



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO CON  
BASE EN SENSORES INERCIALES PARA EL CONTROL DE UN  
DISPOSITIVO MÓVIL”**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTORES:**

**ANDRES MATEO CABAY SEGOVIA**

**EDSON BRANISLEY AMAGUAÑA MORETA**

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO CON  
BASE EN SENSORES INERCIALES PARA EL CONTROL DE UN  
DISPOSITIVO MÓVIL”**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTORES:** ANDRES MATEO CABAY SEGOVIA

EDSON BRANISLEY AMAGUAÑA MORETA

**DIRECTOR:** ING. JORGE LUIS PAUCAR SAMANIEGO

Riobamba – Ecuador

2023

**© 2023, Andres Mateo Cabay Segovia, Edson Branisley Amaguaña Moreta**

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.

Nosotros, Andres Mateo Cabay Segovia y Edson Branisley Amaguaña Moreta, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de noviembre de 2023



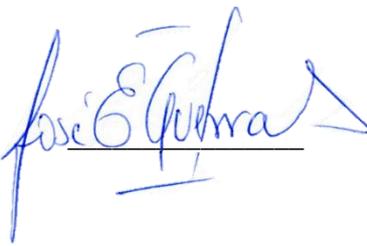
**Andres Mateo Cabay Segovia**  
**060448573-0**



**Edson Branisley Amaguaña Moreta**  
**100325891-8**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Dispositivo Tecnológico, “**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO CON BASE EN SENSORES INERCIALES PARA EL CONTROL DE UN DISPOSITIVO MÓVIL**”, realizado por los señores: **ANDRES MATEO CABAY SEGOVIA** y **EDSON BRANISLEY AMAGUAÑA MORETA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Lic. Monserrath Amparo Padilla Muñoz <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-11-06
Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-06
Ing. José Enrique Guerra Salazar <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-11-06

## **DEDICATORIA**

A mis queridos familiares, amigos y sobre todo Brigitte; este viaje académico ha sido una travesía llena de desafíos y descubrimientos y no podría haber llegado hasta este punto sin el apoyo inquebrantable de cada uno de ustedes. Sus palabras alentadoras, paciencia y amor constante han sido los motores que impulsaron el presente trabajo de integración curricular desde sus primeros pasos hasta su culminación.

*Mateo*

A mis padres queridos, en este momento de triunfo, mis palabras no pueden expresar mi gratitud hacia ustedes. Su amor y dedicación han sido mi faro en los momentos más difíciles y mi brújula en este viaje académico. Cada paso que he dado en la realización de esta tesis ha sido impulsado por el deseo de honrar su sacrificio y su inquebrantable apoyo. No hay un solo éxito en mi vida que no sea por su parte. Incluso cuando dudé de mí mismo, su fe en mí me ha impulsado a superar obstáculos que parecían insuperables. Cada página de este trabajo es un tributo a la ética laboral incansable que me enseñaron y al amor incondicional que siempre me han brindado. Con todo mi amor y gratitud.

*Edson*

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes me han brindado su amor y paciencia durante todos estos años de estudio, a mis amigos, quienes me apoyaron durante la realización de este proyecto cuando se tornó difícil, a Brigitte, quien siempre me apoyó y me dio todo su amor y cariño durante la realización de este proyecto, a mi compañero de tesis y amigo Edson, por el trabajo realizado en conjunto y por último, a mi director de tesis, cuya guía experta y apoyo crítico han sido esenciales en mi desarrollo académico. Gracias por formar parte de este capítulo significativo de mi vida.

*Mateo*

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis amigos y familiares más cercanos, así como a todas las personas que han apoyado este viaje. Mis hermanos queridos Johan y Jenny siempre han estado ahí para mí, desde los días de estudio hasta los momentos de descanso. Su compañía, amabilidad y afecto han sido un regalo valioso. Durante muchos años, Narin, mi mejor amiga, has sido mi confidente y compañera de aventuras, tu apoyo y orientación han sido invaluable, y no puedo expresar mi gratitud por estar siempre a mi lado. Tu amor y confianza en mí, mi querida Zara, mi brillo y pequeña flor, me han llevado más allá de lo que nunca hubiera imaginado, tu constante apoyo me ha dado la fuerza para enfrentar cada desafío con determinación y alegría. A mi compañero de tesis Mateo por la dedicación, esfuerzo y colaboración en este trabajo de titulación. A mi director de tesis, gracias por su orientación, conocimiento y confianza en nuestra capacidad, ha sido un honor aprender bajo su dirección. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi corazón y ha sido una parte esencial de mi éxito. Este logro es suyo tanto como mío.

*Edson*

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema .....</b>	<b>3</b>
<i>1.1.1 Antecedentes .....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.2 Formulación de problema .....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.3 Sistematización del problema .....</i>	<i>5</i>
<b>1.2 Justificación.....</b>	<b>5</b>
<i>1.2.1 Justificación teórica.....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.2 Justificación aplicativa.....</i>	<i>6</i>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>7</b>
<i>1.3.1 Objetivo general.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos .....</i>	<i>7</i>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Importancia del procesamiento de señales .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Sistemas de desplazamiento .....</b>	<b>9</b>
<i>2.2.1 Análisis comparativo entre sistemas de desplazamiento .....</i>	<i>10</i>

<b>2.3</b>	<b>Sensores inerciales .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Giroscopios.....</i></b>	<b>11</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>Análisis comparativo entre tipos de giroscopio .....</i></b>	<b>12</b>
<b>2.3.3</b>	<b><i>Acelerómetros .....</i></b>	<b>12</b>
<b>2.3.4</b>	<b><i>Análisis comparativo entre tipos de acelerómetro .....</i></b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Unidad de medida inercial .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Cálculo del ángulo a partir de la aceleración.....</i></b>	<b>15</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Cálculo del ángulo a partir de la velocidad angular .....</i></b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Factores que afectan a las señales inerciales .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.1</b>	<b><i>Errores presentes en una IMU.....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.5.2</b>	<b><i>Análisis de los errores presentes en una IMU .....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Técnicas para el procesamiento de señales.....</b>	<b>18</b>
<b>2.6.1</b>	<b><i>Análisis comparativo entre técnicas de procesamiento de señales .....</i></b>	<b>20</b>
<b>2.7</b>	<b>Algoritmo del filtro de Kalman .....</b>	<b>20</b>
<b>2.8</b>	<b>Dispositivos orientados al procesamiento de señales .....</b>	<b>22</b>
<b>2.8.1</b>	<b><i>Análisis comparativo entre dispositivos orientados al procesamiento de señales ....</i></b>	<b>23</b>
<b>2.9</b>	<b>Sistema mecánico de robots móviles .....</b>	<b>23</b>
<b>2.9.1</b>	<b><i>Locomoción por ruedas .....</i></b>	<b>24</b>
<b>2.9.2</b>	<b><i>Análisis comparativo entre ruedas para locomoción .....</i></b>	<b>25</b>
<b>2.9.3</b>	<b><i>Actuadores para el desplazamiento de robots móviles.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.9.4</b>	<b><i>Análisis comparativo entre motores de corriente continua.....</i></b>	<b>27</b>
<b>2.10</b>	<b>Desplazamiento de un robot omnidireccional.....</b>	<b>27</b>
<b>2.11</b>	<b>Métodos de control para robots móviles.....</b>	<b>29</b>
<b>2.11.1</b>	<b><i>Análisis comparativo entre métodos de control para robots móviles .....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.12</b>	<b>Estudio de los movimientos de la mano .....</b>	<b>30</b>
<b>2.13</b>	<b>Tecnologías de comunicación inalámbrica.....</b>	<b>32</b>
<b>2.13.1</b>	<b><i>Análisis comparativo entre tecnologías de comunicación inalámbrica.....</i></b>	<b>33</b>
<b>2.14</b>	<b>Sistemas de alimentación .....</b>	<b>34</b>
<b>2.14.1</b>	<b><i>Análisis comparativo entre tipos de batería .....</i></b>	<b>34</b>

## CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Requerimientos de los prototipos .....</b>	<b>36</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Requerimientos del prototipo de control remoto.....</i>	<i>36</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Requerimientos del prototipo de robot móvil .....</i>	<i>37</i>
<b>3.2</b>	<b>Concepción de la arquitectura de los prototipos.....</b>	<b>39</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Concepción de la arquitectura del prototipo de control remoto.....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Concepción de la arquitectura del prototipo de robot móvil .....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Descripción del método de control .....</i>	<i>40</i>
<b>3.3</b>	<b>Diseño de la arquitectura de los prototipos .....</b>	<b>41</b>
<i>3.3.1</i>	<i>Diseño de la arquitectura del control remoto .....</i>	<i>41</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Diseño de la arquitectura del robot móvil.....</i>	<i>43</i>
<b>3.4</b>	<b>Dispositivos <i>hardware</i> para el prototipo de control remoto .....</b>	<b>44</b>
<i>3.4.1</i>	<i>Xiao ESP32-S3.....</i>	<i>44</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Sensor inercial GY-521.....</i>	<i>45</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Pantalla OLED SSD-1306.....</i>	<i>46</i>
<i>3.4.4</i>	<i>Fuente de alimentación .....</i>	<i>47</i>
<b>3.5</b>	<b>Dispositivos <i>hardware</i> para el prototipo de robot móvil .....</b>	<b>48</b>
<i>3.5.1</i>	<i>Tarjeta de desarrollo NodeMCU-32.....</i>	<i>48</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Motor de caja reductora TT de doble eje .....</i>	<i>49</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Driver TB6612FNG.....</i>	<i>50</i>
<i>3.5.4</i>	<i>Convertidor DC-DC MPI1584EN.....</i>	<i>51</i>
<i>3.5.5</i>	<i>Fuente de alimentación .....</i>	<i>52</i>
<i>3.5.6</i>	<i>Modulo indicador de carga de batería SPBKAS-5.8 .....</i>	<i>53</i>
<i>3.5.7</i>	<i>Módulo cargador de baterías BMS 18650 .....</i>	<i>54</i>
<i>3.5.8</i>	<i>Ruedas omnidireccionales mecanum.....</i>	<i>55</i>
<b>3.6</b>	<b>Diagramas de conexiones electrónicas de los prototipos .....</b>	<b>55</b>
<i>3.6.1</i>	<i>Esquema de conexiones del prototipo de control remoto .....</i>	<i>56</i>

3.6.2	<i>Esquema de conexiones del prototipo de robot móvil.....</i>	58
3.7	<b>Software de desarrollo para los prototipos .....</b>	<b>60</b>
3.7.1	<i>Desarrollo del filtro de Kalman.....</i>	61
3.7.2	<i>Programación del prototipo de control remoto.....</i>	62
3.7.3	<i>Programación del prototipo de robot móvil .....</i>	66
3.8	<b>Interfaz de visualización de parámetros.....</b>	<b>70</b>
3.8.1	<i>Diseño de la interfaz de la aplicación móvil .....</i>	71
3.9	<b>Diseño de la estructura de los prototipos.....</b>	<b>71</b>
3.9.1	<i>Diseño de la estructura del prototipo de control remoto .....</i>	72
3.9.2	<i>Diseño de la estructura del prototipo de robot móvil.....</i>	73

## **CAPÍTULO IV**

4.	<b>VALIDACIÓN DE LOS PROTOTIPOS .....</b>	<b>77</b>
4.1	<b>Consideraciones generales .....</b>	<b>77</b>
4.2	<b>Validación del sensor inercial GY-521.....</b>	<b>79</b>
4.3	<b>Validación de velocidad del prototipo de robot móvil.....</b>	<b>84</b>
4.4	<b>Validación del tiempo de latencia entre los prototipos.....</b>	<b>89</b>
4.5	<b>Validación de descarga de las baterías de los prototipos .....</b>	<b>94</b>
4.5.1	<i>Descarga de batería del prototipo de control remoto.....</i>	95
4.5.2	<i>Descarga de batería del prototipo de robot móvil .....</i>	96
4.6	<b>Validación de carga de las baterías de los prototipos.....</b>	<b>98</b>
4.6.1	<i>Carga de batería del prototipo de control remoto .....</i>	98
4.6.2	<i>Carga de batería del prototipo de robot móvil.....</i>	99
4.7	<b>Prueba de funcionamiento y usabilidad .....</b>	<b>100</b>
4.8	<b>Análisis económico de los prototipos desarrollados.....</b>	<b>103</b>

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Características más relevantes de los tipos de sistemas de desplazamiento .....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Características más relevantes de los distintos tipos de giroscopio.....	12
<b>Tabla 2-3:</b> Características más relevantes de los distintos tipos de acelerómetros .....	13
<b>Tabla 2-4:</b> Errores que presentan los sensores inerciales contenidos en una IMU .....	18
<b>Tabla 2-5:</b> Características más relevantes de las técnicas de procesamiento de señales.....	20
<b>Tabla 2-6:</b> Características más relevantes de dispositivos orientados al procesamiento de señales .....	23
<b>Tabla 2-7:</b> Características más relevantes de los diferentes tipos de rueda .....	25
<b>Tabla 2-8:</b> Características más relevantes de motores de corriente continua.....	27
<b>Tabla 2-9:</b> Características más relevantes de los métodos de control para robots móviles.....	30
<b>Tabla 2-10:</b> Características más relevantes de tecnologías de comunicación inalámbrica .....	33
<b>Tabla 2-11:</b> Características más relevantes de los tipos de batería .....	35
<b>Tabla 3-1:</b> Especificaciones técnicas de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3 .....	44
<b>Tabla 3-2:</b> Especificaciones técnicas del sensor inercial GY-521 .....	45
<b>Tabla 3-3:</b> Especificaciones técnicas de la pantalla OLED SSD-1306.....	46
<b>Tabla 3-4:</b> Consumo teórico de corriente del prototipo de control remoto .....	47
<b>Tabla 3-5:</b> Especificaciones técnicas de la batería LiPo <i>Turnigy</i> 1s.....	48
<b>Tabla 3-6:</b> Especificaciones técnicas de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32 .....	49
<b>Tabla 3-7:</b> Especificaciones técnicas del motor reductor TT de doble eje.....	50
<b>Tabla 3-8:</b> Especificaciones técnicas del <i>driver</i> TB6612FNG.....	51
<b>Tabla 3-9:</b> Especificaciones técnicas del convertidor DC–DC MP1584EN.....	52
<b>Tabla 3-10:</b> Consumo de corriente del prototipo de robot móvil.....	52
<b>Tabla 3-11:</b> Especificaciones técnicas de la batería LiPo <i>Turnigy</i> 2s.....	53
<b>Tabla 3-12:</b> Especificaciones técnicas del modulo indicador SPBKAS-5.8 .....	54
<b>Tabla 3-13:</b> Especificaciones técnicas del módulo cargador de baterías BMS-18650.....	54
<b>Tabla 3-14:</b> Especificaciones importantes de las ruedas <i>mecanum</i> de 60 mm.....	55
<b>Tabla 3-15:</b> Dimensiones principales de la estructura del prototipo de control remoto.....	72
<b>Tabla 3-16:</b> Dimensiones principales de la estructura del panel de metal del robot móvil.....	73
<b>Tabla 3-17:</b> Dimensiones principales de la estructura de la base del robot móvil .....	74
<b>Tabla 3-18:</b> Dimensiones principales de la estructura de la cubierta del robot móvil .....	75
<b>Tabla 4-1:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $x$ positivo .....	80
<b>Tabla 4-2:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $x$ positivo .....	80
<b>Tabla 4-3:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $x$ negativo .....	81

<b>Tabla 4-4:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $x$ negativo .....	81
<b>Tabla 4-5:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $y$ positivo .....	81
<b>Tabla 4-6:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $y$ positivo .....	82
<b>Tabla 4-7:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $y$ negativo .....	82
<b>Tabla 4-8:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $y$ negativo .....	82
<b>Tabla 4-9:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $z$ positivo.....	83
<b>Tabla 4-10:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $z$ positivo .....	83
<b>Tabla 4-11:</b> Toma de muestras de ángulos sobre el eje $z$ negativo.....	83
<b>Tabla 4-12:</b> Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje $z$ negativo .....	84
<b>Tabla 4-13:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $x$ positivo .....	85
<b>Tabla 4-14:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $x$ positivo.....	86
<b>Tabla 4-15:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $x$ negativo .....	86
<b>Tabla 4-16:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $x$ negativo .....	86
<b>Tabla 4-17:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $y$ positivo .....	87
<b>Tabla 4-18:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $y$ positivo.....	87
<b>Tabla 4-19:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $y$ negativo .....	87
<b>Tabla 4-20:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $y$ negativo .....	88
<b>Tabla 4-21:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $z$ positivo.....	88
<b>Tabla 4-22:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $z$ positivo .....	88
<b>Tabla 4-23:</b> Toma de muestras de velocidad sobre el eje $z$ negativo.....	89
<b>Tabla 4-24:</b> Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje $z$ negativo .....	89
<b>Tabla 4-25:</b> Toma de muestras de latencia entre los prototipos de control remoto y robot móvil .....	90
<b>Tabla 4-26:</b> Toma de muestras de latencia a 1 m.....	91
<b>Tabla 4-27:</b> Pruebas de normalidad de latencia a 1 m .....	91
<b>Tabla 4-28:</b> Prueba para una muestra de latencia a 1 m.....	91
<b>Tabla 4-29:</b> Toma de muestras de latencia a 12 m.....	91
<b>Tabla 4-30:</b> Pruebas de normalidad de latencia a 12 m .....	92
<b>Tabla 4-31:</b> Prueba para una muestra de latencia a 12 m.....	92
<b>Tabla 4-32:</b> Toma de muestras de latencia a 28 m.....	92
<b>Tabla 4-33:</b> Pruebas de normalidad de latencia a 28 m .....	93
<b>Tabla 4-34:</b> Prueba para una muestra de latencia a 28 m.....	93
<b>Tabla 4-35:</b> Toma de muestras de latencia a 44 m.....	93
<b>Tabla 4-36:</b> Pruebas de normalidad de latencia a 44 m .....	94
<b>Tabla 4-37:</b> Prueba para una muestra de latencia a 44 m.....	94
<b>Tabla 4-38:</b> Toma de muestras de descarga para la batería del prototipo de control remoto.....	96

<b>Tabla 4-39:</b> Pruebas de normalidad de descarga para la batería del prototipo de control remoto .....	96
<b>Tabla 4-40:</b> Toma de muestras de descarga para la batería del prototipo de robot móvil.....	97
<b>Tabla 4-41:</b> Pruebas de normalidad de descarga para la batería del prototipo de robot móvil ..	97
<b>Tabla 4-42:</b> Toma de muestras de carga para la batería del prototipo de control remoto .....	99
<b>Tabla 4-43:</b> Pruebas de normalidad de carga para la batería del prototipo de control remoto...	99
<b>Tabla 4-44:</b> Toma de muestras de carga para la batería del prototipo de control remoto .....	99
<b>Tabla 4-45:</b> Pruebas de normalidad de carga para la batería del prototipo de robot móvil.....	100
<b>Tabla 4-46:</b> Análisis económico para el diseño y fabricación de los prototipos.....	103
<b>Tabla 4-47:</b> Comparativa entre los dispositivos desarrollados y el juguete comercial .....	104

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Sistemas de desplazamiento: a) con <i>joystick</i> , b) con sensores de proximidad, c) con sensores inerciales .....	9
<b>Ilustración 2-2:</b> Giroscopio: a) mecánico, b) óptico, c) MEMS .....	11
<b>Ilustración 2-3:</b> Acelerómetro: a) mecánico, b) capacitivo, c) piezoeléctrico, d) MEMS .....	12
<b>Ilustración 2-4:</b> Unidad de medida inercial completa.....	14
<b>Ilustración 2-5:</b> Ángulos de giro de una IMU .....	14
<b>Ilustración 2-6:</b> Recursividad en el filtro de Kalman .....	19
<b>Ilustración 2-7:</b> Locomoción: a) diferencial, b) convencional, c) omnidireccional, d) oruga ...	24
<b>Ilustración 2-8:</b> Motor: a) reductor, b) paso a paso, c) servomotor, d) <i>brushless</i> .....	26
<b>Ilustración 2-9:</b> Disposición de las ruedas de un robot omnidireccional.....	28
<b>Ilustración 2-10:</b> Movimientos de un robot omnidireccional: a) adelante, b) atrás, c) derecha, d) izquierda, e) mismo eje derecho, f) mismo eje izquierdo .....	28
<b>Ilustración 2-11:</b> Movimientos de la mano: a) extensión, b) flexión, c) pronación, d) supinación, e) desviación radial, f) desviación cubital.....	31
<b>Ilustración 3-1:</b> Concepción de la arquitectura del prototipo de control remoto.....	39
<b>Ilustración 3-2:</b> Concepción de la arquitectura del prototipo de robot móvil.....	40
<b>Ilustración 3-3:</b> Descripción del método de control de los prototipos.....	41
<b>Ilustración 3-4:</b> Diagrama de bloques del prototipo de control remoto.....	42
<b>Ilustración 3-5:</b> Diagrama de bloques del prototipo de robot móvil.....	43
<b>Ilustración 3-6:</b> Tarjeta Xiao ESP32-S3 .....	44
<b>Ilustración 3-7:</b> Sensor inercial GY-521 .....	45
<b>Ilustración 3-8:</b> Pantalla SSD-1306.....	46
<b>Ilustración 3-9:</b> Batería LiPo Turnigy 1s.....	48
<b>Ilustración 3-10:</b> Tarjeta NodeMCU-32 .....	49
<b>Ilustración 3-11:</b> Motor TT de doble eje .....	50
<b>Ilustración 3-12:</b> <i>Driver</i> TB6612FNG.....	51
<b>Ilustración 3-13:</b> Convertidor MP1584EN .....	51
<b>Ilustración 3-14:</b> Batería LiPo Turnigy 2s.....	53
<b>Ilustración 3-15:</b> Módulo SPBKAS-5.8 .....	53
<b>Ilustración 3-16:</b> Módulo BMS-18650 .....	54
<b>Ilustración 3-17:</b> Ruedas <i>mecanum</i> .....	55
<b>Ilustración 3-18:</b> Diagrama de conexiones electrónicas del prototipo de control remoto .....	56
<b>Ilustración 3-19:</b> Diseño PCB del control remoto .....	57

<b>Ilustración 3-20:</b> PCB del control remoto: a) Fabricación, b) Implementación .....	57
<b>Ilustración 3-21:</b> Diagrama de conexiones electrónicas del prototipo de robot móvil .....	58
<b>Ilustración 3-22:</b> Diseño PCB del robot móvil .....	60
<b>Ilustración 3-23:</b> PCB del robot móvil: a) Fabricación, b) Implementación .....	60
<b>Ilustración 3-24:</b> Diagrama de flujo de la inicialización y función principal de la tarjeta Xiao ESP32-S3 .....	64
<b>Ilustración 3-25:</b> Diagrama de flujo de la función de repetición de la tarjeta Xiao ESP32-S3 ..	65
<b>Ilustración 3-26:</b> Diagrama de flujo de la inicialización y función principal de la tarjeta NodeMCU-32.....	67
<b>Ilustración 3-27:</b> Diagrama de flujo de la función de repetición de la tarjeta NodeMCU-32 ...	70
<b>Ilustración 3-28:</b> Diseño de la aplicación móvil.....	71
<b>Ilustración 3-29:</b> Diseño estructural del control remoto.....	72
<b>Ilustración 3-30:</b> Vistas del control remoto: a) superior, b) derecha, c) izquierda, d) isométrica .....	72
<b>Ilustración 3-31:</b> Estructura fabricada del control remoto.....	73
<b>Ilustración 3-32:</b> Diseño del panel de metal.....	74
<b>Ilustración 3-33:</b> Diseño de la base del robot móvil.....	74
<b>Ilustración 3-34:</b> Diseño de la cubierta del robot móvil .....	75
<b>Ilustración 3-35:</b> Vistas del robot móvil: a) superior, b) derecha, c) izquierda, d) isométrica ..	75
<b>Ilustración 3-36:</b> Estructuras ensambladas del robot móvil .....	76
<b>Ilustración 4-1:</b> Prototipos implementados.....	77
<b>Ilustración 4-2:</b> Interfaz de la aplicación móvil “Medición” .....	79
<b>Ilustración 4-3:</b> Toma de muestras angulares.....	79
<b>Ilustración 4-4:</b> Tacómetro Extech RPM 10.....	84
<b>Ilustración 4-5:</b> Toma de muestras de velocidad.....	85
<b>Ilustración 4-6:</b> Multímetro HT116.....	95
<b>Ilustración 4-7:</b> Medición de voltaje en la batería: a) control remoto, b) robot móvil .....	95
<b>Ilustración 4-8:</b> Carga de la batería de los prototipos: a) control remoto, b) robot móvil .....	98
<b>Ilustración 4-9:</b> Encendido del prototipo de: a) control remoto, b) robot móvil .....	101
<b>Ilustración 4-10:</b> Conexión exitosa entre los prototipos.....	101
<b>Ilustración 4-11:</b> a) Opción de conectividad, b) Selección del dispositivo accesible.....	102
<b>Ilustración 4-12:</b> Control remoto: a) medidas angulares, b) velocidad del robot .....	102
<b>Ilustración 4-13:</b> Robot móvil: a) medidas angulares, b) velocidad.....	102
<b>Ilustración 4-14:</b> Movimiento del robot hacia atrás .....	103

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Hoja de datos de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3
- Anexo B:** Hoja de datos del sensor GY-521
- Anexo C:** Hoja de datos de la pantalla OLED SSD-1306
- Anexo D:** Hoja de datos de la batería LiPo Turnigy 1s
- Anexo E:** Hoja de datos de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32
- Anexo F:** Hoja de datos del motor TT de doble eje
- Anexo G:** Hoja de datos del *driver* TB6612FNG
- Anexo H:** Hoja de datos del convertidor DC-DC MP1584EN
- Anexo I:** Hoja de datos de la batería LiPo
- Anexo J:** Hoja de datos del módulo indicador de carga SPBKAS 5.8
- Anexo K:** Hoja de datos del módulo BMS 18650
- Anexo L:** Código desarrollado en Arduino IDE 2.0.3 para la tarjeta XIAO ESP32-S3
- Anexo M:** Código desarrollado en Arduino IDE 2.0.3 para la tarjeta NodeMCU-32
- Anexo N:** Programación de la aplicación móvil en MIT App Inventor
- Anexo O:** Plano de la estructura del prototipo de control remoto
- Anexo P:** Plano de la estructura del panel de metal del prototipo de robot móvil
- Anexo Q:** Plano de la estructura de la base del prototipo de robot móvil
- Anexo R:** Plano de la estructura de la base del prototipo de robot móvil
- Anexo S:** Pruebas de medición de ángulos del sensor GY-521
- Anexo T:** Hoja de datos del equipo patrón tacómetro
- Anexo U:** Pruebas de medición de velocidad con el sensor GY-521 y con el equipo patrón
- Anexo V:** Pruebas de latencia
- Anexo W:** Especificaciones técnicas del multímetro HABOTEST HT 116
- Anexo X:** Pruebas de descarga de los prototipos de control remoto y robot móvil
- Anexo Y:** Pruebas de carga de los prototipos de control remoto y robot móvil

## RESUMEN

Las señales provenientes de sensores inerciales se ven afectadas por perturbaciones externas y por las características de construcción de estos dispositivos. Cuando se transmiten estas señales sin procesar, se pierde una gran cantidad de información durante la transmisión, generando problemas al momento de realizar mediciones con estos sensores, por lo tanto, el estudio titulado “Desarrollo de un sistema de desplazamiento con base en sensores inerciales para el control de un dispositivo móvil” se enfocó en la creación de un sistema de desplazamiento bidimensional utilizando sensores inerciales, algoritmos de procesamiento de señales y microcontroladores para controlar un dispositivo móvil en un plano cartesiano. El trabajo comenzó con la investigación del fundamento teórico de los sensores inerciales junto con los algoritmos necesarios para procesar las señales que generan, luego, se realizó un estudio acerca de los dispositivos móviles y sus principales características. Posteriormente, se llevó a cabo la construcción del *hardware* necesario para realizar el seguimiento de trayectoria del sensor. Mediante el uso de algoritmos de procesamiento de señales se lograron obtener señales adecuadas para el control del dispositivo móvil, donde, se validaron las medidas angulares del sistema de desplazamiento obteniendo un error de seguimiento de trayectorias menor al 5%. En este contexto, este estudio logró el desarrollo exitoso de un sistema de desplazamiento basado en sensores inerciales para el control preciso de un dispositivo móvil en un plano cartesiano.

**Palabras clave:** <UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL (IMU)>, <GIROSCOPIO>, <ACELERÓMETRO>, <SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO>, <NAVEGACIÓN INERCIAL>, <DISPOSITIVO MÓVIL>, <SENSORES INERCIALES>, <PROCESAMIENTO DE SEÑALES>.



## SUMMARY

Signals from inertial sensors are affected by external disturbances and by the construction characteristics of these devices. When these unprocessed signals are transmitted, a large amount of information is lost during transmission, generating problems when making measurements with these sensors, therefore, the study titled "Development of a displacement system based on inertial sensors for the control of a mobile device" focused on the creation of a two-dimensional displacement system using inertial sensors, signal processing algorithms and microcontrollers to control a mobile device in a Cartesian plane. The work began with the investigation of the theoretical foundation of inertial sensors along with the algorithms necessary to process the signals they generate, then a study was carried out about mobile devices and their main characteristics. Subsequently, the construction of the necessary hardware to track the sensor's trajectory was carried out. By using signal processing algorithms, it was possible to obtain adequate signals for the control of the mobile device, where the angular measurements of the displacement system were validated, obtaining a trajectory tracking error of less than 5%. In this context, this study achieved the successful development of a displacement system based on inertial sensors for the precise control of a mobile device in a Cartesian plane.

**Keywords:** <INERTIAL MEASUREMENT UNIT (IMU)>, <GYROSCOPE>  
<ACCELEROMETER>, <DISPLACEMENT SYSTEMS>, <INERTIAL NAVIGATION>  
<MOBILE DEVICE>, <INERTIAL SENSORS>, <SIGNAL PROCESSING>



Lic. Nelly Padilla P. Mgs

0603818717

**DOCENTE FIE**

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sistemas inerciales han emergido como componentes fundamentales en una amplia variedad de aplicaciones, abarcando desde la navegación hasta la medicina y más allá. Estos sistemas se encargan de medir y rastrear movimientos y posiciones, proporcionando datos cruciales para el análisis y comprensión de las actividades humanas y los eventos físicos en general. Sin embargo, la verdadera utilidad de estos sistemas va más allá de la simple captura de datos; radica en la habilidad de procesar estas señales con precisión y eficiencia (Sánchez, 2019).

El procesamiento de señales se ha convertido en un pilar central en esta área, desempeñando un papel crucial en la interpretación de la información recopilada por los sistemas inerciales. Este procesamiento no solo implica el refinamiento y la mejora de las señales capturadas, sino que también define la utilidad y aplicabilidad de los datos resultantes. Desde el seguimiento y la rehabilitación médica hasta la optimización ergonómica en entornos industriales, el procesamiento de señales desempeña un papel fundamental en diversas disciplinas (Rivera, 2020).

La importancia de filtrar adecuadamente las señales no puede ser subestimada. En un mundo inundado de ruido y distracciones, la habilidad de aislar y extraer la información relevante es esencial para tomar decisiones informadas y llevar a cabo análisis precisos. Los filtros aplicados a las señales inerciales no solo mejoran la calidad de los datos, sino que también permiten una interpretación más fidedigna y significativa (Páramo, 2019).

No obstante, los desafíos asociados con el procesamiento y filtrado de señales no pueden ser ignorados. Una interpretación incorrecta, un filtrado inadecuado o la pérdida de información vital pueden tener consecuencias significativas. Los datos mal procesados pueden llevar a la toma de decisiones equivocadas, a diagnósticos erróneos o a una comprensión incompleta de la situación en cuestión. En un contexto donde la transmisión de datos es esencial para la eficacia y seguridad, cualquier fallo en el procesamiento de señales puede resultar en una pérdida crítica de información (Mulet, 2017).

Los beneficios de implementar un procesamiento de señales efectivo son amplios y tangibles. En primer lugar, se logra una mayor precisión en la toma de decisiones y el análisis de datos. Esto, a su vez, puede conducir a una reducción de costos al minimizar errores y fallos. Además, en campos como la medicina, el procesamiento adecuado de señales puede salvar vidas al

proporcionar diagnósticos más precisos y tempranos. En la industria, la optimización y el control mejorado de procesos conducen a un aumento de la eficiencia y la rentabilidad (Pozo, 2010).

En el contexto de este trabajo de integración curricular, se emprenderá una exploración profunda sobre la relevancia de los sistemas inerciales y su vital procesamiento de señales. Para llevar a cabo este análisis, se emplearán enfoques teóricos destinados a investigar las condiciones fundamentales del dispositivo, así como la selección precisa del *hardware* necesario. La ejecución del prototipo se basó en enfoques empíricos, los cuales se abarcaron pruebas exhaustivas del dispositivo. Por último, se llevará a cabo la validación del prototipo, asegurando su conformidad con los requisitos predefinidos. Por consiguiente, en el presente documento está estructurado de una introducción, cinco capítulos, conclusiones y recomendaciones.

En referencia al primer capítulo titulado diagnóstico del problema, se presentan múltiples puntos esenciales que establecen la base para abordar el tema propuesto. Entre estos elementos se encuentran los antecedentes, planteamiento del problema, la justificación teórica, justificación aplicativa y los objetivos generales y específicos. En el segundo capítulo, denominado marco teórico, se realiza un examen exhaustivo de la literatura que aborda las etapas y factores relacionados con el procesamiento de señales, variedades de dispositivos procesar señales , sus beneficios asociados, tecnologías relevantes y otros componentes clave. Esto se lleva a cabo con el objetivo de seleccionar la tecnología adecuada para la creación del prototipo y brindar al lector un entendimiento más profundo de los conceptos relacionados con el tema. El tercer capítulo, titulado marco metodológico, abarca aspectos esenciales vinculados al desarrollo físico del prototipo. Esto incluye la definición de los requisitos, la concepción y diseño de la arquitectura, la selección tanto del *hardware* como del *software*, y la gestión y visualización de la información. El cuarto capítulo se enfoca en la propuesta y diseño del prototipo. Finalmente, el quinto capítulo se dedica a la validación del prototipo, en el cual se detallan las pruebas llevadas a cabo para comprobar el funcionamiento adecuado del prototipo desarrollado.

# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se analiza el problema referente al procesamiento de señales, la justificación teórica y aplicativa, y los objetivos: general y específicos del presente trabajo de integración curricular.

### 1.1 Planteamiento del problema

Se ha realizado una revisión bibliográfica de investigaciones acerca del procesamiento de señales de sensores inerciales y algunas de sus aplicaciones. Dentro de las investigaciones más importantes destacan las que se presentan a continuación.

#### 1.1.1 Antecedentes

**Mundial.** – En Indonesia se creó un prototipo capaz de estabilizar la calidad de imagen y video de un *smartphone*, el objetivo de este trabajo fue el diseño y desarrollo de un dispositivo que ayude a los amantes de la fotografía a tener resultados precisos en sus fotos. El prototipo funciona como un cardán, con ayuda de servomotores, un microcontrolador y sensores inerciales que proporcionan la estabilización de la posición de una cámara en tres ejes coordenados x, y, z; y así, mantener el ángulo de la cámara del *smartphone* en una dirección determinada. Los resultados obtenidos fueron aceptables, debido a que el sensor fue capaz de detectar correctamente la inclinación en todos los ejes y los servomotores realizaron el movimiento angular en línea con un *set point*, donde en conjunto, estabilizaron el *smartphone* con una tasa de error máximo de  $2,31^\circ$  en la lectura del ángulo de balanceo (Rafiq et al., 2020).

**Regional.** – Llevar a cabo actividades físicas como: correr, saltar, caminar o jugar, requieren que las personas se encuentren en óptimas condiciones físicas sin evidenciar algún malestar en su salud. Lastimosamente, este tipo de actividades no pueden ser realizadas por personas mayores o con discapacidad motriz. Estas molestias, generalmente son causadas por problemas en la columna vertebral, lo que lleva a la reducción de la capacidad del balance corporal. Por esta razón, en Perú, se construyó un sistema electrónico capaz de medir en tiempo real, el ángulo de movimiento del tronco cuando la persona realiza movimientos laterales y a su vez, son mostrados en un panel donde se lleva a cabo una prueba de evaluación. Este sistema se basa en el uso de sensores inerciales, donde la señal es adquirida y procesada mediante un microcontrolador. Para

el procesamiento de la señal se realizó una comparación del filtro complementario y el filtro de Kalman, donde, los tiempos al final del desarrollo fueron de aproximadamente 30,2 ms con el filtro complementario y aproximadamente 25,2 ms con el filtro de Kalman. Se concluyó que en ambos casos el sistema responde de forma óptima, aunque no es precisamente el enfoque en el que estamos centrados (Luna, 2019).

**Local.** – En la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador ubicada en la ciudad de Quito, se desarrolló un dispositivo capaz de medir ángulos de inclinación a través del uso de sensores inerciales y, en conjunto con la implementación del filtro de Kalman, proporciona una medida de la actitud tanto en el ángulo de cabeceo como en el ángulo de alabeo. Para el procesamiento del filtro de Kalman, se utilizó un microcontrolador que fue el encargado de generar señales cuadradas para el control de tres servomotores, los cuales emulan los movimientos realizados por un mando de control, donde, se localizan los sensores inerciales. Para la visualización de medidas angulares, se montó un LCD en el mando de control para la visualización de varias opciones que ayudan a tener una mejor comprensión de los sensores utilizados, así como también de la operación del algoritmo del filtro de Kalman (Pozo, 2010).

En la ciudad de Riobamba, se diseñó e implementó un dispositivo para el control de tarificación de taxis con la ayuda de sensores inerciales y un microcontrolador, esto con la finalidad de reemplazar a los taxímetros. Muchos de estos taxímetros son propensos a tener alguna alteración de los datos que se obtienen por parte del conductor o algún daño del dispositivo, sobre tarifando el valor de la carrera y provocando inconformidad en los usuarios de este servicio. El prototipo se desarrolló en cinco etapas: selección de dispositivos *hardware*, calibración de sensores inerciales, desarrollo de *software*, diseño de la estructura y pruebas de funcionalidad. La autora establece que, para tener un error mínimo de funcionamiento del prototipo, el automóvil no debe exceder los 50 km/h (Redrobán, 2018).

### **1.1.2 Formulación de problema**

A partir de las investigaciones realizadas referente al uso de sensores inerciales en aplicaciones de procesamiento de las señales generadas por los mismos, se plantea la siguiente pregunta:

¿Existe un procesamiento óptimo de las señales que genera una IMU y que a su vez permita un control de desplazamiento lineal adecuado de un dispositivo móvil en un plano cartesiano?

### **1.1.3 Sistematización del problema**

¿Cómo se va a determinar el fundamento teórico acerca del funcionamiento de sensores inerciales y de algoritmos que permitan el procesamiento de señales generadas por estos sensores?

¿Cómo se va a desarrollar e implementar los algoritmos en un microcontrolador, que permitan determinar la posición, la velocidad y la orientación real del sensor en un marco de referencia?

¿Cómo se puede determinar el estado del utilizando filtros de estimación y encontrar la solución óptima o k-óptimas al problema de detección y seguimiento de trayectoria?

¿Cómo se va a implementar el *hardware* que permita el seguimiento de la trayectoria del sensor utilizando actuadores de desplazamiento lineal?

¿Cómo se va a desarrollar el protocolo de pruebas que permita validar la medición de posición, velocidad y orientación del sensor inercial y así validar que el error de seguimiento de trayectoria sea menor al 5%?

## **1.2 Justificación**

### **1.2.1 Justificación teórica**

La industria de los sensores inerciales ha tenido un crecimiento importante en los últimos años debido principalmente al nivel de miniaturización al que se está llegando (Pozo et al., 2014). Estos sensores se encuentran presentes en varios dispositivos a nuestro alrededor como los celulares y sistemas de entretenimiento como videojuegos. Por otra parte, también están presentes en los sistemas de navegación inercial que son sistemas de gran utilidad en diferentes aplicaciones, sin embargo, varias de estas aplicaciones se han visto limitadas debido a la presencia de fuentes de ruido en las señales generadas por los sensores inerciales del sistema, lo que ocasiona que los valores medidos sean erróneos (Mulet, 2017).

Las señales generadas por los sensores inerciales presentan una serie de errores en sus mediciones debido a su naturaleza de construcción, debido a que, mientras la miniaturización de los sensores va en incremento, su desempeño disminuye. De manera general, el error de una IMU en la estimación del sesgo del acelerómetro provoca un crecimiento del error que es proporcional al cuadrado del tiempo de operación, y el sesgo en el giroscopio conduce al crecimiento del error

proporcional al cubo del tiempo de operación. Por esta razón, se utilizan distintos métodos, así como algoritmos para reducir los errores en las mediciones, como, por ejemplo, cuando se usa un sensor inercial con un odómetro, el error de posición se vuelve proporcional al cuadrado del tiempo, sin embargo, uno de los métodos más usados para corregir los errores de desviación en el tiempo de operación es a través de filtros de estimación (Pozo et al., 2014).

Los filtros de estimación, se utilizan para reducir errores en la medición de los sensores inerciales, pero, en ocasiones la aplicación de estos filtros resulta compleja debido a la utilización de métodos adicionales a la aplicación del filtro como tal, provocando que los algoritmos para el filtrado de las señales resulten matemáticamente difíciles de implementar y comprender (Qasem et al., 2008).

Tomando en cuenta que un sensor inercial genera mediciones erróneas debido a su naturaleza de construcción y, considerando que no se realiza un procesamiento adecuado de las señales provenientes del mismo, como resultado se obtienen señales que siguen presentando errores en las mediciones y estas señales no son adecuadas para una correcta aplicación.

Por ende, se propone un sistema que sea capaz de reducir el error de medición de un sensor inercial mediante un procesamiento de señales, tomando como base los datos iniciales de la medición del sensor. En el procesamiento, se debe aplicar un filtro a una combinación de las medidas del acelerómetro y el giroscopio del sensor para obtener una única medida angular del sensor sobre cualquiera de sus tres ejes coordenados, donde, se deben reducir notablemente las perturbaciones generadas inicialmente. La señal filtrada, se transmite a través de comunicación inalámbrica para lograr el desplazamiento de un elemento móvil en un plano cartesiano, tomando como referencia los tres ejes coordenados de operación del sensor inercial.

### ***1.2.2 Justificación aplicativa***

Para la realización de este sistema, se va a hacer uso de sensores inerciales, una tarjeta de desarrollo con capacidad de comunicación inalámbrica y entornos de programación que sean compatibles con los dispositivos a utilizar.

Mediante el sensor inercial, se mide la aceleración traslacional y la velocidad de rotación sobre los ejes coordenados del sensor. Debido a que la operación del sensor inercial es dentro de un plano cartesiano de tres dimensiones, se obtienen tres señales distintas. Con estas señales, se realiza el procesamiento o filtrado de las mismas para reducir notablemente las perturbaciones de las señales iniciales. Posteriormente, se programa el algoritmo del procesamiento de las señales

sobre una tarjeta de desarrollo que almacena tanto los datos de las señales iniciales como los datos de las señales procesadas. Con las señales procesadas se envía la información hacia el elemento móvil mediante comunicación inalámbrica para lograr su desplazamiento en base a las medidas angulares generadas.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Desarrollar un sistema de desplazamiento en dos dimensiones utilizando sensores inerciales, algoritmos de procesamiento de señales y microcontroladores para el desplazamiento lineal de un dispositivo móvil en un plano cartesiano.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Determinar el fundamento teórico sobre el cual se sustenta el funcionamiento de los sensores inerciales y los algoritmos que permiten el procesamiento de señales generadas por estos sensores.
- Desarrollar e implementar en un microcontrolador algoritmos que permitan determinar la posición, la velocidad y la orientación real del sensor en un marco de referencia.
- Determinar el estado del sensor utilizando filtros de estimación para encontrar la solución óptima o k-óptimas al problema de detección y seguimiento de trayectoria.
- Implementar el *hardware* que permita el seguimiento de la trayectoria del sensor utilizando actuadores de desplazamiento lineal.
- Desarrollar un protocolo de pruebas que permita validar la medición de posición, velocidad y orientación y así, validar que el error de seguimiento de trayectoria sea menor al 5%.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

El presente estudio se centra en el procesamiento de datos obtenidos a partir de unidades de medida inercial partiendo de un análisis de sus elementos, la obtención de medidas angulares a partir de estos y los errores que conlleva realizar estas mediciones. Lo que se busca es reducir los errores de medida mediante la implementación de una técnica de procesamiento o filtrado, la cual se analiza para comprender su fundamento matemático. Con los datos obtenidos, se busca implementar un sistema de desplazamiento que permita el movimiento de un dispositivo móvil dentro de un plano cartesiano.

