



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
PLATAFORMA ROBÓTICA PARA APLICACIONES EN SEGURIDAD**

**AUTOR: CANO RESTREPO, LUIS FELIPE**

**DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN.**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA PARA APLICACIONES EN SEGURIDAD”*** realizado por el señor **CANO RESTREPO, LUIS FELIPE**, ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 13 de marzo del 2018

**MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **CANO RESTREPO, LUIS FELIPE**, con cédula de identidad N° **172424493-2** y, declaro que éste trabajo de titulación ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA PARA APLICACIONES EN SEGURIDAD.”*** Es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 13 de marzo de 2018

**LUIS FELIPE CANO RESTREPO**

C.C.:172424493-2



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **CANO RESTREPO, LUIS FELIPE**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA PARA APLICACIONES EN SEGURIDAD.”*** En el Repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 13 marzo de 2018

**LUIS FELIPE CANO RESTREPO**

C.C. 172424493-2

# DEDICATORIA

Dedicado a mi familia quienes con su apoyo, paciencia y consejos han hecho posible la culminación de esta etapa.

# AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia que ha creído en mí, brindándome su apoyo a través del curso de la carrera de toda mi vida, inculcándome desde siempre los valores fundamentales para ser una persona correcta y responsable, estando para mí en los momentos más complicados.

A mis amigos de colegio y universidad que con su amistad, apoyo y consejos han hecho de esta etapa un recuerdo muy agradable.

También, expreso mi gratitud a todos los docentes que han compartido su conocimiento conmigo, brindándome su experiencia y empujándome a mejorar día a día.

Gracias por estar presentes en los momentos difíciles y por ofrecer una esperanza en la adversidad.

Felipe Cano

**TABLA DE CONTENIDOS**

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xxiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xxv</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
1.2.1. Plataformas móviles robóticas de vigilancia disponibles en el mercado.....	2
1.2.2. Robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	4
<b>1.3. Objetivos .....</b>	<b>8</b>
1.3.1. Objetivo general.....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
<b>1.4. Justificación e importancia.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Alcance .....</b>	<b>10</b>

<b>1.6. Estructura del documento.....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Robótica móvil.....</b>	<b>12</b>
2.1.1. Historia de la robótica móvil.....	12
2.1.2. Definición de Robot móvil.....	13
2.1.3. Robots autónomos y teleoperados.....	13
2.1.4. Representación de la posición de un robot móvil.....	14
<b>2.2. Locomoción en robots móviles.....</b>	<b>15</b>
2.2.1. Uso de ruedas en robótica móvil.....	16
2.2.2. Diseño de las ruedas.....	16
2.2.3. Configuración cinemática.....	18
<b>2.3. Sensores utilizados en robótica móvil.....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Categorías de los sensores.....	20
2.3.2. Sensores Rueda/motor.....	22
2.3.3. Sensores de rumbo.....	23
2.3.4. Sistema de localización global.....	26
2.3.5. Sensores de rango Activo.....	27
2.3.6. Sensores de Movimiento/velocidad.....	30
2.3.7. Sensores basados en visión.....	31
2.3.8. Posición y orientación de una plataforma móvil.....	33



<b>2.4. Networked para la teleoperación de robots.....</b>	<b>33</b>
2.4.1. Arquitectura de comunicación .....	35
2.4.2. Autonomía y planificación de trayectorias .....	37
<b>2.5. Arquitecturas Robóticas.....</b>	<b>38</b>
2.5.1. Paradigma y arquitectura .....	38
2.5.2. Arquitecturas jerárquicas más representativas.....	38
2.5.3. Arquitecturas Reactivas más representativas.....	41
<b>2.6. Navegación Reactiva .....</b>	<b>47</b>
<b>2.7. Resumen.....</b>	<b>49</b>
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1. Definición del concepto .....</b>	<b>52</b>
3.1.1. Definición de las necesidades.....	52
3.1.2. Definición de las características técnicas .....	53
3.1.3. Aplicación de la Función de Desarrollo de la Calidad QFD .....	54
<b>3.2. Factibilidad y planeación.....</b>	<b>55</b>
3.2.1. Estructura funcional .....	56
<b>3.3. Módulo 1. Locomoción .....</b>	<b>56</b>
3.3.1. Subsistema 1. Transmisión.....	57
3.3.2. Subsistema 3. Ruedas.....	75

3.3.3. Subsistema 2. Diseño de ejes .....	77
3.3.4. Conclusión del diseño para el módulo 1 .....	106
<b>3.4. Módulo 2. Estructura .....</b>	<b>109</b>
3.4.1. Subsistema 1. Diseño del chasis .....	109
3.4.2. Conclusión para el diseño del Módulo 2.....	120
<b>3.5. Módulo 3. Ubicación, Adquisición y procesamiento de datos .....</b>	<b>120</b>
3.5.1. Adquisición y procesamiento de datos.....	120
3.5.2. Odometría.....	128
3.5.3. Posición global.....	132
3.5.4. Conclusión para el diseño del módulo 3 .....	136
<b>3.6. Módulo 4. Comunicación .....</b>	<b>136</b>
3.6.1. Alternativas para la selección de teleoperación.....	137
3.6.2. Evaluación y selección de alternativas .....	138
3.6.3. Conclusión para el diseño del módulo 4.....	140
<b>3.7. Módulo 5. Suministro de energía.....</b>	<b>142</b>
3.7.1. Subsistema 1. Potencia.....	142
3.7.2. Subsistema 2. Control .....	148
3.7.3. Conclusión para el diseño del módulo 5 .....	150
<b>3.8. Módulo 6. Monitoreo y seguridad .....</b>	<b>151</b>
3.8.1. Subsistema 1. Cámara a bordo.....	151

3.8.2. Subsistema 2. Interfaz .....	153
3.8.3. Conclusión para el diseño del módulo 6 .....	156
<b>3.9. Módulo 7. Navegación reactiva .....</b>	<b>157</b>
3.9.1. Comportamiento Ir a la meta.....	161
3.9.2. Comportamiento evasión de obstáculo .....	162
<b>3.10. Diseño del concepto final .....</b>	<b>163</b>
<b>3.11. Resumen.....</b>	<b>165</b>
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>167</b>
<b>4.1. Elementos mecánicos.....</b>	<b>167</b>
4.1.1. Construcción del chasis.....	167
4.1.2. Mecanizado de los ejes .....	168
4.1.3. Mecanizado de las manzanas de las llantas .....	172
4.1.4. Mecanizado de piñones .....	173
4.1.5. Mecanizado de elementos de sujeción para las cajas de reducción .....	175
4.1.6. Corte de coberturas laterales.....	175
4.1.7. Carcasa para cámara web .....	176
4.1.8. Carcasa para sensores ultrasónicos .....	177
4.1.9. Impermeabilización de la estructura.....	177
<b>4.2. Elementos electrónicos .....</b>	<b>178</b>
4.2.1. Construcción de la placa .....	178

4.2.2. Construcción de cables .....	179
<b>4.3. Sistema de control .....</b>	<b>179</b>
4.3.1. Desarrollo de los nodos de control.....	179
4.3.2. Desarrollo de la Interfaz humano maquina.....	181
4.3.3. Router y cámara web .....	188
<b>4.4. Pruebas y resultados.....</b>	<b>188</b>
4.4.1. Primera evaluación.....	189
4.4.2. Segunda evaluación.....	191
4.4.3. Tercera evaluación .....	193
4.4.4. Cuarta evaluación .....	196
4.4.5. Quinta evaluación.....	198
4.4.6. Sexta evaluación.....	198
<b>4.5. Resumen.....</b>	<b>199</b>
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>201</b>
<b>5.1. Conclusiones.....</b>	<b>201</b>
<b>5.2. Recomendaciones.....</b>	<b>203</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>205</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>207</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Clasificación de sensores</i> .....	21
<b>Tabla 2</b> <i>Requerimientos o necesidades del consumidor</i> .....	53
<b>Tabla 3</b> <i>Características técnicas</i> .....	54
<b>Tabla 4</b> <i>Resultados de la matriz QFD</i> .....	55
<b>Tabla 5</b> <i>Módulos para diseño</i> .....	56
<b>Tabla 6</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de motores</i> .....	60
<b>Tabla 7</b> <i>Ponderación de potencia en motores para las soluciones del módulo 1</i> .....	60
<b>Tabla 8</b> <i>Ponderación de control en motores para las soluciones del módulo 1</i> .....	61
<b>Tabla 9</b> <i>Ponderación de adquisición en motores para las soluciones del módulo 1</i> .....	61
<b>Tabla 10</b> <i>Conclusión para la selección de motores módulo 1</i> .....	61
<b>Tabla 11</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de tipo de conducción</i> .....	66
<b>Tabla 12</b> <i>Ponderación de tracción en tipo de conducción para las soluciones del módulo 1</i> ....	67
<b>Tabla 13</b> <i>Ponderación de maniobrabilidad en tipo de conducción</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 1</i> .....	67
<b>Tabla 14</b> <i>Ponderación de implementación de tipo de conducción</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 1</i> .....	67
<b>Tabla 15</b> <i>Conclusión para la selección del tipo de conducción módulo 1</i> .....	68
<b>Tabla 16</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para</i> ..... <i>la selección de tracción en las cuatro llantas</i> .....	71
<b>Tabla 17</b> <i>Ponderación de costo económico para la implementación de la transmisión</i> ..... <i>en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1</i> .....	71

<b>Tabla 18</b> <i>Ponderación de Maniobrabilidad para transmisión en las cuatro ruedas.....</i> <i>para las soluciones del módulo 1 .....</i>	72
<b>Tabla 19</b> <i>Ponderación de implementación para la transmisión en las cuatro ruedas.....</i> <i>para las soluciones del módulo 1 .....</i>	72
<b>Tabla 20</b> <i>Ponderación Disponibilidad para la implementación de la transmisión.....</i> <i>en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1 .....</i>	72
<b>Tabla 21</b> <i>Conclusión para la selección de transmisión en las cuatro llantas módulo 1.....</i>	73
<b>Tabla 22</b> <i>Capacidad nominal de potencia de cadenas en paso único en torón sencillo.....</i> <i>de un piñón de 17 dientes.....</i>	74
<b>Tabla 23</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de ruedas .....</i>	75
<b>Tabla 24</b> <i>Ponderación de variedad de diámetros de ruedas para las soluciones.....</i> <i>del módulo 1 .....</i>	76
<b>Tabla 25</b> <i>Ponderación de tipo de labrado de ruedas para las soluciones del módulo 1 .....</i>	76
<b>Tabla 26</b> <i>Ponderación de implementación de ruedas para las soluciones del módulo 1 .....</i>	76
<b>Tabla 27</b> <i>Ponderación de mantenimiento de ruedas para las soluciones del módulo 1 .....</i>	77
<b>Tabla 28</b> <i>Conclusión para la selección de ruedas módulo 1 .....</i>	77
<b>Tabla 29</b> <i>Diámetros del eje a .....</i>	88
<b>Tabla 30</b> <i>Material y dimensiones del eje a.....</i>	91
<b>Tabla 31</b> <i>Características del cojinete seleccionado para el soporte del eje a.....</i>	92
<b>Tabla 32</b> <i>Material y dimensiones para el pasador del piñón.....</i>	92
<b>Tabla 33</b> <i>Diámetros del eje b .....</i>	101
<b>Tabla 34</b> <i>Material y dimensiones del eje b.....</i>	105
<b>Tabla 35</b> <i>Características de los cojinetes seleccionados para el soporte del eje b .....</i>	105
<b>Tabla 36</b> <i>Material y dimensiones para el pasador para el piñón del eje b.....</i>	105
<b>Tabla 37</b> <i>Características técnicas del motor SM 34505D .....</i>	106

<b>Tabla 38</b> <i>Resumen de dimensiones de los ejes a y b</i> .....	108
<b>Tabla 39</b> <i>Resumen de los cojinetes para los eje a y b</i> .....	108
<b>Tabla 40</b> <i>Resumen de la selección de pasadores para los piñones del eje a y el eje b</i> .....	108
<b>Tabla 41</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de materiales del chasis</i> .	111
<b>Tabla 42</b> <i>Ponderación de resistencia para las soluciones del módulo 2</i> .....	111
<b>Tabla 43</b> <i>Ponderación de permeabilidad para las soluciones del módulo 2</i> .....	111
<b>Tabla 44</b> <i>Ponderación de facilidad de ensamble para las soluciones del módulo 2</i> .....	112
<b>Tabla 45</b> <i>Conclusión para la selección de material módulo 2</i> .....	112
<b>Tabla 46</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de impermeabilización</i> .....	118
<b>Tabla 47</b> <i>Ponderación de costo para la impermeabilización para las soluciones</i> ..... <i>del módulo 2</i> .....	118
<b>Tabla 48</b> <i>Ponderación de facilidad de manejo para la impermeabilización</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 2</i> .....	118
<b>Tabla 49</b> <i>Ponderación resistencia de impermeabilización para las soluciones</i> ..... <i>del módulo 2</i> .....	119
<b>Tabla 50</b> <i>Ponderación de disponibilidad para la impermeabilización</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 2</i> .....	119
<b>Tabla 51</b> <i>Conclusión para la selección de impermeabilización módulo 2</i> .....	119
<b>Tabla 52</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección para la tarjeta</i> ..... <i>de adquisición</i> .....	123
<b>Tabla 53</b> <i>Ponderación de costos de tarjetas de adquisición para las soluciones</i> ..... <i>del módulo 3</i> .....	123
<b>Tabla 54</b> <i>Ponderación de velocidad de procesamiento de tarjetas de adquisición</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 3</i> .....	124
<b>Tabla 55</b> <i>Ponderación de flexibilidad de operación de tarjetas de adquisición</i> ..... <i>para las soluciones del módulo 3</i> .....	124
<b>Tabla 56</b> <i>Conclusión para la selección de la tarjeta de adquisición módulo 3</i> .....	124

<b>Tabla 57</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de hardware.....</i> <i>para procesamiento de datos .....</i>	126
<b>Tabla 58</b> <i>Ponderación de memoria interna de hardware para procesamiento de datos.....</i> <i>para las soluciones del módulo 3 .....</i>	126
<b>Tabla 59</b> <i>Ponderación de velocidad de procesamiento de hardware para procesamiento.....</i> <i>de datos para las soluciones del módulo 3 .....</i>	127
<b>Tabla 60</b> <i>Ponderación de puertos de entrada y salida de hardware para procesamiento.....</i> <i>de datos para las soluciones del módulo 3 .....</i>	127
<b>Tabla 61</b> <i>Ponderación de Capacidad de expansión que presenta el hardware.....</i> <i>para procesamiento de datos para las soluciones del módulo 3 .....</i>	127
<b>Tabla 62</b> <i>Conclusión para la selección de hardware para procesamiento de datos módulo 3 .</i>	128
<b>Tabla 63</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de GPS .....</i>	133
<b>Tabla 64</b> <i>Ponderación de costo de GPS para las soluciones del módulo 3 .....</i>	134
<b>Tabla 65</b> <i>Ponderación de Precisión de GPS para las soluciones del módulo 3 .....</i>	134
<b>Tabla 66</b> <i>Ponderación de implementación de GPS para las soluciones del módulo 3 .....</i>	134
<b>Tabla 67</b> <i>Ponderación de Disponibilidad de GPS para las soluciones del módulo 3 .....</i>	135
<b>Tabla 68</b> <i>Conclusión para la selección de GPS módulo 3 .....</i>	135
<b>Tabla 69</b> <i>Características técnicas del GPS BU-353-SA .....</i>	135
<b>Tabla 70</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de tele operación .....</i>	139
<b>Tabla 71</b> <i>Ponderación de alcance de envío y recepción de datos para las soluciones.....</i> <i>del módulo 4 .....</i>	139
<b>Tabla 72</b> <i>Ponderación implementación de los sistemas de teleoperación para.....</i> <i>las soluciones del módulo 4 .....</i>	140
<b>Tabla 73</b> <i>Ponderación robustez frente al ruido de los sistemas de teleoperación.....</i> <i>para las soluciones del módulo 4 .....</i>	140
<b>Tabla 74</b> <i>Conclusión para la selección del sistema de teleoperación módulo 4 .....</i>	140



<b>Tabla 75</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para la selección de suministro de energía</i> .....	144
<b>Tabla 76</b> <i>Ponderación de portabilidad del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5</i> .....	145
<b>Tabla 77</b> <i>Ponderación de la eficiencia energética del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5</i> .....	145
<b>Tabla 78</b> <i>Ponderación de Capacidad de almacenamiento energético del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5</i> .....	145
<b>Tabla 79</b> <i>Conclusión para la selección del sistema de suministro de energía módulo 5</i> .....	146
<b>Tabla 80</b> <i>Características baterías de 12 V</i> .....	147
<b>Tabla 81</b> <i>Requerimientos del sistema de control</i> .....	148
<b>Tabla 82</b> <i>Características de la batería 5V</i> .....	149
<b>Tabla 83</b> <i>Características de la batería 12V</i> .....	149
<b>Tabla 84</b> <i>Características de la batería. 19 V</i> .....	150
<b>Tabla 85</b> <i>Requerimiento de amperaje de los elementos de la plataforma móvil</i> .....	150
<b>Tabla 86</b> <i>Características técnicas cámara web</i> .....	153
<b>Tabla 87</b> <i>Descripción de elementos que conforman la plataforma móvil</i> .....	163
<b>Tabla 88</b> <i>Soluciones a los módulos planteados</i> .....	166
<b>Tabla 89</b> <i>Lista de nodos del sistema</i> .....	180
<b>Tabla 90</b> <i>Lista de tópicos del sistema</i> .....	180
<b>Tabla 91</b> <i>Respuesta de ping entre los dispositivos que componen la red WLAN</i> .....	191
<b>Tabla 92</b> <i>Desempeño de la plataforma robótica móvil en distintos terrenos realizando trayectorias rectilíneas y giros</i> .....	194
<b>Tabla 93</b> <i>Resultados del desempeño de la plataforma robótica móvil en inclinaciones de 10,15 y 20 grados en distintos terrenos</i> .....	195

<b>Tabla 94</b> <i>Resultados del desempeño de la plataforma robótica móvil al momento de superar obstáculos</i> .....	195
<b>Tabla 95</b> <i>Posiciones alcanzadas por la plataforma robótica móvil en la prueba del comportamiento ir a la meta</i> .....	197
<b>Tabla 96</b> <i>Error porcentual posición enviada por el usuario vs posición alcanzada por la estimación</i> .....	197
<b>Tabla 97</b> <i>Error porcentual posición enviada por el usuario vs posición alcanzada real</i> .....	197
<b>Tabla 98</b> <i>Resultados de la prueba del comportamiento evasión de obstáculos</i> .....	198
<b>Tabla 99</b> <i>Voltaje de las baterías versus tiempo de uso</i> .....	199

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Robot de vigilancia de seguridad Argos .....	2
<b>Figura 4</b> Aquiles I.....	4
<b>Figura 5</b> Plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM .....	5
<b>Figura 6</b> Robot móvil experimental 8x8 articulado. ....	5
<b>Figura 7</b> Robot todo terreno con sistema ROCKER-BOGIE.....	6
<b>Figura 8</b> Robot móvil MI-T-NATOR. ....	6
<b>Figura 9</b> Plataforma robótica para exteriores del Laboratorio de Manufactura. ....	7
<b>Figura 10</b> Sistema de ubicación para la plataforma robótica para exteriores teleoperada..... Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado..... (a) vista superior, (b) vista del mapa generado y (c) fusión para..... comparación del mapa.....	8
<b>Figura 11</b> Marco de referencia global $XI, YI$ , marco de referencia local $XR, YR$ .....	14
<b>Figura 12</b> Descripción de los factores más relevantes en la locomoción de robot móviles.....	16
<b>Figura 13</b> Clases de ruedas utilizadas en robótica móvil .....	17
<b>Figura 14</b> Configuraciones cinemáticas más comunes para plataformas móviles.....	19
<b>Figura 15</b> Robot móvil SR1 identificación del sistema de percepción..... de múltiples sensores.....	21
<b>Figura 16</b> Encoders ópticos, incremental versus absoluto (código Gray).....	23
<b>Figura 17</b> Constelación de satélites.....	26
<b>Figura 18</b> Señal de un sensor ultrasónico.....	29
<b>Figura 19</b> Sensor infrarrojo .....	29
<b>Figura 20</b> Imagen de rango típica de un sensor de rango láser 2d .....	30

<b>Figura 21</b> Cámaras que están disponibles en el mercado CCD chips y CCD cámaras.....	31
<b>Figura 22</b> Redes y protocolos más utilizados en robótica móvil .....	34
<b>Figura 23</b> Arquitectura maestro esclavo .....	35
<b>Figura 24</b> Arquitectura peer to peer .....	36
<b>Figura 25</b> Arquitectura cliente servidor .....	37
<b>Figura 26</b> Componentes Percibir, planificar, actuar del controlador jerárquico anidado .....	39
<b>Figura 27</b> Descomposición del componente planificar tres funciones,..... planificador de misiones, navegador piloto.....	40
<b>Figura 28</b> Etapas de la arquitectura RCS .....	41
<b>Figura 29</b> Arquitectura de subsunción .....	44
<b>Figura 30</b> Campos potenciales principales.....	46
<b>Figura 31</b> Campos potenciales que representa los comportamientos de ir a la meta..... vectores negros campo atractivo, y evadir obstáculo vectores rojos campo..... repulsivo. Los vectores verdes representan el comportamiento..... emergente de la suma vectorial de los dos comportamientos .....	47
<b>Figura 32</b> Organización percibir –actuar.....	48
<b>Figura 33</b> Distribución de los elementos en el eje a.....	78
<b>Figura 34</b> Forma y dimensiones básicas para el diseño del eje a.....	78
<b>Figura 35</b> Gráficos en el plano xy de carga, Cortante (kN) momento flector( Nmm), eje a .....	80
<b>Figura 36</b> Gráficos en el plano xz de carga, Cortante (kN) ,momento flector( Nmm), eje a.....	81
<b>Figura 37</b> Dimensiones en mm del eje a .....	88
<b>Figura 38</b> Muestra la distribución de las fuerzas ejercidas en la cuña o pasador.....	90
<b>Figura 39</b> Distribución de los elementos en el eje b .....	93
<b>Figura 40</b> Forma y dimensiones básicas para el diseño del eje b.....	93

