplica métodos de adquisición, tratamiento y procesamiento de imágenes para ser interpretadas por un computador. Es aplicada en el campo de la robótica para detección de objetos, reconocimiento de imágenes, registro de distancias, entre otras tareas que facilitan el desenvolvimiento del robot.

1.4.1. Técnicas de obtención de imágenes 3D

La obtención de imágenes en 3D se puede obtener de una serie de imágenes, para reconstruir la geometría de la escena aplicando técnicas de visión artificial. Existen varias técnicas que se citan a continuación:

- Cámara estereoscópica, emula fotográficamente la sensación de profundidad basado en la visión humana, creando dos imágenes en 3 dimensiones. (ingeniatic, 2011).
- Multicámara, utiliza dos o más cámaras para obtener imágenes en diferentes ángulos y hacer una reconstrucción de la escena con datos de ancho, largo y profundidad. (ingeniatic, 2011).
- Escáner de luz estructurada, mediante la proyección de un patrón de luz es capaz de capturar la forma, textura y características de un objeto sobre el cual se haya proyectado la luz. (3dnatives, 2016).
- Cámara de tiempo de vuelo en inglés Time of Flight (ToF), usa un sensor para medir la profundidad de una escena comparando la los cambios de una señal de luz infrarrojo, y como resultado genera una imagen en escala de grises con datos de profundidad. (Horaud, 2015).

1.4.2. Procesamiento de imágenes binarias

Al aplicar un filtro o segmentación de una imagen se tiene como resultado una imagen binaria, en una imagen binaria solo existen pixeles con valores de 0 y 255, es decir solo blanco y negro. Sin embargo no siempre se logra obtener una región definida o libre de ruido, para lograr una extracción de fronteras, relleno de regiones entre otras aplicaciones se emplea transformaciones morfológicas.(García Preciado y Gonzalez Forero, 2016).

1.4.2.1. Transformaciones morfológicas

Se basan en operaciones de teoría de conjuntos, simplificando las imágenes pero conservando las características de forma de los objetos, se utiliza para pre-procesamiento de imágenes, destacar la

estructura de los objetos y descripción de objetos. (“Morfología: Imágenes binarias”, 2014). Para su aplicación necesita dos entradas, la imagen original y el elemento estructurador o núcleo. Los operadores morfológicos básicos son:

- Erosión

Es una operación cuya función es desgastar los límites del objeto en primer plano, desplazando el elemento estructurador por la imagen como en la convolución 2D. Un píxel en la imagen original se considerará 1 solo si todos los píxeles del núcleo coinciden, de lo contrario se convierte en 0. Considerando los bordes de la imagen, deben interpolarse o rellenar los valores inexistentes antes de comparar los valores, eliminando ciertos valores de la imagen binaria y manteniendo los coincidentes con el núcleo utilizado. (Opencv, 2014). En la figura 10-1 se puede ver una imagen antes y después de la aplicación de la transformación morfológica de erosión.



Figura 10-1: Operación de erosión.

Fuente: <http://bit.ly/2O0CWIM>

- Dilatación

Es la operación opuesta a la erosión, su funcionamiento es similar desplazando el elemento estructurador por la imagen y si al menos un píxel debajo del núcleo es 1 el píxel en la imagen toma el valor de 1. El resultado es la expansión o dilatación de la región del objeto sobre la imagen en la que se trabaja. En conjunto la operación de erosión y dilatación se usa para la eliminación de ruido en imágenes binarias. (Opencv, 2014). En la figura 11-1 se observa la imagen antes y después de una transformación morfológica de dilatación.



Figura 11-1: Operación de dilatación.

Fuente: <http://bit.ly/2O0CWIM>

1.4.2.2. Detección de bordes: Método Canny

Los bordes son los cambios bruscos de valores en los píxeles de una imagen, y la detección de estos facilitan la localización de objetos y segmentación de regiones. El método de Canny se basa en tres criterios: la detección, la localización y la respuesta; evitando la eliminación de bordes importantes, minimiza la distancia entre la posición real y la localizada del borde e integra múltiples respuestas a un único borde. (Valverde Rebaza, 2007). Este algoritmo de consiste en tres etapas:

- Obtención del gradiente

Para esta etapa se obtienen las derivadas parciales en dirección horizontal G_x y dirección vertical G_y , con la ecuación 16 se encuentra la magnitud en cada punto de la imagen. La dirección de la normal del borde detectado se encuentra con la ecuación 17. (OpenCV, 2015).

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (16)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (17)$$

- Supresión no máxima

Logra el adelgazamiento del ancho de los bordes hasta lograr bordes de un píxel de ancho, eliminando los bordes no deseados verificando pixel a pixel y comparando con píxeles cercanos en la dirección del gradiente si es un valor menor se le asigna un cero. (Garcia Preciado y Gonzalez Forero, 2016). El resultado es una imagen binaria con bordes finos.

- Histéresis de umbral

Aplica una función de histéresis basada en dos umbrales para la eliminación del ruido de píxeles y determinación de bordes falsos. Los bordes con gradiente de intensidad mayor que el máximo umbral se definen como bordes seguros y aquellos por debajo se descartan, excepto los que se encuentren entre los dos umbrales y tengan conexión a un borde seguro.

1.5 Componentes electrónicos y mecánicos del robot

Cada sistema constituye una parte fundamental del robot así como la parte estructural, por ende la comunicación entre cada sistema debe ser óptima. Para que exista armonía entre los sistemas deben manejar los mismos protocolos de comunicación y ser compatibles, por ello es menester hacer un análisis de los dispositivos mecánicos y electrónicos que cumplan con los estándares y objetivos planteados.

1.5.1. Single Board Computer

Es un ordenador de tamaño reducido, con las prestaciones de una computadora de escritorio tradicional. Su tamaño en muchos de los casos no supera el tamaño de la palma de una mano.(Ormeyer, 2014). Consta únicamente de una placa basada en un microprocesador que incorpora memoria para datos y un sistema operativo y añade puertos de entrada y salida. En un robot la SBC se encarga de la toma de decisiones, controlar los periféricos de entrada y salida, así como comunicaciones con otros dispositivos.

1.5.1.1 Análisis comparativo de Single Board Computer

Aunque el término Single Board Computer (SBC) no es muy conocido, existen innumerables placas en el mercado de diferentes fabricantes y con características que las definen. En la tabla 4-1 se coteja las características de las SBC de mayor facilidad en el mercado, las mismas que poseen una garantía por sus fabricantes y mejor soporte para el desarrollo de proyectos ya que incorporan pines GPIO para control de sensores y actuadores.

Tabla 4-1 Comparación de características de Single Board Computer

Placa	CubieAIO-A20	PcDuino v4	HummingBoard	Raspberry PI 3
Características				
SoC	Allwinner A20	Allwinner H3	NXP i.MX6 ARM A9	Broadcom BCM2837
Procesador	480MHz Dual-Core ARM Corte-A7	1.2 GHz Quad core Cortex A7	1GHz Dual Lite NXP i.MX6	1.2GHz Quad- Core ARM Cortex-A53
Memoria RAM	1Gb	1Gb	512 Mb	1 Gb
USB	6	3	2	4
Salida de video	HDMI, Jack	HDMI	HDMI	Jack, HDMI
Almacenamiento	8GB	MicroSD	8GB	MicroSD
Conectividad	Ethernet,WiFi, BT	Ethernet, Wifi,	WiFi, BT	Ethernet,WiFi, BT
Potencia	5 V, 4 A	5V, 2A	5V, 3A	5V, 2.5 ^a
GPIO	54 pines	40 pines	26 pines	40 pines
Tamaño	172 x 106 mm	64 x 56 mm	85 x 56 mm	85 x 56 mm
Costo	\$139.80	\$82.73	\$101	\$67.49

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En vista a los datos analizados en la tabla 4-1, la Raspberry Pi tiene las mejores características en cuanto a tamaño, soporte, capacidad, número de pines GPIO, además de bajo costo para la implementación del prototipo.

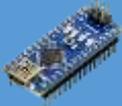
1.5.2. Tarjetas de desarrollo Arduino

Arduino, es la plataforma de *software* libre más utilizada por desarrolladores por su bajo costo y soporte multiplataformas, además sus tarjetas de desarrollo de *hardware* poseen licencia pública que facilita la construcción de dispositivos digitales e interactivos. Se basan en un microcontrolador Atmega que varía de acuerdo a sus versiones, sus innumerables ventajas convierten la plataforma en la opción más factible, con un entorno amigable y sencillo para el desarrollo de proyectos multidisciplinarios.

1.5.2.1. Análisis comparativo de tarjetas de desarrollo arduino

En la tabla 5-1, se hace una comparativa de las placas Arduino con mejores prestaciones y de fácil adquisición en el mercado nacional. En base a las características planteadas establecer cuál de ellas brinde el mejor soporte para elementos que conformen el *hardware* del presente trabajo de investigación.

Tabla 5-1 Comparación de características de Placas de desarrollo Arduino

Placa	Arduino Nano	Arduino Uno	Arduino Mega
Características			
Microcontrolador	ATmega328	ATmega328	ATmega2560
Voltaje de operación	5V	5V	5V
Alimentación	7-12V	7-12V	7-12V
I/O pines digitales	14 (6 PWM)	14 (6 PWM)	54 (15 PWM)
I/O pines analógicos	No tiene	6 entradas	16 entradas
Memoria Flash	32Kb	32Kb	32Kb
Frecuencia	16Mhz	16Mhz	16Mhz
Dimensiones	18.5 x 43.2 mm	53 x 68 mm	101.6 x 53.34 mm
Costo	\$8	\$12	\$16

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Con base a los datos recopilados en la tabla 5-1, el arduino mega tiene las mejores características en cuanto a capacidad de memoria y número de pines digitales, convirtiéndola en ideal para la ejecución del trabajo de investigación.

1.5.3. Motores DC

Un motor es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica, gracias a efecto de un campo magnético generado por un bobinado que constituye el rotor y provocando un movimiento rotatorio.

- *Modulación por Ancho de Pulso PWM*

En base a la modulación del ancho de pulso de la señal de tensión se realiza el control de velocidad de un motor. La modulación por ancho de pulso varía el tiempo de una señal cuadrada de dos estados: alto o bajo, donde bajo es 0V. El ciclo de trabajo mide el tiempo o porcentaje de tiempo de una señal en alto. (MCI Capacitación, 2015).

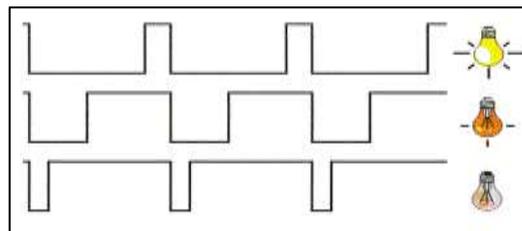


Figura 12-1: Modulación por ancho de pulso

Fuente: <http://bit.ly/2ETfWfN>

1.5.4. Driver de Motores Dual

Es una placa encargada del control de dos motores de forma sencilla y eficaz, permite controlar el sentido de giro y velocidad por señales PWM de un microcontrolador. En el mercado existen una variedad de driver que permiten manejar ya sea motores dc, servomotores, motores paso a paso, entre otros. Dependiendo el consumo de voltaje y corriente de los motores se dimensiona la potencia del driver.

1.5.4.1. Análisis comparativo driver para motores

Una de las características más relevantes en un driver para el control de motores es la protección y el soporte que estas ofrecen para el mejor desempeño de proyectos o prototipos de diversa índole. En la tabla 6-1 se analiza las características de drivers para motores.

Tabla 6-1 Comparación de características de Driver para motores

Características \ Placa	Sabertooth 2x25 	RoboClaw 2x30A 	Módulo de control MOSFET 
Corriente	25A continua 50A pico x canal	30A continua 60A pico x canal	50A continua 100A pico x canal
Voltaje	6-30 V nominal	6-34 V	5-12V
Protección	Térmica, Sobrecorriente	Térmica, Sobrecorriente	Sobrecorriente
Dimensiones	65 x 80 x 20 mm	52 x 74 x 18 mm	60 x 45 x 19 mm
Peso	96 g	62 g	15 g
Costo	\$127.99	\$124.95	\$25.80

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Con los datos examinados en la tabla 6-1, el módulo de control de doble canal MOSFET posee las mejores características en cuanto a tamaño, peso y costo, además ofrece protecciones haciéndola ideal para la implementación del presente trabajo de investigación.

1.5.5. Sensores

Los sensores son los principales dispositivos en el sistema de percepción y navegación de un robot, mediante estos el robot puede interactuar a estímulos del ambiente. Estos estímulos son magnitudes físicas convertidas en señales eléctricas gracias al sensor, estas son interpretadas y procesadas por un microcontrolador.

1.5.5.1. Encoder

Estos sensores son los más usados para sistemas de odometría. Son codificadores usados para el control de posición angular, su funcionamiento se basa en un sensor ya sea óptico o magnético y un disco que genera señales digitales en respuesta al movimiento de un motor. (Romero Barcojo, 2012). Los tipos más comunes de encoder se clasifican en:

- Encoder relativo

También conocido como incremental, estima la posición por cuentas acumulativas comparando la posición actual del sensor con el anterior registrado. Posee un disco único con marcas o ranuras únicas en cada posición. Uno de los más conocidos es el encoder de cuadratura, que usa dos sensores ópticos desplazados $\frac{1}{4}$ de ranura uno del otro, generando un desfase de 90° o en cuadratura. (Requena, 2009).

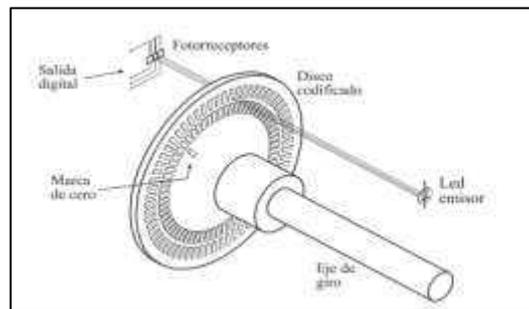


Figura 13-1: Disposición de un encoder relativo

Fuente: (Barrientos *et al.*, 2007, p.52), Fundamentos de Robótica

- Encoders absolutos

Tiene un disco codificado con binario o gray, con bandas dispuestas en forma de coronas circulares concéntricas, de tal forma que el sentido radial queda dividido en sectores. (Romero Barcojo, 2010).

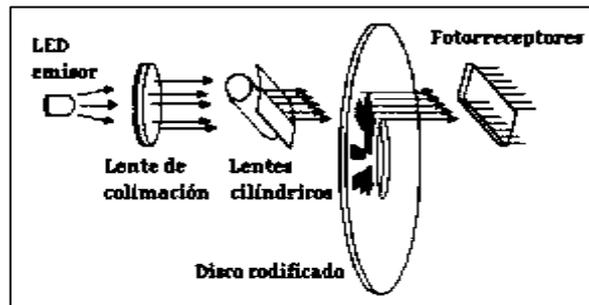


Figura 14-1: Disposición de un encoder absoluto

Fuente: <http://bit.ly/2No6feW>

1.5.5.2. Sensor de distancia

Estos sensores permiten convertir la magnitud física de la distancia en una señal analógica, la misma que puede ser manipulada por un microcontrolador. Su funcionamiento se basa al hacer una estimación de distancia establecer en el tiempo que tarda en recorrer una onda de sonido o de luz con cada rebote sobre un objeto.

- Ultrasonico

Usa ondas de sonido para medir distancias. Su funcionamiento se basa en un emisor y receptor de onda de sonido a una frecuencia específica y recibe la onda después de que rebote en un objeto. En la figura 15-1 se puede apreciar el funcionamiento del sensor ultrasónico. (Kota, 1998).

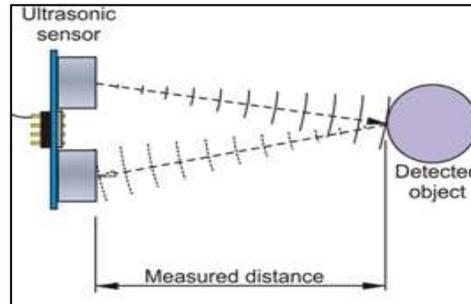


Figura 15-1: Sensor Ultrasonico.

Fuente: <http://bit.ly/2J6tszx>

1.5.5.3. Sensor de visión

Emplea imágenes capturadas por una o varias cámaras para determinar la presencia y orientación de objetos ubicados en un determinado espacio.

- Kinect

El sensor Kinect es un conjunto de cámaras que logra registrar y hacer un seguimiento de movimientos corporales, además de reconocimiento de gestos y comandos de voz. Para cumplir con este fin posee: una cámara RGB, sensor de profundidad, micrófono multi-array, un procesador, y servomotor que le da un rango de inclinación $\pm 27^\circ$. Su campo de visión angular es de $\pm 43^\circ$ verticalmente y $\pm 57^\circ$ horizontalmente, el rango de medida de profundidad es 0.4 a 3.5 metros, y las cámaras tienen dos resoluciones 320×240 pixeles a 16 bits de profundidad y 640×480 pixeles a 32-bit de color. En la figura 16-1 se observa las partes internas y externas del sensor.

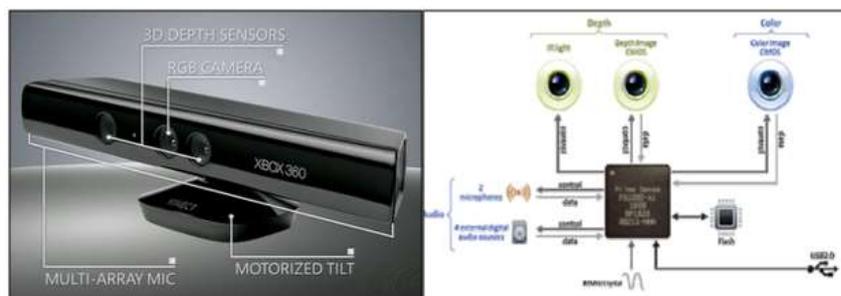


Figura 16-1: Sensor Kinect a. Vista externa b. Vista interna

Fuente: <http://bit.ly/2H9jFfi>

1.5.6. Batería

Es un dispositivo que acumulan energía a con procesos electroquímicos, previo a una carga eléctrica. Entre las más conocidas se encuentran las pilas alcalinas, de ácido de plomo, de níquel, litio o grafeno.

- **Batería de polímero de litio o LiPO**

Es recargable, y tiene gran demanda ya que al ser una variación de las baterías de litio o iones de litio, posee mayor densidad energética y tasa de descarga. Su popularidad depende de sus reducido tamaño, peso y buen rendimiento. (Baterías Eléctricas, 2016).

Su voltaje depende del número de celdas, ya que cada celda posee 3.7V y se pueden acoplar varias celdas en serie acumulando el voltaje por celda.

1.6 Comunicación serial

La comunicación serial es un protocolo estándar que envía y recibe bytes de información a un bit a la vez, uno detrás de otro en serie. Transmite datos en formato ASCII. En comparación a una comunicación en paralelo, que envía un byte completo es más lenta, pero más sencilla y puede alcanzar distancias mayores. (National Instruments, 2006a).

- **Comunicación RS-232**

RS-232, Estándar ANSI/EIA-232. Es una comunicación de punto a punto entre los dispositivos y el puerto serial de la controladora, PC o SBC. El *hardware* de RS-232 se puede utilizar para comunicaciones seriales en distancias de hasta 15 metros. (National Instruments, 2006b).

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

El diseño metodológico aplicado al desarrollo del presente trabajo de investigación se basa en una investigación tecnológica experimental, aplicando métodos como el método inductivo para recopilar información acerca de sistemas de navegación, sistemas de locomoción, sistemas de control y morfología de un robot móvil y así encontrar la solución óptima para el desarrollo del prototipo, mientras el método heurístico es aplicado al diseño e implementación del prototipo, mediante el estudio, elaboración y ejecución de un plan para el dimensionamiento y selección de componentes que validen el funcionamiento y rendimiento. Finalmente, se aplica el método experimental para la ejecución de pruebas y análisis de resultados que permiten examinar el comportamiento del prototipo según la manipulación de variables a criterio del investigador.

El proceso de desarrollo se divide en fases, en la figura 1-2 se ilustra los componentes y características de cada fase:

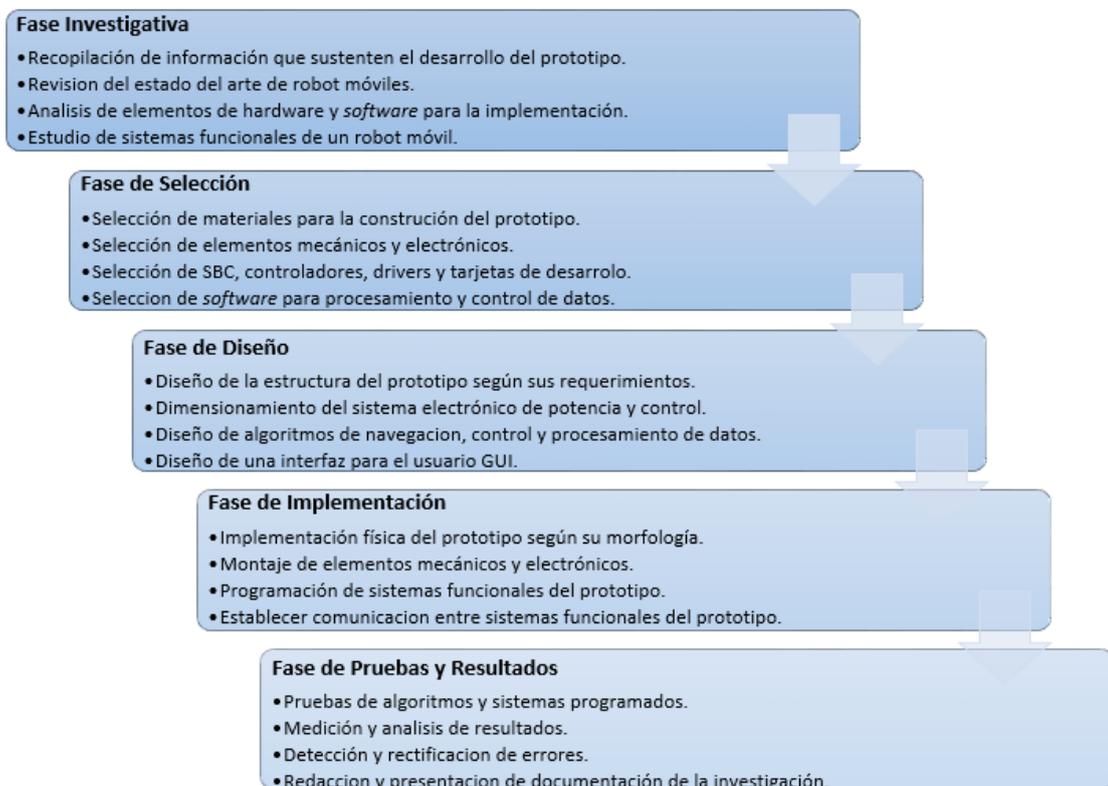


Figura 1-2: Fases de desarrollo del prototipo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.1. Descripción general del prototipo

El prototipo debe movilizarse dentro de la institución para cumplir con la entrega de insumos médicos evadiendo obstáculos y evitando colisiones, para ello cuenta con un sistema sensorial, que está constituido por sensores laterales que guían al robot en una trayectoria manteniendo una distancia segura con las paredes de los pasillos. Cuenta con un sensor Kinect que determina obstáculos estáticos o dinámicos para ejecutar una maniobra de evasión. Para que el robot llegue a su destino debe establecer su posición y orientación respecto a un sistema de referencia, para cumplir con dicho propósito el prototipo posee un sistema de navegación basado en odometría con encoders en cada motor. De esta manera y con todos sus sistemas integrados a una Single-Board Computer y mediante una interfaz visual de fácil comprensión para el usuario, cumple con la función de trasladarse de un punto A hacia un punto B cumpliendo con su cometido.

2.2. Requerimientos del robot móvil

Para la construcción y diseño del prototipo de robot móvil para la entrega de insumos médicos en el centro de Salud Tipo C Espoch-Lizarzaburu se requiere que cumpla con características que aseguren el transporte de insumos médicos, que son:

- Capacidad de almacenaje para el transporte de insumos médicos.
- Conjunto de sensores exteroceptivos que evite colisiones con paredes, obstáculos y le permitan llegar a su destino.
- Estructura que soporte el peso del prototipo.
- Actuadores que garanticen el movimiento del prototipo.
- Baterías que aseguren una autonomía mínima de una hora.
- Seguridad en los compartimientos para salvaguardar la integridad de los insumos médicos.
- Una interfaz visual de fácil comprensión para el usuario.
- Contar con un rostro amigable para las personas que asisten al centro de salud.
- Las rutas para los destinos establecidos deben ser previamente establecidas con el personal médico, para que no alteren las funciones cotidianas en el centro de salud.
- Ser de bajo costo y fácil transportación.

2.3. Concepción universal del diseño de *hardware* del prototipo

Para mejor comprensión del funcionamiento del prototipo a desarrollar se ha diseñado el diagrama general del prototipo que se aprecia en la figura 2-2.

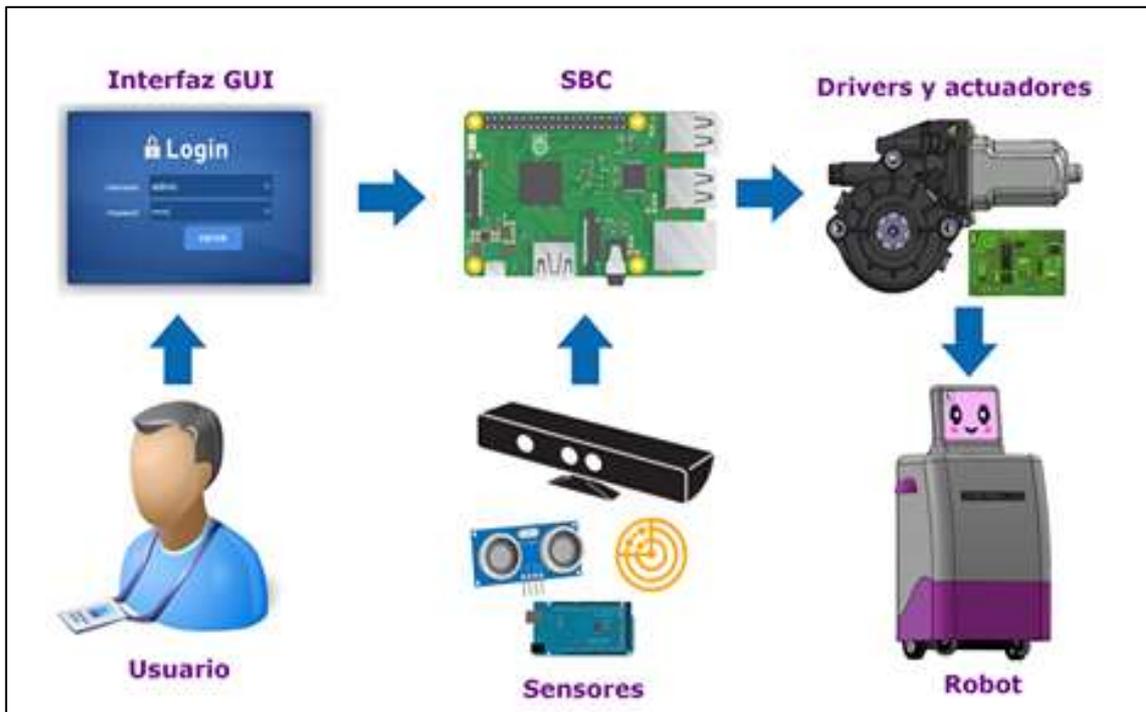


Figura 2-2: Diagrama general del prototipo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.4. Arquitectura de *Hardware*

Una vez seleccionados los dispositivos de *hardware* y para una mejor comprensión del funcionamiento del prototipo se ha dividido el desarrollo en dos partes: detección de obstáculos y navegación.