#### 2.1 Importancia del procesamiento de señales

Las señales provenientes de distintas fuentes físicas por lo general son adquiridas en forma de datos a través de dispositivos y sensores especializados, sin embargo, los datos entregados están sujetos a factores que conllevan la toma de muestras erróneas (Muñoz et al., 2018). Estos datos deben ser una fuente importante de información para su posterior análisis, de este modo, se consigue extraer un determinado número de características con base a diferentes mediciones, teniendo en cuenta que a medida que la cantidad de datos aumenta, el tiempo de procesamiento también se incrementa (Carrera y Rodríguez, 2016).

Procesar señales provenientes de sensores no es un tema nuevo, sin embargo, los avances tecnológicos en capacidad de cómputo, conectividad, portabilidad y procesamiento de datos de manera rápida, permiten la implementación de soluciones antes inimaginables. El procesamiento de señales es la aplicación de una serie de operaciones lógicas y matemáticas a un conjunto de datos adquiridos que proporcionan una medida analógica o digital (Rebollar et al., 2019).

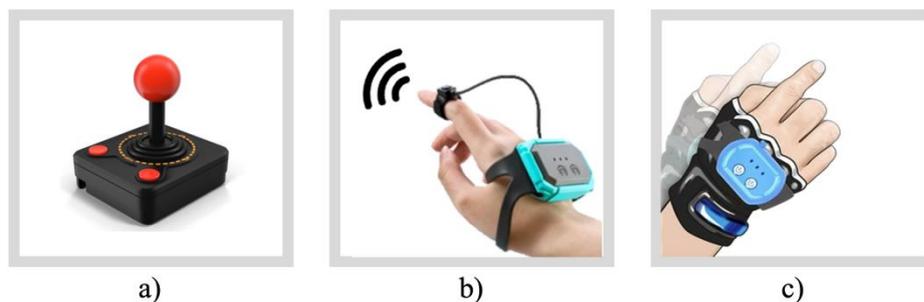
Para que las mediciones de los sensores presenten los resultados deseados, la señal emitida debe ser leída, procesada e interpretada, por lo que es necesario conocer el tipo de señal que se está transmitiendo, los problemas que presentan y otros factores importantes al momento de procesar señales. Es importante simular y visualizar el recorrido de una señal a lo largo de su transmisión, desde que se emite hasta que llega a su destino y cumple con su función de transportar información (Noboa, 2022). Según la funcionalidad de una determinada aplicación, el procesamiento de señales es distinto. Con los datos recibidos por un sensor se obtiene información importante y para procesarlos se utilizan diferentes métodos y herramientas (Páez, 2022).

El procesamiento de señales es necesario para corregir posibles deficiencias en los datos debido a errores que presentan los sensores al momento de realizar una medición (Garza, 2022). En su estudio, (Rivera 2020) indica que en el campo del procesamiento de señales, es frecuente utilizar estructuras de filtro que pueden modelar y analizar una señal con base a sus características. Estos filtros tienen la capacidad de cambiar su respuesta automáticamente para mejorar su desempeño, se basan en algoritmos recursivos que permiten que el filtro se desempeñe de forma adecuada en ambientes donde no se conocen las características relevantes de la señal (Rivera, 2020).

Con base en el estudio realizado, es importante tener en cuenta que existen distintos factores externos que afectan la toma de datos provenientes de sensores que conllevan a mediciones erróneas. Para reducir estos efectos, se debe analizar la señal extraída y posteriormente proponer una solución mediante técnicas de filtrado que son muy utilizadas en la actualidad, para así, reducir los efectos externos que afectan a la señal.

## 2.2 Sistemas de desplazamiento

Se refieren a un conjunto organizado de componentes y tecnologías que permiten el movimiento controlado de un dispositivo móvil. Estos sistemas generalmente constan de sensores y algoritmos de control, siendo su objetivo principal, posibilitar el movimiento del dispositivo de forma precisa y efectiva, respondiendo a comandos o entradas por parte del usuario (Maestro, 2018). Existen diferentes tipos de sistemas de desplazamiento, como se observa en la *Ilustración 2-1*.



**Ilustración 2-1:** Sistemas de desplazamiento: a) con *joystick*, b) con sensores de proximidad, c) con sensores inerciales

**Fuente:** PixelSquid, 2023; AliExpress, 2023; TeeGGi, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Sistemas de desplazamiento con *joystick*.** – Integran un *joystick* para controlar y dirigir el movimiento del dispositivo móvil de forma manual, este elemento permite el control de velocidad del dispositivo móvil en dos ejes coordenados de manera precisa, además, su modo de control es sencillo e intuitivo (Magnabosco, 2012).

**Sistemas de desplazamiento con sensores de proximidad.** – Incorporan sensores ultrasónicos que permiten la medición de distancias en base a una variación física existente entre un punto de referencia y la superficie más cercana para detectar obstáculos en el entorno, de esta manera se facilita la navegación, evitando colisiones (Maestro, 2018).

**Sistemas de desplazamiento con sensores inerciales.** – Utilizan una combinación de sensores inerciales para la medición de cambios en la velocidad y orientación, donde, se obtiene información acerca de movimientos sobre tres ejes coordenados, permitiendo un control basado en movimientos físicos (Maestro, 2018).

### 2.2.1 Análisis comparativo entre sistemas de desplazamiento

En la *Tabla 2-1* se presentan las características más relevantes de los diferentes tipos de sistemas de desplazamiento para así, determinar el sistema más adecuado.

**Tabla 2-1:** Características más relevantes de los tipos de sistemas de desplazamiento

Sistema de desplazamiento	Con joystick	Con sensores de proximidad	Con sensores inerciales
<b>Interfaz de usuario</b>	Intuitiva para usuarios familiarizados	Requiere práctica del usuario	Sigue los movimientos naturales del usuario
<b>Precisión de control</b>	Buena, depende de la habilidad del usuario	Moderada, se ve afectada por obstáculos y condiciones ambientales	Alta, sigue con precisión los movimientos del usuario
<b>Inconvenientes</b>	Fatiga en sesiones de uso prolongadas	Requiere tiempo para la adaptabilidad del usuario	No aplica
<b>Efectividad de control</b>	80 %	75 %	95 %
<b>Costo de implementación</b>	Bajo	Medio	Medio – alto

Fuente: Maestro, 2018; Magnabosco, 2012; Albelo, 2016

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-1*, se considera el uso de un sistema de desplazamiento con sensores inerciales debido a su manejo intuitivo mediante movimientos naturales por parte del usuario, además de su precisión y efectividad al momento de controlar dispositivos móviles.

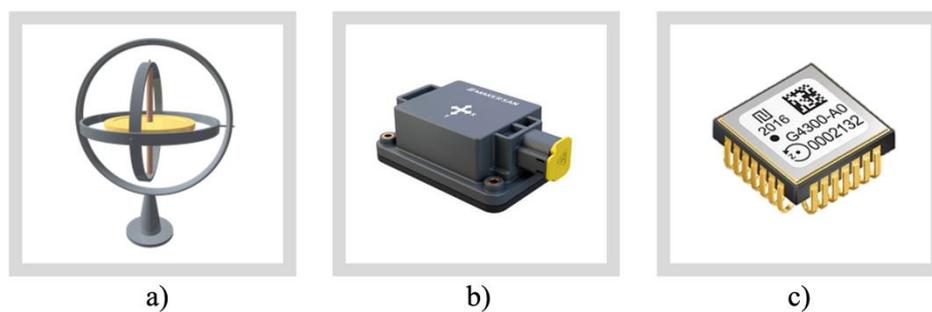
## 2.3 Sensores inerciales

Son dispositivos que miden la velocidad y aceleración de un objeto en movimiento en relación a un sistema de referencia inercial, el cual, es un sistema que no está sujeto a una fuerza externa. Estos dispositivos se basan en los principios de la física para medir los cambios en la orientación,

posición y velocidad de un objeto y, se utilizan principalmente en el estudio y análisis de movimiento de medidas obtenidas por giroscopios y acelerómetros (Iglesias, 2021).

### 2.3.1 Giroscopios

Son sensores inerciales que miden la velocidad angular de un objeto en movimiento con respecto a un sistema de referencia basándose en el principio del momento angular, que establece que un objeto en movimiento tiende a mantener su eje de rotación fijo en el espacio, a menos que se le aplique una fuerza para cambiar su orientación (Gómez, 2021). En la *Ilustración 2-2* se observan los diferentes tipos de giroscopio.



**Ilustración 2-2:** Giroscopio: a) mecánico, b) óptico, c) MEMS

**Fuente:** Gutiérrez, 2020; DiarioElectronico, 2023; DirectIndustry, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Giroscopios mecánicos (rotatorios).** – Su estructura contiene un disco giratorio situado sobre un eje libre, el cual, permite que el dispositivo tenga libertad de movimiento dentro de un sistema de referencia. Su funcionamiento se basa en la conservación del momento angular para la obtención de medidas angulares (González, 2016).

**Giroscopios ópticos.** – Se basan en el efecto Sagnac para la medición de la velocidad angular, donde, un haz de luz se divide en dos rayos que viajan en direcciones opuestas y se reflejan en espejos montados en un rotor giratorio, posteriormente, se unen en un detector. La interferencia entre los dos rayos de luz permite medir la velocidad angular del rotor (Gutiérrez, 2020).

**Giroscopios micromecánicos (MEMS).** – Constan de estructuras microscópicas, como masas suspendidas o elementos vibrantes que responden a cambios en la orientación. Cuando el dispositivo rota, induce fuerzas de Coriolis y las mediciones de estas fuerzas se convierten en señales eléctricas para la determinación de la velocidad angular. Estos dispositivos son conocidos por su tamaño compacto, su bajo consumo de energía y capacidad de integración en dispositivos miniaturizados (España, 2019).

### 2.3.2 Análisis comparativo entre tipos de giroscopio

En la *Tabla 2-2*, se presentan las características más relevantes de los diferentes tipos de giroscopio para así, determinar el dispositivo más adecuado.

**Tabla 2-2:** Características más relevantes de los distintos tipos de giroscopio

Giroscopio	Mecánico	Óptico	Micromecánico
Rango de medida	-1.000 – 1.000 °/s	-20.000 – 20.000 °/s	-300 – 2.000 °/s
Margen de error	0,1 – 1 %	0,05 %	0,001 %
Sensibilidad	0,1 – 10 mV/s	60 – 120 mV/s	1 – 2.000 Hz
Consumo de energía	2 – 20 mA	7,5 – 70 mA	3,9 mA
Voltaje de operación	12 V	3 – 5,5 V	1,8 – 3,3 V

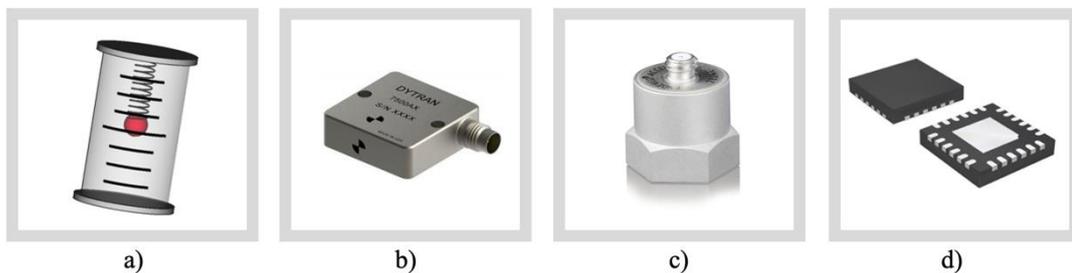
Fuente: Morales y Cruz, 2020

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-2*, se considera el uso de giroscopios micromecánicos debido a que cuentan con el rango de medida más adecuado y con un menor margen de error, estos factores se tienen en cuenta al momento de obtener la velocidad angular. Además, su consumo de energía no es variable y se establece en un valor bajo, ideal para su alimentación.

### 2.3.3 Acelerómetros

Son sensores inerciales que miden la aceleración lineal y angular de un objeto en movimiento dentro de uno o en los tres ejes ortogonales de un sistema de coordenadas. En la *Ilustración 2-3* se observan los diferentes tipos de acelerómetro, cada uno de ellos puede ser utilizado de acuerdo a la aplicación requerida y las condiciones de trabajo (Morales y Cruz, 2020).



**Ilustración 2-3:** Acelerómetro: a) mecánico, b) capacitivo, c) piezoeléctrico, d) MEMS

Fuente: Gutiérrez, 2020; AeroExpo, 2023; ENDEVCO, 2023; DigiKey, 2023

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Acelerómetros mecánicos.** – Emplean una masa inerte y resortes elásticos, la masa se encuentra suspendida mediante un resorte, de manera que puede desplazarse desde su posición de reposo.

Para obtener la aceleración, se relaciona la segunda ley de Newton con la ley de elasticidad de Hooke (Apaza et al., 2020).

**Acelerómetros capacitivos.** – Miden la variación de carga eléctrica en las placas de un condensador cuando el sensor se somete a una aceleración. El condensador es de tamaño reducido y está formado por dos placas conductoras paralelas separadas por un material dieléctrico. Para obtener la aceleración se debe tener en cuenta la variación de la capacitancia (Urueña, 2021).

**Acelerómetros piezoeléctricos.** – Contienen un cristal piezocerámico y una masa inercial en su interior, los cuales se unen en conjunto a un sistema para medir el nivel de vibraciones. El cristal se deforma cuando se le aplica una fuerza, generando cargas eléctricas proporcionales al nivel de deformación. Estas cargas pueden amplificarse para realizar mediciones (Urueña, 2021).

**Acelerómetros micromecánicos (MEMS).** – Utilizan la tecnología de microfabricación, combinando componentes eléctricos y mecánicos con un conjunto de masas suspendidas por finas estructuras elásticas dentro de un circuito integrado. Cuando el dispositivo se mueve o vibra, las masas se desplazan debido a la fuerza de aceleración, generando una señal eléctrica que se puede medir y procesar para determinar la magnitud y dirección de la aceleración. (Gutiérrez, 2020).

#### 2.3.4 *Análisis comparativo entre tipos de acelerómetro*

En la *Tabla 2-3* se presentan las características más relevantes de los diferentes tipos de acelerómetro para así, determinar el dispositivo más adecuado.

**Tabla 2-3:** Características más relevantes de los distintos tipos de acelerómetros

Acelerómetro	Mecánico	Capacitivo	Piezoeléctrico	Micromecánico
<b>Margen de medida</b>	0 – 200 m/s <sup>2</sup>	0 – 1.000 m/s <sup>2</sup>	0 – 2.000 m/s <sup>2</sup>	1,5 – 250 m/s <sup>2</sup>
<b>Ancho de banda</b>	0 – 1.000 Hz	0 – 2.000 Hz	10 – 20.000 Hz	0,1 – 1.500 Hz
<b>Sensibilidad</b>	1 V/g	100 mV/g	100 mV/g	0,75 V ± 5%
<b>Costo</b>	Alto	Alto	Medio	Medio

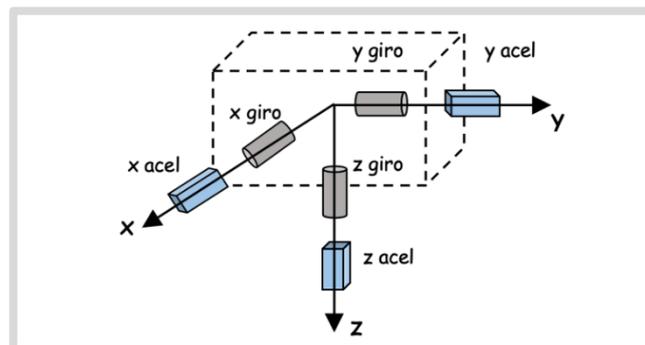
Fuente: Stuardi et al., 2022; Monje, 2010

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-3*, se considera el uso de acelerómetros micromecánicos debido a que cuentan con un margen de medida menor, un rango de ancho de banda adecuado y una sensibilidad con un margen de error mínimo y bastante aceptable, factores a tener en cuenta al momento de realizar mediciones de la aceleración.

## 2.4 Unidad de medida inercial

IMU, por sus siglas en inglés de *Inertial Measurement Unit*, es un dispositivo electrónico que utiliza una combinación de acelerómetros y giroscopios para medir la velocidad angular, la aceleración y orientación de un objeto. A diferencia de trabajar con acelerómetros o giroscopios de forma independiente, las IMU presentan mejores resultados en cuanto a mediciones. En la *Ilustración 2-4* se observa una unidad de medida inercial completa, compuesta por una terna de acelerómetros y otra de giroscopios (España, 2019).

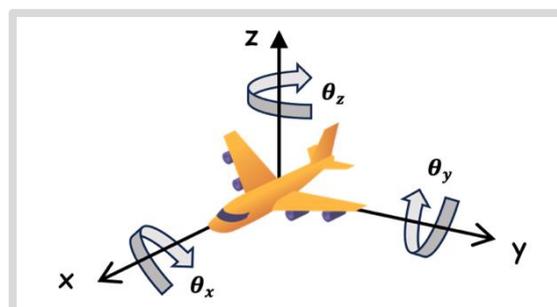


**Ilustración 2-4:** Unidad de medida inercial completa

Fuente: España, 2019

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con los datos obtenidos de una IMU, se estima la posición y orientación de un objeto en movimiento con referencia a un sistema global, esto se logra mediante la lectura de datos del acelerómetro y el giroscopio contenidos en el dispositivo. Posteriormente, con estos parámetros se obtienen los ángulos de giro que se observan en la *Ilustración 2-5* (Pozo, 2010).



**Ilustración 2-5:** Ángulos de giro de una IMU

Fuente: Pozo, 2010

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Cabe mencionar que la obtención del ángulo de giro en z tanto con el acelerómetro y el giroscopio de una IMU resulta compleja debido a que el primero no proporciona una medida directa en la

orientación de z y, para el caso del giroscopio, existen errores acumulativos para la obtención del ángulo, sin embargo, se puede obtener mediante el uso de técnicas de procesamiento o filtrado para contrarrestar los errores (Giménez, 2010).

#### 2.4.1 Cálculo del ángulo a partir de la aceleración

Para obtener los ángulos de giro, primero se calcula la aceleración en cada uno de los tres ejes a partir del acelerómetro mediante la *Ecuación 2-1* (Giménez, 2010):

$$a = \frac{a_{LSB}}{r_{escala}} \quad (2-1)$$

Donde:

$a$ , es la aceleración obtenida a partir de los datos del acelerómetro.

$a_{LSB}$ , es la lectura entregada por el acelerómetro en bits.

$r_{escala}$ , es el rango de escala completo del acelerómetro que se obtiene de su hoja de datos.

Con el valor de la aceleración, se obtienen las medidas angulares  $\theta_x$  y  $\theta_y$  mediante las *Ecuaciones 2-2* y *2-3* (Giménez, 2010):

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}} \right) \quad (2-2)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left( \frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}} \right) \quad (2-3)$$

Donde:

$\theta_x$ ,  $\theta_y$ , representan los ángulos de giro en x y en y, respectivamente.

$a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ , son las aceleraciones en cada uno de los ejes coordenados x, y, z del acelerómetro, respectivamente.

#### 2.4.2 Cálculo del ángulo a partir de la velocidad angular

Para obtener medidas angulares a partir del giroscopio, primero se determina la velocidad angular de cada eje mediante la *Ecuación 2-4* (Giménez, 2010):

$$\omega = \frac{v_{giro}}{r_{escala}} \quad (2-4)$$

Donde:

$\omega$ , es la velocidad angular obtenida a partir de los datos del giroscopio.

$v_{giro}$ , es la lectura entregada por el giroscopio en bits.

$r_{escala}$ , es el rango de escala completo del giroscopio que se obtiene de su hoja de datos.

Para obtener una medida angular, se integra la velocidad angular con respecto a una variación en el tiempo. La *Ecuación 2-5* muestra la fórmula para calcular el ángulo en base a la velocidad angular considerando la toma de muestras anteriores (Soria y Vaca, 2015):

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + \omega_i \quad (2-5)$$

Donde:

$\alpha_k$ , representa el ángulo medido del estado actual.

$\alpha_{k-1}$ , representa el ángulo medido en el estado anterior.

$\omega_i$ , es la velocidad angular medida por el giroscopio en cada instante de tiempo.

La *Ecuación 2-5* proporciona valores fiables únicamente en intervalos cortos de tiempo, en períodos extensos de tiempo, los resultados se alejan de la medida real. Además, no se conoce el ángulo de partida del giroscopio para comenzar las mediciones. Estos problemas se contrarrestan mediante el uso de las medidas del acelerómetro (Soria y Vaca, 2015).

## 2.5 Factores que afectan a las señales inerciales

Dentro del presente estudio se considera el uso de sensores inerciales micromecánicos, sin embargo, debido a su naturaleza de construcción, las IMU construidas a partir de estos sensores se encuentran comprometidas. A medida que la miniaturización de los sensores micromecánicos aumenta, su desempeño disminuye (Pozo et al., 2014). Además, las señales generadas por estos sensores también se ven afectadas por distintos factores que limitan el desempeño de la IMU generando errores en las mediciones. A continuación, se presentan algunos de los factores más importantes que afectan a una IMU con sensores inerciales micromecánicos (Mulet, 2017).

**Calibración.** – Es un proceso crítico donde se ajustan los sensores inerciales para corregir las desviaciones iniciales en las medidas de aceleración y velocidad angular. Una mala calibración afecta la precisión del sensor a lo largo del tiempo, por lo que es necesario realizar este proceso regularmente y en algunos casos, después del cambio de condiciones en las que opera la IMU (Mulet, 2017).

**Deriva.** – Es un cambio gradual en las mediciones debido a la sensibilidad de los sensores inerciales. Se presenta debido a la acumulación de la suma de medidas angulares anteriores que

acumulan errores durante intervalos de tiempo extensos, donde, si las medidas anteriores presentan error, este se incrementa en cada instante de tiempo, dando como resultado un valor lejano al valor real (Pozo, 2010).

**Bias.** – Es un error constante propio de los sensores inerciales que aparece al realizar mediciones. Este factor depende de las características de construcción de los sensores y de su operación. Los parámetros de *bias* se especifican en la hoja de datos de los sensores y se aprecia cuando se encuentran en reposo (Pozo, 2010).

Del estudio, se concluye que las IMU presentan errores antes y después de realizar mediciones debido a sus características de construcción y los distintos factores externos que afectan a las mediciones. Además, existen otros factores que afectan a estos dispositivos, estos se clasifican de acuerdo al tipo de error y se estudian a continuación (Mulet, 2017).

### **2.5.1 Errores presentes en una IMU**

Si bien una IMU brinda buenos resultados en aplicaciones de monitoreo de movimiento, aún presenta problemas de ruido en las señales que afectan a la precisión en las mediciones, por lo que es necesario realizar una calibración adecuada del dispositivo para mejorar la calidad en los datos obtenidos. Los errores que afectan a una IMU se clasifican en dos grupos: estocásticos y determinísticos (Morales y Cruz, 2020).

**Errores estocásticos.** – Hacen referencia a una varianza o aleatoriedad, componentes aleatorios de los errores que afectan a los sensores. Para corregirlos, se emplean modelos de calibración complejos de procesamiento de señales para identificar el error y posteriormente compensarlo (Morales y Cruz, 2020).

**Errores determinísticos.** – Son aquellos en los que no interviene la aleatoriedad, estos errores contienen un sesgo medio constante que puede ser medido y posteriormente compensado mediante técnicas de calibración a los dispositivos contenidos en las unidades de medida inercial. Para reducir el efecto de estos errores también se utilizan técnicas de procesamiento o filtrado de señales (Rico, 2018).

### **2.5.2 Análisis de los errores presentes en una IMU**

En la *Tabla 2-4* se describen todos los errores que presentan los sensores inerciales contenidos en una IMU que afectan la precisión y emisión de los datos generados. “√” indica si el sensor

presenta error, se puede calibrar, es determinístico, es estocástico; mientras que, “x” indica si el sensor no presenta error, no se puede calibrar, no es determinístico, no es estocástico (Morales y Cruz, 2020).

**Tabla 2-4:** Errores que presentan los sensores inerciales contenidos en una IMU

Errores	Acelerómetro	Giroscopio	Calibración	Deterministas	Estocásticos
<b>Desalineación</b>	✓	✓	✓	✓	x
<b>Factor de escala</b>	x	✓	✓	✓	x
<b>Bias u offset</b>	✓	✓	✓	x	✓
<b>Sesgo</b>	✓	✓	✓	x	✓
<b>Sensibilidad</b>	✓	✓	x	✓	x
<b>Calibración</b>	✓	✓	✓	x	x
<b>Rectificación de vibraciones</b>	x	✓	x	x	x
<b>Ruido de cuantificación</b>	✓	✓	✓	x	✓

Fuente: Morales y Cruz, 2020

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-4*, se concluye que los errores de *bias*, sesgo y ruido de cuantificación son los más importantes dentro de una IMU debido a que están presentes tanto en el acelerómetro como en el giroscopio y, para contrarrestarlos es necesaria la implementación de técnicas de procesamiento de señales. Por otro lado, el error de calibración pese a no contar como error determinístico o estocástico es importante debido a que a partir de la calibración inicial, se realiza la toma de muestra de mediciones.

## 2.6 Técnicas para el procesamiento de señales

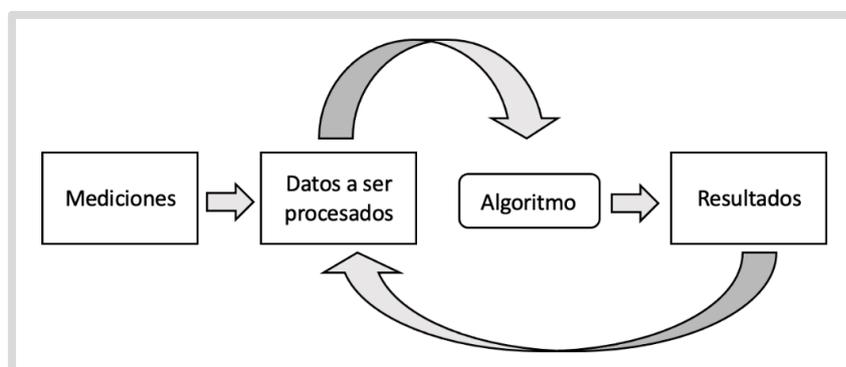
Las mayoría de señales son de naturaleza analógica y pueden ser tratadas mediante filtros, los cuales comprenden un conjunto de técnicas y algoritmos que se utilizan para analizar, modificar y extraer información de las señales. Estas técnicas abarcan una amplia gama de aplicaciones, desde la eliminación de factores externos hasta la mejora de la calidad de la señal que se está analizando (Alvarado, 2006). Las técnicas de procesamiento de señales más utilizadas se presentan a continuación.

**Filtro pasa altos.** – Esta técnica de procesamiento permite el paso de componentes de alta frecuencia de una señal mientras elimina los componentes de baja frecuencia, para lo cual, se elige una frecuencia de corte que permite eliminar la amplitud de la señal si es menor a dicha

frecuencia. Representa una herramienta esencial para el análisis y manipulación de datos, donde, destacan las variaciones rápidas de alta frecuencia en una señal mientras atenúa los componentes de bajas frecuencias. Se utiliza ampliamente en procesamiento de señales de audio y en la eliminación de componentes de corriente continua en circuitos electrónicos (Alvarado, 2006). Esta técnica se utiliza con sensores inerciales para eliminar la deriva durante un corto período de tiempo (Mulet, 2017).

**Filtro complementario.** – Fusiona dos fuentes de datos con el objetivo de obtener una única salida que combine las fortalezas de ambas. Se utiliza en los sistemas de navegación inercial, donde surge la idea de usar la medición obtenida por parte de un giroscopio para períodos de tiempos cortos y realizar la corrección de la medida mediante un acelerómetro. Su implementación resulta matemáticamente sencilla y consume pocos recursos computacionales, sin embargo, este filtro presenta sensibilidad a los errores de calibración que conlleva a problemas de deriva en períodos de tiempo extensos, generando errores acumulativos en la medida final (Gaydou et al., 2011).

**Filtro de Kalman.** – Se utiliza para la estimación de estados no medibles de un sistema incluso en presencia de ruido generado durante la medición. Se considera predictivo debido a que toma en cuenta medidas pasadas y actuales para realizar una estimación que posteriormente corrige. Utiliza un algoritmo recursivo que no requiere que los datos anteriores se almacenen y se vuelvan a procesar cada vez que se toma una nueva medición, en lugar de esto, hace uso del último valor obtenido también conocido como estado anterior, a partir del cual, junto con las nuevas medidas obtenidas, el algoritmo proporciona nuevos resultados que posteriormente son considerados como estados anteriores. En la *Ilustración 2-6* se observa de forma gráfica la recursividad característica de este filtro (Soria y Vaca, 2015).



**Ilustración 2-6:** Recursividad en el filtro de Kalman

Fuente: Pozo, 2010

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 2.6.1 Análisis comparativo entre técnicas de procesamiento de señales

En la *Tabla 2-5* se presentan las características más relevantes de las distintas técnicas de procesamiento de señales, con el objetivo de determinar técnica más adecuada.

**Tabla 2-5:** Características más relevantes de las técnicas de procesamiento de señales

Técnica de procesamiento	Filtro pasa altos	Filtro complementario	Filtro de Kalman
<b>Función</b>	Eliminar componentes de baja frecuencia	Combinación de medidas para resultados fiables	Estimación de estados mediante predicciones
<b>Control de deriva</b>	Poco efectivo en períodos largos de tiempo	Eefctividad media en períodos cortos de tiempo	Diseñado específicamente para controla la deriva
<b>Control de ruido externo</b>	Sensible al ruido de alta frecuencia	Sensible al ruido con mala sintonización	Maneja el ruido mediante ponderación de medidas
<b>Precisión del filtro</b>	60 %	85 %	99 %
<b>Complejidad del algoritmo</b>	Simple de implementar	Sintonización de parámetros compleja	Complejo, pero con resultados fiables

Fuente: Alvarado, 2006; Gaydou et al., 2011; Rico et al., 2015

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-5*, se elige el filtro de Kalman para el procesamiento de la señal arrojada por una unidad de medida inercial debido a su eficiencia en el control de deriva y ruido externo mediante predicciones, además de la optimización de la información para obtener resultados precisos y fiables al momento de realizar mediciones.

### 2.7 Algoritmo del filtro de Kalman

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento de esta técnica de procesamiento se dividen en dos grupos, el primero se encarga de realizar una predicción del estado y el siguiente se encarga de realizar una corrección del mismo. El sistema sobre el cual se están realizando las mediciones se describe de manera general mediante la *Ecuación 2-6* (Pozo, 2010):

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B \cdot u_{k-1} + \omega_{k-1} \quad (2-6)$$

Donde:

$k - 1$ , corresponde al estado anterior de la medición.

$x$ , es el vector de estado.

$u$ , es la entrada de control del filtro.

$\omega$ , es el ruido generado en el proceso.

$A$ , es la matriz de transición de estado que representa la relación entre el estado actual y el anterior.

$B$ , es la matriz que relaciona el vector de estado con las entradas de control del filtro.

La *Ecuación 2-7* representa una medición que describe la relación entre el proceso y las medidas obtenidas (Pozo, 2010):

$$z_k = H_k \cdot x_k + v_k \quad (2-7)$$

Donde:

$k$ , hace referencia al estado actual.

$z$ , representa las mediciones realizadas.

$H$ , es la matriz de observación que describe la relación entre el estado y las mediciones del sistema.

$v$ , es el ruido en la medición.

Ahora, se analizan las ecuaciones de la etapa de predicción que proyectan el estado  $k$ , utilizando los valores de la estimación del estado y covarianza del error que provienen directamente del estado anterior. A través de las *Ecuaciones 2-8 y 2-9* se determina la estimación a priori del estado y de la covarianza del error (Pozo, 2010):

$$\hat{x}_k^- = A \cdot \hat{x}_{k-1}^- + B \cdot \hat{u}_{k-1}^- \quad (2-8)$$

$$P_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q \quad (2-9)$$

Donde:

$\hat{x}_k^-$ , es la estimación del estado del sistema en  $k$ .

$\hat{x}_{k-1}^-$ , es la estimación anterior del estado del sistema en  $k - 1$ .

$\hat{u}_{k-1}^-$ , es la estimación anterior de la entrada del sistema en  $k - 1$ .

$P_k^-$ , es la covarianza del error de la estimación del estado en  $k$ .

$P_{k-1}$ , es la covarianza del error de la estimación anterior del estado del sistema en  $k - 1$ .

$A^T$ , es la transpuesta de la matriz de transición de estado.

$Q$ , es la matriz de covarianza de ruido en el proceso.

Por último, está la etapa de corrección que actualiza las mediciones. Esta etapa se rige por las *Ecuaciones 2-10, 2-11 y 2-12* (Pozo, 2010):

$$K_k = P_k^- \cdot H^T \cdot (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)^{-1} \quad (2-10)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_k^-) \quad (2-11)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^- \quad (2-12)$$

Donde:

$K_k$  es la ganancia del filtro de Kalman.

$H^T$ , es la matriz transpuesta de la matriz de observación.

$R$ , es la matriz de covarianza del ruido en la medición.

$z_k$ , es la medición reciente en  $k$ .

$P_k$ , es la covarianza del error de la estimación del estado del sistema a posteriori en  $k$ .

$I$ , es la matriz identidad.

Los dos grupos de ecuaciones que conforman el algoritmo del filtro de Kalman contienen dos parámetros fundamentales:  $R$  y  $Q$ . El primero se determina antes de la implementación del algoritmo mediante muestras de mediciones para ajustar el sistema y el segundo se obtiene mediante observaciones del comportamiento del sistema (Pozo, 2010).

## 2.8 Dispositivos orientados al procesamiento de señales

Son tarjetas de desarrollo que procesan información de manera sencilla permitiendo la creación de diferentes aplicaciones con fines muy útiles. Estos dispositivos se conectan a diferentes elementos como sensores, los cuales son los encargados de brindar la información del medio que los rodea. La elección del mejor dispositivo dependerá de las necesidades y los requerimientos del proyecto (Marchán y Guananga, 2018). Algunos dispositivos orientados al procesamiento de señales son:

**Arduino.** – Cuenta con una amplia variedad de tarjetas de desarrollo y se considera la plataforma más utilizada para realizar diseños electrónicos. Se enfoca a un público tanto básico como experto y es la más conocida y utilizada dentro del sector de desarrollo básico. Además, cuenta con su propio IDE de desarrollo para la programación de sus tarjetas, sin embargo, dentro del sector profesional se encuentran alternativas más avanzadas y eficaces (Ramírez, 2016).

**Espressif.** – Sus dispositivos combinan un microcontrolador de 32 bits con una tarjeta Wi-Fi y Bluetooth, además, cuentan con un procesador digital de señal integrado para el procesamiento de señales orientadas a IoT. Estos dispositivos tienen una gran capacidad de almacenamiento como de velocidad en el proceso de información, periféricos integrados y doble núcleo integrado. Además, sus dispositivos se programan utilizando diversas plataformas y entornos de desarrollo. Sus principales aplicaciones son en el desarrollo de sistemas IoT debido a su bajo consumo de energía (Corpus y Portugal, 2021).

**Raspberry Pi.** – Son computadores de bajo costo con una arquitectura de procesador ARM que posee diversas interfaces de *hardware* para establecer una comunicación con otros dispositivos,

además, cuentan con distintos componentes para diversos modos de comunicación así como la integración de puertos para la conexión de periféricos (Chacón, 2014). Ofrecen una alternativa en cuanto a *hardware* y *software* libre para implementar en diferentes tipos de sistemas, por lo que se utilizan para el procesamiento de señales analógicas previo a una etapa de adquisición de datos (Velásquez y Gómez, 2013).

### 2.8.1 Análisis comparativo entre dispositivos orientados al procesamiento de señales

En la *Tabla 2-6* se presentan las características más relevantes de diferentes dispositivos orientados al procesamiento de señales para así, determinar los dispositivos más adecuados.

**Tabla 2-6:** Características más relevantes de dispositivos orientados al procesamiento de señales

Dispositivo	Arduino	Espressif	Raspberry Pi
<b>Voltaje de operación</b>	3,3 – 5 V	3,3 – 5 V	5V
<b>Consumo de energía</b>	10 $\mu$ A – 100 mA	5 $\mu$ A – 60 mA	250 – 500 mA
<b>Temporizadores</b>	8 – 16 bits	32 bits	32 bits
<b>Memoria RAM</b>	2 – 96 KB	32 KB – 520 KB	512 MB – 4 GB
<b>Memoria flash</b>	32 – 512 KB	1 – 16 MB	Si, por tarjeta microSD
<b>Convertor A/D</b>	6 – 16 canales	18 canales	Si, por módulo externo
<b>Convertor D/A</b>	Si, por módulo externo	2 canales	Si, por módulo externo
<b>Procesador digital de señales (DSP)</b>	No integra	Integra	No integra
<b>Conexión Wi-Fi</b>	Si, por módulo externo	Integra, todos los modelos	Integra, modelos recientes
<b>Conexión Bluetooth</b>	Si, por módulo externo	Integra, todos los modelos	Integra, modelos recientes
<b>Peso</b>	7 – 37 gramos	7 – 10 gramos	9 – 46 gramos
<b>Costo</b>	\$ 8 – 60	\$ 8 – 20	\$ 40 – 280

Fuente: Arduino, 2021; Espressif Systems, 2023; Raspberry Pi, 2023

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-6*, se considera el uso de los dispositivos de Espressif debido a que cuentan con un rango de voltaje adecuado para su alimentación y tienen un menor consumo de energía. Integran un temporizador de 32 bits para la ejecución rápida de instrucciones y una memoria flash de gran capacidad para el almacenamiento de datos. Además, cuentan con un procesador digital de señales, ideal para el procesamiento de grandes cantidades de datos.

## 2.9 Sistema mecánico de robots móviles

Dentro del presente estudio, también se considera el uso de un dispositivo móvil que se desplace a partir de los datos arrojados por los sensores inerciales del sistema de desplazamiento. Partiendo

de la concepción del autor (Licona Alviter 2019), que en su estudio, considera a los dispositivos móviles como robots móviles debido a que son dispositivos autónomos de transporte que integran una plataforma mecánica que posee un sistema de locomoción para navegar en un ambiente de trabajo específico, y que además, cuentan con un nivel de autonomía para moverse y transportar cargas; se considera a partir de ahora a los dispositivos móviles como robots móviles.

Un robot móvil debe contar con un principio de locomoción definido y apropiado para su aplicación, que define su movilidad y la superficie de contacto. Este sistema se determina por su peso debido a que afecta la movilidad y define la potencia necesaria de los motores para el desplazamiento del robot (Bermúdez, 2002).

### 2.9.1 Locomoción por ruedas

Son los sistemas más utilizados por robots móviles debido a su eficiencia en superficies lisas y firmes, su construcción es sencilla y, además, no causan desgaste de la superficie donde se desplazan (Barrientos et al., 2007). Pueden ser adaptados a diferentes tipos de terreno gracias al uso de ruedas con distintas propiedades de agarre y tracción (Wang et al., 2022). En la *Ilustración 2-7* se observan los tipos de rueda más utilizadas para locomoción en robots móviles.



**Ilustración 2-7:** Locomoción: a) diferencial, b) convencional, c) omnidireccional, d) oruga

**Fuente:** Alibaba Group, 2023; Autobot SDN BHD, 2023; AliExpress, 2023; SuperRobotica, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Ruedas diferenciales.** – Permiten realizar giros completos sin sufrir colisiones y entre las ventajas de usar estas ruedas se encuentran su bajo costo, sencillez de implementación y diseño simple (Aguilar, 2022). Al variar las velocidades angulares de las ruedas, se posibilita que el robot gire alrededor de su centro de rotación instantáneo (Herroz et al. 2022).

**Ruedas convencionales.** – Son muy comunes debido a su simplicidad y capacidad para adaptarse a diferentes entornos. Poseen un punto de contacto con el terreno, permitiéndole al robot moverse

sin resbalamiento, de modo que su velocidad es nula tanto en la dirección paralela como en la perpendicular al plano de la rueda, asegurando así la rotación (Trujillo, 2015).

**Ruedas omnidireccionales.** – Permiten un desplazamiento eficiente del robot en cualquier dirección sin la necesidad de giro, de esta manera, puede llegar a su destino con la orientación deseada (Zambrano, 2015). Estas ruedas permiten que el robot tenga una movilidad completa para desplazarse en cualquier dirección sin necesidad de reorientación. Las ruedas omnidireccionales más utilizadas son de tipo *mecanum* (Gracia, [s.f.]).

**Ruedas de oruga.** – Son una alternativa para la movilidad de robots móviles en terrenos irregulares gracias a su diseño con tracción mejorada y estabilidad, lo cual, les permite adaptarse a diferentes superficies o en entornos con condiciones difíciles. Pese a esta característica, estas ruedas no son muy comunes debido a que su eficiencia es menor comparada con otros tipos de rueda más precisas (Quicaliquin, 2019).

### 2.9.2 Análisis comparativo entre ruedas para locomoción

En la *Tabla 2-7* se presentan las características más relevantes de los tipos de rueda para locomoción en robots móviles para así, determinar el tipo de rueda más adecuada.

**Tabla 2-7:** Características más relevantes de los diferentes tipos de rueda

Tipo de rueda	Oruga	Omnidireccional	Convencional	Diferencial
<b>Peso</b>	1 – 50 Kg	0,1 – 5 Kg	0,1 – 10 Kg	0,1 – 10 Kg
<b>Costo</b>	\$ 100 – 5.000	\$ 50 – 2.000	\$ 20 – 500	\$ 10 – 300
<b>Tamaño (diámetro x ancho)</b>	50 – 500 mm x 10 – 100 mm	50 – 300 mm x 10 – 100 mm	50 – 300 mm x 10 – 100 mm	50 – 200 mm x 10 – 50 mm
<b>Terrenos ideales</b>	Irregulares, resbaladizos	Cambios rápidos de dirección	Lisos	Espacios reducidos, irregulares
<b>Costo</b>	\$ 20 todo el sistema de orugas	\$ 5 – 8 cada par	\$ 1 cada rueda	\$ 5 el par

Fuente: Aguilar, 2022; Herroz et al., 2022; Trujillo, 2015; Zambrano, 2015

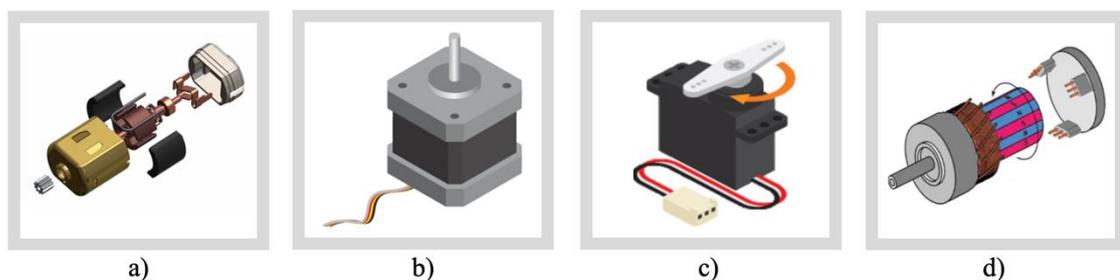
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-7*, se considera el uso de ruedas omnidireccionales debido a que cuentan una excelente movilidad en espacios reducidos y permiten el desplazamiento del robot en cualquier dirección sin la necesidad de cambiar su orientación inicial. Además, estas ruedas son de bajo costo y cuentan con un peso adecuado y tamaño ideal para ser implementadas en el prototipo de robot móvil.