<b>Figura 41</b>	Gráficos en el plano xy de carga, Cortante (kN) , momento flector( Nmm), eje b .....	95
<b>Figura 42</b>	Gráficos en el plano xz de carga, Cortante (kN) , momento flector( Nmm), eje b .....	96
<b>Figura 43</b>	Dimensiones en milímetros del eje b.....	101
<b>Figura 44</b>	Muestra los elementos que compone el módulo 1: 1) Motor, 2) Caja reductora,..... 3) Eje a, eje delantero , 4) eje b, eje tracero , 5) Piñon, 6) Cadena,..... 7) Chumaceras de pared, 8) Llantas .....	106
<b>Figura 45</b>	Esquemático de la conexión Rx,Tx de los motores SM34505D .....	107
<b>Figura 46</b>	Simulación del torque que ejercen los motores sobre el soporte.....	113
<b>Figura 47</b>	Diseño de las carcasas para los sensores de proximidad..... a) Muestra la carcasa frontal, b) muestra las carcasas laterales. ....	114
<b>Figura 48</b>	Distribución de los elementos mecánicos en la plataforma robótica móvil:..... 1) Chasis, 2) parachoques 3) eje delantero,4) chumacera de pared,..... 5) eje trasero, 6) caja de reducción, 7) motores, 8) cadena,..... 9) soporte para elementos de control,10) piñón, 11) cobertura superior,..... 12) carcasa frontal para sensores ultrasónicos, 13) coberturas laterales,..... 14) carcasa lateral para sensores ultrasónicos,15) acople para cajas reductoras.....	114
<b>Figura 49</b>	Simulación de la resistencia del chasis frente a una carga de 800N.....	115
<b>Figura 50</b>	Simulación del toque que ejercen los motores sobre el chasis .....	116
<b>Figura 51</b>	Simulación de impacto en bache tren delantero .....	117
<b>Figura 52</b>	Simulación de impacto en bache tren posterior .....	117
<b>Figura 53</b>	Dimensiones del vehículo diferencial utilizadas para el cálculo odométrico .....	129
<b>Figura 54</b>	Distribución y función de pines del conector DB15.....	131
<b>Figura 55</b>	Esquemático de la conexión del puerto DB15 de los motores Smart motor..... y el sistema embebido raspberrypi 2 modelo B .....	131
<b>Figura 56</b>	Diagrama de flujo para odometría .....	132
<b>Figura 57</b>	Esquema de las conexiones de red topología Peer to Peer .....	141
<b>Figura 58</b>	Arreglo de baterías.....	146

<b>Figura 59</b> Voltaje y amperaje proporcionado por la batería .....	147
<b>Figura 60</b> Esquema de la distribución de los requerimientos de..... voltaje de los dispositivos, fuente de 5V, 19V, 12V .....	148
<b>Figura 61</b> Esquema de comunicación entre nodos sistema ROS .....	155
<b>Figura 62</b> Distribución de secciones de la pestaña de control de la HMI .....	157
<b>Figura 63</b> Arquitectura para la implementación de la navegación reactiva .....	158
<b>Figura 64</b> a) Muestra el marco de referencia global <b>XI, YI</b> , y el marco..... de referencia local <b>XR, YR</b> , el robot empieza en un punto 0,0,0..... en el cual coinciden el marco de referencia global y local, a medida que..... se desplaza corrige el rumbo para alcanzar la posición de la meta..... b) Muestra el conjunto de vectores obtenidos de los sensores de..... proximidad representados por las flechas verdes, el círculo verde..... representa la distancia de detección, la flecha roja representa el..... vector resultante, que modifica el rumbo del robot hasta que..... sale de la distancia de detección y retoma el rumbo hacia la meta. ....	160
<b>Figura 65</b> Diagrama de flujo comportamiento Ir a la meta .....	161
<b>Figura 66</b> Diagrama de flujo comportamiento evadir obstáculos .....	162
<b>Figura 67</b> Elementos del diseño final: 1), Chumacera de pared..... 2) Eje delantero, 3) Carcasa frontal sensores de proximidad,..... 4) Parachoques, 5) Ruedas,6) paro de emergencia, 7) Cámara,..... 8) Tablero de control,9) Modem,10) Computadora abordo,..... 11) Baterías 12v 55Ah,12) Chasis,13) Eje trasero ,..... 14) Carcasas laterales sensores de proximidad,15), Tapa,16),..... 17) Piñón 17 dientes,18,) Acople para cajas de reducción,..... 19) Cadena número 40, 20) Switch de control,..... 21) RaspberryPi, circuito de acondicionamiento y circuito de energía 5V,..... 22) Batería 12V ,23) GPS, 24) Batería 5V.....	163
<b>Figura 68</b> Chasis para plataforma robótica móvil .....	167
<b>Figura 69</b> Procesos de manufactura iniciales para el torneado de los ejes,..... a) Refrentado, b) Punto, c) Cilindrado, d) Toma de medidas. ....	169
<b>Figura 70</b> Operaciones para acoplar la caja de reducción, a) Taladrado, b) Mandrinado.....	169

<b>Figura 71</b> Muestra la operación de a) cilindrado del diámetro de 1 pulgada,..... b) División de las secciones .....	170
<b>Figura 72</b> Se muestra las operaciones realizadas para los pasadores..... roscados M6 a) Taladrado, b) Machuelado .....	170
<b>Figura 73</b> Muestra las operaciones para los elementos de sujeción a) Roscado, b) Tronzado ..	171
<b>Figura 74</b> Cilindrado de la primera sección eje b .....	171
<b>Figura 75</b> Ejes a y b.....	172
<b>Figura 76</b> Proceso de mandrinado en la cara lateral de manzana .....	172
<b>Figura 77</b> En la izquierda se muestra la manzana antes del mecanizado,..... a la derecha se muestra la manzana ya mecanizada .....	173
<b>Figura 78</b> Procesos de manufactura realizada en el piñón, a) Taladrado agujero central,..... b) Mandrinado, c) Taladrado para pasadores, d) Machuelado. ....	174
<b>Figura 79</b> Piñón mecanizado a) Muestra el piñón antes del mecanizado,..... b) Muestra el mecanizado del agujero central, .....	174
c) Muestra el mecanizado para los pasadores M8.....	174
<b>Figura 80</b> Elemento de sujeción para las cajas de reducción. ....	175
<b>Figura 81</b> Coberturas laterales .....	176
<b>Figura 82</b> Elementos de la estructura de la cámara.....	176
<b>Figura 83</b> Piezas que componen la carcasa para los sensores ultrasónicos.....	177
<b>Figura 84</b> Manufactura y colocación de empaques.....	177
<b>Figura 85</b> Se muestra el proceso de manufactura para fabricar las placas PCB..... a) colocación de la placa en ácido Percloruro de Hierro,..... b) Se extrae y limpia la placa, c) Taladrado de los agujeros para..... los elementos electrónicos, d) Suelda de los elementos electrónicos. ....	178
<b>Figura 86</b> Cables para el conector DB9 a) Suelda de cables, b) Cable terminado.....	179
<b>Figura 87</b> Pestaña de inicio .....	182
<b>Figura 88</b> Pestaña de control, se identifican las diferentes secciones .....	183

<b>Figura 89</b> Sección 1 se identifican la distribución de la información enviada..... por los sensores de proximidad .....	183
<b>Figura 90</b> Sección 2 Ubicación GPS, y Ubicación por odometría.....	184
<b>Figura 91</b> Casilleros para el ingreso del punto coordenado .....	184
<b>Figura 92</b> Campos para activar el modo perímetro.....	184
<b>Figura 93</b> Campos que muestran la posición y orientación..... y el error de la plataforma respecto al punto objetivo.....	185
<b>Figura 94</b> Controles de la cámara.....	186
<b>Figura 95</b> Controles principales de la plataforma robótica. ....	186
<b>Figura 96</b> Casillero para ingresar la velocidad en rpms.....	187
<b>Figura 97</b> Controles de desplazamiento de la plataforma robótica. ....	187
<b>Figura 98</b> Botón de paro.....	187
<b>Figura 99</b> Sección 5, video en tiempo real.....	187
<b>Figura 100</b> Instalación de a) Modem, b) Cámara abordó.....	188
<b>Figura 101</b> Funcionamiento individual del nodo radar .....	189
<b>Figura 102</b> Nodos de la cámara.....	190
<b>Figura 103</b> Funcionamiento individual del nodo gps.....	190
<b>Figura 104</b> Funcionamiento individual del nodo encoder.....	191
<b>Figura 105</b> Lista de nodos total corriendo en el sistema.....	192
<b>Figura 106</b> Lista de todos los tópicos que corren en el sistema. ....	192
<b>Figura 107</b> Interacción entre nodos y tópicos del sistema total .....	193



# RESUMEN

El presente trabajo de titulación está enfocado en el desarrollo y estudio de la robótica móvil, para lo cual se diseñó y construyó un prototipo de plataforma móvil robótica capaz de desenvolverse en terrenos irregulares y resistir las condiciones adversas del medio ambiente, con el principal objetivo de generar un sistema de vigilancia dinámico, así como dotar al CICTE de una plataforma en la cual se puedan realizar futuros desarrollos en el campo de la robótica. El documento empieza exponiendo los aspectos generales de la robótica móvil, involucrando: Configuraciones mecánicas, localización, sensores, teleoperación, navegación reactiva. A continuación se muestra el diseño y la selección de alternativas para solventar los requerimientos. A nivel mecánico se expone el diseño, selección y construcción de los componentes entre los cuales están: chasis, ejes y selección de componentes, transmisión de potencia, impermeabilización. A nivel eléctrico se expone el acondicionamiento de sensores, la selección de elementos y el diseño del circuito electrónico para satisfacer las necesidades energéticas de los diversos dispositivos. A nivel de software la plataforma robótica está estructurada y diseñada basándose en la utilización de ROS (Robotic Operacional System). Finalmente se realizaron las pruebas correspondientes para verificar el desenvolvimiento de la plataforma robótica en entornos irregulares, midiendo así su desempeño y funcionalidad, con lo cual se redactó las conclusiones obtenidas con sus respectivas recomendaciones para la implantación y desarrollo de futuras mejoras.

## **PALABRAS CLAVE:**

- **ROBÓTICA MÓVIL**
- **NAVEGACIÓN REACTIVA**
- **ROS**

# ABSTRACT

The present graduation work is focused on the development and study of mobile robotics, for which a prototype of robotic mobile platform was designed and built capable of working in irregular terrains and resisting the adverse conditions of the environment, with the main objective of generating a dynamic surveillance system, as well as providing the CICTE with a platform in which future developments in the field of robotics can be carried out. The document begins by exposing the general aspects of mobile robotics, involving: mechanical configurations, location, sensors, teleoperation, and reactive navigation. Below is the design and selection of alternatives to solve the requirements. At a mechanical level, the design, selection and construction of the components are exposed, among which are: chassis, axes and component selection, power transmission, waterproofing. At the electrical level, the conditioning of sensors, the selection of elements and the design of the electronic circuit are exposed to satisfy the energy needs of the various devices. At the software level, the robotic platform is structured and designed based on the use of ROS (Robotic Operational System). Finally, the corresponding tests were performed to verify the development of the robotic platform in irregular environments, thus measuring its performance and functionality, with which the conclusions obtained were drafted with their respective recommendations for the implementation and development of future improvements.

## **KEYWORDS:**

- **MOBILE ROBOTICS**
- **REACTIVE NAVIGATION**
- **ROS**

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

Debido a la falta de una plataforma robótica móvil para exteriores suficientemente robusta para operar en terrenos irregulares, se dificulta la implementación y desarrollo de proyectos en el ámbito de la robótica móvil, por lo tanto es necesario contar con plataformas móviles robóticas de interiores y exteriores que permitan desarrollar futuros proyectos e investigación dentro de esta área del conocimiento. Dichas plataformas deben contar con los recursos mecánicos apropiados para desenvolverse sin ningún problema y con las menores limitaciones. Con el desarrollo adecuado del sistema mecánico de las plataformas, es posible enfocarse en el desarrollo y mejoras dentro de los sistemas de percepción, inteligencia artificial, y control de las mismas.

Se han realizado algunos proyectos en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, dentro del campo de la robótica móvil. Uno de ellos es el desarrollo de una plataforma robótica para exteriores teleoperada (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015) pero la plataforma presenta ciertas limitaciones mecánicas que generan complicaciones en el correcto funcionamiento de otros sistemas como el de percepción y control. El problema se evidencia en terrenos irregulares tales como césped y otros, puesto que la plataforma no responde a la velocidad necesaria y en el tiempo adecuado.

### 1.2. Antecedentes

La robótica móvil pretende desarrollar maquinas capaces de desenvolverse en distintos terrenos, estudiando así los diversos mecanismos para lograr el objetivo, tales como ruedas orugas, patas, etc. Así

mimos se busca dotar a estas máquinas de capacidades sensoriales que les permitan reconocer su entorno para tomar acciones con respecto a él, para incrementar su autonomía y lograr que se desenvuelvan con la mínima intervención humana.

A continuación se presenta las plataformas móviles robóticas con aplicaciones en seguridad que se encuentra en el mercado:

### 1.2.1. Plataformas móviles robóticas de vigilancia disponibles en el mercado

Robot de vigilancia de seguridad Argos: Entre las funciones más destacadas del robot móvil se encuentra el sistema de navegación y cálculo de rutas automático, reconocimiento de personas, generación de escenarios, mapas 3D en tiempo real, y visión de 360 grados. (Ingeniería de Procesos y Producto I-MAS ,2010). Ver *Figura 1*.



**Figura 1** Robot de vigilancia de seguridad Argos  
Fuente: (Ingeniería de Procesos y Producto I-MAS ,2010).

EGIS-SR: Diseñado en Corea, Robot de seguridad en el hogar, localización basada en patrullaje autónomo, tiene un sistema de recarga automática el cual usa un mecanismo pasivo compensador de error adaptativo, cuenta con un sistema de cámaras estéreo, ofrece servicios de detección, supresión de incendios,

y monitoreo más control remoto vinculado a la red de seguridad comercial (DST Robot Co. Ltd ,1999). Ver

*Figura 2.*

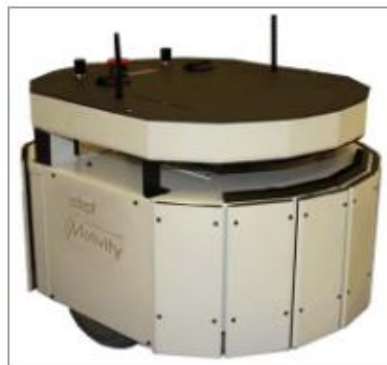


***Figura 2*** EGIS-SR

Fuente: (DST Robot Co. Ltd ,1999)

PatrolBot: Diseñado en E.E.U.U, es un robot de alta calidad con transmisión diferencial diseñado para proyectos de investigación que requieren un uso continuo y confiable las 24 horas, los 7 días de la semana, puede escanear edificios, crear mapas del entorno y navegarlos de forma autónoma usando un sensor láser.

Ver *Figura 3.* (Gutmar, S.A., 2007)



***Figura 3*** PatrolBot

Fuente: (Gutmar, S.A., 2007)

Aquiles I: Diseñado en España, Dispone de brazo que le permite realizar operaciones sobre objetos. Ofrece soluciones robóticas de alta tecnología para proteger a los técnicos y especialistas en misiones de alto riesgo. Herramientas versátiles y altamente modulares que les permiten hacer frente a los diferentes tipos de amenazas IED-NRBQ. Ver *Figura 4*. (OMRON ADEPT TECHNOLOGIES, INC., 2016).



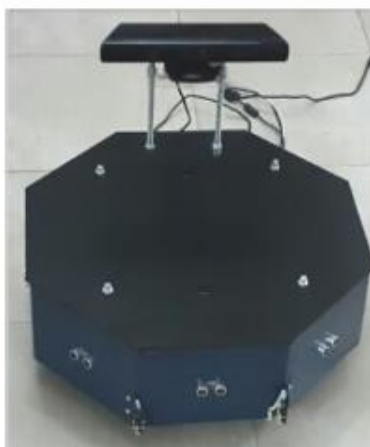
***Figura 4*** Aquiles I

Fuente:(OMRON ADEPT TECHNOLOGIES, INC., 2016).

### **1.2.2. Robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE**

A continuación se cita puntualmente trabajos previos realizados en la Universidad:

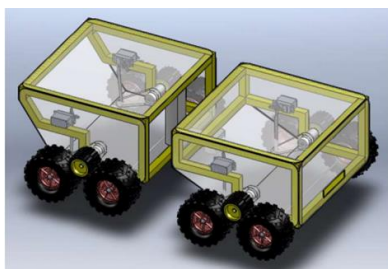
Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM (Gallardo Andrade, José Alejandro y Gaona Román, Andrés David, 2015).La plataforma integra la localización y mapeo simultáneos a las funciones operativas de la plataforma robótica móvil. Ver *Figura 5*.



**Figura 5** Plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM

Fuente:(Gallardo Andrade, José Alejandro y Gaona Román, Andrés David, 2015)

Diseño y construcción de un robot móvil experimental  $8 \times 8$  articulado para salvar obstáculos (Mohammad Ali Hidalgo, 2014). Dicho robot dispone de dos vagones unidos por un eje cilíndrico, sensores infrarrojos para detección de obstáculos; su locomoción es mediante transmisión por rodillos de fricción, servomotores en los mecanismos articulados que levantan las ruedas móviles y permiten salvar los obstáculos. Consta de dos circuitos de control de motores para su activación y control de giro. Ver *Figura 6*.

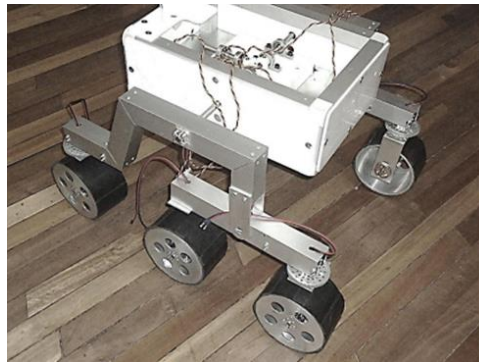


**Figura 6** Robot móvil experimental 8x8 articulado.

Fuente: (Mohammad Ali Hidalgo, 2014)

Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema ROCKER-BOGIE y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE (Quezada

Cepeda, 2014). El robot cuenta con un sistema de suspensión Rocker – Bogie, donde sus dos brazos basculantes conectados mediante un mecanismo diferencial lo ayudan a la movilidad en terrenos irregulares. Tiene capacidad de navegación autónoma, detectando y esquivando objetos; además de tener la posibilidad de una manipulación inalámbrica. Ver *Figura 7*.



***Figura 7*** Robot todo terreno con sistema ROCKER-BOGIE.  
Fuente: (Quezada Cepeda, 2014)

Diseño e implementación de un robot móvil autónomo y tele operado para labores agrícolas (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013). El robot es un prototipo autónomo y tele operado capaz de realizar la fumigación en plantaciones de rosas. Plataforma móvil con arreglo diferencial de 3 ruedas que posee un sistema hidráulico de distribución y aspersión de fungicida. Ver *Figura 8*.



***Figura 8*** Robot móvil MI-T-NATOR.  
Fuente: (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013)

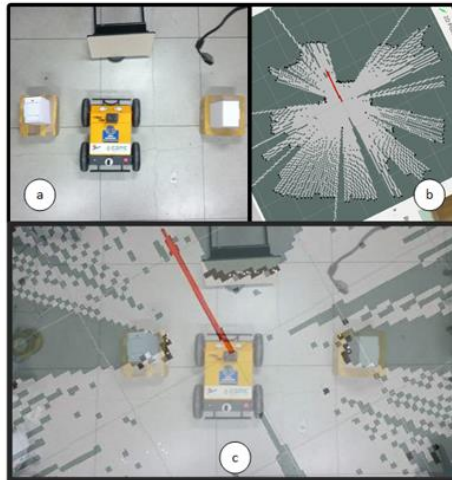


Diseño y Construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de Manufactura (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015). Cuenta con las siguientes características: Estructura resistente a factores ambientales., Sistema de monitoreo con cámara inalámbrico, Alcance estimado de hasta 70 metros, Soporta un peso de hasta 40 kilogramos., Autonomía hasta 2.5 horas. Ver Figura 9.



**Figura 9** Plataforma robótica para exteriores del Laboratorio de Manufactura.  
Fuente: (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015)

Desarrollo de un sistema de ubicación para la plataforma robótica de exteriores teleoperada del laboratorio de manufactura (Obando Carlos, Garzón Pedro, 2016). Plataforma de exteriores, teledirigida, enfocada al estudio del mapeo simultaneo con la tecnología SLAM. Dentro de sus características se encuentran lo siguiente: Se presentaron mejoras mecánicas tales como rectificación de ejes, cambio de llantas he impermeabilización del chasis, implementación de un sensor lidar para realizar SLAM, se instaló un sistema de posicionamiento global (GPS), se agregó un botón de paro de emergencia, se realizó el procesamiento de señales en un sistema embebido, se agregó un sistema de rotación para la cámara abordó así como su respectiva protección. Ver *Figura 10*.



**Figura 10** Sistema de ubicación para la plataforma robótica para exteriores tele-operada. Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado (a) vista superior, (b) vista del mapa generado y (c) fusión para comparación del mapa.

Fuente: (Obando Maldonado & Garzón Jaramillo, 2016)

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de plataforma robótica móvil para exteriores con aplicaciones en el área de seguridad, la cual permita el monitoreo de un perímetro mediante navegación reactiva.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de los elementos mecánicos diseñados frente a esfuerzos teóricos.
- Determinar el conjunto de sensores internos que permitan realizar odometría y el conjunto de sensores externos que permitan monitorear el entorno.