- Etapa de detección de obstáculos

El desarrollo de esta etapa se centra en la obtención y procesamiento de imágenes, la toma de decisiones y análisis de obstáculos, estáticos y dinámicos. En la figura 3-2 se detalla la arquitectura de la etapa de detección de obstáculos, está conformada por el bloque de adquisición de imágenes captadas por el sensor Kinect, a su vez se comunica con el bloque de procesamiento conformado por una Raspberry Pi 3 Model B cuya función es procesar las imágenes que recibe del sensor de profundidad de la Kinect, para determinar obstáculos y la proximidad a los mismos. El bloque de alimentación provee de energía necesaria para el funcionamiento de esta etapa, la tensión necesaria para el correcto funcionamiento de los dispositivos se encuentra a dos niveles para lo cual se necesita un regulador de voltaje.



Figura 3-2: Diagrama de bloques de la etapa de detección de obstáculos

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

- Etapa de navegación

En esta etapa se encuentra el bloque de adquisición de datos, donde se recibe información recopilada por los sensores propioceptivos y exteroceptivos con los que cuenta el prototipo. Los datos de los sensores pasan al bloque de control que cuenta con una tarjeta de desarrollo Arduino Mega que procesa la información proveniente del bloque de adquisición de datos y se encarga del accionamiento de los actuadores, como se puede ver en la figura 4-2.



Figura 4-2: Diagrama de bloques de la etapa de navegación.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.5. Selección de dispositivos de *hardware* para la construcción del prototipo

Posterior al análisis de los requerimientos, así como la arquitectura de hardware, se procede a la selección de componentes que integran el prototipo.

2.5.1. Dispositivos de obtención de datos

Estos dispositivos poseen la propiedad de captar magnitudes físicas del medio, para transformarlas en señales eléctricas que pueden ser procesadas por un microcontrolador.

2.5.1.1. Sensor Kinect

El sensor de profundidad de la Kinect proyecta un patrón de luz infrarroja modulada en amplitud, el mismo que es recibido por la cámara IR para calcular la distancia por triangulación estereó, convirtiendo la diferencia de fase entre la luz emitida y reflejada en distancia para cada pixel de la imagen. Aplicando este método la Kinect puede devolver una serie de vóxeles. (Calibo, 2014). Para representar una imagen en 3 dimensiones estos deben sufrir cambios de opacidad, teniendo como resultado una imagen a escala de grises, que está compuesta por una serie de valores matriciales que tomarán un valor entre 0 y 255. Los datos de profundidad se devuelven en un mapa de píxeles con una frecuencia de 30fps, para una correcta detección y funcionamiento debe cumplir las siguientes condiciones:

- El objeto debe encontrarse en el rango de distancia y ángulo de visión del sensor Kinect.
- Evitar objetos de tipo translucido, especular o cóncavo que no reflejen el patrón de luz infrarroja.
- Precautelar condiciones lumínicas óptimas.

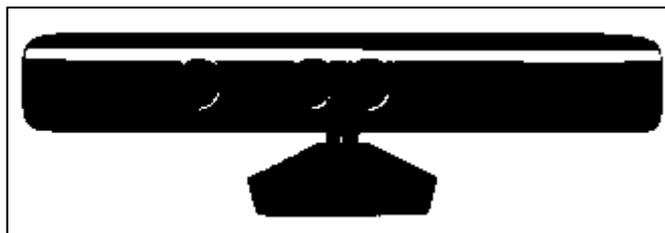


Figura 5-2: Sensor Kinect

Fuente: <http://bit.ly/2L7MCX5>

2.5.1.2. Sensor Ultrasónico

Usa ondas de sonido para medir distancias, tomando el tiempo que tarda en rebotar las ondas en un objeto que se encuentre en el rango de medida del sensor. El prototipo incorpora dos sensores ubicados lateralmente que le permite mantenerse a una distancia prudencial de las paredes en el pasillo por donde moviliza.

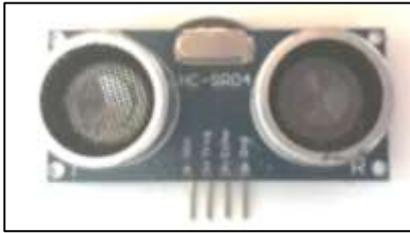


Figura 6-2: Sensor Ultrasonico

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.5.1.3. Sensor infrarrojo

Estos sensores poseen un diodo led emisor y un fototransistor, el diodo emisor proyecta luz infrarroja invisible a la vista, esta golpea un objeto y es receptada por la base del fototransistor lo que permite la conducción.



Figura 7-2: Sensor Infrarrojo QRD1114

Realizado por: <http://bit.ly/2JJZHV7>

2.5.1.4. Encoder Incremental

Se caracteriza porque determina la posición angular del prototipo al contar los pulsos generados cuando un haz de luz atraviesa por un disco con hendiduras o marcas en su superficie.

Utiliza dos canales desfasados que permite contar impulsos de un canal y determinar el sentido de giro a partir del desfase entre los dos canales. (Romero Barcojo, 2010). Se construyó un encoder óptico incremental usando sensores infrarrojos QRD1114 para los canales A y B como se muestra en la figura 8-2.

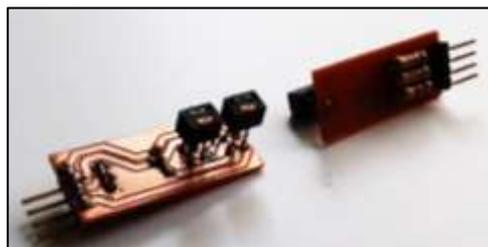


Figura 8-2: Encoders

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

Para su correcto funcionamiento se construyó un disco óptico de dos canales desfasados 90 grados con 20 divisiones de color blanco y negro como se muestra en la figura 9-2, lo que permite al sensor contar los pulsos del canal A y B como se detalló en el primer capítulo.

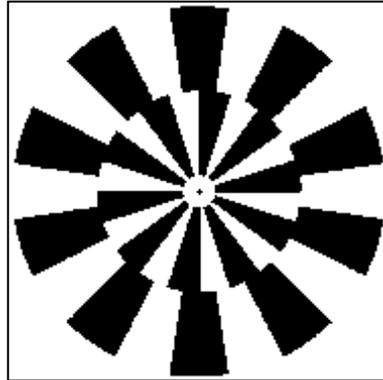


Figura 9-2: Disco Óptico

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

El sensor genera dos señales cuadradas desfasadas 90 grados, en la figura 10-2 se puede observar las señales de los canales A y B antes y después del acondicionamiento mediante transistores bjt.



Figura 10-2: Señales de los canales A y B

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.5.2. *Dispositivo de procesamiento*

Se basa en un microprocesador, incorpora memoria y terminales de entrada y salida que permite el control y comunicación de periféricos para un mejor manejo del prototipo. A este dispositivo se conecta como entrada el sensor Kinect del cual se toman los datos para un cómputo y así determinar la proximidad de obstáculos que se encuentren frente del prototipo, y subsiguientemente ejecutar acciones. Y se enlaza mediante un protocolo serial con la placa de desarrollo arduino, con la que mantiene comunicación para control odométricos y de motores, y demás sensores internos y externos.

2.5.2.1. Single-Board Computer Raspberry Pi 3 Model B

Por su versatilidad, accesibilidad y soporte, además de su tamaño y costo la han de la Raspberry Pi la más cotizada para proyectos de desarrollo, sobre todo en el campo de visión e inteligencia artificial. Esta plataforma tiene soporte para software como OpenCV que es una biblioteca para desarrollo de aplicaciones de visión artificial, además de OpenKinect que es la manera más eficiente de utilizar el sensor Kinect con la misma finalidad, una característica de estas bibliotecas es que son de acceso libre al igual que el sistema operativo Raspbian. Posee un procesador de 1.2GHz 64-bit quad-core, un chip de video con salida HDMI al que se conecta una pantalla LCD para visualizar la interfaz y el rostro del prototipo. Además de 4 puertos USB, a estos se conecta el sensor Kinect y periféricos externos como un teclado y/o mouse.



Figura 11-2: Raspberry Pi 3 Model B

Fuente: <http://bit.ly/2H23ywb>

2.5.3. Dispositivos de control

Estas placas de desarrollo son de gran utilidad para aplicaciones electrónicas, facilitan el control de actuadores y sensores. Serán las encargadas de recibir los datos de los sensores, realizar el procesamiento de coordenadas odométricas y el control de velocidad de los motores, se conecta a la Raspberry Pi por comunicación serial.

2.5.3.1. Tarjeta de desarrollo Arduino MEGA 2560

Esta tarjeta de la plataforma Arduino tiene mejores prestaciones en comparación a otras versiones, siendo la placa más completa de la plataforma. Basado en un ATmega2560, posee 54 terminales de entrada y salida, de los cuales 14 son salidas PWM y 16 entradas analógicas permitiendo manejar proyectos de mayor demanda con respecto a *hardware*. Se encarga de procesar los datos de los sensores ultrasónicos convirtiéndolas en variables de distancia y los pulsos de los encoder incrementales calculando la distancia, ángulo y sentido de giro de ruedas del prototipo. Además

controla las variables de salida para los motores, las variables de PWM que manipula el driver para el giro y velocidad de motores.



Figura 12-2: Arduino MEGA 2560

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.5.3.2. Puente H, Módulo de control doble canal MOSFET

Es una placa de accionamiento eficiente para control de velocidad y potencia de motores DC. Cuenta con una acción de freno rápido gracias a un MOSFET de baja resistencia interna, tiene minimización de conmutación mejorando la eficiencia energética y protección sobrecorrientes. (Banggood, 2017). Se conecta los motores y el voltaje de alimentación, recibe 6 señales PWM de entrada del Arduino de los pines 2, 3, 4, 5, 6, 7.



Figura 13-2: Módulo de control doble canal MOSFET

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.5.4. Visualización de rostro e interfaz

Con el fin de ayudar a la inserción de un ente robótico se ha diseñado una interfaz con el usuario de fácil comprensión, la misma se visualiza en una pantalla que emula el rostro del prototipo. La pantalla es LCD con una placa controladora de TV LCD Universal V56.

2.5.4.1. Pantalla Samsung LCD 14.1”

Está formada por 1280 x 800 de píxeles que se colocan delante de una fuente de luz, dispuestos en forma de matriz con un bajo consumo de energía eléctrica. El módulo V56 facilita la conexión de periféricos a la pantalla, cuenta con un puerto HDMI para conectar a la Raspberry Pi de la cual se muestra un rostro diseñado para el prototipo y una GUI con control de acceso, selección de compartimiento, y destino del prototipo. Las características técnicas de la pantalla se detallan en la tabla 1-2.



Figura 14-2: Pantalla Samsung LCD

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Tabla 1-2. Características de pantalla LCD

Características	Pantalla LCD
Marca	Samsung LTN141AT03
Tamaño	14.1 inch
Cociente de contraste	800:1
Resolución	1280 x 800 px
Tiempo de respuesta	3 ms
Conector	30 pins LVDs
Tipo de panel	TFT

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.5.5. Actuadores eléctricos

Estos dispositivos poseen la propiedad de transformar energía eléctrica en movimientos mecánicos. Para el movimiento del prototipo se utilizó una configuración diferencial que usa dos motores de alto torque. Al mismo tiempo se usa tres cerraduras eléctricas, uno en cada compartimiento del prototipo asegurando la integridad de los insumos en el trayecto a su destino.

2.5.5.1. Motor DC

Estas máquinas de corriente continua transforman energía eléctrica en energía mecánica, para el prototipo se ha seleccionado motores eleva vidrios de automóviles. Estos motores poseen gran torque debido a un tornillo sin fin y un engrane acoplado al eje del motor, como se observa en la figura 15-2, y sus características técnicas se detallan en la tabla 2-2.



Figura 15-2: Motor DC

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Tabla 2-2. Características de los motores

Características	Motor
Marca	Bunker
Voltaje nominal	12 V
Velocidad sin carga	110 RPM
Corriente sin carga	1.15 A
Par sin carga	0.34 Nm
Velocidad con carga	100 RPM
Corriente con carga	2.51A
Par con carga	1.20 Nm
Corriente de arranque	21.87 A
Par de arranque	1.20 Nm

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.5.5.2. Cerradura eléctrica

Es una bobina de alambre de cobre que genera un campo magnético con el paso de la corriente, el campo provoca una fuerza de atracción sobre el seguro que permite la apertura del compartimiento, cajón, gabinete o puerta donde se encuentre. Brindan seguridad y estabilidad por

su diseño pequeño y fino de acero inoxidable. Cada cerradura se coloca en cada compartimiento del prototipo que se activa con los pines digitales 10, 11 y 12 del Arduino.



Figura 16-2: Cerradura eléctrica

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.5.4. Sistema de alimentación

Se basa en un cálculo de consumo de corriente y capacidad de voltaje de los dispositivos que componen el prototipo. La alimentación requiere tres niveles de tensión, ya que cuenta con componentes digitales que requieren 5V, y actuadores que operan a 9V y 12 V. Esta etapa se encarga de regular la tensión con dos convertidores DC-DC de alto rendimiento.

2.5.4.1. Batería LiPO

Batería de polímero de Litio, es una batería recargable, de tamaño y peso reducido. Para definir la batería que asegure el funcionamiento adecuado de los dispositivos que conforman el prototipo se define el consumo de cada dispositivo como se detalla en la tabla 3-2.

Tabla 3-2. Consumo de dispositivos del prototipo

Dispositivos	Corriente (mA)
Raspberry Pi 3 Model B	350
Arduino MEGA 2560	46
Puente H	36
Sensor Kinect	340
Sensores Ultrasónicos HC-SR04	2
Encoders	50
Pantalla LCD 14.1"	775
Motores DC	2300
Cerraduras	430
Buzzer	25
TOTAL	3854

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

Con el consumo establecido se procede a la selección de 4 baterías LiPO de 11.1V a 2200 mAh, conectadas en paralelo para incrementar la corriente a 8800mAh. En la figura 17-2 se observa una de las baterías usadas en la implementación. Otra característica a tomar en cuenta en las baterías es el porcentaje de la tasa de descarga que es de 30-40 C, que definen la corriente máxima que pueden suministrar las baterías.



Figura 17-2: Batería LiPO

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.5.4.2. Regulador de voltaje LM2596

Es un regulador de conmutación gradual tipo buck, permite reducir una tensión continua con una alta eficiencia. Tiene una carga de 3A con regulación de voltaje en un rango de 1.2V a 37V, y protección con sobrecargas y sobrecorrientes.

Se usa un regulador conectado al bloque de procesamiento con un voltaje de salida de 5V de acuerdo a los requerimientos de alimentación que exige esta SBC, y un regulador con una salida de 9V para la alimentación del bloque de control para su correcto funcionamiento.

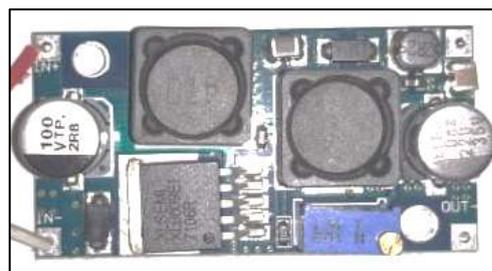


Figura 18-2: Regulador de voltaje LM2596

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.6. Esquema de conexión electrónica

El diagrama general de conexiones del prototipo se muestra en la figura 19-2. Donde la SBC Raspberry pi3 es el elemento principal, al mismo se conecta la pantalla de 14" para visualización de la interfaz y rostro del prototipo por el puerto HDMI, el sensor Kinect se comunica por el

puerto USB y la tarjeta de control Arduino se enlaza mediante comunicación serial por los pines Tx y Rx. Para la adquisición de datos se conectan a la placa Arduino los dos sensores ultrasónicos HC-SR04, y dos encoders incrementales compuestos de dos sensores ópticos QR1114 cada uno que se conectan a los pines digitales del Arduino. También se conecta el Módulo de control doble canal MOSFET por los pines de PWM del Arduino, para el control de velocidad de los motores. La alimentación del sistema tiene 3 niveles de voltaje: 12V para pantalla, Kinect y motores, 9 V para Arduino y cerraduras, 5V para alimentación de Raspberry Pi 3; estos niveles son obtenidos gracias al regulador de voltaje LM2596.

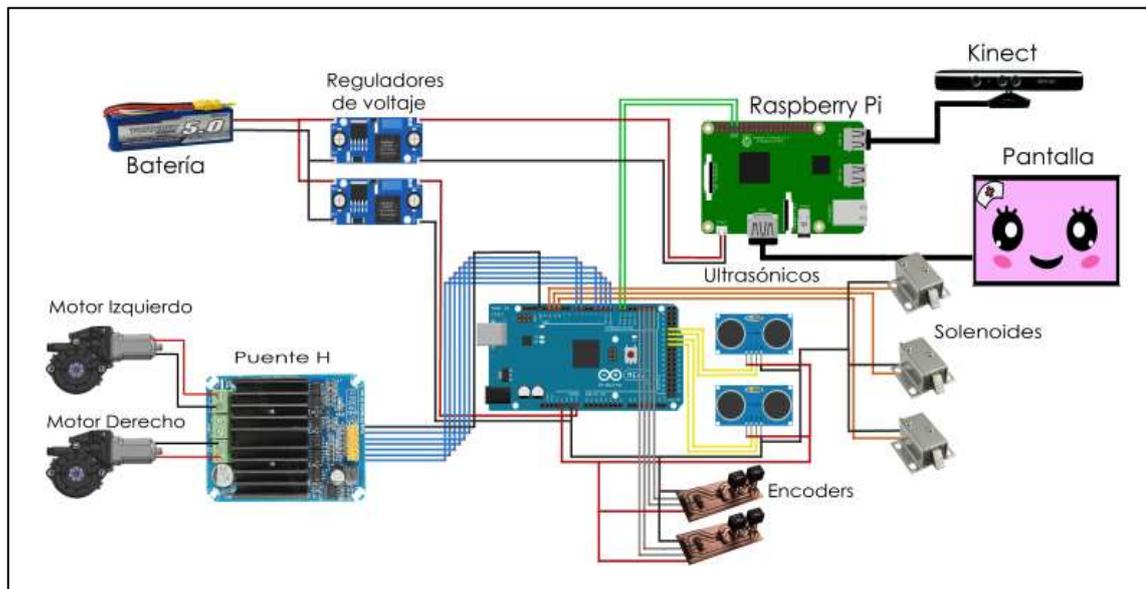


Figura 19-2: Diagrama de conexión electrónica del prototipo

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.6.1. Tabla de terminales

En este apartado se describen las conexiones de los dispositivos de los diferentes sistemas que integran el prototipo. En la tabla 4-2, se detallan los terminales de conexión de los dispositivos del bloque de procesamiento de la etapa de detección de obstáculos.

Tabla 4-2. Terminales de conexión de Raspberry Pi 3

Módulos	Terminales Arduino
Arduino Mega	10 (Tx) 11 (Rx)
Pantalla LCD 14"	Puerto HDMI
Sensor Kinect	Puerto USB 1

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En la tabla 5-2, se describen los terminales de conexión de los dispositivos *hardware* la placa de control Arduino que constituye el bloque de control de la etapa de navegación.

Tabla 5-2. Terminales de conexión de Arduino

Módulos	Terminales Arduino	
Control de motores	Canal A	Canal B
	6 (IN1)	7 (IN1)
	2 (IN2)	3 (IN2)
	4 (EN)	5 (EN)
Sensores Ultrasónicos	Sensor 1	Sensor 2
	28 (Trig)	32 (Trig)
	30 (Echo)	34 (Echo)
Sensores Encoders	Sensor 1	Sensor 2
	18 (canal 1)	20 (canal 1)
	19 (canal 2)	21 (canal 2)
Cerraduras eléctrica	10 (salida digital)	
	11 (salida digital)	
	12 (salida digital)	
Buzzer	52 (salida digital)	

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.6.2. Diseño de PCB

Previo a la implementación electrónica se realizó una simulación y verificación de funcionamiento de los dispositivos, y para optimizar el cableado y conexión de estos elementos se ha diseñado una placa de circuito impreso (PCB) para la etapa de navegación. En la figura 20-2 se puede observar el diseño de la PCB, realizado el *software* Proteus.

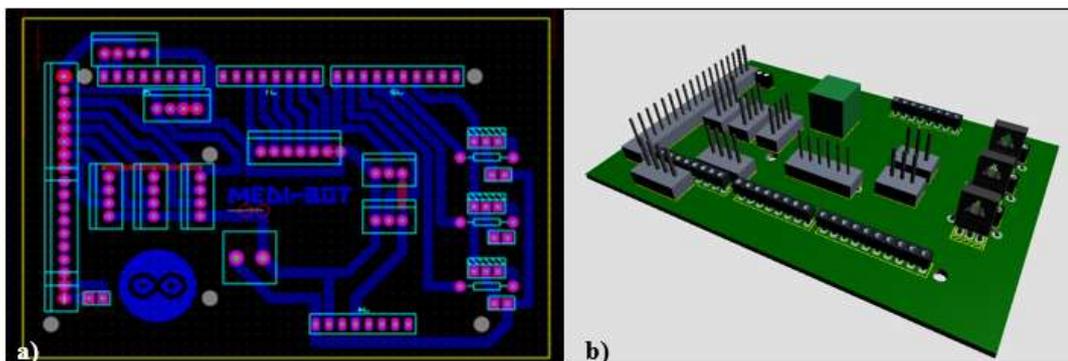


Figura 20-2: PCB para etapa de control. a) Diagrama esquemático b) Vista 3D

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018.

2.7. Diseño Estructural del prototipo

Esta etapa es de vital importancia para el correcto funcionamiento del prototipo, como preliminar al diseño se considera requerimientos y las medidas antropométricas con relación a la ergonomía de los usuarios del prototipo. Las medidas ergonómicas aseguran la buena postura y altura adecuada de trabajo que evite inclinaciones forzadas del tronco impidiendo lesiones y fatiga. En la figura 21-2 se detallan las medidas de una persona promedio.

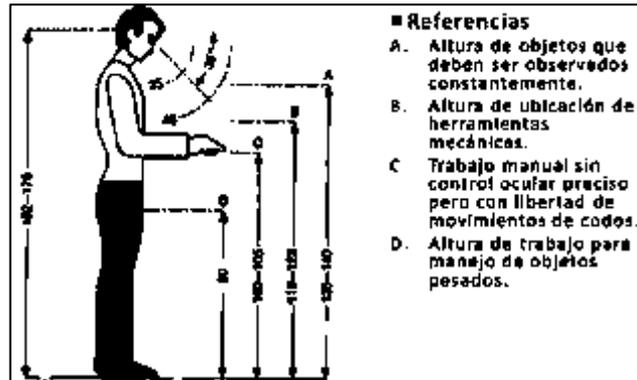


Figura 21-2: Distancias mínimas de trabajo parado.

Fuente: <http://bit.ly/2L96uso>

La altura para trabajo con libertad de movimientos de codos limita la altura del cuerpo del prototipo, sin embargo la altura total del prototipo puede alcanzar 140cm. Mientras que el ancho del prototipo se limita al área donde se moviliza, según la norma NTE INEN 2 247:2000 las dimensiones mínimas de un pasillo con acceso público es 1.20 m., y donde se prevea una circulación frecuente de sillas de ruedas debe tener un ancho mínimo de 1.80 m., mientras en pasillos de poca afluencia se aceptan reducciones de hasta 0.90 m. (Quito, 2003), en el centro de salud el ancho de los pasillos de acuerdo a la norma está en un rango de 1,90 m. y 2,50 m.



Figura 22-2: Ancho de los pasillos del centro de salud.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Basando la altura recomendada por las medidas antropométricas y el área de desempeño del prototipo, se procede al diseño 3D previo a la implementación, el mismo que se puede ver en la figura 23-2.

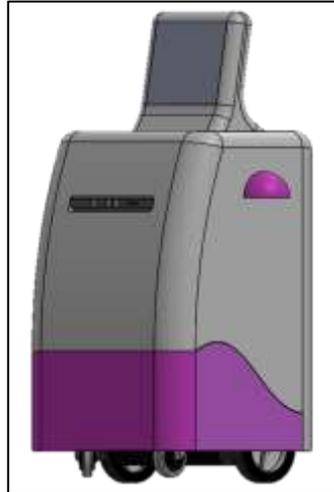


Figura 23-2: Vista general del diseño.

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.7.1. Cabeza

Como ya se había planteado la apariencia y similitud de un robot a un humano facilita la interacción con las personas. Para que el prototipo tenga una apariencia más sociable se ha añadido una cabeza como complemento al chasis, esta estructura aloja la pantalla LCD donde se proyecta un rostro amigable que interactúe de mejor manera con los pacientes y personal del centro de salud. El diseño de la cabeza como se puede ver en la figura 24-2, sirve a más de ser el rostro como protección anti golpes para la pantalla.