### 2.9.3 Actuadores para el desplazamiento de robots móviles

Dentro de los sistemas mecánicos se consideran los desplazamientos rotatorios, donde, las ruedas del robot móvil generan una fricción rotacional en el punto de contacto de la rueda con la superficie donde se mueve, de esta manera, se logra dotar de movimiento al sistema de locomoción del robot móvil. Para llevar a cabo esta tarea se utilizan actuadores, comúnmente motores de corriente continua (Barrientos et al., 2007).

Este tipo de motores contienen un estator que produce un campo magnético constante y un rotor enrollado con un conmutador de escobillas. El campo magnético del estator se genera mediante bobinas a las cuales se les aplica voltaje para que se alineen con el campo magnético de los imanes y, debido al efecto del conmutador, la polaridad de la tensión aplicada cambia provocando que el motor continúe girando para volver a alinearse con el campo magnético (Spencer, 2019). En la *Ilustración 2-8* se observan los tipos de motores de corriente continua más usados para locomoción.



**Ilustración 2-8:** Motor: a) reductor, b) paso a paso, c) servomotor, d) *brushless*

**Fuente:** Electrical Technology, 2023; Makitpro, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Motor reductor.** – Incorpora un sistema de reducción de engranajes para disminuir la velocidad de rotación del eje de salida que le permite disminuir su velocidad de giro, aumentando su eficiencia y torque. Para controlar este motor, se utilizan *drivers* que reciben señales PWM generadas por microcontroladores, así como señales digitales para cambiar la dirección de giro (Archila, 2022).

**Motor paso a paso.** – Realizan movimientos discretos en respuesta a señales eléctricas que se aplican a sus bobinas. A diferencia de otros motores, estos no se caracterizan por ser rápidos, y los motores más veloces de esta clase raramente superan las 3.000 revoluciones por minuto. Debido a que funcionan lentamente, no necesitan escobillas y tienen una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento (Malo, 2011).

**Servomotor.** – Está diseñado para operar en respuesta a señales de control específicas, permitiendo el control de velocidad, aceleración, par y posición de su eje. Debido a su bajo momento de inercia puede moverse rápidamente, acelerar y frenar con gran eficacia. Este motor no puede detenerse en una posición fija o dar vueltas específicas, por esta razón, no es adecuado para aplicaciones que requieren movimientos precisos (Gómez, 2021).

**Motor *brushless*.** – Está equipado con imanes permanentes, los cuales generan un campo magnético con intensidad constante, y un estator equipado con un conjunto de bobinas distribuidas con tres o más fases. Estos motores no cuentan con escobillas ni con un sistema mecánico de conmutación para reemplazarlas (Seminario, 2021).

#### 2.9.4 Análisis comparativo entre motores de corriente continua

En la *Tabla 2-8* se presentan las características más importantes de cada uno de los motores de corriente continua para así, determinar el tipo de motor más adecuado.

**Tabla 2-8:** Características más relevantes de motores de corriente continua

Motor	Reductor	Paso a paso	Servomotor	<i>Brushless</i>
<b>Voltaje de operación</b>	3 – 6 V	3 – 5 V	4 – 8 V	12 V
<b>Velocidad de revolución</b>	10 – 100 RPM	10 – 1.000 RPM	1.000 – 10.000 RPM	1.000 – 20.000 RPM
<b>Torque</b>	1 – 100 Nm	0,1 – 50 Nm	0,1 – 50 Nm	1 – 100 Nm
<b>Control</b>	Interruptores o relés	<i>Drivers</i>	PID	Retroalimentación

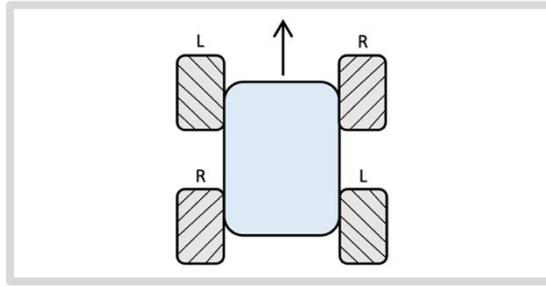
Fuente: Seminario, 2021; Calvo, 2022; Gómez, 2021; Malo, 2011; Spencer, 2019

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-8*, se eligen los motores reductores debido a su rango de voltaje de operación y, además, porque cuentan con un excelente torque, un factor importante al momento de controlar la velocidad del prototipo de robot móvil.

#### 2.10 Desplazamiento de un robot omnidireccional

Este robot móvil consta de cuatro ruedas omnidireccionales de tipo *mecanum*, un par de ellas conocidas como zurdas y el otro par como diestras, donde, cada rueda cuenta con rodillos. Estos dos tipos de rueda se diferencian en que los rodillos de la rueda izquierda están orientados desde la parte inferior derecha hacia la parte superior izquierda, mientras que, para la rueda derecha los rodillos están orientados en sentido contrario, las ruedas se distribuyen a los costados del robot como se observa en la *Ilustración 2-9* (Cabrera y Reinozo, 2022).

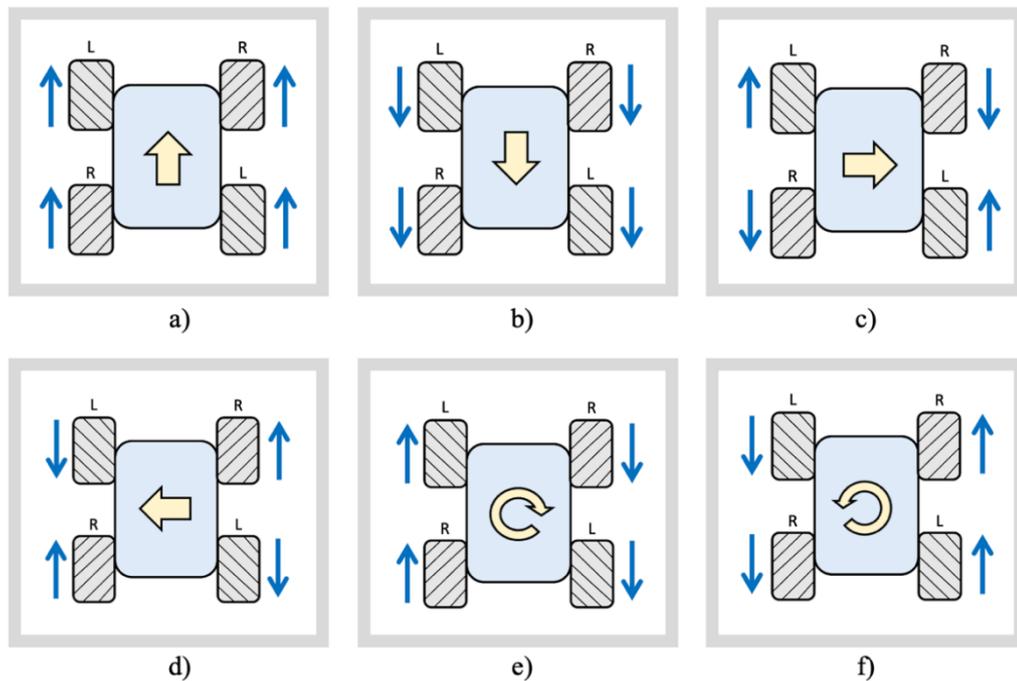


**Ilustración 2-9:** Disposición de las ruedas de un robot omnidireccional

**Fuente:** (Cabrera y Reinozo, 2022)

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Al aplicar una fuerza lateral sobre las ruedas, los rodillos giran sobre sí mismos permitiéndole al robot tener velocidad en la dirección del eje de giro. Si cada rueda varía su velocidad de dirección y rotación, se producen movimientos lineales o rotacionales, entonces, el robot puede realizar seis tipos de movimientos como se observa en la *Ilustración 2-10* (Cabrera y Reinozo, 2022).



**Ilustración 2-10:** Movimientos de un robot omnidireccional: a) adelante, b) atrás, c) derecha, d) izquierda, e) mismo eje derecho, f) mismo eje izquierdo

**Fuente:** Cabrera y Reinozo, 2022

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Movimiento hacia delante.** – Para lograr este movimiento con el robot, el par de ruedas omnidireccionales zurdas y diestras acopladas al robot deben girar hacia adelante a la misma velocidad (Cabrera y Reinozo, 2022).

**Movimiento hacia atrás.** – Para lograr este movimiento con el robot, el par de ruedas omnidireccionales zurdas y diestras acopladas al robot deben girar hacia atrás a la misma velocidad (Cabrera y Reinozo, 2022).

**Movimiento a la derecha.** – El par de ruedas zurdas gira hacia adelante, mientras que, el par de ruedas diestras gira hacia atrás. Todas las ruedas deben girar a la misma velocidad para lograr el movimiento lateral del robot hacia la derecha (Cabrera y Reinozo, 2022).

**Movimiento a la izquierda.** – El par de ruedas zurdas debe girar hacia atrás, mientras que, el par de ruedas diestras debe girar hacia adelante. Todas las ruedas deben girar a la misma velocidad para lograr el movimiento lateral del robot hacia la izquierda (Cabrera y Reinozo, 2022).

**Giro sobre su propio eje derecho.** – Las dos ruedas laterales izquierdas deben girar hacia adelante, mientras que, las dos ruedas laterales derechas deben girar hacia atrás. Las cuatro ruedas deben girar a la misma velocidad para lograr la rotación estacionaria del robot hacia la derecha (Cabrera y Reinozo, 2022).

**Giro sobre su propio eje izquierdo.** – Las dos ruedas laterales izquierdas deben girar hacia atrás, mientras que, las dos ruedas laterales derechas deben girar hacia adelante. Las cuatro ruedas deben girar a la misma velocidad para lograr la rotación estacionaria del robot hacia la izquierda (Cabrera y Reinozo, 2022).

## **2.11 Métodos de control para robots móviles**

Son técnicas y estrategias utilizadas para dirigir el movimiento y las acciones de un robot móvil permitiendo a los operadores controlar el robot de diferentes formas, según la tarea a realizar y las necesidades específicas (Rodríguez, 2022). A continuación, se presentan algunos métodos para el control de robots móviles.

**Control manual.** – Cuentan con sistemas de control centralizados que son manejados por un operador humano encargado de recibir los datos, procesarlos y planificar las acciones del robot (López, 2022). No tienen la capacidad de actuar de forma autónoma, lo que significa que requieren de la intervención de una persona para poder operar y realizar sus tareas (Alfaro, 2020).

**Control autónomo.** – Cuenta con la habilidad de procesar la información recopilada de su entorno, lo que permite modificar su comportamiento y tomar decisiones o planificar acciones sin

la necesidad de intervención humana (López, 2022). Se pueden tomar decisiones propias en cuanto a la forma en que llevarán a cabo un recorrido y las acciones que llevará a cabo para lograr un objetivo específico (Alfaro, 2020).

**Control gestual.** – Es una técnica de interacción innovadora que permite la comunicación con diversos dispositivos, incluyendo robots móviles. Es una forma natural de interacción entre personas que va desde simples gestos en una conversación, hasta el uso de un lenguaje completo para personas con discapacidad auditiva. Ha revolucionado el campo de la robótica y la visión artificial, permitiendo aplicaciones como la navegación y la localización (Rodríguez, 2022).

### 2.11.1 Análisis comparativo entre métodos de control para robots móviles

En la *Tabla 2-9* se presentan las características más importantes de los métodos que se utilizan para el control de robots móviles para así, determinar el método de control más adecuado.

**Tabla 2-9:** Características más relevantes de los métodos de control para robots móviles

Métodos de control	Manual	Autónomo	Por gestos
Alcance	1 – 5 m	En su propio entorno	10 – 50 m
Comunicación	Inalámbrica	Inalámbrica	Inalámbrica
Funcionalidad	Por un usuario	Programado	IA, sensores, gestos faciales o manuales
Aplicaciones	Precisión	Adaptabilidad y autonomía	Interacción humano-robot más natural e intuitiva

Fuente: Alfaro, 2020

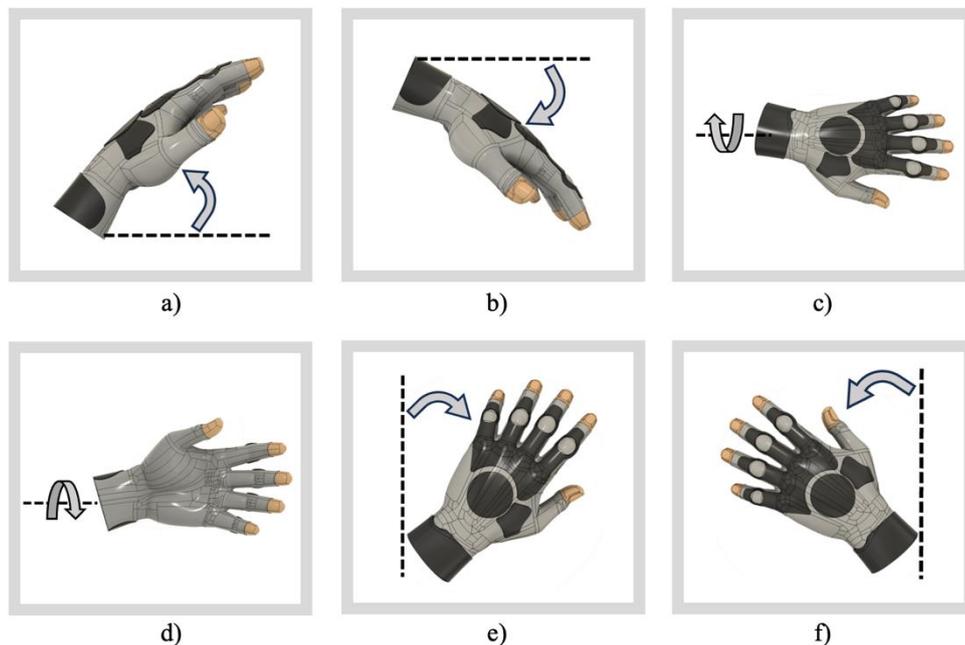
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-9*, se considera el uso de control gestual debido a su interacción humano-robot que permite visualizar, adaptar y corregir los movimientos del robot en ese instante, además, el uso de gestos es muy utilizado actualmente en el campo de la robótica. Este tipo de control resulta útil para la implementación del sistema de desplazamiento con sensores inerciales debido a su alcance de control.

### 2.12 Estudio de los movimientos de la mano

La muñeca posee tres grados de libertad, lo que le permite a la mano realizar tres tipos diferentes de movimientos. Se debe tener en cuenta que cada grado de libertad es un emparejado de dos movimientos, que involucra la posición neutral sobre el mismo eje (Pozo, 2022). En la *Ilustración*

2-11 se observan los tipos de movimiento que se pueden realizar con la mano partiendo de una posición neutral de cero grados.



**Ilustración 2-11:** Movimientos de la mano: a) extensión, b) flexión, c) pronación, d) supinación, e) desviación radial, f) desviación cubital

**Fuente:** Zambrano et al., 2018

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Extensión.** – Es el movimiento que se produce cuando el dorso de la mano realiza un movimiento en dirección al antebrazo desde la posición neutral de la mano. Con este movimiento se obtiene una movilidad de 0 hasta 65 – 85 grados (Sánchez, 2022).

**Flexión.** – Es el movimiento que se produce a través del eje transversal de la muñeca y es la inclinación de la parte inferior de la mano desde su posición neutral hacia la cara anterior del antebrazo. Este movimiento tiene una movilidad de 0 a 70 – 90 grados (Sánchez, 2022).

**Pronación.** – Es el movimiento que se produce cuando la palma de la mano gira en torno a su propio eje a partir desde su posición neutral hacia abajo. Este giro tiene un ángulo máximo de 90 grados (Fernández, 2019).

**Supinación.** – Es el movimiento que se produce a partir del giro de la palma sobre su propio eje hacia arriba desde su posición neutral. Este giro tiene un ángulo máximo de 120 grados (Fernández, 2019).

**Desviación radial.** – Es el movimiento que se produce al girar la mano desde su posición neutral en dirección al dedo pulgar. Este movimiento permite una movilidad de 0 a 15 grados (Fernández, 2019).

**Desviación cubital.** – Es el movimiento que se produce al girar la mano desde su posición neutral en dirección al dedo meñique. Este movimiento tiene una movilidad de 0 a 30 grados (Fernández, 2019).

Con base al estudio realizado, se determina que los seis movimientos de la mano son ideales para controlar el robot móvil mediante control gestual: extensión y flexión, para desplazar el robot móvil hacia atrás y adelante respectivamente, debido a su movilidad 85 y 90 grados como máximo; desviación radial y desviación cubital para cambiar la dirección del robot móvil hacia la izquierda o derecha respectivamente debido que presentan una movilidad simple de hasta 30 grados; supinación y pronación para rotar el robot móvil hacia la izquierda o derecha respectivamente, debido a que abarcan un margen de medida angular bastante amplio.

### **2.13 Tecnologías de comunicación inalámbrica**

Permiten la conexión entre dos o más dispositivos mediante el uso de ondas de radio y sin la necesidad de conectar cables. Estas redes inalámbricas son capaces de transmitir información a través de ondas electromagnéticas, lo que permite la conectividad remota entre dispositivos (Salazar, 2016). Dentro del desarrollo del presente trabajo de integración curricular, se debe considerar la transmisión de datos mediante alguna de estas tecnologías que permita la comunicación entre los dos prototipos. Algunas tecnologías de comunicación inalámbrica son:

**Wi-Fi.** – Se basa en el estándar 802.11 y permite la transmisión de datos para establecer conexiones entre diferentes dispositivos. Su objetivo principal es proporcionar una conexión inalámbrica compatible con una amplia gama de dispositivos, incluyendo televisores, smartphones, ordenadores, etc. Esta tecnología permite conectarse en cualquier parte del mundo siempre y cuando el dispositivo sea compatible y esté dentro del alcance de una red inalámbrica o punto de acceso (Iglesias, 2021).

**Bluetooth.** – Ofrece una forma de comunicación punto a multipunto, con bajo consumo de energía y alcance limitado con el objetivo de reemplazar cables. Los dispositivos que incorporan esta tecnología se dividen en tres categorías que se clasifican según su alcance máximo: clase 1, clase 2 y clase 3, cuyos alcances son aproximadamente de 100 m, 10 m y 1 m, respectivamente.

Utiliza la banda de 2,4 GHz para permitir a dos dispositivos dentro del alcance comunicarse y compartir una velocidad de transferencia de hasta 720 Kbps (Salazar, 2016).

**RFID.** – Crea un sistema de identificación inalámbrico que permite almacenar y recuperar datos sin necesidad de contacto físico con un lector. El alcance de esta tecnología viene dado por diferentes bandas de frecuencia: 125 KHz tiene un alcance de hasta 50 cm, 13,56 MHz tiene un alcance de 8 cm, 400 MHz – 1.000 MHz tiene un alcance de 3 a 10 m y 2,45 GHz – 5,4 GHz tienen un alcance de más de 10 m (Chunga y De la Cruz, 2019).

**ZigBee.** – Se trata de un sistema de protocolo inalámbrico creado específicamente para radios digitales, el cual se fundamenta en el estándar IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN). La distancia de transmisión de esta tecnología varía de 10 a 75 m, según la potencia de transmisión y el entorno, pero es posible crear redes de gran alcance debido a que cada dispositivo ZigBee funciona como repetidor, transmitiendo la señal al siguiente dispositivo y así sucesivamente (Solano, 2019).

### 2.13.1 Análisis comparativo entre tecnologías de comunicación inalámbrica

En la *Tabla 2-10* se presentan las características más importantes de los tipos de comunicación inalámbrica para así, determinar la tecnología más adecuada para la transmisión de datos.

**Tabla 2-10:** Características más relevantes de tecnologías de comunicación inalámbrica

Tecnología	Wi- Fi	Bluetooth	RFID	ZigBee
Velocidad de transmisión	11 – 54 Mbps	1 – 720 Kbps	1 – 1.000 Kbps	20 – 250 Kbps
Alcance	50 – 100 m	1 – 100 m	10 m	10 – 75 m
Latencia	1 – 50 ms	20 – 200 ms	15 – 100 ms	0,1 – 10 ms
Topología	Punto a punto - Multipunto	Punto - Multipunto	Punto - Punto	Punto - Punto

Fuente: Salazar, 2016; Solano, 2019; Proaño, 2021; Chunga y De la Cruz, 2019

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-10*, se considera el uso la tecnología Bluetooth para la comunicación entre el sistema de desplazamiento y el robot móvil debido a su alcance y su velocidad de transmisión, que cuenta con un rango de 720 Kbps para el envío y recepción de datos a una latencia considerable, además, su topología punto a multipunto permite la conexión entre varios dispositivos a la vez mediante un único dispositivo patrón.

## 2.14 Sistemas de alimentación

El desarrollo de los prototipos que se consideran para el presente trabajo de integración curricular demanda el uso considerable de energía. Cada prototipo debe tener la misma autonomía de funcionamiento, donde, se considera el uso de baterías que permitan el suministro de energía a cada uno.

Las baterías son acumuladores eléctricos compuestos por celdas electroquímicas que tienen la capacidad de transformar la energía química contenida, en energía eléctrica. Como resultado producen corriente continua, ideal para suministrar energía a diversos circuitos electrónicos o eléctricos según su potencia y tamaño (Quintero et al., 2021). Los tipos de batería más utilizados en aplicaciones electrónicas son:

**Baterías de polímero de litio (LiPo).** – Presentan una mayor flexibilidad y ligereza gracias a su consistencia gelatinosa, lo que elimina la posibilidad de que se liberen ácidos. Estas baterías incluyen una gran capacidad de energía, una larga vida útil y un peso muy reducido, lo que la convierte en una opción ideal para dispositivos de alta gama como drones y sensores. Además, esta batería cuenta con un circuito de protección que se encarga de evitar sobrecargas, descargas y controlar la temperatura (Islas, 2019).

**Baterías de iones de litio (Li-ion).** – Tienen una alta densidad de energía, eficiencia energética y larga vida útil. Además, pueden triplicar la densidad de energía de otras baterías y debido a su tamaño reducido, peso ligero, alta densidad de energía y larga vida útil, las baterías de iones de litio se han convertido en la opción preferida para dispositivos de cuidado de la salud (Quintero et al., 2021).

**Baterías de níquel-metal de hidruro (NiMH).** – Resuelven la necesidad de tener una batería portátil, recargable y más ligera y compacta que sus predecesoras de níquel-cadmio. Presentan una alta resistencia a la carga, por lo que deben ser cargadas con una corriente muy baja para evitar una reacción química abrupta que pueda generar una explosión que cause el daño total de la batería (Islas, 2019).

### 2.14.1 Análisis comparativo entre tipos de batería

En la *Tabla 2-11* se presentan las características más importantes de los diferentes tipos de batería para así, determinar la más adecuada en la implementación de los prototipos considerados.

**Tabla 2-11:** Características más relevantes de los tipos de batería

Batería	LiPo	Li-ion	NiMH
Voltaje nominal	3 – 4,2 V	3,6 – 3,7 V	1,2 V
Corriente nominal	50 – 40.000 mAh	20 – 20.000 mAh	1.200 – 2.500 mAh
Peso	11 – 13.5 g	10 – 11 g	20 – 150 g
Ciclos de carga	300 – 500	300 – 500	500 – 100
Tamaño (volumen)	5.240 – 20.222,66 mm <sup>3</sup>	5.440 – 22.992,66 mm <sup>3</sup>	6.569 – 25.796,23 mm <sup>3</sup>

Fuente: Islas, 2019; Quintero et al., 2021

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 2-11*, se considera el uso de baterías LiPo debido a que cuentan con un mayor voltaje y corriente nominal, que permite el suministro suficiente de energía a todos los componentes electrónicos, además, cuenta con un tamaño reducido junto con un peso bajo.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se detallan los requerimientos de cada prototipo electrónico, sus concepciones y diseños de arquitectura, los componentes *hardware* de cada uno, sus esquemas de conexión, el *software* y los algoritmos utilizados para la programación y, por último, la estructura que debe tener cada prototipo.

#### 3.1 Requerimientos de los prototipos

En base a las investigaciones realizadas en el capítulo anterior, se considera el uso de dos prototipos, un control remoto como sistema de desplazamiento y un robot móvil como dispositivo móvil, cada uno de los prototipos cuenta con sus propios requerimientos, para lo cual, en las siguientes secciones se analiza cada prototipo por separado.

##### 3.1.1 *Requerimientos del prototipo de control remoto*

A continuación, se detallan los requerimientos que debe cumplir el prototipo de control remoto:

- Debe integrar un acelerómetro y un giroscopio para que en conjunto permitan el registro de los movimientos de la mano del usuario.
- Debe integrar un procesador para el procesamiento de los datos registrados por los sensores inerciales y así, obtener medidas angulares en tres ejes coordenados.
- Debe permitir el desplazamiento del robot móvil mediante seis movimientos de la mano: extensión, de 15° a 65° para desplazar el robot hacia atrás; flexión, de 15° a 70° para desplazar el robot hacia adelante; desviación radial, de 15° a 25° para desplazar el robot a la derecha; desviación cubital, de 15° a 30° para desplazar el robot a la izquierda; pronación, de 15° a 90° para girar el robot sobre su propio eje derecho; supinación, de 15° a 120° para girar el robot sobre su propio eje izquierdo.
- Debe contar con una posición neutral, donde, las variaciones de cada movimiento de la mano que sean menores a 15° en cada eje no se detecten y el robot móvil permanezca en reposo.

- Las medidas angulares de cada movimiento de la mano se deben mapear en medidas de velocidad en m/s.
- La velocidad del robot móvil debe aumentar conforme aumente el ángulo de giro en cada eje, de igual manera, la velocidad del robot debe disminuir cuando el ángulo de giro disminuya.
- Debe contar con comunicación inalámbrica por Bluetooth para establecer comunicación con el robot móvil y así, enviar los datos de movimientos de la mano y velocidad.
- Su autonomía de funcionamiento debe ser de 25 minutos por medio de una batería y, además, debe recargarse mediante un módulo cargador de baterías.
- Debe integrar una pantalla OLED que indique si se ha establecido comunicación con el robot móvil, los ángulos de giro de los movimientos de la mano, la velocidad que adquiere el robot móvil, el nivel de carga de la batería y un aviso de recarga de batería al 10%.
- El usuario debe controlar al robot móvil mediante el control remoto a una distancia máxima de 50 metros.
- Su estructura debe ser de tamaño reducido para acoplarse en un guante.

### ***3.1.2 Requerimientos del prototipo de robot móvil***

A continuación, se detallan los requerimientos que debe cumplir el prototipo de robot móvil:

- Debe contar con comunicación inalámbrica por Bluetooth para establecer comunicación con el control remoto y así, recibir los datos de movimientos de la mano y la velocidad a la que debe desplazarse. Estos datos deben ser transmitidos de regreso hacia una aplicación móvil.
- Para su desplazamiento, debe contar con cuatro ruedas omnidireccionales: un par de ruedas zurdas y un par de ruedas diestras ubicadas a los laterales de su estructura y acopladas a cuatro motores de corriente continua.
- Su velocidad debe ser de 1 m/s y de acuerdo con las variaciones de velocidad recibidas del control remoto debe desplazarse hacia adelante, hacia atrás, a la izquierda, a la derecha, girar sobre su propio eje izquierdo y girar sobre su propio eje derecho.

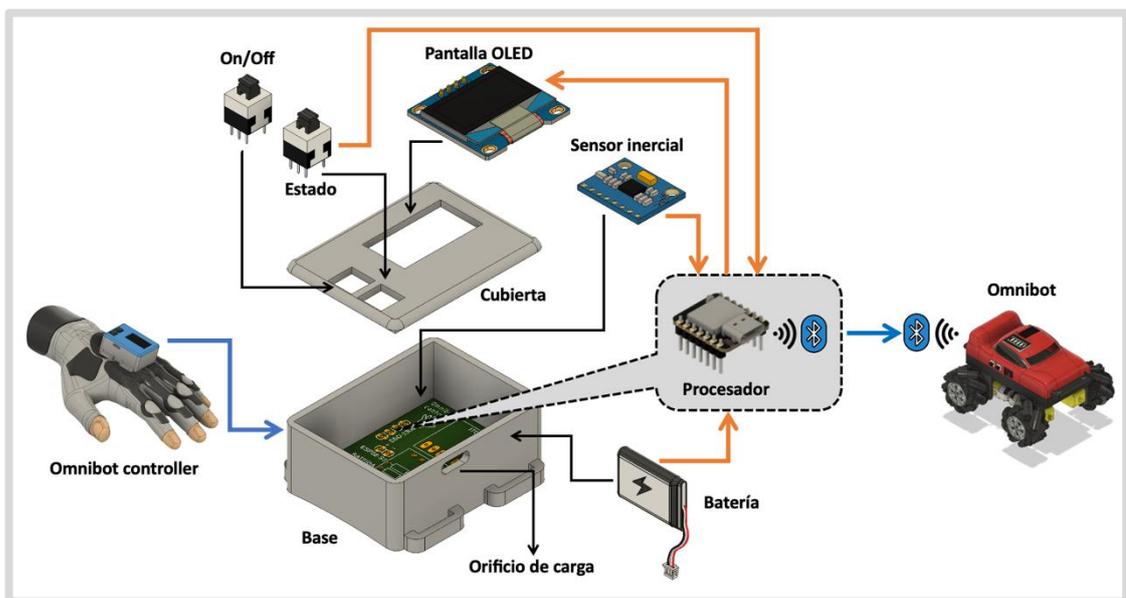
- Debe integrar un procesador junto con puentes H para controlar el sentido de giro de los motores y su velocidad mediante el mapeo de señales PWM, considerando que al 0% de la señal el robot se frena y al 100% de la señal, el robot se desplaza a velocidad máxima.
- Para su desplazamiento hacia delante, los cuatro motores acoplados a las cuatro ruedas deben tener polarización directa.
- Para su desplazamiento hacia atrás, los cuatro motores acoplados a las cuatro ruedas deben tener polarización inversa.
- Para su desplazamiento hacia la derecha, el par de motores acoplados a las ruedas zurdas deben tener polarización directa y el par de motores acoplados a las ruedas diestras deben tener polarización inversa.
- Para su desplazamiento hacia la izquierda, el par de motores acoplados a las ruedas zurdas deben tener polarización inversa y el par de motores acoplados a las ruedas diestras deben tener polarización directa.
- Para el giro sobre su propio eje derecho, los dos motores de las ruedas laterales izquierdas deben tener polarización directa y los dos motores de las ruedas laterales derechas deben tener polarización inversa.
- Para el giro sobre su propio eje izquierdo, los dos motores de las ruedas laterales izquierdas deben tener polarización inversa y los dos motores de las ruedas laterales derechas deben tener polarización directa.
- Debe integrar una pantalla OLED que indique si se ha establecido comunicación inalámbrica con el control remoto y, además, un interruptor que permita el cambio de estado de visualización entre la velocidad del robot y sus respectivos ángulos de giro.
- Su autonomía de funcionamiento debe ser de 25 minutos por medio de una batería que deberá recargarse mediante un módulo cargador de baterías. Además, debe integrar un indicador de carga que permita la visualización del estado de carga de la misma.
- Su estructura debe tener la forma de un automóvil y además, debe contar con orificios para la inserción de los componentes electrónicos.

### 3.2 Concepción de la arquitectura de los prototipos

En base a los requerimientos planteados, se establecen las arquitecturas de los prototipos de control remoto y robot móvil que se los denominan como *omnibot controller* y *omnibot*, respectivamente.

#### 3.2.1 Concepción de la arquitectura del prototipo de control remoto

En la *Ilustración 3-1* se presenta arquitectura del prototipo de control remoto. El prototipo cuenta con un procesador con capacidad de comunicación inalámbrica por Bluetooth que permite el envío de datos hacia el robot móvil, un sensor inercial que registra de los movimientos de la mano del usuario, además, integra una pantalla OLED que indica los ángulos de giro y la velocidad a la que se desplaza el robot móvil. Para el encendido del prototipo y cambio de estado de visualización en la pantalla se utilizan interruptores, por último, cuenta con una batería que alimenta todos los dispositivos que integran el prototipo e interruptores.



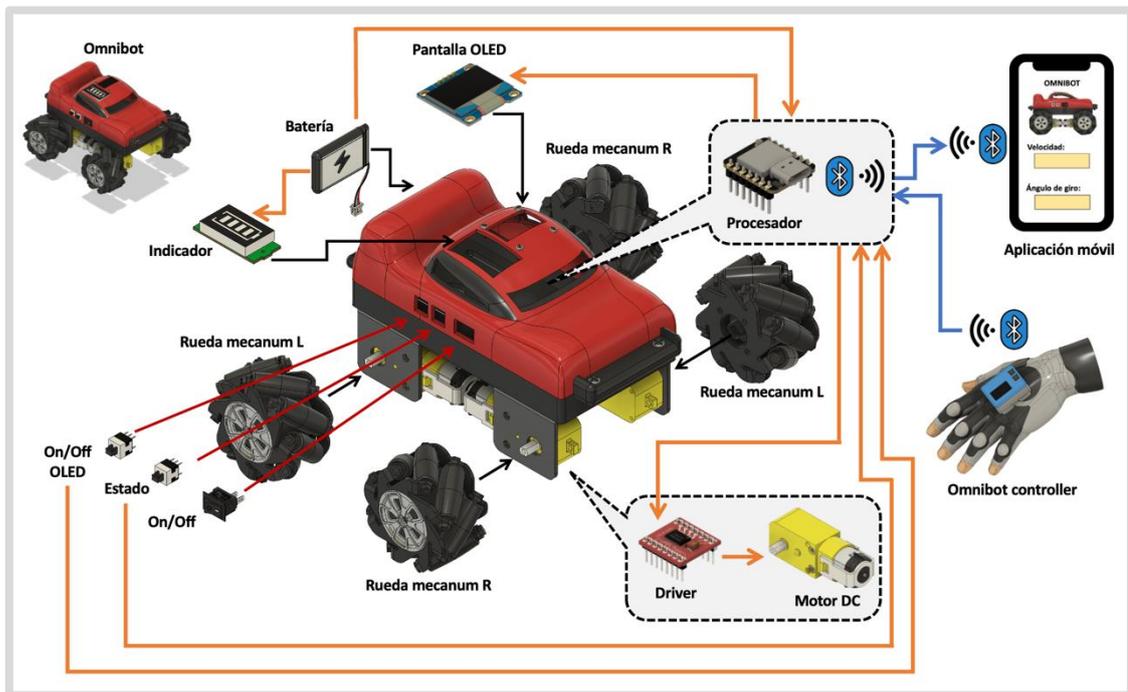
**Ilustración 3-1:** Concepción de la arquitectura del prototipo de control remoto

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

#### 3.2.2 Concepción de la arquitectura del prototipo de robot móvil

En la *Ilustración 3-2* se presenta la arquitectura del prototipo de robot móvil. El prototipo cuenta con un procesador con capacidad de comunicación inalámbrica por Bluetooth que recibe los datos del control remoto y, además, transmite los datos de regreso hacia una aplicación móvil. Considerando un robot omnidireccional, cuenta con cuatro ruedas *mecanum*, dos ruedas zurdas y

dos diestras ubicadas a los laterales del robot y que se controlan mediante puentes H y motores de corriente continua. Integra una pantalla OLED que indica la velocidad del robot móvil y sus medidas angulares correspondientes. Cuenta con interruptores para el encendido del prototipo, encendido de la pantalla y cambio de estado de visualización en la misma, por último, el prototipo se alimenta por medio de una batería a la cual se conecta un módulo indicador de carga para conocer su estado de recarga.



**Ilustración 3-2:** Concepción de la arquitectura del prototipo de robot móvil

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.2.3 Descripción del método de control

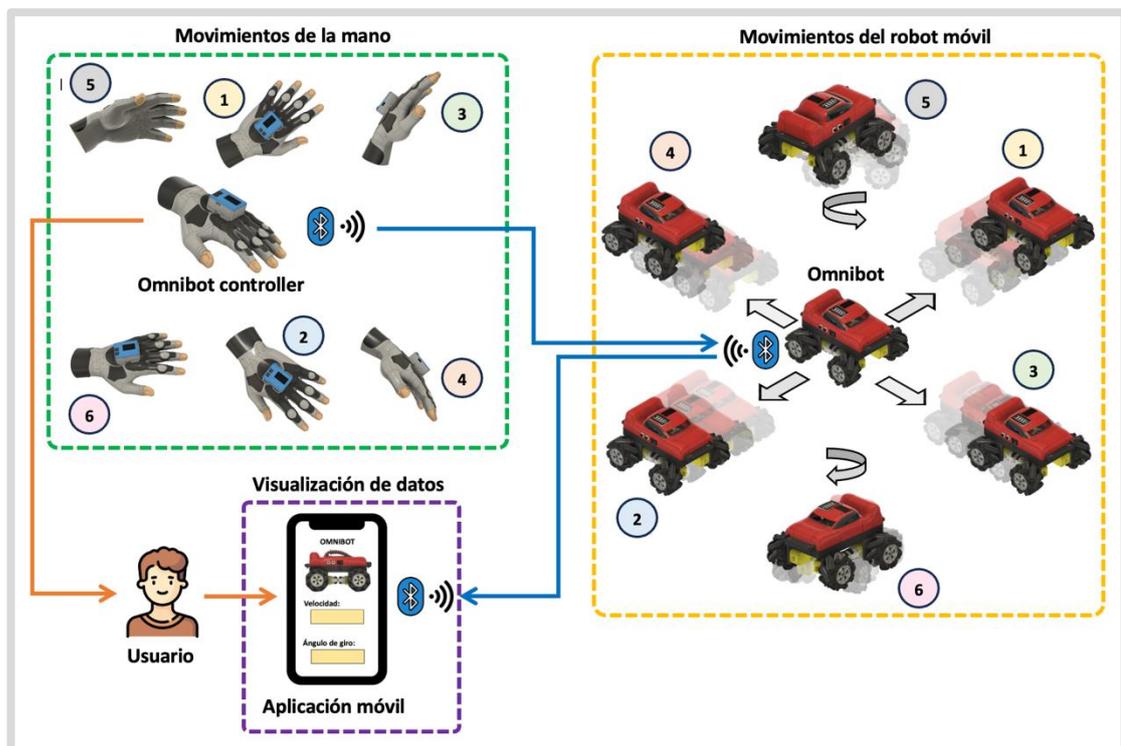
En la *Ilustración 3-3* se observa la interacción de tres bloques fundamentales que conforman las arquitecturas de los prototipos:

**Movimientos de la mano.** – El usuario se coloca el prototipo de control remoto en la mano y realiza los seis movimientos fundamentales: flexión, extensión, desviación radial, desviación cubital, supinación y pronación. Estos movimientos se procesan y se convierten en medidas angulares y de velocidad, que posteriormente se transmiten hacia el prototipo de robot móvil mediante comunicación por Bluetooth.

**Movimientos del robot móvil.** – Mediante comunicación por Bluetooth, el robot recibe los datos de medidas angulares y velocidad del control remoto y, en consecuencia, se desplaza en seis

direcciones diferentes: hacia adelante, hacia atrás, a la izquierda, a la derecha, giro sobre su propio eje izquierdo, giro sobre su propio eje derecho. Además, el robot móvil transmite los datos de regreso hacia una aplicación móvil.

**Visualización de datos.** – Está compuesto por una aplicación móvil que receipta los datos enviados por el robot móvil mediante comunicación por Bluetooth, donde, el usuario puede visualizar en tiempo real las medidas angulares de los tres ejes de movimiento y la velocidad correspondiente a cada eje.



**Ilustración 3-3:** Descripción del método de control de los prototipos

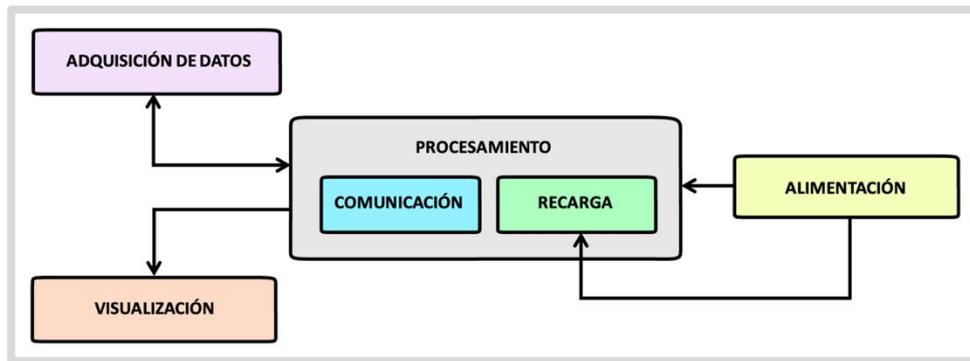
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.3 Diseño de la arquitectura de los prototipos

A continuación, se detallan los diagramas de bloques en base a la concepción de las arquitecturas de los prototipos, donde, se explica el funcionamiento de cada bloque.

#### 3.3.1 *Diseño de la arquitectura del control remoto*

En la *Ilustración 3-4* se presenta el diagrama de bloques que rige el funcionamiento de este prototipo y se detalla la función de cada bloque.



**Ilustración 3-4:** Diagrama de bloques del prototipo de control remoto

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Bloque de adquisición de datos.** – Contiene un acelerómetro y un giroscopio, que permiten la medición de aceleración y velocidad angular, respectivamente de cada uno de los movimientos de la mano que realice el usuario. Este bloque se encarga de almacenar los datos obtenidos en variables para su procesamiento. Además, se comunica con el bloque de procesamiento de forma bidireccional para el envío de los datos adquiridos y su alimentación por parte del bloque de alimentación.

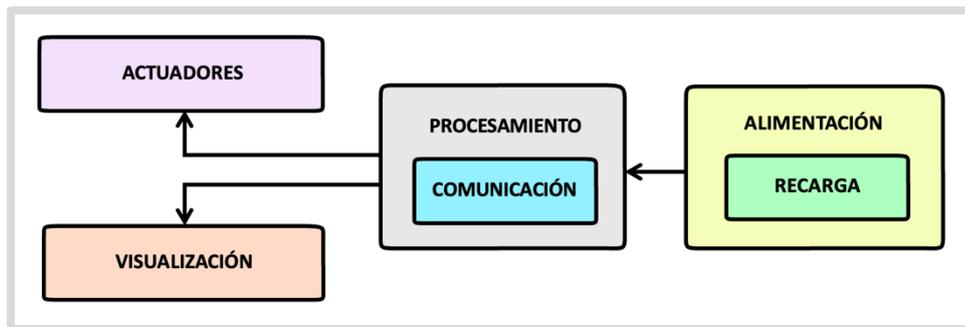
**Bloque de procesamiento.** – Contiene una tarjeta de desarrollo con capacidad de comunicación por Bluetooth y, además, integra un módulo cargador de baterías. Dentro de este bloque los datos adquiridos se procesan mediante algoritmos matemáticos para obtener medidas angulares que posteriormente se mapean en velocidad. Este bloque también contiene a los bloques de comunicación y recarga para la transmisión de datos mediante Bluetooth y la recarga de la batería, respectivamente. Este bloque se comunica con el bloque de visualización que le permite al usuario visualizar diferentes parámetros.

**Bloque de visualización.** – Recibe los datos del bloque de procesamiento y la respuesta de comunicación inalámbrica del bloque de comunicación. Este bloque contiene una pantalla OLED que indica si se ha establecido la comunicación con el robot móvil y también permite la visualización de medidas angulares, la velocidad del robot móvil y el porcentaje de carga de batería del bloque de alimentación.

**Bloque de alimentación.** – Contiene una batería LiPo que se encarga de la alimentación del bloque de procesamiento, el cual, posteriormente suministra energía a los bloques de adquisición de datos y visualización. Este bloque se comunica con el bloque de recarga que le permite al usuario cargar la batería cuando se descargue por completo.

### 3.3.2 Diseño de la arquitectura del robot móvil

En la *Ilustración 3-5* se presenta el diagrama de bloques que rige el funcionamiento de este prototipo y se detalla la función de cada bloque.