- Utilizar software de código abierto para implementar el sistema de control de la plataforma robótica móvil.
- Implementar un sistema de control que permita a la plataforma trasladarse de un punto a otro autónomamente.
- Evaluar el funcionamiento de la plataforma robótica móvil de exteriores en terrenos irregulares tales como: Tierra, Cemento, gradas, césped, etc.

#### **1.4. Justificación e importancia**

La principal importancia del desarrollo e implementación de presente proyecto radica en dotar al CICTE (Centro de Investigaciones científicas y tecnológica del ejercito) de una herramienta robótica móvil capaz de desenvolverse en diversos terrenos irregulares con la capacidad de evadir o superar obstáculos presentes en su ruta, mediante la implementación de un sistema de control que le permita desplazarse a un punto deseado. La plataforma robótica tendrá la posibilidad de desenvolverse en terrenos irregulares debido a su sistema mecánico apto para dicha tarea. La capacidad de poder ser teleoperada, junto con un sistema de navegación reactiva, dan gran versatilidad a la plataforma móvil robótica. Con lo cual se pretende ampliar las capacidades de los sistemas de vigilancia aportando un sistema móvil que puede patrullar un determinado sector, con la habilidad de superar o evadir cualquier obstáculo. Además el desarrollo de la plataforma móvil busca aportar con la investigación y desarrollo dentro del ámbito de la robótica móvil y sus aplicaciones. Por último, la investigación en esta área ha tomado gran interés dentro del DECEM de la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE. Por lo cual el proyecto busca seguir impulsando el desarrollo dentro de esta área del conocimiento.

## **1.5. Alcance**

El proyecto se basa en el diseño y construcción de una plataforma robótica móvil teleoperada y con funciones autónomas, para exteriores enfocada a tareas de seguridad, como la vigilancia mediante video en tiempo real, capaz de desenvolverse en terrenos irregulares. Para lo cual, se diseñara un sistema de locomoción que permita a la plataforma móvil manejarse en los mismos. Dentro del aspecto mecánico se involucra el diseño de ejes, sistemas de transmisión, chasis capaz de proteger los delicados instrumentos electrónicos que lleva en su interior para que resistan condiciones climáticas adversas.

El sistema de control se diseñara en el sistema operativo para robots (ROS), el cual permite la interacción de diferentes programas que corren simultáneamente llamados nodos, con lo cual queda abierta la posibilidad de adicionar nuevos elementos de software para ampliar las capacidades de la plataforma robótica móvil. Se implantará un sistema de navegación reactiva que permita a la plataforma dirigirse de un punto a otro evitando obstáculos que no puedan ser superados por la plataforma móvil.

## **1.6. Estructura del documento**

Dentro del presente documento se abordarán en el capítulo 1 la introducción del proyecto, algunas plataformas robóticas móviles disponibles en el mercado, así como trabajos realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE relacionados con el tema de robótica móvil. A continuación se exponen los objetivos, justificación y alcance del proyecto. Continuando con el capítulo 2 donde se abordan los temas relacionados con robótica móvil, que es un robot móvil, la clasificación de robots móviles así como las distintas opciones de ruedas existentes y las opciones más comunes para su configuración cinemática. Se hablara sobre los conceptos de navegación reactiva y las arquitecturas robóticas, así como de los sensores necesarios para que el robot tenga la capacidad de extraer la información necesaria del entorno. Se abordara

también la manera de comunicar al usuario con la plataforma robótica móvil, las arquitecturas de comunicación y los protocolos utilizados.

A continuación el capítulo 3 expone la planificación, diseño y selección de elementos que cumplan con las especificaciones técnicas planteadas para ofrecer la mejor solución. Dentro de lo cual estará el diseño mecánico de la plataforma, la selección y diseño electrónico de los componentes y sensores necesarios para su operación y el diseño del sistema de control, para culminar en la definición del concepto a implementar.

Posteriormente el capítulo 4 describe los procesos de manufactura empleados en la construcción de los elementos mecánicos. Se describirá los procesos para la implementación de los elementos eléctricos y electrónicos. Se tratará la forma de ensamble de los elementos y la implementación del sistema de control desarrollado en el sistema operativo robótico (R.O.S).

Seguidamente en el capítulo 5 se detallan los resultados de las pruebas de funcionalidad y rendimiento en los diferentes aspectos mecánicos eléctricos y de control.

Finalmente, dentro del capítulo 6 se expondrán las conclusiones y recomendaciones a las cuales se ha llegado después de realizar el presente trabajo con lo cual se pretende presentar tópicos para nuevos trabajos que se puedan desarrollar sobre la plataforma robótica móvil para mejorar sus características.

# Capítulo 2

## Estado del arte

Dentro del capítulo se abordan los temas relacionados con robótica móvil, se describe que es un robot móvil, los distintos tipos de ruedas y sus configuraciones dentro de las plataformas móviles, así como una breve revisión de otros sistemas locomotores. Se expondrá los sensores más utilizados dentro de robótica móvil. Se revisa los temas relacionados con la tele robótica, las arquitecturas más utilizadas para comunicar la plataforma robótica con el usuario. Se analiza el comportamiento de la navegación reactiva, su implementación y uso.

### **2.1. Robótica móvil**

#### **2.1.1. Historia de la robótica móvil**

La robótica móvil nace de la necesidad de ampliar el entorno en el cual se puede desempeñar un robot, el cual estaba limitado al volumen de trabajo de una estructura mecánica sujeta por uno de sus extremos. En los años treinta los “micro mouse” desarrollaban funciones inteligentes las cuales consistían en resolver laberintos, En 1948 se presenta la tortuga de Walter la cual contaba con funciones tales como reaccionar ante la presencia de obstáculos, superara pendientes y al detectar que la batería presentaba voltajes menores al de funcionamiento, se dirigía a una posición donde se recargaba. Más adelante en los años 60 se comienzan a usar vehículos autónomos en la industria los cuales operaban en entornos altamente estructurados, una de las estrategias utilizadas era apoyarse en rutas ya trazadas en el suelo de la planta que eran detectadas por sensores ópticos. En la década de los 70 se retoma el uso de robots móviles en la industria los cuales estaban dotados

de sistemas de visión artificial, la limitada capacidad de los sistemas computacionales de la época impedían desarrollar una navegación autónoma eficaz. A raíz del incremento tecnológico que empieza a surgir en los años 80, en áreas como la electrónica, la computación, procesos de manufactura, así como el desarrollo de nuevos mecanismos y sensores, abren las puertas para el desarrollo de robots móviles con mayor autonomía y fiabilidad, en este periodo el desarrollo de plataformas robóticas móviles, para interiores y exteriores como las desarrolladas por Carnegie Mellon University (Pittsburg, E.E.U.U). Que busca dotar de la inteligencia suficiente para que, por medio de la observación de un entorno desconocido el robot pueda tomar decisiones que afectan su navegación. (Ollero, 2001).

### **2.1.2. Definición de Robot móvil**

Se puede considerar un robot móvil a cualquier maquinaria con la posibilidad de desplazarse en uno o varios medios sean estos acuático, terrestre, aéreo, la cual puede ser teleoperada o autónoma.

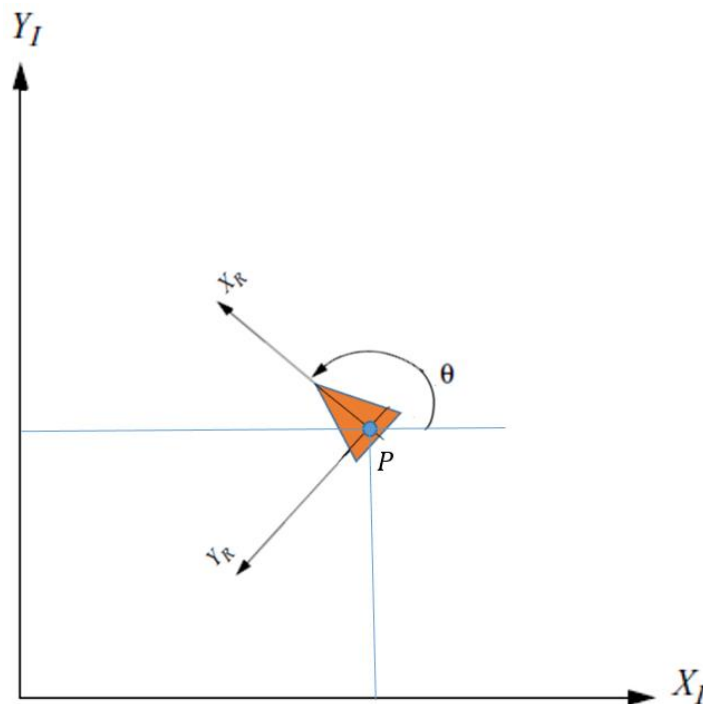
### **2.1.3. Robots autónomos y teleoperados**

Podemos catalogar a los robots según su nivel de autonomía en teleoperados, de tareas preprogramadas o repetitivo, y autónomos. Los robots teleoperados son manipulados remota o localmente en tiempo real por un operador el cual está encargado de todas las funciones complejas tales como percepción del entorno, toma de decisiones, planificación de rutas entre otras, mientras más avanzado sea el sistema, existe mayor retroalimentación del estado del robot hacia el operador. Los robots de tareas preprogramadas o repetitivos están enfocados a realizar tareas predecibles y constantes, poseen simples o ningún sistema de percepción del entorno son los más comunes dentro de la industria, puesto que son relativamente rápidos, y con gran

repetibilidad, por último los robots autónomos poseen una gran capacidad para procesar datos provenientes del entorno y de su funcionamiento interno, esta característica los hace ser los más desarrollados en cuanto a los sistemas de percepción y procesamiento. Dichas máquinas requieren mínima o nula intervención humana siendo capaces de realizar tareas como modelado del entorno, planeación de rutas, y toma de decisiones, están diseñados para realizar trabajos en entornos poco estructurados.

#### 2.1.4. Representación de la posición de un robot móvil

Para el siguiente análisis no se tomarán en cuenta los grados de libertad debido a los ejes de las ruedas, las juntas de la dirección de las ruedas, y las articulaciones de las ruedas. El robot posee tres ejes en el plano  $xy$ , dos para determinar la posición  $X_R, Y_R$  en el plano y uno para la orientación  $\theta$ .



**Figura 11** Marco de referencia global  $X_I, Y_I$ , marco de referencia local  $X_R, Y_R$   
Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

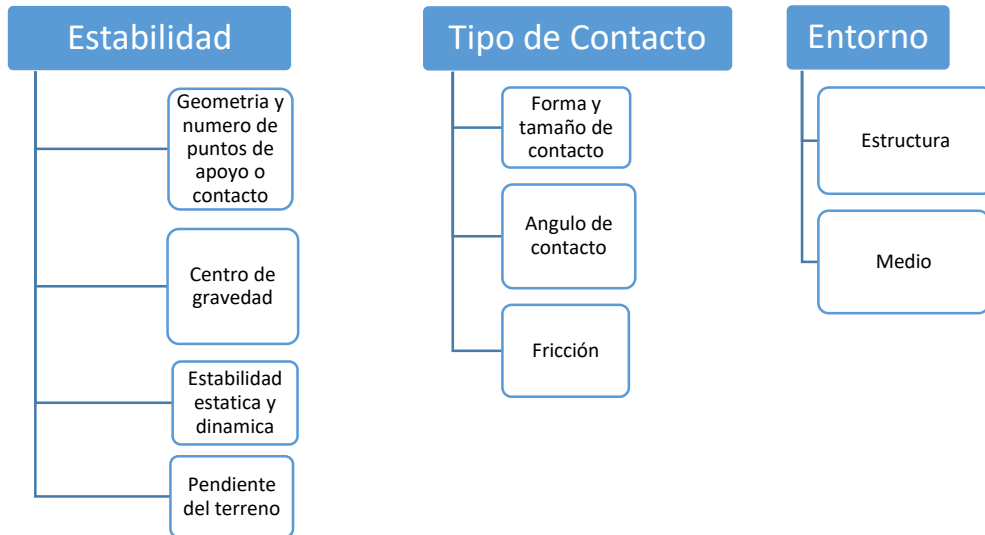


Para especificar la posición del robot se define una relación entre el marco de referencia global  $X_I, Y_I$ , y el marco de referencia del robot  $X_R, Y_R$ , ver *Figura 11*. Los ejes  $X_I, Y_I$  determinan una base inercial arbitraria en el plano la cual sirve como referencia global de algún punto origen 0, Se selecciona algún punto dentro del chasis del robot para especificar su posición.  $X_R, Y_R$  Definen dos ejes relativos a  $P$  formando el marco de referencia local del robot. La posición del punto  $P$  está dada por las coordenadas  $x, y$ , mientras que la diferencia angular entre el marco de referencia global y el marco de referencia local está dada por  $\theta$ . Por lo tanto podemos describir la posición del robot como un vector compuesto de estos tres elementos.

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

## 2.2. Locomoción en robots móviles

Dentro del diseño de un robot móvil se debe tener presente los actuadores y mecanismos que permitan al robot desplazarse de un punto a otro, estos deben estar pensados en función del medio en el cual se desenvolverá el robot. La locomoción de un robot móvil presenta tres aspectos importantes ver *Figura 12*:



**Figura 12** Descripción de los factores más relevantes en la locomoción de robot móviles.

### 2.2.1. Uso de ruedas en robótica móvil

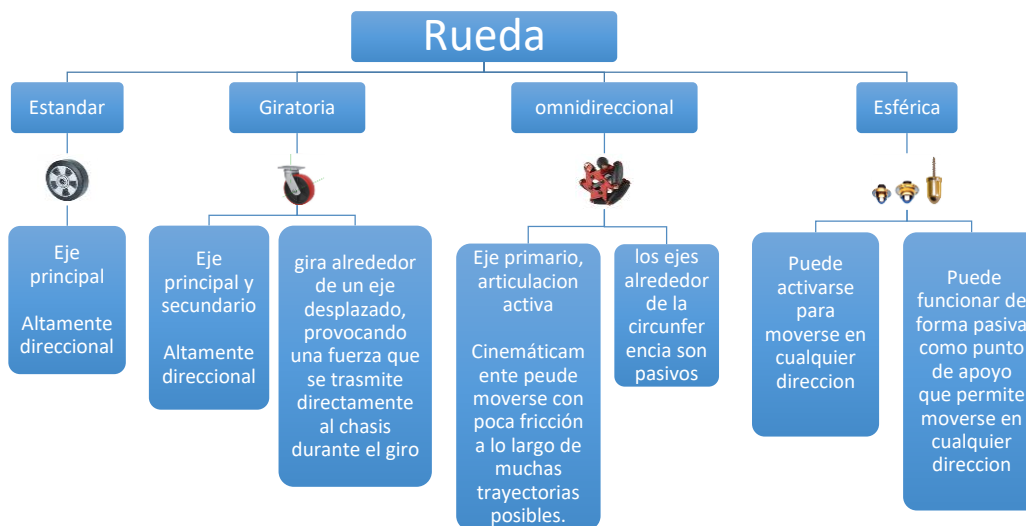
Debido a sus prestaciones, eficiencia y implementación mecánica relativamente sencilla la rueda es uno de los dispositivos de locomoción más usados en robótica móvil. El uso de ruedas dentro de las plataformas móviles elimina el factor del equilibrio puesto que están diseñados para que todas las ruedas estén en contacto con la superficie en todo momento. Es necesario como mínimo tres puntos de apoyo para garantizar el equilibrio, los robots de dos ruedas son casos especiales los cuales necesitan de sistemas de control para mantener el equilibrio.

### 2.2.2. Diseño de las ruedas

En la *Figura 13* se muestra una breve descripción de las cuatro clases más comunes de ruedas utilizadas en robótica móvil. Dado que la cinemática de cada tipo de rueda es diferente la selección de la misma tendrá un efecto directo sobre la cinemática total del robot. Dentro de las cuales están:

Rueda estándar y rueda giratoria; Ambas ruedas tienen un eje principal de rotación y son altamente direccionales, la diferencia entre las dos ruedas es que la rueda estándar puede girar y producir fuerzas laterales, debido a que el centro de rotación pasa por el punto de contacto con el suelo, mientras que la rueda giratoria, rota alrededor de un eje desfasado, causando una fuerza que se imparte en el chasis del robot durante el giro.

Rueda Omnidireccional y esférica; Están diseñadas para ofrecer menor resistencia direccional. La rueda omnidireccional trabaja como una rueda normal, pero posee un arreglo de rodillos pasivos orientados a 90 o 45 grados los cuales permiten que se desplace no solo hacia adelante o atrás, sino también realizar otro tipo de trayectorias con una mínima fricción. La rueda esférica puede desplazarse en cualquier sentido y realizar todo tipo de trayectorias en un plano de dos dimensiones.



**Figura 13** Clases de ruedas utilizadas en robótica móvil

### 2.2.3. Configuración cinemática

La configuración cinemática de un robot hace referencia a la distribución de las ruedas motrices en el mismo. La manera en que se seleccione la configuración y el número de ruedas dentro de la plataforma robótica móvil tendrá un efecto en su capacidad de movimiento y limitaciones, a continuación en la *Figura 14* se describe brevemente las configuraciones más comunes. Dentro de las cuales están:

**Configuración Diferencial;** Es necesario tres puntos de contacto como mínimo para proporcionar estabilidad, posee dos ruedas motorizadas, las cuales direccionan la plataforma móvil, si giran en el mismo sentido y a la misma velocidad el vehículo avanza o retrocede en línea recta, si las ruedas giran a distintas velocidades y en el mismo sentido, realizará una trayectoria curva en el sentido de la rueda con menor velocidad, si las ruedas giran en sentidos opuestos el vehículo gira respecto al punto medio entre las dos ruedas motrices. Lo cual genera que la velocidad lineal y angular estén totalmente acopladas.

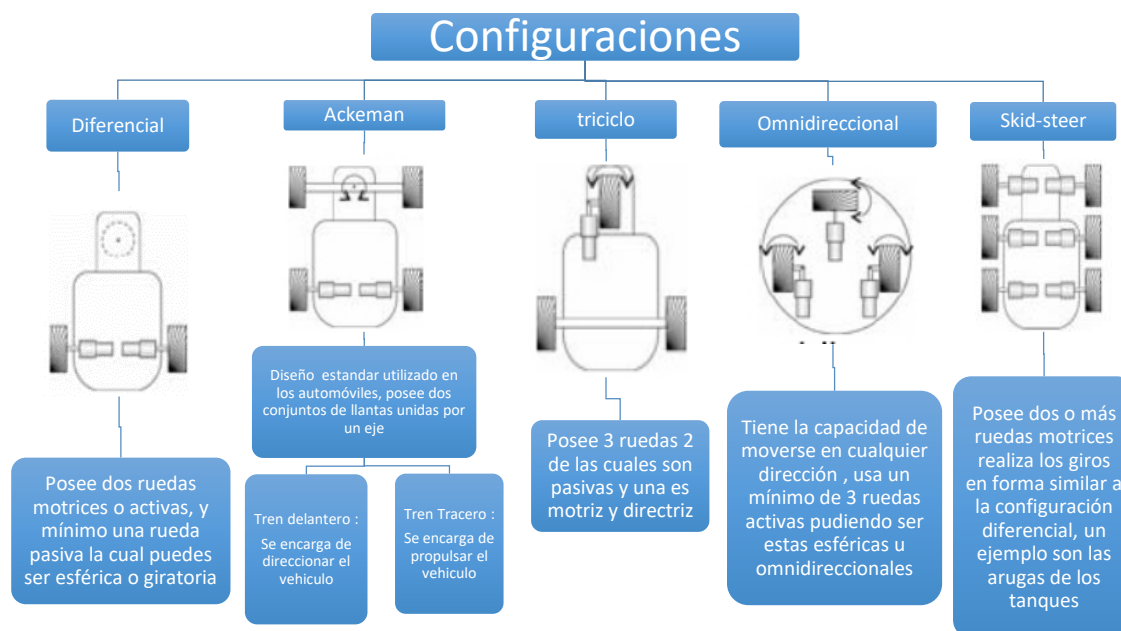
**Configuración Ackerman;** Configuración estándar utilizada en los automóviles. Se compone de un par de combinado de ruedas motrices traseras y un par de combiando de ruedas directrices frontales. No presenta dificultades al realizar trayectorias rectilíneas, las llantas traseras experimentan deslizamiento en las curvas, la velocidad lineal y angular están completamente desacopladas puesto que son generadas por motores independientes.

**Configuración triciclo;** Posee una sola rueda motriz y direccional a la vez, es el concepto más simple para implementar en un robot. Requiere de dos ruedas giratorias, en la parte trasera para proporcionar tres puntos de contacto. La velocidad lineal y angular son independientes.

**Configuración Omnidireccional;** Permite desplazar el vehículo en cualquier dirección dentro de un plano bidimensional. Requiere una alta sincronización de los motores de cada rueda para desplazarse. El arreglo de

ruedas mas comun utilizada en eta configuracion son las ruedas omnidireccionales y esfericas. Se requiere minimo tre spuntos de contacto pero los diseños mas comunes hace uso de cuatro ruedas, debido a que presenta facilidades de control.

Configuracion Skid/steer; Puede verse como un caso especial de la configuracion diferencial , con la diferencia que posee mejor maneobrabilidad en terrenos irregulares y presenta una alta friccion en los giros, debido a los multiples puntos de contacto con el suelo.