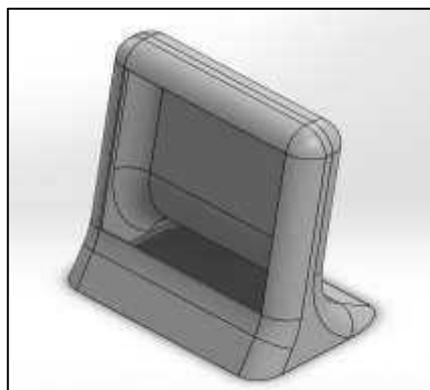


Figura 24-2: Diseño de cabeza.

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.7.2. Chasis

Es un análogo a esqueleto capaz de soportar el peso del prototipo, como: los motores, ruedas y rodamientos, y la parte electrónica como: batería, sensores, placas de desarrollo, drivers y SBC. Está formado por la base y el cuerpo, además de poseer compartimientos en el cuerpo para alojar los insumos médicos.

- Base

Es el soporte del cuerpo del prototipo por ende debe ser resistente y con un área que brinde estabilidad al mismo. Acoge todo el sistema de locomoción que comprende ruedas matrices, ruedas de soporte y motores, el diseño de la base que se puede apreciar en la figura 25-2.

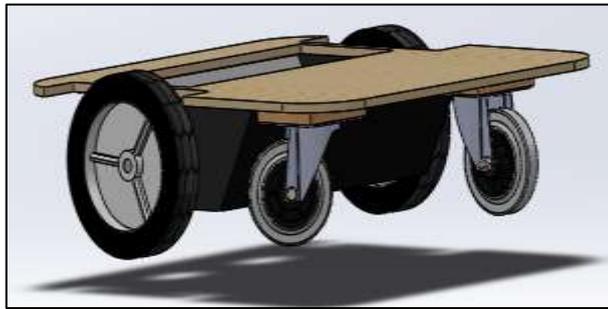


Figura 25-2: Diseño de la base.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

- Cuerpo

El diseño del cuerpo del prototipo es hueco y posee tres compartimientos donde el prototipo albergará los insumos médicos para su transportación. En la figura 26-2 se puede apreciar el diseño final.

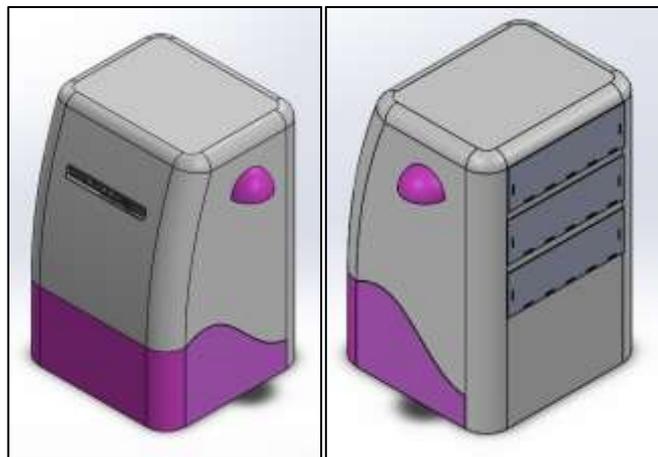


Figura 26-2: Vista frontal y posterior del diseño de cuerpo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.8. Construcción del prototipo

Este apartado se enfoca a la descripción del proceso de fabricación del prototipo posterior al diseño. La construcción es mixta, y para cada parte del prototipo se utilizó materiales que resulten resistentes, livianos y de bajo costo.

2.8.1. Implementación del cuerpo

El cuerpo está construido con fibra de vidrio, siendo de menor costo para la fabricación y muy ligero de peso. Por sus características de resistencia a la: tensión, impacto, compresión y altas temperaturas, a más de un bajo índice de absorción de humedad, se convierte en un material idóneo para la elaboración de prototipos mecánicos y electrónicos. (MIRAVETE, Larrodé y Castejón, 2000). En la figura 27-2 se puede visualizar un diagrama del trabajo realizado con fibra de vidrio para construcción del cuerpo del prototipo, el proceso va desde la realización de un molde en cartón prensado de 3 mm lo suficientemente sólido para que mantenga la forma en la siguiente fase que comprende la colocación de fibra de vidrio con resina de poliéster, culminada la fase debe secarse 2 horas por capa de fibra de vidrio colocada. Una vez seco completamente por un periodo mínimo de 24 horas, se retira el molde y se lija, para continuar con una capa de masilla que cubra imperfecciones, con un acabado liso y rígido. Al finalizar, debe estar liso y listo para pintarse, los detalles propios del diseño del prototipo se colocan una vez se haya secado la pintura por un periodo de 72 horas.



Figura 27-2: Diagrama del proceso de construcción del cuerpo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Una vez culminada la construcción se toma medidas y peso del resultado final, estos valores se registran en la tabla 6-2.

Tabla 6-2. Características del cuerpo

Características del cuerpo de prototipo	
Dimensiones	Ancho: 5250 mm Fondo: 5100 mm Alto: 8100 mm
Peso	11 kg

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.8.2. Implementación del sistema de locomoción

Una vez analizada la teoría de sistemas de locomoción en el capítulo anterior, se opta por la implementación de un sistema con configuración diferencial, con dos ruedas motrices alineadas a cada lado de la base, y dos ruedas tipo castor por delante de las ruedas motrices para proporcionar la estabilidad. Conociendo el peso del chasis y los elementos del prototipo se procede a la selección de ruedas cuyo diseño y material soporten dicho peso.

2.8.2.1. Selección de Ruedas

Las ruedas motrices son las encargadas de transmitir el movimiento del motor, ejerciendo tracción sobre el piso, mientras las ruedas tipo castor giran en cualquier dirección adaptándose y manteniendo la orientación. En conjunto estas ruedas deben soportar un peso del prototipo y la carga, en la tabla 7-2 se describen las características de las ruedas utilizadas.

Tabla 7-2. Características de las ruedas

Características	Ruedas Motrices	Ruedas tipo castor
Diámetro	175 mm	100 mm
Grosor	36 mm	20 mm
Material	Caucho y plástico	Metal y goma
Adherencia	Si	No
Labrado	Si	Si
Soporte	36 kg	17 Kg

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

En la figura 28-2 se puede apreciar las ruedas motrices que son ruedas utilizadas comúnmente en podadoras, y las ruedas tipo castor de uso industrial para carros de limpieza o plataformas de transporte; antes de su instalación.



Figura 28-2: Ruedas del prototipo

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Para la implementación de la base se diseñó ejes que permitan a las ruedas motrices acoplarse al motor, como se observa en la figura 29-2 estos ejes de nylon torneado se ajustan al motor por la parte de diámetro inferior y a la rueda por la parte de diámetro superior manteniéndose en dicha posición con prisioneros.



Figura 29-2: Acople en nylon motor-rueda

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En la figura 30-2, se puede observar el acople colocado al motor y la rueda previo a la implementación de la base.



Figura 30-2: Motor con acople para rueda

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.8.2.2. Colocación de los sensores encoder

Los sensores encoder se instalaron en la carcasa plástica de los motores, ubicados estratégicamente en la cara opuesta a la salida del eje de rotación como se observa en la figura 31-2 a, mientras que el disco óptico se ubicó en la parte trasera del engranaje que transmite el movimiento del eje del motor a la rueda, como se puede visualizar en la figura 31-2 b.

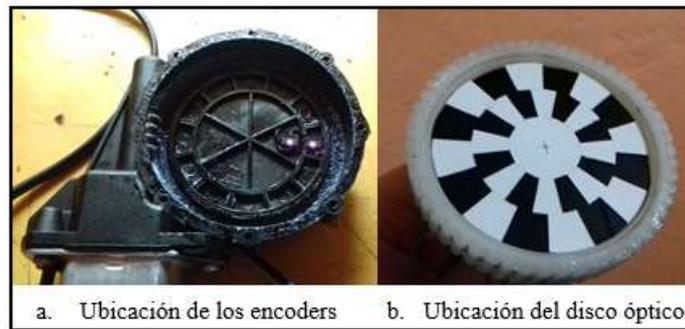


Figura 31-2: Encoder y disco óptico acoplados al motor

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.8.3. Implementación base

La construcción de la base se la realiza con una plancha de tol de 1mm de espesor, con orificios laterales para colocar los motores. Con el fin de disminuir la fricción y peso sobre el eje del motor se utiliza un rodamiento de bolas, capaz de soportar 19.5 Newton de fuerza en movimiento, el mismo que se puede apreciar en la figura 32-2.



Figura 32-2: Rodamiento 6206R5

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En la estructura metálica se ubican los motores con sus respectivos acoples y rodamientos, cada uno de ellos sujetado con acoples de nylon que reducen las vibraciones del motor en movimiento, como se puede observar en la figura 33-2.

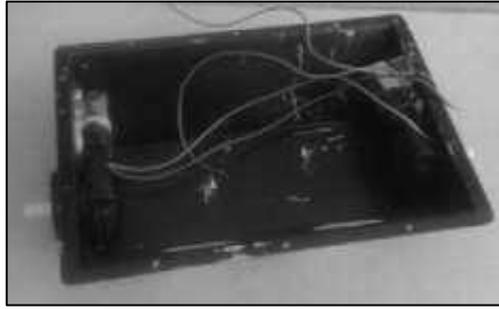


Figura 33-2: Estructura metálica y motores

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Las ruedas tipo castor o ruedas locas se ubican en la parte delantera del robot, con una separación entre ellas inferior a la separación de las ruedas motrices. Esta disposición permite al robot mantenerse en pie en caso que una de las ruedas quede en el aire, distribuyendo el peso neto sobre las tres ruedas restantes formando un triángulo de sustentación que permite al prototipo mantenerse estable mientras su centro de gravedad se ubique dentro de dicho triángulo. En la figura 34-2 se muestra la base una vez construida.



Figura 34-2: Base implementada

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Al concluir con la implementación se determinan las características de la base del prototipo, que se detallan en la tabla 8-2.

Tabla 8-2. Características de la base implementada

Característica	Medida
Diámetro de ruedas motrices	17.5 cm
Distancia entre ruedas motrices	43 cm
Distancia entre ruedas castor	30 cm
Distancia entre ejes	20.5 cm
Altura libre al piso	4 cm

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.9. Apariencia externa

Como se analizó en el capítulo anterior, el aspecto externo define el grado de aceptación que tiene un robot al interactuar constantemente con personas, más aun cuando debe integrarse como un nuevo miembro del personal que labora en el Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu, para cumplir con dicho objetivo el prototipo cuenta con su propio rostro que representa una emoción dependiendo su estado.

2.9.1. Rostro

Con el fin de otorgarle al prototipo una apariencia más amigable, y que proyecte más seguridad para el personal de la institución médica se proyecta una imagen que emulan un rostro, como se puede observar en la figura 35-2.



Figura 35-2: Rostro del prototipo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.10. Selección de rutas

El prototipo está diseñado para desempeñarse en el Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu. Según datos estadísticos recabados el número de pacientes atendidos en el último año es de 17043, en el primer semestre del año 2018 fueron internados un total de 225 pacientes en el área de hospitalización y un promedio de 50 personas al día son atendidas en el área de procedimientos. Estas áreas son las únicas que requieren el transporte de insumos médicos desde farmacia, junto a farmacia se encuentra la sala de espera y recepción, donde los pacientes que asisten al centro de salud se reúnen siendo un lugar muy concurrido, por lo tanto se determinó que el robot no debe ingresar. Teniendo en cuenta esta información y con ayuda del director del Centro de Salud se determinaron las rutas a seguir por el prototipo sin interrumpir el paso del personal que trabaja en el centro y las personas que asisten cada día. En la figura 36-2, se observa el plano del Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu del con las rutas que el prototipo debe seguir.

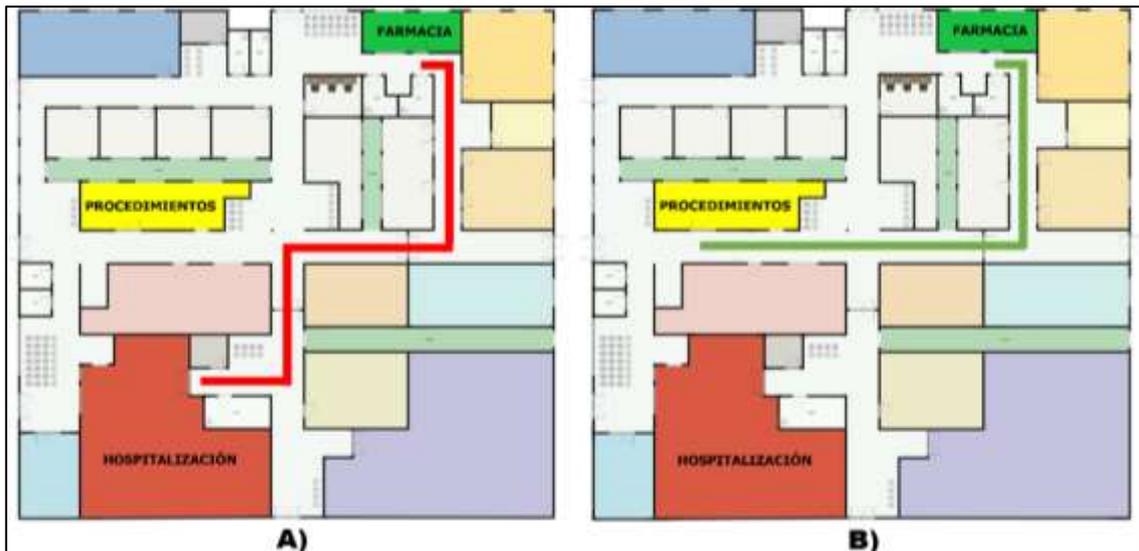


Figura 36-2: A) Ruta de farmacia a Hospitalización. B) Ruta a procedimientos

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.10.1 Dimensiones y programación de las rutas.

El prototipo sale desde farmacia hacia una de las dos rutas establecidas, y regresa nuevamente a farmacia. Pero a veces es necesario enviar encomiendas hacia las dos áreas establecidas para acortar los tiempos de entrega. Para ello se ha programado una ruta extra, esta ruta es la de color azul y se la puede observar en la figura 37-2. Si el prototipo se encuentra en hospitalización, puede ir hasta procedimientos y regresar a farmacia. Si el prototipo se encuentra en procedimientos, puede ir a hospitalización y luego regresar al origen permitiendo una entrega más eficiente en un solo viaje.

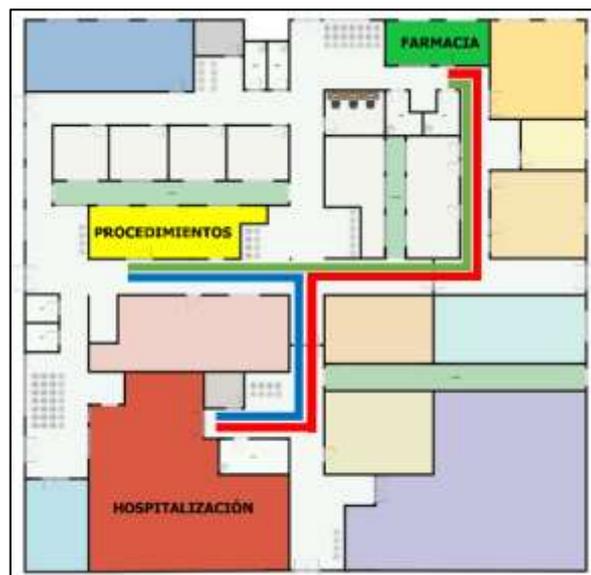


Figura 37-2: Ruta extra en azul.

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

En la figura 38-2 se representa las rutas con sus respectivas distancias por tramos.

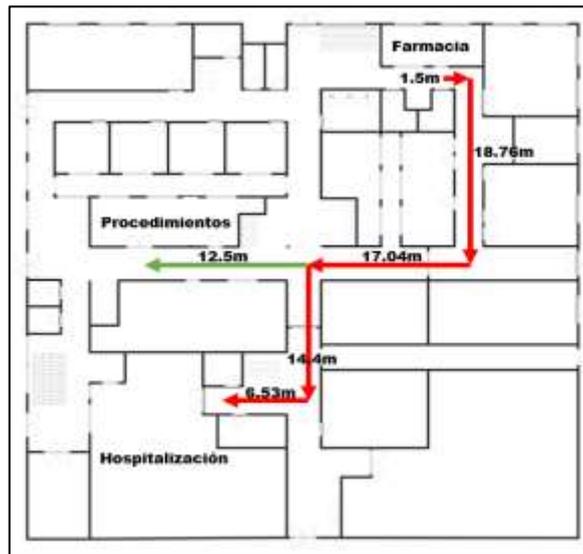


Figura 38-2: Distancias por tramos para las rutas.

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.11. Diseño de *Software*

Para el desarrollo de *software* del prototipo se ha utilizado dos plataformas Python y Arduino, siendo ambas plataformas de programación de gran soporte y aportan con librerías libres para aplicaciones específicas. Python, es un lenguaje de programación que soporta orientación a objetos, es funcional, dinámico y multiplataforma. Arduino, es multiplataforma con un entorno desarrollado en java y basado en lenguaje C permite la interacción fácil del hardware y el código.

2.11.1. *Herramientas de software*

En este apartado se presenta una breve descripción de las plataformas utilizadas para el desarrollo de software del prototipo, las herramientas utilizadas son libres y de código abierto aplicados en el campo de la visión e inteligencia artificial para campos como la ingeniería, robótica, medicina entre otros.

2.11.1.1. *Sistema operativo Raspbian*

Es una distribución libre de GNU/Linux basado en Debian Stretch, optimizado para uso de la SBC Raspberry Pi. Cuenta con un entorno gráfico con escritorio, ventanas, iconos, fondos de pantalla, acceso a navegadores y más. (Creative Commons, 2017).

2.11.1.2. Python 2.7

Python es un lenguaje de programación con soporte multiplataforma y de código abierto, permite acceso y manejo a los GPIO de la Raspberry Pi. Permite al usuario el uso de extensiones y librerías que permiten el desarrollo de aplicaciones para compilar y ejecutar en esta SBC.

2.11.1.3. Tkinter

Es una biblioteca gráfica para Python, usada para la creación de interfaces gráficas de usuario GUI. Una interfaz proporciona un entorno visual que facilita el manejo del código usando un conjunto de imágenes y objetos gráficos que representan información o acciones.

2.11.1.4. OpenCV

Es una biblioteca de código abierto para desarrollo de aplicaciones con visión artificial, es multiplataforma y una gran cantidad de funciones para el proceso de visión estéreo y robótica, además de reconocimiento de objetos. Basado en código C brinda un entorno de programación eficiente y fácil de utilizar.

2.11.1.5. Libfreenect

Es una biblioteca de código abierto para el desarrollo de aplicaciones con el sensor Kinect, es multiplataforma. Facilita el manejo y obtención de datos provenientes del sensor, además de su procesamiento para aplicaciones de visión.

2.11.1.6. Ide Arduino

Es un editor de texto que permite escribir un código para programar una tarjeta de desarrollo Arduino es basado en C++. Los códigos desarrollados en este entorno permite controlar los pines de entrada y salida, protocolos de comunicación, y sensores conectados a la placa, además de ser de libre acceso.

2.11.2. Desarrollo de Software en Python

Con esta herramienta se ha desarrollado el software para detección de obstáculos, en el siguiente apartado se analiza el algoritmo aplicado al prototipo.

2.11.2.1. Detección de obstáculos

El sensor Kinect utiliza un puerto USB de la Raspberry Pi para la adquisición de imágenes de profundidad a más de una fuente de poder. En la figura 40-2 se muestra el diagrama de flujo de esta etapa, a continuación se describe el algoritmo para detección de obstáculos:

- Se inicializa con la inclusión de librerías de OpenCV `<cv2>` para procesamiento y tratamiento de imágenes, y OpenKinect `<freenect>` para la obtención de imágenes y datos de profundidad del sensor Kinect.
- Se declara variables y la matriz del elemento estructurador o núcleo.
- Se define los límites de rango de valores de profundidad de la imagen, recortando la distancia máxima a 1023 o 2×10^{-1} , para prevenir la introducción de ruido.
- Se crea una ventana para visualizar las imágenes de profundidad.
- Se inicializa el puerto serial y se configura la velocidad de transmisión a 9600 baudios.
- En el bucle loop, se realiza una lectura del mapa de profundidad del sensor Kinect `<freenect.sync_get_depth()>`. El mapa de profundidad tiene formato de 11 bits, y debe ser convertida a imagen de 8 bits.
- Se aplica una transformación morfológica mediante método de erosión con el comando `<cv2.erode()>`, y posteriormente el método canny `<cv2.Canny()>` para la detección de bordes en la imagen.
- Se encuentra los momentos de los contornos, es decir se calcula el promedio ponderado de las intensidades de los píxeles de contornos con el comando `<cv2.moments()>`.
- Se compara la matriz de píxeles de la imagen uno por uno cotejando la profundidad de color según la figura 39-2. Si la intensidad es igual a 80 se establece la distancia en 50 cm, se emite una alerta de colisión y se envía el carácter S por el puerto serial. Caso contrario se hace otra comparación.

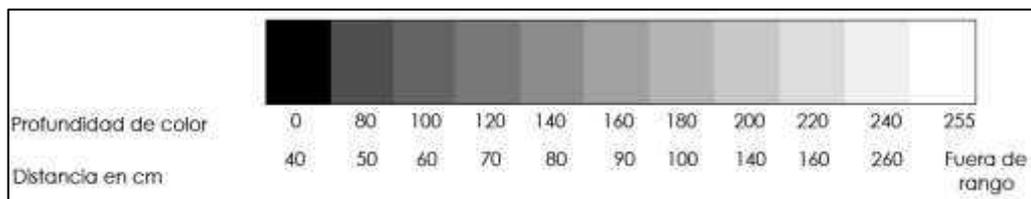


Figura 39-2: Intensidad de píxeles mostrados en imagen de profundidad.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

- Si la intensidad del píxel es 180 se establece la distancia menor a un 1 m, se determina un obstáculo detectado, se envía el carácter S por el puerto serial, y se guarda la distancia

del obstáculo detectado en una variable, al paso de 3 segundos se pregunta si el valor de la distancia ha variado con respecto a la distancia actual. Si la distancia ha cambiado se determina obstáculo dinámico y envía el carácter D por el puerto serial; caso contrario se realiza un barrido de la región, se determina obstáculo dinámico y envía el carácter E por el puerto serial.

Si la intensidad del pixel no es igual a 100, se establece la distancia mayor a un 1 m, se determina que el prototipo avance y se envía el carácter A por el puerto serial.

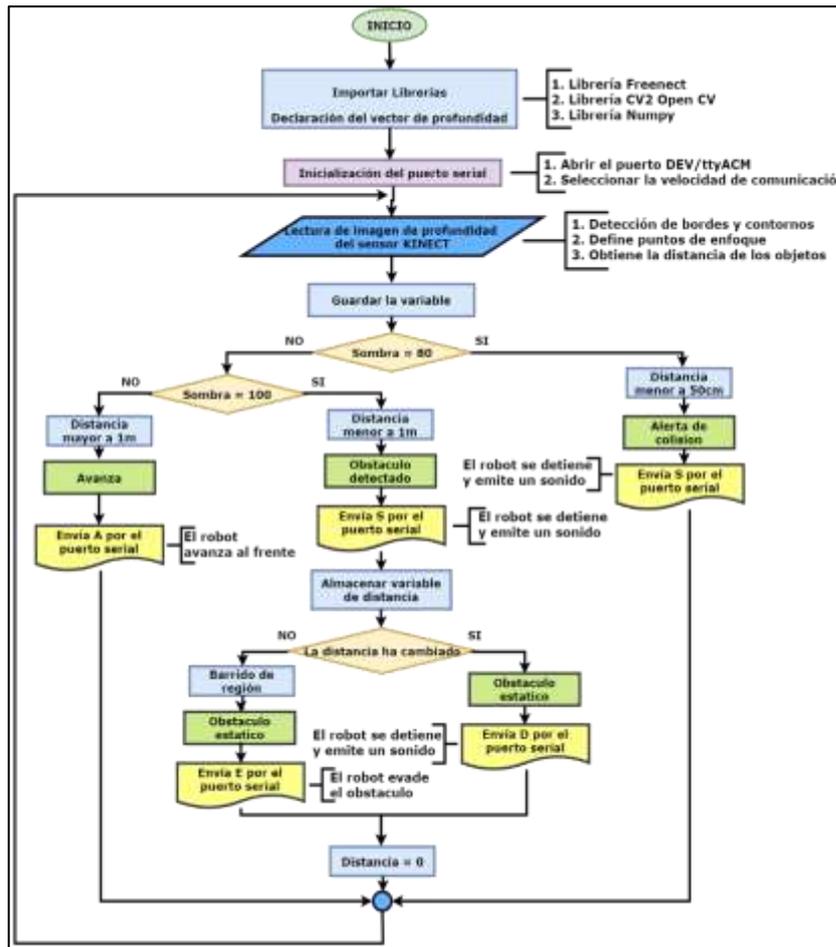


Figura 40-2: Diagrama de flujo de la detección de obstáculos.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.11.3. Desarrollo de Software en Arduino

Con esta herramienta se ha desarrollado el software para navegación del prototipo, mantiene comunicación por protocolo serial con la etapa de detección de obstáculos. En los siguientes apartados se analiza los algoritmos para lectura de sensores, odometría, control y desplazamiento del prototipo.

2.11.3.1. Lectura de encoders incrementales

Los sensores encoder utilizan los terminales de interrupciones del Arduino Mega para contar los pulsos generados por los canales A y B, gracias al desfase de los pulsos se determina la posición y velocidad, a más del sentido de giro de las ruedas del prototipo. Antes de probar el funcionamiento de los codificadores incrementales, es necesario comprobar que el algoritmo implementado en el microcontrolador, para ello se realiza pruebas manuales girando la rueda hacia delante y hacia atrás, donde el contador de pulsos incrementa al girar la rueda hacia delante y disminuye al girar la rueda hacia atrás. De esta forma, se comprueba el correcto funcionamiento del algoritmo.

En la figura 41-2 se encuentra el diagrama de flujo de esta etapa, a continuación, se describe el proceso de lectura de encoders incrementales:

- Se inicia declarando las variables en donde se almacenan los estados de los canales A y B de los encoders del motor derecho e izquierdo.
- Se declaran los terminales de interrupciones en donde están conectados los encoders como entradas.
- Se inicializa la comunicación serial a 9600 baudios.
- En el bucle loop se leen las señales del canal A y del canal B en el momento de la interrupción, esta señal puede ser HIGH o LOW.

Si el canal A está a HIGH, pueden darse dos situaciones:

- Que el canal B esté a LOW, en este caso el prototipo está avanzando, por lo que sumaría un pulso al contador.
- Que el canal B esté a HIGH, en este caso el prototipo está retrocediendo, por lo que restaría un pulso al contador.