**Ilustración 3-5:** Diagrama de bloques del prototipo de robot móvil.

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Bloque de procesamiento.** – Contiene una tarjeta de desarrollo con capacidad de comunicación por Bluetooth y dos puentes H, en conjunto, se encargan del mapeo de señales PWM para la regulación de velocidad de motores de corriente continua. Dentro de este bloque se encuentra contenido el bloque de comunicación, que se encarga de la recepción de datos del control remoto. Este bloque se comunica con el bloque de actuadores para el envío de las señales PWM y con el bloque de visualización que le permite al usuario visualizar diferentes parámetros.

**Bloque de actuadores.** – Contiene cuatro motores de corriente continua acoplados a cuatro ruedas omnidireccionales que aumentan o disminuyen su velocidad de giro de acuerdo con las señales PWM receptadas del bloque de procesamiento, de esta manera, se logra el desplazamiento del robot móvil en las seis direcciones establecidas.

**Bloque de visualización.** – Recibe los datos del bloque de procesamiento. Este bloque contiene una pantalla OLED junto con un interruptor para encender o apagar la pantalla, la cual, indica si se ha establecido la comunicación con el control remoto y también permite la visualización de medidas angulares y la velocidad del robot móvil.

**Bloque de alimentación.** – Contiene una batería LiPo que se encarga de la alimentación del bloque de comunicación, que posteriormente, suministra energía a los bloques de actuadores y visualización. También contiene un indicador de carga para la batería que indica el estado y el nivel de carga de la misma. Dentro de este bloque está contenido el bloque de recarga que contiene

un módulo cargador de baterías LiPo que le permite al usuario cargar la batería cuando se descargue por completo.

### 3.4 Dispositivos *hardware* para el prototipo de control remoto

A continuación, se establecen los dispositivos *hardware* a utilizar en la implementación de este prototipo, donde, se describe cada elemento con sus características más relevantes.

#### 3.4.1 *Xiao ESP32-S3*

Es una tarjeta de desarrollo de alto rendimiento desarrollada por *Seed Studio* y cuenta con la tecnología del procesador ESP32-S3R8 de *Espressif* que funciona hasta 240 MHz. Incorpora un chip de administración de energía que permite que el módulo se alimente de forma independiente mediante el uso de una batería y recargar la misma a través de su puerto USB. Cuenta con comunicación inalámbrica de modo dual Bluetooth BLE 5.0 e incluye una antena U.FL para lograr una comunicación remota de más de 100 m. Esta tarjeta de desarrollo es de tamaño muy reducido, lo que la hace ideal para proyectos con espacio limitado (Seeed Studio, 2023). En la *Ilustración 3-6* se observa la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3.



**Ilustración 3-6:** Tarjeta Xiao ESP32-S3

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-1* se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo A*.

**Tabla 3-1:** Especificaciones técnicas de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	USB tipo C: 5 V, Batería: 3,8 V
Corriente de operación	USB tipo C: 19 mA, Batería: 22 mA
Consumo de energía	84 mW
Temperatura de operación	-40 – 65 °C
Corriente de carga con batería	50 mA

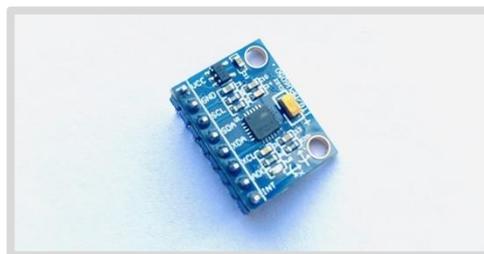
Especificación técnica	Detalles
Procesador	Xtensa LX7 de doble núcleo
Bluetooth	BLE: Bluetooth 5.0
Consumo de energía para Bluetooth BLE	85 mA
Memoria	PSRAM: 8 MB, Flash: 8 MB
Interfaz de comunicación	UART: 1, I <sup>2</sup> C: 1
Número de pines	14 (Digitales: 11, Analógicos: 11)
Recarga de batería	Si, mediante su puerto USB tipo C
Dimensiones (largo x ancho)	21 x 17,5 mm
Peso	2,2 gramos

Fuente: Seeed Studio, 2023

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.4.2 Sensor inercial GY-521

Está basado en la unidad de medida inercial MPU-6050 de *IvenSense*, que combina un acelerómetro y un giroscopio de tecnología MEMS. Tanto el acelerómetro como el giroscopio poseen tres ejes, dando un total de seis grados de libertad para el dispositivo. Se comunica a través de una interfaz I<sup>2</sup>C mediante resistencias *pull-up* y posee un rango de escala programable para el acelerómetro y el giroscopio, gracias a esto se logra una captura precisa de movimiento rápido y lento (SSDIELECT, 2023). En la *Ilustración 3-7* se observa el sensor inercial GY-521.



**Ilustración 3-7:** Sensor inercial GY-521

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-2* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del sensor inercial GY-521 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo B*.

**Tabla 3-2:** Especificaciones técnicas del sensor inercial GY-521

Especificación técnica	Detalles
Sensor integrado	MPU-6050
Voltaje de operación	3,3 – 5 V
Corriente de operación	5 mA, 500 $\mu$ A
Consumo de energía	3,5 mA

Especificación técnica	Detalles
Rango de medida del acelerómetro (ajustable)	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ g
Rango de medida del giroscopio (ajustable)	$\pm 250, \pm 500, \pm 1.000, \pm 2.000$ °/s
Convertor A/D	16 bits de salida digital
Dimensiones (largo x ancho)	16,4 x 21,2 mm
Peso	2,1 gramos

Fuente: SSDIELECT, 2023; Tecneu, 2023

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.4.3 Pantalla OLED SSD-1306

Desarrollada por *Adafruit*, es una pantalla *que* posee una resolución es de 128 x 64 píxeles, permitiendo controlar cada píxel de forma individual para mostrar texto en forma de gráficos. No necesita retroiluminación por ser OLED, lo que hace que su consumo de energía sea menor y aumente su contraste. Cuenta con una interfaz de comunicación I<sup>2</sup>C y está diseñada para trabajar a 5 V gracias a su regulador de voltaje (Electrónica Plett, 2023). En la *Ilustración 3-8* se observa la pantalla OLED SSD-1306.



**Ilustración 3-8:** Pantalla SSD-1306

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-3* se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la pantalla OLED SSD-1306 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo C*.

**Tabla 3-3:** Especificaciones técnicas de la pantalla OLED SSD-1306

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	3 – 5,5 V
Corriente de operación	220 mA
Driver	SSD1306
Resolución	128 x 64 píxeles
Consumo de energía	0,04 W cuando se encienden todos los píxeles
Interfaz de comunicación	I <sup>2</sup> C
Monocromo	Píxeles blancos (fondo negro)
Temperatura de trabajo	-30 – 70 °C

Especificación técnica	Detalles
Dimensiones (largo x ancho)	25 x 23 mm
Peso	5 gramos

Fuente: San José, 2022

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.4.4 Fuente de alimentación

Para seleccionar la capacidad de la fuente de alimentación, es necesario realizar el dimensionamiento teórico del consumo para cada dispositivo *hardware* que integra el prototipo de control remoto. En la *Tabla 3-4* se observa el cálculo del consumo de corriente para cada dispositivo considerando el parámetro de corriente de operación de sus especificaciones técnicas y la cantidad de dispositivos utilizados.

**Tabla 3-4:** Consumo teórico de corriente del prototipo de control remoto

Cantidad	Dispositivo <i>hardware</i>	Corriente de operación
1	Xiao ESP32-S3	85 mA + 22 mA = 107 mA
1	Módulo sensor inercial GY-521	5 mA
1	Pantalla OLED SSD-1306	220 mA
<b>Consumo total de corriente:</b>		332 mA

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 3-4*, se observa que el consumo total de corriente de los elementos *hardware* del prototipo es de 332 mA. Además, se debe considerar que su tiempo de funcionamiento es de 25 minutos. Mediante la *Ecuación 1-3*, se determina la capacidad de la batería LiPo requerida.

$$C_b = C_t \cdot t_f \quad (1-3)$$

Donde:

$C_b$ : es la capacidad de la batería LiPo medida en mA.

$C_t$ : es la corriente total que consume el dispositivo en mA.

$t_f$ : es el tiempo de funcionamiento del dispositivo en horas.

Con los datos conocidos, se obtiene un valor de 138,33 mAh. Entonces, se requiere una batería LiPo con una capacidad de al menos 140 mAh para alimentar el dispositivo durante un tiempo máximo de 25 minutos. Se elige la batería LiPo Turnigy 1s de 200 mAh que se observa en la *Ilustración 3-9*. Es una batería de alto rendimiento y fiabilidad, equipada con cables de descarga

de alta resistencia para minimizar la resistencia y soportar cargas de alta corriente durante su uso (ElectroStore, 2023).



**Ilustración 3-9:** Batería LiPo Turnigy 1s

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-5* se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la batería LiPo *Turnigy 1s* y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo D*.

**Tabla 3-5:** Especificaciones técnicas de la batería LiPo *Turnigy 1s*

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de suministro	3,7 V
Corriente de suministro	200mAh
Configuración	1s
Descarga constante	20C
Dimensiones (largo x ancho x altura)	42 x 18,5 x 5,5 mm
Peso	7 gramos

Fuente: AliExpress, [s.f.]

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5 Dispositivos *hardware* para el prototipo de robot móvil

A continuación, se establecen los dispositivos *hardware* a utilizar en la implementación de este prototipo, donde, se describe cada elemento con sus características más relevantes.

#### 3.5.1 Tarjeta de desarrollo *NodeMCU-32*

Integra el SoM (*System on Module*) ESP-WROOM-32 de *Espressif Systems*. Una de sus principales características es la conectividad inalámbrica mediante diversos protocolos como Wi-Fi, Bluetooth y BLE. Cuenta con una CPU de 32 bits de dos núcleos de 240 MHz que se pueden controlar de forma independiente. Internamente cuenta con una gran cantidad de periféricos para la conexión como sensores y amplificadores, además de interfaces para tarjetas SD, SPI, UART e I<sup>2</sup>C. El lenguaje más utilizado para el desarrollo de aplicaciones es C++ y cuenta con un

conversor USB – Serial para su programación mediante USB (Naylamp Mechatronics, 2023). En la *Ilustración 3-10* se observa la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32.



**Ilustración 3-10:** Tarjeta NodeMCU-32

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-6* se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la tarjeta de desarrollo NodeMCU–32 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo E*.

**Tabla 3-6:** Especificaciones técnicas de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de alimentación (USB)	3,3 – 5V
Voltaje de operación	3,3 V
Corriente de operación	5 $\mu$ A
Voltaje de Entradas/Salidas	3,3 V
Consumo de energía	50 mA
CPU	Xtensa LX6 de doble núcleo de 32 bits
Frecuencia de reloj	240 MHz
Bluetooth	V4.2 BR/EDR, BLE
Número de pines	38 pines: 24 GPIO, 16 PWM, 18 ADC, 4 I <sup>2</sup> C
Dimensiones (largo x ancho)	55 x 28 mm
Peso	6,8 gramos

**Fuente:** Naylamp Mechatronics, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.2 Motor de caja reductora TT de doble eje

Es un motor DC universal con caja reductora de 6 V a 200 rpm con relación de 48:1, que le permite entregar un excelente torque en un tamaño reducido con un voltaje bajo. Su caja reductora está compuesta de engranajes acoplados a un motor que permite reducir la velocidad de giro del motor para entregar una fuerza mecánica mayor. El motor está cubierto por una carcasa de plástico resistente color amarillo, no tóxico y además cuenta con un eje de plástico que sobresale a ambos lados de la carcasa para facilitar el anclaje de una rueda. Este tipo de motores es ideal para

proyectos de robótica móvil (HobbyDu, [s.f.]). En la *Ilustración 3-11* se observa el motor reductor TT de doble eje.



**Ilustración 3-11:** Motor TT de doble eje

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-7* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del motor reductor TT de doble eje y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo F*.

**Tabla 3-7:** Especificaciones técnicas del motor reductor TT de doble eje

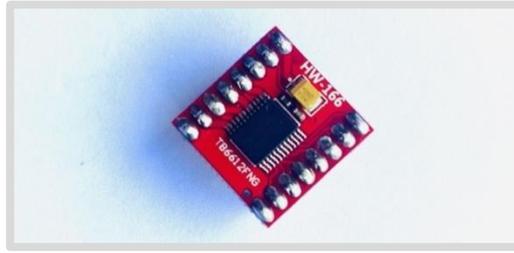
Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	3 – 6 V
Corriente de operación sin carga	150 mA +/- 10%
Consumo de corriente sin carga	100 mA (5 V)
Consumo de corriente nominal	140 mA (5 V)
Relación de engranajes	48:1
Velocidad angular nominal	200 rpm
Velocidad mínima de funcionamiento	3 V: 90 +/- 10% rpm; 6V: 200 +/- 10% rpm
Velocidad sin carga	3 V: 25,9 m/min; 6 V: 47,7 m/min
Dimensiones (largo x ancho x altura)	70 x 22 x 18 mm
Peso	30 gramos

**Fuente:** HobbyDu, [s.f.]

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.3 *Driver TB6612FNG*

Es un controlador dual para motores DC desarrollado por *Toshiba*, es ideal para el control de dos motores DC de tamaño reducido y para motores paso a paso bipolares. A diferencia de otros controladores, sus puentes H están basados en MOSFET que son mucho más eficientes que los BJT, esto permite un mayor suministro de corriente a los motores, extrayendo menos cantidad de voltaje de la fuente de alimentación lógica. Además, integra capacitores de suministro de energía y protección contra la inversión de polaridad del motor (SanDoRobotics, 2023). En la *Ilustración 3-12* se observa el *driver* TB6612FNG.



**Ilustración 3-12:** *Driver TB6612FNG*

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-8* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del *driver TB6612FNG* y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo G*.

**Tabla 3-8:** Especificaciones técnicas del *driver TB6612FNG*

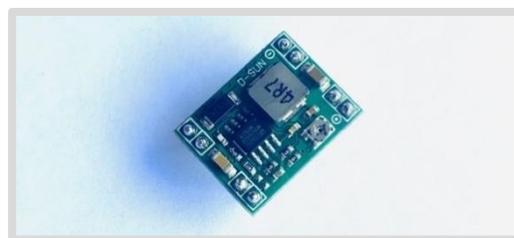
Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	2,7 – 5,5 V
Corriente de operación máxima	3 A por canal
Voltaje de alimentación de motores	4,5 – 13,5 V
Frecuencia PWM	100 KHz
Dimensiones (largo x ancho)	15,2 x 20,3 mm
Peso	3 gramos

**Fuente:** SanDoRobotics, 2023

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.4 *Convertidor DC-DC MP1584EN*

Es un regulador conmutado de tipo *step-down* que integra el circuito integrado MP1584EN de *Monolithic Power Systems*. Su función es suministrar un voltaje de salida constante inferior al voltaje de entrada frente a variaciones del voltaje de carga o, de entrada (AV Electronics, [s.f.]). En la *Ilustración 3-13* se observa el convertidor DC-DC MP1584EN.



**Ilustración 3-13:** *Convertidor MP1584EN*

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-9* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del convertidor DC-DC MP1584EN y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo H*.

**Tabla 3-9:** Especificaciones técnicas del convertidor DC–DC MP1584EN

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	4,5 – 28 V
Voltaje de salida	0,8 – 20 V
Corriente de salida máxima	3 A, 1 A recomendado
Potencia de salida	20 W
Temperatura de trabajo	-40 – 85 °C
Protección de temperatura	Si (apaga la salida)
Protección de corto circuito	Si, hasta 4 A
Protección frente a inversión de polaridad	No
Dimensiones (largo x ancho)	17 x 22 mm
Peso	3 gramos

Fuente: AV Electronics, [s.f.]

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.5 Fuente de alimentación

Se realiza el dimensionamiento teórico de consumo para cada dispositivo *hardware* que integra el prototipo. En la *Tabla 3-10* se observa el cálculo del consumo de corriente para cada dispositivo considerando el parámetro de corriente de operación de sus especificaciones técnicas y la cantidad de dispositivos utilizados. Además de los dispositivos descritos anteriormente, también se considera el uso de la misma pantalla OLED SSD-1306 del prototipo de control remoto.

**Tabla 3-10:** Consumo de corriente del prototipo de robot móvil

Cantidad	Dispositivo <i>hardware</i>	Corriente de operación
1	NodeMCU-32	50 mA
4	Motor reductor TT	100 mA
2	Driver TB6612FNG	4.000 mA
1	Convertidor DC-DC MP1584EN	1.000 mA
1	Pantalla OLED SSD-1306	220 mA
<b>Consumo total de corriente:</b>		5.830 mA

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base a la información de la *Tabla 3-10*, se observa que el consumo total de corriente de los elementos *hardware* del prototipo es de 5.830 mA. Además, se debe considerar que su tiempo de funcionamiento es de 25 minutos. Resolviendo la *Ecuación 1-3*, se obtiene un valor de 2.237,5 mAh, por lo que la batería LiPo debe tener una capacidad de por lo menos 2.238 mAh. Se elige la batería LiPo Turnigy 2s de 1.000 mAh que se observa en la *Ilustración 3-14*, la misma cuenta con un alto rendimiento y fiabilidad a un bajo costo. Está equipada con conectores chapados en oro y conectores de balance de estilo JST-XH (ElectroStore, 2023).



**Ilustración 3-14:** Batería LiPo Turnigy 2s

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-11* se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la batería LiPo Turnigy 2s y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo I*.

**Tabla 3-11:** Especificaciones técnicas de la batería LiPo Turnigy 2s

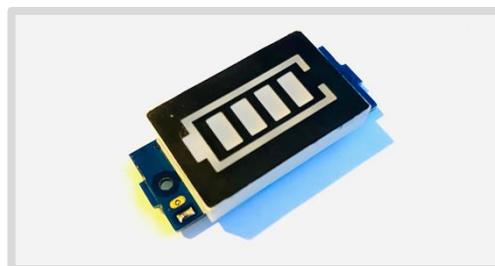
Especificación técnica	Detalles
Voltaje de suministro	7,4 V
Corriente de suministro por celda	1.000 mAh
Descarga constante	20C
Dimensiones (largo x ancho x altura)	72 x 34 x 14 mm
Peso	59 gramos

**Fuente:** ElectroStore, [s.f.]

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.6 Módulo indicador de carga de batería SPBKAS-5.8

Este módulo facilita la evaluación de la carga de las baterías de litio y lipo de dos celdas. Al conectar las terminales de la batería, el módulo te proporciona una representación sencilla y comprensible del nivel de carga (Hobbytronica, [s.f.]). En la *Ilustración 3-15* se observa el módulo indicador de carga SPBKAS-5.8.



**Ilustración 3-15:** Módulo SPBKAS-5.8

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-12* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del módulo cargador de baterías BM 18650 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo J*.

**Tabla 3-12:** Especificaciones técnicas del modulo indicador SPBKAS-5.8

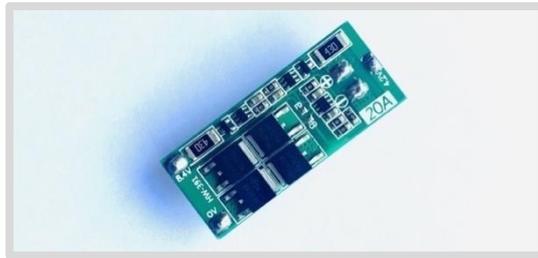
Especificación técnica	Detalles
Voltaje de operación	6,6 – 8,4 V
Tipo de batería	Li-Ion, LiPo
Capacidad de carga	3000 mAh
Dimensiones (largo x ancho x alto)	45 x 20 x 8 mm
Peso	8 gramos

Fuente: Hobbytronica, [s.f.]

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.7 Módulo cargador de baterías BMS 18650

Es un módulo de recarga fabricado por la empresa *Homemade Workshop* y se utiliza para la recarga de baterías LiPo de dos celdas mediante la circulación de voltaje de la batería hacia la carga hasta que disminuya a valores mínimos. Por otro lado, al momento de cargar la batería cuando ha alcanzado el voltaje suficiente, el circuito corta la entrada de corriente permitiendo la descarga (Vistrónica, [s.f.]). En la *Ilustración 3-16* se observa el módulo BMS-18650.



**Ilustración 3-16:** Módulo BMS-18650

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-13* se presentan las especificaciones técnicas más importantes del módulo cargador de baterías BM 18650 y su información técnica detallada se adjunta en el *Anexo K*.

**Tabla 3-13:** Especificaciones técnicas del módulo cargador de baterías BMS-18650

Especificación técnica	Detalles
Voltaje de carga	8,4 – 9 V
Voltaje de sobrecarga	4,1 – 4,2 V
Voltaje de descarga	2,4 – 2,6 V
Corriente máxima	20 A
Temperatura de trabajo	-40 – 85 °C
Dimensiones (largo x ancho)	48 x 20 mm
Peso	3 gramos

Fuente: Vistrónica, [s.f.]

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.5.8 Ruedas omnidireccionales mecanum

Cuentan con un acoplamiento de 6,7 mm y están diseñadas para una maniobrabilidad de 360 grados con giros fáciles y movimiento lateral directo. Las ruedas constan de nueve rodillos de goma colocados entre dos placas de plástico. Además, sus gomitas son de alta calidad para una gran fuerza de fricción para un movimiento suave y ruido mínimo (Robo.in, [s.f.]). En la *Ilustración 3-17* se observan las ruedas omnidireccionales *mecanum*.



**Ilustración 3-17:** Ruedas *mecanum*

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Tabla 3-14* se presentan las especificaciones más importantes de las ruedas omnidireccionales *mecanum* de 60 mm.

**Tabla 3-14:** Especificaciones importantes de las ruedas *mecanum* de 60 mm

Especificación técnica	Detalles
Diámetro interior	3,3 mm
Diámetro exterior	60 mm
Espesor	28 mm
Número de rodillos de las ruedas	9
Capacidad de carga	5 kg
Peso	44 gramos

**Fuente:** Robo.in, [s.f.]

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

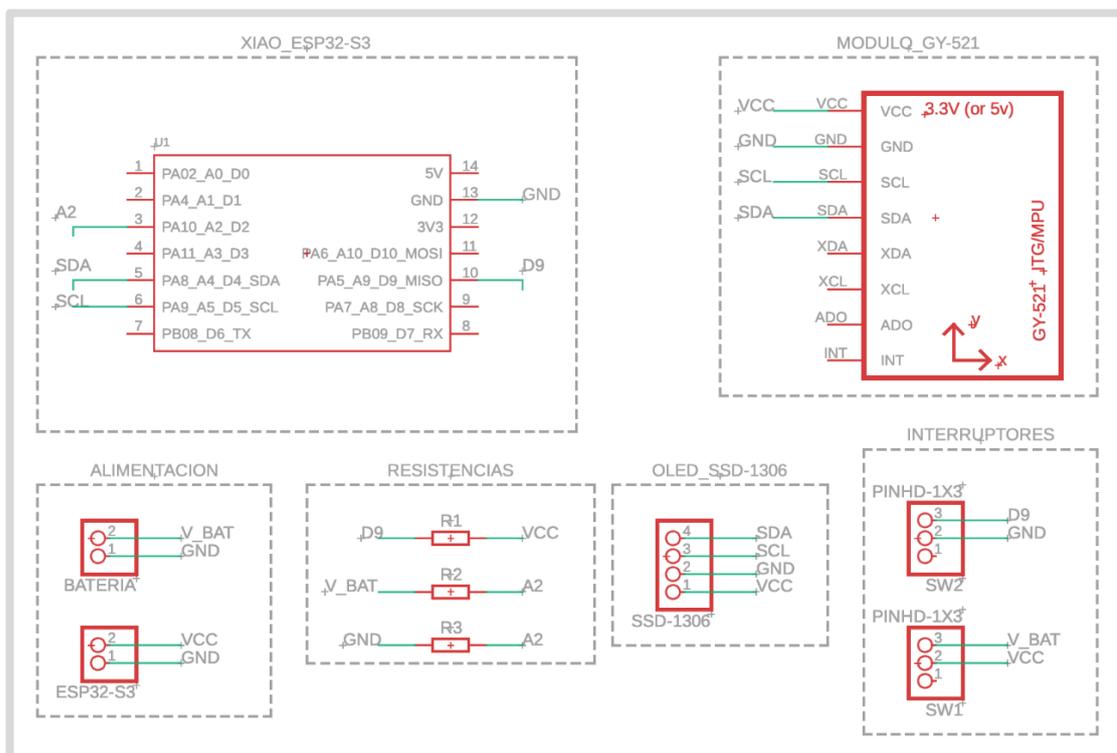
### 3.6 Diagramas de conexiones electrónicas de los prototipos

A continuación, en base a los dispositivos *hardware* de cada prototipo se detallan sus diagramas de conexiones que se realizan en el *software* de Fusion 360 en su versión 2.0.17, disponible en (Autodesk Inc., 2023). Esta plataforma combina CAD, CAM, CAE y PCB en un mismo entorno de *software* en la nube. Ofrece varias herramientas de diseño 3D que incluyen bocetos, modelado directo de superficie, paramétrico, de malla y de forma libre, así como renderizado, integración

de diseño PCB y ensamblaje. Además, tiene la función de simulación integrada para simular los diseños realizados (Autodesk Inc., 2023).

### 3.6.1 Esquema de conexiones del prototipo de control remoto

En la *Ilustración 3-18* se observa el diagrama de conexiones electrónicas del prototipo, que está conformado por la tarjeta de desarrollo Xiao EP32-S3, el sensor inercial GY-521, la pantalla OLED SSD-1306, tres resistencias y dos interruptores.



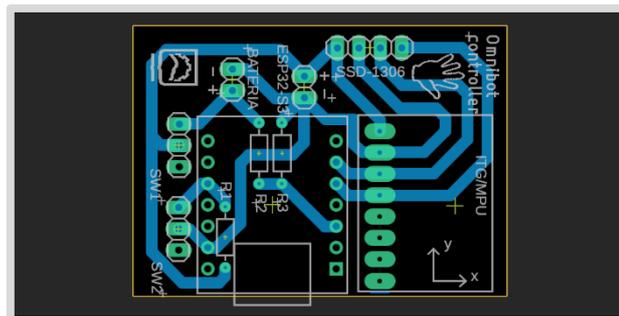
**Ilustración 3-18:** Diagrama de conexiones electrónicas del prototipo de control remoto

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

- El terminal positivo de la batería (V\_BAT) se conecta al terminal 2 de la bornera de la batería y su terminal negativo (GND) se conecta con el terminal 1 de la misma bornera.
- Los terminales positivo (VCC) y negativo (GND) de la tarjeta Xiao ESP32-S3 se conectan a los dos terminales de la bornera ESP32-S3.
- Para encender el circuito se utiliza un interruptor de dos posiciones, donde, el terminal 3 se conecta al terminal positivo de la batería y el terminal 2, al terminal 1 de la bornera ESP32-S3.

- Los terminales SDA y SCL de la tarjeta Xiao ESP32-S3 se conectan en común con los terminales SDA y SCL del sensor inercial GY-521 y la pantalla OLED SSD-1306. Estos dos últimos dispositivos se conectan a la bornera ESP32-S3 para su alimentación.
- Se utiliza otro interruptor, donde, se conecta el terminal 3 a un extremo de una resistencia de 10 kOhms, el otro extremo se conecta al pin digital D9 de la tarjeta Xiao ESP32-S3. Por último, el terminal 2 del interruptor se conecta al terminal 1 de la bornera ESP32-S3.
- Se implementa un divisor de tensión. Para lo cual, se conectan los dos extremos de dos resistencias de 100 kOhms a los terminales positivo y negativo de la batería respectivamente, los otros dos extremos de la resistencia se conectan en común hacia el pin analógico A2.

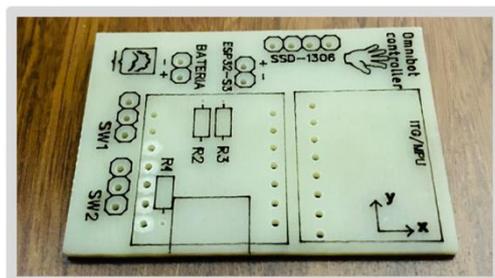
En la *Ilustración 3-19* se observa el diseño de la placa PCB del prototipo, realizado a base a su diagrama de conexiones electrónicas.



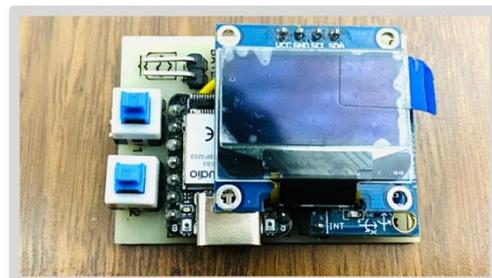
**Ilustración 3-19:** Diseño PCB del control remoto

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Ilustración 3-20* se observa la fabricación y la implementación física de la placa PCB del prototipo de control remoto.



a)



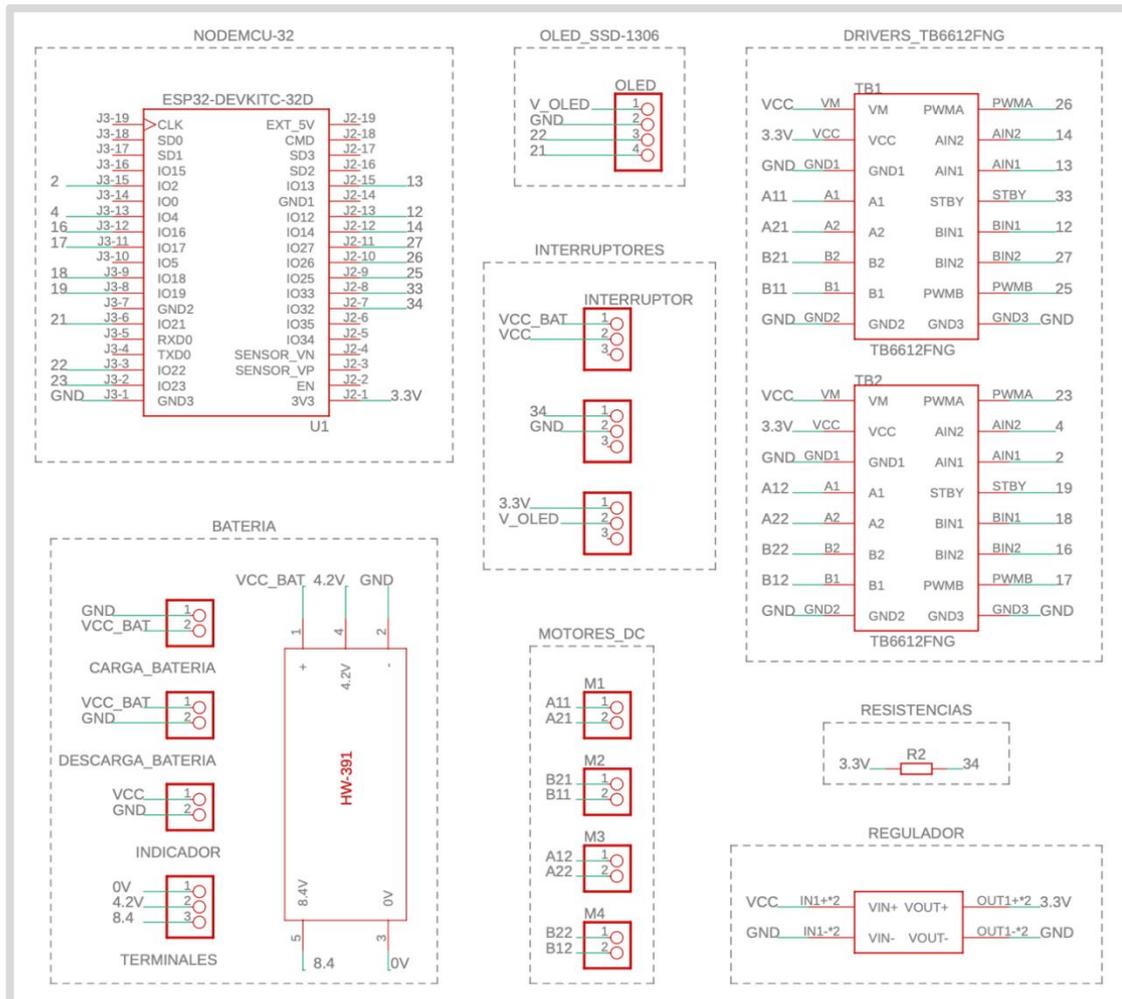
b)

**Ilustración 3-20:** PCB del control remoto: a) Fabricación, b) Implementación

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.6.2 Esquema de conexiones del prototipo de robot móvil

En la *Ilustración 3-21* se observa el diagrama de conexiones electrónicas del prototipo, que está conformado por la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32, dos *drivers* TB6612FNG, cuatro borneras para la conexión de los cuatro motores DC, una pantalla OLED SSD-1306, tres interruptores, un módulo cargador de baterías, un regulador de voltaje, una resistencia y borneras para las conexiones de la batería.



**Ilustración 3-21:** Diagrama de conexiones electrónicas del prototipo de robot móvil

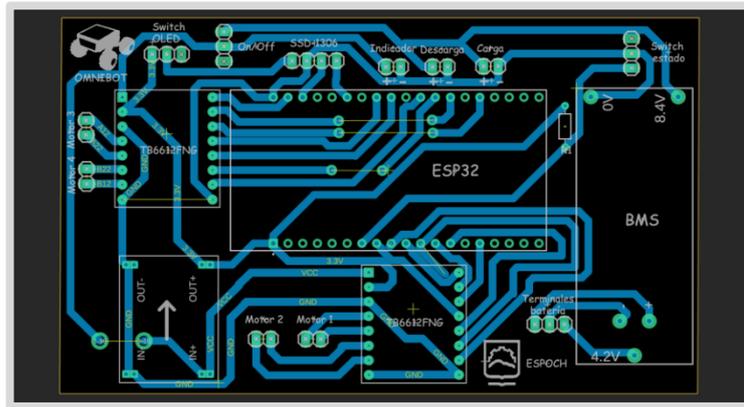
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

- El terminal positivo (VCC\_BAT) y el terminal negativo (GND) de la batería se conectan a la bornera de carga de batería para la alimentación de todo el circuito.
- El terminal VOUT+ del convertidor DC-DC se conecta en común a los pines: 3.3V de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32, VCC de los dos *drivers* TB6612FNG y VCC de la pantalla OLED

SSD-1306, este último componente se conecta junto con el interruptor S3 conectado directamente al convertidor DC-DC.

- Los pines SDA Y SCL de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32 conectan con los pines SDA y SCL de la pantalla OLED SSD-1306, respectivamente.
- Los pines de VM de los dos *drivers* TB6612FNG se conectan con el terminal de VCC del interruptor S1.
- Los pines 12, 13, 14, 25, 26, 27, 33 de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32 se conectan con los pines AIN1, BIN1, AIN2, BIN2, PWMA, PWMB, STBY del primer *driver* TB6612FNG.
- Los pines 2, 4, 16, 17, 18, 19, 23 de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32 se conectan con los pines AIN1, BIN1, AIN2, BIN2, PWMA, PWMB, STBY del segundo *driver* TB6612FNG.
- Los pines A1, A2, B2, B1 del primer *driver* TB6612FNG se conectan a los terminales X1-1, X1-2, X2-1, X2-2 de las borneras, respectivamente.
- Los pines A1, A2, B2, B1 del segundo *driver* TB6612FNG se conectan a los terminales X4-1, X4-2, X3-1, X3-2 de las borneras, respectivamente.
- Se conecta el interruptor S2 junto con una resistencia en configuración *pull-up* al pin digital 34 de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32.
- Para la carga de la batería LiPo, se conectan los terminales de 0V, 4.2V y 8.4V a los tres terminales de la bornera de terminales de carga que, a su vez, se conectan en común con los terminales 3, 4 y 5 del módulo BMS-18650, respectivamente.
- Para mostrar el nivel de carga en el indicador SPBKAS-5.8, se conectan sus terminales positivo y negativo a los terminales VCC y GND de la bornera de indicador de carga.
- Todos los pines y terminales GND de los componentes seleccionados se conectan en común al terminal negativo de la batería LiPo.

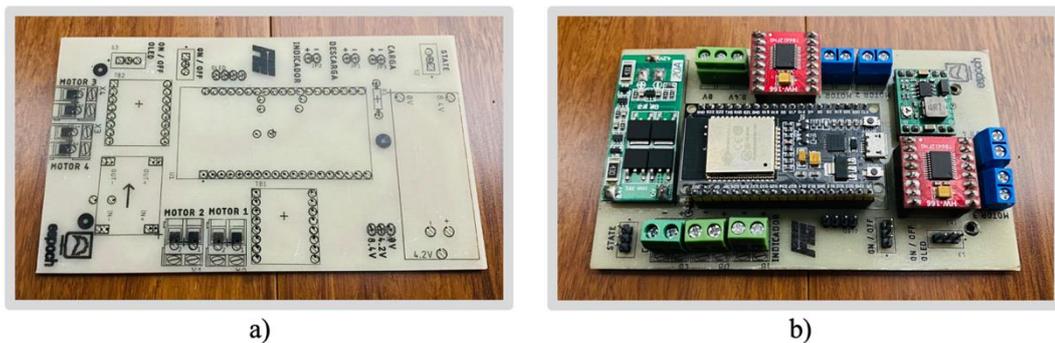
En la *Ilustración 3-22* se observa el diseño de la placa PCB del prototipo, realizado en base a su diagrama de conexiones electrónicas.



**Ilustración 3-22:** Diseño PCB del robot móvil

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Ilustración 3-23* se observa la fabricación y la implementación física de la placa PCB del prototipo de robot móvil.



**Ilustración 3-23:** PCB del robot móvil: a) Fabricación, b) Implementación

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.7 Software de desarrollo para los prototipos

A continuación, se detallan los diagramas de flujo para la programación de las tarjetas de desarrollo Xiao ESP32-S3 y NodeMCU-32. También, se presenta el desarrollo de la interfaz para la visualización de parámetros.

Para el desarrollo de la programación de las tarjetas de desarrollo se utiliza el *software* de Arduino IDE en su versión 2.0.3, disponible en (Arduino, 2021). Es una plataforma desarrollada por Arduino que proporciona un conjunto de herramientas de *software* que permiten a los programadores desarrollar y cargar el código necesario para hacer que una placa de desarrollo de Arduino o dispositivos compatibles con el IDE, funcionen acorde a sus necesidades de programación. Se basa en el lenguaje de programación C++ y permite escribir, depurar, editar y grabar el código de programa en los denominados *sketches* de una manera sencilla (Söderby y Hylén, [s.f.]).

### 3.7.1 Desarrollo del filtro de Kalman

Los datos registraros por el sensor inercial GY-521 se procesan mediante el filtro de Kalman para la obtención de medidas angulares precisas en los tres ejes coordenados. Para lo cual, se considera la medida angular del giroscopio como la medida principal y la medida angular del acelerómetro como la medida del observador para cada uno de los ejes  $x, y, z$ . A partir de estos parámetros, se propone el siguiente modelo matemático:

$$\begin{bmatrix} \text{angulo}^- \\ \text{deriva}^- \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{angulo} \\ \text{deriva} \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_k$$

Al resolver el producto de matrices se obtienen las siguientes ecuaciones para su programación en Arduino IDE:

$$\begin{aligned} \text{angulo}_k^- &= \text{angulo}_{k-1} + u_k \cdot dt - \text{deriva}_{k-1} \cdot dt \\ \text{deriva}_k^- &= \text{deriva}_{k-1} \end{aligned}$$

Se establece la matriz de covarianza de ruido en el proceso, la cual, es una matriz cuadrada de 2x2, donde, los términos de su diagonal principal contienen el sesgo tanto del acelerómetro como del giroscopio, estos parámetros se obtienen de la hoja de datos del sensor inercial GY-521:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,003 \end{bmatrix}$$

Al resolver la *Ecuación 2-9* con la matriz conocida  $Q$ , se obtienen los cuatro términos de la matriz estimada de covarianza que se deben programar en Arduino IDE:

$$\begin{aligned} P_{k00}^- &= Q_{00} + P_{00} - P_{10}dt - P_{01}dt + P_{11}dt^2 \\ P_{k01}^- &= Q_{01} + P_{01} - P_{11}dt \\ P_{k10}^- &= Q_{10} + P_{10} - P_{11}dt \\ P_{k11}^- &= Q_{11} + P_{11} \end{aligned}$$

Se considera la matriz de observación  $H$  como una matriz identidad de 1x2 y, por otra parte, la matriz de covarianzas  $R$  en las mediciones se obtiene en base a mediciones de prueba y error antes de la implementación del filtro:

$$H = (1 \ 0)$$

$$R = 0,05$$

Al resolver la *Ecuación 2-10* con los parámetros  $H$  y  $R$  se obtienen los dos términos de las ganancias de Kalman que se deben programar en Arduino IDE:

$$K_{k\ 00} = \frac{P_{k\ 00}^-}{P_{k\ 00}^- + R}$$

$$K_{k\ 10} = \frac{P_{k\ 10}^-}{P_{k\ 00}^- + R}$$

Mediante la resolución de la *Ecuación 2-11* se determinan los términos de los estados corregidos que se deben programar en Arduino IDE:

$$angulo_k = angulo_k^- + K_{k\ 00} \cdot (z_k - angulo_k^-)$$

$$deriva_k = deriva_k^- + K_{k\ 10} \cdot (z_k - angulo_k^-)$$

Por último, mediante la resolución de la *Ecuación 2-12* se calculan los términos para la matriz de covarianza corregida que se deben programar en Arduino IDE:

$$P_{k\ 00} = P_{k\ 00}^- - P_{k\ 00}^- \cdot K_{k\ 00}$$

$$P_{k\ 01} = P_{k\ 01}^- - P_{k\ 01}^- \cdot K_{k\ 00}$$

$$P_{k\ 10} = P_{k\ 10}^- - P_{k\ 00}^- \cdot K_{k\ 10}$$

$$P_{k\ 11} = P_{k\ 11}^- - P_{k\ 01}^- \cdot K_{k\ 10}$$

### 3.7.2 Programación del prototipo de control remoto

La tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3 se programa mediante el *software* de Arduino antes mencionado. El desarrollo de la programación considera el uso de las siguientes librerías:

- **Wire.h:** permite una interfaz de comunicación con dispositivos I<sup>2</sup>C.
- **Adafruit\_GFX.h:** permite la creación de gráficos centrales para pantallas OLED.
- **Adafruit\_SSD1306.h:** facilita la configuración de la pantalla OLED.
- **BLEDevice.h, BLEServer.h, BLEUtils.h, BLE2902.h:** en conjunto, permiten la creación de un servidor Bluetooth.

Para el correcto funcionamiento del prototipo, la programación se compone de la siguiente manera:

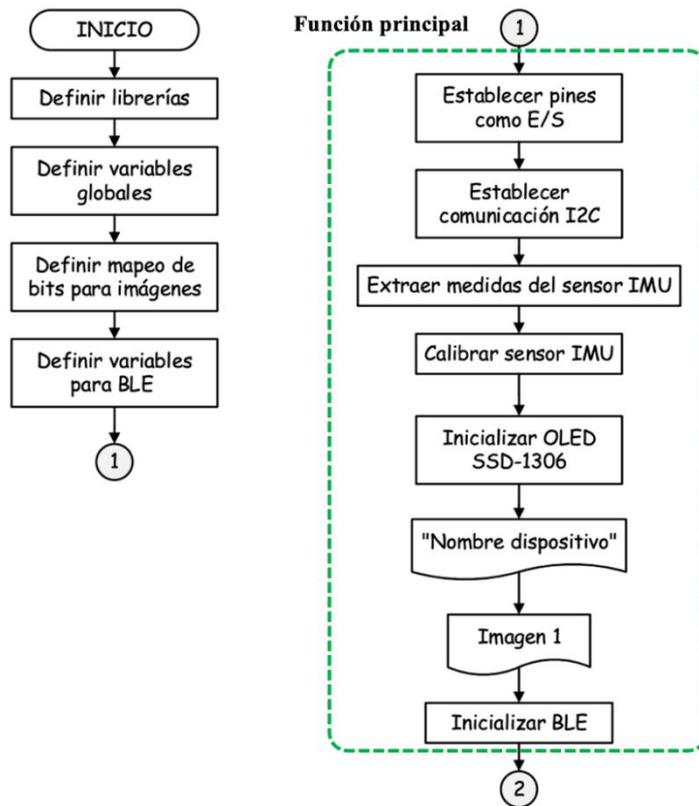
**Inicialización.** – Consta de la primera parte del diagrama de flujo que rige el funcionamiento de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

- Se incluyen las librerías: Wire.h, Adafruit\_GFX.h, Adafruit\_SSD1306.h, BLEDevice.h, BLEServer.h, BLEUtils.h, BLE2902.h.
- Se definen las variables globales, que incluyen los pines de entradas y salidas a los que se conectan los dispositivos *hardware* y, valores de tipo entero, flotante y cadenas de caracteres.
- Se define una matriz que contiene el mapeo en bits de diferentes imágenes para su impresión en la pantalla OLED.
- Se define un nombre para el servidor Bluetooth y se declaran las características con sus respectivos UUID's para todas las medidas que se van a transmitir.