**Figura 14.** Configuraciones cinemáticas más comunes para plataformas móviles

### 2.3. Sensores utilizados en robótica móvil

Una de las tareas más importantes para desarrollar la autonomía en un robot es tener la capacidad de adquirir información del medio ambiente y de sí mismo a esto se le conoce como percepción, esto se alcanza mediante la implementación de varios transductores y/o sensores que son los encargados de transformar un estímulo físico en señales eléctricas que se pueden medir, monitorear y manipular. Dentro de la vasta gama de

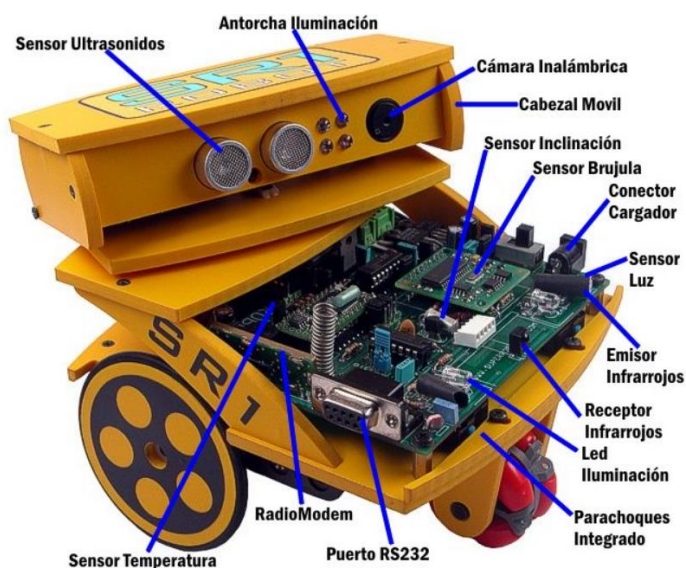
sensores que se utiliza en robótica, la aplicación de diferentes técnicas de medición, y el uso de diferentes interfaces para realizar el control, se tratará los sensores más utilizados dentro de la robótica móvil. Lo importante es encontrar el sensor correcto para la aplicación que deseamos realizar, lo cual involucra: La técnica adecuada de medición, el peso y dimensiones correctas, el rango correcto de temperatura a la que opera, y el consumo energético, y por su puesto el precio adecuado. (Siegwart & Nourbakhsh, 2004). Estos parámetros serán los que nos guiarán en el momento de seleccionar el sensor adecuado a nuestra necesidad.

### 2.3.1. Categorías de los sensores

Dentro de la robótica móvil es muy importante distinguir entre los sensores internos y externos, en la *Figura 15* se muestra el robot SR 1 con su sistema de múltiples sensores. Según Siegwart y Nourbakhsh los sensores se pueden clasificar en:

**Sensores internos (Propioceptivo).**- Están en la estructura interna del robot con los cuales se monitoriza el estado interno del robot.

**Sensores Externos (Exteroceptivo):** Están en la parte externa del robot y monitorizan el entorno del robot. Un robot móvil depende en gran parte de los sensores exteroceptivos para recolectar información de su entorno, puesto que el robot está en movimiento constante la posición de los sensores varía lo cual tiene un efecto significativo en el comportamiento de los mismos.



**Figura 15** Robot móvil SR1 identificación del sistema de percepción de múltiples sensores.

Fuente: (INTPLUS, 2018)

A continuación se muestra en la Tabla 1 la clasificación de sensores usados en aplicaciones de robótica móvil.

**Tabla 1**

*Clasificación de sensores*

Clasificación general (uso típico)	Sensor Sistema de sensor	Propioceptivo o Exteroceptivo	Activo o Pasivo	o
Sensores táctiles (detectan el contacto físico o la cercanía; switches de seguridad)	Switches de contacto, Parachoques,	Exteroceptivo	Pasivo	
	barreras ópticas,	Exteroceptivo	Activo	
	sensores de proximidad sin contacto	Exteroceptivo	Activo	
Sensores Rueda/motor (Rueda/motor velocidad y posición)	Encoders de escobillas	Propioceptivo	Pasivo	
	Potenciómetros	Propioceptivo	Pasivo	
	Synchros resolvers	Propioceptivo	Activo	
	Encoders Ópticos	Propioceptivo	Activo	
	Encoders Magnéticos	Propioceptivo	Activo	
	Encoders Inductivos	Propioceptivo	Activo	

CONTINUA →

Sensores de rumbo (Orientación del robot con relación a un eje de referencia.)	Encoders Capacitivos	Propioceptivo	Activo
	Compas	Exteroceptivo	Pasivo
	Giroscopio	Propioceptivo	Pasivo
	Inclinometro	Exteroceptivo	Activo/Pasivo
Sistema de localización global ( Localización con respecto a un sistema de referencia fijo)	GPS	Exteroceptivo	Activo
	Torres ópticas activas RF	Exteroceptivo	Activo
	Torres Ultrasónicas activas	Exteroceptivo	Activo
	Torres Reflectivas	Exteroceptivo	Activo
Rango activo (reflectividad, tiempo de vuelo, y triangulación geométrica)	Sensores reflectivos	Exteroceptivo	Activo
	Sensores ultrasónicos	Exteroceptivo	Activo
	Localizador láser	Exteroceptivo	Activo
	Triangulación óptica (1D)	Exteroceptivo	Activo
	Luz estructurada (2D)	Exteroceptivo	Activo
Sensores de movimiento/velocidad (Velocidad relativa a objetos estáticos o en movimiento)	Radar Doppler	Exteroceptivo	Activo
	Sonido Doppler	Exteroceptivo	Activo
Sensores basados en visión (Rango visual, análisis completo de imagen, segmentación, reconocimiento de objetos.)	cámaras CCD/CMOS	Exteroceptivo	Pasivo
	Paquete de alcance visual		
	Paquete de seguimiento de objetos		

Fuente: (Siegwart Nourbakhsh,2004)

### 2.3.2. Sensores Rueda/motor

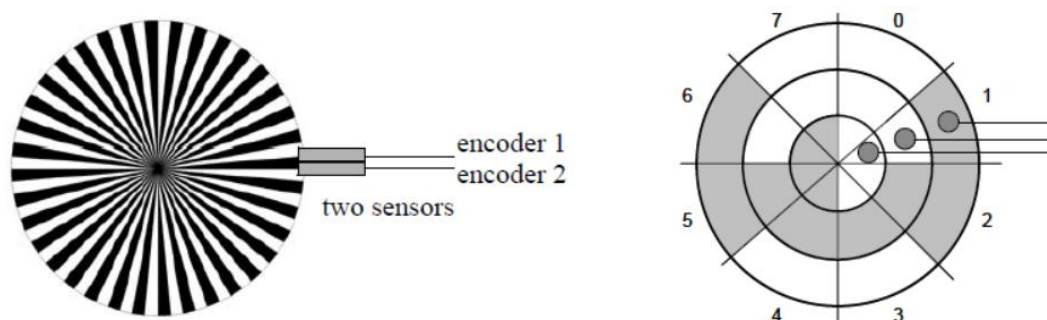
Son dispositivos que miden el estado dinámico interno del robot

#### 2.3.2.1. Encoders ópticos

Thomas Bräunl describe los encoders como un sensor fundamental para tener retroalimentación del movimiento de los ejes dentro de un robot. Existen algunas técnicas para la construcción de encoders magnéticos u ópticos. Los encoders magnéticos usan el efecto Hall, el sensor y un disco giratorio en el eje, están provistos de una serie de imanes montados circularmente. Cada vuelta del eje del motor hace que los



imanes pasen a través del sensor de efecto Hall y como resultado genere el número de pulsos en los cuales esta dividió el disco. Los encoders ópticos utilizan un disco con segmentos blancos y negros ver *Figura 16* Encoders ópticos, incremental versus absoluto (código Gray), junto a un led y un fotodiodo. El foto diodo detecta la reflexión de la luz durante el paso por los segmentos blancos, pero no durante el paso por los segmentos negros, generando un numero de pulsos por revolución acorde a número de segmentos blancos que tenga el disco, se utilizan dos sensores con un pequeño desfase para medir el sentido de giro del motor. Los dos tipos de sensores mencionados se llaman incrementales, puesto que solo pueden contar el número de segmentos que pasan por un punto inicial. Para localizar una posición absoluta se utilizan los encoders basados en un disco de código Gray, el número de sensores utilizados determina la resolución del encoder.



*Figura 16* Encoders ópticos, incremental versus absoluto (código Gray)  
Fuente: (Bräunl, 2006)

### 2.3.3. Sensores de rumbo

Los sensores de rumbo pueden ser propioceptivos (giroscopio, inclinómetro) o exeroceptivos (compas). Son usados para determinar la orientación e inclinación del robot. Nos permiten, junto a una información apropiada de velocidad, integrar el movimiento a una posición estimada. Este procedimiento, que tiene sus raíces en la navegación de buques y barcos, se llama dead reckoning. (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

### 2.3.3.1. Brújulas

Los dos sensores modernos más comunes para medir la dirección de un campo magnético son los de efecto Hall y las brújulas de flujo interrumpido. El efecto Hall describe el comportamiento del potencial eléctrico dentro de un semiconductor cuando está en presencia de un campo magnético. Cuando una corriente constante es aplicada a lo largo del semiconductor, se produce una diferencia de voltaje en dirección perpendicular, a través del ancho del semiconductor, basado en la orientación relativa del semiconductor a las líneas de campo magnéticas. Estos instrumentos son baratos pero sufren de algunas desventajas. La resolución de una brújula digital de efecto hall es pobre. Existen fuentes de error internas incluyen no linealidad del sensor básico y error de sesgo sistemático en el ámbito de los semiconductores. El circuito resultante debe llevar a cabo un filtrado significativo, y esto baja el ancho de banda de los compases de efecto hall a valores que son muy lentos en términos de robótica móvil. (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

Las brújulas de flujo interrumpido operan con un principio diferente. Dos pequeñas bobinas se enrollan en un núcleo de ferrita y están fijas perpendicularmente una con otra. Cuando la corriente alterna es activada en las dos bobinas, el campo magnético causa la variación en la fase dependiendo de la alineación relativa con cada bobina. Midiendo el cambio de las dos fases, la dirección del campo magnético en dos dimensiones puede ser computarizada. Las brújulas de flujo interrumpido pueden medir precisamente la intensidad del campo magnético y mejora la resolución y la precisión; como sea es mucho más grande y costoso que un brújula de efecto hall. (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

### 2.3.3.2. Giroscopios

Son sensores de rumbo que mantiene su orientación en relación a un sistema fijo de referencia. Así proveen una medida absoluta del rumbo de un sistema móvil. Según Siegwart y Nourbakhsh los giroscopios se pueden clasificar en dos categorías mecánicos y digitales:

Giróscopos mecánicos. El concepto de un giroscopio mecánico está basado en las propiedades inerciales de un rotor que gira a alta velocidad. La propiedad e interés es conocida como precesión giroscópica. El torque que produce el giro de la rueda provoca la estabilidad del dispositivo regida por la siguiente ecuación 2-8.

$$\tau = I\omega\Omega \quad (2-2)$$

Donde:

$\tau =$  torque reactivo

$I =$  Inercia de la rueda

$\omega =$  velocidad angular

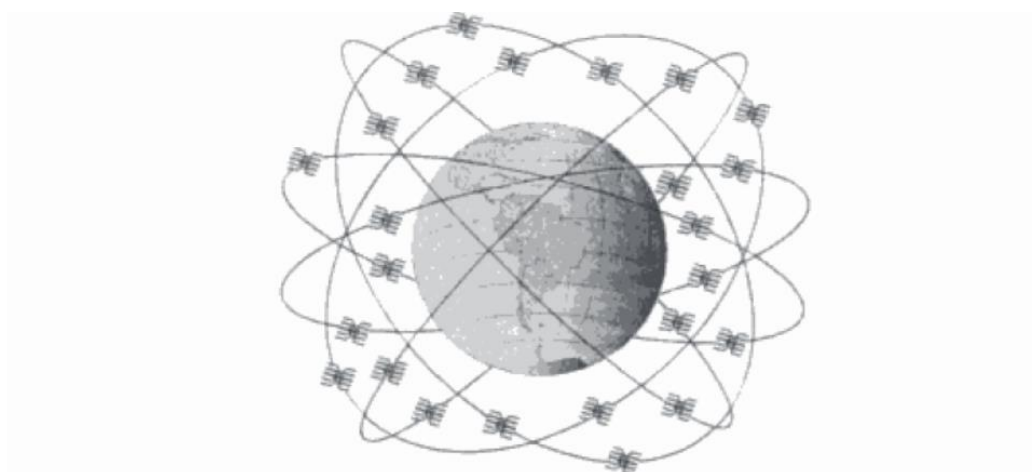
$\Omega =$  velocidad de precepción

Giroscopios ópticos, son sensores de velocidad angular que usan dos haces de luz monocromática, o láser, emitidos desde la misma fuente, en vez de mover partes mecánicas. Trabajan con el principio de que la velocidad de la luz permanece sin cambio y, por eso, los cambios geométricos pueden causar que la luz alcance su objetivo en distintos intervalos de tiempo. Un haz de luz es dirigido en el sentido horario a través de una fibra mientras el otro viaja en dirección anti horario. Como el láser que viaja en el sentido de la rotación

tiene un camino más corto para recorrer, esto provoca que tenga una frecuencia mayor. La diferencia de frecuencia de los dos haces es proporcional a la velocidad angular  $\Omega$  del cilindro.

### 2.3.4. Sistema de localización global

Usando la interacción de los sensores a bordo y los transmisores de onda corta de ambiente, el robot puede identificar su posición precisamente, la *Figura 17* muestra un ejemplo del sistema.



**Figura 17** Constelación de satélites.

Fuente: (Ollero, 2001)

#### 2.3.4.1. Sistema de posicionamiento global

El sistema de posicionamiento global es una red de 24 satélites que orbitan la tierra dos veces por día. Provee de una estimación de la posición basada en triangulación de las señales que puede recibir, si recibe mínimo tres señales provee de latitud y longitud, si recibe cuatro señales o más puede proporcionar latitud, longitud y altitud.

Según Reuter (2001) PPS permite una fiabilidad y precisión 10 veces mayor a SPS, para ello, el servicio SPS transmite datos erróneos de manera premeditada permitiendo una precisión de 100 metros un 90% del

tiempo; precisión suficiente para navegación pero no para direccionamiento de armas y lamentablemente para otras aplicaciones entre las que destacan: Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems), que incluyen sistemas anti-colisión y de mantenimiento de carril en vía.

### 2.3.5. Sensores de rango Activo

Dentro de las cualidades que los destacan en robótica móvil se encuentran: Bajo costo y todos los sensores proveen una interpretación sencilla de la salida, medición directa de la distancia del robot a los objetos en sus cercanías.

#### 2.3.5.1. Sensores de tiempo de vuelo de rango activo

Siegwart y Nourbakhsh describen el comportamiento de los sensores de tiempo de vuelo de rango activo como dispositivos que hacen uso de la propagación de la velocidad del sonido de un a onda electromagnética. En general, la distancia a la que viaja una onda de sonido o una onda electromagnética está dada por la ecuación 2-9:

$$d = c \times t \quad (2-3)$$

Donde

*d = distnacia de viaje*

*c = velocidad de la propaacion de la onda*

*t = tiempo de vuelo*

La calidad de la información recibida dependen principalmente de: Incertidumbres en determinar el tiempo exacto de la señal de retorno, Inexactitudes en la medición del tiempo de vuelo (particularmente con los sensores laser), El cono de dispersión del haz de transmisión (particularmente en los sensores ultrasónicos), Interacción con el objetivo, Variación de la velocidad de propagación, La velocidad del robot móvil y el objetivo (en el caso de un objetivo dinámico).

### 2.3.5.2. Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos se basan en la transmisión de un paquete de ondas de presión, para luego medir el tiempo que le toma al paquete reflejarse y regresar al receptor. La distancia  $d$  del objeto que causo la reflexión puede ser calculada en función de la propagación de la velocidad del sonido  $c$  y el tiempo de vuelo  $t$  como se describe en la ecuación 2-10. En condiciones estándar de presión y  $20^{\circ}$  C la velocidad del sonido es aproximadamente  $c = 343 \frac{m}{s}$ . La *Figura 18* muestra las señales de entrada y salida de un sensor ultrasónico.

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (2-4)$$

La velocidad del sonido está dada por:

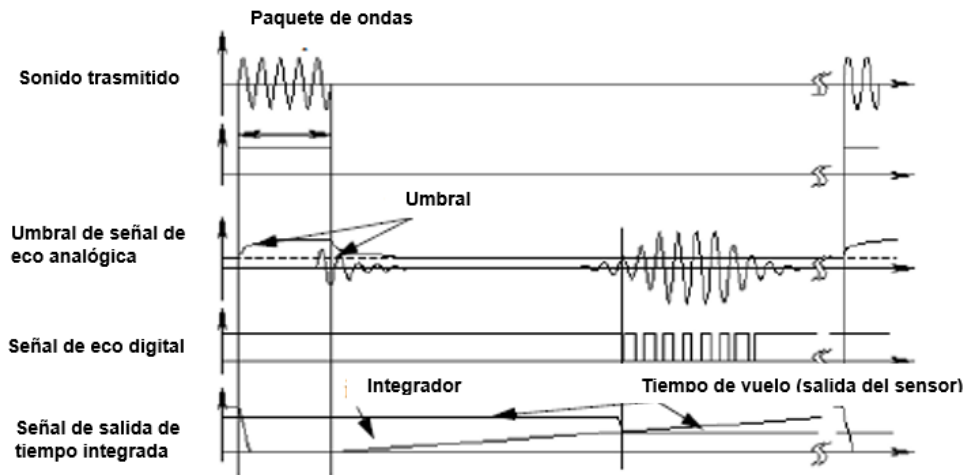
$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (2-5)$$

Donde:

$\gamma = \text{radio del calor específico}$

$R = \text{Constante del gas}$

$T = \text{temperatura en grados Kelvin}$

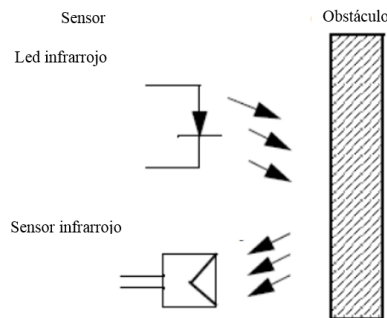


**Figura 18** Señal de un sensor ultrasónico.

Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

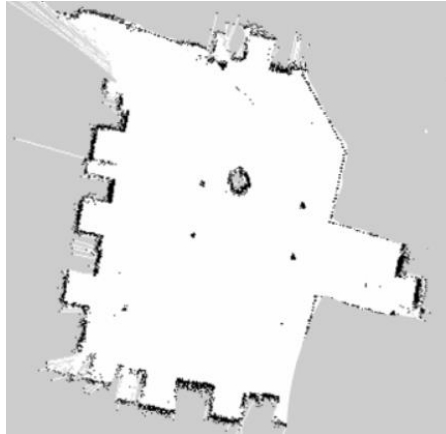
### 2.3.5.3. Localizador láser

El localizador láser es un sensor de tiempo de vuelo que logra mejoras significativas frente a los sensores ultrasónicos, debido al uso de la luz láser en vez del sonido. Este tipo de sensores consiste en un transmisor que ilumina un objetivo con un haz colimado, y un receptor capaz de detectar la composición de la luz que es esencialmente coaxial con el haz de transmisión ver *Figura 19*. Generalmente hacen referencia a radar óptico lidar (light detección and ranging), este dispositivo produce una distancia estimada basado en el tiempo que necesita la luz para alcanzar un objetivo y retornar. Un mecanismo con espejos barre el haz de luz para cubrir un lugar requerido en un plano incluso en tres dimensiones, usando un espejo rotatorio un ejemplo de la información que entrega el sensor lidar se puede ver en la *Figura 20*. Para medir el tiempo que tarda el pulso laser en regresar es necesario circuitos capaces de resolver la señal en picosegundos por lo cual el dispositivo es bastante costoso.



**Figura 19** Sensor infrarrojo

Fuente: (Bräunl, 2006).



**Figura 20** Imagen de rango típica de un sensor de rango láser 2d

### 2.3.6. Sensores de Movimiento/velocidad

Algunos sensores miden directamente el movimiento relativo entre el robot y su entorno, si un objeto se encuentra en movimiento respecto al marco de referencia local del robot, será detectado y su velocidad puede ser estimada.

#### 2.3.6.1. Sensores basados en el efecto Doppler (radar o sonido)

Siegwart y Nourbakhsh describen el funcionamiento de los sensores basados en efecto doppler como un transmisor que emite una onda electromagnética o de sonido con una frecuencia  $f_t$ . Ya sea esta recibida por el receptor o reflejada por un objeto, la medida de la frecuencia  $f_r$  en el receptor es función de la velocidad relativa  $v$  entre el transmisor y el receptor, la cual está dada por la ecuación 2-13, si el trasmisor se encuentra en movimiento y el receptor también la medida de la frecuencia  $f_r$  esta dada por la ecuación 2-14

$$f_r = f_t \times \frac{1}{1 + v/c} \quad (2-6)$$



$$f_r = f_t \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (2-7)$$

### 2.3.7. Sensores basados en visión

A través de las imágenes se recolecta una gran cantidad de información sobre objetos, lugares, símbolos, etc, la necesidad de que los robots puedan interactuar de una manera más amplia con el entorno, requiere una adquisición y procesamiento de información más compleja, que solo puede ser captada por medio del sentido de la vista, es por eso que se busca dotar a las máquinas de esta capacidad, por medio de sistemas de visión artificial, en la *Figura 21* se muestra algunos ejemplos de dispositivos de visión que se pueden encontrar en el mercado.



**Figura 21.** Cámaras que están disponibles en el mercado CCD chips y CCD cámaras.

### 2.3.7.1. Sensores CCD y CMOS

La tecnología CCD es un arreglo de elementos de imagen sensibles a la luz, o píxeles, usualmente entre 20,00 y muchos millones de píxeles en total.