Si el canal A está a LOW, pueden darse dos situaciones:

- Que el canal B esté a HIGH, en este caso el prototipo está avanzando, por lo que sumaría un pulso al contador.
 - Que el canal B esté a LOW, en este caso el prototipo está retrocediendo, por lo que restaría un pulso al contador.
- Al final se imprimen las variables donde se han acumulado los pulsos generados por los dos sensores.

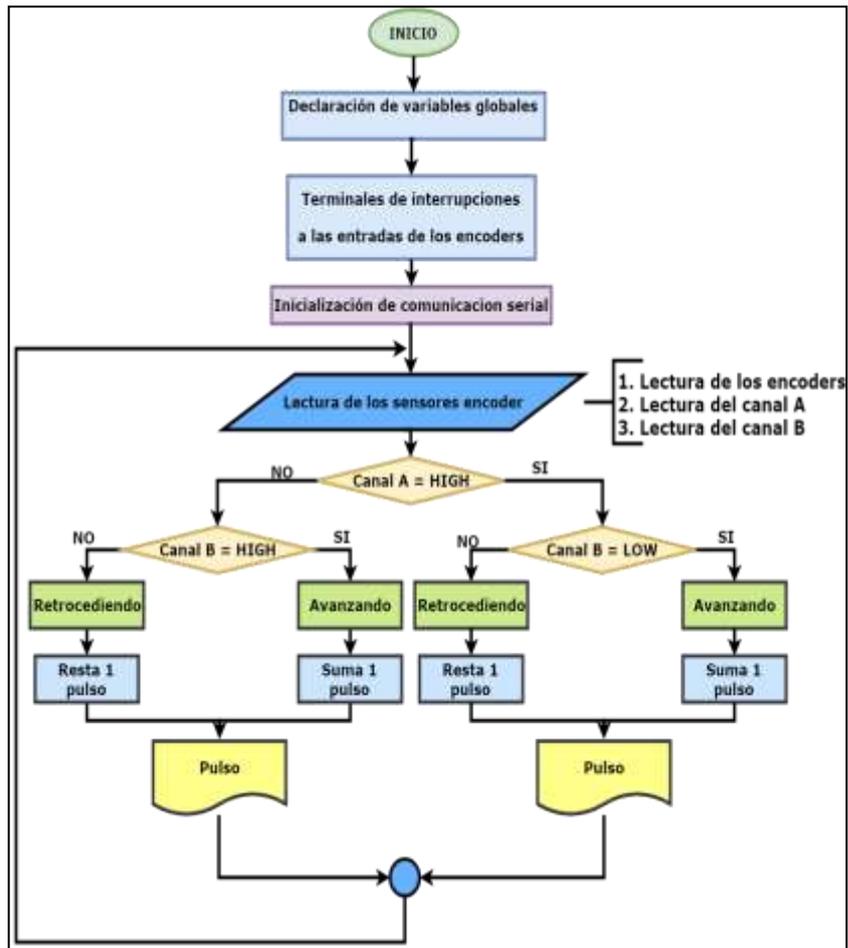


Figura 41-2: Diagrama de flujo de lectura de encoders.

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

2.11.3.2. Detección lateral

Los sensores de distancia laterales del prototipo permiten su movilidad en medio del pasillo sin colisionar con las paredes. En la figura 42-2 se muestra el diagrama de flujo de la detección lateral de obstáculos y su funcionamiento de se describe a continuación:

- Se importa la librería <Ultrasonic.h> que es la encargada de transformar el tiempo de respuesta de los pulsos ultrasónicos receptados en distancia. El sonido tarda 29,2 microsegundos en recorrer un centímetro. Por tanto, se obtiene la distancia a partir del tiempo entre la emisión y recepción del pulso mediante la ecuación 18.

$$distancia(cm) = \frac{Tiempo (\mu s)}{29.2 * 2} (18)$$

- Se establecen las variables donde se almacenarán los valores medidos de distancia.
- Se inicializa la comunicación serial a una velocidad de 9600 baudios.

- Dentro del bucle loop se procede a la lectura de los sensores, estos valores son transformados a distancia y se almacenan en las variables `dis_sensor_der` y `dis_sensor_izq`.
- Se compara los valores de distancia, si existe un valor menor de distancia en el sensor derecho el robot gira al lado izquierdo, y si existe un valor menor distancia en el sensor izquierdo el robot gira al lado derecho.
- Los valores de distancia de los dos sensores se imprimen por el puerto serial.

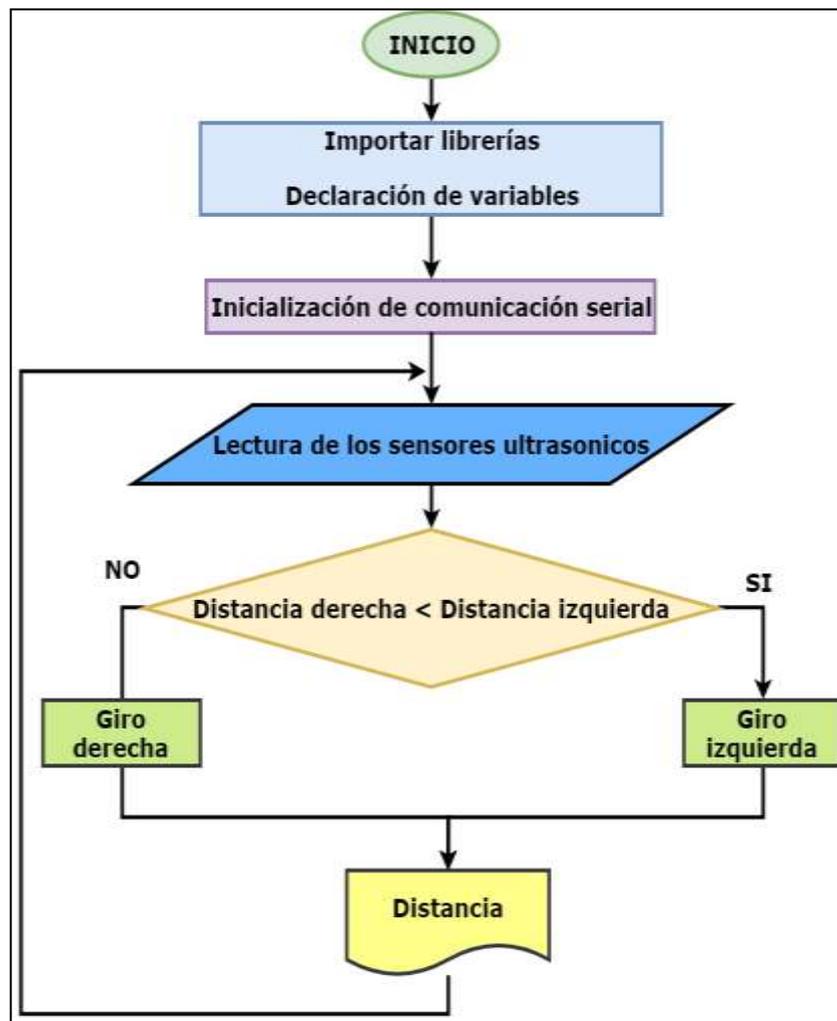


Figura 42-2: Diagrama de flujo de la detección lateral.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

2.11.3.3. Análisis odométricos

Con la odometría se obtiene los parámetros que representan la ubicación del prototipo en el plano XY, mediante la aplicación de las ecuaciones 9,10 y 11 analizadas en el capítulo anterior. A partir de la variación de las coordenadas y del ángulo de dirección se calculan los valores actuales con ecuaciones por diferencias implementado en un algoritmo que se describe a continuación:

- Inicia con la declaración de variables, contador_derecho y contador_izquierdo. Que mantienen la cuenta de los pulsos generados por los encoders en la rueda derecha e izquierda respectivamente.
- Se calcula la variación angular aplicando la ecuación 19. Para asegurar que el ángulo se mantenga en un rango de 0 a 360°, se resta 360° si excede el valor a una revolución y se suma si el valor es negativo o inferior a 0°.

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \Delta\theta \dots (19)$$

- Se calcula la variación de coordenadas X y Y, aplicando las ecuaciones por diferencias 20 y 21 en base a los pulsos contados por los motores.

$$x_t = x_{t-1} + \Delta x \dots (20)$$

$$y_t = y_{t-1} + \Delta y \dots (21)$$

- Finalmente, se calcula los valores de las coordenadas actuales sumando los valores de los diferenciales respectivos y se imprime estos valores.

2.11.3.4. Control de motores

El prototipo utiliza dos motores DC de 110 rpm alimentado a 12V, con estos actuadores el prototipo es capaz de realizar movimientos como: avanzar, retroceder, y girar a la izquierda y derecha. Estos movimientos se consiguen por la conmutación de ambos motores que son controlados por la tarjeta de desarrollo Arduino a través de un módulo de control doble canal MOSFET. Para controlar el sentido de giro de los motores necesita cuatro señales digitales, dos para cada motor para mejor comprensión se ha realizado la tabla 9-2 donde se explica los movimientos generados por cada combinación.

Tabla 9-2. Características de la base implementada

Movimientos del prototipo	Motor izquierdo Canal A		Motor derecho Canal B	
	IN1	IN2	IN1	IN2
Avanzar	1	0	1	0
Retroceder	0	1	0	1
Girar Derecha	1	0	0	1
Girar izquierda	0	1	1	0

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

El módulo de control doble canal MOSFET, posee dos pines adicionales Enable que sirve para habilitar las entradas de conmutación a los motores. Para controlar la velocidad se envía una señal utilizando modulación por ancho de pulso PWM por las entradas Enable. Esta señal genera una tensión proporcional al ciclo de trabajo, donde los motores incrementan su velocidad a mayor ancho de pulso.

2.11.3.5. Controlador PID

El prototipo tiene implementado un control PID discreto de velocidad para cada motor, el objetivo es que el prototipo recorra una distancia en línea recta hasta llegar al punto deseado con el mínimo de error. El algoritmo se ejecuta cada $T=0.2$ segundos y genera una señal discreta que debe ser convertida a PWM.

La sintonización del controlador se reduce al ajuste de las constantes: Proporcional K_p , Integral K_i y Deriva K_d . Como se puede ver en el diagrama de la figura 43-2.

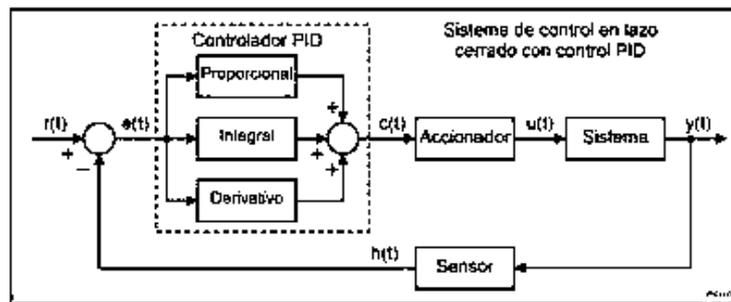


Figura 43-2: Diagrama del controlador PID.

Fuente: <http://bit.ly/2M5QGM1>

Con la ayuda de la herramienta ident de Matlab se estima la función de transferencia, una correcta selección de estos parámetros genera una salida eficaz en el menor tiempo posible, con aplicación PID Tuner de Matlab se analiza la respuesta de uno de los motores teniendo como resultado las constantes del controlador y la respuesta del mismo en la planta, como se puede observar en las figuras 44-2 y 45-2.

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	37.3849
Ki	0.00029224
Kd	0
Tf	n/a

Figura 44-2: Parámetros del controlador PID.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

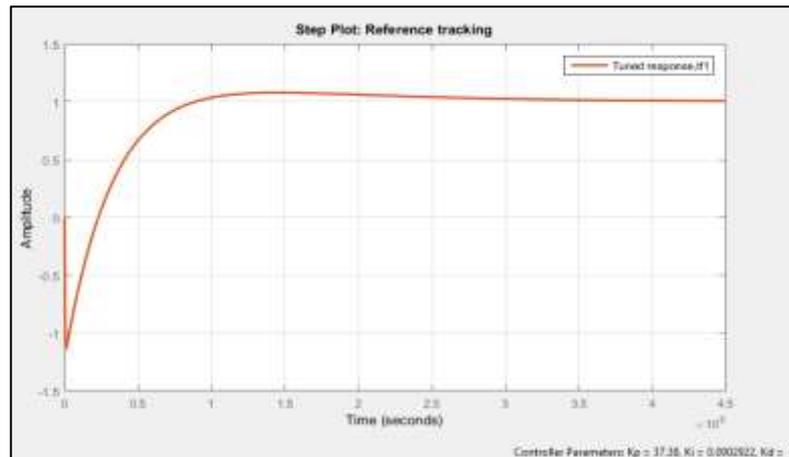


Figura 45-2: Comportamiento de la planta con los parámetros obtenidos.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Una vez obtenidos los parámetros, y con la lectura de los encoders se procede a la programación del controlador cuyo algoritmo se describe a continuación:

- Se inicia calculando la velocidad angular con la ecuación 22. Donde el diferencial de desplazamiento angular se calcula con un contador de pulsos, sabiendo que el disco tiene marcas cada 45° con una resolución de 8 pulsos por revolución.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_{t_0} - \theta_t}{t_0 - t} \quad (22)$$

- Conocida la velocidad angular a la que gira el prototipo, se procede al cálculo del error comparando este valor con el valor de referencia; la diferencia de estos valores da como resultado el valor del error absoluto.
- El valor de la acción proporcional resulta del producto del error por la constante proporcional K_p . Como se describe en la ecuación 23.

$$u_p = K_p * e \quad (23)$$

- La acción integral se calcula empleando un algoritmo recursivo, siendo el resultado de la acumulación del error absoluto por la constante K_i y el diferencial de tiempo, como se observa en la ecuación 24.

$$u_i += e * T * K_i \quad (24)$$

- La acción derivativa se calcula como la diferencia entre el error actual y el anterior entre la diferencia de tiempo, por la constante derivativa K_d . Como se describe en la ecuación 25.

$$u_d = \frac{e_t - e_{t-1}}{T} * K_p \quad (25)$$

- Finalmente la salida del controlador $u(t)$ se compone de la suma de las tres acciones de control.

2.11.4. Desarrollo de Software Interfaz de usuario

Para permitir la interacción de los usuarios con el prototipo se ha diseñado una interfaz visual que permite el control de los compartimientos y selección de la ruta. Por seguridad consta con una ventana de autenticación para que únicamente los usuarios autorizados tengan acceso. En la figura 46-2 se encuentra el diagrama de flujo de la interfaz de usuario, el proceso de describe a continuación:

- Se inicia importando la librería Tkinter que es una biblioteca grafica para Python.
- Se declaran las variables globales para almacenar datos y comunicarse entre ventanas.
- Inicializa la comunicación serial con una velocidad de 9600 baudios.
- Se abre la ventana de autenticación donde se ingresan los datos de usuario y contraseña. Si los datos son correctos se abre la ventana de menú principal del prototipo, caso contrario se pide ingresar los datos nuevamente.
Si los campos no son llenados se tiene un mensaje de advertencia para la autenticación.
- Una vez abierta la ventana de menú principal se procede con la selección de compartimiento, si se selecciona el compartimiento 1 envía el carácter “1” por el puerto serial, caso contrario se pregunta si el compartimiento seleccionado es el número 2, si es verdadero se envía el carácter “2” y caso contrario el carácter “3”. En esta ventana se procede también con la selección de ruta teniendo dos opciones la ruta de hospitalización y la ruta de procedimientos, una vez seleccionada la ruta el prototipo se dirige automáticamente al lugar. También se puede seleccionar una ruta con los dos destinos para optimizar el tiempo en la entrega de insumos en caso de ser necesario.
- Después de seleccionar el compartimiento y la ruta se abre la ventana de regreso, en esta ventana una vez el prototipo ha llegado a su destino se puede abrir el compartimiento en donde lleva los insumos médicos. En la ventana se indica el compartimiento donde se encuentran los insumos, una vez retirada la encomienda el usuario selecciona el botón regresar para que el prototipo retorne automáticamente al punto de origen, o continúe con su ruta.

En el punto de origen permanece, hasta que el usuario nuevamente le indique que necesita el envío de insumos médicos.

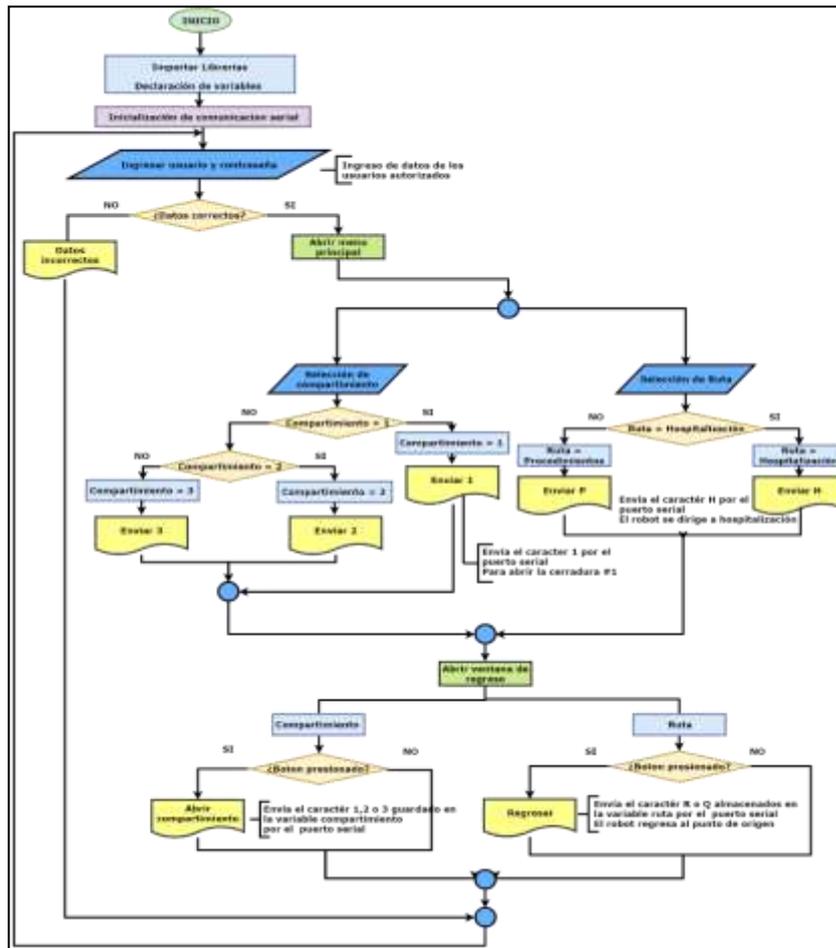


Figura 46-2: Diagrama de flujo de la detección lateral.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

CAPITULO III

3. MARCO DE RESULTADOS

En este capítulo se examinaron los resultados obtenidos con un conjunto de pruebas experimentales que validen el funcionamiento del prototipo de acuerdo a los requerimientos planteados, además se analizaron los alcances y limitaciones, así como un detallado estudio económico del costo del prototipo. Para el desarrollo de las pruebas experimentales se tuvo presente que los resultados experimentales son observaciones muestrales, no poblacionales; por ende se aplicó métodos estadísticos inferenciales para hacer afirmaciones válidas acerca de la población. (Gutiérrez Pulido y Salazar, 2008). Cada una de las pruebas fue realizada con la batería del prototipo en plena carga.

3.1. Pruebas de precisión del prototipo

Para relacionar el grado de precisión del prototipo, se debe tener claro el concepto de precisión, que es el grado de concordancia entre una medida y otras de la misma magnitud realizadas en condiciones sensiblemente iguales. (Miguel y Chinchilla). El prototipo posee un conjunto de sensores propioceptivos y exteroceptivos que determinan la precisión del sistema.

3.1.1. Prueba de medición de distancia con sensores ultrasónicos

El objetivo de esta prueba fue comprobar que el equipo mide valores reales, para su desarrollo se tomó 30 muestras de medidas del sensor y el equipo patrón como se muestra en la figura 1-3. En la figura 1-3a se observa cómo se desarrolló la toma de muestras, mientras los datos que se muestran en el monitor serial de Arduino del sensor se puede ver en la figura 1-3b. Cada muestra se tomó variando la distancia 10 centímetros entre cada una, en la tabla 1-3 se detallan los resultados experimentales para verificación de medición de distancia con los sensores ultrasónicos, teniendo como resultado el error absoluto de los sensores para un posterior análisis.

Tabla 1-3. Mediciones de distancia con sensores ultrasónicos

Numero de prueba	Distancia medida con el equipo patrón (cm)	Distancia medida con sensor ultrasónico HC-SR04 (cm)		Error Absoluto	
		Derecho	Izquierdo	Derecho	Izquierdo
1	10	10,34	10,28	0,34	0,28

Numero de prueba	Distancia medida con el equipo patrón (cm)	Distancia medida con sensor ultrasónico HC-SR04 (cm)		Error Absoluto	
		Derecho	Izquierdo	Derecho	Izquierdo
2	20	20,14	20,24	0,14	0,24
3	30	30,45	30,35	0,45	0,35
4	40	40,24	40,17	0,24	0,17
5	50	50,21	49,98	0,21	0,02
6	60	60,31	60,29	0,31	0,29
7	70	69,69	70,02	0,31	0,02
8	80	80,14	80,19	0,14	0,19
9	90	89,18	89,94	0,82	0,06
10	100	99,66	100,12	0,34	0,12
11	110	108,93	109,32	1,07	0,68
12	120	119,97	120,02	0,03	0,02
13	130	129,93	129,98	0,07	0,02
14	140	140,27	140,53	0,27	0,53
15	150	149,79	150,12	0,21	0,12
16	160	160,14	160,32	0,14	0,32
17	170	170,65	170,24	0,65	0,24
18	180	180,41	180,14	0,41	0,14
19	190	189,18	190,52	0,82	0,52
20	200	199,31	200,11	0,69	0,11
21	210	209,83	209,97	0,17	0,03
22	220	220,24	220,20	0,24	0,20
23	230	228,93	229,14	1,07	0,86
24	240	240,21	240,30	0,21	0,30
25	250	250,45	250,45	0,45	0,45
26	260	259,55	260,89	0,45	0,89
27	270	269,90	270,14	0,10	0,14
28	280	279,84	279,96	0,16	0,04
29	290	290,24	290,21	0,24	0,21
30	300	300,21	299,79	0,21	0,21

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

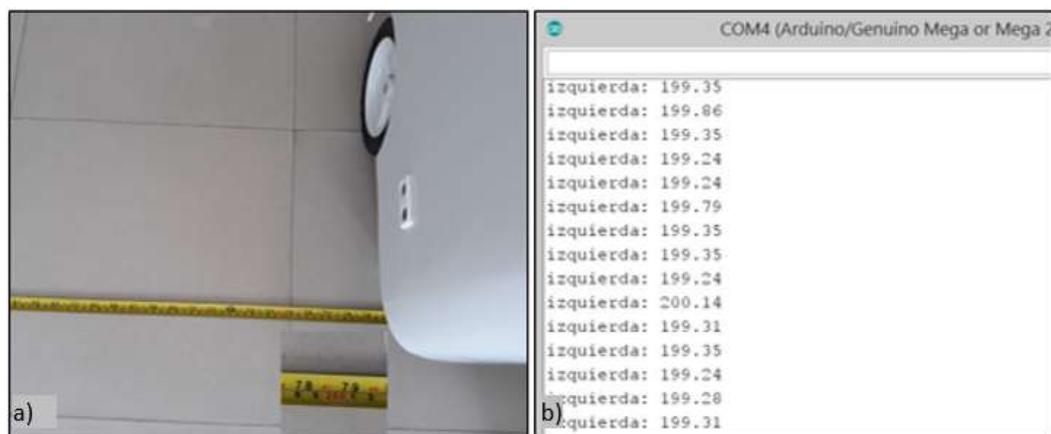


Figura 1-3: Prueba de medidas obtenidas con sensor ultrasónico.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Una vez obtenidos los datos estadísticos se aplicó a una prueba de hipótesis, que realiza una comparación de medias entre el equipo patrón y los sensores ultrasónicos mediante una prueba de hipótesis, de la siguiente manera:

1. Se definió la hipótesis nula y alternativa

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_A: \mu \neq \mu_0$$

Análogamente,

H_0 : La media de la distancia deseada es igual a la media de la distancia obtenida con el sensor ultrasónico.

H_A : La media de la distancia deseada es diferente a la media de la distancia obtenida con el sensor ultrasónico.

2. Se estableció el nivel de significancia del 5%, es decir $\alpha = 0.05$.

3. Se aplicó una prueba bilateral de la media, utilizando el estadístico t de Student para medias de dos muestras independientes. En la tabla 2-3 se encuentran los resultados de la prueba estadística.

Tabla 2-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.

Prueba t para dos muestras independientes		
	<i>Equipo Patrón</i>	<i>Sensor Ultrasónico</i>
Media	155	154,9446667
Varianza	7750	7740,827295
Observaciones	30	30
Varianza agrupada	0,999986393	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	29	
Estadístico t	0,655913975	
P(T<=t) una cola	0,258525034	
Valor crítico de t (una cola)	1,699127027	
P(T<=t) dos colas	0,517050067	
Valor crítico de t (dos colas)	2,045229642	

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

4. En base a la prueba T para igualdad de medias, la probabilidad 0.517 fue mayor al nivel de significancia, aceptando la hipótesis alternativa; esto significa que la media de la distancia deseada es igual a la media de la distancia obtenida con el sensor ultrasónico.

De la prueba de hipótesis, se inferió que no existe una variación entre la medida de los sensores ultrasónicos con respecto a la medida real, por lo cual se puede concluir que los sensores ultrasónicos tienen un alto grado de precisión para posicionar al prototipo.

Analizando los datos de la tabla 1-3, se obtuvo los valores de desviación estándar que representa la dispersión de los datos con respecto a la media en la gráfica 1-3 se representa la dispersión de medidas tabuladas.

- Los datos tabulados por el sensor ultrasónico derecho presentaron una desviación estándar de 0.879 cm.
- Los datos tabulados por el sensor ultrasónico izquierdo presentaron una desviación estándar de 0.880 cm.
- Los datos tabulados por el equipo patrón presentaron una desviación estándar de 0.880 cm.