**Función principal.** – Se encarga de la configuración inicial de los dispositivos *hardware* conectados a la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

- Se definen los pines de la tarjeta de desarrollo como entradas o salidas.
- Se inicializa el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C que permite la configuración de la pantalla OLED SSD-1306 y del sensor inercial GY-521.
- Se extraen las medidas del giroscopio y del acelerómetro del sensor inercial y, posteriormente se almacenan en valores de tipo flotante para su calibración.
- Se activa la pantalla OLED, que imprime el nombre del prototipo de control remoto por un corto período de tiempo.
- Se inicializa la comunicación por Bluetooth, donde, el servidor realiza la búsqueda del prototipo de robot móvil.

En la *Ilustración 3-24* se presenta de forma gráfica el diagrama de flujo correspondiente a la inicialización y a la función principal de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3.



**Ilustración 3-24:** Diagrama de flujo de la inicialización y función principal de la tarjeta Xiao ESP32-S3

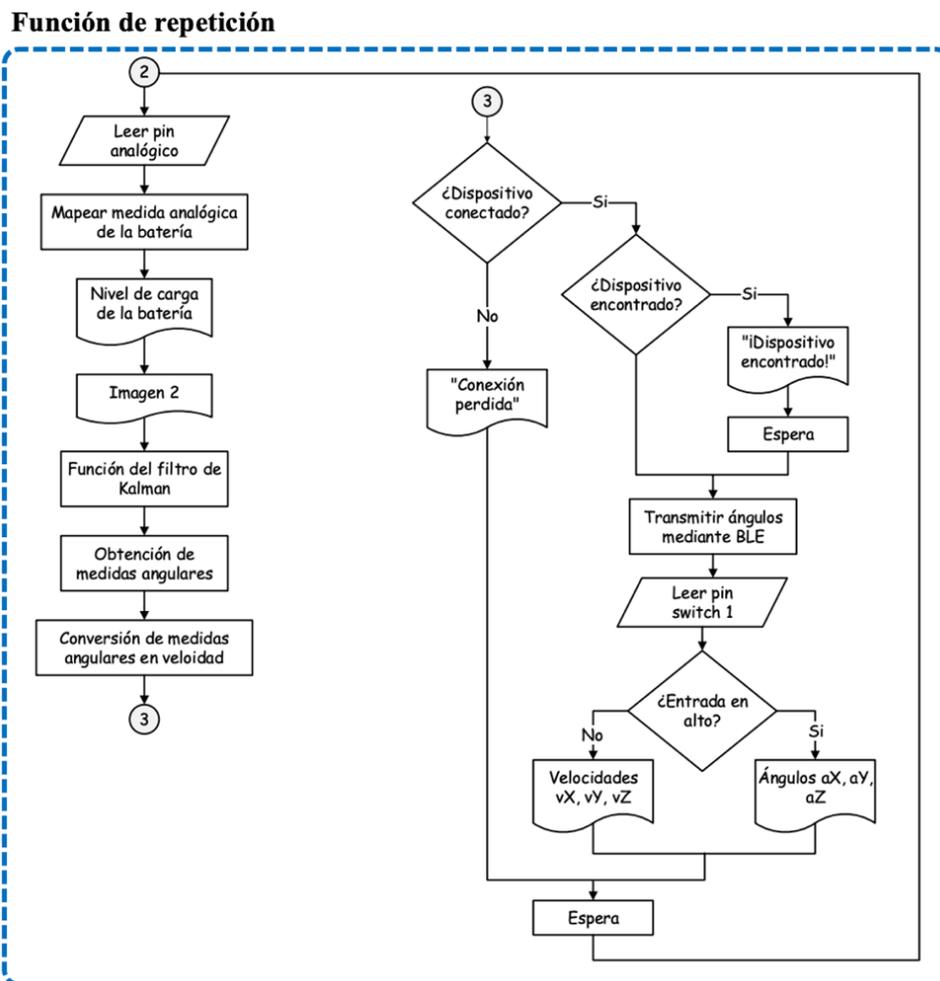
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Función de repetición.** – Incluye todas las instrucciones matemáticas y los algoritmos que debe realizar el prototipo de manera continua durante su funcionamiento. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

- Se realiza el mapeo de la lectura analógica del pin al cual se conecta la batería para conocer su estado de carga.
- Se crea una función interna para el filtro de Kalman, que contiene todas las ecuaciones matriciales del algoritmo para la obtención de las medidas angulares en los tres ejes coordenados.
- Las medidas obtenidas se mapean en medidas de velocidad de 0 a 1 m/s.
- Se realiza la comprobación de conectividad del servidor Bluetooth mediante un ciclo de repetición. Si el servidor está conectado, se comprueba la conectividad con el robot móvil, caso contrario, se imprime un mensaje de conexión perdida en la pantalla OLED.

- Se realiza la comprobación de conectividad por Bluetooth con el robot móvil mediante un ciclo de repetición. Si se establece la comunicación con el prototipo, se imprime en la pantalla OLED un mensaje de conexión exitosa por un tiempo de 4 segundos y posteriormente, se transmiten las medidas angulares y de velocidad hacia el robot móvil.
- Se realiza la comprobación de la lectura digital del interruptor que permite el cambio de estado de visualización de parámetros mediante un ciclo de repetición, si la entrada está en estado alto, se imprimen las medidas angulares en la pantalla OLED, caso contrario, se imprimen las velocidades del robot móvil.

En la *Ilustración 3-25* se presenta de forma gráfica el diagrama de flujo correspondiente a la función de repetición de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3. La programación completa realizada en Arduino IDE se adjunta en el *Anexo L*.



**Ilustración 3-25:** Diagrama de flujo de la función de repetición de la tarjeta Xiao ESP32-S3

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.7.3 Programación del prototipo de robot móvil

La tarjeta de desarrollo NodeMCU-32 también se programa mediante el *software* de Arduino. El desarrollo de la programación considera el uso de las siguientes librerías:

- **Wire.h:** permite una interfaz de comunicación con dispositivos I<sup>2</sup>C.
- **Adafruit\_GFX.h:** permite la creación de gráficos centrales para pantallas OLED.
- **Adafruit\_SSD1306.h:** facilita la configuración de la pantalla OLED.
- **BLEDevice.h:** permite la creación de un cliente Bluetooth.

Para el correcto funcionamiento del prototipo, la programación se compone de la siguiente manera:

**Inicialización.** – Consta de la primera parte del diagrama de flujo que rige el funcionamiento de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

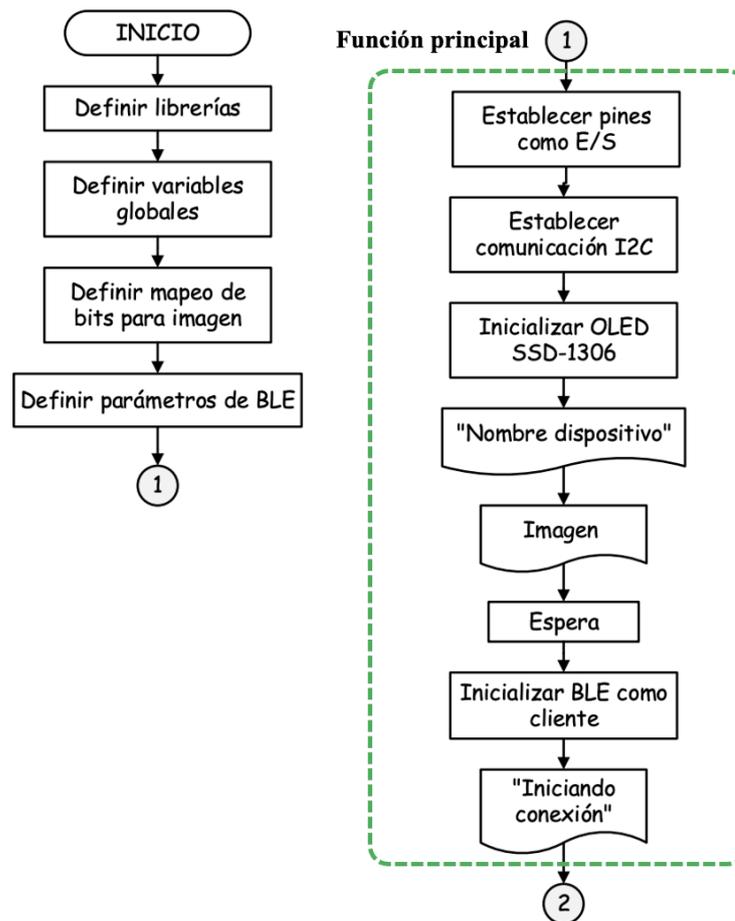
- Se incluyen las librerías: Wire.h, Adafruit\_GFX.h, Adafruit\_SSD1306.h, BLEDevice.h.
- Se definen las variables globales, que incluyen los pines de entradas y salidas a los que se conectan los dispositivos *hardware* y, valores de tipo entero y flotante.
- Se define una matriz que contiene el mapeo en bits de diferentes imágenes para su impresión en la pantalla OLED.
- Se define un nombre para el cliente Bluetooth y se declaran las características con los mismos UUID's utilizados para el control remoto para receptor las medidas transmitidas.

**Función principal.** – Se encarga de la configuración inicial de los dispositivos *hardware* conectados a la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

- Se definen los pines de la tarjeta de desarrollo como entradas o salidas.
- Se inicializa el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C que permite la configuración de la pantalla OLED SSD-1306.

- Se activa la pantalla OLED, que imprime el nombre del prototipo de robot móvil por un corto período de tiempo.
- Se inicializa la comunicación por Bluetooth, donde, el cliente realiza la búsqueda del prototipo de control remoto.

En la *Ilustración 3-26* se presenta de forma gráfica el diagrama de flujo correspondiente a la inicialización y a la función principal de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32.



**Ilustración 3-26:** Diagrama de flujo de la inicialización y función principal de la tarjeta NodeMCU-32

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Función de repetición.** – Incluye todas las instrucciones y ciclos de repetición que permiten el desplazamiento del robot móvil en las seis direcciones establecidas y, además, contiene los algoritmos que debe realizar el prototipo de manera continua durante su funcionamiento. A continuación, se explica el funcionamiento de esta función:

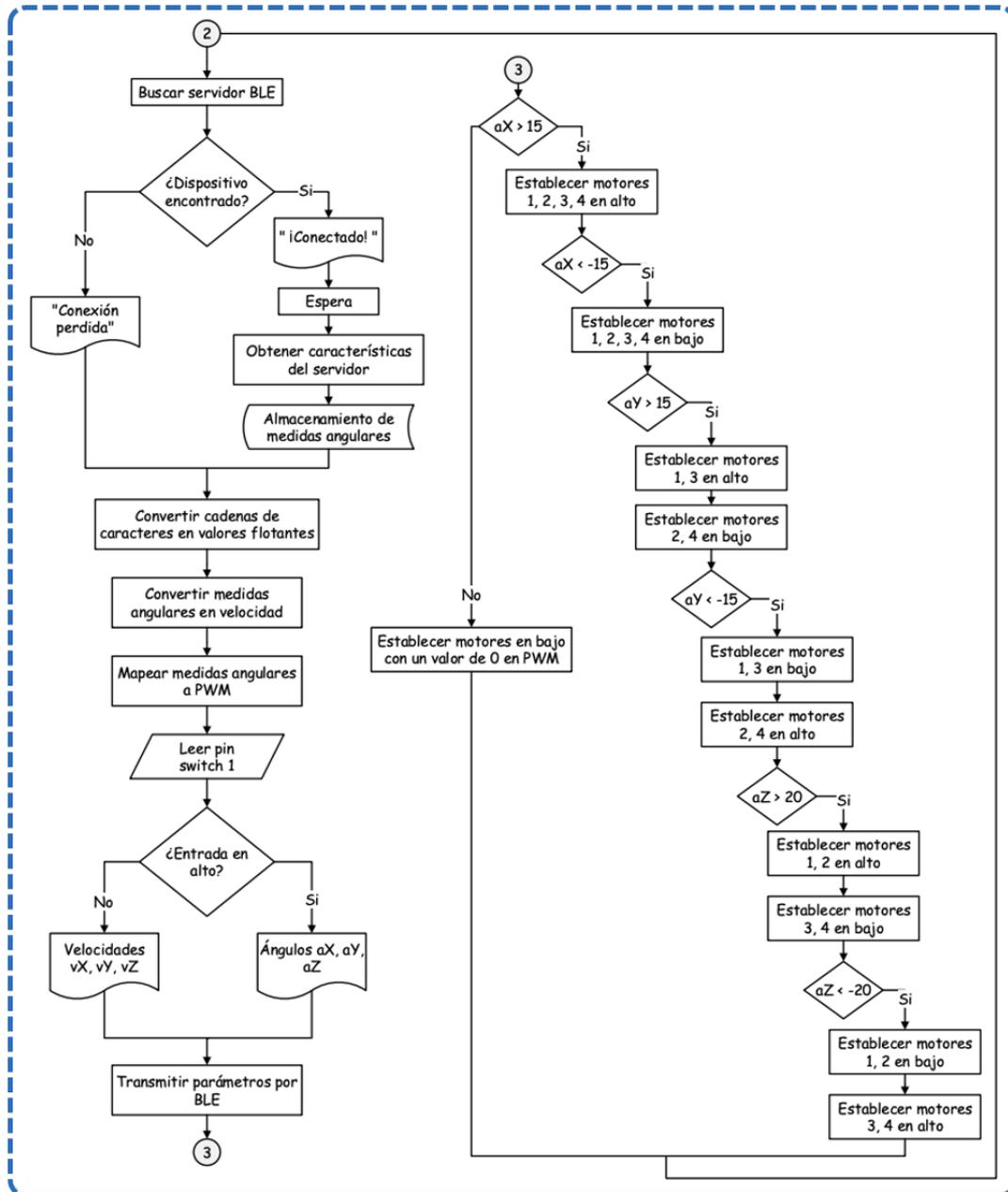
- Se realiza la búsqueda del control remoto mediante comunicación por Bluetooth.
- Mediante un ciclo de repetición, si se encuentra al control remoto, se imprime un mensaje de conexión exitosa en la pantalla OLED por un tiempo de 4 segundos, caso contrario, se imprime un mensaje de conexión perdida. Luego de 5 segundos, la tarjeta de desarrollo se reinicia de forma automática y realiza una nueva búsqueda. El ciclo de repetición termina cuando el robot móvil establece comunicación con el control remoto.
- Se obtienen las características del control remoto con sus identificadores UUID, que deben coincidir con los identificadores UUID del robot móvil. Las medidas angulares y de velocidad obtenidas, se almacenan en nuevas variables de cadenas de caracteres.
- Las medidas en formato de cadenas de caracteres se convierten en valores de tipo flotante para realizar las operaciones de mapeo correspondientes.
- Las medidas de velocidad de 0 a 1 m/s se mapean en señales PWM de 0 a 255, donde 0 representa el valor mínimo de la señal y 255 el valor máximo. Estas señales son enviadas a los dos *drivers* TB6612FNG para el control de velocidad y sentido de giro de los motores de corriente continua.
- Se realiza la comprobación de la lectura digital del interruptor que permite el cambio de estado de visualización de parámetros mediante un ciclo de repetición, si la entrada está en estado alto, se imprime la velocidad del robot móvil en la pantalla OLED, caso contrario, se imprimen las medidas angulares.
- Se transmiten mediante Bluetooth las medidas angulares y de velocidad convertidas en valores de tipo flotante de regreso hacia la aplicación móvil.
- Se realiza la comprobación de la lectura digital del interruptor que permite el cambio de estado de visualización de parámetros mediante un ciclo de repetición, si la entrada está en estado alto, se imprimen las medidas angulares en la pantalla OLED, caso contrario, se imprimen las velocidades del robot móvil.
- Mediante un ciclo de repetición, se realiza la comprobación de las medidas angulares tanto positivas como negativas y, en base cada una se establecen las condiciones para la activación

de los motores de corriente continua en alto o en bajo. Este ciclo de repetición termina cuando la conexión Bluetooth entre el control remoto y el robot móvil se interrumpe.

- Si el ángulo de giro en  $x$  positivo receptado del control remoto es mayor a  $15^\circ$ , los cuatro motores de corriente continua se establecen en un valor alto con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si el ángulo de giro en  $x$  negativo receptado del control remoto es menor a  $-15^\circ$ , los cuatro motores de corriente continua se establecen en un valor bajo con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si el ángulo de giro en  $y$  positivo receptado del control remoto es mayor a  $15^\circ$ , los dos motores acoplados a las ruedas zurdas del robot se establecen en alto, mientras que, los dos motores acoplados a las ruedas diestras se establecen en bajo con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si el ángulo de giro en  $y$  negativo receptado del control remoto es menor a  $-15^\circ$ , los dos motores acoplados a las ruedas zurdas del robot se establecen en bajo, mientras que, los dos motores acoplados a las ruedas diestras se establecen en alto con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si el ángulo de giro en  $z$  positivo receptado del control remoto es mayor a  $20^\circ$ , los dos motores acoplados a las ruedas laterales izquierdas del robot se establecen en bajo, mientras que, los dos motores acoplados a las ruedas laterales derechas se establecen en alto con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si el ángulo de giro en  $z$  negativo receptado del control remoto es menor a  $-20^\circ$ , los dos motores acoplados a las ruedas laterales izquierdas del robot se establecen en alto, mientras que, los dos motores acoplados a las ruedas laterales derechas se establecen en bajo con un valor de PWM variable de acuerdo con el mapeo de la velocidad.
- Si los ángulos receptados de los tres ejes  $x, y, z$  se establecen en un rango de entre  $-15^\circ$  a  $15^\circ$  para cada uno de los ejes, los cuatro motores de corriente coninua se establecen en bajo.

En la *Ilustración 3-27* se presenta de forma gráfica el diagrama de flujo correspondiente a la función de repetición de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32. La programación completa realizada en Arduino IDE se adjunta en el *Anexo M*.

### Función de repetición



**Ilustración 3-27:** Diagrama de flujo de la función de repetición de la tarjeta NodeMCU-32

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

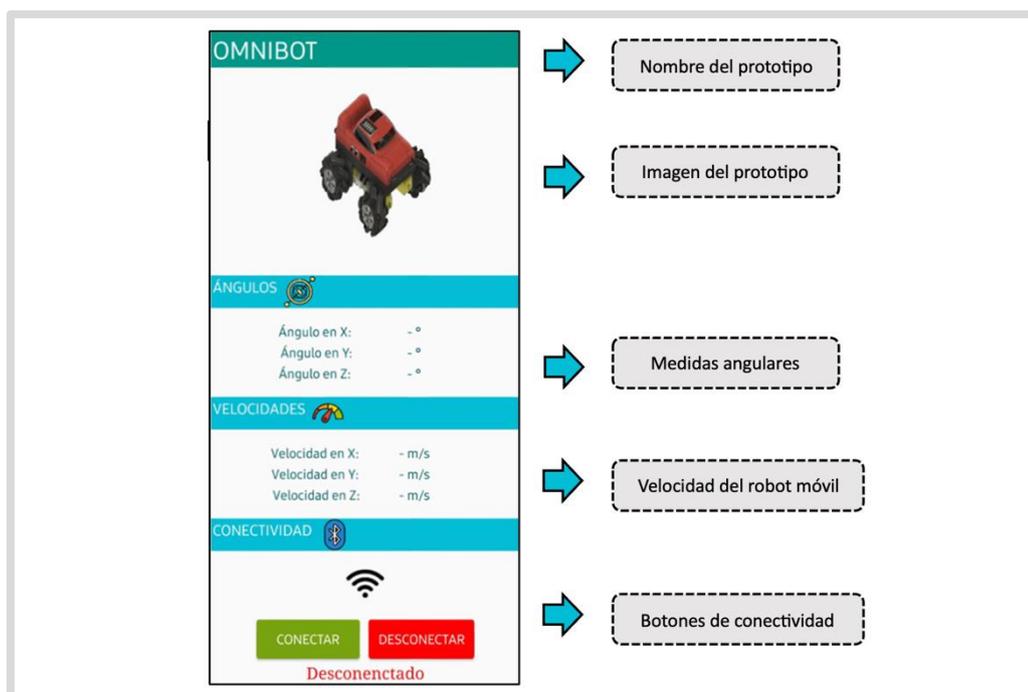
### 3.8 Interfaz de visualización de parámetros

Se compone de una interfaz gráfica diseñada para teléfonos celulares, que le permite al usuario la visualización de las medidas angulares en los tres ejes coordenados y la velocidad del robot móvil correspondiente a cada ángulo. Esta herramienta resulta ser muy útil cuando el robot se encuentra a una distancia lejana del usuario y se desea conocer sus parámetros de desplazamiento.

Para el desarrollo de esta interfaz, se utiliza el *software* en línea MIT App Inventor, que permite la creación de interfaces gráficas mediante botones, imágenes, etiquetas y conectividad de manera fácil y sencilla. Además, dispone de una sección de diagrama de bloques para la programación funcional de una aplicación que posteriormente pueda instalarse en teléfonos inteligentes o tabletas (MIT App Inventor, 2023).

### 3.8.1 Diseño de la interfaz de la aplicación móvil

En la *Ilustración 3-28* se presenta el diseño de la interfaz gráfica de la aplicación móvil. En la parte superior se indica el nombre del prototipo y se agrega una imagen correspondiente al mismo. Para la visualización de parámetros se utilizan seis bloques de cuadros de texto, tres para las medidas angulares en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , y tres para las velocidades correspondientes a cada ángulo. Además, se añaden dos botones para la conectividad por Bluetooth con el robot móvil. La programación por bloques realizada para el funcionamiento de la aplicación se adjunta en el *Anexo N*.



**Ilustración 3-28:** Diseño de la aplicación móvil

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.9 Diseño de la estructura de los prototipos

A continuación, se describe a detalle el diseño de las estructuras de los prototipos de control remoto y robot móvil, para lo cual, se considera el uso del *software* de Fusion 360 descrito anteriormente en modo de diseño 3D.

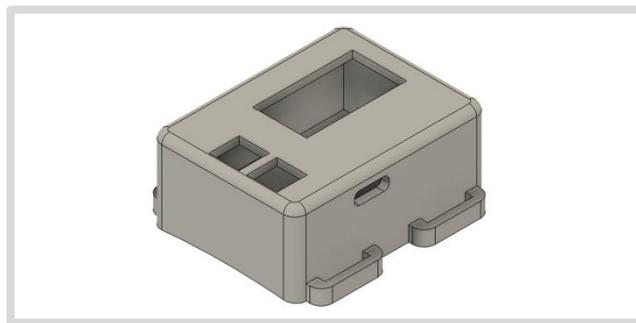
### 3.9.1 Diseño de la estructura del prototipo de control remoto

Para esta estructura se considera el uso de una carcasa conformada por una base y una cubierta. La estructura cuenta con un orificio en uno de los laterales de la base para la entrada de un cable USB tipo C y con cuatro orificios a los lados para la sujeción de la estructura con elásticos. La cubierta cuenta con tres orificios para la inserción de dos interruptores y la pantalla OLED. Esta estructura se realiza en base a las medidas principales que se detallan en la *Tabla 3-15* y su diseño se presenta en la *Ilustración 3-29*. El plano completo de esta estructura se adjunta en el *Anexo O*.

**Tabla 3-15:** Dimensiones principales de la estructura del prototipo de control remoto

Dimensiones	Medida
Largo	38 mm
Ancho	51 mm
Altura	22 mm

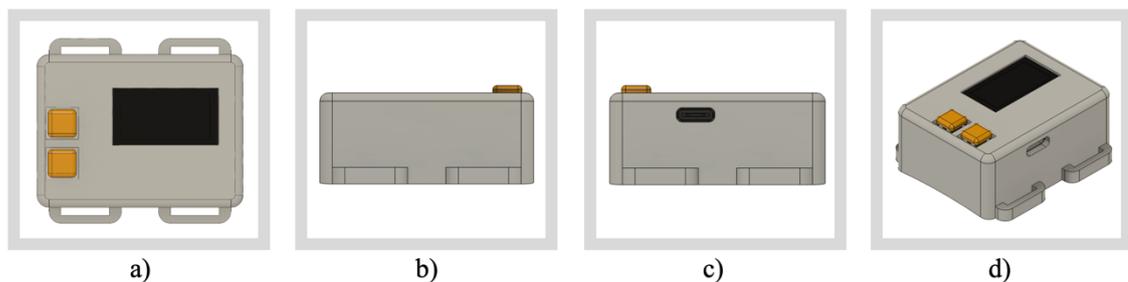
Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023



**Ilustración 3-29:** Diseño estructural del control remoto

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Ilustración 3-30* se observan diferentes vistas del prototipo de control remoto ensamblado mediante herramientas de ensamblaje de Fusion 360, de esta manera, se determina si las piezas diseñadas son correctas y se ensamblan con normalidad previo a su fabricación.



**Ilustración 3-30:** Vistas del control remoto: a) superior, b) derecha, c) izquierda, d) isométrica

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para la fabricación de la estructura, se realiza una impresión 3D por separado de la base y su cubierta. El material de fabricación es filamento PLA en color gris, que presenta una resistencia mecánica baja y alta rigidez contra impactos. En la *Ilustración 3-31* se observa la estructura ensamblada luego de la impresión 3D.



**Ilustración 3-31:** Estructura fabricada del control remoto

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

### 3.9.2 *Diseño de la estructura del prototipo de robot móvil*

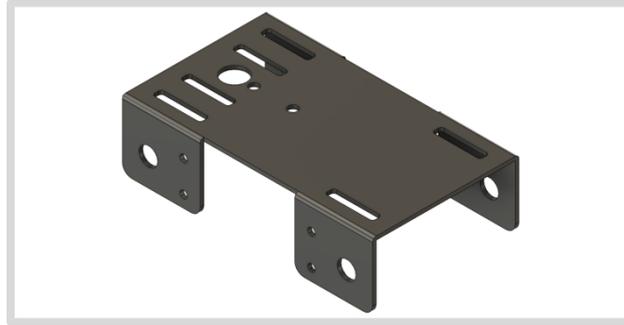
El robot móvil está conformado por tres piezas fundamentales: un panel de metal, una base y una cubierta. Cada pieza cuenta con su propio diseño estructural y se describen a detalle a continuación.

**Panel de metal.** – Esta estructura se encarga de la sujeción de los cuatro motores de corriente continua, dos a cada lado. Cuenta con pequeños orificios que permiten el ajuste de los motores con la estructura mediante la inserción de tornillos para que se mantengan en posición fija, además, cuenta con orificios para la salida de los ejes de los motores que permiten el acople de las cuatro ruedas *mecanum* con los motores. Para el paso de cables de los motores y otros elementos, cuenta con orificios en la parte superior. Esta estructura se realiza en base a las medidas principales que se detallan en la *Tabla 3-16* y su diseño se presenta en la *Ilustración 3-32*. El plano completo de esta estructura se adjunta en el *Anexo P*.

**Tabla 3-16:** Dimensiones principales de la estructura del panel de metal del robot móvil

Dimensiones	Panel horizontal	Panel vertical
Largo	135 mm	41,5 mm
Ancho	75 mm	35 mm
Altura	2 mm	2 mm

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023



**Ilustración 3-32:** Diseño del panel de metal

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Base.** – En esta estructura se inserta la placa PCB con todos los componentes *hardware* del robot móvil. Se diseña a partir de las medidas del panel de metal y cuenta con orificios para el paso de los cables de los motores de corriente continua. Además, cuenta con dos vigas a los extremos con orificios para la inserción de tornillos que permitan el cierre de esta estructura con la estructura de la cubierta. Esta estructura se realiza en base a las medidas principales que se detallan en la *Tabla 3-17* y su diseño se presenta en la *Ilustración 3-33*. El plano completo de esta estructura se adjunta en el *Anexo Q*.

**Tabla 3-17:** Dimensiones principales de la estructura de la base del robot móvil

Dimensiones	Medida
Largo	145 mm
Ancho	80 mm
Altura	20 mm

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023



**Ilustración 3-33:** Diseño de la base del robot móvil

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Cubierta.** – Esta estructura permite la protección de la placa PCB y todos sus componentes, tiene la forma de un automóvil que se diseña a partir del uso de un plano libre. Consta de dos orificios en la parte superior para la inserción de la pantalla OLED y el indicador de carga, en el lateral derecho de la estructura se realizan tres orificios para la inserción de tres interruptores. Además,

en sus extremos contiene dos vigas con orificios para la inserción de tornillos que permiten el cierre de esta estructura con la estructura de la base. Esta estructura se realiza en base a las medidas principales que se detallan en la *Tabla 3-18* y su diseño se presenta en la *Ilustración 3-34*. El plano completo de esta estructura se adjunta en el *Anexo R*.

**Tabla 3-18:** Dimensiones principales de la estructura de la cubierta del robot móvil

Dimensiones	Medida
Largo	145 mm
Ancho	80 mm
Altura	32,5 mm

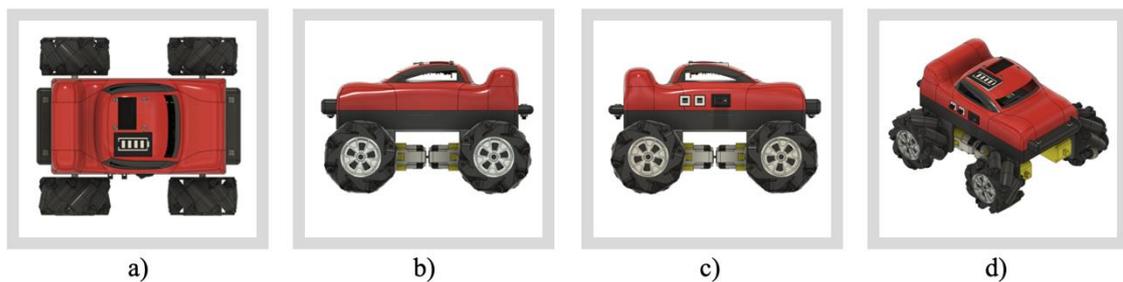
**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023



**Ilustración 3-34:** Diseño de la cubierta del robot móvil

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En la *Ilustración 3-35* se observan diferentes vistas del prototipo de robot móvil ensamblado mediante herramientas de ensamblaje de Fusion 360, de esta manera, se determina si las piezas diseñadas son correctas y se ensamblan con normalidad previo a su fabricación.



**Ilustración 3-35:** Vistas del robot móvil: a) superior, b) derecha, c) izquierda, d) isométrica

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para la fabricación de cada pieza que conforman la estructura completa del robot móvil, se realiza una impresión 3D por separado de la base y su cubierta. El material de fabricación para la impresión es filamento PLA en color negro para la base y rojo para la cubierta. Por otra parte, el

material del panel de metal es acero en color negro. En la *Ilustración 3-36* se observa la estructura ensamblada con las tres piezas fundamentales.



**Ilustración 3-36:** Estructuras ensambladas del robot móvil

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

## CAPÍTULO IV

### 4. VALIDACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

En el presente capítulo se valida el desempeño del *hardware* y *software* de los prototipos de control remoto y robot móvil que se observan implementados en la *Ilustración 4-1*. Las pruebas realizadas incluyen la validación del sensor inercial y velocidad, tiempo latencia entre los prototipos, carga y descarga de las baterías de los prototipos, integridad de los datos transmitidos, funcionamiento y usabilidad y, análisis económico de los prototipos desarrollados.



**Ilustración 4-1:** Prototipos implementados

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

#### 4.1 Consideraciones generales

Cuando se analiza un resultado obtenido a través de experimentación, surge naturalmente la cuestión de si dicho resultado podría haber acontecido por mera casualidad. La prueba de hipótesis es un procedimiento estadístico destinado para determinar si la aleatoriedad constituye una explicación factible para el resultado experimental en cuestión. Equivocaciones frecuentes en torno a la validación de hipótesis son ampliamente difundidas, tanto entre expertos en la materia como entre estudiantes (Aguilar et al., 2010).

Una hipótesis estadística constituye una declaración o suposición en relación a una o más poblaciones. El diseño de la metodología de la prueba de hipótesis se desarrolla empleando el concepto de hipótesis nula, que se aplica a cualquier afirmación que se desea examinar y se representa como  $H_0$ , donde, la refutación de  $H_0$  resulta en la validación de una hipótesis alternativa, identificada como  $H_1$  (Walpole et al., 2007). Por otra parte, la hipótesis alternativa generalmente representa la interrogante que requiere resolución, la teoría que precisa confirmación, de ahí la vitalidad de su formulación precisa. La hipótesis nula invalida o contrasta

con la hipótesis alternativa, funcionando con frecuencia como el contrapunto lógico de esta última (Walpole et al., 2007).

¿Cuán pequeño debe ser el nivel de probabilidad para deducir que la hipótesis nula carece de validez? Aunque no existe una respuesta absolutamente correcta o incorrecta para esta interrogante, se ha establecido convencionalmente que se considera la hipótesis nula como inválida si el valor de probabilidad es inferior a 0,05 o 5%. El nivel de significancia es el umbral de probabilidad que determina el rechazo de la hipótesis nula (Aguilar et al., 2010).

Para la validación de los prototipos se realizaron pruebas que ayuden a definir la exactitud y precisión, donde, se considera que los datos obtenidos deben seguir una distribución normal mediante pruebas de normalidad. Se optó por emplear la media como indicador de centralidad debido a que las tres medidas disponibles: media, mediana y moda, presentaban similitudes entre sí, estas pruebas se conocen como pruebas paramétricas (Dietrichson, 2019).

Hay diversas formas de determinar si una variable sigue una distribución normal. El *test* de Shapiro Wilks, para muestras menores a 50, establece la hipótesis nula como una muestra que se origina a partir de una distribución normal. Este *test* busca refutar la hipótesis nula con un nivel de significancia específico, en este caso el 5% (Dietrichson, 2019). Si la probabilidad que arroja el test de Shapiro Wilks es mayor que el nivel de significancia, quiere decir que los datos siguen una distribución normal y se puede realizar una prueba paramétrica, pero si la probabilidad es menor que el nivel de significancia los datos no seguirán una distribución normal y se deberá realizar una prueba no paramétrica (Dietrichson, 2019).

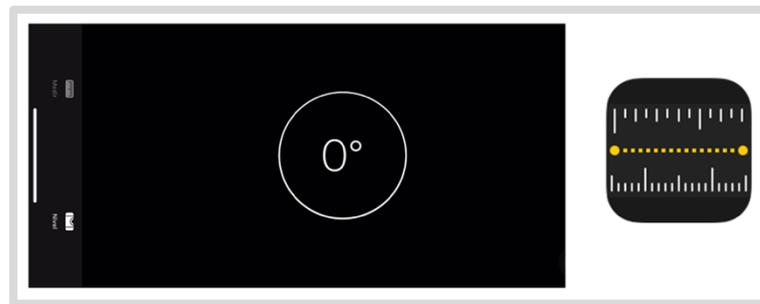
Para las pruebas de validación se trabajó con un nivel de confianza del 95%. Según (Devore 2008), un nivel de confianza del 95% implica que, en 95 de cada 100 muestras el intervalo resultante incluiría el parámetro estimado u otro valor en consideración. Solo en un 5% de las muestras, el intervalo sería incorrecto. Los niveles de confianza más comúnmente utilizados son el 95%, el 99% y el 90%. A medida que aumenta el nivel de confianza, la certeza de que el valor del parámetro estimado está dentro del intervalo también aumenta.

Para la obtención de los resultados se usó IBM SPSS Statistics 21, una plataforma de *software* estadístico robusta, que brinda una interfaz de uso sencillo junto con un conjunto completo de atributos. Sus características avanzadas en estadísticas aseguran una precisión elevada y decisiones de alto calibre. Comprende todos los pasos del ciclo de análisis, abarcando desde la preparación y administración de datos hasta el análisis y la generación de informes (IBM, [s.f.]).

## 4.2 Validación del sensor inercial GY-521

El objetivo de esta prueba es realizar un análisis comparativo de los ángulos de giro entregados por el sensor inercial GY-521 en contraste con los resultados obtenidos mediante la aplicación móvil “Medición”.

En la *Ilustración 4-2* se observa la interfaz de la aplicación móvil, que fue desarrollada por Apple en el año 2018 y está disponible en la tienda de *Apple Store* para dispositivos *iPhone* y *iPad*. La aplicación permite determinar si un objeto cercano tiene horizontalidad o verticalidad, además, brinda de manera eficiente las dimensiones de objetos rectangulares (Apple, 2023).



**Ilustración 4-2:** Interfaz de la aplicación móvil “Medición”

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para la realización de esta prueba se tomaron muestras de los seis ejes de rotación del sensor:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  positivos y negativos, colocando el control remoto y el dispositivo con la aplicación móvil sobre una tapa de fácil apertura. Para cada eje, se tomó un número de muestras distinto en base a las restricciones de los movimientos de la mano. Los datos de la pantalla OLED del control remoto y de la aplicación móvil se registraron en conjunto, como se observa en la *Ilustración 4-3*. Las evidencias de la toma de muestras mediante ambos dispositivos se adjuntan en el *Anexo S*.



**Ilustración 4-3:** Toma de muestras angulares

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Posteriormente, se realizó la validación individual para cada uno de los ejes del sensor inercial mediante las pruebas de normalidad, esperando que la probabilidad asociada a las muestras obtenidas para cada eje del sensor supere el nivel de significancia establecido anteriormente.

**Eje x positivo.** – Se registraron 18 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor inercial GY-521. En la *Tabla 4-1* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-1:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje x positivo

N° de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	5,56	5,00
2	10,32	10,00
3	15,82	15,00
4	21,24	20,00
5	26,98	25,00
6	31,53	30,00
7	36,38	35,00
8	41,64	40,00
9	47,08	45,00
10	51,71	50,00
11	56,76	55,00
12	61,96	60,00
13	67,34	65,00
14	72,33	70,00
15	77,83	75,00
16	82,58	80,00
17	85,30	85,00
18	88,59	90,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje x positivo se presentan en la *Tabla 4-2*.

**Tabla 4-2:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje x positivo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,078	18	0,200	0,961	18	0,629
	Sensor	0,087	18	0,200	0,953	18	0,472

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Eje x negativo.** – Se registraron 9 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor inercial GY-521. En la *Tabla 4-3* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-3:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje  $x$  negativo

N° de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	-6,58	-5,00
2	-11,34	-10,00
3	-17,00	-15,00
4	-22,35	-20,00
5	-27,25	-25,00
6	-31,65	-30,00
7	-36,03	-35,00
8	-42,13	-40,00
9	-45,00	-45,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-4*.

**Tabla 4-4:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje  $x$  negativo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,078	9	0,200	0,972	9	0,914
	Sensor	0,087	9	0,200	0,965	9	0,848

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Eje  $y$  positivo.** – Se registraron 13 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor GY-521. En la *Tabla 4-5* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-5:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje  $y$  positivo

N° de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	5,02	5,00
2	10,71	10,00
3	15,92	15,00
4	21,34	20,00
5	26,65	25,00
6	31,47	30,00
7	37,63	35,00
8	42,44	40,00
9	48,51	45,00
10	52,77	50,00
11	58,67	55,00
12	63,34	60,00
13	65,00	65,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-6*.

**Tabla 4-6:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje  $y$  positivo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,087	13	0,200	0,966	13	0,837
	Sensor	0,102	13	0,200	0,952	13	0,636

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Eje  $y$  negativo.** – Se registraron 14 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor GY-521. En la *Tabla 4-7* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-7:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje  $y$  negativo

Nº de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	-6,48	-5,00
2	-11,35	-10,00
3	-16,38	-15,00
4	-21,94	-20,00
5	-27,29	-25,00
6	-32,73	-30,00
7	-36,87	-35,00
8	-42,96	-40,00
9	-47,39	-45,00
10	-52,32	-50,00
11	-56,44	-55,00
12	-61,24	-60,00
13	-66,98	-65,00
14	-70,00	-70,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-8*.

**Tabla 4-8:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje  $y$  negativo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,084	14	0,200	0,965	14	0,796
	Sensor	0,092	14	0,200	0,960	14	0,718

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Eje z positivo.** – Se registraron 6 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor GY-521. En la *Tabla 4-9* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-9:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje z positivo

N° de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	5,02	5,00
2	10,04	10,00
3	15,19	15,00
4	20,61	20,00
5	25,69	25,00
6	30,00	30,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-10*.

**Tabla 4-10:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje z positivo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,122	6	0,200	0,982	6	0,961
	Sensor	0,132	6	0,200	0,975	6	0,925

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Eje z negativo.** – Se registraron 8 muestras de mediciones angulares otorgadas por la aplicación móvil y el sensor GY-521. En la *Tabla 4-11* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-11:** Toma de muestras de ángulos sobre el eje z negativo

N° de muestra	Ángulo medido por el sensor GY-521 [°]	Ángulo medido con la aplicación móvil [°]
1	0,02	0,00
2	-2,03	-2,00
3	-4,04	-4,00
4	-6,12	-6,00
5	-8,11	-8,00
6	-10,18	-10,00
7	-12,31	-12,00
8	-14,23	-14,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para el eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-12*.

**Tabla 4-12:** Pruebas de normalidad de ángulos sobre el eje z negativo

Ángulos medidos por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Ángulos entregados por los dispositivos	Aplicación	0,105	8	0,200	0,975	8	0,933
	Sensor	0,106	8	0,200	0,974	8	0,925

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

En base a los datos de las pruebas de normalidad realizadas y centrándonos en el *test* de Shapiro Wilk de cada prueba, se concluye que los datos entregados por cada uno de los ejes de rotación del sensor inercial siguen una distribución normal. Esto nos brinda una sólida indicación de que el sensor inercial GY-521 del prototipo de control remoto se desempeña de manera confiable y precisa al medir los ángulos de los ejes de rotación.

### 4.3 Validación de velocidad del prototipo de robot móvil

El objetivo de esta prueba es realizar un análisis comparativo de los valores de velocidad registrados por el sensor inercial GY-521 en contraste con los datos obtenidos del tacómetro Extech RPM10 del fabricante *Extech Instruments*.

En la hoja de especificaciones técnicas este dispositivo, se menciona que tiene una precisión del 0,05% con una resolución máxima de 1 rpm. El tacómetro Extech RPM10 se observa en la *Ilustración 4-4* y sus especificaciones técnicas detalladas se adjuntan en el *Anexo T*.



**Ilustración 4-4:** Tacómetro Extech RPM 10

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para la realización de esta prueba se tomaron muestras de velocidad de los seis ejes de rotación del sensor:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  positivos y negativos, donde, se conectó el eje del motor de una de las ruedas del robot móvil con el eje del tacómetro. En cada ocasión, se registran los datos de la pantalla OLED del robot móvil y del tacómetro en conjunto, como se observa en la *Ilustración 4-5*. Las evidencias de la toma de muestras mediante ambos dispositivos se adjuntan en el *Anexo U*.



**Ilustración 4-5:** Toma de muestras de velocidad

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Posteriormente, se realizó la validación individual de las velocidades entregadas por los ejes del sensor inercial mediante las pruebas de normalidad, esperando que la probabilidad asociada a las muestras obtenidas para cada eje del sensor supere el nivel de significancia establecido anteriormente.