Siegwart y Nourbakhsh explican el funcionamiento de la tecnología CCD y CMOS de la siguiente forma: Los fotodiodos usados en los chips CCD (como en los chips CMOS) no son igualmente sensibles a todas las frecuencias de luz. Son sensibles a la luz con una longitud de onda entre 400 y 1000nm. descargando un capacitor que posee un tamaño entre 5 a 25  $\mu m$ . En primer lugar, los condensadores de todos los píxeles se cargan completamente, entonces el período de integración comienza. A medida que los fotones de luz golpean cada píxel, liberan electrones, que son capturados por campos eléctricos y retenidos en el píxel. Con el tiempo, cada píxel acumula un nivel variable de carga basado en el número total de fotones que lo han golpeado. Después que el periodo de integración está completo las cargas relativas de todos los píxeles necesitan ser congeladas y leídas. En un CCD, el proceso de lectura se realiza en una esquina del chip CCD. Las cargas de la fila inferior de píxeles son transportadas a esta esquina y se lee, entonces las filas de arriba se desplazan hacia abajo y el proceso se repite. Esto significa que cada carga debe ser transportada a través del chip, y es crítico que el valor sea preservado. Esto requiere circuitos de control especializados y técnicas de fabricación para asegurar la estabilidad de las cargas transportadas. Las principales desventajas de las cámaras CCD son en el área de inconsistencia y el rango dinámico. Las condiciones de luz extrema así como las condiciones de poca luz afectan el rendimiento de la cámara afectando su comportamiento lineal.

La tecnología CMOS. Complementary metal oxide semiconductor chip, posee un arreglo de píxeles, pero situados junto a cada píxel se encuentran transistores específicos para ese píxel. Durante la recolección de datos, el CMOS toma un nuevo enfoque; los circuitos específicos de cada píxel alado de cada píxel miden la señal de dicho píxel, todo en paralelo para cada píxel en el arreglo. Todos los valores resultantes de cada

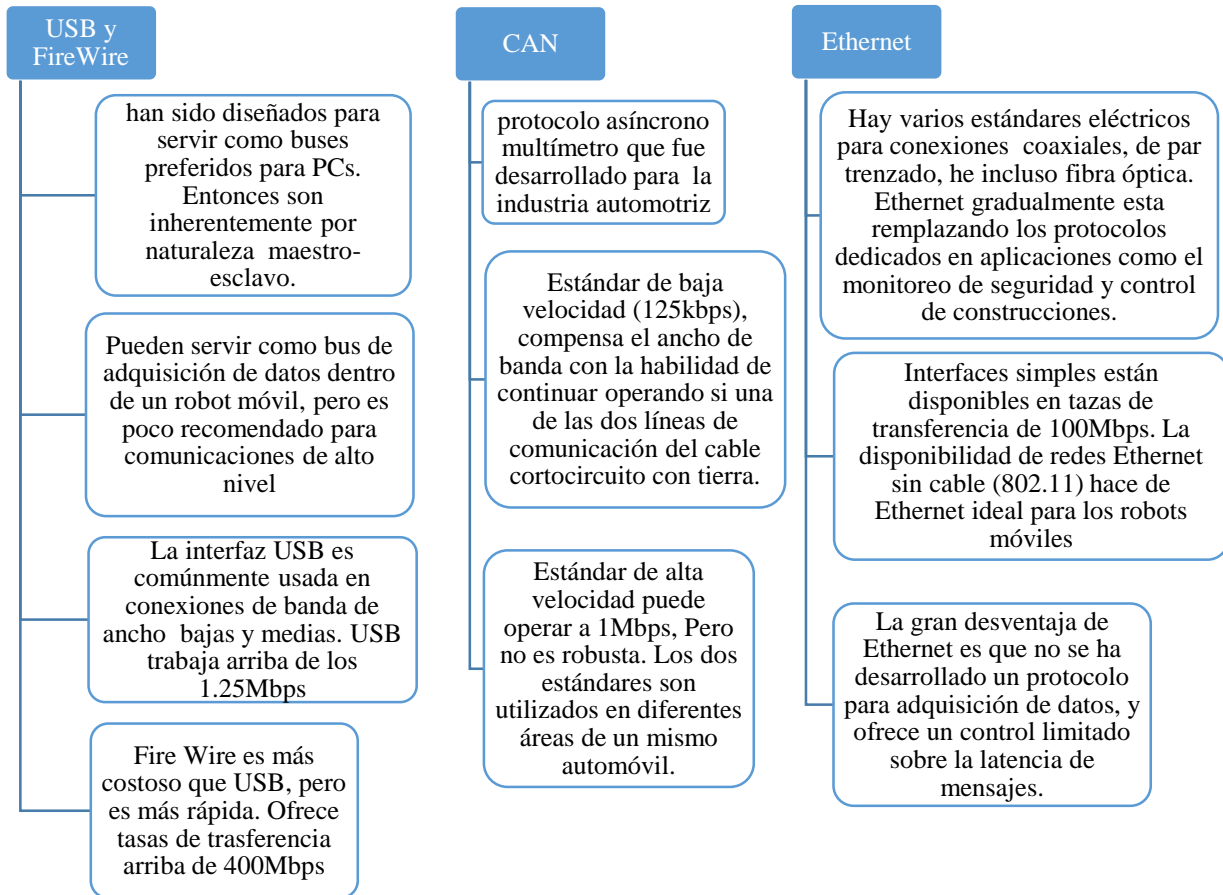
pixel son llevados a su destino. La tecnología CMOS tiene varias ventajas respecto a la tecnología CCD. No necesita de drivers especializados de reloj y circuitos requeridos en CCD para transferir cada carga de los pixeles hacía de las columnas y de las filas. Esto significa que no se requiere la manufactura de semiconductores especializados para crear chips CMOS. Trabaja con un consumo cien veces menor que los chips CCD. En un robot móvil la energía es un recurso escaso y por lo tanto esta es una importante ventaja. Dentro de las desventajas que presenta la tecnología CMOS es menos sensible que la tecnología CCD, la mejor resolución que se puede alcanzar es inferior a la que se puede alcanzar con los chips CCD.

#### **2.3.8. Posición y orientación de una plataforma móvil**

Para lograr controlar la plataforma robótica móvil de forma autónoma es necesario tener medidas de la posición y orientación, dichas señales deben recogerse en intervalos de tiempo adecuados, la técnica más común para dicha tarea es conocida como odometría la cual consiste en recolectar las señales provenientes de los encoders ubicados en cada rueda, para procesarlas y obtener la posición y orientación de la plataforma, esta técnica es propensa a la acumulación de errores a medida que la distancia aumenta, para minimizar el error se usa varios sistemas combinados tales como acelerómetros , giroscopios, entre otros, para las plataformas de exteriores se suman los dispositivos GPS debido a que la distancia que recorren es mucho mayor.

### **2.4. Networked para la teleoperación de robots**

A continuación en la *Figura 22* se describirán las redes y protocolos más usados para la comunicación de plataformas móviles robóticas.



**Figura 22** Redes y protocolos más utilizados en robótica móvil

Según John M. Holland los requerimientos básicos de un protocolo de aplicación son los siguientes: Es absolutamente esencial que un protocolo de aplicación para un robot móvil soporte la manipulación y el monitoreo de casi toda función del robot, y de manera eficiente. Esto es verdadero incluso si el robot no se comunica con una estación base durante su operación normal. También es verdadero si el diseño final no necesita comunicación en absoluto. Además se requiere que el protocolo sea flexible, por las siguientes tres razones primarias: Debe soportar la depuración de software incorporado, debe facilitar expansiones futuras, debe facilitar la coordinación del robot con otros sistemas tales como elevadores, puertas, etc.

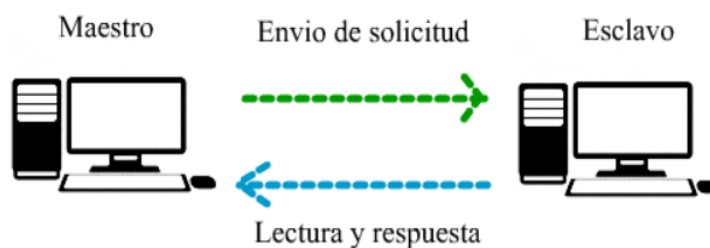
## 2.4.1. Arquitectura de comunicación

La arquitectura de comunicación describe cual es el, o los dispositivos de la red que inician el envío de información o mensaje, así como quien lo recibe, por lo tanto describe la forma de comunicación dentro de las cuales las más básicas son: La arquitectura de maestro esclavo, es la más fácil de implementar, la arquitectura par a par (Peer to peer), la cual hace referencia a la comunicación entre iguales, y la arquitectura cliente servidor, es un diseño de software para la interacción entre programas.

### 2.4.1.1. Arquitectura maestro esclavo

La arquitectura maestro/ esclavo, hace referencia a la existencia de un solo dispositivo (maestro) el cual inicia y controla una sesión de uno o más equipos Ver *Figura 23*.

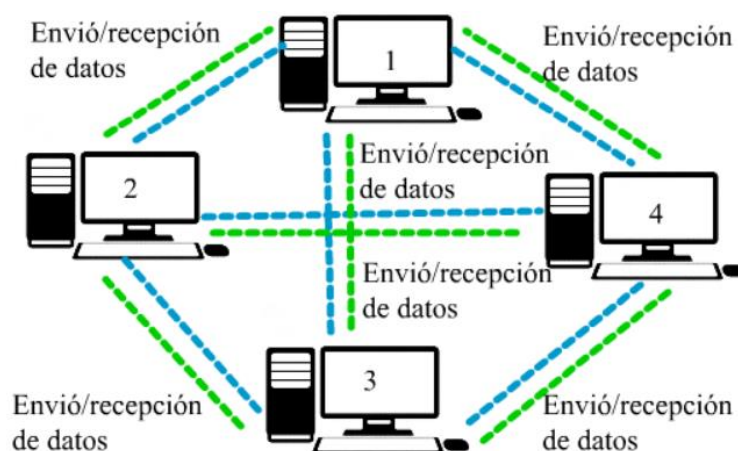
El maestro tiene dos modalidades de funcionamiento, el modo Unidifusión en el cual el maestro se dirige a un dispositivo esclavo específico de manera individual, dicho esclavo lee la solicitud, la procesa y envía un mensaje de respuesta. El modo de difusión en el cual el maestro envía una solicitud a todos los dispositivos esclavos, estos mensajes son aceptados leídos y procesados por los esclavos pero no envían respuesta. (Holland, 2004)



*Figura 23* Arquitectura maestro esclavo

### 2.4.1.2. Arquitectura Peer to Peer

La arquitectura peer to peer o red entre iguales, hace referencia a una red de dispositivos intercomunicados que funciona simultáneamente como clientes y servidor, logrando compartir información en cualquier formato directamente entre dispositivos ver *Figura 24*. Posee la gran ventaja de aprovechar al máximo recursos tales como ancho de banda, capacidad de almacenamiento, entre otros. (Holland, 2004)



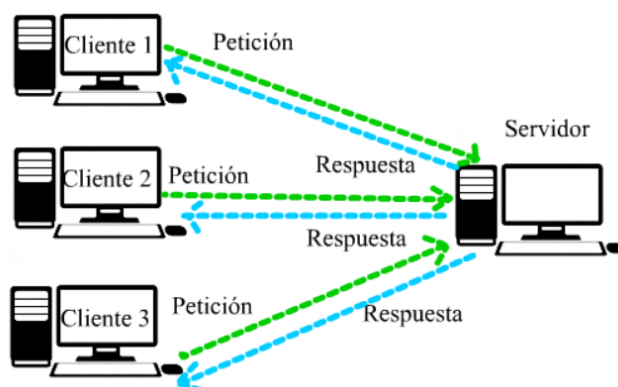
*Figura 24* Arquitectura peer to peer

### 2.4.1.3. Arquitectura Cliente servidor

La arquitectura cliente servidor es un tipo de diseño de software donde se definen programas que proporcionan un servicio de información los cuales se denominan servidores, y programas que solicitan información o realizan peticiones los cuales se conocen como clientes, ver *Figura 25*. Clientes y servidores pueden ser ejecutados en el mismo dispositivo.

Los clientes son programas ejecutables que constantemente envían peticiones al servidor mientras esperan la respuesta.

Los servidores son programas que proporcionan un servicio dentro de la red que funcionan como un administrador de base de datos, reciben las peticiones, ejecutan el servicio y envían el resultado al cliente que lo solicitó. Estos programas pueden compartir información entre ellos.



*Figura 25* Arquitectura cliente servidor

#### 2.4.2. Autonomía y planificación de trayectorias

La autonomía en robótica móvil hace referencia al sistema de navegación autónomo, dichos sistemas engloban las tareas de Percibir, planificar y actuar. La etapa de percepción engloba todo el sistema sensorial, esto quiere decir que se toman en cuenta tanto los sensores internos y externos, mientras que los sensores internos se encargan de medir el funcionamiento y comportamiento de los actuadores, los sensores externos permiten la comunicación entre el entorno y la plataforma encargándose de modelar, mapear, medir distancias, y tomar información del entorno. La etapa de planificación está conformada por planificación total de la misión, la ruta a seguir, la trayectoria que debe tomar, y la evasión de obstáculos. La etapa de acción recibe los datos enviados por la etapa de planificación y la de percepción uniendo y procesando dicha información, toma decisiones a nivel de software para modificar el estado de los actuadores.

Para la definición de la trayectoria se debe considerar las características cinemáticas de la plataforma. Una vez planificada la ruta a seguir es necesario crear movimientos concretos, los cuales serán controlados para mantener a la plataforma dentro del rumbo planteado, para conseguir que un robot móvil con ruedas realice el seguimiento de caminos es necesario determinar el ángulo de orientación, en base a la orientación y posición actuales en función de la trayectoria deseada.

## **2.5. Arquitecturas Robóticas**

### **2.5.1. Paradigma y arquitectura**

Un paradigma robótico está definido como la relación que existe entre los tres aspectos primarios: Percibir, Planear, Actuar y por la manera en que la información de los sensores es procesada y distribuida a través del sistema.

La arquitectura es el método de implementación de los paradigmas, de representar los principios de alguna manera concreta. Idealmente una arquitectura es genérica; como el buen diseño de programas orientado a objeto, debe tener muchas piezas reusables para otras plataformas robóticas y objetivos.

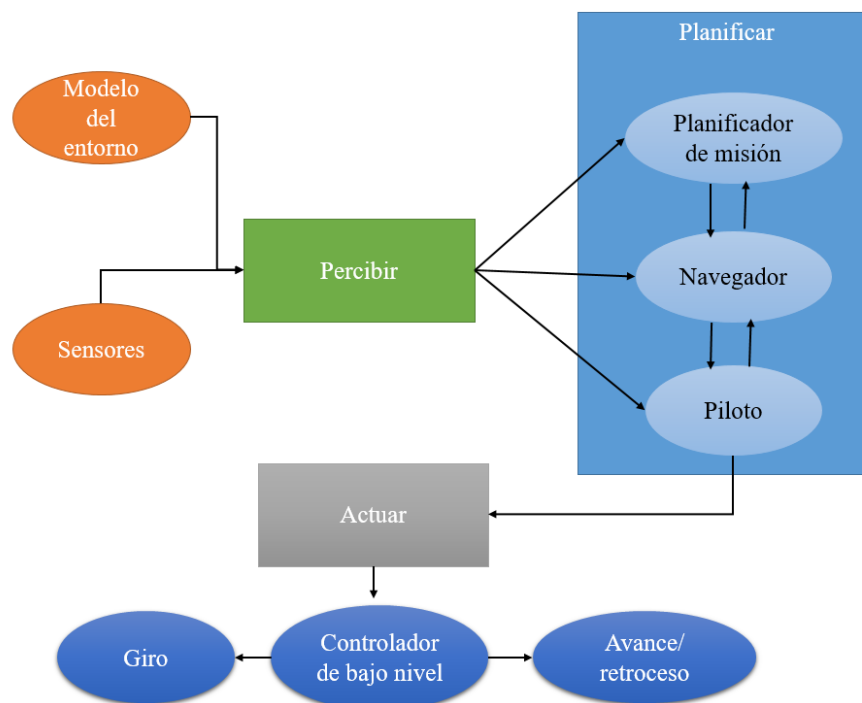
### **2.5.2. Arquitecturas jerárquicas más representativas**

#### **2.5.2.1. Controlador jerárquico anidado**

Consta de tres componentes Percibir, planificar y actuar ver *Figura 26*. Inicialmente el robot recoge los datos provenientes de los sensores y los combina con el modelo del entorno pre definido, como mapas, reglas y restricciones de comportamiento, señalizaciones, entre otros. Una vez creado o actualizado el modelo del entorno, se ejecuta la siguiente etapa, planificar, la cual se compone de tres pasos, planificador de misiones,



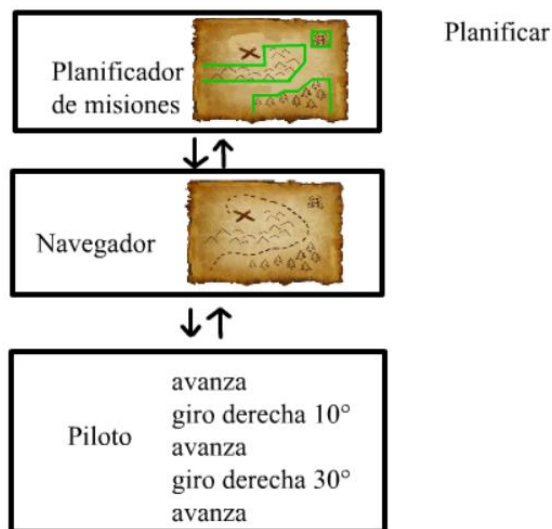
navegador, y el piloto, cada paso tiene acceso a la etapa de percepción en base al cual puede modificar su comportamiento, el piloto es el último paso encargado de generar comportamientos determinados tales como girar hacia la izquierda o derecha, avanzar o retroceder, para luego enviar esta información al controlador de bajo nivel que se encarga de traducir esta información en acciones que deben ejecutar los actuadores. El controlador de bajo nivel junto con los actuadores conforma la etapa actuar del modelo. (Murphy, 2000)



**Figura 26.** Componentes Percibir, planificar, actuar del controlador jerárquico anidado

El mayor aporte de la arquitectura jerárquica anidada es la descomposición del componente de planificación en tres funciones: Planificador de misiones, navegador, y el piloto, ver Figura 27 el planificador de misiones se encarga de enviar la tarea de manera que otras funciones entiendan el mensaje, y se encarga de ubicar a la meta y al robot dentro del entorno global pre cargado, esta información es enviada al navegador el cual se encarga de generar una ruta de varios segmentos, desde la ubicación actual del robot hasta el punto objetivo, la ruta es enviada al piloto el cual toma el primer segmento de la ruta y lo descompone en una lista

de acciones a realizar, y continua con los siguientes segmentos, constantemente el piloto revisa la etapa de percepción para saber si se ha desviado de la ruta, si se ha alcanzado la meta o si se ha presentado un obstáculo. Si el robot se ha desviado de la ruta, tomará acciones para corregir el rumbo. Si algo inesperado ocurre en la ruta, como un obstáculo, el piloto se comunica con el navegador, el cual entrega al piloto un nuevo segmento de ruta para que corrija el rumbo y pueda evadir el obstáculo. Si se alcanza la meta el piloto informa dicho estado al navegador el cual informa al planificador de misiones, para que pueda ejecutar la siguiente misión.

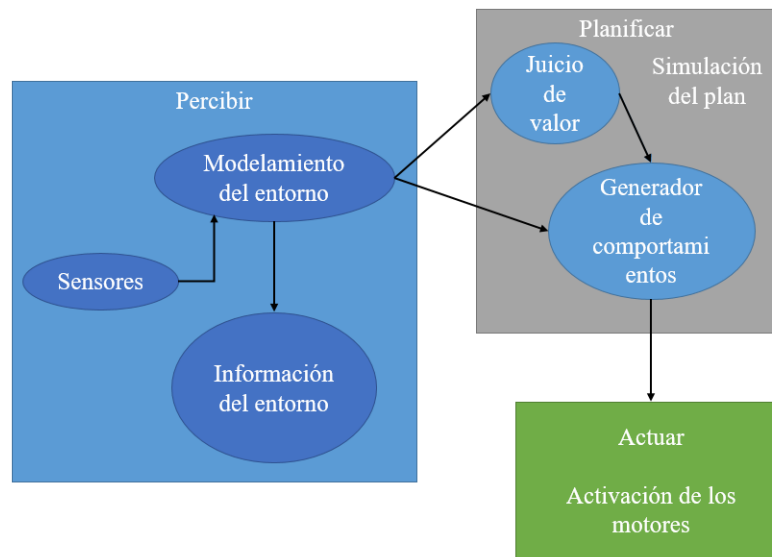


**Figura 27** Descomposición del componente planificar tres funciones, planificador de misiones, navegador piloto

### 2.5.2.2. Arquitectura NIST RCS

La arquitectura NIST RCS (National Institute of Standards and Technology, Real time control-system). Está basada en la arquitectura de controlador Jerárquico anidado, consta de las tres etapas, percibir, planear, y actuar ver *Figura 28*. La etapa de percepción introduce un paso de preprocesamiento de las señales antes de fusionar esta información con la información del entorno precargada para formar el modelo del entorno. El módulo de juicio de valor dentro de la etapa de planificación esta encardo de planear, simular el plan y verificar si funciona, luego transfiere esta información al módulo generador de comportamientos el cual convierte el

plan en acciones que el robot pueda realizar enviando esta información al controlador de bajo nivel. (Murphy, 2000)



**Figura 28** Etapas de la arquitectura RCS

### 2.5.3. Arquitecturas Reactivas más representativas

Según Robin R. Murphy para la implementación de un sistema reactivo, el diseñador debe identificar el conjunto de comportamientos necesarios para la tarea. Los comportamientos pueden ser nuevos o utilizar comportamientos existentes. La acción general del robot emerge de múltiples comportamientos concurrentes. Por lo tanto, una arquitectura reactiva debe proporcionar mecanismos para: Desencadenar comportamientos y para determinar qué sucede cuando múltiples comportamientos están activos al mismo tiempo.