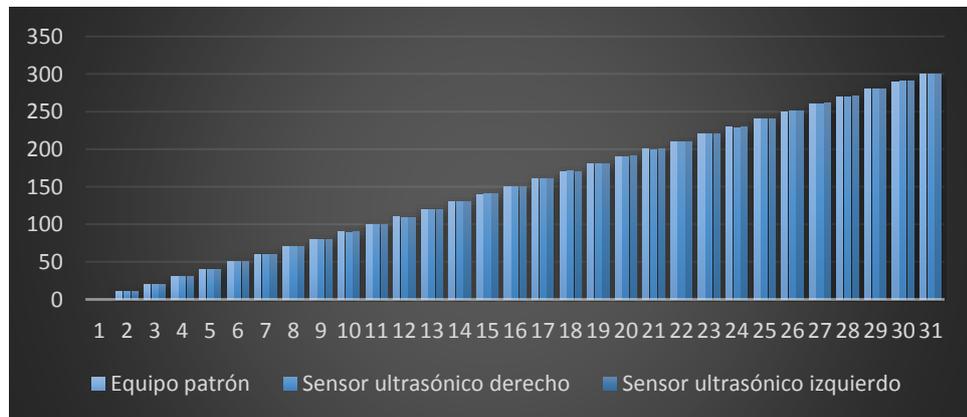


Gráfico 1-3: Dispersión de medidas obtenidas con sensores ultrasónicos.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

3.1.2. Prueba de medición de distancia con encoders

El objetivo de esta prueba fue comprobar el funcionamiento de los sensores encoders, se tomó 30 muestras del sensor, cada muestra se tomó variando la distancia 1 metro entre cada 10 muestras. En la tabla 3-3 se detallan los resultados experimentales el cálculo del error de los encoders con respecto a la distancia deseada.

Tabla 3-3. Mediciones de distancia con encoders.

Número de prueba	Distancia deseada	Distancia con equipo patrón (m)	Distancia medida con encoders (m)			Error Absoluto	
			Derecho	Izquierdo	Promedio	Derecho	Izquierdo
1	1	1,07	1,030	1,030	1,03	0,04	0,04

2	1	1,08	1,030	1,030	1,03	0,05	0,05
3	1	1,08	1,099	0,962	1,03	0,019	0,118
4	1	1,03	1,030	1,030	1,03	0	0
5	1	1,03	1,030	1,030	1,03	0	0
6	1	1,07	1,030	1,030	1,03	0,04	0,04
7	1	1,05	1,030	1,030	1,03	0,02	0,02
8	1	1,05	1,030	1,030	1,03	0,02	0,02
9	1	1,06	1,030	1,030	1,03	0,03	0,03
10	1	1,03	1,030	1,030	1,03	0	0
11	2	2,09	2,061	1,992	2,03	0,029	0,098
12	2	2,06	2,065	1,991	2,03	0,005	0,069
13	2	2,09	2,062	1,992	2,03	0,028	0,098
14	2	2,03	2,062	2,062	2,06	0,032	0,032
15	2	2,06	2,062	1,992	2,03	0,002	0,068
16	2	2,07	2,062	1,993	2,03	0,008	0,077
17	2	2,05	2,062	2,062	2,06	0,012	0,012
18	2	2,08	1,991	2,062	2,03	0,089	0,018
19	2	2,04	2,062	2,062	2,06	0,022	0,022
20	2	2,02	1,992	2,061	2,03	0,028	0,041
21	3	3,02	3,024	3,024	3,02	0,004	0,004
22	3	3,01	2,955	3,092	3,02	0,055	0,082
23	3	3,05	3,092	2,955	3,02	0,042	0,095
24	3	3,06	3,024	3,024	3,02	0,036	0,036
25	3	3,03	3,023	3,092	3,06	0,007	0,062
26	3	3,07	3,023	3,092	3,06	0,047	0,022
27	3	3,02	3,023	3,025	3,02	0,003	0,005
28	3	3	2,955	3,092	3,02	0,045	0,092
29	3	3,04	3,024	3,024	3,02	0,016	0,016
30	3	3,05	3,024	3,024	3,02	0,026	0,026

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

Con los datos de la tabla 3-3, se realizó una comparación de medias entre el equipo patrón y los encoders aplicando una prueba de hipótesis, de la siguiente manera:

1. Se definió la hipótesis nula y alternativa

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_A: \mu \neq \mu_0$$

Análogamente se tiene,

H_0 : La media de la distancia deseada es igual a la media de la distancia obtenida con el encoder.

H_A : La media de la distancia deseada es diferente a la media de la distancia obtenida con el encoder.

2. Se estableció el nivel de significancia del 5%, es decir $\alpha = 0.05$.

3. Se aplicó una prueba bilateral utilizando el estadístico t de Student para muestras independientes. En la tabla 4-3 se encuentran los resultados de la prueba estadística.

Tabla 4-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes.

Prueba t para medias de dos muestras independientes		
	<i>Medidas patrón</i>	<i>Medidas encoder</i>
Media	2,049666667	2,032333333
Varianza	0,676444713	0,68845299
Observaciones	30	30
Coefficiente de correlación de Pearson	0,682448851	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	58	
Estadístico t	0,081262965	
P(T<=t) una cola	0,4677563	
Valor crítico de t (una cola)	1,671552762	
P(T<=t) dos colas	0,935512601	
Valor crítico de t (dos colas)	2,001717484	

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

4. En base a la prueba T para igualdad de medias, la probabilidad 0.935 fue mayor al nivel de significancia, aceptando la hipótesis nula y rechazando la alternativa; esto significa que la media de la distancia medida es igual a la media de la distancia obtenida con el encoder.

De la prueba de hipótesis, se infirió que no existe una variación significativa entre la distancia calculada por los encoders con respecto a la distancia real, por lo cual se puede concluir que los encoders tienen un alto grado de precisión para posicionar al prototipo.

Con datos de la tabla 3-3 se obtuvo los valores de desviación estándar del sensor derecho, izquierdo y la medida del equipo patrón. Además en gráfica 2-3 se representa la dispersión de medidas tabuladas por cada sensor respecto a la medida del equipo patrón.

- Los datos tabulados por el encoder en el motor derecho presentaron una desviación estándar de 0.823 cm.
- Los datos tabulados por el encoder en el motor izquierdo presentaron una desviación estándar de 0.839 cm.
- Los datos tabulados por el equipo patrón presentaron una desviación estándar de 0.8225 cm.

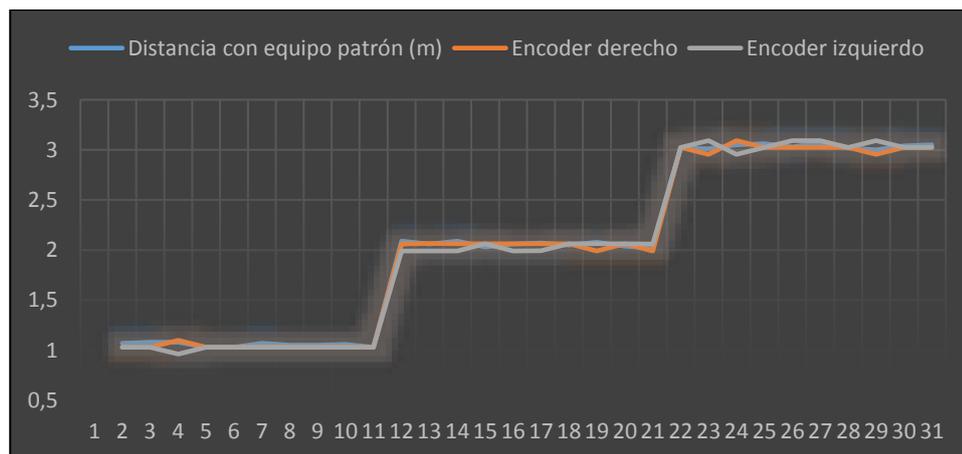


Gráfico 2-3: Dispersión de medidas obtenidas con los encoders

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

3.1.3. Prueba de reconocimiento con sensor Kinect

Esta prueba se realizó con el objetivo de verificar la detección de un obstáculo con la cámara de profundidad del sensor Kinect, para el desarrollo se recabó 30 muestras, variando 0.5 metros por cada 5 muestras. El desarrollo de esta prueba se puede evidenciar en la figura 2-3. En la tabla 5-3 se detallan los resultados experimentales obtenidos con el sensor Kinect.

Tabla 5-3. Muestras tomadas con el sensor Kinect.

Número de prueba	Distancia medida (m)	Detección Sensor Kinect
1	3	No
2	3	No
3	3	No
4	3	No
5	3	No
6	2.5	Si
7	2.5	Si
8	2.5	Si
9	2.5	Si
10	2.5	Si
11	2	Si
12	2	Si
13	2	Si
14	2	Si
15	2	Si
17	1.5	Si
18	1.5	Si
19	1.5	Si
20	1.5	Si
21	1	Si

Número de prueba	Distancia medida (m)	Detección Sensor Kinect
22	1	Si
23	1	Si
24	1	Si
25	1	Si
26	0.5	Si
27	0.5	Si
28	0.5	Si
29	0.5	Si
30	0.5	Si

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018



Figura 2-3: Prueba de medidas con sensor Kinect.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En base a los datos recabados en la tabla 5-3, se inferió por el porcentaje de 83.33% de resultados positivos en las observaciones muestrales que el Sensor Kinect tienen un alto grado de precisión para la detección de obstáculos. En la gráfica 3-3 que se presenta a continuación se puede observar la respuesta del sensor Kinect cuando se le presenta un obstáculo en su ángulo de visión.



Gráfico 3-3: Respuesta del sensor kinect.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

En base a las tres pruebas realizadas con los sensores propioceptivos y exteroceptivos se concluyó en una precisión de ± 0.26 cm.

3.2. Pruebas de error de desplazamiento

Para relacionar el grado de precisión del prototipo al llegar al destino deseado con las coordenadas previamente establecidas se realizaron pruebas. Las pruebas consistieron en enviar al prototipo a tres coordenadas diferentes por 10 ocasiones, en cada punto se determinó el error entre las coordenadas deseadas y las obtenidas con el prototipo, aplicando una diferencia de pendientes que se representa en la fórmula 26. En la tabla 6-3 se visualiza los resultados obtenidos.

$$error = \frac{y_d - y_0}{x_d - x_0} - \frac{y_p - y_0}{x_p - x_0} \quad (26)$$

Donde:

x_0, y_0 : Coordenadas del punto de origen.

x_d, y_d : Coordenadas del punto deseado.

x_p, y_p : Coordenadas del prototipo.

Tabla 6-3. Mediciones de desplazamiento al punto de destino.

Número de prueba	Primera coordenada (2,1)			Segunda coordenada (1, 1)			Tercera coordenada (2, 5)		
	Obtenido		Error	Obtenido		Error	Obtenido		Error
	x	y		x	y		x	y	
1	2,03	1,05	0,017	1,03	1,07	0,039	2,05	5,05	0,037
2	2,05	1,03	0,002	1,04	1,03	0,010	2,06	5,10	0,024
3	2,03	1,03	0,007	1,07	1,05	0,019	2,09	5,06	0,079
4	2,06	1,07	0,019	1,03	1,04	0,010	2,05	5,10	0,012
5	2,05	1,05	0,012	1,05	1,02	0,029	2,04	5,06	0,020
6	2,06	1,06	0,015	1,06	1,07	0,009	2,06	5,05	0,049
7	2,02	1,03	0,010	1,02	1,05	0,029	2,09	5,03	0,093
8	2,07	1,03	0,002	1,05	1,03	0,019	2,05	5,06	0,032
9	2,03	1,03	0,007	1,05	1,05	0,000	2,07	5,05	0,060
10	2,09	1,01	0,017	1,03	1,01	0,019	2,05	5,09	0,017

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

La prueba de hipótesis que se realizó se basa en los datos de la tabla 6-3, se ejecutó una comparación de medias entre la pendiente de las coordenadas deseadas y la pendiente de las coordenadas alcanzadas por el prototipo. La prueba de hipótesis se desarrolla a continuación:

1. Se definió la hipótesis nula y alternativa

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_A: \mu \neq \mu_0$$

Análogamente se tiene,

H_0 : La media de la pendiente de las coordenadas deseadas es igual a la media de la pendiente de las coordenadas alcanzadas por el prototipo.

H_A : La media de la pendiente de las coordenadas deseadas es diferente a la media de la pendiente de las coordenadas alcanzadas por el prototipo.

2. Se estableció el nivel de significancia del 5%, es decir $\alpha = 0.05$.

3. Se aplicó una prueba bilateral o de dos colas, utilizando el estadístico T de Student para muestras independientes. Los resultados de la prueba estadística aplicada al desplazamiento del prototipo se puede observar en la tabla 7-3.

Tabla 7-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes

Prueba t para medias de dos muestras independientes		
	<i>Medidas patrón</i>	<i>Medidas encoder</i>
Media	1,333333333	1,321359995
Varianza	0,747126437	0,710116818
Observaciones	30	30
Coefficiente de correlación de Pearson	0,728621627	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	58	
Estadístico t	0,054326267	
P(T<=t) una cola	0,478430961	
Valor crítico de t (una cola)	1,671552762	
P(T<=t) dos colas	0,956861921	
Valor crítico de t (dos colas)	2,001717484	

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

4. En base a la prueba T para igualdad de medias, la probabilidad 0.957 fue mayor al nivel de significancia, aceptando la hipótesis nula y rechazando la alternativa; esto significa que la media de la pendiente de las coordenadas deseadas es igual a la media de la pendiente de las coordenadas alcanzadas por el prototipo. De la prueba de hipótesis, se infirió que no existe una variación

significativa entre la ruta recorrida por el prototipo respecto a la ruta establecida, por lo cual se concluyó que el desplazamiento no es exacto pero si presenta un alto grado de precisión.

Con datos de la tabla 6-3 se obtuvo los valores de desviación estándar de desplazamiento del prototipo con respecto a la medida del equipo patrón. Además en gráfica 4-3 se representa la dispersión de medidas tabuladas.

- Los datos tabulados por el prototipo presentaron una desviación estándar de 0.843 cm.
- Los datos tabulados por el equipo patrón presentaron una desviación estándar de 0.864 cm.
- La media del error del prototipo en el desplazamiento del ± 2.38 cm con respecto a la distancia real.

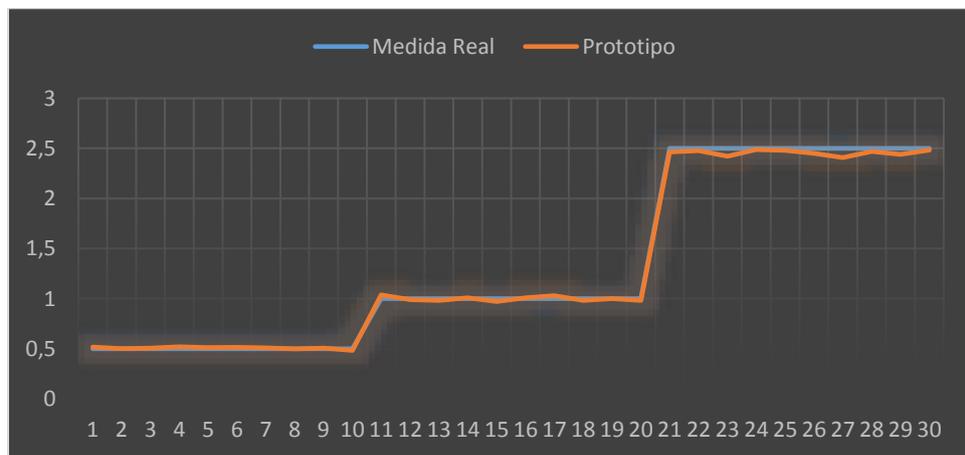


Gráfico 4-3: Dispersión de medidas obtenidas con el desplazamiento del prototipo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

3.3. Pruebas de tiempo

Para el desarrollo de esta prueba se tomó 30 muestras, las mismas que se dividen en 15 muestras para la ruta hacia hospitalización y 15 muestras para la ruta a procedimientos. Tomando en cuenta que estos tiempos son recabados cuando el prototipo recorre la ruta sin obstáculos, debido a que el prototipo difiere en el tiempo del recorrido respecto a uno o varios obstáculos dinámico y/o estático. Para el cálculo del tiempo estimado se usa la fórmula 27, sabiendo que el robot se desplaza con una velocidad de 0.67 m/s, siendo un 60% de la velocidad total de prototipo. Este valor se estableció como una velocidad segura para transitar en el centro de salud. En la tabla 8-3 se detalla el tiempo que tardó el prototipo en recorrer las rutas establecidas en cada prueba.

$$t_e = \frac{d}{v} \quad (27)$$

Donde:

t_e : Tiempo estimado.

d : Distancia estimado por ruta.

v : Velocidad del prototipo.

Tabla 8-3. Mediciones de tiempo del prototipo en recorrido.

Número de prueba	Ruta Hospitalización (min)	Ruta Procedimientos (min)
	Tiempo estimado = 1.449	Tiempo estimado = 1.239
1	1,452	1,380
2	1,440	1,461
3	1,417	1,476
4	1,470	1,305
5	1,500	1,463
6	1,462	1,253
7	1,480	1,305
8	1,452	1,262
9	1,473	1,281
10	1,496	1,454
11	1,466	1,461
12	1,453	1,453
13	1,465	1,276
14	1,490	1,28
15	1,455	1,257

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Con los datos de la tabla 8-3, se aplicó una prueba de hipótesis para comparar las medias entre tiempo estimado y el tiempo que tardó el prototipo al recorrer las rutas. La prueba de hipótesis se desarrolla a continuación:

1. Se definió la hipótesis nula y alternativa

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_A: \mu \neq \mu_0$$

Análogamente se tiene,

H_0 : La media del tiempo estimado es igual a la media del tiempo que tarda el prototipo.

H_A : La media del tiempo estimado es diferente a la media del tiempo que tarda el prototipo.

2. Se estableció el nivel de significancia del 5%, es decir $\alpha = 0.05$.

3. Se aplicó una prueba bilateral o de dos colas, utilizando el estadístico T de Student para muestras independientes. Los resultados de la prueba estadística aplicada al tiempo del prototipo en cumplir con una ruta se puede observar en la tabla 9-3.

Tabla 9-3. Resultados de Prueba t para muestras independientes

Prueba t para medias de dos muestras independientes		
	<i>Medidas patrón</i>	<i>Medidas encoder</i>
Media	1,344	1,38353333
Varianza	0,01140517	0,01007115
Observaciones	30	30
Coefficiente de correlación de Pearson	0,01073816	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	58	
Estadístico t	-1,47755639	
P(T<=t) una cola	0,07246823	
Valor crítico de t (una cola)	1,67155276	
P(T<=t) dos colas	0,14493646	
Valor crítico de t (dos colas)	2,00171748	

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

4. En base a la prueba T para igualdad de medias, la probabilidad 0.145 fue mayor que el nivel de significancia, entonces se aceptó la hipótesis nula y se rechazó la alternativa; esto significa la media del tiempo estimado fue igual a la media del tiempo que tarda el prototipo.

De la prueba de hipótesis, se infirió que el tiempo que tarda el prototipo en recorrer una ruta es significativamente similar al tiempo estimado, por lo cual se concluyó que el tiempo en recorrer una distancia sin obstáculos cumple con la estimación planteada.

Con datos de la tabla 6-3 se obtuvo los valores de desviación estándar de desplazamiento del prototipo con respecto a la medida del equipo patrón teniendo como resultado 0.100 cm, y un retardo de tiempo de 0.04 segundos en su desplazamiento. El valor de la desviación estándar indica la dispersión de los datos con respecto a la media de los mismos. Además en gráfica 4-3 se representa la dispersión de medidas de tiempo con respecto al tiempo estimado para cada ruta.

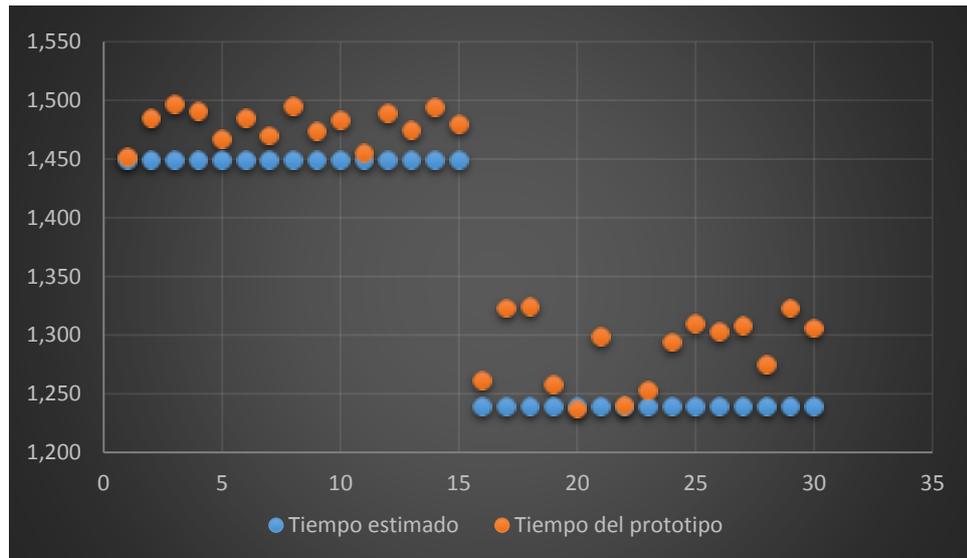


Gráfico 5-3: Dispersión de medidas obtenidas en la prueba de tiempo.

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

3.4. Cálculo de rendimiento de batería del prototipo

Para determinar el tiempo de duración de funcionamiento del prototipo se aplicó la ecuación 28, basada en el cálculo de consumo de cada dispositivo como se analizó en la tabla 3-2 en el capítulo II, donde se determinó el consumo eléctrico total de 3854mA.

$$Duración\ Batería = \frac{Capacidad\ Batería\ [mAh]}{Consumo\ eléctrico\ [mA]} \quad (28)$$

Teniendo como resultado:

$$Duración\ Batería = \frac{8800}{3854}$$

$$Duración\ Batería = 2.28\ h$$

Se tuvo como resultado una autonomía teórica del prototipo de 2h 16m 48s a plena carga. Para determinar la duración de la batería durante el funcionamiento del prototipo se realizó un registro de tiempos considerando que el límite de descarga de una batería liPO es de 3.5V por celdas, en la tabla 10-3 se puede ver los tiempos registrados para comparar con la duración teórica de la batería. Debido a la disponibilidad se utilizaron 4 baterías de tres celdas en paralelo con un voltaje de 11.1V con una suma total de corrientes de 8800mA cumpliendo satisfactoriamente con los requerimientos previamente establecidos.

Tabla 10-3. Duración de batería

Número de prueba	Tiempo registrado (min)
1	125.13
2	123.89
3	128.10
4	127.98
Promedio	126.275

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Con base a los datos de la tabla 9-3, se obtuvo el tiempo real de duración de la batería, siendo de aproximadamente de 2h 6m.

3.5. Grado de aceptación y beneficio del prototipo

Concluidas las pruebas de funcionamiento del prototipo, se aplicó la encuesta que se encuentra en el Anexo C a 100 personas entre pacientes, y personal del Centro de Salud. De las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Pregunta 1: ¿Considera factible la inserción de un robot para ayudar en tareas de transporte de insumos médicos en el centro de salud?

La mayor parte de los encuestados concordó que era factible la inserción para modernizar el centro de salud, mientras que la diferencia consideró que no era factible por los costos que implica incluir al robot al personal médico, obteniendo los porcentajes en la tabla 11-3.

Tabla 11-3. Respuesta a la primera pregunta

Factibilidad de inserción de prototipo	Centro de Salud	
	f	%
Si	43	86
No	7	14
Total	50	100

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Pregunta 2: ¿Piensa usted que con el uso del robot se reduzcan las tareas del personal y se mejore la atención?

De todos los encuestados ninguno opinó de forma negativa, coincidiendo que el robot ayudará a reducir las tareas del personal y agilizará la atención, obteniendo los porcentajes en la tabla 12-3.

Tabla 12-3. Respuesta a la segunda pregunta

Ayuda el prototipo	Centro de Salud	
	f	%
Si	50	100
No	0	0
Total	50	100

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

Pregunta 3: ¿El aspecto del robot le parece amigable?

De los encuestados a la mayoría concuerda que es agradable y le sorprende verlo por los pasillos del Centro de Salud, y los demás encuestados opinó que es grande y le tiene un poco de temor, obteniendo los porcentajes en la tabla 13-3.

Tabla 13-3. Respuesta a la tercera pregunta

El prototipo es amigable	Centro de Salud	
	f	%
Si	48	96
No	2	4
Total	50	100

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

Pregunta 4: ¿El rostro del robot le inspira confianza?

Según los encuestados la mayoría coincide que el rostro es un detalle que le sorprende y agrada, mientras una persona opinó que le es indiferente como se ve el robot y no deja de ser una máquina, obteniendo los porcentajes en la tabla 14-3.

Tabla 14-3. Respuesta a la tercera pregunta

Inspira confianza	Centro de Salud	
	f	%
Si	49	98
No	1	2
Total	50	100

Realizado por: Ivonne Vásconez, 2018

3.6. Análisis de costos

El funcionamiento del prototipo es gracias a varios componentes que lo conforman, los mismos que se presentan en la tabla 15-3 con sus respectivos costos.