**Velocidad sobre el eje  $x$  positivo.** – Se establecieron 18 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-13* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-13:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje  $x$  positivo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,01	0,03
2	0,02	0,04
3	0,04	0,08
4	0,05	0,09
5	0,06	0,10
6	0,13	0,14
7	0,22	0,19
8	0,29	0,34
9	0,37	0,36
10	0,45	0,43
11	0,53	0,55
12	0,60	0,62
13	0,70	0,71
14	0,76	0,75
15	0,84	0,82
16	0,92	0,91
17	0,97	0,97
18	1,00	1,03

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje  $x$  positivo se presentan en la *Tabla 4-14*.

**Tabla 4-14:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje  $x$  positivo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,142	18	0,200	0,902	18	0,62
	Tacómetro RPM 10	0,164	18	0,200	0,907	18	0,46

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Velocidad sobre el eje  $x$  negativo.** – Se establecieron 9 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-15* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-15:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje  $x$  negativo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,43	0,39
2	0,52	0,48
3	0,60	0,59
4	0,68	0,72
5	0,75	0,76
6	0,82	0,80
7	0,90	0,89
8	0,98	0,96
9	1,00	1,01

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje  $x$  negativo se presentan en la *Tabla 4-16*.

**Tabla 4-16:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje  $x$  negativo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,116	9	0,200	0,956	9	0,760
	Tacómetro RPM 10	0,142	9	0,200	0,958	9	0,780

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Velocidad sobre el eje  $y$  positivo.** – Se establecieron 13 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-17* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-17:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje y positivo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,10	0,60
2	0,17	0,15
3	0,25	0,21
4	0,32	0,30
5	0,40	0,42
6	0,48	0,47
7	0,56	0,54
8	0,65	0,67
9	0,72	0,71
10	0,81	0,83
11	0,88	0,89
12	0,97	0,95
13	1,00	1,40

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje y positivo se presentan en la *Tabla 4-18*.

**Tabla 4-18:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje y positivo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,100	13	0,200	0,953	13	0,642
	Tacómetro RPM 10	0,096	13	0,200	0,960	13	0,757

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Velocidad sobre el eje y negativo.** – Se establecieron 13 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-19* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-19:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje y negativo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,08	0,03
2	0,15	0,12
3	0,22	0,24
4	0,29	0,28
5	0,37	0,35
6	0,44	0,48
7	0,52	0,50
8	0,61	0,63

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
9	0,67	0,69
10	0,76	0,77
11	0,82	0,81
12	0,88	0,89
13	1,00	1,12

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje y negativo se presentan en la *Tabla 4-20*.

**Tabla 4-20:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje y negativo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,106	13	0,200	0,953	13	0,609
	Tacómetro RPM 10	0,097	13	0,200	0,975	13	0,937

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Velocidad sobre el eje z positivo.** – Se establecieron 6 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-21* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-21:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje z positivo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,10	0,09
2	0,21	0,19
3	0,35	0,32
4	0,54	0,52
5	0,83	0,81
6	1,00	1,02

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje y negativo se presentan en la *Tabla 4-22*.

**Tabla 4-22:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje z positivo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,169	6	0,200	0,944	6	0,695
	Tacómetro RPM 10	0,181	6	0,200	0,940	6	0,662

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Velocidad sobre el eje z negativo.** – Se establecieron 8 muestras para la medición de velocidades entregadas por los dispositivos en diferentes tiempos. En la *Tabla 4-23* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-23:** Toma de muestras de velocidad sobre el eje z negativo

N° de muestra	Velocidad del robot móvil [m/s]	Velocidad entregada por el tacómetro [m/s]
1	0,01	0,02
2	0,10	0,12
3	0,21	0,24
4	0,32	0,30
5	0,43	0,46
6	0,65	0,67
7	0,87	0,91
8	1,00	1,01

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la velocidad sobre eje y negativo se presentan en la *Tabla 4-24*.

**Tabla 4-24:** Pruebas de normalidad de velocidad sobre el eje z negativo

Velocidades medidas por los dispositivos		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Velocidades entregadas por los dispositivos	Sensor	0,146	8	0,200	0,942	8	0,631
	Tacómetro RPM 10	0,176	8	0,200	0,934	8	0,558

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En base a los datos de las pruebas de normalidad realizadas y centrándonos en el *test* de Shapiro Wilk de cada prueba, se concluye que las velocidades entregadas por cada uno de los ejes de rotación del sensor inercial siguen una distribución normal. Esto indica que el robot móvil mantiene velocidades confiables y precisas.

#### 4.4 Validación del tiempo de latencia entre los prototipos

El objetivo de esta prueba es determinar que la latencia en la comunicación Bluetooth entre los prototipos de control remoto y robot móvil sea inferior a 20 milisegundos, el cual, es el valor de referencia de latencia máxima establecido para Bluetooth.

Para la realización de esta prueba, se transmitieron los datos desde el control remoto hacia el robot móvil a lo largo de una línea recta, abarcando una distancia de 1 a 44 metros y registrando un

total de 12 muestras en intervalos de 4 metros. Los datos se registraron del monitor serial del *software* de Arduino mediante la función *toggle timestamp*, que permite la visualización de datos transmitidos y receptados a lo largo del tiempo. Luego, los datos receptados por el robot móvil se restaron de los datos transmitidos del control remoto, obteniendo como resultado, la latencia existente entre los dos prototipos. Las evidencias de la toma de muestras de latencia entre los prototipos se adjuntan en el *Anexo V*.

En la *Tabla 4-25* se presentan las muestras de latencia obtenidas entre ambos dispositivos.

**Tabla 4-25:** Toma de muestras de latencia entre los prototipos de control remoto y robot móvil

N° de muestra	Distancia [m]	Control remoto [ms]	Robot móvil [ms]	Latencia [ms]
1	1	0,002	0,003	0,001
2	4	0,004	0,015	0,011
3	8	0,010	0,024	0,014
4	12	0,017	0,036	0,019
5	16	0,025	0,055	0,030
6	20	0,030	0,075	0,045
7	24	0,036	0,095	0,059
8	28	0,052	0,121	0,069
9	32	0,056	0,131	0,075
10	36	0,072	0,161	0,089
11	40	0,084	0,182	0,098
12	44	0,362	0,670	0,308

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

La latencia entre los prototipos se registró nuevamente, considerando únicamente las distancias de 1 m, 12 m, 28 m y 44 m, para así, determinar si los valores de latencia tomados inicialmente se asemejaban con los valores de latencia registrados de la siguiente manera: el control remoto se mantuvo en una posición fija, mientras que, el robot móvil giraba alrededor de él cada 15 grados. Este enfoque permitió establecer un punto de referencia para analizar si las mediciones variaban abruptamente cuando se variaba el ángulo de referencia entre ambos prototipos.

Se espera que la probabilidad asociada a las muestras obtenidas de latencia supere el nivel de significancia y que las mediciones de latencia registradas para cada rango de distancia se asemejen a sus respectivos valores de referencia. A continuación, se presentan las pruebas realizadas.

**Latencia a 1 m.** – Tomando se como referencia la latencia a 1 m de la *Tabla 4-25*, se tomaron 13 muestras alrededor de esa distancia variando el ángulo desde 15° hasta 360°. En la *Tabla 4-26* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-26:** Toma de muestras de latencia a 1 m

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
1	15°	0,00050
2	30°	0,00087
3	60°	0,00050
4	90°	0,00100
5	120°	0,00113
6	150°	0,00150
7	180°	0,00100
8	210°	0,00087
9	240°	0,00050
10	270°	0,00100
11	300°	0,00113
12	330°	0,00087
13	360°	0,00050

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la validación de latencia a 1 m se presentan en la *Tabla 4-27* y posteriormente se realiza una prueba para una única muestra que se observa en la *Tabla 4-28*.

**Tabla 4-27:** Pruebas de normalidad de latencia a 1 m

Distancia considerada	Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
	Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Latencia a 1 metro	0,197	13	0,180	0,892	13	0,103

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Tabla 4-28:** Prueba para una muestra de latencia a 1 m

1 muestra	Valor de prueba = 0,001					
	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza	
					Inferior	Superior
Latencia a 1 m	-1,473	12	0,166	-0,0001254	-0,000311	0,000060

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Latencia a 12 m.** – Tomando se como referencia la latencia a 12 m de la *Tabla 4-25*, se tomaron 13 muestras alrededor de esa distancia variando el ángulo desde 15° hasta 360°. En la *Tabla 4-29* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-29:** Toma de muestras de latencia a 12 m

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
1	15°	0,01850
2	30°	0,01920

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
3	60°	0,01880
4	90°	0,01900
5	120°	0,01930
6	150°	0,01940
7	180°	0,01900
8	210°	0,01920
9	240°	0,01880
10	270°	0,01900
11	300°	0,01930
12	330°	0,01880
13	360°	0,01860

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la validación de latencia a 12 m se presentan en la *Tabla 4-30* y posteriormente se realiza una prueba para una única muestra que se observa en la *Tabla 4-31*.

**Tabla 4-30:** Pruebas de normalidad de latencia a 12 m

Distancia considerada	Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
	Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Latencia a 12 metros	0,154	13	0,200	0,947	13	0,548

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Tabla 4-31:** Prueba para una muestra de latencia a 12 m

1 muestra	Valor de prueba = 0,019					
	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza	
					Inferior	Superior
Latencia a 12 m	-0,099	12	0,923	-0,0000077	-0,000178	0,000162

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Latencia a 28 m.** – Tomando se como referencia la latencia a 28 m de la *Tabla 4-25*, se tomaron 13 muestras alrededor de esa distancia variando el ángulo desde 15° hasta 360°. En la *Tabla 4-32* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-32:** Toma de muestras de latencia a 28 m

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
1	15°	0,06850
2	30°	0,06920
3	60°	0,06880
4	90°	0,06900
5	120°	0,06930

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
6	150°	0,06940
7	180°	0,06900
8	210°	0,06920
9	240°	0,06880
10	270°	0,06900
11	300°	0,06930
12	330°	0,06880
13	360°	0,06860

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la validación de latencia a 28 m se presentan en la *Tabla 4-33* y posteriormente se realiza una prueba para una única muestra que se observa en la *Tabla 4-34*.

**Tabla 4-33:** Pruebas de normalidad de latencia a 28 m

Distancia considerada	Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
	Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Latencia a 28 metros	0,154	13	0,200	0,947	13	0,548

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Tabla 4-34:** Prueba para una muestra de latencia a 28 m

1 metro	Valor de prueba = 0,069					
	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza	
					Inferior	Superior
Latencia a 28 m	-0,099	12	0,923	-0,0000077	-0,000178	0,000162

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Latencia a 44 m.** – Tomando se como referencia la latencia a 44 m de la *Tabla 4-25*, se tomaron 13 muestras alrededor de esa distancia variando el ángulo desde 15° hasta 360°. En la *Tabla 4-35* se observan las muestras obtenidas.

**Tabla 4-35:** Toma de muestras de latencia a 44 m

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
1	15°	0,30750
2	30°	0,30800
3	60°	0,30760
4	90°	0,30800
5	120°	0,30820
6	150°	0,30830
7	180°	0,30800
8	210°	0,30800

N° de muestra	Ángulos de variación para la distancia [°]	Latencia en base a la referencia [ms]
9	240°	0,30760
10	270°	0,30800
11	300°	0,30800
12	330°	0,30750
13	360°	0,30730

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la validación de latencia a 44 m se presentan en la *Tabla 4-36* y posteriormente se realiza una prueba para una única muestra que se observa en la *Tabla 4-37*.

**Tabla 4-36:** Pruebas de normalidad de latencia a 44 m

Distancia considerada	Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
	Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Latencia a 44 m	0,307	13	0,001	0,886	13	0,085

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

**Tabla 4-37:** Prueba para una muestra de latencia a 44 m

1 metro	Valor de prueba = 0,308					
	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza	
					Inferior	Superior
Latencia a 28 m	-1,473	12	0,166	-0,0001254	-0,000311	0,000060

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

En base a los datos de las pruebas de normalidad realizadas para las latencias de 1 m, 12 m, 28 m y 44 m, y, además, centrándonos en el *test* de Shapiro Wilk de cada prueba, se concluye que los datos de latencia registrados siguen una distribución normal debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia.

Por otro lado, las pruebas para una única muestra de latencia en las distancias consideradas establecen que la media del conjunto de datos de latencia es igual al valor referencial debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia. Finalmente, se concluye que los prototipos de control remoto y robot móvil tienen una latencia inferior a 20 milisegundos.

#### 4.5 Validación de descarga de las baterías de los prototipos

El objetivo de esta prueba es validar que el tiempo de descarga de las baterías de los prototipos es de 25 minutos en contraste con los datos obtenidos del multímetro HT116 del fabricante *Hobotest*.

En la hoja de especificaciones técnicas del multímetro, se menciona que tiene una precisión del 0,5% en medición de voltaje para corriente continua. El multímetro HT116 se observa en la *Ilustración 4-6* y sus especificaciones técnicas detalladas se adjuntan en el *Anexo W*.



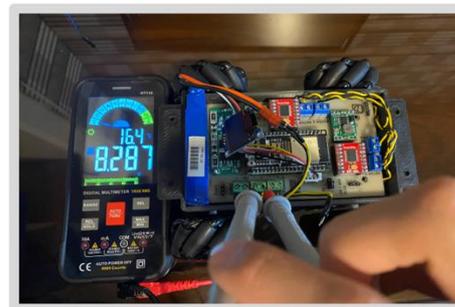
**Ilustración 4-6:** Multímetro HT116

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para la realización de esta prueba, se tomaron muestras de voltaje con el multímetro, midiendo el nivel de voltaje en los terminales positivo y negativo de las baterías de los prototipos de control remoto y robot móvil durante el tiempo establecido para la descarga, como se observa en la *Ilustración 4-7*. Las evidencias de la toma de muestras mediante ambos dispositivos se adjuntan en el *Anexo X*.



a)



b)

**Ilustración 4-7:** Medición de voltaje en la batería: a) control remoto, b) robot móvil

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Posteriormente, se realizan las pruebas de normalidad, esperando que la probabilidad asociada a las muestras obtenidas supere el nivel de significancia.

#### **4.5.1 Descarga de batería del prototipo de control remoto**

Se recolectaron 15 muestras de la batería del control remoto y el multímetro con un intervalo de 15 minutos en un rango de 0 a 210 minutos. Los datos de estas muestras se presentan en la *Tabla 4-38*.

**Tabla 4-38:** Toma de muestras de descarga para la batería del prototipo de control remoto

N° de muestra	Minuto [min]	Voltaje en la pantalla OLED [V]	Voltaje del multímetro [V]
1	0	3,695	3,700
2	15	3,540	3,547
3	30	3,485	3,493
4	45	3,430	3,437
5	60	3,420	3,421
6	75	3,405	3,411
7	90	3,390	3,398
8	105	3,360	3,365
9	120	3,350	3,354
10	135	3,330	3,332
11	150	3,310	3,314
12	165	3,285	3,289
13	180	3,260	3,265
14	195	3,230	3,234
15	210	3,210	3,212

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la descarga de la batería del prototipo de control remoto se presentan la *Tabla 4-39*.

**Tabla 4-39:** Pruebas de normalidad de descarga para la batería del prototipo de control remoto

Dispositivos de medición		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Muestras entregadas por los dispositivos	Oled	0,146	15	0,200	0,939	15	0,371
	Multímetro	0,141	15	0,200	0,941	15	0,401

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base en la *Tabla 4-39* y centrándose en el *test* de Shapiro Wilk, se concluye que los datos efectivamente siguen una distribución normal debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia.

#### 4.5.2 Descarga de batería del prototipo de robot móvil

Se recolectaron 15 muestras de la batería del robot móvil y el multímetro con un intervalo de 15 minutos en un rango de 0 a 210 minutos. Los datos de estas muestras se presentan en la *Tabla 4-40*.

**Tabla 4-40:** Toma de muestras de descarga para la batería del prototipo de robot móvil

N° de muestra	Minuto [min]	Voltaje en indicador de carga [V]	Voltaje del multímetro [V]
1	0	7,402	7,400
2	15	7,398	7,395
3	30	7,334	7,337
4	45	7,329	7,327
5	60	7,306	7,308
6	75	7,299	7,295
7	90	7,283	7,280
8	105	7,275	7,276
9	120	7,264	7,262
10	135	7,245	7,244
11	150	7,226	7,229
12	165	7,201	7,200
13	180	7,188	7,191
14	195	7,176	7,174
15	210	7,149	7,152

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la descarga de la batería del prototipo de robot móvil se presentan la *Tabla 4-41*.

**Tabla 4-41:** Pruebas de normalidad de descarga para la batería del prototipo de robot móvil

Dispositivos de medición		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Muestras entregadas por los dispositivos	Módulo	0,090	15	0,200	0,969	15	0,844
	Multímetro	0,095	15	0,200	0,970	15	0,854

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

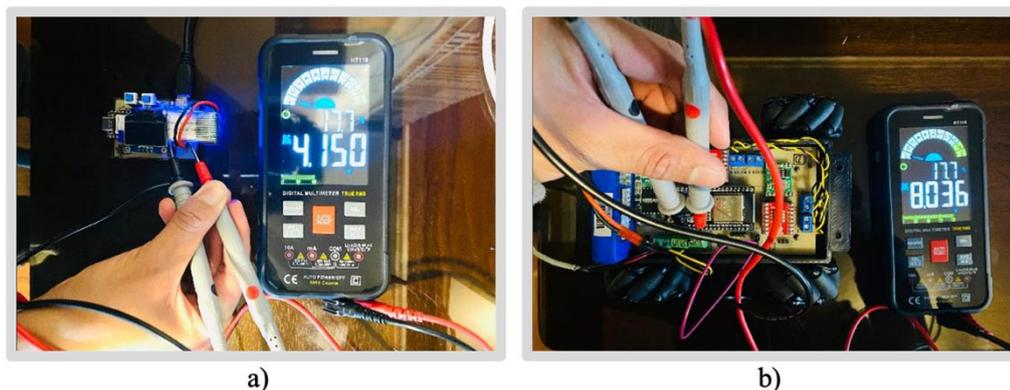
Con base en la *Tabla 4-41* y centrándose en el *test* de Shapiro Wilk, se concluye que los datos efectivamente siguen una distribución normal debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia.

Finalmente, en base a las pruebas de descarga realizadas, se concluye que las mediciones proporcionadas por las baterías de los prototipos de control remoto y robot móvil mediante el multímetro siguen una distribución normal, esto implica que las baterías de los dos prototipos cumplen con el requerimiento establecido de tener una duración aproximada de 25 minutos de funcionamiento.

#### 4.6 Validación de carga de las baterías de los prototipos

El objetivo de esta prueba es validar que los tiempos de carga de las baterías de los prototipos de control remoto y robot móvil son de 10 minutos y 60 minutos, respectivamente, en base a los valores teóricos proporcionados en las especificaciones técnicas de las baterías.

Para la realización de esta prueba, se procedió a conectar la batería del prototipo de control remoto a una fuente de 5V mediante el puerto USB tipo C del prototipo y, se conectó la batería del prototipo de robot móvil a una fuente de alimentación de 9V. Después, se midieron los voltajes de las baterías utilizando el multímetro HT116 y se compararon los datos con los niveles de voltaje proporcionados por los prototipos. El nivel de carga de la batería del prototipo de control remoto se observa en la pantalla OLED integrada, mientras que en el prototipo de robot móvil se puede observar en el módulo indicador de carga. En la *Ilustración 4-8* se observa la ubicación de los dispositivos para la toma de muestras y las evidencias de la toma de muestras de voltaje para las baterías de ambos dispositivos se presentan en el *Anexo Y*.



**Ilustración 4-8:** Carga de la batería de los prototipos: a) control remoto, b) robot móvil

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Se espera que las muestras de voltaje para las baterías obtenidas por el multímetro y los dispositivos tengan relación. Con el propósito de abordar esta consideración, se procedió a realizar un análisis de normalidad para las baterías de los prototipos desarrollados, esperando que la probabilidad asociada a las muestras obtenidas supere el nivel de significancia.

##### 4.6.1 Carga de batería del prototipo de control remoto

Se recolectaron 10 muestras con un intervalo de 1 minuto en un rango de 0 a 10 minutos. Los datos de estas muestras se presentan en la *Tabla 4-42*.

**Tabla 4-42:** Toma de muestras de carga para la batería del prototipo de control remoto

Nº de muestra	Minuto [min]	Voltaje en la pantalla OLED [V]	Voltaje del multímetro [V]
1	1	0,348	0,350
2	2	0,701	0,700
3	3	1,059	1,060
4	4	1,408	1,410
5	5	1,758	1,760
6	6	2,112	2,110
7	7	2,472	2,470
8	8	2,878	2,880
9	9	3,172	3,173
10	10	3,687	3,668

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la carga de la batería del prototipo de control remoto se presentan en la *Tabla 4-43*.

**Tabla 4-43:** Pruebas de normalidad de carga para la batería del prototipo de control remoto

Dispositivos de medición		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Muestras entregadas por los dispositivos	Oled	0,098	10	0,200	0,975	10	0,934
	Multímetro	0,099	10	0,200	0,974	10	0,928

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base en la *Tabla 4-43* y centrándose en el *test* de Shapiro Wilk, se concluye que los datos efectivamente siguen una distribución normal debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia.

#### 4.6.2 Carga de batería del prototipo de robot móvil

Se recolectaron 15 muestras con un intervalo de 4 minutos en un rango de 0 a 60 minutos. Los datos de estas muestras se presentan en la *Tabla 4-44*.

**Tabla 4-44:** Toma de muestras de carga para la batería del prototipo de control remoto

Nº de muestra	Minuto [min]	Voltaje en módulo indicador [V]	Voltaje del multímetro [V]
1	4	0,488	0,490
2	8	0,989	0,990
3	12	1,482	1,480
4	16	1,968	1,970

N° de muestra	Mínuto [min]	Voltaje en módulo indicador [V]	Voltaje del multímetro [V]
5	20	2,468	2,470
6	24	2,959	2,960
7	28	3,451	3,450
8	32	3,947	3,950
9	36	4,439	4,440
10	40	4,930	4,930
11	44	5,428	5,430
12	48	5,919	5,920
13	52	6,409	6,410
14	56	6,908	6,910
15	60	7,390	7,400

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Las pruebas de normalidad para la carga de la batería del prototipo de robot móvil se presentan la *Tabla 4-45*.

**Tabla 4-45:** Pruebas de normalidad de carga para la batería del prototipo de robot móvil

Dispositivos de medición		Kolmogorov Smirnov			Shapiro Wilk		
		Estadísticos	gl	Significancia	Estadísticos	gl	Significancia
Muestras entregadas por los dispositivos	Módulo	0,083	15	0,200	0,964	15	0,753
	Multímetro	0,083	15	0,200	0,964	15	0,756

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base en la *Tabla 4-45* y centrándose en el *test* de Shapiro Wilk, se concluye que los datos efectivamente siguen una distribución normal debido a que la probabilidad es mayor que el nivel de significancia.

Finalmente, en base a las pruebas de descarga realizadas, se concluye que las mediciones proporcionadas por las baterías de los prototipos de control remoto y robot móvil mediante el multímetro siguen una distribución normal, esto implica que las baterías de los prototipos de control remoto y robot móvil se cargan en 10 minutos y en 60 minutos, respectivamente.

#### 4.7 Prueba de funcionamiento y usabilidad

Esta prueba se llevó a cabo con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de los prototipos de control remoto y robot móvil y así, determinar si el manejo de los mismos es intuitivo y sencillo por parte del usuario.

Para llevar a cabo esta prueba y una vez realizadas las pruebas de validación respectivas, se inicia con el encendido de los prototipos de control remoto y robot móvil mediante sus botones de encendido como se observa en la *Ilustración 4-9*. Al encender los prototipos, las pantallas OLED integradas muestran el nombre de cada uno por un tiempo de 4 segundos. Posteriormente, se inicia la búsqueda de conexión entre ambos prototipos mediante Bluetooth.



**Ilustración 4-9:** Encendido del prototipo de: a) control remoto, b) robot móvil

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

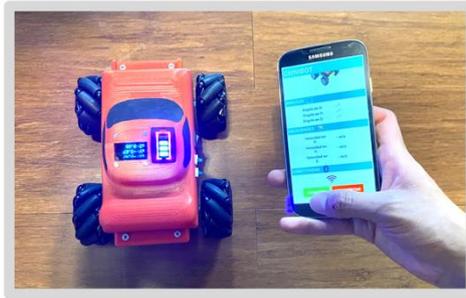
Una vez establecida la comunicación inalámbrica por Bluetooth entre ambos prototipos, las pantallas OLED integradas muestran un mensaje de conexión exitosa por un tiempo de 2 segundos, como se observa en la *Ilustración 4-10*. El robot móvil permanece en reposo mientras el usuario mantenga el control remoto en posición neutral.



**Ilustración 4-10:** Conexión exitosa entre los prototipos

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Ahora, se establece la comunicación inalámbrica por Bluetooth entre el robot móvil y la aplicación móvil. Dentro de la interfaz de la aplicación, el usuario debe elegir la opción de conectividad, donde, se abre un menú con los dispositivos accesibles. Posteriormente, se selecciona el dispositivo de robot móvil como se observa en la *Ilustración 4-11*. La interfaz de la aplicación cuenta con un indicador que indica el estado de conexión una vez que los dispositivos se comunican entre sí, para finalizar la comunicación, se selecciona la opción de desconexión.



a)



b)

**Ilustración 4-11:** a) Opción de conectividad, b) Selección del dispositivo accesible

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

El usuario puede visualizar en el control remoto las medidas angulares, así como la velocidad del robot móvil mediante el interruptor de cambio de estado que permite el cambio de visualización en la pantalla OLED del prototipo, como se observa en la *Ilustración 4-12*.



a)



b)

**Ilustración 4-12:** Control remoto: a) medidas angulares, b) velocidad del robot

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

De igual manera, se puede visualizar la velocidad y las medidas angulares en el robot móvil mediante el interruptor de cambio de estado como se observa en la *Ilustración 4-13*.



a)



b)

**Ilustración 4-13:** Robot móvil: a) medidas angulares, b) velocidad

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Para desplazar el robot móvil, el usuario debe realizar cualquiera de los seis movimientos de la mano con el control remoto. No se puede realizar dos movimientos a la vez, para realizar un movimiento diferente se debe ubicar el control remoto en posición neutral. A medida que aumente el ángulo de giro, la velocidad del robot móvil aumenta, si se mantiene el control móvil en una determinada posición, el robot móvil se desplazará con velocidad constante como se observa en la *Ilustración 4-14*.



**Ilustración 4-14:** Movimiento del robot hacia atrás

**Realizado por:** Cabay M., Amaguaña E., 2023

Luego de la realización de esta prueba, se comprobó de manera exitosa el funcionamiento de los prototipos desarrollados, el manejo de los mismos es sencillo e intuitivo y, además, cumple con los requerimientos establecidos para cada prototipo.

#### 4.8 Análisis económico de los prototipos desarrollados

En la *Tabla 4-46* se presentan los costos totales requeridos para el desarrollo y ensamblaje de los prototipos, donde, se detallan los costos de los elementos utilizados que corresponden a su compra en Ecuador sin considerar las obras de ingeniería aplicadas.

**Tabla 4-46:** Análisis económico para el diseño y fabricación de los prototipos

Cantidad	Componente electrónico	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Xiao ESP32-S3	\$ 6,00	\$ 6,00
1	Sensor inercial GY-521	\$ 6,00	\$ 6,00
2	Pantalla OLED SSD-1306	\$ 7,00	\$ 14,00
1	Batería LiPo Anera 1s	\$ 6,50	\$ 6,50
1	Módulo cargador de baterías TP4056	\$ 4,00	\$ 4,00
1	NodeMCU-32	\$ 12,00	\$ 12,00
4	Motor TT de doble eje	\$ 1,50	\$ 6,00
2	Driver TB6612FNG	\$ 4,00	\$ 8,00

Cantidad	Componente electrónico	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Convertidor DC-DC MP1584EN	\$ 3,00	\$ 3,00
1	Batería LiPo Gens Ace 2s	\$ 15,00	\$ 15,00
1	Módulo cargador de baterías BMS 18650	\$ 6,00	\$ 6,00
1	Kit de ruedas omnidireccionales mecanum	\$ 5,00	\$ 5,00
4	Interruptor cuadrado 8x8mm de 6 pines	\$ 0,40	\$ 1,60
1	Interruptor cuadrado pequeño de 2 pines	\$ 0,35	\$ 0,35
1	Filamento PLA gris	\$ 22,50	\$ 21,50
1	Filamento PLA negro	\$ 22,50	\$ 21,50
1	Filamento PLA rojo	\$ 22,50	\$ 21,50
1	Material electrónico	\$ 5,00	\$ 5,00
<b>Costo total</b>		\$ 157,95	

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base en la información de la *Tabla 4-46*, se observa que el costo total de la implementación es de 157,95 dólares americanos (USD). Con este valor obtenido se elabora la *Tabla 4-47*, que presenta la relación de costo-beneficio entre los prototipos desarrollados y el juguete propuesto por (Kiddie Cutie Pty. Ltd. 2023), que presenta características similares a los prototipos.

**Tabla 4-47:** Comparativa entre los dispositivos desarrollados y el juguete comercial

Características	Prototipos desarrollados	Carro de acrobacias 4WD RC
Batería	<i>Omnibot controller</i> : 350 mAh <i>Omnibot</i> : 3000 mAh	Control: Pila AA (no incluye) Carro: 600 mAh
Tiempo de uso	25 minutos	15 minutos
Tiempo de carga	40 – 60 minutos	90 – 120 minutos
Pantalla de visualización de ángulos y velocidad	Integra	No integra
Aplicación móvil	Integra	No integra
Aumento/disminución de velocidad	Si, mediante ángulos de giro	Mantiene velocidad constante
Velocidad máxima	1 m/s	0,85 m/s
Distancia máxima de control	44 metros	30 metros
Latencia (distancia mínima)	0,1 us	0,02 ms
Material	PLA	ABS
Dimensiones (largo x ancho x altura)	14,5 x 8 x 5,25 cm	33 x 17,5 x 8,5 cm
Peso	1,2 kg	1,5 kg
Costo	\$ 157,95	\$ 165,00

Realizado por: Cabay M., Amaguaña E., 2023

Con base en la información de la *Tabla 4-47*, se evidencia que el juguete comercial presenta deficiencias significativas como: la integración de una pantalla de visualización de parámetros y una menor latencia, en relación con los prototipos desarrollados. Al evaluar sus costos, se tiene

una diferencia del 4,46%, lo que implica que los prototipos desarrollados presentan mejores características y al mismo tiempo, tienen un costo menor. Estos resultados indican mayor competitividad en comparación al juguete comercial existente.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un sistema de desplazamiento basado en la integración de sensores inerciales para el control de un dispositivo móvil. A través de la implementación de esta solución de control, se logra el desplazamiento de un robot móvil en un plano cartesiano predefinido. Este proceso de movilización se efectúa con la activación precisa de actuadores estratégicos, los cuales responden de manera eficiente y precisa al procesamiento de los datos generados por el sensor inercial.
- El control remoto está constituido por etapas de: adquisición de datos, procesamiento, visualización, alimentación, recarga y comunicación, cada uno cuenta con funciones específicas. Por otro lado, el robot móvil está conformado por etapas de: comunicación, procesamiento, actuadores, visualización, alimentación y recarga, cada uno cuenta con funciones específicas.
- Según las pruebas de validación del sensor inercial GY-521, se determinó que los datos entregados por cada uno de los ejes de rotación siguen una distribución normal. Esto nos brinda una sólida indicación de que el sensor inercial está desempeñándose de manera confiable y precisa al medir los ángulos de los ejes de rotación.
- Según las pruebas de validación de velocidad del robot móvil, se determinó que las velocidades entregadas por cada uno de los ejes del sensor inercial GY-521 siguen una distribución normal, esto implica que el robot móvil mantiene velocidades confiables y precisas.
- En base a las pruebas de validación del tiempo de latencia entre los prototipos, se determinó que los resultados de la comunicación Bluetooth entre ambos prototipos cumplen con el requisito de tener una latencia inferior a 20 milisegundos, esto debido a que las muestras para cada una de las distancias siguen una distribución normal. Los enfoques empleados en este estudio brindaron una base sólida para confiar en la calidad y consistencia de la comunicación entre estos dispositivos.
- A partir de las pruebas de descarga de las baterías de los prototipos, se determinó que las mediciones proporcionadas por las baterías de los prototipos siguen una distribución normal. Esto implica que las baterías de ambos dispositivos se descargan en un tiempo de 25 minutos.

- A partir de las pruebas de carga de las baterías de los prototipos, se determinó que las mediciones proporcionadas por las baterías de los prototipos siguen una distribución normal. Esto implica que la batería del control remoto se carga en aproximadamente 10 minutos, mientras que, la batería del robot móvil se carga en aproximadamente 60 minutos.
- A partir de las pruebas de funcionamiento y usabilidad, se pudo verificar el funcionamiento de los prototipos desarrollados. El manejo de los prototipos es sencillo e intuitivo y, además, cumple con los requerimientos establecidos para cada dispositivo.
- En base al análisis económico realizado para el diseño e implementación de los prototipos, se determinó que el costo de los prototipos desarrollados es 4,46% menor que el costo del carro de acrobacias 4WD RC, lo que implica que los prototipos desarrollados presentan mejores prestaciones a un menor costo. Estos resultados indican mayor competitividad en comparación al juguete comercial existente.

## RECOMENDACIONES

- Ampliar el tiempo de realización de pruebas con la finalidad de encontrar posibles mejoras en el diseño de los prototipos, debido a que el tiempo dedicado al presente trabajo de integración curricular fue muy corto.
- Reducir el tamaño del prototipo de control remoto mediante el uso de componentes electrónicos miniaturizados, con la finalidad de tener un diseño más compacto.
- Implementar el prototipo mediante otro protocolo de comunicación inalámbrica que cuente con mayor alcance y menor latencia para reducir el tiempo de respuesta entre los prototipos de control remoto y robot móvil.
- Para investigaciones futuras, se puede ampliar el presente tema de estudio mediante la integración de un control háptico que permita informar al usuario sobre una colisión del robot móvil, esto le permitiría al usuario sentir físicamente que el robot ha colisionado, aunque no esté en la ubicación física del robot.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**AEROEXPO.** *Acelerómetros capacitivos.* [blog]. [Consulta: 11 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.aeroexpo.online/es/fabricante-aeronautico/acelerometro-capacitivo-3585.html>.

**AGUILAR CASTILLO, Rodolfo.** Robot móvil autónomo tipo diferencial basado en un controlador embebido. (Trabajo de titulación). Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. 2022.

**AGUILAR MÁRQUEZ, Armando; et al.** *Introducción a la inferencia estadística.* 1ª ed. México: Pearson Educación, 2010.

**ALBELO, Néstor.** Sistema de control remoto para realizar labores agrícolas. (Trabajo de titulación). Universidad de La Laguna. La Laguna. 2016.

**ALFARO PURISACA, Paúl Anthony.** Control de robots móviles autónomos en formación usando el esquema líder-seguidor. (Trabajo de titulación) (Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Control y Automatización. Lima-Perú. 2020.

**ALIBABA GROUP.** *Mecanum-Robot de rueda inteligente para Arduino Mega2560, Kit omnidireccional con Motor codificador de 12V, juguete para Proyecto de bricolaje.* [blog]. [Consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/4000794020032.html>.

**ALIEXPRESS.** *Coche acrobático 4WD Rc 2. Productos.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/1005005117520048.html>.

**ALIEXPRESS.** *Kit de Chasis de coche Robot inteligente con codificador de velocidad 4WD y caja de batería para Arduino.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/4000141444356.html>.

**ALIEXPRESS.** *Batería Lipo 3,7 450V 302035mAh . Batería Lipo 3,7 450V 302035mAh.* [blog]. [Consulta: 10 junio 2023]. Disponible en: <https://it.aliexpress.com/item/1005003292929172.html>.

**ALVARADO, José.** *Procesamiento Digital de Señales.* Cartago: Notas de clase, 2006.

**APAZA, A; et al.** “El Acelerómetro una Puerta a otros Avances Tecnológicos y su Aplicación en la Ingeniería Civil”. [en línea], [s.f.]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/>.

**APPLE.** *Medición. Utilidades.* [blog]. [Consulta: 12 noviembre 2023]. Disponible en: <https://apps.apple.com/mx/app/medici%C3%B3n/id1383426740>.

**ARCHILA MURILLO, Javier Ernesto.** Diseño e implementación de capacidades automáticas de navegación para un Robot Explorador Modular. (Trabajo de Titulación). Universidad del Valle de Guatemala, Mecatrónica. Guatemala. 2022.

**ARDUINO.** *Arduino Boards.* [blog]. [Consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/collections/boards>.

**AUTOBOTIC SDN BHD.** *2WD 2 Layer Round Smart Robot Car Chassis Kit With DC Motor Set For Arduino.* [blog]. [Consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.autobotic.com.my/2WD-2-Layer-Round-Smart-Robot-Car-Chassis-Kit-with-DC-Motor-Set-for-Arduino>.

**AUTODESK INC.** *EAGLE / Fusion 360. What is EAGLE?* [blog]. [Consulta: 9 junio 2023]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.

**AV ELECTRONICS.** *Convertidor Voltaje DC-DC Step-Down 3A MP1584EN.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-mp1584en/>.

**BARRIENTOS, Víctor; et al.** “Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte”. *Polibits*, vol. 35, (2007), (México).

**BERMÚDEZ, Giovani.** “Robots móviles. Teoría, aplicaciones y experiencias”. *Tecnura* [en línea], 2002, (Colombia), vol. 5 (10). [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/5882/7368>.

**CABRERA CASTRO, Andrea Gabriela y REINOZO CHACÓN, Jhon Paúl.** Diseño y construcción de un robot móvil omnidireccional basado en ROS para la enseñanza de conceptos

matemáticos a estudiantes de bachillerato. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. 2022.

**CALVO CID, Antonio.** Servomotor Industrial. Puesta en Servicio y Supervisión a través de un Automata Programable. (Trabajo de titulación). Universidad de Sevilla. Sevilla. 2022.

**CARRERA, Enrique y RODRÍGUEZ, Jefferson.** “Selección de características para atributos continuos en tareas de clasificación de actividad física”. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, vol. 5, n° 10, (2016), (México).

**CHACÓN MOLINA, Orlando Patricio.** Análisis para un sistema domótico con la arquitectura Arduino y Raspberry PI, sobre TCP/IP. (Trabajo de Titulación). Universidad del Azuay. Cuenca. 2014.

**CHOCA VARELA, Ángel Rodrigo y MOYA YANCHATIPAN Luis David.** Diseño e Implementación de un Robot Batalla de 30 libras. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Mecatrónica. Guayaquil. 2022.

**CHUNGA AGUILAR, Rixi Alexandra y DE LA CRUZ INFANTES, Juan Carlos.** Sistema Basado en RFID para Mejorar la Seguridad de Acceso a las oficinas de la Gerencia Regional de Transporte y Comunicaciones -La Libertad, 2019. (Trabajo de Titulación). Universidad César Vallejo, Escuela Académica de Ingeniería y Arquitectura. Trujillo-Perú. 2019.

**CORPUS CHIRINOS, Bryan Emmanuel y PORTUGAL AUCCASI, Ana María.** Diseño de una red inalámbrica para el servicio de pesaje en el sector agroindustrial utilizando balanzas Super SS mediante protocolo SPI basado en microcontrolador ESP32. (Trabajo de Titulación). Universidad Ricardo Palma. Lima. 2021.

**DEVORE, Jay L.** *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* [en línea]. México: Cengage Learning, 2008. [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <http://www.FreeLibros.me>.

**DIARIOELECTRONICO.** *GYPRO4300 Giroscopio MEMS digital para aplicaciones dinámicas. Giroscopios.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.diarioelectronico.com/gypro4300-giroscopio-mems-digital-para-aplicaciones-dinamicas/>.

**DIETRICHSON, A.** *Prueba de Shapiro-Wilks. Bookdown.* [blog]. [Consulta: 4 agosto 2023]. Disponible en: <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/test-de-normalidad.html>.

**DIGIKEY.** *IIS328DQTR. Acelerómetros.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.digikey.ca/en/products/detail/stmicroelectronics/IIS328DQTR/5268013>.

**DIRECTINDUSTRY.** *Acelerómetros con giroscopio. Mediciones de Posición, Velocidad y Aceleración.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/acelerometro-giroscopio-232891.html>.

**ELECTRICAL TECHNOLOGY.** *Brushless DC Motor (BLDC) – Construction, Working & Applications. Electrical Technology.* [blog]. [Consulta: 14 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/bldc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>.

**ELECTRÓNICA PLETT.** *Display OLED I2C 0.96 128x64 SSD1306 . Display OLED I2C 0.96 128x64 SSD1306.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <http://www.electronica.com.py/producto/display-oled-i2c-0-96-128x64-ssd1306-iic-oled-ssd1315/>.

**ELECTROSTORE.** *Batería LiPo 1S 3,7v 200mAh Turnnigy 20-50C. Baterías Lipo.* [blog]. [Consulta: 26 septiembre 2023]. Disponible en: <https://grupoelectrostore.com/shop/baterias/baterias-lipo/turnigy-baterias-lipo/bateria-lipo-1s-37v-200mah-turnigy-20-50c/>.

**ELECTROSTORE.** *Batería LiPo 2s 7,4v 1000mAh Turnigy 20-30C. Baterías Lipo.* [blog]. [Consulta: 26 septiembre 2023]. Disponible en: <https://grupoelectrostore.com/shop/baterias/baterias-lipo/turnigy-baterias-lipo/bateria-lipo-2s-7-4v-1000mah-turnigy-20-30c/>.

**ELECTROSTORE.** *BATERÍA LIPO 2S 7,4V 3000MAH 25C TATTU GENS ACE HARDCASE DEAN. BATERÍA LIPO 2S 7,4V 3000MAH 25C TATTU GENS ACE HARDCASE DEAN.* [blog]. [Consulta: 17 junio 2023]. Disponible en: <https://grupoelectrostore.com/shop/baterias/baterias-lipo/tattu/bateria-lipo-2s-74v-3000mah-25c-tattu-gens-ace-hardcase-dean/>.

**ENDEVCO.** *Acelerómetro 1 eje Model 2224C. Mediciones de Aceleración, Velocidad y Posición.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/endevco/product-5413-791911.html>.

**ESPAÑA, Martín.** *Sistemas de Navegación Integrada con Aplicaciones.* 2ª ed. CONAE, 2019.

**ESPRESSIF SYSTEMS.** *Espressif Hardware. ESP32-S Series.* [blog]. [Consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.espressif.com/en/products/socs>.

**FERNÁNDEZ MEJÍA, Bethy Andrea.** Diseño y construcción de un prototipo de rehabilitación para codo y muñeca. (Trabajo de Titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito-Ecuador. 2019.

**GARZA RODRÍGUEZ, Alejandro.** Análisis de los movimientos de pronación y supinación de las manos en pacientes con Parkinson mediante señales biomecánicas multiaxiales. (Trabajo de Titulación) (Doctoral). Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. 2022.

**GAYDOU, David; et al.** “Filtro complementario para estimación de actitud aplicado al controlador embebido de un cuatrirrotor”. *CASE Congreso Argentino de Sistemas Embebidos*, (2015).

**GIMÉNEZ BONASTRE, Alfred Raúl.** Desarrollo de un Sistema Integrado de Navegación Inercial: Interficie IMU + FPGA. (Trabajo de Titulación). : Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. 2010.

**GÓMEZ ARIAS, Britam Arom.** Desarrollo e implementación de una estrategia para la evaluación automática del riesgo de caídas *en personas usando sensores inerciales*. (Trabajo de Titulación) (Doctoral). Universidad de Concepción. Concepción:. 2021.

**GÓMEZ TUQUERRES, Franklin Noe.** Mando de un servomotor industrial mediante un PLC S7-300 para prácticas de control de movimiento. (Trabajo de Titulación). Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga. 2021.

**GONZÁLES MAÑERO, Francisco.** Estudio y modelado de errores que afectan a una Unidad de Medidas Inerciales de bajo coste. (Trabajo de Titulación). Universidad de Sevilla. Sevilla. 2016.

**GRACIA, Luis.** Modelado Cinemático y Control de Robots Móviles con Ruedas. (Trabajo de Titulación) (Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. [s.f.].