Dentro de las arquitecturas reactivas más representativas podemos identificar dos: La arquitectura de subsunción, está basada en un conjunto de comportamientos, entendemos por comportamientos a la dualidad de percepción y acción, dichos comportamientos se activan o desactivan en función de estímulos provenientes

del entorno, el sistema están gobernado por una máquina de estado la cual libera, impide, o fusiona los comportamientos, la interacción entre comportamientos simples dan lugar a comportamientos emergentes más complejos. La arquitectura de campos potenciales, representa los comportamientos mediante vectores, la suma de los distintos vectores da lugar a los comportamientos emergentes. Un campo potencial es una colección de campos o vectores, los cuales son usados para representar una fuerza proveniente de alguna fuente, los vectores están representados por flechas donde la magnitud de la misma es proporcional a la fuerza ejercida y el ángulo representa la dirección. (Murphy, 2000)

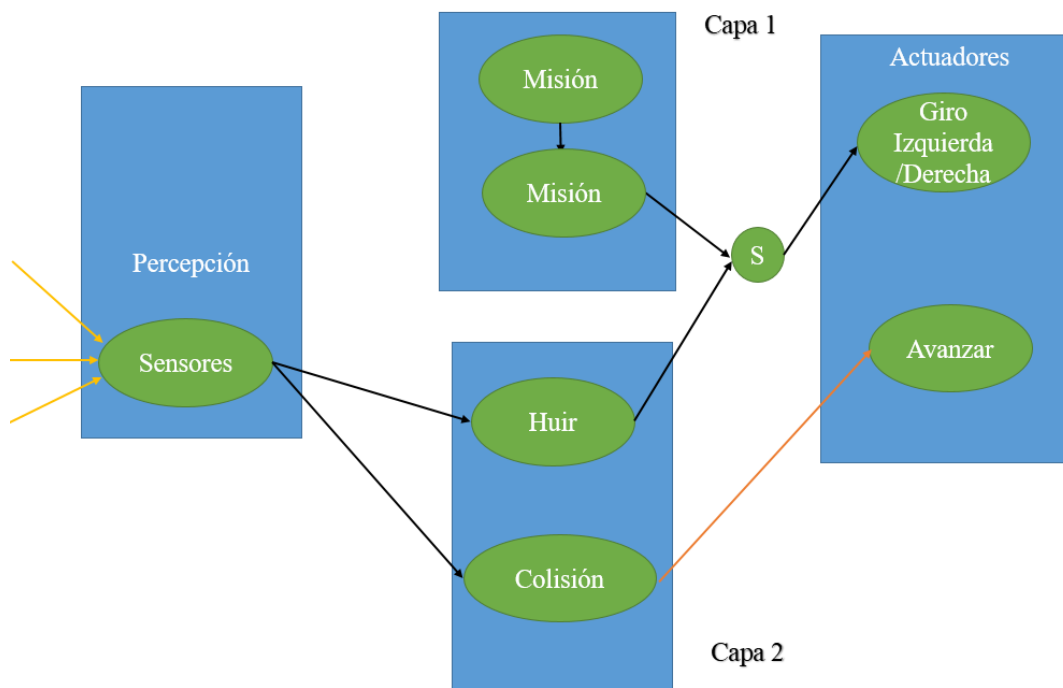
### **2.5.3.1. Arquitectura reactiva de subsunción**

Se refiere a la forma en la cual están combinados los comportamientos, está compuesta de una o varias capas, cada capa contiene un conjunto de comportamientos, las primeras capas representan los comportamientos esenciales. Los comportamientos están relacionados con el modo de estímulo-respuesta, sin una programación externa que coordine su control. Este modelo de arquitectura no necesita un modelamiento previo del entorno para realizar el desplazamiento seguro de un punto a otro.

Los vectores de dirección de las capas más altas subsumen los vectores de dirección de las capas más bajas lo cual se realiza en dos formas:

1. **Inhibición:** La salida del módulo de subsunción está conectado a la salida de otro modulo. Si la salida del módulo de subsunción está activa, la salida del módulo de subsunción es bloqueado o desactivado.
2. **Supresión:** La salida del módulo de subsunción está conectado a la entrada de otro modulo. Si la salida del módulo de Subsunción está activa, reemplaza la entrada normal por el módulo de subsunción.

La *Figura 29* muestra un diseño de arquitectura de subsunción en el cual podemos identificar la etapa de percepción formada por los sensores que recolectan información del entorno, la siguiente etapa está conformada por dos capas, la capa 0 contiene los comportamientos primarios huir, si el robot detecta un obstáculo gira hasta alejarse, colisión en caso de no detectar ninguna colisión el robot sigue avanzando. La siguiente capa, la capa1 muestra comportamientos de mayor complejidad tales como evasión de obstáculos, el cual genera un vector en base a la información enviada por los sensores para modificar el rumbo del robot y continuar la ruta mientras evade el obstáculo. El comportamiento curso deseado, se encarga de modificar el rumbo hacia un punto específico, dicho comportamiento se comunica con el comportamiento de evasión de obstáculos, en caso de que este comportamiento este desactivado la información del rumbo pasa a la etapa de los actuadores sin modificación, en caso contrario se combinan los dos vectores resultantes y se envía esta información a los actuadores. S representa la subsunción de los dos comportamientos huir y evasión de obstáculos, El comportamiento de evasión de obstáculos suprime la salida del comportamiento huir, esto quiere decir que el comportamiento huir sigue funcionando pero su salida no va hacia los actuadores.



**Figura 29** Arquitectura de subsunción

Según Robert R. Murphy los cuatro aspectos interesantes de la subsunción en términos de liberación y control son:

1. Los módulos son agrupados en capas de competencia. Las capas reflejan la jerarquía de inteligencia, o competencias. Las capas más bajas encapsulan las funciones de sobrevivencias como evitar colisiones, mientras que los niveles más altos crean acciones de metas directas como el mapeo. Cada capa puede ser vista como un comportamiento abstracto para una tarea particular.
2. Los módulos en las capas de nivel superior puede sobre escribir, o remplazar, las salidas provenientes de comportamientos de la siguiente capa inferior. Las capas de comportamiento operan simultáneamente e independientemente, por lo que debe existir un mecanismo para manejar conflictos potenciales. La solución en subsunción es un tipo de ganador-tomar todo, donde el ganador es siempre la capa superior

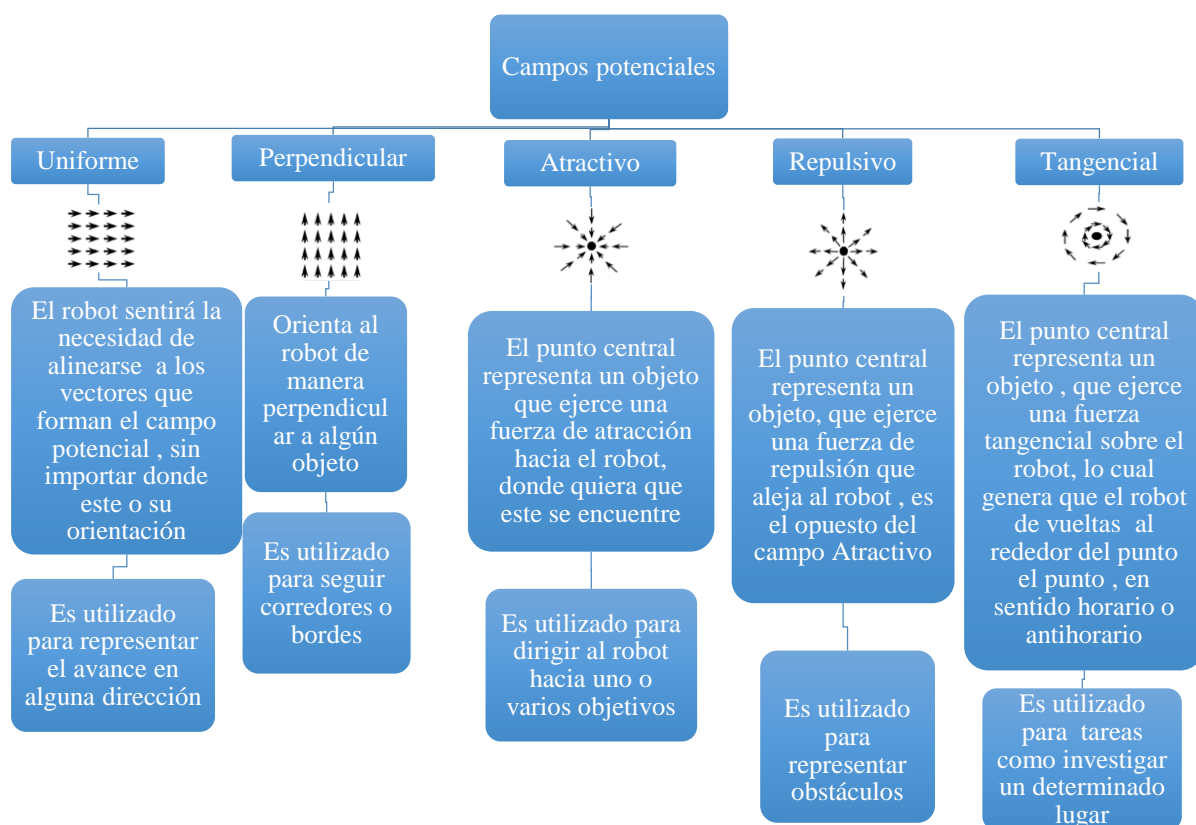
3. Se evita el uso del estado interno. Estado interno en este caso significa cualquier tipo de representación local, persistente que representa el estado del mundo, o un modelo. Debido a que el robot es un agente situado, la mayor parte de su información debe venir directamente del mundo. Si el robot depende de una representación interna, lo que cree, puede comenzar a divergir peligrosamente de la realidad. Se necesita algún estado interno para liberar comportamientos como estar asustado o hambriento, pero los buenos diseños de comportamiento minimizan esto.
4. Una tarea se lleva a cabo activando la capa apropiada, que luego activa las capas inferiores debajo de ella, y así sucesivamente. Sin embargo, en la práctica, los sistemas de supresión no son fácilmente asequibles, es decir, no se les puede ordenar que realicen otra tarea sin ser reprogramados.

### **2.5.3.2. Arquitectura reactiva por metodología de campos potenciales**

Este tipo de arquitectura modela los comportamientos como campos potenciales, combinando la influencia de los campos potenciales en una suma vectorial, se generan comportamientos emergentes que permiten que el robot cumpla su tarea.

#### **2.5.3.2.1 Visualizando los campos potenciales**

En muchas aplicaciones robóticas el entorno se representa en dos dimensiones similar a un mapa, el cual se puede dividir en pequeños cuadrados formando una cuadrícula en la cual los objetos perceptibles y el entorno generan un campo potencial análogo a un campo magnético, el robot se representa como una partícula influenciada por los campos potenciales. En la *Figura 30* se muestra los cinco campos potenciales principales, estos campos potenciales pueden ser combinados para crear campos potenciales más complejos.

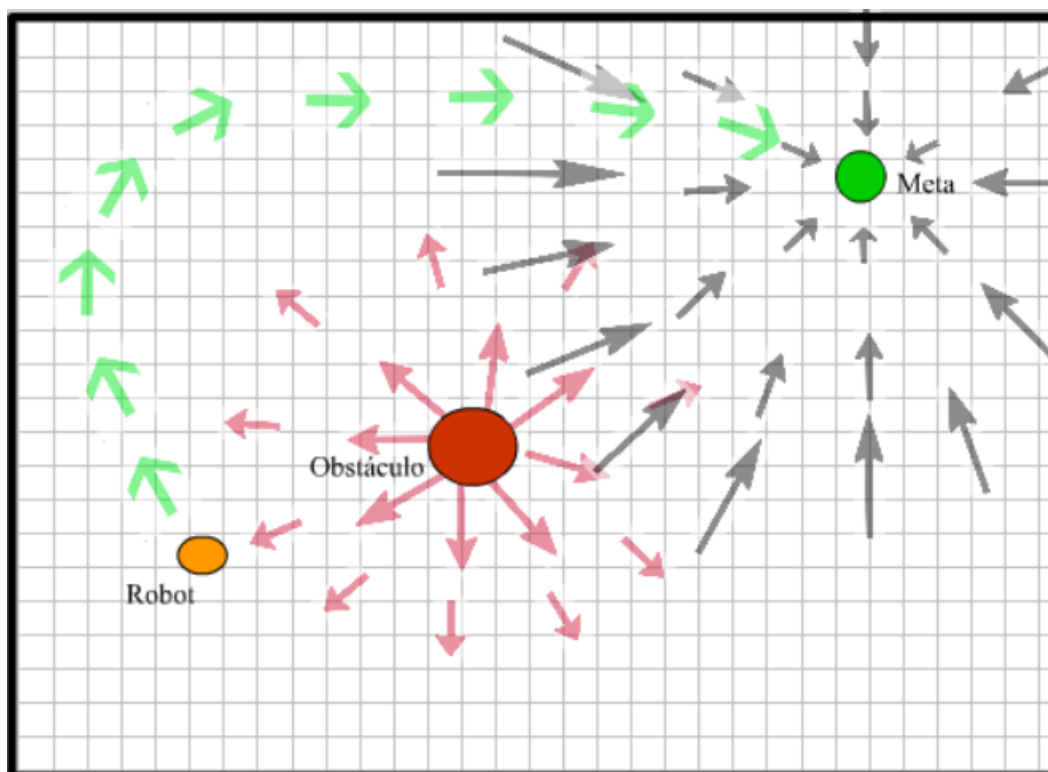


**Figura 30** Campos potenciales principales

### 2.5.3.2.2 Combinación de campos y comportamientos

La *Figura 31* muestra la implementación de campos potenciales para representar dos comportamientos, ir a la meta representado por el círculo verde y el campo potencial atractivo compuesto por flechas negras, el siguiente comportamiento es huir, representado por el círculo rojo y el campo potencial repulsivo en flechas rojas, la intensidad del campo potencial se representa por la magnitud de los vectores representados por las flechas. Las flechas verdes muestra el resultado de la suma vectorial de los dos campos potenciales, lo cual genera el comportamiento del robot representado por el círculo naranja, como se mencionó anteriormente el comportamiento del robot surge a partir de la suma vectorial de todos los campos potenciales dentro del entorno que influyen al robot.



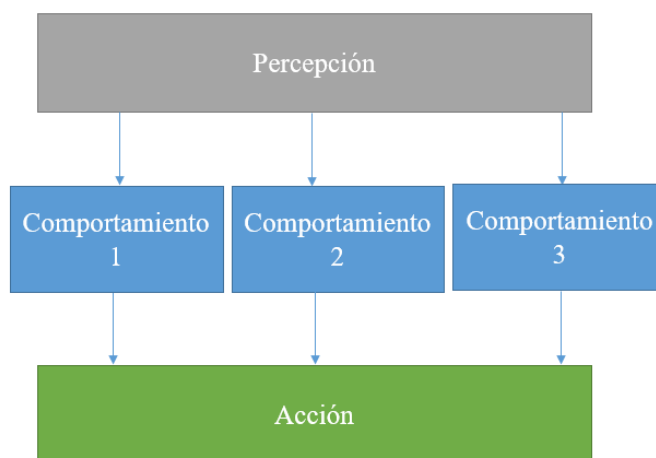


**Figura 31** Campos potenciales que representa los comportamientos de ir a la meta vectores negros campo atractivo, y evadir obstáculo vectores rojos campo repulsivo. Los vectores verdes representan el comportamiento emergente de la suma vectorial de los dos comportamientos

## 2.6. Navegación Reactiva

El paradigma reactivo surge de la inconformidad con el desempeño del paradigma jerárquico y de la creciente tendencia de emular el comportamiento de los organismos biológicos, lo cual dio a los robots la capacidad de respuesta frente al entorno, en tiempos de ejecución mucho más rápida que el paradigma jerárquico. El paradigma reactivo descarta la organización Percibir, planear y actuar, sustituyéndolos por una estructura de percepción-acción que componen los comportamientos individuales, los cuales son combinados y dan lugar a comportamientos de mayor complejidad que permiten al robot desarrollar la tarea dada. La organización Percibir-actuar no define la manera en que se controlan y combinan los comportamientos, este aspecto es inherente a la arquitectura seleccionada.

Para que un robot pueda lograr navegar por el entorno desde una visión reactiva, es necesario crear un conjunto de comportamientos que permita que el robot se dirija a un punto deseado, pueda evadir obstáculos presentes en el camino y detenerse cuando la misión sea realizada o cambiar a otra misión. Los comportamientos pueden tener un conjunto de sensores dedicados para dicho comportamiento en específico, o reutilizar la información del conjunto de sensores total. Los comportamientos no tienen conocimiento de lo que están percibiendo y los procesos que llevan a cabo los demás comportamientos. Cada comportamiento tiene acceso directo al módulo de percepción ver *Figura 32*. Los comportamientos no dependen de una representación central a partir del conjunto de sensores, son entidades computacionales independientes que trabajan de forma concurrente.



**Figura 32** Organización percibir –actuar

Uno de los aspectos principales de la navegación reactiva es que los comportamientos están controlados por lo que sucede en el entorno. El robot forma parte integral del entorno, y tiene sus propias intenciones y metas, a medida que se desplaza por el entorno este va cambiando, mientras el robot recibe retroalimentación del entorno por medio del sistema de percepción, se afecta la posición de la meta relativa al robot y la manera en la cual la debe alcanzarla, generando así un nuevo ciclo de acciones.

## 2.7. Resumen

- El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en uno de sus extremos. En los años ochenta el incremento espectacular de la capacidad computacional y el desarrollo de nuevos sensores, mecanismos y sistemas de control, permite aumentar la autonomía. La autonomía de un robot móvil se basa en el sistema de navegación automática. En estos sistemas se incluyen tareas de planificación, percepción y control. El sistema de percepción de un robot tiene tres objetivos: lograr una navegación segura, modelar su entorno, y estimar la posición del robot móvil. Se pueden clasificar en dos tipos: Teleoperados, las tareas de percepción del entorno, planificación y manipulación compleja son realizadas por humanos, el operador actúa en tiempo real. Y Autónomos o inteligentes, son los más evolucionados desde el punto de vista del procesamiento de información. Son máquinas capaces de percibir, modelar el entorno, planificar y actuar para alcanzar objetivos sin intervención, o con una intervención muy pequeña, de supervisores humanos.
- Un robot móvil necesita mecanismos de locomoción que le permitan moverse en un entorno específico. Muchos de estos mecanismos que permiten desenvolverse a los robots en diversos ambientes han sido inspirados en la naturaleza. Sin embargo la rueda ha sido uno de los mecanismos más populares para la locomoción en terrenos irregulares y estructurados puesto que puede lograr muy buena eficiencia, con una implementación mecánica relativamente sencilla. Existen 4 clases principales de ruedas: rueda estándar, rueda giratoria, Ruedas omnidireccionales, Bola o rueda esférica. Estas se pueden configurar dentro de una plataforma móvil según se

requiera para obtener el mejor desempeño y maniobrabilidad dentro de una determinada superficie.

Se requiere plantear modelos matemáticos que represente el comportamiento de la posición y el desplazamiento del robot móvil en un entorno dado, los cuales hacen uso de sistemas de referencia global y local, utilizando variables tales como coordenadas globales  $X_I, Y_I$  así como la diferencia angular  $\theta$  entre el marco de referencia global y el marco de referencia local. Las limitaciones cinemáticas de un robot móvil están dadas por sus propias ruedas, cada rueda impone cero o más restricciones al movimiento del robot.

- Una de las tareas más importantes para desarrollar la autonomía en un robot es tener la capacidad de adquirir información del medio ambiente y de sí mismo a esto se le conoce como percepción. Los sensores se clasifican en Prospiceptivo(sensores internos),se concentran en adquirir información sobre el estado interno del robot , y Exteroceptivos (sensores externos), se concentran en la tarea de adquirir información de los objetos en las regiones inmediatas para interpretar el estado de sus alrededores. Debido a que los sensores dentro de un robot móvil están en continuo movimiento esto tiene un impacto significante en su comportamiento.
- La arquitectura de comunicación describe quien inicia el mensaje, y quien lo recibe pasivamente. Existen tres tipos de arquitectura básica: Maestro-esclavo, en la cual el maestro inicia todas las comunicaciones y los esclavos responden, para luego monitorear el estado de cada esclavo y verificar si puede seguir con el proceso. Peer to peer, en la cual cualquier agente dentro del vínculo puede mandar un mensaje a cualquier otro agente y cliente servidor la cual es un tipo de diseño de software donde se definen programas que proporcionan un servicio de información ,servidores, y programas que solicitan información o realizan peticiones, clientes.

- El paradigma reactivo surge de la inconformidad con el desempeño del paradigma jerárquico y de la creciente tendencia de emular el comportamiento de los organismos biológicos, lo cual dio a los robots la capacidad de una respuesta frente al entorno, en tiempos de ejecución mucho más rápida que el paradigma jerárquico. La principal connotación de un sistema robótico reactivo es que se ejecuta rápido. Los comportamientos sirven como bloques de construcción básicos para las acciones robóticas, y el comportamiento general del robot es emergente.

Las arquitecturas más representativas son la arquitectura de subsunción: Los comportamientos están relacionados con el modo de estímulo-respuesta, sin una programación externa que coordine su control. Y la arquitectura de campos potenciales: Requiere que los comportamientos sean implementados como campos potenciales, siempre usa vectores para representar los comportamientos, la suma de vectores para combinar los vectores de diferentes comportamientos para producir un comportamiento emergente.

# Capítulo 3

## Metodología y diseño

En el capítulo se desarrolla la metodología para la construcción de la plataforma robótica móvil. Está basada en modelo para diseño y desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2012) para alcanzar un diseño eficientemente enfocado a la solución de problemas. Define el concepto del producto; necesidades y características técnicas. Estructura el concepto de acuerdo a su función en el diseño para plantear alternativas que posteriormente serán evaluadas. Se selecciona opciones previas de diseño a nivel sistema para después especificar el diseño de detalle para cada módulo.

### 3.1. Definición del concepto

Según (Ulrich & Eppinger, 2012), para el desarrollo de un producto se debe elaborar el concepto y sus estatutos de manera general. Se capta el sentir del cliente, se analizan las necesidades y se documentan. Se identifica las especificaciones técnicas más relevantes para la calidad y se realiza un análisis de la importancia de los mismos.