Tabla 15-3. Costo del prototipo

Cantidad	Componente	Valor unitario	Valor total
Componentes electrónicos			
1	Sensor Kinect	90	90
2	Sensor ultrasónico HC-SR04	4	8
4	Sensor Infrarrojo QRD1114	1.75	7
1	SBC Raspberry Pi 3 Model B	67.50	67.50
1	Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560	18	18
1	Módulo de control doble canal MOSFET	30	30
1	Pantalla LCD 14.1"	80	80
1	Driver para pantalla LCD	20	20
2	PCB para encoders	3	6
1	PCB Shield para Arduino Mega 2560	10	10
Alimentación			
2	Regulador de voltaje LM2596	4.5	9
4	Batería LiPO 3s 2200mAH	35	140
1	Cargador Batería LiPO	28	28
Componentes mecánicos			
2	Motores DC	60	120
3	Cerradura Eléctrica	5.50	16.5
2	Rueda Loca	11.32	22.64
2	Llanta	16.44	32.88
Estructura			
1	Base del cuerpo en tol de 1mm	30	30
1	Cuerpo en fibra de vidrio	300	300
1	Cabeza en acrílico	20	20
2	Acoples para motores en Nylon	14	28
2	Rodamiento 6206R5	5	10
1	Piezas Impresas en 3D	30	30
Elementos adicionales			
1	Mini Teclado Mouse Inalámbrico Usb	18	18
1	Cable HDMI	4.5	4.5
	Costos adicionales	100.20	100.20
Costo total del prototipo			1102.20

Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

CONCLUSIONES

- Se cumple con la correcta implementación un robot móvil de configuración diferencial capaz de desplazarse en un ambiente hospitalario de una sola planta de libre acceso, con obstáculos estáticos y dinámicos a fin de llegar a su destino, cumpliendo con la entrega de insumos médicos en el Centro de Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu.
- La morfología del robot se determina estudiando la arquitectura del prototipo y los sistemas de locomoción que se adaptan a la aplicación del presente trabajo de titulación, teniendo en cuenta que el prototipo opera en interiores sobre una superficie plana.
- La configuración de locomoción con ruedas se elige según un análisis comparativo, donde la configuración diferencial obtiene un 40% de dificultad un valor por debajo de las demás. A más de ser la configuración más usada en interiores, siendo la mejor opción para aplicar un análisis cinemático orientado a odometría.
- Los componentes mecánicos y electrónicos que conforman el prototipo garantizan un correcto funcionamiento en condiciones adecuadas.
- Los resultados de las pruebas aplicando métodos estadísticos de inferencia son: un error en el desplazamiento del ± 2.38 cm con respecto a la distancia real, una precisión de ± 0.26 cm, y un retardo de tiempo de 0.04 segundos en su ruta.
- Existen perturbaciones ambientales que influyen en el comportamiento del prototipo, sin embargo en las pruebas se establece que posee un sistema robusto que minimiza el error.
- La construcción del dispositivo y la selección de componentes resultan en un prototipo de bajo costo en comparación con los robots comerciales existentes. El mismo cuenta con características similares para el transporte de insumos médicos en un ambiente hospitalario.

RECOMENDACIONES

- Evitar el piso mojado, para impedir lecturas erróneas por los sensores que resulten en una falsa distancia recorrida por el prototipo que no le permita llegar con precisión y exactitud a su destino.
- Para mejorar el funcionamiento se recomienda cambiar los encoder y motores por unos de mejor resolución, que perfeccione la lectura de pulsos por revolución teniendo mejor rendimiento.
- Añadir alarmas visuales y sonoras para anticipar la llegada del prototipo, e incentivar la relación robot humano.
- Analizar la posibilidad de cambiar las baterías del sistema para incrementar tiempo de funcionamiento del prototipo, o incluso fuentes de energía autosustentables que mantengan al prototipo en funcionamiento constante.
- Implementar mecanismos de seguridad al prototipo, debido a que puede ser manipulado por personas ajenas y lleguen a afectar la integridad de los sistemas mecánicos y electrónicos, además de un sistema de alerta que vigile las rutas del prototipo.
- Para trabajos futuros, incrementar el uso de galgas en los compartimientos para identificar si existe carga o no, y a su vez determinar en donde se encuentra la carga; optimizando las funciones y la autonomía del prototipo.

BIBLIOGRAFIA

3DNATIVES. *Escáner de luz estructurada.* [en línea]. 2016 [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/escaner-de-luz-estructurada-06122016/>.

ACKERMAN, Evan. Panasonic Revives Hospital Delivery Robot. *IEEE Spectrum* [en línea]. 2014. [Consulta: 16 abril 2018]. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/panasonic-hospital-delivery-robot>.

ALLONROBOTS. *Robots in hospitals.* [en línea]. 2013. [Consulta: 17 diciembre 2017]. Disponible en: <http://www.allonrobots.com/robots-in-hospitals.html>.

ASTROM, Karl. & HAGGLUND, Tore. *PID Controllers: Theory, Desing and tuning* [en línea]. 1995 S.l.: s.n. [Consulta: 21 julio 2018]. ISBN 1-55617-516-7. Disponible en: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>.

BAMBINO, II. Una Introducción a los Robots Móviles. 2008, pp. 1-86.

BANGGOOD. *50A Dual-Channel H Bridge Motor Driver.* [en línea]. 2017. [Consulta: 17 abril 2018]. Disponible en: <http://bit.ly/2AUJw8d>

BARRIENTOS, Antonio., et al. *Fundamentos de Robótica.* 2. 2007. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U. ISBN 8448156366, 9788448156367.

Baterías Eléctricas. [en línea], 2016. [Consulta: 4 julio 2018]. Disponible en: <http://bateriasdegrafenopara.com/tipos-de-baterias/>.

CALIBO, Taylor. *Obstacle detection and avoidance on a mobile robotic platform using active depth sensing* [en línea]. S.l.: NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL. 2014. [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.855.4855&rep=rep1&type=pdf>.

CHINCHILLA, Antonio. *Comportamiento Mecánico de los Materiales.* [en línea]. S.l.: [Consulta: 31 julio 2018]. Disponible en: <https://w3.ual.es/~aposadas/TeoriaErrores.pdf>.

CREATIVE COMMONS. *¿Qué es Raspbian?* [en línea]. 2017. [Consulta: 17 julio 2018]. Disponible en: <https://www.programoergosum.com/cursos-online/raspberry-pi/232-curso-de-introduccion-a-raspberry-pi/instalar-raspbian>.

GALLEGOS, Diego. El Carlos Andrade Marín utiliza tecnología robótica en medicina de rehabilitación. *ElCiudadano*. [en línea]. 2016. [Consulta: 1 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.elciudadano.gob.ec/el-carlos-andrade-marin-utiliza-tecnologia-robotica-en-medicina-de-rehabilitacion/>.

GARCIA PRECIADO, Paola & GONZALEZ FORERO, Sergio. *Reconocimiento de color y posicion con un sensor Kinect para aplicacion de robótica móvil*. 2016. S.l.: Pontificia Universidad Javeriana.

GAVILANEZ, Javier. *Fundamentos de Robótica Introducción*. . 2016. S.l.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto. & SALAZAR, Roman. *Análisis y diseño de experimentos*. 2. 2008, México: s.n. ISBN 9789701065266.

HORAUD, Radu. *Three-Dimensional Sensors Lecture 3: Time of Flight Cameras (Continuous Wave Modulation)*. [en línea], vol. 3. 2015. [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <http://perception.inrialpes.fr/>.

INGENIATIC. *Cámara estereoscópica*. [en línea]. 2011. [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <http://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/394-cámara-estereoscópica.html>.

JARDÓN HUETE, Alberto. *Metodología de diseño de robots de asistenciales. Aplicación al robot portátil ASIBOT* [en línea]. S.l.: Universidad Carlos III de Madrid. 2006. [Consulta: 21 febrero 2018]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/787>.

KOTA, Masaharu. *Ultrasonic sensor*. [en línea], vol. 104, no. 6, pp. 3153. 1998. [Consulta: 17 abril 2018]. ISSN 00014966. DOI 10.1121/1.424228. Disponible en: http://education.rec.ri.cmu.edu/content/electronics/boe/ultrasonic_sensor/1.html.

LJUNGBLAD, Sara, et al. Hospital Robot at Work: Something Alien or an Intelligent Colleague? , 2012. pp. 10.

MCI CAPACITACIÓN. *Modulación por ancho de pulsos.* [en línea]. 2015. [Consulta: 17 abril 2018]. Disponible en: <http://cursos.mcielectronics.cl/modulacion-por-ancho-de-pulsos/>.

MINISTERIO SALUD PÚBLICA. *Inaguración Centro de Salud Tipo C en Riobamba.* [en línea]. 2015. [Consulta: 22 febrero 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2CzobjL>

MIRAVETE, Antonio & LARRODÉ, Emilio. *Materiales Compuestos.* [en línea], 2000. [Consulta: 30 mayo 2018]. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=t9H_oQEACAAJ.

MISIEGO LÓPEZ, Ana. *Control de robots autónomos mediante microcontrolador Arduino.* 2015. S.l.: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

Morfología: Imágenes binarias. [en línea], 2014. [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema5-1.pdf>.

Morfología de los robots industriales [en línea], 2005. 2005. S.l.: s.n. [Consulta: 16 abril 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2NY8STN>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Comunicación Serial: Conceptos Generales.* [en línea]. [Consulta: 17 abril 2018]., 2006a. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Comunicación Serial: Conceptos Generales - National Instruments.* [en línea]., 2006b. [Consulta: 4 julio 2018]. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>.

O'KEEFE, Sean. *A Robot to Help Make the Rounds. NASA Spinoff* [en línea].2003. [Consulta: 27 febrero 2018]. Disponible en: https://spinoff.nasa.gov/spinoff2003/hm_4.html.

OLLERO, Anibal. *Modelos cinematicos de robots.* 2001. S.l.: s.n. ISBN 84-267-13.

OPENCV. *Transformaciones morfológicas.* [en línea]. 2014. [Consulta: 18 julio 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2yY1BOs>

OPENCV. *Canny Edge Detection.* [en línea]. 2015. [Consulta: 19 julio 2018]. Disponible en: https://docs.opencv.org/3.1.0/da/d22/tutorial_py_canny.html.

ORMEYER, Cliff. Single Board Computers. *Electronic Design* [en línea], 2014, no. 6, pp. 1-11. Disponible en: <http://www.embeddedarm.com/products/single-board-computers.php>.

REQUENA, Javier. *Encoders*. [en línea], 2009, [Consulta: 4 julio 2018]. Disponible en: <http://ramos.elo.utfsm.cl/~elo212/docs/Encoders-jvr-v01.pdf>.

ROMERO BARCOJO, Alfonso. *Encoder*. [en línea], 2010, pp. 1-3. [Consulta: 4 julio 2018]. Disponible en: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1H2F1807L-JP0SG2-J1J/encoder.pdf>.

SWEDBERG, Claire. Hospital Robot Tracks Controlled Substances, High-Value Meds. *RFID* [en línea], 2010, [Consulta: 27 febrero 2018]. Disponible en: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?7825>.

TAKAHASHI, Masaki., et al. Developing a mobile robot for transport applications in the hospital domain. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, ISSN 09218890. DOI 10.1016/j.robot.2010.03.010.

VALVERDE REBAZA, Jorge. *Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny*. [en línea], no. October 2007, pp. 8. Disponible en: <http://www.seccperu.org/files/Detecci?ndeBordes-Canny.pdf>.

ANEXOS

Anexo A: Manual de Usuario



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

“CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL USANDO UN SBC
(SINGLE- BOARD COMPUTER) PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE DE INSUMOS
MÉDICOS EN EL CENTRO DE SALUD TIPO C LIZARZABURU EN LA CIUDAD DE
RIOBAMBA.”

MANUAL DE USUARIO

AUTOR: VÁSCONEZ CHAGÑAY IVONNE CAROLINA

TUTOR: Ing. PAUCAR SAMANIEGO JORGE LUIS

Riobamba – Ecuador
2018

MANUAL DE USUARIO DEL ROBOT MEDIBOT

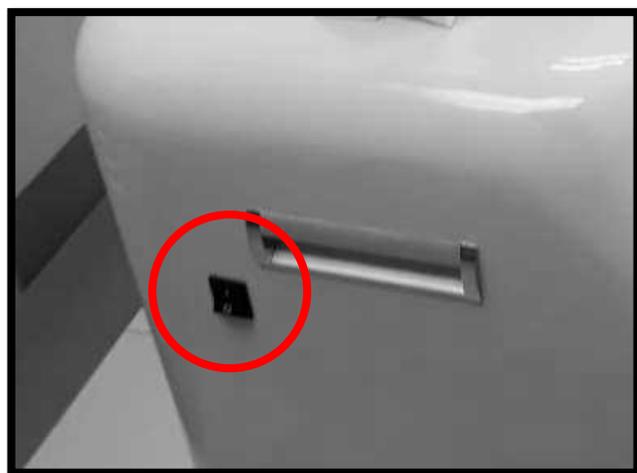


Realizado por: Ivonne Vásquez, 2018

Medibot es un robot capaz de desplazarse de forma autónoma, con el fin de transportar insumos médicos en el Centro De Salud tipo C Espoch-Lizarzaburu. Para su funcionamiento cuenta con sensores exteroceptivos que permiten al prototipo captar el entorno y sensores propioceptivos que sirven para determinar su posición. El prototipo cuenta con una interfaz de usuario para interactuar con el personal de farmacia que son los encargados de enviar las encomiendas hacia el área de procedimientos y hospitalización. A continuación, se describe el funcionamiento del robot y de la interfaz de usuario.

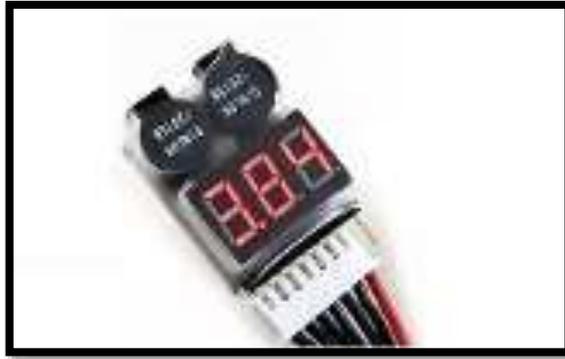
1. ENCENDIDO DEL ROBOT

Para encender al prototipo se debe accionar el interruptor que se encuentra en el lado superior derecho del robot.



2. INDICADOR DE BATERÍA BAJA

El prototipo cuenta con un indicador de batería baja, este está programado para activarse cuando las celdas de las baterías LiPO se encuentren en un voltaje menor a 3.7v, y emitir una alerta en forma de pulsos sonoros.



3. CARGA DE BATERÍAS

Para cargar las baterías del prototipo se debe seguir los siguientes pasos:

1. Asegurarse que el robot este apagado
2. Conectar el cable de poder en el conector que se encuentra en lado inferior derecho del prototipo.
3. Accionar el interruptor de carga.



4. Se activará un led rojo que indica que el cargador esta encendido.
5. Un segundo led comenzará a parpadear y cuando las baterías estén completamente cargadas este led se quedará encendido continuamente.

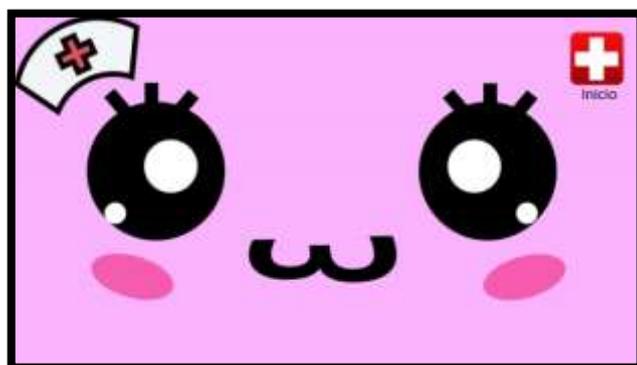


4. MANEJO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

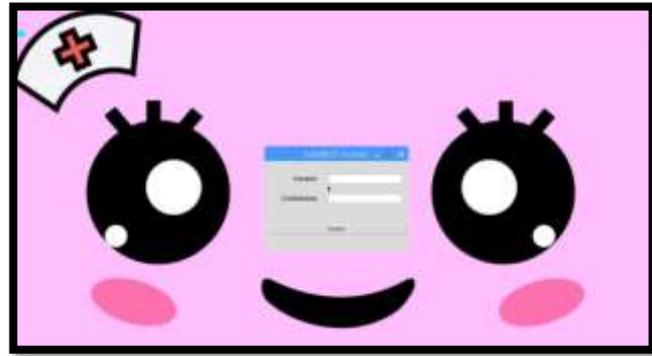
Para acceder y navegar en la interfaz de usuario se utiliza un teclado con mousepad inalámbrico, este se lo observa en la figura.



Una vez encendido el robot se procede a abrir la interfaz de usuario seleccionando el icono de inicio que se encuentra en el escritorio y presionando enter.



Se abrirá una ventana de autenticación donde se deberá ingresar los datos de usuario y contraseña. Estos datos son únicos y asignados a cada personal encargado del envío y recepción de las encomiendas.



MediBOT Acceso

Usuario: medibot

Contraseña: *****

Aceptar

Cuando se ha ingresado los datos correctos se abre una nueva ventana en donde se podrá seleccionar y abrir los compartimientos, seleccionar la ruta y enviar al robot hacia su destino.

Control de rutas robot MediBOT

Por favor indique el compartimiento que desee abrir:

Compartimiento 1

Compartimiento 2

Compartimiento 3

Por favor indique el destino de los insumos:

Procedimientos

Hospitalización

Hospitalización y Procedimientos

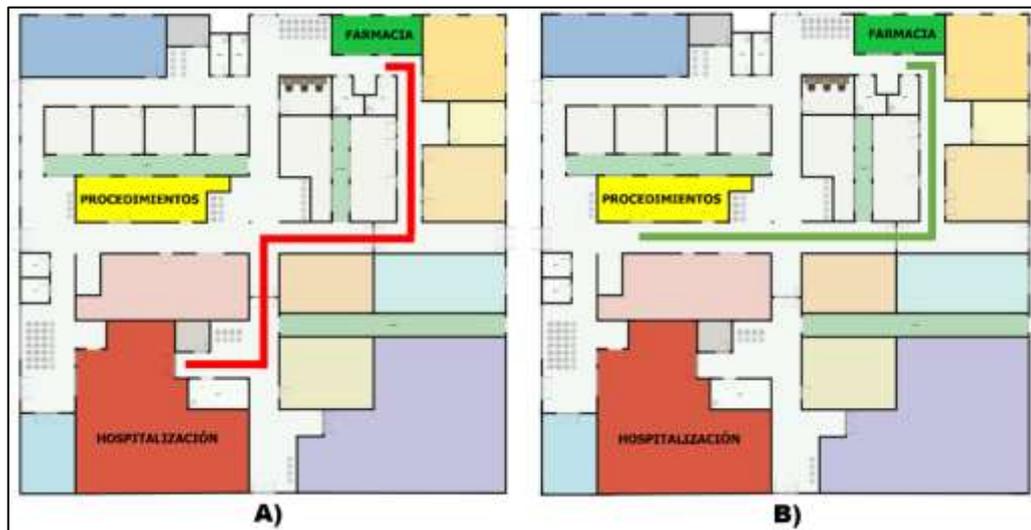
Id

Salir

Al seleccionar un compartimiento, este se abre por 3 segundos.

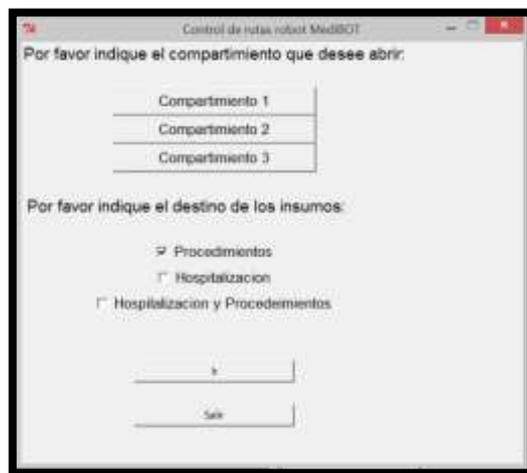


Una vez guardados los insumos médicos en el compartimiento seleccionado, se procede a seleccionar una ruta de las dos disponibles o las dos, hospitalización o procedimientos.

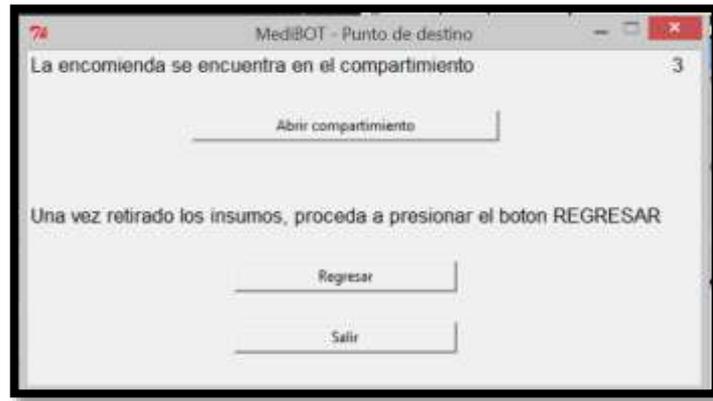


Ruta de hospitalización (A), ruta de procedimientos (B).

Para que el robot se dirija al destino seleccionado se da click en botón IR.



Una vez se ha dado click en el botón IR, el robot se dirige automáticamente a su destino, y al mismo tiempo se abre una nueva ventana.



En esta ventana me indica el compartimiento en donde se encuentra la encomienda. Y cuando el robot llega a su destino emite una alerta sonora indicando de su llegada para que el encargado de receptor las encomiendas pueda acceder a ellas dando click en el botón abrir compartimiento. Para que el robot regrese al origen, se debe dar click en el botón regresar.

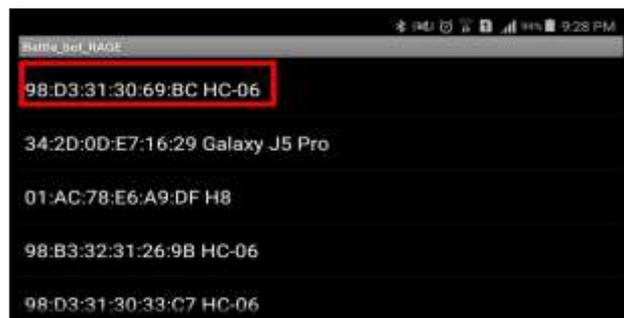
5. MANEJO REMOTO DEL ROBOT MEDIANTE BLUETOOTH

Para movilizar el prototipo de una manera rápida y sin esfuerzo, se lo maneja mediante un Smartphone, gracias al uso de una aplicación Android. Para ello se siguen los siguientes pasos.

1. Descargar la aplicación robot bluetooth controller
2. Pulsar el icono del bluetooth



3. Seleccionar el modulo bluetooth del robot



4. Se abrirá el panel de control del robot con los movimientos de: frente, atrás, derecha, izquierda y stop.



Anexo B: Manual Técnico.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

**“CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL USANDO UN SBC
(SINGLE- BOARD COMPUTER) PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE DE INSUMOS
MÉDICOS EN EL CENTRO DE SALUD TIPO C LIZARZABURU EN LA CIUDAD DE
RIOBAMBA.”**

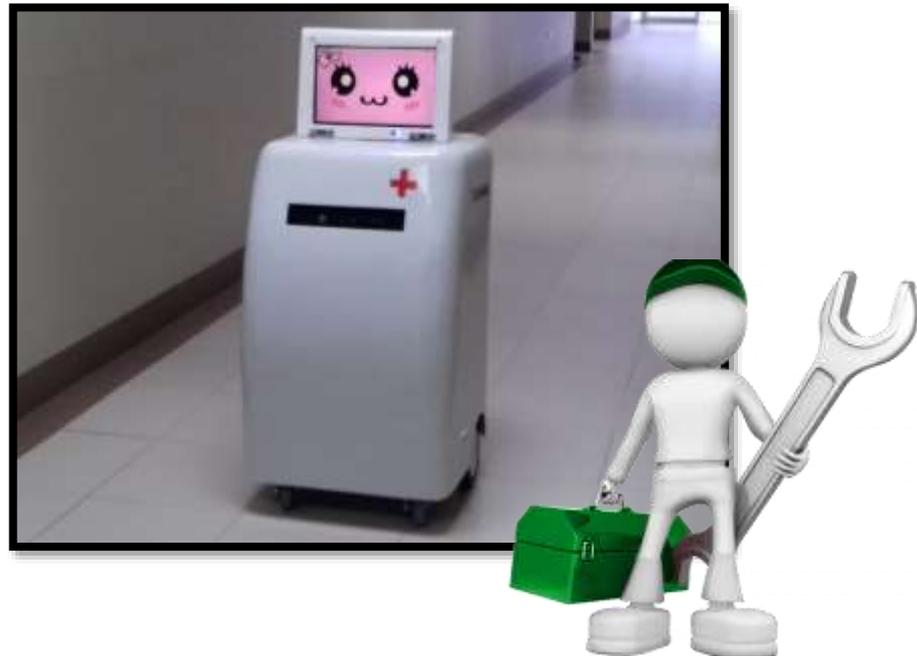
MANUAL TÉCNICO

AUTOR: VÁSCONEZ CHAGÑAY IVONNE CAROLINA

TUTOR: Ing. PAUCAR SAMANIEGO JORGE LUIS

Riobamba – Ecuador
2018

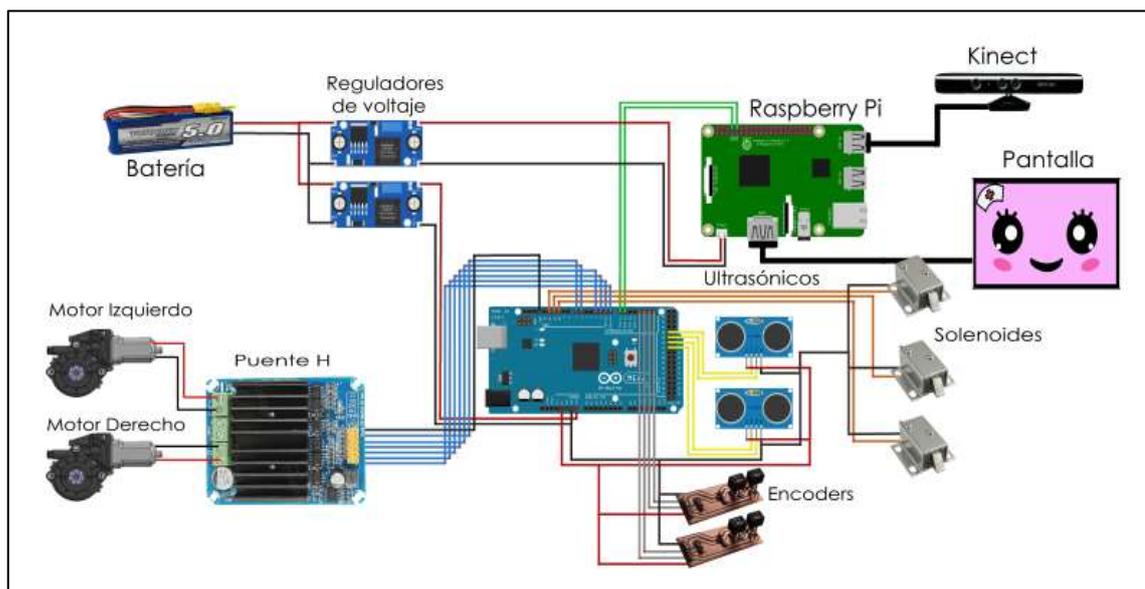
MANUAL TÉCNICO DEL ROBOT MEDIBOT



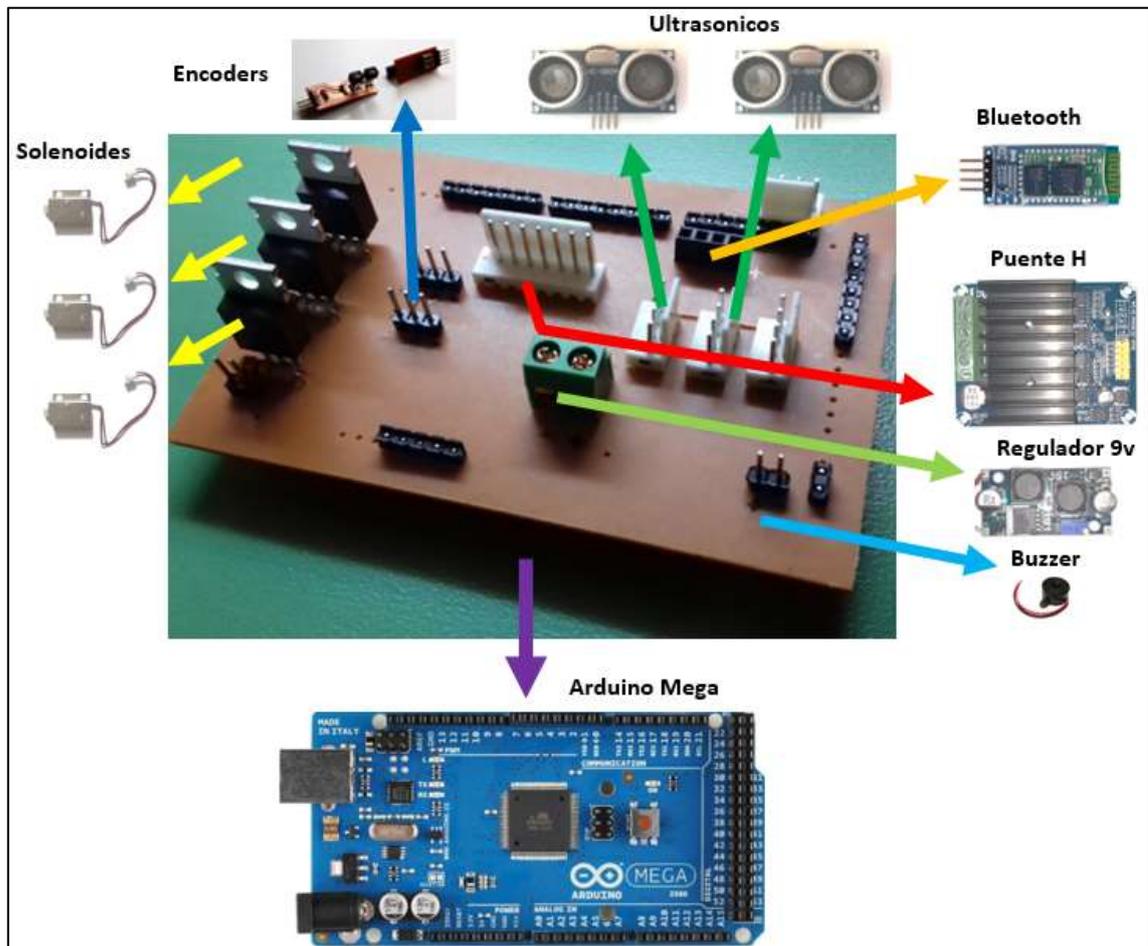
El presente manual técnico contiene toda la información necesaria para resolver problemas de diferente índole que pueden surgir en el uso del robot MediBOT. Se provee de soluciones a los fallos más comunes y llevar un adecuado mantenimiento correctivo del robot.

1. DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL ROBOT

Para encender al prototipo se debe accionar el interruptor que se encuentra en el lado superior derecho del robot.



2. CONEXIONES DE LA SHIELD MEDIBOT ARDUINO MEGA



3. MEDICIONES DE VOLTAJE

La tarjeta de control medibot shield tiene unos varios puntos de medición de voltaje, uno a la entrada del regulador de voltaje y la otra a la salida del regulador. El arduino mega posee un regulador de 5v con los que se alimenta a los sensores ultrasónicos y a los encoders. El bluetooth también se alimenta con 5v

En la siguiente tabla se muestra los valores de voltaje de comprobación.

Punto de medición	Valor
GND	-
Vcc Entrada al regulador	11.8 - 12.5
Vcc Salida al regulador	9v
Vcc sensores ultrasónicos	5v
Vcc encoders	5v
Bluetooth	5v

4. FALLAS MÁS COMUNES

En esta sección se indican los pasos a seguir en situaciones de fallas más comunes en la operación del robot, para comprobar los elementos implicados en el correcto funcionamiento.

No enciende el robot

1. Revisar el estado del interruptor
2. Comprobar si las baterías están cargadas
3. Revisar el estado de los cables

Las baterías no se cargan

1. Revisar la alimentación a la red eléctrica
2. Comprobar el interruptor del cargador
3. Revisar el fusible del conector de carga
4. Comprobar la conexión de las baterías al cargador

El monitor del robot no enciende

1. Comprobar la alimentación de voltaje.
2. Revisar el estado del led del monitor, cuando está apagado el led se pone de color “rojo”, y cuando esta encendido el led cambia a “azul”.
3. Comprobar el estado de los conectores de video.
4. Revisar el estado del cable de video.

No se conecta por medio de bluetooth

1. Reiniciar el robot.
2. Revisar si esta encendido el bluetooth en el teléfono Android
3. Seleccionar correctamente el modulo bluetooth del robot

5. INFORMACIÓN ÚTIL PARA EL MANTENIMIENTO

Esta información será de vital importancia a la hora de realizar el mantenimiento correctivo de diversos elementos del robot medibot. A continuación, se enlistan todos los componentes electrónicos a ser reemplazados en caso de daños significativos.

- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Arduino: | Arduino Mega |
| 2. Sensores de distancia: | HC-S04 |
| 3. Encoders: | QRD 1114 |
| 4. Modulo bluetooth: | HC-06 |
| 5. Driver puente H: | 50A MOSFET DE DOS CANALES |
| 6. Motores: | MOTORES 12VDC ELEVAVIDRIOS |

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| 7. Regulador de voltaje: | LM2596 |
| 8. Cámara: | KINECT XBOX 360 |
| 9. Computador a bordo: | RASPBERRY PI REV 3 |
| 10. Baterías: | TURNIGY 2200 MAH 35C |

Anexo C: Modelo de encuesta aplicada.



La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, solicita su valiosa colaboración con la finalidad de proporcionar su ilustrado criterio respecto a la construcción e implementación de un robot móvil para aplicaciones de transporte de insumos médicos en el Centro de Salud tipo C Lizarzaburu en la Ciudad de Riobamba.

Instrucciones

- Por favor lee detenidamente la pregunta y marque la respuesta que considere adecuada.
- Le rogamos responder con toda sinceridad.

Pregunta 1: ¿Considera factible la inserción de un robot para ayudar en tareas de transporte de insumos médicos en el centro de salud?

Si _____ No _____

¿Por qué?

Pregunta 2: ¿Piensa usted que con el uso del robot se reduzcan las tareas del personal y se mejore la atención?

Si _____ No _____

¿Por qué?

Pregunta 3: ¿El aspecto del robot le parece amigable?

Si _____ No _____

¿Por qué?

Pregunta 4: ¿El rostro del robot le inspira confianza?



Si _____ No _____

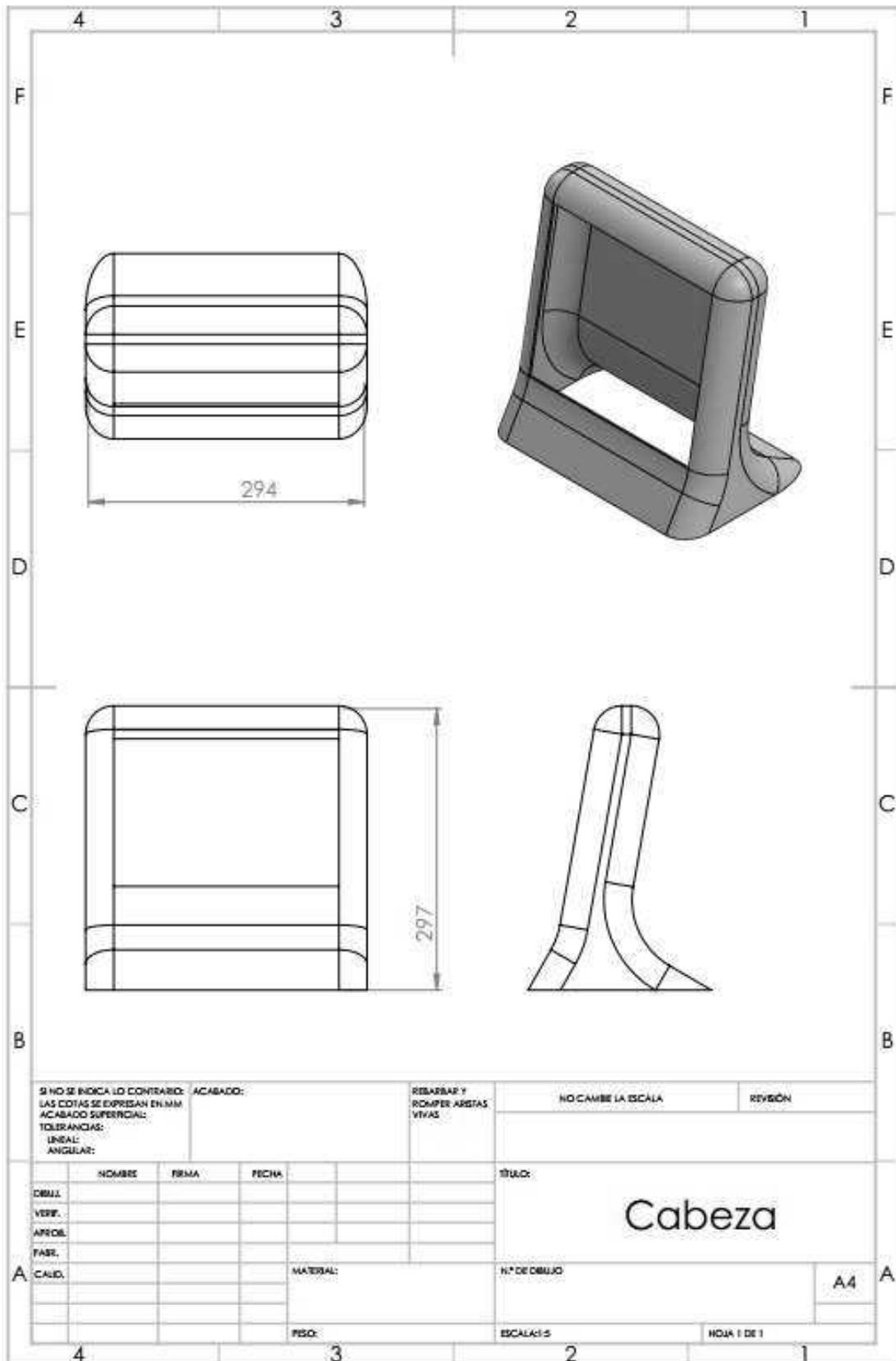
¿Por qué?



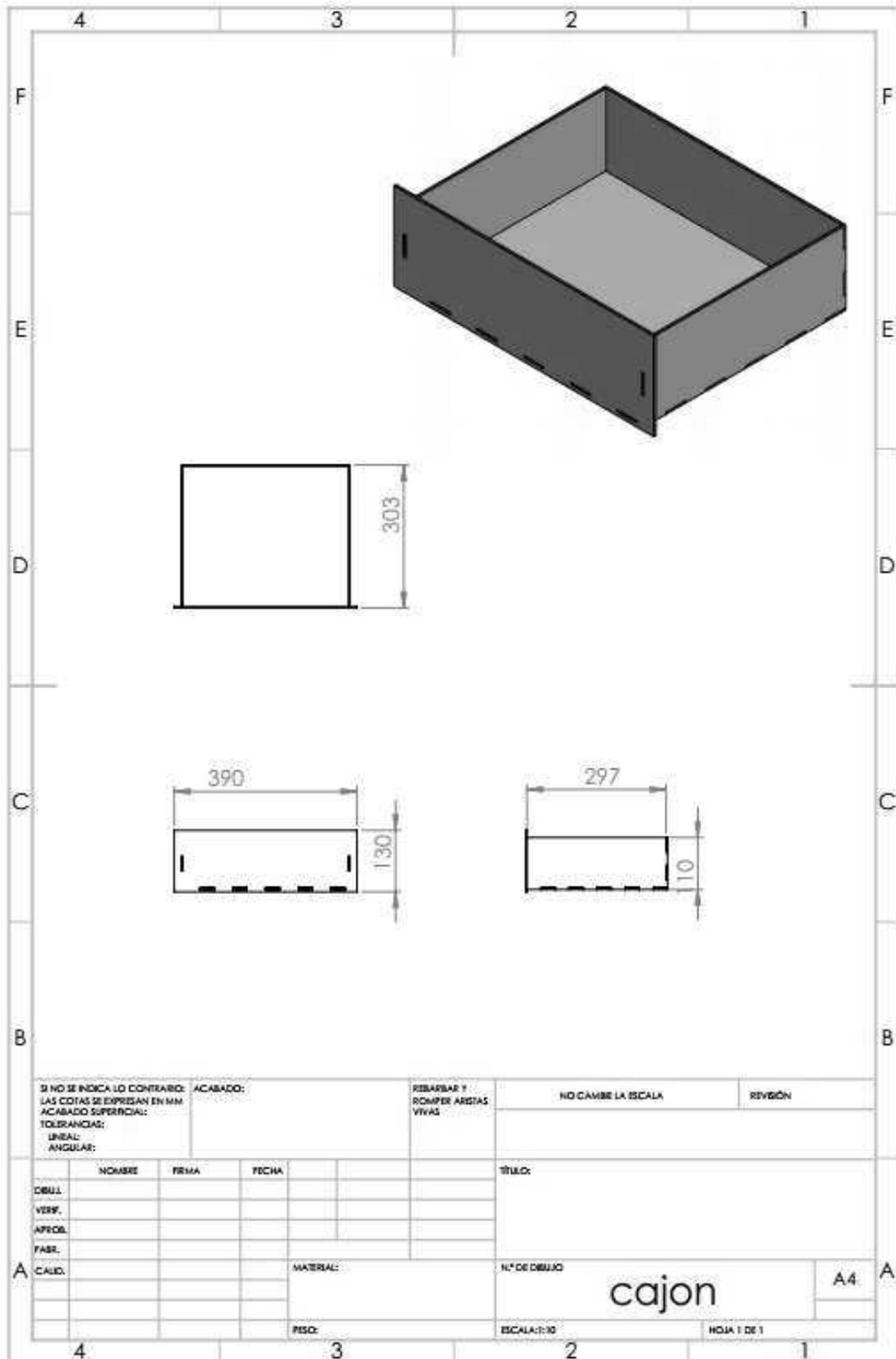
ESCUOLA DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA
CONTROL Y SISTEMAS INDUSTRIALES

Medi-Bo+

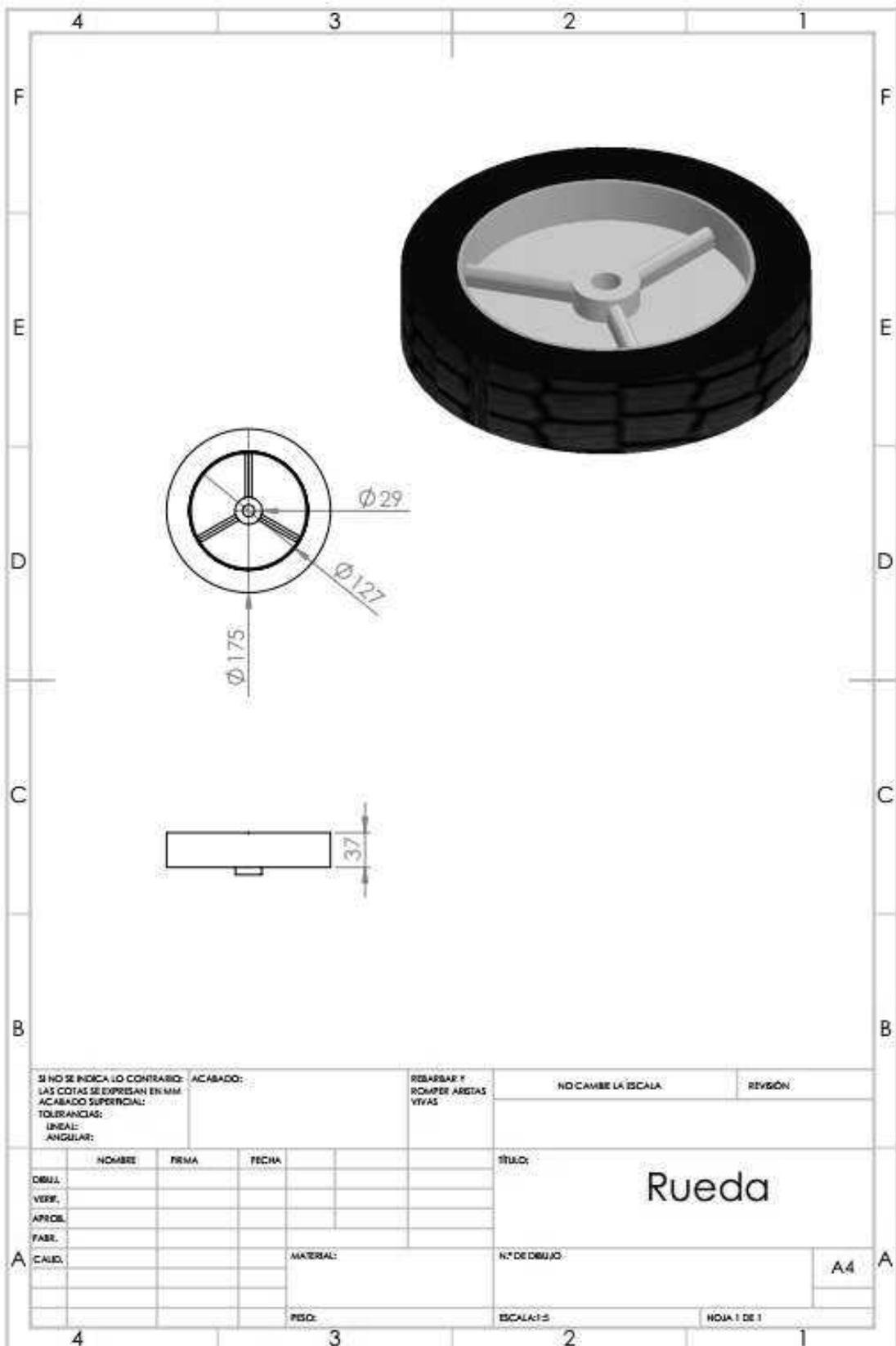
Cabeza del prototipo.



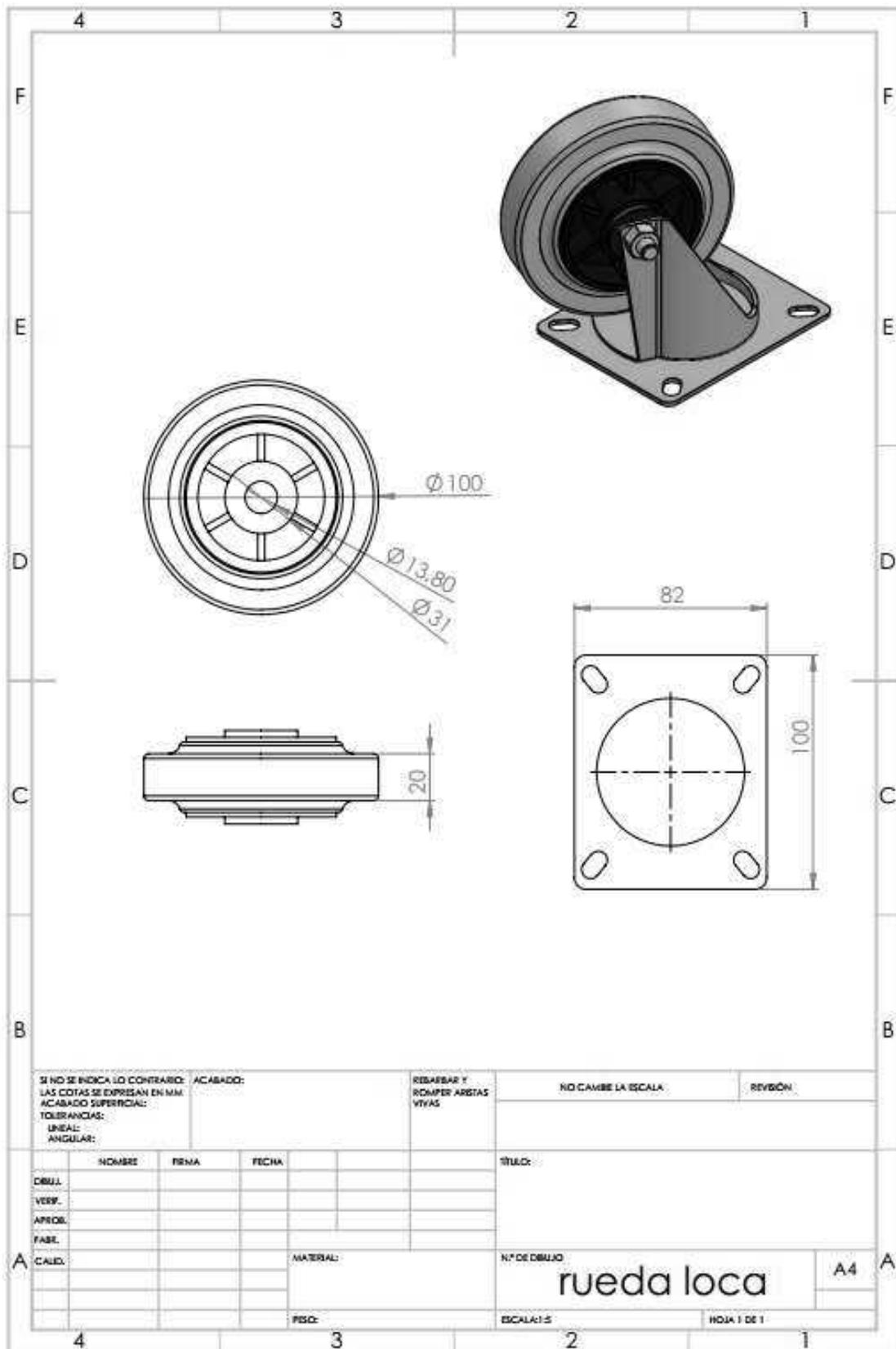
Compartimiento del prototipo.



Rueda del prototipo.

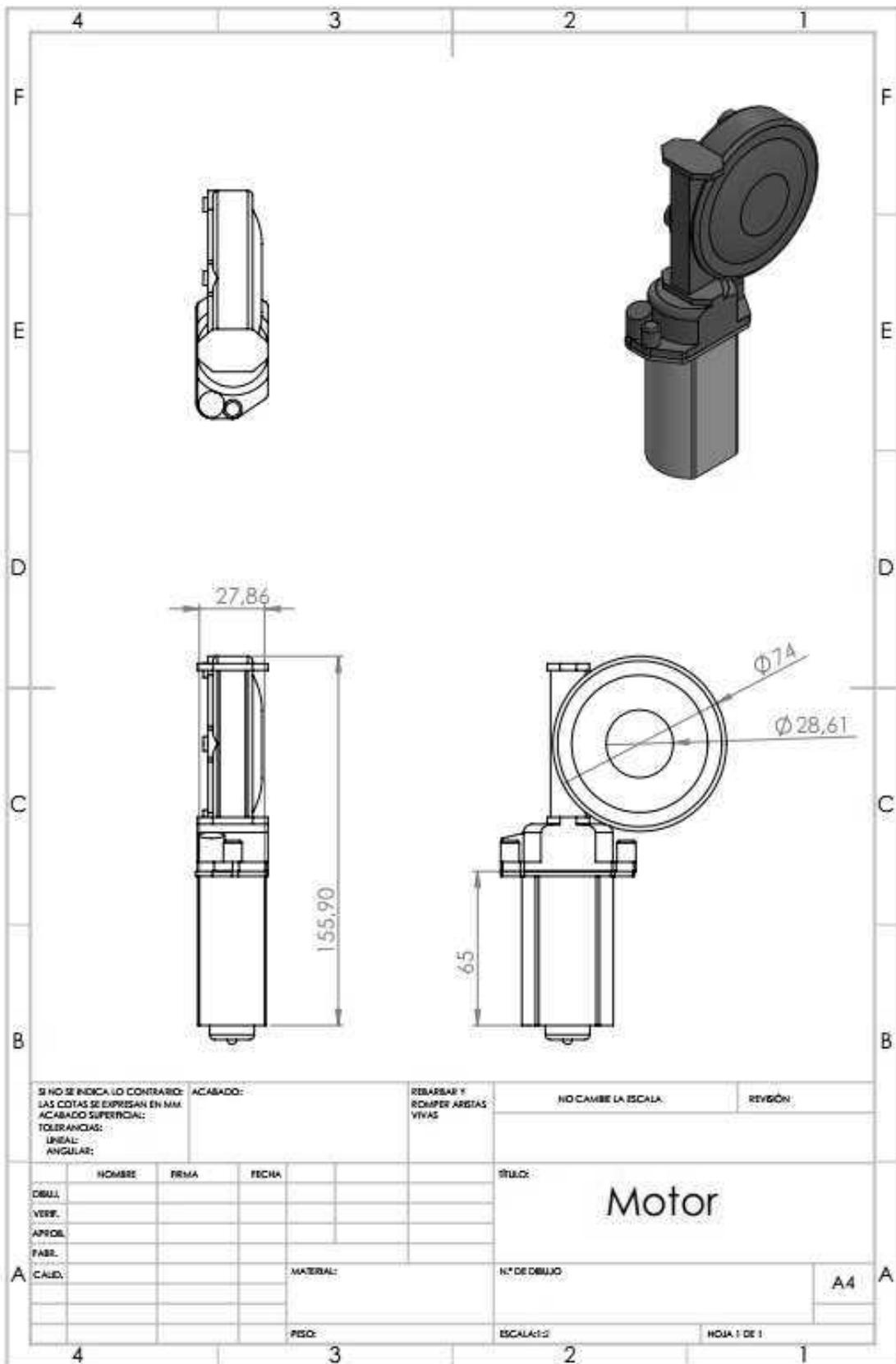


Rueda Loca del prototipo.