**GUTIÉRREZ GARCÍA, Jesús Fernando.** Giroscopios y acelerómetros electrónicos para medición de velocidad angular de mecanismos. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Ensenada, Baja California. 2020.

**HERROZ HERRERA, Alex; et al.** “Planificación inteligente de trayectorias para un robot móvil diferencial en entornos dinámicos”. *Congreso Internacional de Mecatrónica Control e Inteligencia Artificial (CIMCIA)*, (2022), México.

**HOBBYDU.** *Motor reductor 48:1 con doble eje de plástico 3-6V. Motor reductor 48:1 con doble eje de plástico 3-6V.* [blog]. [Consulta: 8 junio 2023]. Disponible en: <https://hobbydu.com/motores/motor-reductor-tt-doble-eje-de-plastico-3-6v-398.html>.

**HOBBYTRONICA.** *Modulo Indicador Carga De Bateria De Litio 2s 6.6v - 8.4v. Hobbytronica.* [blog]. [Consulta: 7 septiembre 2023]. Disponible en: [https://www.hobbytronica.com.ar/MLA-917994156-modulo-indicador-carga-de-bateria-de-litio-2s-66v-84v-\\_JM](https://www.hobbytronica.com.ar/MLA-917994156-modulo-indicador-carga-de-bateria-de-litio-2s-66v-84v-_JM).

**IBM.** *IBM SPSS Statistics. IBM.* [blog]. [Consulta: 4 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/products/spss-statistics>.

**IGLESIAS NAVARRO, I.** Interfaz gráfica para medición de ángulos de extremidades inferiores del cuerpo humano por medio de sensores inerciales. (Trabajo de Titulación). Universidad Técnica del Norte. Ibarra. 2021.

**ISLAS SILVAS, Osbel Alejandro.** Algoritmo inteligente para la optimización del proceso del proceso de carga en una batería LiPo. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad Autónoma de Baja California. Tijuana, 2019.

**KIDDIE CUTIE PTY. LTD.** *Activities toys. 4WD RC Stunt Drift Car with Hand Gesture Remote Control.* [blog]. [Consulta: 10 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.kiddiecutie.com.au/products/4wd-rc-stunt-drift-car-with-hand-gesture-remote-control?fbclid=IwAR2G0iXfRsuErNHCg86Yj4YAsIAN8kAuasCUXlIH4ngEZVPUVZZBxBJfLk>.

**LICONA ALVITER, Juan Alberto.** Diseño y desarrollo de un robót móvil a bajo costo para niños: ECATEBOT. (Trabajo de Titulación). Universidad Autónoma del Estado de México, Computación. Ecatepec de Morelos. 2019.

**LÓPEZ, Ricardo Santiago.** Diseño, construcción y programación de un robot móvil autónomo. (Trabajo de Titulación). Universidad Nacional Autónoma de México, Computación. México. 2022.

**LUNA, Juan.** Desarrollo de un sistema de adquisición para la evaluación del balance corporal en base a la medida del movimiento del tronco. (Trabajo de Titulación). PUCP. Lima. 2019.

**MAESTRO, Rubén.** Integración de sensores y estrategia de control para robot móvil basado en microcontrolador. (Trabajo de Titulación). Universidad de Jaén. Jaén. 2018.

**MAGNABOSCO, Luca.** Control de movimiento de un robot móvil omnidireccional. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica de Catalunya. Catalunya. 2012.

**MAKITPRO.** *Tipos de motores.* [blog]. [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <http://makitpro.com/index.php/aprende/referencia/tipos-de-motores/>.

**MALO YAGÜE, Laura.** Control de un motor paso a paso. (Trabajo de Titulación). Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 2011.

**MARCHÁN URQUIZO, Carla Yesenia y GUANANGA OÑA, Wilson David.** Implementación de un prototipo de sistema electrónico de control multimodal para la supervisión y vigilancia en tiempo real de personas privadas de libertad. (Trabajo de Titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. 2018.

**MIT APP INVENTOR.** *MIT App Inventor Get Started.* [blog]. [Consulta: 26 septiembre 2023]. Disponible en: <https://appinventor.mit.edu/>.

**MONJE CENTENO, Daniel.** Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración. (Trabajo de Titulación). Universidad de Sevilla. Sevilla. 2010.

**MORALES SAMBONI, Camilo Andrés y CRUZ SILVA, María Fernanda.** Desarrollo de software a integrar con plataforma de tres grados de libertad para conformar un sistema de ajuste

de parámetros en sensores acelerómetro y giroscopio en unidades inerciales tipo MEMS. (Trabajo de Titulación). Universidad Autónoma del Cauca. Popayán. 2020.

**MULET ROJAS, Francisco Dénsil.** Implementación de algoritmo para el filtrado de señales en sensores inerciales de bajo costo. (Trabajo de Titulación). Universidad de las Ciencias Informáticas. La Habana. 2017.

**MUÑOZ POBLETE, Carlos; et al.** “Caw’s Walking State Recognition Based on Accelerometers and Gyroscopes Installed on Ear-Tags and Collar-Tags”. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 16, n° 9, (2018), (Chile).

**NAYLAMP MECHATRONICS.** *NODEMCU-32 38-pin ESP32 WiFi. NODEMCU-32 38-pin ESP32 WiFi.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/1011-nodemcu-32-38-pin-esp32-wifi.html>.

**NOBOA RIVERA, Jason Adel.** Diseño de una interfaz hombre máquina para la medición y control de parámetros de corte en una máquina CNC. (Trabajo de Titulación). Universidad Técnica del Norte. Ibarra. 2022.

**ORTEGA NOROÑA, Jonny Fabricio y YAPO PILLAJO, Luis Manolo.** Construcción de un robot móvil híbrido omnidireccional. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica Salesiana Quito. 2017.

**PÁEZ MARGARIT, Rubén.** Proyecto de desarrollo de un sistema de medida autónomo para la mejora del rendimiento en carreras de BMX. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 2022.

**PÁRAMO CARRANZA, Luis Alberto.** Análisis y diseño del filtro de Kalman para sistemas no lineales descritos por modelos difusos tipo Takagi-Sugeno. (Trabajo de Titulación) (Doctoral). Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. 2019.

**PIXELSQUID.** *Atari 2600 Joystick Controller. PNG Collections.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.pixelsquid.com/png/atari-2600-joystick-controller-893615392612685103?image=G03>.

**POZO ABREGÚ, John Antonio.** Diseño de muñeca activa de 2 grados de libertad para prótesis transradial. (Trabajo de Titulación). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. 2022.

**POZO, David.** Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio. (Trabajo de Titulación). Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2010.

**POZO, D; et al.** “Medición de Ángulos de Inclinación por Medio de Fusión Sensorial Aplicando Filtro de Kalman”. *EPN*, vol. 33, n° 1, (2014), (Quito).

**PROAÑO SOTO, Paúl Mauricio.** Evaluación del impacto de interferencias en sistemas de comunicaciones Wi-Fi a 2.4 GHz. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena. 2021.

**QASEM, Haytham.** “Design and Calibration of an Inertial Sensor System for Precise Vehicle Navigation”. *WPNC*, (2008).

**QUICALIQUIN CUSHQUI, Mayra Viviana.** Diseño e implementación de un prototipo de robot tipo oruga para exploración en caso de sismos controlado inalámbricamente. (Trabajo de Titulación). Universidad Tecnológica Israel. Quito. 2019.

**QUINTERO, Vanessa; et al.** “Baterías de ion litio: características y aplicaciones”. *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, n° 1, (2021), (Panamá).

**RAFIQ, Arif; et al.** “Development of a simple and low-cost smartphone gimbal with MPU-6050 sensor”. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 1, n° 4, (2020), (Indonesia).

**RAMÍREZ GOROSTIZAGA, Iker.** Diseño hardware y desarrollo de librerías para la implementación de una plataforma open source basada en un microcontrolador PIC como alternativa a la plataforma Arduino UNO. (Trabajo de Titulación). Universidad de las Islas Baleares. Palma. 2016.

**RASPBERRY PI.** *Raspberry Pi computers and microcontrollers. Raspberry Pi computers and microcontrollers.* [blog]. [Consulta: 20 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.com/products/>.

**REBOLLAR, Alicia Martínez; et al.** “Adquisición de señales digitales utilizando teléfonos inteligentes y FIWARE”. *Research in Computing Science*, vol. 148, n° 8, (2019).

**REDROBÁN, Laura.** Diseño e implementación de un prototipo para el control y tarifación del servicio de taxi a través de sensores inerciales. (Trabajo de Titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. 2018.

**RICO GARCÍA, Mateo.** Caracterización de la dinámica del tren inferior humano usando unidades de medición inercial. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín. 2018.

**RICO, J.; et al.** “Comparación de algoritmos de estimación de actitud”. *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, (2015), (Bilbao).

**RIVERA, María F.** “Estructura de celosía o lattice aplicada a filtros adaptativos en el procesamiento digital de señales”. *Espacios* [en línea], 2020, vol. 41 (47). [Consulta: [s.f.]]. ISSN: 0798-1015. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com/a20v41n47/a20v41n47p09.pdf>.

**ROBO.IN.** *Mechanical Components and Workbencho Tools. 60MM-K Mecanum Wheel Compatible with 6.7mm Coupling (Pack of 4)-Black.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://robu.in/product/60mm-k-mecanum-wheel-compatible-with-6-7mm-coupling-pack-of-4-black/>.

**RODRÍGUEZ ARMESTO, Alejandro.** Diseño de arquitectura, control y programación de robot móvil controlado por gestos. (Trabajo de Titulación). Universidad de Sevilla, Electrónica, Robótica y Mecatrónica. Sevilla. 2022.

**SALAZAR, J.** *Redes inalámbricas.* [blog]. [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <https://www.techpedia.eu>.

**SAN JOSÉ, A.** *Pantalla OLED 0.96" 128x64. Pantalla OLED 0.96" 128x64.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/pantalla-oled-0-96-128x64-1>.

**SÁNCHEZ GALVIS, Laura María del Pilar.** Prototipo basado en sensores inerciales para el seguimiento de la actividad física. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad Autónoma de Manizales. Manizales. 2019.

**SÁNCHEZ PAREDES, D.A.** Diseño y construcción de una máquina prototipo, para rehabilitación de muñeca con esguince de grado 1, mediante el control de movimientos asistidos. (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica Salesiana. Quito. 2022.

**SANDOROBOTICS.** *Controlador Para Motor Dual TB6612FNG. Controlador Para Motor Dual TB6612FNG.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://sandorobotics.com/producto/713/>.

**SEED STUDIO.** *Getting Started with Seeed Studio XIAO ESP32S3 (Sense). Getting Started with Seeed Studio XIAO ESP32S3 (Sense).* [blog]. [Consulta: 7 junio 2023]. Disponible en: [https://wiki.seeedstudio.com/xiao\\_esp32s3\\_getting\\_started/](https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32s3_getting_started/).

**SEMINARIO GASTELO, Javier Martín.** Diseño de controlador de velocidad de motor brushless DC mediante la fuerza contraelectromotriz. (Trabajo de Titulación). Universidad de Piura. Piura. 2021.

**SÖDERBY, K. y HYLÉN, J.** *Tutoriales de Arduino IDE 2. Primeros pasos con Arduino IDE 2.* [blog]. [Consulta: 9 junio 2023]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2>.

**SOLANO CARRASCO, Abraham.** Sistema de comunicación inalámbrica (Zigbee) para los medidores digitales de energía eléctrica. (Trabajo de Titulación). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 2019.

**SORIA ROCHA, Diego Manuel y VACA DÁVALOS, Carlos Eduardo.** Diseño y construcción de un vehículo prototipo auto balanceado de dos ruedas longitudinales. (Trabajo de Titulación). Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí. 2015.

**SPENCER VARGAS, Daniel Orlando.** Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para moto eléctrica. (Trabajo de Titulación). Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2019.

**SSDIELECT.** *MPU6050 (GY-521) Sensor acelerómetro y giroscopio. MPU6050 (GY-521) Sensor acelerómetro y giroscopio.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://ssdielect.com/acelerometro-y-magnetometro-1/1330-mpu6050-gy-521.html>.

**STUARDI, José E; et al.** “Caracterización del diseño de bajo costo de un acelerómetro SMEM para un uso específico”. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 9, n° 1, (2022), (Argentina).

**SUPERROBOTICA.** *ROBOT TRI-TRACK SIN ELECTRONICA S300167.* *SuperRobotica.* [blog]. [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <http://www.superrobotica.com/S300167.htm>.

**TECNEU.** *Acelerometro Y Giroscopio Mpu-6050 Gy-521.* *Acelerometro Y Giroscopio Mpu-6050 Gy-521.* [blog]. [Consulta: 2 junio 2023]. Disponible en: <https://www.tecneu.com/products/acelerometro-y-giroscopio-mpu-6050-gy-521>.

**TEEGGI.** *TeeGGi, auto de acrobacias a control remoto con sensor de gestos para niños, vehículo todoterreno 4WD RC deformable.* *Juguetes y Juegos.* [blog]. [Consulta: 9 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/acrobacias-veh%C3%ADculo-todoterreno-deformable-juguetes/dp/B09MB8JDQ8?th=1>.

**TRUJILLO MORA, Valentín.** *Entender los diferentes tipos de locomoción de los robots móviles (Locomoción con Ruedas).* Zumpango de Ocampo: Unidad de aprendizaje, 2015.

**URUEÑA ORELLANA, Cristóbal Andrés.** Diseño y evaluación de un acelerómetro basado en el uso de recolectores de energía piezoeléctricos. (Trabajo de Titulación). Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2021.

**VELÁSQUEZ, Sergio y GÓMEZ, Carlos.** “Monitoreo de variables analógicas usando Raspberry PI”. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 17, n° 69, (2013), (Venezuela).

**VISTRÓNICA.** *Módulo de carga y protección BMS para dos baterías 18650 con balanceador HW-391.* <https://www.vistronica.com/baterias/accesorios/modulo-de-carga-y-proteccion-para-baterias-18650-con-balanceador-hw-391-detail.html>. [blog]. [Consulta: 23 junio 2023]. Disponible en: <https://www.vistronica.com/baterias/accesorios/modulo-de-carga-y-proteccion-para-baterias-18650-con-balanceador-hw-391-detail.html>.

**WALPOLE, Ronald E.; et al.** *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* [en línea]. 8ª. México: Pearson Educación, 2007. [Consulta: [s.f.]]. Disponible en: <https://www.pearsoneducacion.net/walpole>.

**WANG, Z.; et al.** “Modeling, Simulation and Implementation of All Terrain Adaptive Five DOF Robot”. *Sensors*, vol. 22, n° 18, (2022).

**ZAMBRANO, Iván; et al.** *Memorias del I Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación*. Quito:Abya-Yala, 2018.

**ZAMBRANO PÉREZ, Víctor Daniel.** Implementación de algoritmos de determinación de rutas para el robotino® de Festo. (Trabajo de Titulación). Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2015.

# ANEXOS

## Anexo A: Hoja de datos de la tarjeta de desarrollo Xiao ESP32-S3

### Introduction

Seed Studio XIAO Series are diminutive development boards, sharing a similar hardware structure, where the size is literally thumb-sized. The code name "XIAO" here represents its half feature "Tiny", and the other half will be "Puissant". Seed Studio XIAO ESP32S3 Sense integrates camera sensor, digital microphone and SD card supporting. Combining embedded ML computing power and photography capability, this development board can be your great tool to get started with intelligent voice and vision AI.

### Specification

Item	Seed Studio XIAO ESP32S3	Seed Studio XIAO ESP32S3 Sense
Processor	ESP32-S3R8 Xtensa LX7 dual-core, 32-bit processor that operates at up to 240 MHz	
Wireless	Complete 2.4GHz Wi-Fi subsystem BLE: Bluetooth 5.0, Bluetooth mesh	
Built-in Sensors	-	OV2640 camera sensor for 1600*1200 Digital microphone
Memory	On-chip 8M PSRAM & 8MB Flash	On-chip 8M PSRAM & 8MB Flash Onboard SD Card Slot, supporting 32GB FAT
Interface	1x UART, 1x IIC, 1x IIS, 1x SPI, 11x GPIOs (PWM), 9x ADC, 1x User LED, 1x Charge LED 1x Reset button, 1x Boot button	1x UART, 1x IIC, 1x IIS, 1x SPI, 11x GPIOs (PWM), 9x ADC, 1x User LED, 1x Charge LED, 1x B2B Connector (with 2 additional GPIOs) 1x Reset button, 1x Boot button
Dimensions	21 x 17.5mm	21 x 17.5 x 15mm (with expansion board)
Power	Input voltage (Type-C): 5V Input voltage (BAT): 4.2V	
	Circuit operating Voltage (ready to operate): - Type-C: 5V@19mA - BAT: 3.8V@22mA	Circuit operating Voltage (ready to operate): - Type-C: 5V@38.3mA - BAT: 3.8V@43.2mA (with expansion board)
	-	Webcam Web application: - Type-C: - Average power consumption: 5V/138mA - Photo moment: 5V/341mA - Battery: - Average power consumption: 3.8V/154mA - Photo moment: 3.8V/304mA
	-	Microphone recording & SD card writing: - Type-C: - Average power consumption: 5V/46.5mA - Peak power consumption: 5V/89.6mA - Battery: - Average power consumption: 3.8V/54.4mA - Peak power consumption: 3.8V/108mA

### XIAO ESP32S3/XIAO ESP32S3 Sense Pin List

**FRONT**

Legend:

- Touch: Pink
- Digital: Green
- Analog: Orange
- GPIO: Blue
- IIC: Grey
- Power: Red
- GND: Black
- SPI: Yellow
- UART: Light Blue

**BACK**

- GPIO2: Blue
- A1: Orange
- D1: Green
- D2: Green
- D3: Green
- D4: Green
- D5: Green
- D6: Green
- D7: Green
- D8: Green
- A2: Orange
- A3: Orange
- GPIO3: Blue

- 5V - This is 5v out from the USB port. You can also use this as a voltage input but you must have some sort of diode (schottky, signal, power) between your external power source and this pin with anode to battery, cathode to 5V pin.
- 3V3 - This is the regulated output from the onboard regulator. You can draw 700mA
- GND - Power/data/signal ground

### Features

- Powerful MCU Board:** Incorporate the ESP32S3 32-bit, dual-core, Xtensa processor chip operating up to 240 MHz, mounted multiple development ports, Arduino / MicroPython supported
- Advanced Functionality (for Sense):** Detachable OV2640 camera sensor for 1600\*1200 resolution, compatible with OV5640 camera sensor, integrating additional digital microphone
- Elaborate Power Design:** Lithium battery charge management capability, offer 4 power consumption model which allows for deep sleep mode with power consumption as low as 14uA
- Great Memory for more Possibilities:** Offer 8MB PSRAM and 8MB FLASH, supporting SD card slot for external 32GB FAT memory
- Outstanding RF performance:** Support 2.4GHz Wi-Fi and BLE dual wireless communication, support 100m+ remote communication when connected with U.FL antenna
- Thumb-sized Compact Design:** 21 x 17.5mm, adopting the classic form factor of XIAO, suitable for space limited projects like wearable devices

### Hardware Overview

Before everything starts, it is quite essential to have some basic parameters of the product. The following table provides information about the characteristics of Seed Studio XIAO ESP32S3.

**XIAO ESP32S3/XIAO ESP32S3 Sense front indication diagram**

**XIAO ESP32S3/XIAO ESP32S3 Sense back indication diagram**

# Anexo B: Hoja de datos del sensor GY-521



InvenSense Inc.  
1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.  
Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104  
Website: www.invensense.com

Document Number: RM-MPU-6000A-00  
Revision: 4.2  
Release Date: 08/19/2013

## MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2



**MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions**

Document Number: RM-MPU-6000A-00  
Revision: 4.2  
Release Date: 08/19/2013

### 3 Register Map

The register map for the MPU-60X0 is listed below.

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	B07	B06	B05	B04	B03	B02	B01	B00	
0D	13	SELF_TEST_X	RW		XA_TEST[4:2]						XG_TEST[4:2]	
0E	14	SELF_TEST_Y	RW		YA_TEST[4:2]						YG_TEST[4:2]	
0F	15	SELF_TEST_Z	RW		ZA_TEST[4:2]						ZG_TEST[4:2]	
10	16	SELF_TEST_A	RW		RESERVED					YA_TEST[1:0]	ZA_TEST[1:0]	
1A	26	CONFIG	RW						EXT_SYNC_SET[2:0]		RMR_RT_PN[7:0]	
1B	27	GYRO_CONFIG	RW						FB_SEL[1:0]		DLPF_CFG[0:0]	
1C	28	ACCEL_CONFIG	RW		XA_ST	YA_ST	ZA_ST		AFS_SEL[1:0]			
23	35	FFO_EN	RW		TEMP_FFO_EN	XO_FFO_EN	YO_FFO_EN	ZO_FFO_EN	ACCEL_FFO_EN	SLV2_FFO_EN	SLV1_FFO_EN	SLV0_FFO_EN
24	36	ICM_MST_CTRL	RW		MST_INT_EN	WANT_FOR_ES	SLV3_FFO_EN		ICM_MST_P_NMR			ICM_MST_CLK[3:0]
25	37	ICM_SLV0_ADDR	RW		ICM_SLV0_REG							ICM_SLV0_ADDR[8:0]
26	38	ICM_SLV0_REG	RW									ICM_SLV0_REG[7:0]
27	39	ICM_SLV0_CTRL	RW		ICM_SLV0_EN	ICM_SLV0_BYTE_SW	ICM_SLV0_REG_DIS	ICM_SLV0_GRP				ICM_SLV0_LEN[3:0]
28	40	ICM_SLV1_ADDR	RW		ICM_SLV1_REG							ICM_SLV1_ADDR[8:0]
29	41	ICM_SLV1_REG	RW									ICM_SLV1_REG[7:0]
2A	42	ICM_SLV1_CTRL	RW		ICM_SLV1_EN	ICM_SLV1_BYTE_SW	ICM_SLV1_REG_DIS	ICM_SLV1_GRP				ICM_SLV1_LEN[3:0]
2B	43	ICM_SLV2_ADDR	RW		ICM_SLV2_REG							ICM_SLV2_ADDR[8:0]
2C	44	ICM_SLV2_REG	RW									ICM_SLV2_REG[7:0]
2D	45	ICM_SLV2_CTRL	RW		ICM_SLV2_EN	ICM_SLV2_BYTE_SW	ICM_SLV2_REG_DIS	ICM_SLV2_GRP				ICM_SLV2_LEN[3:0]
2E	46	ICM_SLV3_ADDR	RW		ICM_SLV3_REG							ICM_SLV3_ADDR[8:0]
2F	47	ICM_SLV3_REG	RW									ICM_SLV3_REG[7:0]
30	48	ICM_SLV3_CTRL	RW		ICM_SLV3_EN	ICM_SLV3_BYTE_SW	ICM_SLV3_REG_DIS	ICM_SLV3_GRP				ICM_SLV3_LEN[3:0]
31	49	ICM_SLV4_ADDR	RW		ICM_SLV4_REG							ICM_SLV4_ADDR[8:0]
32	50	ICM_SLV4_REG	RW									ICM_SLV4_REG[7:0]
33	51	ICM_SLV4_DO	RW									ICM_SLV4_DO[7:0]
34	52	ICM_SLV4_CTRL	RW		ICM_SLV4_EN	ICM_SLV4_INT_EN	ICM_SLV4_REG_DIS					ICM_SLV4_DO[7:0]
35	53	ICM_SLV4_DO	R									ICM_SLV4_DO[7:0]
36	54	ICM_MST_STATUS	R		PMR_THROUGH	ICM_SLV4_DONE	ICM_SLV4_ARB	ICM_SLV4_NACK	ICM_SLV3_NACK	ICM_SLV2_NACK	ICM_SLV1_NACK	ICM_SLV0_NACK
37	55	INT_PN_CFG	RW		INT_LEVEL	INT_OPEN	LATCH_INT_EN	INT_RD_CLEAR	FBVNC_INT_LEVEL	FBVNC_INT_EN	ICM_BYPASS_INT_EN	
38	56	INT_ENABLE	RW					FFO_OVERFLOW_EN	ICM_MST_INT_EN			DATA_READY_INT
3A	58	INT_STATUS	R						ICM_MST_INT			DATA_READY_INT



**MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions**

Document Number: RM-MPU-6000A-00  
Revision: 4.2  
Release Date: 08/19/2013

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	B07	B06	B05	B04	B03	B02	B01	B00
3B	59	ACCEL_XOUT_H	R								ACCEL_XOUT[15:8]
3C	60	ACCEL_XOUT_L	R								ACCEL_XOUT[7:0]
3D	61	ACCEL_YOUT_H	R								ACCEL_YOUT[15:8]
3E	62	ACCEL_YOUT_L	R								ACCEL_YOUT[7:0]
3F	63	ACCEL_ZOUT_H	R								ACCEL_ZOUT[15:8]
40	64	ACCEL_ZOUT_L	R								ACCEL_ZOUT[7:0]
41	65	TEMP_OUT_H	R								TEMP_OUT[15:8]
42	66	TEMP_OUT_L	R								TEMP_OUT[7:0]
43	67	GYRO_XOUT_H	R								GYRO_XOUT[15:8]
44	68	GYRO_XOUT_L	R								GYRO_XOUT[7:0]
45	69	GYRO_YOUT_H	R								GYRO_YOUT[15:8]
46	70	GYRO_YOUT_L	R								GYRO_YOUT[7:0]
47	71	GYRO_ZOUT_H	R								GYRO_ZOUT[15:8]
48	72	GYRO_ZOUT_L	R								GYRO_ZOUT[7:0]
49	73	EXT_SENS_DATA_00	R								EXT_SENS_DATA_00[7:0]
4A	74	EXT_SENS_DATA_01	R								EXT_SENS_DATA_01[7:0]
4B	75	EXT_SENS_DATA_02	R								EXT_SENS_DATA_02[7:0]
4C	76	EXT_SENS_DATA_03	R								EXT_SENS_DATA_03[7:0]
4D	77	EXT_SENS_DATA_04	R								EXT_SENS_DATA_04[7:0]
4E	78	EXT_SENS_DATA_05	R								EXT_SENS_DATA_05[7:0]
4F	79	EXT_SENS_DATA_06	R								EXT_SENS_DATA_06[7:0]
50	80	EXT_SENS_DATA_07	R								EXT_SENS_DATA_07[7:0]
51	81	EXT_SENS_DATA_08	R								EXT_SENS_DATA_08[7:0]
52	82	EXT_SENS_DATA_09	R								EXT_SENS_DATA_09[7:0]
53	83	EXT_SENS_DATA_10	R								EXT_SENS_DATA_10[7:0]
54	84	EXT_SENS_DATA_11	R								EXT_SENS_DATA_11[7:0]
55	85	EXT_SENS_DATA_12	R								EXT_SENS_DATA_12[7:0]
56	86	EXT_SENS_DATA_13	R								EXT_SENS_DATA_13[7:0]
57	87	EXT_SENS_DATA_14	R								EXT_SENS_DATA_14[7:0]
58	88	EXT_SENS_DATA_15	R								EXT_SENS_DATA_15[7:0]
59	89	EXT_SENS_DATA_16	R								EXT_SENS_DATA_16[7:0]
5A	90	EXT_SENS_DATA_17	R								EXT_SENS_DATA_17[7:0]
5B	91	EXT_SENS_DATA_18	R								EXT_SENS_DATA_18[7:0]
5C	92	EXT_SENS_DATA_19	R								EXT_SENS_DATA_19[7:0]
5D	93	EXT_SENS_DATA_20	R								EXT_SENS_DATA_20[7:0]
5E	94	EXT_SENS_DATA_21	R								EXT_SENS_DATA_21[7:0]
5F	95	EXT_SENS_DATA_22	R								EXT_SENS_DATA_22[7:0]
60	96	EXT_SENS_DATA_23	R								EXT_SENS_DATA_23[7:0]
63	99	ICM_SLV0_DO	RW								ICM_SLV0_DO[7:0]
64	100	ICM_SLV1_DO	RW								ICM_SLV1_DO[7:0]
65	101	ICM_SLV2_DO	RW								ICM_SLV2_DO[7:0]
66	102	ICM_SLV3_DO	RW								ICM_SLV3_DO[7:0]



**MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions**

Document Number: RM-MPU-6000A-00  
Revision: 4.2  
Release Date: 08/19/2013

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	B07	B06	B05	B04	B03	B02	B01	B00		
67	103	ICM_MST_DELAY_CT	RW		DELAY_ES_SHADOW				ICM_SLV4_INT_EN	ICM_SLV3_INT_EN	ICM_SLV2_INT_EN	ICM_SLV1_INT_EN	ICM_SLV0_INT_EN
68	104	SIGNAL_PATH_RES	RW							GYRO_RESET	ACCEL_RESET	TEMP_RESET	
6A	106	USER_CTRL	RW		FFO_EN		ICM_MST_INT_EN	ICM_SLV3_INT_EN		FFO_RESET	ICM_MST_RESET	ICM_COND_RESET	
6B	107	PWR_MGMT_1	RW		DEVIC	SLEEP	CYCLE		TEMP_DIS			CLKSEL[2:0]	
6C	108	PWR_MGMT_2	RW		LP_WAKE_CTRL[1:0]		STBY_XA	STBY_YA	STBY_ZA	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG	
72	114	FFO_COUNTH	RW									FFO_COUNT[15:8]	
73	115	FFO_COUNTL	RW									FFO_COUNT[7:0]	
74	116	FFO_R_W	RW									FFO_DATA[7:0]	
75	117	WHO_AM_I	R									WHO_AM_I[8:0]	

Note: Register Names ending in \_H and \_L contain the high and low bytes, respectively, of an internal register value.

In the detailed register tables that follow, register names are in capital letters, while register values are in capital letters and italicized. For example, the ACCEL\_XOUT\_H register (Register 59) contains the 8 most significant bits, ACCEL\_XOUT[15:8], of the 16-bit X-Axis accelerometer measurement, ACCEL\_XOUT.

The reset value is 0x00 for all registers other than the registers below.

- Register 107: 0x40.
- Register 117: 0x68.

# Anexo C: Hoja de datos de la pantalla OLED SSD-1306

**SOLOMON SYSTECH**  
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

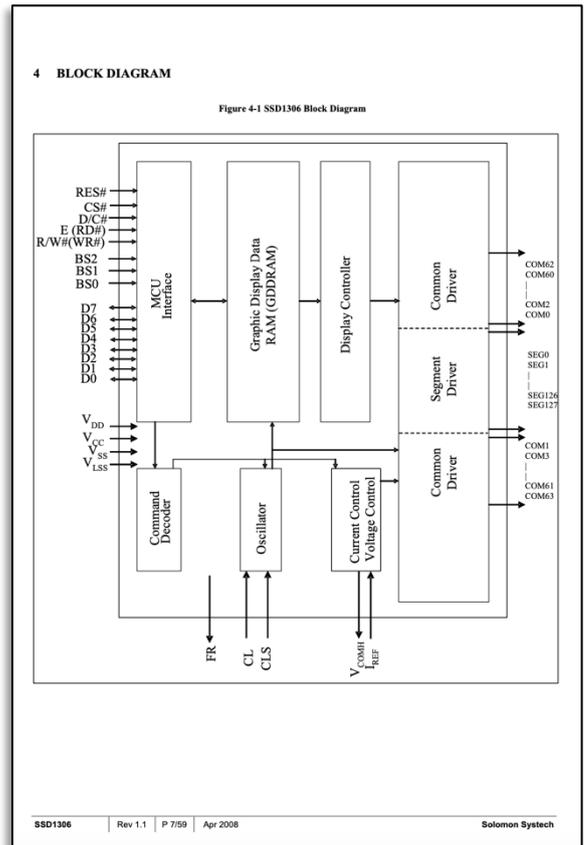
**SSD1306**

### Advance Information

**128 x 64 Dot Matrix**  
**OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller**

This document contains information on a new product. Specifications and information herein are subject to change without notice.

<http://www.solomon-systech.com>  
 SSD1306 | Rev 1.1 | P 1/59 | Apr 2008 | Copyright © 2008 Solomon Systech Limited



### 1 GENERAL DESCRIPTION

SSD1306 is a single-chip CMOS OLED/PLED driver with controller for organic / polymer light emitting diode dot-matrix graphic display system. It consists of 128 segments and 64 commons. This IC is designed for Common Cathode type OLED panel.

The SSD1306 embeds with contrast control, display RAM and oscillator, which reduces the number of external components and power consumption. It has 256-step brightness control. Data/Commands are sent from general MCU through the hardware selectable 6800/8080 series compatible Parallel Interface, I<sup>2</sup>C interface or Serial Peripheral Interface. It is suitable for many compact portable applications, such as mobile phone sub-display, MP3 player and calculator, etc.

### 2 FEATURES

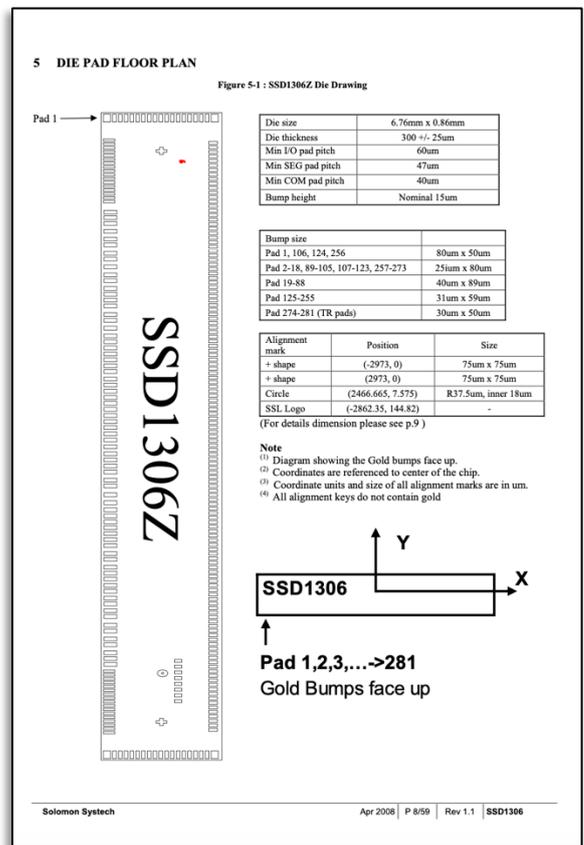
- Resolution: 128 x 64 dot matrix panel
- Power supply
  - V<sub>DD</sub> = 1.65V to 3.3V for IC logic
  - V<sub>CC</sub> = 7V to 15V for Panel driving
- For matrix display
  - OLED driving output voltage, 1.5V maximum
  - Segment maximum source current: 100µA
  - Common maximum sink current: 15mA
  - 256 step contrast brightness current control
- Embedded 128 x 64 bit SRAM display buffer
- Pin selectable MCU interfaces:
  - 8-bit 6800/8080-series parallel interface
  - 3/4 wire Serial Peripheral Interface
  - I<sup>2</sup>C Interface
- Screen saving continuous scrolling function in both horizontal and vertical direction
- RAM write synchronization signal
- Programmable Frame Rate and Multiplexing Ratio
- Row Re-mapping and Column Re-mapping
- On-Chip Oscillator
- Chip layout for COG & COF
- Wide range of operating temperature: -40°C to 85°C

### 3 ORDERING INFORMATION

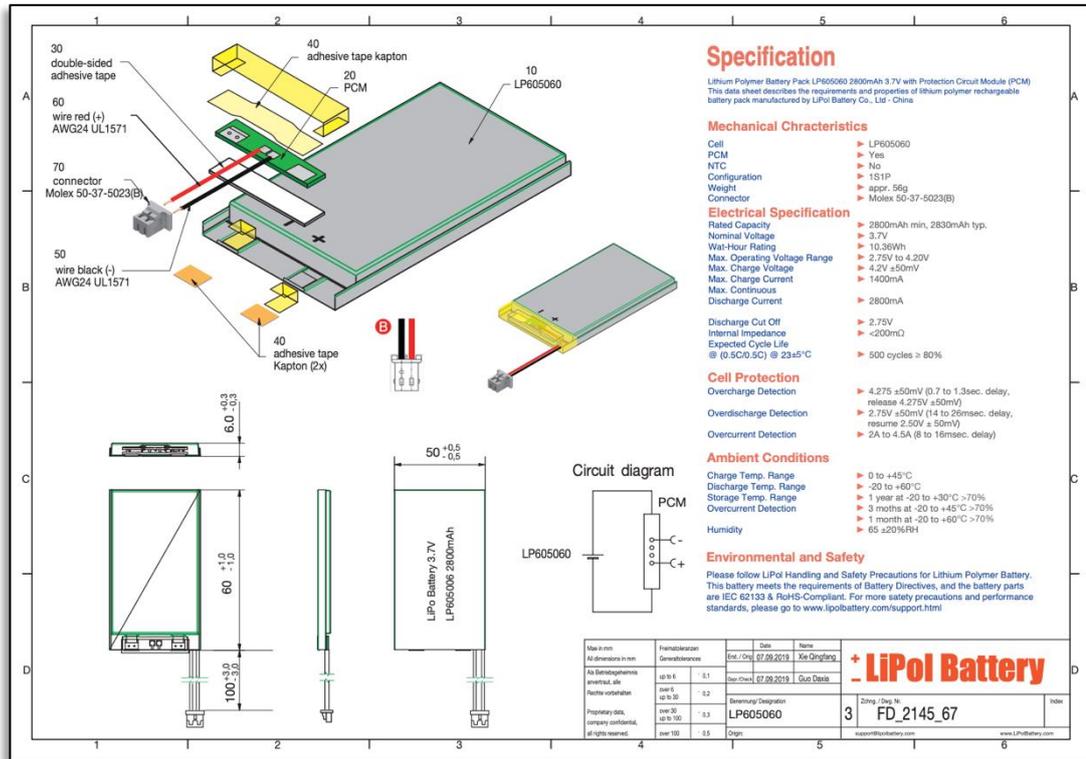
Table 3-1: Ordering Information

Ordering Part Number	SEG	COM	Package Form	Reference	Remark
SSD1306Z	128	64	COG	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Min SEG pad pitch : 47µm</li> <li>○ Min COM pad pitch : 40µm</li> <li>○ Die thickness: 300 +/- 25µm</li> <li>○ 35mm film, 4 sprocket hole, Folding TAB</li> </ul>
SSD1306TR1	104	48	TAB	11, 56	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 8-bit 80 / 8-bit 68 / SPI / I<sup>2</sup>C interface</li> <li>○ SEG, COM lead pitch 0.1mm x 0.997</li> <li>○ -0.0997mm</li> <li>○ Die thickness: 457 +/- 25µm</li> </ul>

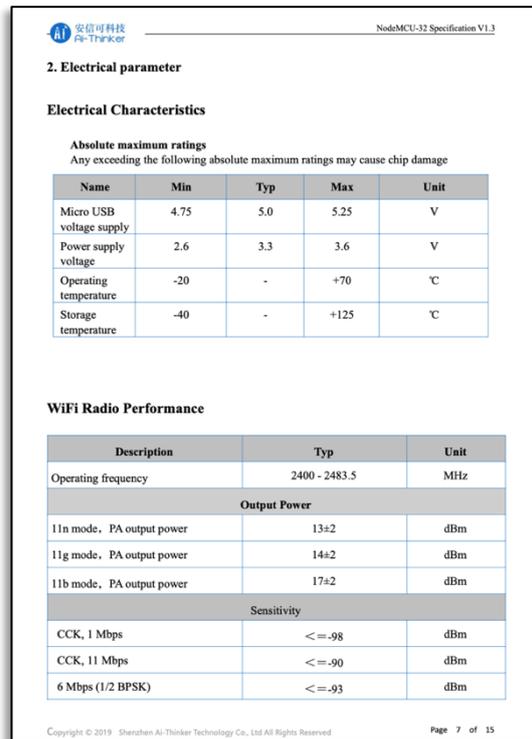
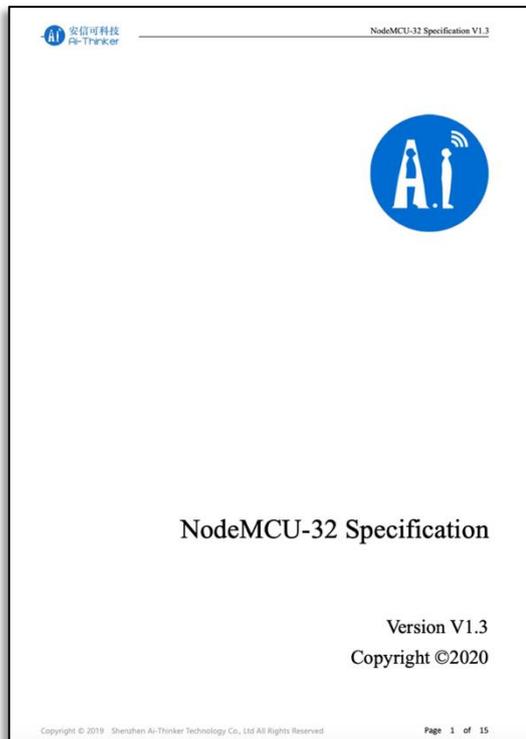
Solomon Systech | Apr 2008 | P 6/59 | Rev 1.1 | SSD1306



## Anexo D: Hoja de datos de la batería LiPo Turnigy 1s



## Anexo E: Hoja de datos de la tarjeta de desarrollo NodeMCU-32





# Anexo G: Hoja de datos del driver TB6612FNG

**TOSHIBA** TB6612FNG

Toshiba Bi-CD Integrated Circuit Silicon Monolithic

## TB6612FNG

Driver IC for Dual DC motor

TB6612FNG is a driver IC for DC motor with output transistor in LD MOS structure with low ON-resistor. Two input signals, IN1 and IN2, can choose one of four modes such as CW, CCW, short brake, and stop mode.



Weight: 0.14 g (typ.)

**Features**

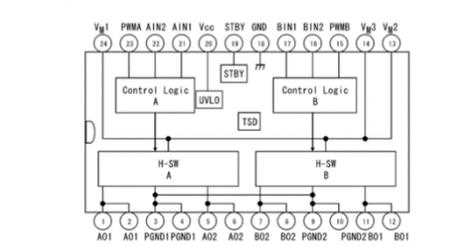
- Power supply voltage: VM = 15 V(Max)
- Output current: I<sub>OUT</sub> = 1.2 A(Av)/3.2 A (peak)
- Output low ON resistor: 0.5Ω (upper/lower Typ. @ VM ≥ 5 V)
- Standby (Power save) system
- CW/CCW/short brake/stop function modes
- Built-in thermal shutdown circuit and low voltage detecting circuit
- Small faced package(SSOP24: 0.65 mm Lead pitch)

\* This product has a MOS structure and is sensitive to electrostatic discharge. When handling this product, ensure that the environment is protected against electrostatic discharge by using an earth strap, a conductive mat and an ionizer. Ensure also that the ambient temperature and relative humidity are maintained at reasonable levels.