#### 3.1.1. Definición de las necesidades

Las necesidades definen las características y prestaciones que el concepto requiere para el diseño final; lo cual permite desarrollar especificaciones técnicas del producto. La Tabla 2 expone los requerimientos deseados del proyecto, los cuales serán analizados individualmente con el fin de ofrecer soluciones prácticas y modulares.

**Tabla 2***Requerimientos o necesidades del consumidor*

N°	REQUERIMIENTOS
1	No debe ingresar agua al interior del robot móvil
2	Chasis fuerte y robusto
3	Fácil acceso a los dispositivos interno
4	Buena transmisión mecánica
5	Gran potencia de tracción
6	Materiales resistentes al ambiente
7	Control remoto
8	Transmisión de datos en tiempo real
9	Evitar obstáculos
10	Software de control de uso libre
11	Ubicación
12	Capacidad de vigilar un perímetro
13	Fácil mantenimiento
14	Presentación
15	La plataforma trabaje en diferentes terrenos
<b>9</b>	<b>Evitar obstáculos</b>
10	Software de control de uso libre
11	Ubicación
12	Capacidad de vigilar un perímetro
13	Fácil mantenimiento
14	Presentación
15	La plataforma trabaje en diferentes terrenos

### 3.1.2. Definición de las características técnicas

Partiendo de los requerimientos para la plataforma robótica móvil, se define las características técnicas, que son las necesidades del usuario traducidas a lenguaje técnico. Una vez obtenidas las especificaciones necesarias, se puede abordar la elaboración del proyecto de una forma clara y objetiva. En la Tabla 3 se detallan las características técnicas necesarias para lograr satisfacer las necesidades del usuario.

**Tabla 3***Características técnicas*

N°	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
1	Estructura sellada e impermeable
2	Materiales resistentes a impacto
3	Dispositivos internos ubicados en posiciones accesibles
4	Diámetros de ruedas y distancia entre ejes acorde a las dimensiones del robot móvil
5	Tracción en las 4 llantas
6	Baterías capaces de abastecer todo el sistema durante 1 hora.
7	Alcance de tele operación de 100 metros.
8	Transmisor de video, posición, en tiempo real
9	Sensor de detección de objetos
10	Software de programación robótica de acceso libre
11	Odometría, Sensor de posición global
12	Motores de alto torque
13	Capacidad de desensamble de los elementos internos y externos

### 3.1.3. Aplicación de la Función de Desarrollo de la Calidad QFD

Se relaciona los requerimientos de los clientes con las características técnicas necesarias para satisfacerlos. Tomados en su conjunto, los requerimientos definen la calidad de un producto y son las expresiones que los clientes utilizan para describir los productos y sus características deseables. (Yacuzzi y Martín ,2003) aseguran que el Despliegue de la Función de Calidad es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, características técnicas y operativas satisfactorias. QFD es un método estructurado para planificar y desarrollar un producto, permitiendo a un equipo de trabajo satisfacer las necesidades del cliente, evaluando cada aspecto del producto de manera sistemática y ordenada. La matriz QFD realizada para captar las necesidades del proyecto se presenta en el anexo A. Obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4, ordenando su ponderación de mayor a menor:



**Tabla 4***Resultados de la matriz QFD*

<b>HITOS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	<b>PORCENTAJE DE PONDERACIÓN</b>
<b>1</b>	Estructura sellada e impermeable	13,83
<b>2</b>	Materiales resistentes a impacto	10,62
<b>3</b>	Software de programación robótica de acceso libre	9,62
<b>4</b>	Diámetros de ruedas y distancia entre ejes acorde a las dimensiones del robot móvil	9,16
<b>5</b>	Motores de alto torque	8,43
<b>6</b>	Capacidad de desensamble de los elementos internos y externos	8,33
<b>7</b>	Transmisor de video, posición, en tiempo real	7,97
<b>8</b>	Odometría, Sensor de posición global	7,60
<b>9</b>	Dispositivos internos ubicados en posiciones accesibles	7,51
<b>10</b>	Tracción en las 4 llantas	7,33
<b>11</b>	Alcance de tele operación	6,87
<b>12</b>	Sensor de detección de objetos	6,41
<b>13</b>	Baterías capaces de abastecer todo el sistema	4,67

### **3.2. Factibilidad y planeación**

### 3.2.1. Estructura funcional

Una vez obtenidos los resultados de la matriz QFD, deben ser englobados dentro de módulos presentados en la Tabla 5, con lo cual se forma una estructura funcional, por medio de la cual se logra cumplir con las necesidades del producto en forma ordenada. Es necesario presentar diversas soluciones, seleccionando así la más adecuada en base a una tabla de ponderación comparativa, con el fin de escoger la mejor opción que se ajuste a las necesidades planteadas.

**Tabla 5**

*Módulos para diseño*

#	Módulo	Subsistemas	Funciones	Hitos a cumplir
1	Locomoción	Transmisión	Selección de motores	4;5;10
			Tracción en las 4 ruedas	
		Tipo de transmisión		
		Ruedas	Capacidades para terrenos irregulares	
		Diseño de ejes	Análisis de cargas	
2	Estructura	Diseño del chasis	Estructura resistente e impermeable	1;2;6;9
			Ubicación de elementos internos	
			Ensamble y desensamble	
3	Ubicación, procesamiento y adquisición de datos	N/A	Odometría	7;8
			Posicionamiento global	
			Adquisición de datos	
4	Comunicación	N/A	Envío y recepción de señales	11
5	Suministro de energía	Potencia	Suministro de energía a los motores	13
		Control	Suministro de energía para CPU	
			Suministro de energía para cámara a bordo	
			Suministro de energía para elementos de comunicación	
			Suministro de energía para sensores	
6	Monitoreo y seguridad	Cámara abordo	Video en tiempo real	1;3;4;5;6
		Interfaz	Comunicación humano - máquina	
7	Navegación Reactiva	N/A	Procesamiento de los datos enviados por los sensores de proximidad	12
			Conjunto de Comportamientos	

## 3.3. Módulo 1. Locomoción

El modulo se encarga de los aspectos y elementos mecánicos que permitirán desplazarse a la plataforma robótica móvil, dentro de terrenos irregulares.

### 3.3.1. Subsistema 1. Transmisión

A continuación se muestra las diferentes alternativas de motores, de las cuales se seleccionara el más adecuado acorde a la necesidad.

#### 3.3.1.1. Alternativas para la selección de motores.

##### 3.3.1.1.1 Motores DC con caja reductora

Motor con gran variedad de especificaciones de trabajo, posea gran torque debido a su caja reductora.

#### **Ventajas**

- Funcionalidad a diferentes voltajes
- Fácil control
- Flexibilidad de curvas par-velocidad

#### **Desventajas**

- Necesidad de sensores para medir velocidad y posición.
- Difícil mantenimiento
- Costo según la potencia.

##### 3.3.1.1.2 Motor paso a paso

El motor gira un determinado ángulo en función de las señales eléctricas que se aplique a cada una de sus bobinas, por medio de las terminales de control.

**Ventajas**

- No necesita de sensores para medir posición y velocidad.
- Resolución de pasos de 1° a 180°.
- Variedad de tamaño.

**Desventajas**

- Reducción del par al aumentar la velocidad
- Secuencia programada para realizar el control.
- Adquisición difícil.
- Control en lazo abierto.

**3.3.1.1.3 Servo motor**

Posee la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro del rango de operación propio, manteniéndose en la misma. Se puede encontrar servo motores AC y DC, para el caso se tomara como referencia los servomotores DC.

**Ventajas**

- Ubicación con precisión
- Fácil de controlar.
- Fácil montaje.

**Desventajas**

- Mayor tamaño acorde a la capacidad de torque.
- Giro constante de 360° restringido.

- Adquisición difícil.

#### 3.3.1.1.4. Servo motor Smart motor

Posee la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro del rango de operación propio, manteniéndose en la misma. Posee la capacidad de ser programado y varios tipos de control tales como, posición, velocidad, torque.

#### **Ventajas**

- Ubicación con precisión
- Fácil de controlar.
- No requiere drivers adicionales para su control.
- Capacidad de ser programado
- Alto torque
- Salida de 5V 500mA
- Encoder integrado
- Giro constante
- Capacidad de envío y recepción de datos

#### **Desventajas**

- Mayor tamaño acorde a la capacidad de torque.
- Alto consumo energético
- Costo elevado
- Cables especializados

### 3.3.1.2. Evaluación y selección de alternativas

**Tabla 6**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de motores*

<b>Criterio</b>	<b>Potencia</b>	<b>Control</b>	<b>Adquisición</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Potencia</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Control</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Adquisición</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

Soluciones establecidas para motores módulo 1

Solución 1	Motor DC con caja reductora
Solución 2	Motor paso a paso
Solución 3	Servo motor
Solución 4	Servo motor Smart motor

**Tabla 7**

*Ponderación de potencia en motores para las soluciones del módulo 1*

<b>Potencia</b>						
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	0,00	3,00	0,50
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	0,00	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 4</b>	1,00	1,00	1,00	-	4,00	0,67
			Suma		6,00	1,00

**Tabla 8***Ponderación de control en motores para las soluciones del módulo 1*

<b>Control</b>						
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	0,00	3,00	0,50
<b>Solución 4</b>	1,00	1,00	1,00	-	4,00	0,67
			Suma		6,00	1,00

**Tabla 9***Ponderación de adquisición en motores para las soluciones del módulo 1*

<b>Adquisición</b>						
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	0,50	3,50	0,58
<b>Solución 4</b>	1,00	1,00	0,50	-	3,50	0,58
			Suma		6,50	1,08

**Tabla 10***Conclusión para la selección de motores módulo 1*

<b>Conclusión</b>					
<b>Criterio</b>	Potencia	Control	Adquisición	$\sum$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,25	0,11	0,03	0,39	3
<b>Solución 2</b>	0,08	0,06	0,06	0,19	4
<b>Solución 3</b>	0,17	0,17	0,10	0,43	2
<b>Solución 4</b>	0,33	0,22	0,10	0,65	1

Se selecciona los motores Smart motor serie 34505D como actuadores para la locomoción de la plataforma robótica móvil, puesto que ofrecen múltiples ventajas entre las principales son: motores de alto torque, no requieren de drivers adicionales para funcionar, poseen giro constante, poseen un encoder integrado

con una resolución de 8000 count/rev, además cuentan con la posibilidad de suministra una fuente de 5V a 50mA.

### 3.3.1.2.1 Torque necesario.

Para realizar el dimensionamiento de los motores seleccionados, se debe considerar las cargas que afectan a la plataforma móvil, la velocidad angular, la velocidad lineal, las revoluciones por minuto, tipo de tracción, delantera, trasera o en las cuatro llantas. Puesto que estos parámetros influirán directamente en las ecuaciones que serán utilizadas. El primer paso será plantear los valores de las variables antes mencionadas con las cuales obtener el torque necesario para que la plataforma robótica móvil pueda moverse. La fuerza necesaria para rodar esta dada por la ecuación 3-1:

$$Fr = peso \times a \times \mu \quad (3-1)$$

La potencia necesaria esta dada por la ecuación 3-2

$$P_{util} = Fr \times v \quad (3-2)$$

Para calcular la potencia necesaria se debe involucra la eficiencia del motor ecuación 3-3

$$P_{necesaria} = P_{util}/\eta \quad (3-3)$$

El par motor en el eje del motor está dado por la ecuación 3-4

$$T = P_{necesario}/\omega \quad (3-4)$$

La fuerza necesaria para mover un vehículo con tracción en las cuatro ruedas está definida por la ecuación 3-5:



$$peso \times \tan(\theta) = F \times f = \mu \times peso \quad (3-6)$$

Para obtener valores numéricos debemos plantear las condiciones de las variables

Parámetros a utilizar:

$$\mu = 0.3$$

$$eficiencia \text{ del motor } n = 90\%$$

$$radio = 200 \text{ mm}$$

$$Peso = 80Kg$$

$$rpm = 330$$

$$\omega = \frac{330 \times rpm \times \pi}{30} = 3.619 \frac{rad}{s}$$

$$v = radio \times \omega = 0.7 \frac{m}{s}$$

Para hallar la fuerza de rozamiento utilizamos la ecuación 3-1.

$$Fr = 80 \times 9.8 \times 0.3 = 235.2 \text{ N}$$

Calculamos la potencia útil y la potencia necesaria con las ecuaciones 3-2 y 3-3 respectivamente

$$P_{util} = 235.2 \times 0.7 = 164.64 \text{ W}$$

$$P_{necesaria} = \frac{164.64}{0.9} = 182.9 \text{ W}$$

Una vez obtenidas la potencia útil y la potencia necesaria utilizamos la ecuación 3-4 para calcular el torque que se necesitara por rueda.

$$T = \frac{271.49}{4(3.619)} = 12.63 \text{ Nm}$$

Si consideramos ahora una pendiente de  $24^\circ$  se utilizara la ecuación 3-6, para hallar la fuerza necesaria para mover la plataforma móvil.

$$80 \times 9.8 \times \tan(24^\circ) = F_{xf}$$

$$F_{xf} = 349 \text{ N}$$

Utilizando la fuerza  $F_{xf}$  para el cálculo del torque necesario, haciendo uso de las ecuaciones 3-2, 3-3,3-4 respectivamente obtenemos lo siguiente

$$P_{util} = 349 \times 0.7 = 244.342 \text{ W}$$

$$P_{necesaria} = \frac{244.342}{0.9} = 271.49 \text{ W}$$

$$T = \frac{271.49}{4(3.619)} = 18.75 \text{ Nm}$$

Se concluye que es necesario un torque de 18.8 Nm para que la plataforma robótica móvil logre superar cuestas de máximo  $24^\circ$  con un peso de 80kg, a una velocidad angular de 3.62 rad/s, a 330 rpm, con una eficiencia de los motores del 90%.

### 3.3.1.3. Alternativas para la selección del tipo de conducción

#### 3.3.1.3.1. Sistema ackerman

Es el sistema estándar de conducción de los vehículos, posee dos ruedas impulsoras en la parte de atrás y dos ruedas guías en la parte frontal

#### Ventajas

- No necesita sincronización de los motores

- Facilidad de control
- La velocidad lineal y la angular son independientes

### **Desventajas**

- No puede girar en su propio eje
- Las ruedas traseras experimentan deslizamiento en curvas

#### 3.3.1.3.2 Sistema de rueda individual motriz

Es el concepto más simple de diseñar, consta de tres ruedas, todos los movimientos son realizados por una única rueda, necesitando dos ruedas no móviles para soportarse.

### **Ventajas**

- Diseño simple
- Facilita la cinemática
- No requiere sincronizar los motores
- Menor número de sensores

### **Desventajas**

- No posee movimiento omnidireccional

#### 3.3.1.3.3 Sistema Diferencial

Posee dos motores uno en cada rueda, las cuales se manejan independiente mente, desde el punto de vista mecánico es más sencillo que el sistema de rueda individual motriz, mientras que el control de movimiento es

más complejo que el de rueda individual motriz, así mismo requiere de ruedas de soporte una o dos, requiere de sincronización de los motores para avanzar en línea recta.

### Ventajas

- Gran maniobrabilidad
- Gira sobre su propio eje
- Evita des alineamiento de las ruedas
- Implementación media

### Desventajas

- Complejidad de control de movimiento
- Necesidad de sincronizar los motores
- Mayor número de sensores

#### 3.3.1.4. Evaluación y selección de alternativas

**Tabla 11**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de tipo de conducción*

<b>Criterio</b>	<b>Tracción</b>	<b>Maniobrabilidad</b>	<b>Implementación</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Tracción</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Maniobrabilidad</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Implementación</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

Soluciones establecidas para el tipo de conducción módulo 1

Solución 1	Sistema Ackerman
Solución 2	Rueda individual motriz
Solución 3	Sistema diferencial

**Tabla 12**

*Ponderación de tracción en tipo de conducción para las soluciones del módulo 1*

<b>Tracción</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 13**

*Ponderación de maniobrabilidad en tipo de conducción para las soluciones del módulo 1*

<b>Maniobrabilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 14**

*Ponderación de implementación de tipo de conducción para las soluciones del módulo 1*

<b>Implementación</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 3</b>	1,00	0,50	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 15***Conclusión para la selección del tipo de conducción módulo 1*

<b>Conclusión</b>					
<b>Criterio</b>	Tracción	Maniobrabilidad	Implementación	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,17	0,08	0,03	0,28	2
<b>Solución 2</b>	0,08	0,08	0,07	0,24	3
<b>Solución 3</b>	0,25	0,17	0,07	0,49	1

La opción que cumple con los requisitos es el sistema diferencial, debido a las ventajas que ofrece al momento de plantear el modelo matemático del movimiento, así como su gran posibilidad de maniobrabilidad al poder de girar sobre su propio eje lo cual vuelve especialmente útil a esta configuración en espacios reducidos.

### 3.3.1.5. Alternativas para Tracción en las cuatro llantas.

#### 3.3.1.5.1 Uso de cuatro motores

Cada llanta posee un motor que transmite el movimiento individualmente

#### **Ventajas**

- Control individual de cada llanta
- Posibilidad de movimiento omnidireccional

#### **Desventajas**

- Consumo energético elevado
- Difícil sincronización

- Necesidad de mayor número de sensores.
- Incremento del peso.

#### 3.3.1.5.2 Transmisión por banda plana

La potencia generada desde un motor es transmitida a través de un sistema de poleas, proporcionando tracción a dos ruedas.

#### **Ventajas**

- Uso de un solo motor para activar dos o más ruedas
- Posibilidad de transmitir potencia a largas distancias.
- Absorben cargas de impacto
- Los ejes no necesitan estar en ángulos rectos
- Silenciosas
- Eficiencia a altas velocidades

#### **Desventajas**

- Deslizamiento
- Necesidad de tensores
- Pérdida de potencia
- Velocidad angular entre ejes no es constante, ni exactamente igual a la relación del diámetro de las poleas

#### 3.3.1.5.3 Transmisión por cadena

La potencia generada desde un motor es transmitida a través de un sistema de piñones, proporcionando tracción a dos ruedas

### **Ventajas**

- Uso de un solo motor para activar dos o más ruedas
- Posibilidad de transmitir potencia a largas distancias.
- Absorben cargas de impacto
- No existe pérdida de potencia por deslizamiento
- Relación constante
- Vida útil larga
- Fácil mantenimiento
- Durabilidad

### **Desventajas**

- Genera ruido

### **3.3.1.6. Evaluación y selección de alternativas**



**Tabla 16**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de tracción en las cuatro llantas*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Maniobrabilidad</b>	<b>Implementación</b>	<b>Disponibilidad</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,10
<b>Maniobrabilidad</b>	1,00	-	0,50	0,00	2,50	0,25
<b>Implementación</b>	1,00	0,50	-	0,00	2,50	0,25
<b>Disponibilidad</b>	1,00	1,00	1,00	-	4,00	0,40
				Suma	10,00	1,00

Soluciones establecidas para la transmisión en as cuatro llantas módulo 1

Solución 1	Cuatro motores
Solución 2	Banda
Solución 3	Cadena

**Tabla 17**

*Ponderación de costo económico para la implementación de la transmisión en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Costo</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 18.**

*Ponderación de Maniobrabilidad para transmisión en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Maniobrabilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,50	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	0,00	0,50	-	1,50	0,25
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 19**

*Ponderación de implementación para la transmisión en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Implementación</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 3</b>	1,00	0,50	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 20**

*Ponderación Disponibilidad para la implementación de la transmisión en las cuatro ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Disponibilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 3</b>	1,00	0,50	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 21**

*Conclusión para la selección de transmisión en las cuatro llantas módulo 1*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Maniobrabilidad</b>	<b>Implementación</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Orden de Selección</b>
<b>Solución 1</b>	0,02	0,13	0,04	0,07	0,25	3
<b>Solución 2</b>	0,03	0,06	0,10	0,17	0,37	2
<b>Solución 3</b>	0,05	0,06	0,10	0,17	0,38	1

La opción para obtener tracción en las cuatro ruedas es el uso de la transmisión por cadena puesto que ahorra espacio, reduce los costes de energía, es duradera, no permite deslizamientos, absorbe vibraciones, el costo de mantenimiento es bajo. A continuación se presenta el diseño de la transmisión por cadena.

### 3.3.1.6.1. Diseño de transmisión por cadena

Parámetros: Transmisión 1:1 potencia de entrada 0.364hp (271.5 W) a 330 rpm impacto moderado, día de trabajo de 4 horas, temperaturas frías, distancia entre centros 600mm, factor de seguridad 2.

Para el diseño se debe seleccionar las siguientes constantes, Las cuales se pueden encontrar en (Budynas & Nisbett, 2012).:

Ks factor de servicio para impacto pesado 1.3

k1 factor de corrección de dientes se seleccionara un piñón de 17 dientes por lo tanto k1=1

k2 factor de torones múltiples, se utilizara torón simple por lo tanto k2=1

Hallando la potencia generada utilizando la ecuación 3-7, podemos consultar en la Tabla 22 e identificar el número de cadena apropiada para el requerimiento.

$$H_{tab} = \frac{nd \times K_s \times H_{nom}}{k_1 \times k_2} \quad (3-7)$$

$$H_{tab} = \frac{2 \times 1.3 \times 0.364}{1 \times 1} = 0.96hp$$

**Tabla 22**

Capacidad nominal de potencia de cadenas en paso único en torón sencillo de un piñón de 17 dientes

Velocidad de la Caterina, rpm	25	35	40	41	50	60
50	0,05	0,16	0,37	0,20	0,72	1,24
100	0,09	0,29	0,69	0,38	1,34	2,31
150	0,13	0,41	0,99	0,55	1,92	3,32
200	0,16	0,54	1,29	0,71	2,50	4,30
300	0,23	0,78	1,85	1,02	3,61	6,20
400	0,30	1,01	2,40	1,32	4,67	8,03
500	0,37	1,24	2,93	1,61	5,10	9,81
600	0,44	1,46	3,45	1,90	6,72	11,60
700	0,50	1,68	3,97	2,18	7,73	13,30
800	0,56	1,89	4,48	2,46	8,71	15,00
900	0,62	2,10	4,98	2,74	9,69	16,7
Tipo A	Tipo B					

Fuente: (Richard,G.B & Nisbett,J.K , 2008)

EL número de cadena que satisface nuestro requerimiento es el numero 41 paso 12.7 mm de tipo A, lubricación manual o por goteo. A continuación se calcula la longitud de la cadena utilizando la ecuación 3-8.

$$L = \frac{2 \times C}{p} + \frac{N1 + N2}{2} + \frac{(N1 - N2)^2}{4\pi^2 C/p} \quad (3-8)$$

$$L = \frac{2 \times 600}{12.7} + 17 = 112 \text{ pasos}$$

Multiplicando el  $L$  por el paso de la cadena se obtiene su longitud. Longitud de la cadena 1.42m

### 3.3.2. Subsistema 3. Ruedas

A continuación se muestra las diferentes alternativas de ruedas, de las cuales se seleccionara la más adecuada para sortear terrenos irregulares en este aspecto los diámetros más grandes son favorables, también se requiere que proporcionen un porcentaje de amortiguación, y ser de fácil reparación y mantenimiento.