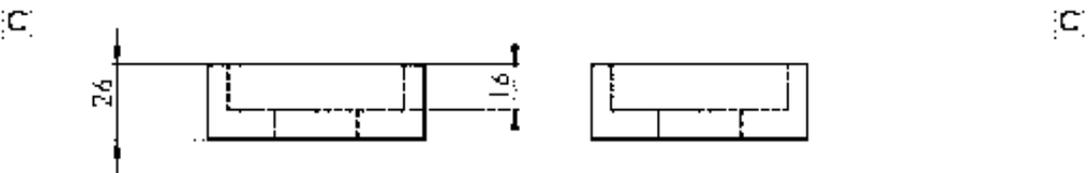
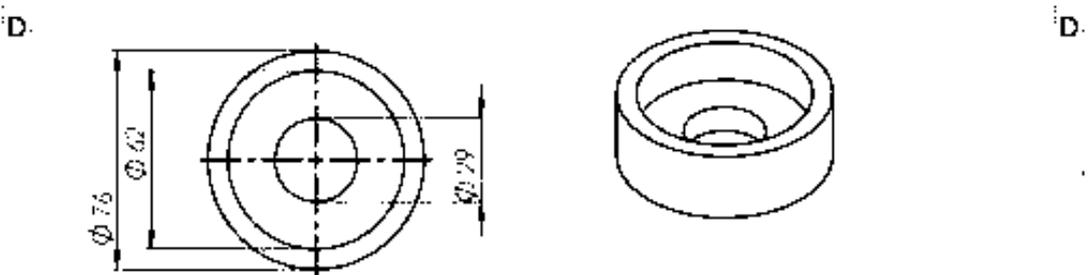
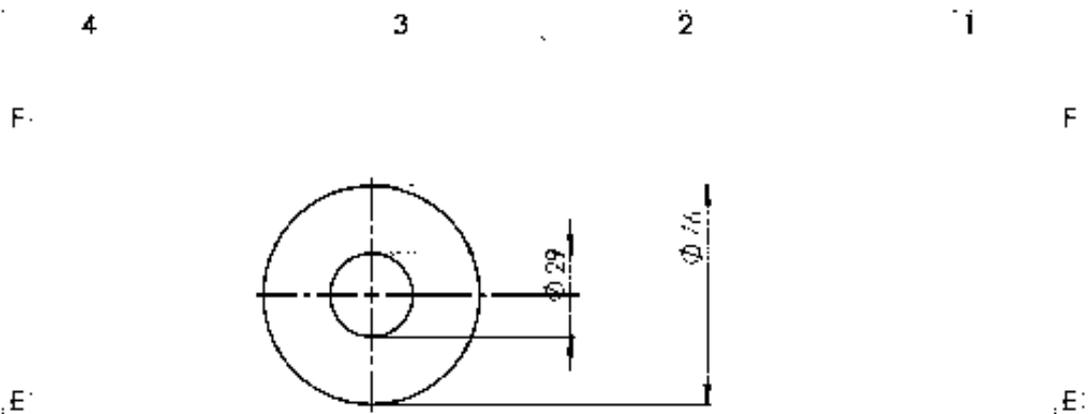


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA.	REVISIÓN:
NOMBRE		FINA	FECHA	TÍTULO:		
DBUJ.				N.º DE DIBUJO rueda loca		
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO		A4
			PESO:	ESCALA: 1:5		HOJA 1 DE 1

Motor del prototipo.



Acople para rodamiento de rueda del prototipo.



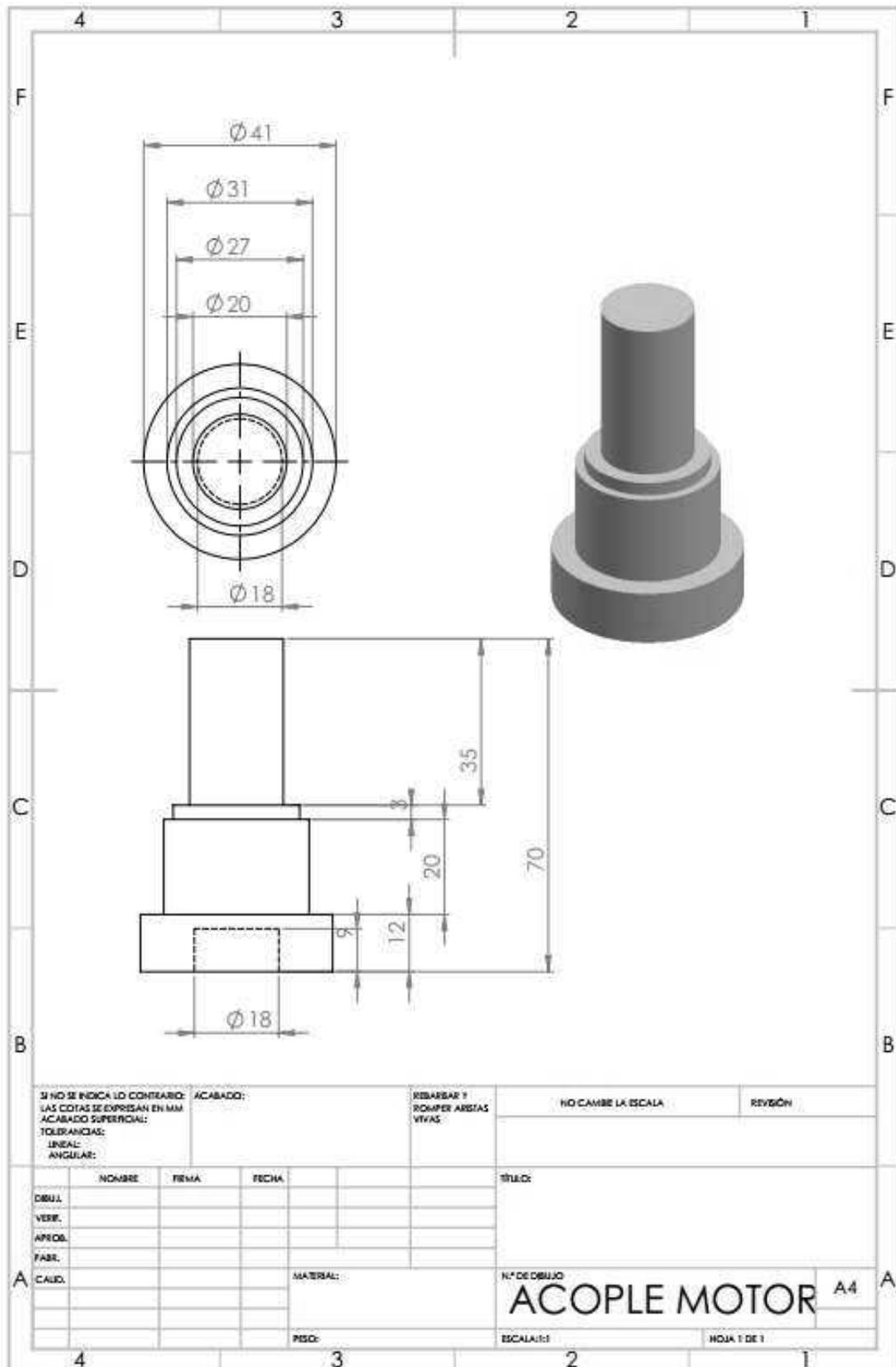
B

<p>SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERIOR: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:</p>	<p>ACABADO: REMA: FINCA:</p>	<p>REBARBA: REBARBA: REBARBA: VITAS:</p>	<p>NO CAMBIE LA ESCALA</p>	<p>REVISIÓN</p>
<p>OBJETIVO: VERIFICAR: APROBADO: FABRIL: CATEDRADO:</p>	<p>MATERIAL:</p>	<p>ESCALA:</p>	<p>Nº DE DIBUJO: rodamiento_acople^A</p>	<p>NOVA (EN 1)</p>
4	3	2	1	

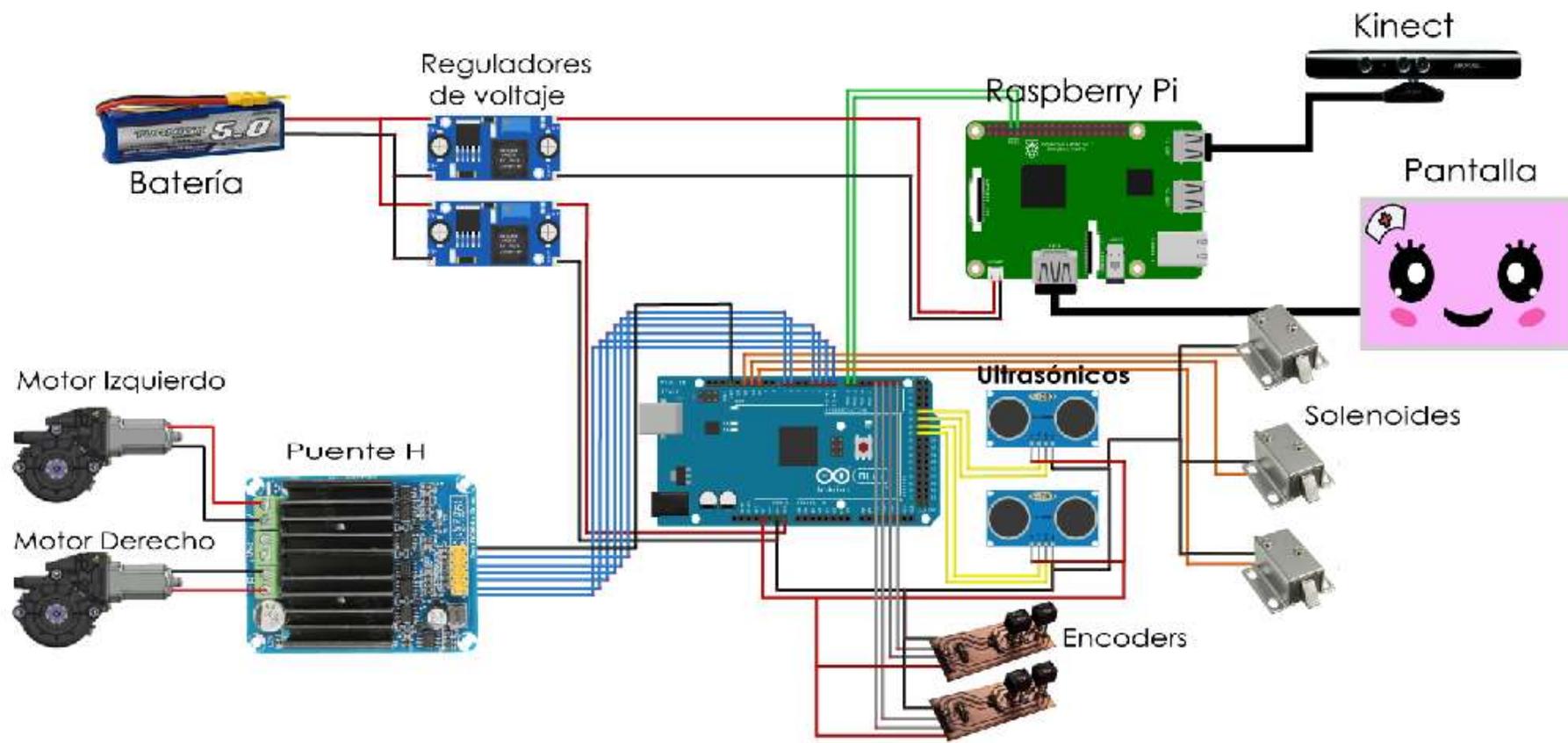
A

A

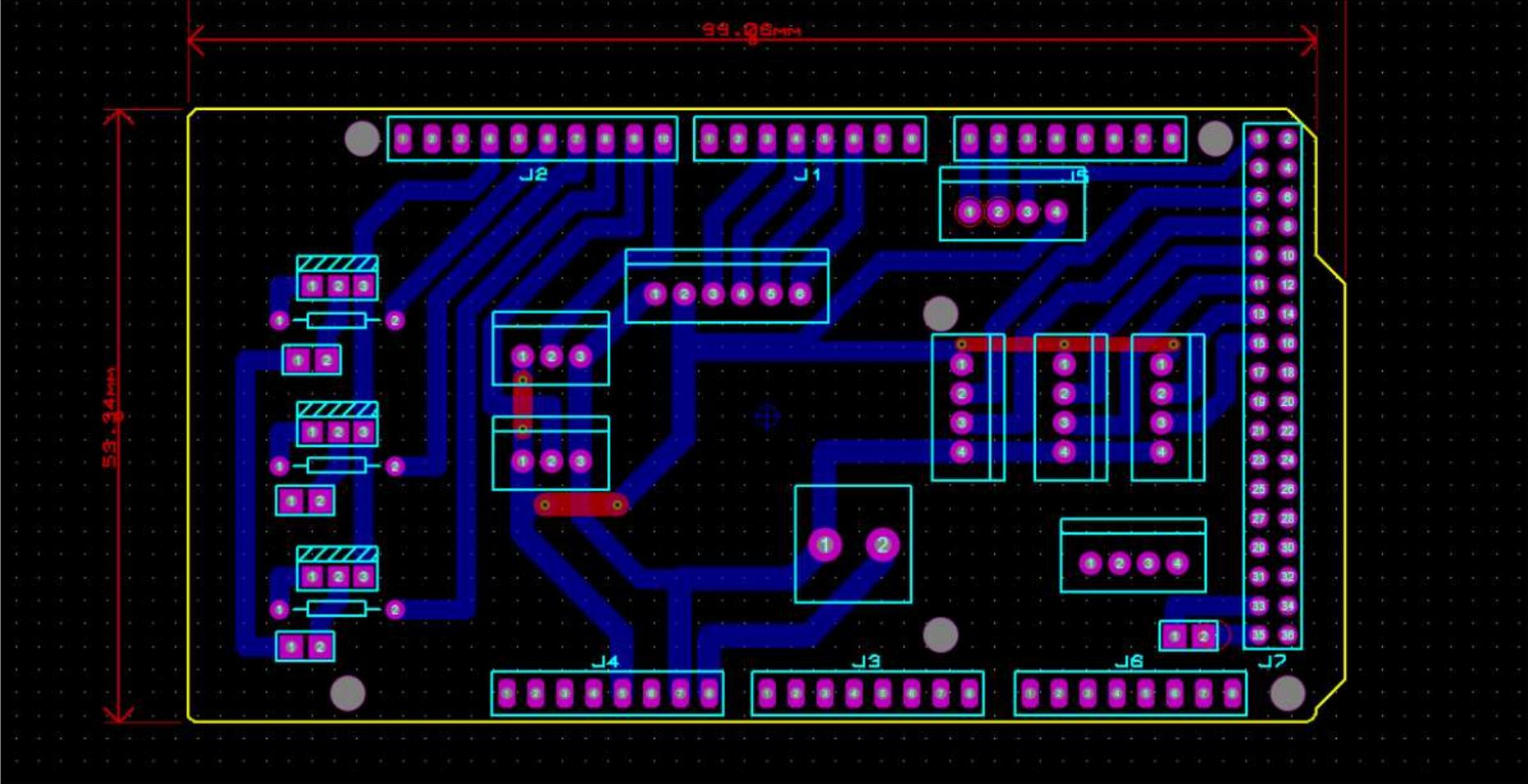
Acople motor-rueda del prototipo.

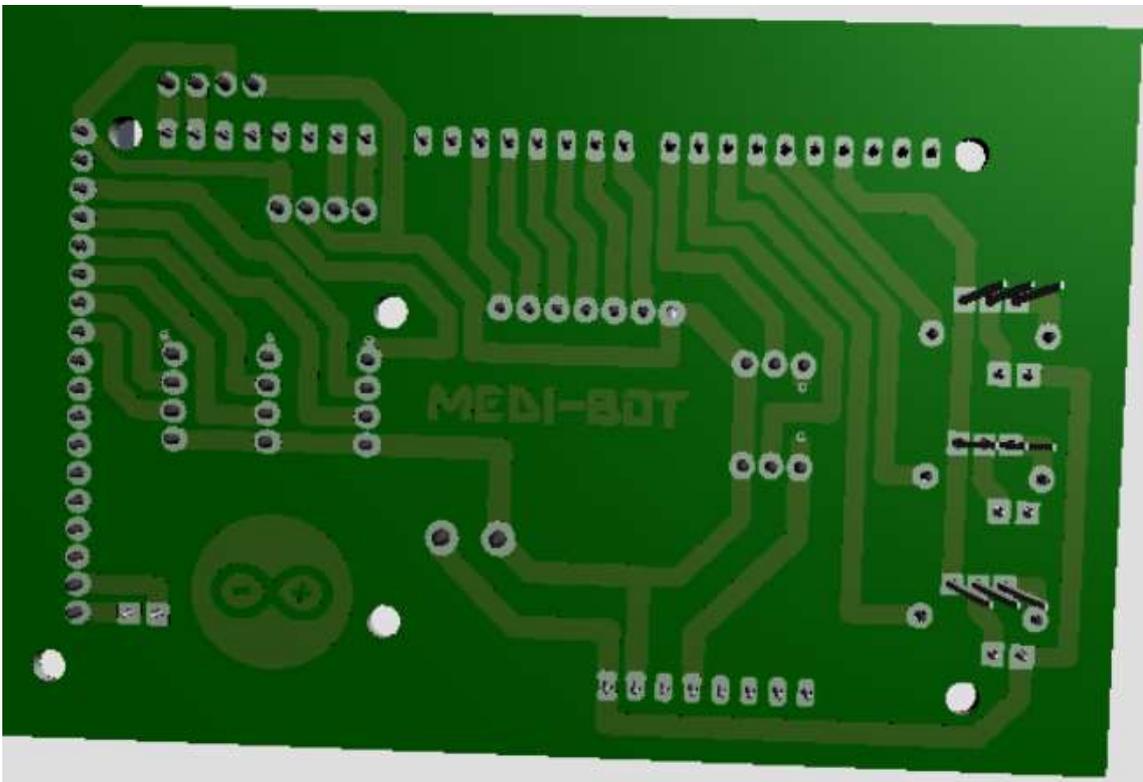
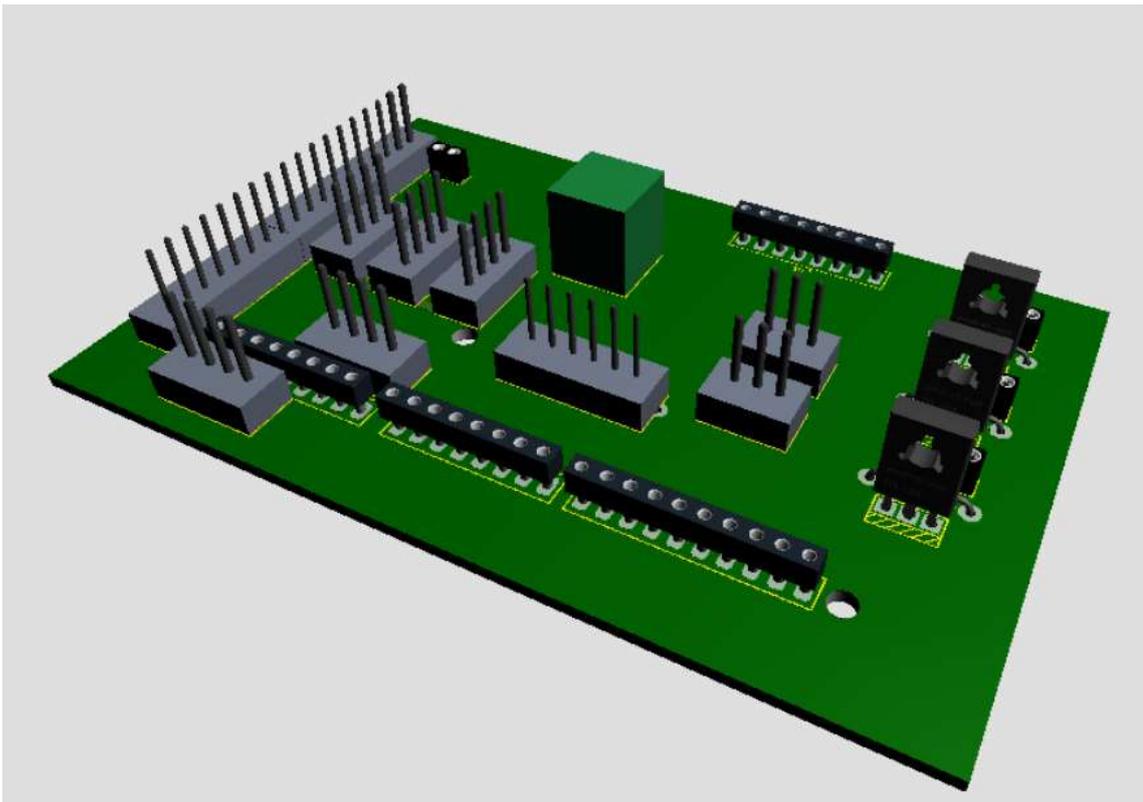


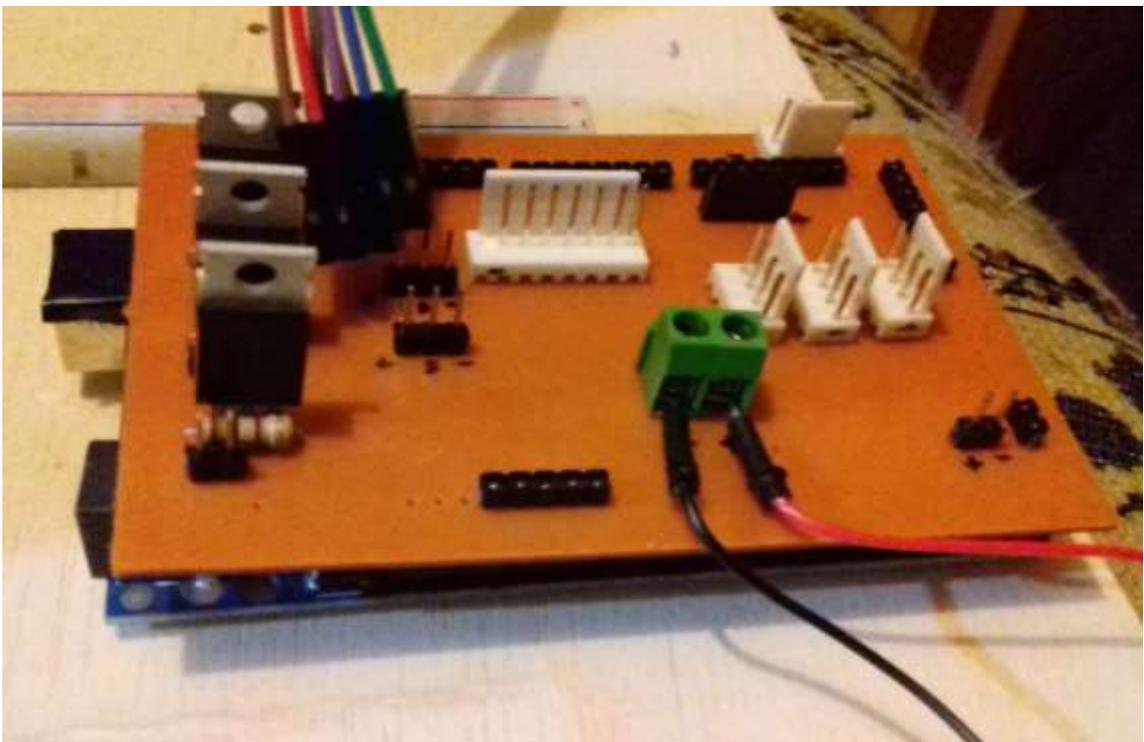
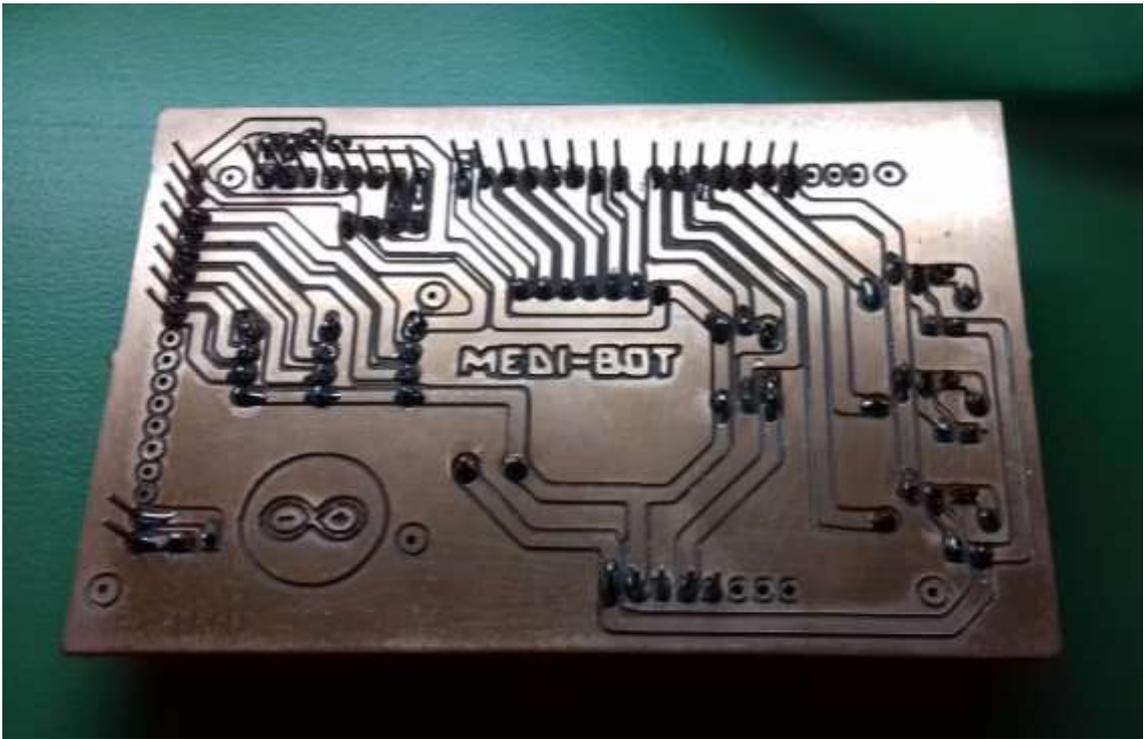
Anexo E: Esquemático de conexiones.



Anexo F: Esquemático de PCB







Anexo G: Evidencia fotográfica.