© 2014 TOSHIBA Corporation 1 2014-10-01

**TOSHIBA** TB6612FNG

### Block Diagram



**Pin Functions**

No.	Pin Name	I/O	Function
1	AO1	O	ch A output 1
2	AO1	—	—
3	POND1	—	Power GND 1
4	POND1	—	—
5	AO2	O	ch A output 2
6	AO2	—	—
7	BO2	O	ch B output 2
8	BO2	—	—
9	POND2	—	Power GND 2
10	POND2	—	—
11	BO1	O	ch B output 1
12	BO1	—	—
13	VM2	—	Motor supply
14	VM2	—	—
15	PWMB	I	ch B PWM input(200 kΩ pull-down at internal)
16	BN2	I	ch B input(2200 kΩ pull-down at internal)
17	BN1	I	ch B input(1200 kΩ pull-down at internal)
18	GND	—	Small signal GND
19	STBY	I	"L" = standby(200 kΩ pull-down at internal)
20	Vcc	—	Small signal supply
21	AIN1	I	ch A input(1200 kΩ pull-down at internal)
22	AIN2	I	ch A input(2200 kΩ pull-down at internal)
23	PWMA	I	ch A PWM input(200 kΩ pull-down at internal)
24	VM1	—	Motor supply

2 2014-10-01

**TOSHIBA** TB6612FNG

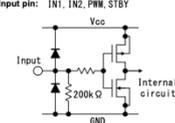
### Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristics	Symbol	Rating	Unit	Remarks
Supply voltage	VM	15	V	
	V <sub>CC</sub>	5	V	
Input voltage	V <sub>IN</sub>	-0.2 to 6	V	IN1, IN2, STBY, PWM pins
Output voltage	V <sub>OUT</sub>	15	V	O1, O2 pins
Output current	I <sub>OUT</sub>	1.2	A	Per 1 ch
	I <sub>OUT</sub> (peak)	3.2	A	tw = 20 ms Continuous pulse, Duty ≤ 20%
		0.78	A	IC only
Power dissipation	P <sub>D</sub>	0.89	W	50 mm × 50 mm, l = 1.6 mm Cu ≥ 40% in PCB mounting
		1.36	W	76.2 mm × 114.3 mm, l = 1.6 mm Cu ≥ 30% in PCB mounting
Operating temperature	T <sub>opr</sub>	-20 to 85	°C	
Storage temperature	T <sub>stg</sub>	-55 to 150	°C	

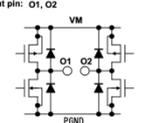
### Operating Range (Ta = -20 to 85°C)

Characteristics	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit	Remarks
Supply voltage	V <sub>CC</sub>	2.7	3	5.5	V	
	VM	2.5	5	13.5	V	
Output current (H-SW)	I <sub>OUT</sub>	—	—	1.0	A	VM ≥ 4.5 V
		—	—	0.4	A	4.5 V ≤ VM ≤ 2.5 V Without PWM Operation
Switching frequency	f <sub>SW</sub>	—	—	100	kHz	

Input pin: IN1, IN2, PWM, STBY



Output pin: O1, O2



3 2014-10-01

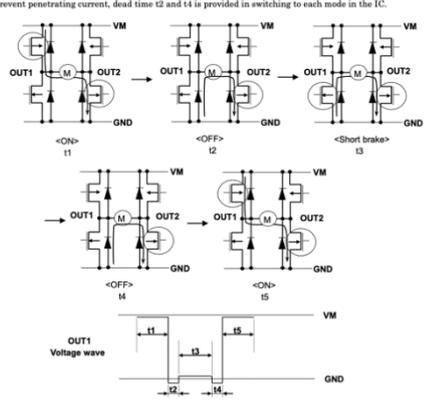
**TOSHIBA** TB6612FNG

### H-SW Control Function

Input				Output		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Mode
H	H	HL	H	L	L	Short brake
L	H	H	H	L	H	CCW
L	H	L	H	L	L	Short brake
H	L	H	H	H	L	CW
H	L	L	H	L	L	Short brake
L	L	H	H	OFF (High impedance)	OFF (High impedance)	Stop
HL	HL	HL	L	OFF (High impedance)	OFF (High impedance)	Standby

### H-SW Operating Description

\* To prevent penetrating current, dead time t2 and t4 is provided in switching to each mode in the IC.



4 2014-10-01

# Anexo H: Hoja de datos del convertidor DC-DC MP1584EN



**MP1584**  
**3A, 1.5MHz, 28V**  
**Step-Down Converter**

The Future of Analog IC Technology™

### DESCRIPTION

The MP1584 is a high frequency step-down switching regulator with an integrated internal high-side high voltage power MOSFET. It provides 3A output with current mode control for fast load response and easy compensation.

The wide 4.5V to 28V input range accommodates a variety of step-down applications, including those in an automotive input environment. A 100µA operational quiescent current allows use in battery-powered applications.

High power conversion efficiency over a wide load range is achieved by scaling down the switching frequency at light load condition to reduce the switching and gate driving losses.

The frequency foldback helps prevent inductor current runaway during startup and thermal shutdown provides reliable, fault tolerant operation.

By switching at 1.5MHz, the MP1584 is able to prevent EMI (Electromagnetic Interference) noise problems, such as those found in AM radio and ADSL applications.

The MP1584 is available in a thermally enhanced SOIC8E package.

### FEATURES

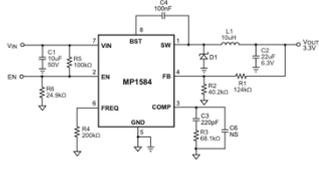
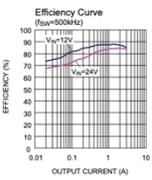
- Wide 4.5V to 28V Operating Input Range
- Programmable Switching Frequency from 100kHz to 1.5MHz
- High-Efficiency Pulse Skipping Mode for Light Load
- Ceramic Capacitor Stable
- Internal Soft-Start
- Internally Set Current Limit without a Current Sensing Resistor
- Available in SOIC8E Package.

### APPLICATIONS

- High Voltage Power Conversion
- Automotive Systems
- Industrial Power Systems
- Distributed Power Systems
- Battery Powered Systems

™MPS and "The Future of Analog IC Technology" are Registered Trademarks of Monolithic Power Systems, Inc.

### TYPICAL APPLICATION

MP1584 Rev. 1.0  
8/8/2011

www.MonolithicPower.com  
MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited.  
© 2011 MPS. All Rights Reserved.

1



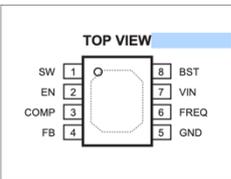
**MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER**

### ORDERING INFORMATION

Part Number*	Package	Top Marking	Free Air Temperature (T <sub>A</sub> )
MP1584EN	SOIC8E	MP1584EN	-20°C to +85°C

\* For Tape & Reel, add suffix -Z (e.g. MP1584EN-Z);  
For RoHS Compliant Packaging, add suffix -LF. (e.g. MP1584EN-LF-Z)

### PACKAGE REFERENCE



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (1)

Supply Voltage (V<sub>IN</sub>).....-0.3V to +30V  
Switch Voltage (V<sub>SW</sub>).....-0.3V to V<sub>IN</sub> + 0.3V  
BST to SW.....-0.3V to +6V  
All Other Pins.....-0.3V to +6V  
Continuous Power Dissipation (T<sub>A</sub> = +25°C)<sup>(2)</sup>.....2.5W  
Junction Temperature.....150°C  
Lead Temperature.....260°C  
Storage Temperature.....-65°C to +150°C

#### Recommended Operating Conditions (1)

Supply Voltage V<sub>IN</sub>.....4.5V to 28V  
Output Voltage V<sub>OUT</sub>.....0.8V to 25V

Operating Junction Temp. (T<sub>J</sub>).....-20°C to +125°C

#### Thermal Resistance (4)

θ<sub>JA</sub>.....50.....10.....°C/W  
θ<sub>JC</sub>.....10.....10.....°C/W

Notes:

- Exceeding these ratings may damage the device.
- The maximum allowable power dissipation is a function of the maximum junction temperature T<sub>J(MAX)</sub>, the junction-to-ambient thermal resistance θ<sub>JA</sub>, and the ambient temperature T<sub>A</sub>. The maximum allowable continuous power dissipation at any ambient temperature is calculated by P<sub>D(MAX)</sub> = (T<sub>J(MAX)</sub> - T<sub>A</sub>) / θ<sub>JA</sub>. Exceeding the maximum allowable power dissipation will cause excessive die temperature, and the regulator will go into thermal shutdown. Internal thermal shutdown circuitry protects the device from permanent damage.
- The device is not guaranteed to function outside of its operating conditions.
- Measured on JEDEC1-7, 4-layer PCB.

MP1584 Rev. 1.0  
8/8/2011

www.MonolithicPower.com  
MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited.  
© 2011 MPS. All Rights Reserved.

2



**MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER**

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V<sub>IN</sub> = 12V, V<sub>EN</sub> = 2.5V, V<sub>COMP</sub> = 1.4V, T<sub>A</sub> = +25°C, unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Feedback Voltage	V <sub>FB</sub>	4.5V < V <sub>IN</sub> < 28V	0.776	0.8	0.824	V
Upper Switch On Resistance	R <sub>DS(ON)</sub>	V <sub>BST</sub> = V <sub>SW</sub> = 5V		150		mΩ
Upper Switch Leakage		V <sub>EN</sub> = 0V, V <sub>SW</sub> = 0V, V <sub>IN</sub> = 28V		1		µA
Current Limit				4.0	4.7	A
COMP to Current Sense Transconductance	G <sub>CS</sub>			9		A/V
Error Amp Voltage Gain (5)				200		V/V
Error Amp Transconductance		I <sub>CCOMP</sub> = ±3µA	40	60	80	µA/V
Error Amp Min Source current		V <sub>FB</sub> = 0.7V		5		µA
Error Amp Min Sink current		V <sub>FB</sub> = 0.9V		-5		µA
VIN UVLO Threshold			2.7	3.0	3.3	V
VIN UVLO Hysteresis				0.35		V
Soft-Start Time (3)		0V < V <sub>FB</sub> < 0.8V		1.5		ms
Oscillator Frequency		R <sub>REGIO</sub> = 100kΩ		900		kHz
Shutdown Supply Current		V <sub>EN</sub> = 0V		12	20	µA
Quiescent Supply Current		No load, V <sub>FB</sub> = 0.9V		100	125	µA
Thermal Shutdown				150		°C
Thermal Shutdown Hysteresis				15		°C
Minimum Off Time (3)				100		ns
Minimum On Time (3)				100		ns
EN Up Threshold			1.35	1.5	1.65	V
EN Hysteresis				300		mV

Note:  
5) Guaranteed by design.

MP1584 Rev. 1.0  
8/8/2011

www.MonolithicPower.com  
MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited.  
© 2011 MPS. All Rights Reserved.

3



**MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER**

### PIN FUNCTIONS

SOIC Pin #	Name	Description
1	SW	Switch Node. This is the output from the high-side switch. A low forward drop Schottky diode to ground is required. The diode must be close to the SW pins to reduce switching spikes.
2	EN	Enable Input. Pulling this pin below the specified threshold shuts the chip down. Pulling it up above the specified threshold or leaving it floating enables the chip.
3	COMP	Compensation. This node is the output of the error amplifier. Control loop frequency compensation is applied to this pin.
4	FB	Feedback. This is the input to the error amplifier. The output voltage is set by a resistive divider connected between the output and GND which scales down V <sub>OUT</sub> equal to the internal +0.8V reference.
5	GND Exposed Pad	Ground. It should be connected as close as possible to the output capacitor to shorten the high current switch paths. Connect exposed pad to GND plane for optimal thermal performance.
6	FREQ	Switching Frequency Program Input. Connect a resistor from this pin to ground to set the switching frequency.
7	VIN	Input Supply. This supplies power to all the internal control circuitry, both BS regulators and the high-side switch. A decoupling capacitor to ground must be placed close to this pin to minimize switching spikes.
8	BST	Bootstrap. This is the positive power supply for the internal floating high-side MOSFET driver. Connect a bypass capacitor between this pin and SW pin.

MP1584 Rev. 1.0  
8/8/2011

www.MonolithicPower.com  
MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited.  
© 2011 MPS. All Rights Reserved.

4

## Anexo I: Hoja de datos de la batería LiPo

90 shrink wrap  
10 LP605175 x 2  
80 adhesive tape  
35 Kapton tape  
20 PCM  
70 adhesive tape  
50 d/s Tessa 4972  
60 Kapton tape  
30 solder-lag  
40 weld-lag  
35 Kapton tape  
130 d/s Nomex tape

**Circuit diagram**

CH1  
LP605175  
CH2  
LP605175  
PCM  
C-  
C+

### Specification

Lithium Polymer Battery Pack LP605175 2S 2500mAh 7.4V with Protection Circuit Module (PCM)  
This data sheet describes the requirements and properties of lithium polymer rechargeable battery pack manufactured by LIPo Battery Co., Ltd - China

#### Mechanical Characteristics

- Cell: LP605175
- PCM: Yes
- NTC: No
- Configuration: 2S2P
- Weight: appr. 125g

#### Electrical Specification

- Rated Capacity: 2500mAh min, 2530mAh typ.
- Nominal Voltage: 7.4V
- Watt-Hour Rating: 18.5Wh
- Max. Operating Voltage Range: 6.00V to 8.40V
- Max. Charge Voltage: 8.4V  $\pm$ 50mV
- Max. Charge Current: 1250mA
- Max. Continuous Discharge Current: 2500mA
- Discharge Cut Off: 6.00V
- Internal Impedance: <math><120m\Omega</math>
- Expected Cycle Life @ (0.5C/0.5C) @ 23 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C: 500 cycles  $\pm$  80%

#### Cell Protection

- Overcharge Detection: 8.475  $\pm$ 50mV (0.7 to 1.3sec. delay, release 8.535V  $\pm$ 50mV)
- Overdischarge Detection: 6.00V  $\pm$ 50mV (14 to 26msec. delay, resume 5.80V  $\pm$ 50mV)
- Overcurrent Detection: 4A to 4.5A (8 to 16msec. delay)

#### Ambient Conditions

- Charge Temp. Range: 0 to +45 $^{\circ}$ C
- Discharge Temp. Range: -20 to +60 $^{\circ}$ C
- Storage Temp. Range: 1 year at -20 to +30 $^{\circ}$ C >70%  
3 months at -20 to +45 $^{\circ}$ C >70%  
1 month at -20 to +60 $^{\circ}$ C >70%
- Humidity: 65  $\pm$ 20%RH

#### Environmental and Safety

Please follow LIPo Handling and Safety Precautions for Lithium Polymer Battery. This battery meets the requirements of Battery Directives, and the battery parts are IEC 62133 & RoHS-Compliant. For more safety precautions and performance standards, please go to [www.lipobattery.com/support.html](http://www.lipobattery.com/support.html)

Projection:	See the written besides part. The dimensions are considered inseparable.	Material:	6645165 6332
Size in mm: All dimensions in mm	Final dimension: Gesamtdimension	Date:	20.10.2019
Alt. Bezeichnung/alternatives:	up to 6	Name:	Xie Qingfang
Rechte vorbehalten.	over 6 up to 20	Rev. (Date):	20.10.2019
Proprietary data, company confidential, all rights reserved.	over 20 up to 100	Secondary Designation:	Cuo Daxia
	over 100	LP605175 2S	3
		Origin:	Zhong / Dep No.
			FD_5175_20
		www.LIPoBattery.com	support@lipobattery.com

## Anexo J: Hoja de datos del módulo indicador de carga SPBKAS 5.8

### PRODUCT 1-8S Green /Blue General

#### Parameters

- Working voltage: 3-34V, working current 5mA.
- Working temperature: -20~50  $^{\circ}$ C TZT
- The voltage error is 2% (requires higher accuracy, do not shoot)
- Size: 43.5 \* 20cm

#### Product Size and Display

100%  
75%  
50%  
25%

Only red frame is displayed when the battery is below 25%

#### How to use

- Lithium-ion battery The battery indicator board that can be used in Ni-MH batteries, as long as the required voltage is within the range of the parameter list TZT
- How to use: Connect the positive and negative terminals of the display board to the positive and negative terminals of the battery under test. The digital tube displays the real-time battery power.
- Warm sound tips. This model is not waterproof. If it is used outdoors, please waterproof it, because the electronic components should be used in a dry environment.

We Are The Distributor Of TZT Brand in Hong Kong, China

#### Connection display

- Battery-type power display, select the corresponding pad on the tin, you can detect the battery voltage corresponding to 1S-8S, very convenient TZT
- 1S-8S optional pads can only be connected one, not allowed at the same time, 2 or more simultaneous shorts occur
- 1-cell lithium battery connection:

- 3-cell lithium battery connection:

#### Application areas

- 1S to 8S lithium battery, the corresponding voltage battery can be (specifically as a table) TZT

	25%	50%	75%	100%
1S	3.3V	3.5V	3.7V	3.9V
2S	6.6V	7.0V	7.4V	7.8V
3S	9.9V	10.5V	11.1V	11.7V
4S	13.2V	14V	14.8V	15.6V
5S	16.5V	17.5V	18.5V	19.5V
6S	19.8V	21V	22.2V	23.4V

7S	23.1V	24.3V	25.5V	27.3V
8S	26.4V	28V	29.6V	31.2V

**Usage**

- Connect the positive and negative ports of the display panel to the positive and negative ports of the battery under test. The digital display tube will display the real-time battery power. Note that after connecting a few series of lithium batteries in series, it is necessary to connect in to the corresponding pads. For example, if a 2S battery is measured (ie. two 3.7V lithium batteries are connected in series), a short circuit on the pad corresponding to S2 of the board is required TZT
- Pay attention to the number of corresponding battery strings and use them within the corresponding voltage range. Do not exceed a voltage of 4.37V at most. (For example, if the pin on the pad of S3 is selected, the maximum voltage detected by the module should not exceed  $4.3 \times 3 = 12.9V$ )
- The battery voltage is greater than  $N \times 3.3V$ , and the battery voltage is 1 grid. (Note: N is the number of battery segments)
- Display the quantity of electricity parameter: (Note: N indicates the number of batteries)
  - When the battery voltage exceeds  $N \times 3.3V$ , it will illuminate 1 block of electricity TZT
  - When the battery voltage exceeds  $N \times 3.5V$ , it will illuminate 2 pieces of electricity TZT
  - When the battery voltage exceeds  $N \times 3.7V$ , it will illuminate 3 blocks
  - When the battery voltage exceeds  $N \times 3.9V$ , it will illuminate 4 blocks
  - When the battery voltage is less than  $N \times 3.3V$ , the four display TZT screens will be turned off, indicating that the battery power is less than 3.3V and needs to be charged.

Weight: 7.25g

### Anexo K: Hoja de datos del módulo BMS 18650

**1688** SUNLEPHANT 太阳能 光伏 锂电 储能 逆变器

**Shenzhen Global Technology Co., Ltd**

3 cell 12.6V 20A lithium battery protection board (with recovery function - AUTO Recovery)

**Model: BMS-20A-3S-S & BMS-20A-3S-EFJ**    **ms:72M5366,72M5373**

BMS-20A-3S-S    Standard BMS 3 cell 12.6V 20A lithium battery protection board (with recovery function - AUTO Recovery)  
Starting motor (less than 80A)

BMS-20A-3S-EFJ    Same as above with the difference of Starting motor less than 80A.

Application range: Suitable for lithium batteries with a normal voltage of 3.7V and fully charged 4.2V, including 1860 to 26650, Polymer lithium batteries.

PCB Size: 59\*20\*3.4

Weight: 4.3g

Charging Voltage: 12.6 - 13.6V

inflow discharge max: 20A

If heat dissipation environment is not adequate please reduce load

Input discharge normal: 10A

If heat dissipation environment is not adequate please reduce load

Standard version (S): Applicable to start electric motor with current below 60A and power up to 100W.

Enhanced version (EFJ): Applicable to start electric motor with current below 80A and power up to 100W, with interference function.

Recommended conditions:

- 3x 10C - 20C battery cells or 6x 5C - 10C cells are required
- Wire size should not be smaller than the 2.5mm<sup>2</sup> GND and 12.6V

12.6V 锂电池保护板 REV 2.3

适用电机/电钻, 禁止短路

12.9V Lithium Battery Protection Board Rev. 2.3

Application for electric motors with short circuit protection

BMS-20A-3S-S

BMS-20A-3S-EFJ

Shenzhen City, Guangdong Science and Technology Co., Ltd. Address: China's Shenzhen Futian District, Shenzhen Huangping North Road  
Copyright © 2010-2015 1688.com All rights reserved. Copyright and Trademark Notices

**1688** SUNLEPHANT 太阳能 光伏 锂电 储能 逆变器

**Shenzhen Global Technology Co., Ltd**

3S20A - Electric parameter	Min	Nor	Max	Unit	Notes
Self consumption current	32	35	35	mA	
Overcharge protection voltage	4.2	4.25	4.3	V	
Discharge recovery voltage	4.1	4.25	4.3	V	
Over-discharge protection voltage A	2.4	2.5	2.6	V	
Voltage after over-discharge protection	2.5	3	3.2	V	1C Discharge
Voltage after over-discharge protection	3.2	3.5	3.6	V	2C Discharge
Over-discharge recovery voltage	2.9	3.2	3.3	V	
Min. I <sub>in</sub>	10	10	14	mA	
Overcurrent protection current	86	85	85	A	
Over-current delay time	50	100	100	ms	
Continuous current	20	20	20	A	
Continuous rated power	0	250	250	W	
Environment temperature	-40	25	85	°C	

Trouble shooting:	Fault phenomenon	Fault Checking and Causes	Method of fix
Unable to charge	Unable to charge	Measure the voltage of 3 batteries. If the voltage of one group of batteries is exceeds about 4.25V, the protection board will start overcharge protection.	Match the batteries well, and don't mix the good batteries with the bad ones (normal function, no warranty)
Unable to discharge	Unable to discharge	Measure the voltage of 3 groups of batteries. If the voltage of one group of batteries is less than 2.7V, the protection board will start overcharge protection.	Match the batteries well, and don't mix the good batteries with the bad ones (normal function, no warranty)
Charge / discharge failure	Charge / discharge failure	0V, 4.2V, 8.4V, 12.6V wrong connection	Rewire or renew the board (Human fault, no warranty)
Overcharge/over-discharge failure	Overcharge/over-discharge failure	0V, 4.2V, 8.4V, 12.6V wrong connection	Rewire or renew the board (Human fault, no warranty)
Discharge protection	Discharge protection	Check the battery pack whether has sufficient discharge capacity and the starting current of the load whether exceeds the over-current protection current of the protective board.	Replacement of batteries with stronger discharge or protective board with larger current (beyond working range, no warranty required)
Element visual welding	Element visual welding	There is no connection between one pin of the component and PCB welding.	Repair welding (Maintainable by return)
Element continuous welding	Element continuous welding	There is a short circuit between two or more pins of a component.	Remove components and re-weld (Maintainable by return)
Electrostatic breakdown A	Electrostatic breakdown A	In the absence of electricity, measure the G, D and S pins of MOS transistors. If the forward and reverse resistances of any two pins are OD, it has been damaged.	Removal and replacement MOS transistors
Electrostatic breakdown B	Electrostatic breakdown B	Remove the MOS transistors and measure the resistance values of G and D poles, G and S pins. If there is breakdown, the resistance should be infinite under normal conditions.	Removal and replacement MOS transistors

Shenzhen City, Guangdong Science and Technology Co., Ltd. Address: China's Shenzhen Futian District, Shenzhen Huangping North Road  
Copyright © 2010-2015 1688.com All rights reserved. Copyright and Trademark Notices

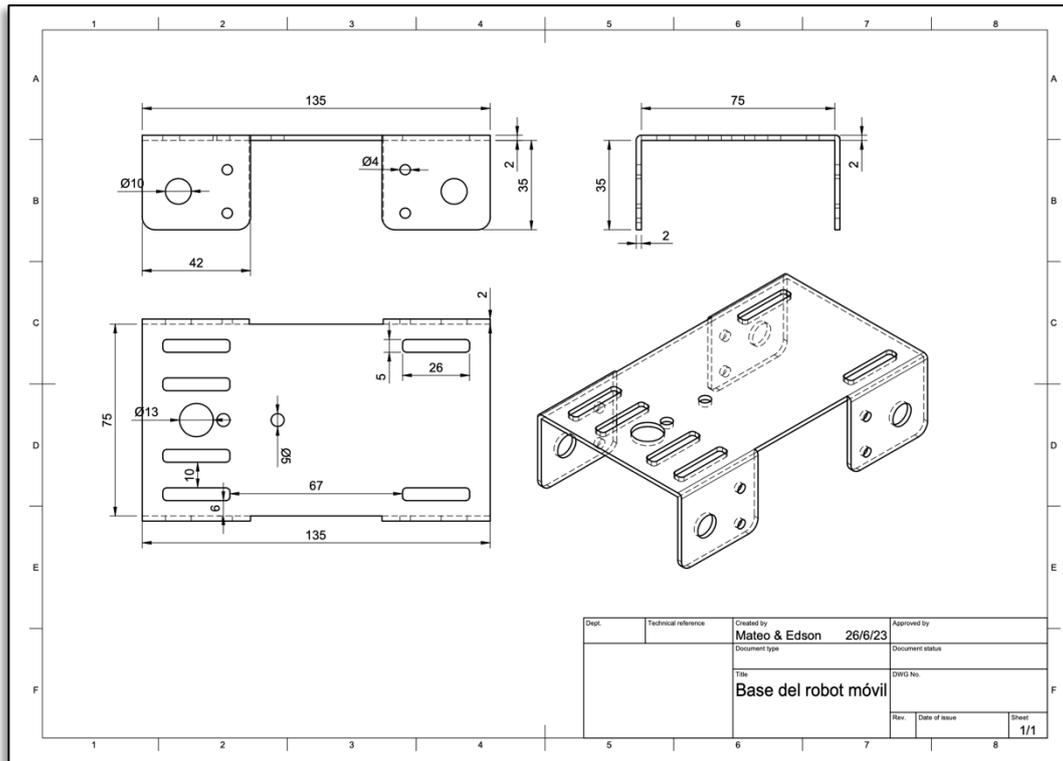




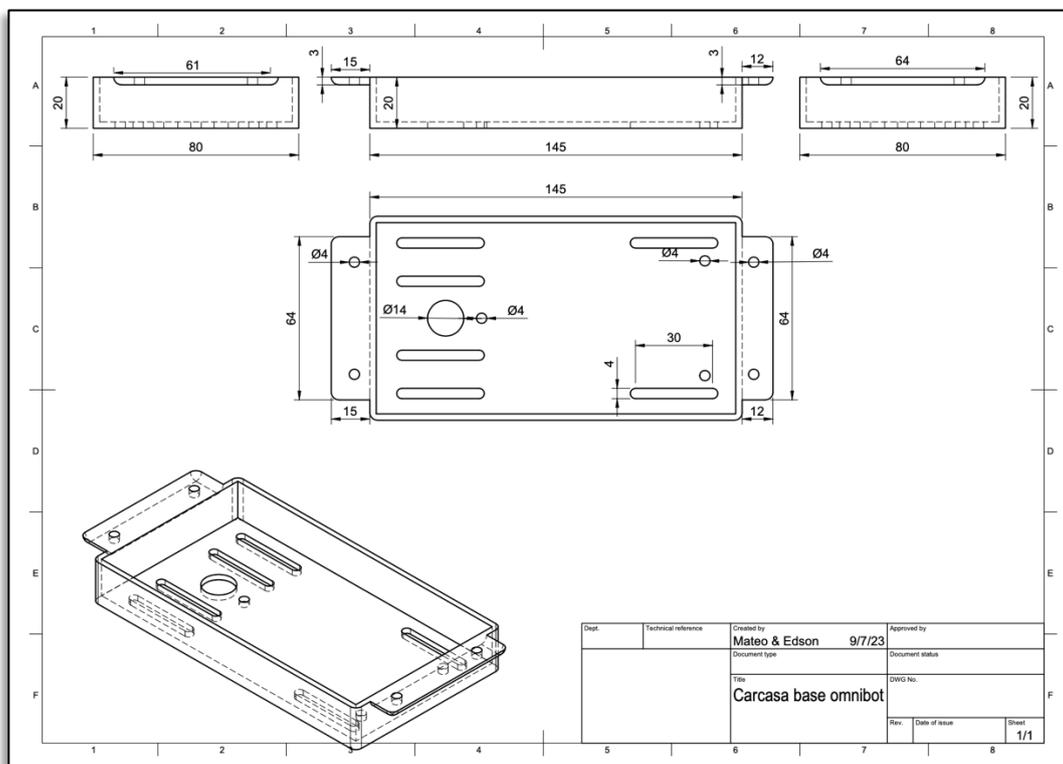




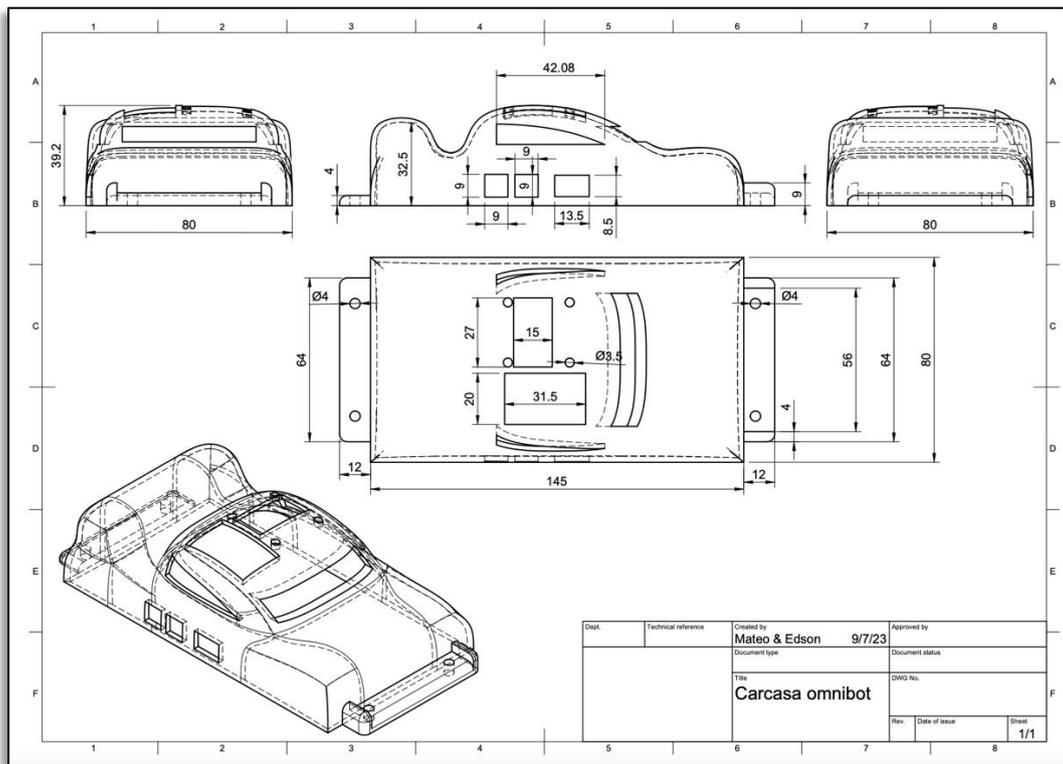
**Anexo P:** Plano de la estructura del panel de metal del prototipo de robot móvil



**Anexo Q:** Plano de la estructura de la base del prototipo de robot móvil



**Anexo R: Plano de la estructura de la base del prototipo de robot móvil**



**Anexo S: Pruebas de medición de ángulos del sensor GY-521**



## Anexo T: Hoja de datos del equipo patrón tacómetro

Experience the **Extech Advantage**

PRODUCT DATASHEET

### Combination Tachometer + IR Thermometer

✓ **Photo/Contact Tachometer includes a non-contact IR Thermometer**  
For non-contact surface temperature measurements

**Features:**

- Built-in IR thermometer with laser measures remote surface temperature on motors and rotating parts
- Wide Temperature range of -4 to 600°F (-20 to 315°C)
- Fixed 0.95 emissivity, 6:1 distance to target ratio
- Provides wide RPM (photo and contact) and Linear Surface Speed (contact) measurements
- Accurate to 0.05% with max resolution of 0.1rpm in either photo or contact mode
- Large 0.4" (5 digit) LCD display
- Non-contact Photo tachometer uses a Laser for greater measuring distance up to 6.5ft (2m)
- Contact tachometer for RPM and surface speed measurements
- Memory stores Min/Max/Last
- Characters on display reverse direction depending on mode
- Durable molded housing
- Complete with tips/wheel, four 1.5V AA batteries, reflective tape, and carrying case

Non-contact model for use on machinery where high speed measurements are required

Accessory wheels enable tachometer to measure linear surface speeds

Built-in **IR Thermometer**

Specifications	
Display counts	99,999 count LCD
Range (photo)	Photo: 15 to 99,999 RPM; Contact: 0.5 to 20,000 RPM
Range (contact)	0.2 to 9,999 Contact
Photo	0.05 to 1000 RPM
Basic Accuracy	±0.05%/±1 RPM
Max. gun resolution	0.1 rpm
Temperature (°F)	-4 to 600°F (-20 to 315°C)
Temperature (°C)	-20 to 315°C (-4 to 600°F)
Dimensions	8.5 x 2.8 x 1.2" (216 x 68 x 30mm)
Weight	15.6oz (439g)

**Ordering information:**

TachIR+ IR Thermometer  
 RPM10-NIST ..... RPM10 with NIST certificate  
 RPM10-NIST+ ..... RPM10 with NIST certificate  
 \*Limited NIST Product certified to all functions except IR Thermometer

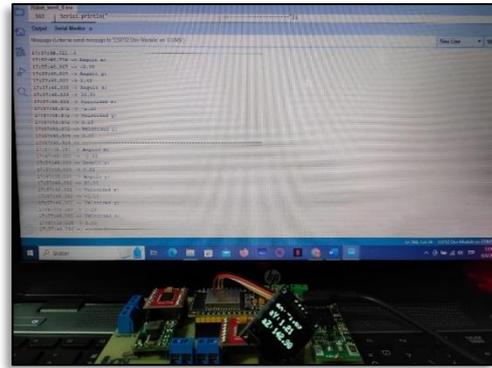
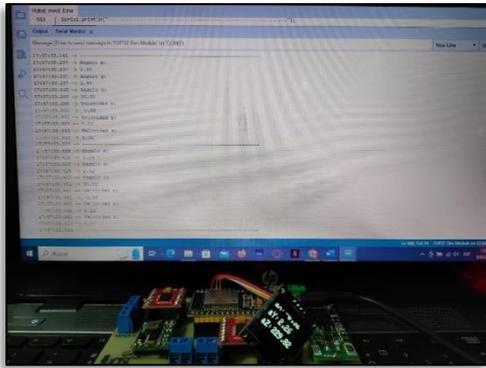
[www.extech.com](http://www.extech.com)

Specifications subject to change without notice.  
 Copyright © 2008 Extech Instruments Corporation. All rights reserved. Reading the sign of registration is where it is part of any sign.

## Anexo U: Pruebas de medición de velocidad con el sensor GY-521 y con el equipo patrón



## Anexo V: Pruebas de latencia



```

Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'DFRobot Beetle ESP32-C3' on 'COM7')
New Line 9600 baud

17:45:08.572 -> 1.17
-----
17:45:08.637 -> Angulo x:
17:45:08.637 -> 0.16
17:45:08.669 -> Angulo y:
17:45:08.669 -> -5.49
17:45:08.669 -> Angulo z:
17:45:08.700 -> 16.31
17:45:08.700 -> Velocidad x:
17:45:08.700 -> -0.99
17:45:08.700 -> Velocidad y:
17:45:08.733 -> -0.13
17:45:08.733 -> Velocidad z:
17:45:08.765 -> 1.17
-----
17:45:08.831 -> Angulo x:
17:45:08.831 -> 0.16
17:45:08.863 -> Angulo y:
17:45:08.863 -> -5.48
17:45:08.863 -> Angulo z:
17:45:08.863 -> 16.31
17:45:08.895 -> Velocidad x:
17:45:08.895 -> -0.99
17:45:08.895 -> Velocidad y:
17:45:08.926 -> -0.13
17:45:08.926 -> Velocidad z:
17:45:08.926 -> 1.17
    
```

## Anexo W: Especificaciones tecinas del multímetro HABOTEST HT 116

Description
Este multímetro portátil inteligente H0201212 HT 116 es preciso y fácil de usar, más preciso y versátil. Con múltiples funciones como voltaje de corriente continua CA, medición de corriente, resistencia, capacitancia, frecuencia y prueba de temperatura. Viene a prueba, no lo devuelva.
<b>Características:</b> Con pantalla grande a color VA, que le permite operar y ver los datos más claramente, le brinda una mejor experiencia de uso. Indicación de voltaje en corriente con alarma sonora y visual, generadora de advertencia de los usuarios. Se brinda una mejor experiencia de uso simple gama de aplicaciones, se puede utilizar para reparaciones eléctricas, ingeniería eléctrica, inspección de calidad, investigación y educación, etc. La función de luz de fondo, es más conveniente para que lo use y lo lee en la oscuridad. Multiplicación se puede utilizar para medición de voltaje y corriente CA y continua, medición de capacitancia y resistencia, prueba de frecuencia, trabajo y relación, también se puede utilizar para medición de temperatura y dióxido. Con voltaje de Corriente CA, corriente, resistencia, función de identificación automática de encendido y apagado y el reconocimiento automático de la función de entrada de corriente.
<b>Especificaciones:</b> Material: ABS Color: Negro Medición de corriente continua: Rango: 50.00mA/500.0mA; 0.0001mA/0.00001V Precisión: ±0.5% + 3 Voltaje de CA: Rango: 50.00mV/500.0mV; 0.0001V/0.01V/100.0V Precisión: ±0.8% + 3 Corriente continua: Rango: 50.00mA/500.0mA; 0.000mA/500.0mA; precisión: ±0.8% + 3 Rango: 0.000A, precisión: ±1.2% + 3 Corriente alterna: Rango: 50.00mA/500.0mA; 0.000mA/500.0mA; precisión: ±1.0% + 3 Frecuencia: Rango: 50.00Hz/500.0Hz/5.0kHz/50.0kHz/500.0kHz; precisión: ±0.8% + 3 Rango: 0.000A/0.000A/0.000A; precisión: ±1.2% + 3 Capacitancia: Rango: 0.000F/0.000F/0.000F/0.000F/0.000F/0.000F; precisión: ±0.8% + 3 Rango: 0.000F/0.000F/0.000F/0.000F/0.000F; precisión: ±1.2% + 3 Frecuencia: Rango: 0.000Hz/0.000Hz/0.000Hz/0.000Hz/0.000Hz/0.000Hz; precisión: ±1.0% + 3 Dióxido: Rango: 0.1% - 99.9% Precisión: ±1.0% + 2 Temperatura (°C): Rango: 40°C / 100°C / 40°C / 100°C Precisión: ±1.0% + 3 Cuenta: 9999 Batería: 3 Pantalla en color: 1 (sistema de activación y luz) BATERÍA (V): Medición relativa: 1 Medición de batería: 1 Función de alerta de sobrecalentamiento de la batería: 1 Indicación de batería baja: 1 Respuesta automática: 1 Indicación LED del conector de sonda: 1 Función: 3 (puede AAA no incluido) Materia del artículo: ABS/PC/Aluminio, 17.1%, Be Peso del artículo: 284g/0.3 onzas Número del modelo: H0201212/HT116/17.1% Be Peso del paquete: 302g/1.1 lb
<b>Lista de empaque:</b> 1 * multímetro 1 * manual de usuario



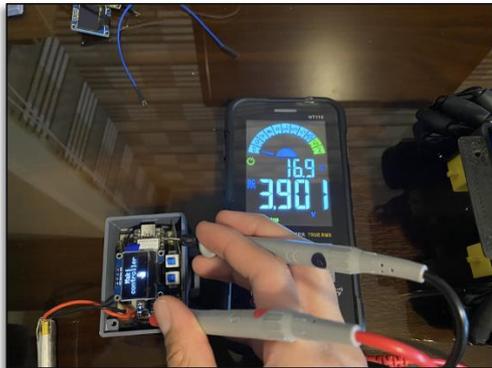
## Specifications

Material: ABS	Color: black
Ranges: 0.1%~99.9%	Direct current voltage:
Accuracy: $\pm(1.0\%+2)$	Ranges: 99.99mV/999.9mV, 9.999V/99.9V/999.0V
Temperature ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$ ):	Accuracy: $\pm(0.5\%+3)$
Ranges: $-40^{\circ}\text{C}$ ~ $1000^{\circ}\text{C}$ , $-40^{\circ}\text{F}$ ~ $1832^{\circ}\text{F}$	AC voltage:
Accuracy: $\pm(1.0\%+3)$	Ranges: 99.99mV/999.9mV, 9.999V/99.9V/750.0V
Counts: 9999	Accuracy: $\pm(0.8\%+3)$
Bargraph: $\checkmark$	Direct current:
Live test: $\checkmark$ (sound and light alarm)	Ranges: 99.99 $\mu\text{A}$ /999.9 $\mu\text{A}$ , 99.99mA/999.9mA, accuracy: $\pm(0.8\%+3)$
MAX/MIN/AVG: $\checkmark$	Ranges: 9.999A, accuracy: $\pm(1.2\%+3)$
Relative measurement: $\checkmark$	Capacitance:
Data hold: $\checkmark$	Ranges: 9.999F/99.99F/999.9nF/9.999 $\mu\text{F}$ /99.99 $\mu\text{F}$ /999.9 $\mu\text{F}$
Fuse burning prompt function: $\checkmark$	Accuracy: $\pm(4.0\%+3)$
Low battery indication: $\checkmark$	Ranges: 9.999mF/99.99mF, accuracy: $\pm(5.0\%+5)$

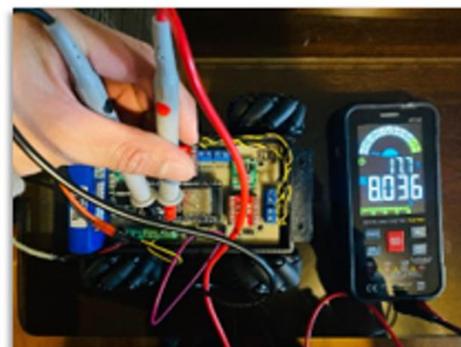
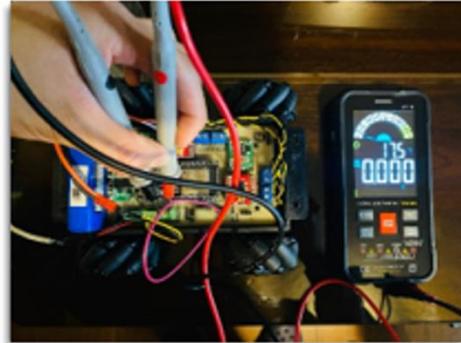
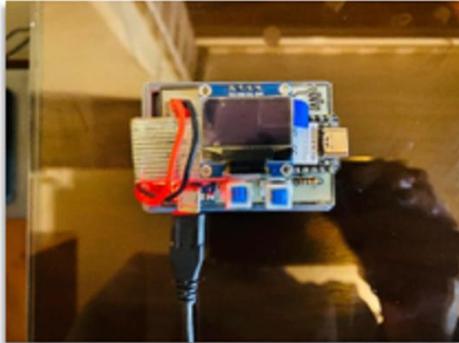
## Detalles

Dispositivo inteligente	no	Corriente CC	99.99 $\mu\text{A}$ /999.9 $\mu\text{A}$ , 99.99mA/999.9mA accuracy: $\pm(0.8\%+3)$
Corriente CA	99.99 $\mu\text{A}$ /999.9 $\mu\text{A}$ , 99.99mA/999.9mA accuracy: $\pm(1.0\%+3)$	Voltage DC	99.99mV/999.9mV, 9.999V/99.9V/999.0V
AC voltage	99.99mV/999.9mV, 9.999V/99.9V/750.0V	Modo de uso	--
Rango de capacitancia medible	9.999F/99.99F/999.9nF/9.999 $\mu\text{F}$ /99.99 $\mu\text{F}$ /999.9 $\mu\text{F}$ accuracy: $\pm(4.0\%+3)$	Rango de resistencia medible	99.99 $\Omega$ /999.9 $\Omega$ /9.999k $\Omega$ /99.99k $\Omega$ accuracy: $\pm(0.8\%+3)$
Número de modelo	HABOTEST HT116	Dimensiones	--
Rango de inductancia medible	--	Tipo de pantalla	Pantalla digital
Suministros para manualidades	ELECTRICAL	Nombre de la marca	metek
Certificación	NONE	Origen	CH(Origin)

## Anexo X: Pruebas de descarga de los prototipos de control remoto y robot móvil



**Anexo Y:** Pruebas de carga de los prototipos de control remoto y robot móvil





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 20/11/2023

<b>INFORMACIÓN DE LOS AUTORES</b>	
<b>Nombres – Apellidos:</b> Andrés Mateo Cabay Segovia Edson Branisley Amaguaña Moreta	
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>	
<b>Facultad:</b> Informática y Electrónica	
<b>Carrera:</b> Electrónica y Automatización	
<b>Título a optar:</b> Ingeniero en Electrónica y Automatización	
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b>	 Ing. Fernanda Arévalo M.