#### 3.3.2.1. Alternativas para la selección de ruedas.

Dentro de las opciones existentes en el mercado tenemos las ruedas para caretila presentes en varios diámetros de los cuales el máximo es de 350mm, se pueden encontrar macizas o con cámara de aire, tienen una alta capacidad de carga entre 100 kg y 180 kg. Ruedas para podadora manual las cuales son sólidas y se puede encontrar diámetros entre 178mm y 254 mm con una capacidad de carga de 60 a 136 kg. Ruedas para bicicleta destaca su relación peso resistencia, con una capacidad de carga entre 90 y 136 kg, se puede encontrar una gran variedad de diámetros desde además tiene la posibilidad de cambiar la llanta con diferentes labrados para mejorar el desempeño en distintos terrenos.

#### 3.3.2.2. Evaluación y selección de alternativas

**Tabla 23**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de ruedas*

<b>Criterio</b>	<b>Variedad de diámetros</b>	<b>Labrado</b>	<b>Implementación</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b><math>\Sigma</math>+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Variedad de diámetros</b>	-	0,00	0,00	0,00	1,00	0,11
<b>Labrado</b>	1,00	-	1,00	0,00	3,00	0,33
<b>Implementación</b>	1,00	0,00	-	1,00	2,00	0,22
<b>Mantenimiento</b>	1,00	1,00	0,00	-	3,00	0,33
				<b>Suma</b>	<b>9,00</b>	<b>1,00</b>

Soluciones establecidas para ruedas módulo 1

Solución 1	Rueda de carretilla
Solución 2	Rueda para podadora manual
Solución 3	Llanta de bicicleta

**Tabla 24**

*Ponderación de variedad de diámetros de ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Variedad de diámetros</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 25**

*Ponderación de tipo de labrado de ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Labrado</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 26**

*Ponderación de implementación de ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Implementación</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 3</b>	1,00	0,50	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 27***Ponderación de mantenimiento de ruedas para las soluciones del módulo 1*

<b>Mantenimiento</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 28***Conclusión para la selección de ruedas módulo 1*

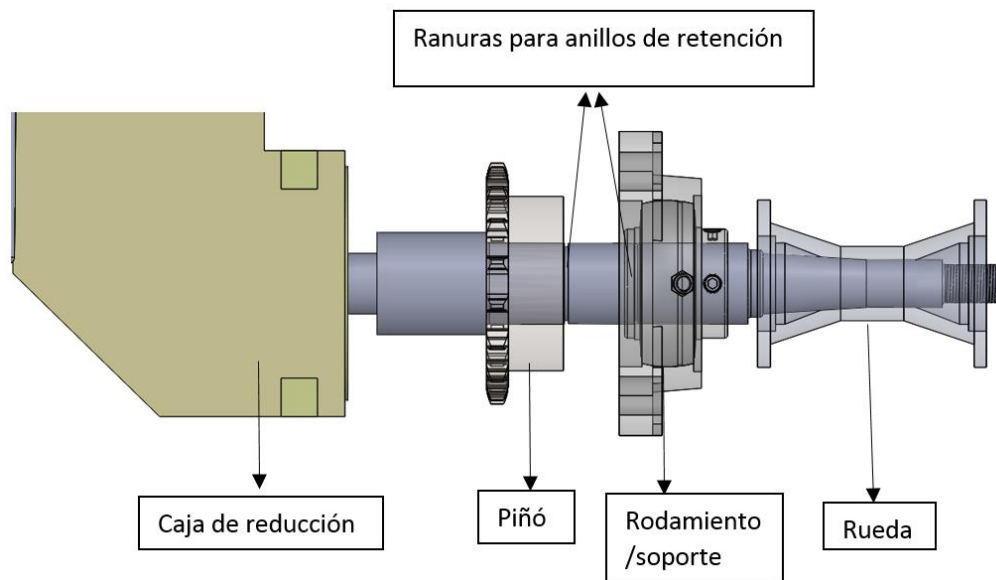
<b>Criterio</b>	<b>Variedad de diámetros</b>	<b>Labrado</b>	<b>Implementación</b>	<b>Mantenimiento</b>	$\Sigma$	<b>Orden de Selección</b>
<b>Solución 1</b>	0,03	0,08	0,04	0,08	0,23	3
<b>Solución 2</b>	0,03	0,08	0,09	0,08	0,29	2
<b>Solución 3</b>	0,06	0,17	0,09	0,17	0,48	1

La opción para la ruedas es la rueda de bicicleta debido a su relación peso resistencia, además se puede encontrar una gran variedad de diámetros, mientras mayor sea el diámetro mayor posibilidad de sortear obstáculos como baches o gradas tendrá la plataforma móvil, es posible cambiar el labrado de las llantas para conseguir una mejor adherencia en distintos terrenos, otra característica importante es que al tener un tubo lleno de aire proporciona amortiguación en caso de impactar con algún bache.

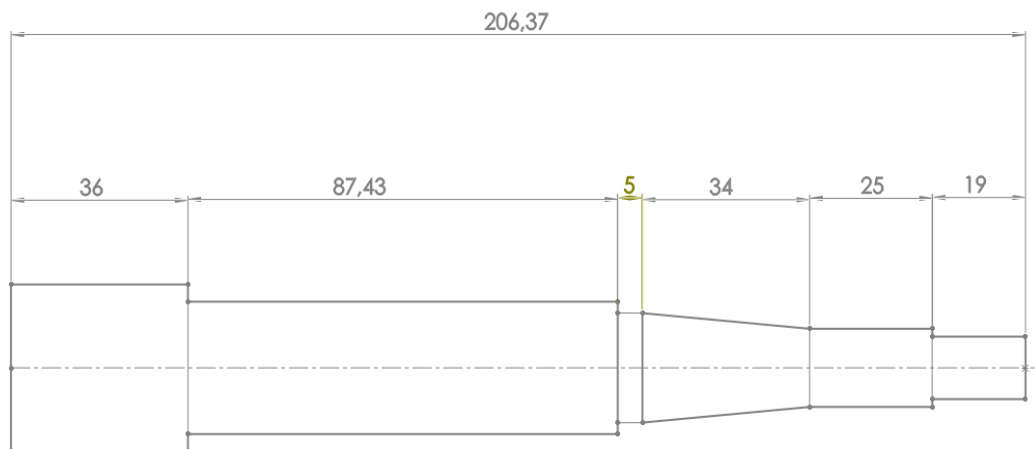
### 3.3.3. Subsistema 2. Diseño de ejes

#### Esquema del eje a

El primer paso para el diseño de los ejes es identificar los elementos que serán acoplados al mismo, definir su forma y longitudes. En la *Figura 33* se muestra los elementos que serán acoplados al eje a, la *Figura 34* muestra las longitudes básicas del eje, así como un esquema básico de su forma.



**Figura 33** Distribución de los elementos en el eje a



**Figura 34** Forma y dimensiones básicas para el diseño del eje a

### Cálculo de las fuerzas que soporta el eje



Fuerza producida por el piñón

Datos:

$$p = 12.7 \text{ mm}$$

$$N = 17$$

$$n = 330 \text{ rpm}$$

$$H = 0.2714 \text{ kW}$$

Calculamos el diámetro del piñón mediante la ecuación 3-9.

$$D = \frac{p}{\sin\left(\frac{180}{N}\right)} \quad (3-9)$$

$$D = 57.1 \text{ mm}$$

Fuerza tangencial ejercida por el piñón se utiliza la ecuación 3-10.

$$W_t = \frac{60000H}{\pi D n} \quad (3-10)$$

$$W_t = 0.275 \text{ kN}$$

Fuerza ejercida por la llanta

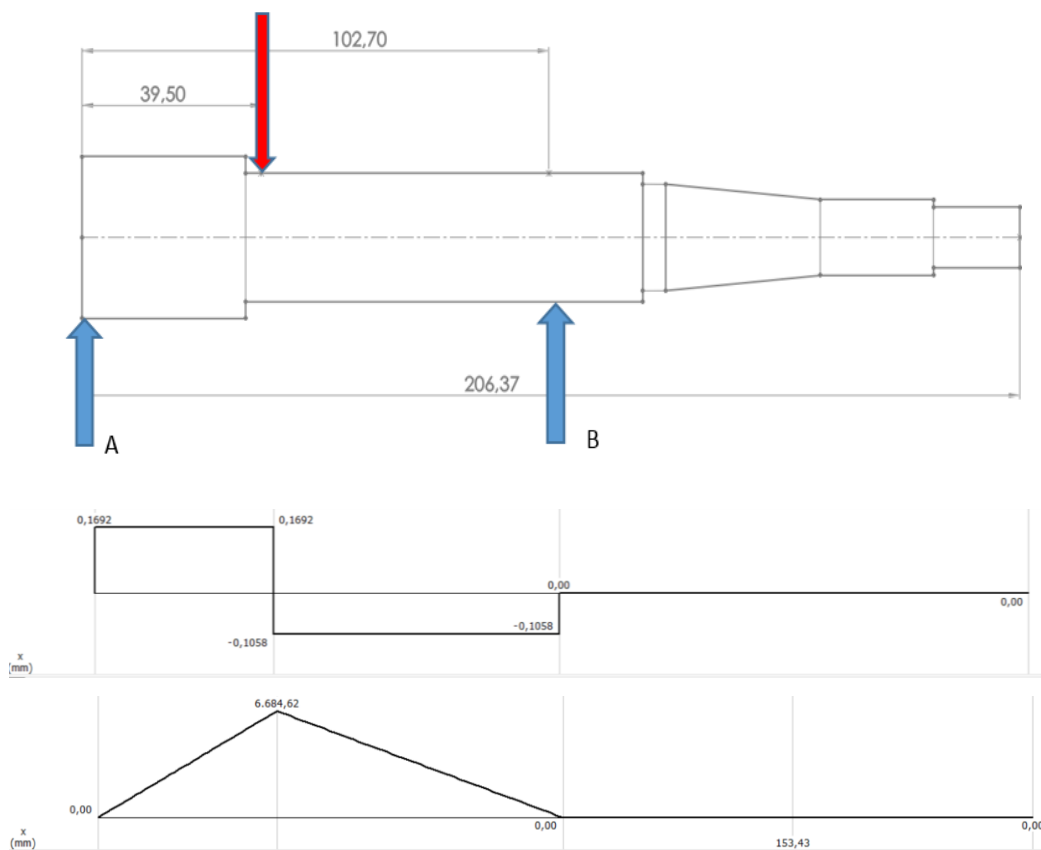
La fuerza ejercida por la llanta será el peso total de la estructura dividido para 4 por lo tanto

$$F_r = 196 \text{ N}$$

**Gráficos de cortante y momento flector**

Para determinar las reacciones producidas por las cargas ejercidas en el eje, así como los momentos flectores críticos, se realizara los gráficos de cargas, cortante y momento flector, en los planos  $x, y$  y  $x, z$ , ver *Figura 35, Figura 36*, con estos datos se procederá con el análisis estático, el análisis de fatiga y la aplicación del criterio de falla de Soderberg para determinar las dimensiones de los diámetros que requiere el eje para cumplir con las prestaciones.

Plano  $xy$



**Figura 35** Gráficos en el plano  $xy$  de carga, Cortante (kN) , momento flector( Nmm), eje a

Se obtiene las siguientes reacciones en los apoyos a partir de la sumatoria de fuerzas y momentos presentes en el eje:

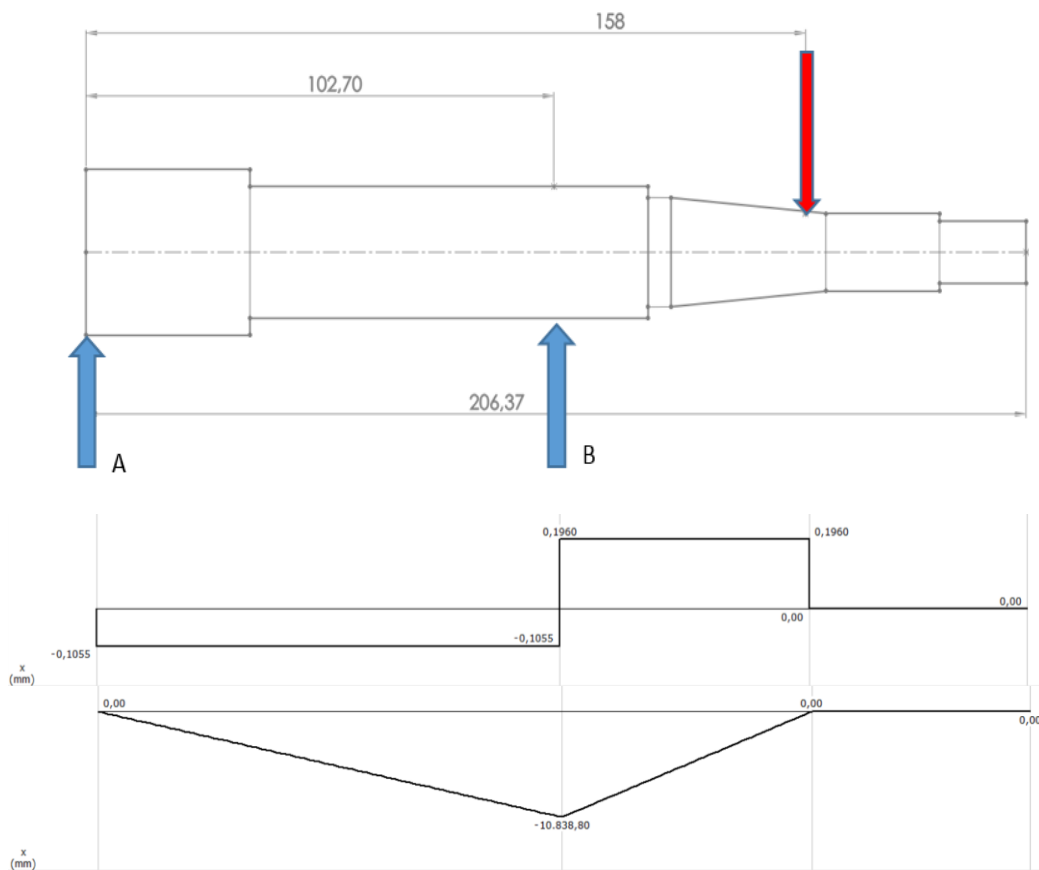
$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$A_y = 0.17 \text{ kN}$$

$$B_y = 0.11 \text{ kN}$$

Plano  $xz$



**Figura 36** Gráficos en el plano  $xz$  de carga, Cortante (kN), momento flector (Nmm), eje  $a$

Se obtiene las siguientes reacciones en los apoyos a partir de la sumatoria de fuerzas y momentos presentes en el eje:

$$A_z = 0.11 \text{ kN}$$

$$B_z = 0.30 \text{ kN}$$

De los gráficos se obtiene los valores máximos de los momentos

Momentos máximos

$$M_1 = 6684.62 \text{ Nmm}$$

$$M_2 = -10838.8 \text{ Nmm}$$

Torque máximo y momento crítico

$$T = 18800 \text{ Nmm}$$

$$M_c = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

$$M_c = 1.273 \times 10^4 \text{ Nm}$$

### **Selección del material**

La selección del material es un proceso iterativo, se empieza seleccionando uno de los materiales recomendados para ejes, las propiedades mecánicas más relevante para el diseño son el esfuerzo a la tensión  $S_u$ , y el esfuerzo a la fluencia  $S_y$ , después de realizar el diseño, este parámetro puede cambiar para ajustarlo a las necesidades de prestaciones y dimensiones requeridas. El material seleccionado para el diseño del eje es un acero AISI 4340 con las siguientes propiedades mecánicas.

$$S_u = 1720 \text{ MPa}$$

$$S_y = 1590 \text{ MPa}$$

### Análisis estático

Se realiza el análisis estático de los esfuerzos que afectan al eje para obtener una primera aproximación del diámetro crítico del eje, con el cual se partirá para aplicar teorías de falla que nos entreguen una dimensión acorde al requerimiento.

Se calcula el esfuerzo equivalente producido por el torque y el momento crítico ecuación 3-11.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \quad (3-11)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{32M_c}{\pi D^3}\right)^2 + \left(\frac{32T}{\pi D^3}\right)^2}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{4.044 \times 10^5}{D^3}$$

Se aplica La ecuación 3-12 del factor de seguridad para la fluencia, para halla un valor estimado del diámetro del eje el cual será usado en la ecuación para hallar el factor de tamaño, utilizado en el criterio de Soderberg. Factor de seguridad  $Fs = 3$

$$\frac{S_y}{Fs} = \sigma_{eq} \quad (3-12)$$

Se reemplaza el esfuerzo equivalente y se despeja el Diámetro

$$D = \sqrt[3]{\frac{\sigma_{eq} \times Fs}{S_y}}$$

$$D = 9.138 \text{ mm}$$

### Análisis de fatiga

Se calcula los esfuerzos máximos ecuación 3-13 y mínimo ecuación 3-14, así como los pares de torsión máximo ecuación 3-15 y mínimo ecuación 3-16.

$$\sigma_{max} = \frac{32 M_c}{\pi D^3} = \frac{1.297 \times 10^5}{D^3} \quad (3-13)$$

$$\sigma_{min} = -\frac{32 M_c}{\pi D^3} = -\frac{1.297 \times 10^5}{D^3} \quad (3-14)$$

$$\tau_{max} = \frac{16 T}{\pi D^3} = -\frac{9.575 \times 10^5}{D^3} \quad (3-15)$$

$$\tau_{min} = -\frac{16 T}{\pi D^3} = -\frac{9.575 \times 10^5}{D^3} \quad (3-16)$$

Se calcula los esfuerzos medio  $\sigma_m$  ecuación 3-17 y alternante  $\sigma_a$  ecuación 3-18.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3-17)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3-18)$$

$$\sigma_m = 0$$

$$\sigma_a = \frac{1.297 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula los pares de torsión medio  $\tau_m$  ecuación 3-19 y alternante  $\tau_a$  ecuación 3-20.

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad (3-19)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad (3-20)$$

$$\tau_m = 0$$

$$\tau_a = \frac{9.575 \times 10^5}{D^3}$$

Se selecciona los factores de concentración de esfuerzo debido a cambio de sección  $k_t = 1$ ,  $k_{f1} = 1.8$ , debido a chavetero  $k_{f2} = 2.2$ , ver. Los cuales se pueden encontrar en (Budynas & Nisbett, 2012).

Se calcula el factor total de concentración de esfuerzos

$$k_f = k_{f1} \times k_{f2} = 3.982$$

Se calcula los esfuerzos medio resultante  $\sigma_{mr}$ , y alternante resultante  $\sigma_{ar}$

$$\sigma_{mr} = k_t \times \sigma_m = 0$$

$$\sigma_{ar} = k_t \times \sigma_a = \frac{5.165 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula los pares de torsión medio resultante  $\tau_{mr}$  y alternante resultante  $\tau_{ar}$

$$\tau_{mr} = k_t \times \tau_m = 0$$

$$\tau_{ar} = k_f \times \tau_a = \frac{3.813 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula el esfuerzo equivalente medio ecuación 3-21 y alternante ecuación 3-22

$$\sigma_{eqmr} = \sqrt{(\sigma_{mr})^2 + 4(\tau_{mr})^2} = 0 \quad (3-21)$$

$$\sigma_{eqar} = \sqrt{(\sigma_{ar})^2 + 4(\tau_{ar})^2} \quad (3-22)$$

$$\sigma_{eqar} = \frac{9.21 \times 10^5}{D^3}$$

### Se aplica el criterio de Soderberg

Se calcula  $k_b$  el factor de tamaño con la ecuación 3-23 haciendo uso de diámetro D calculado anteriormente, el factor de carga  $k_c = 1$  debido a que el eje está sometido a flexión, y el factor de superficie  $k_s$  obtenido de ecuación 3-23, los factores  $a = 4.51$  y  $b = -0.265$  debido a que la superficie es maquinada, con una resistencia ultima  $S_{ut} = 895 \text{ Mpa}$ . Los valores obtenidos para los factores de modificación por condición superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad, se encuentran tabulados en (Budynas & Nisbett, 2012).

$$k_b = 0.869 * D^{-0.097} = 0.686 \quad (3-22)$$

$$k_c = 1$$

$$k_s = a(S_{ut})^b \quad (3-23)$$

$$k_s = 0.74$$



Se calcula el límite de resistencia a la fatiga mediante la ecuación 3-24, con un factor de seguridad  $F_s = 6$ , para una confiabilidad del 90%,  $k_{conf} = 0.897$

$$S_{ef} = 0.5S_u \times k_b \times k_c \times k_s \times k_{conf} \quad (3-24)$$

$$S_{ef} = 400.26$$

Se despeja el diámetro de la ecuación 3-25.

$$\frac{S_y}{F_s} = \sigma_{eqmr} + \frac{S_y}{S_{ef}} \times \sigma_{eqar} \quad (3-25)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{F_s}{S_y} \times \frac{S_y \times \sigma_{eqar}}{S_{ef}}}$$

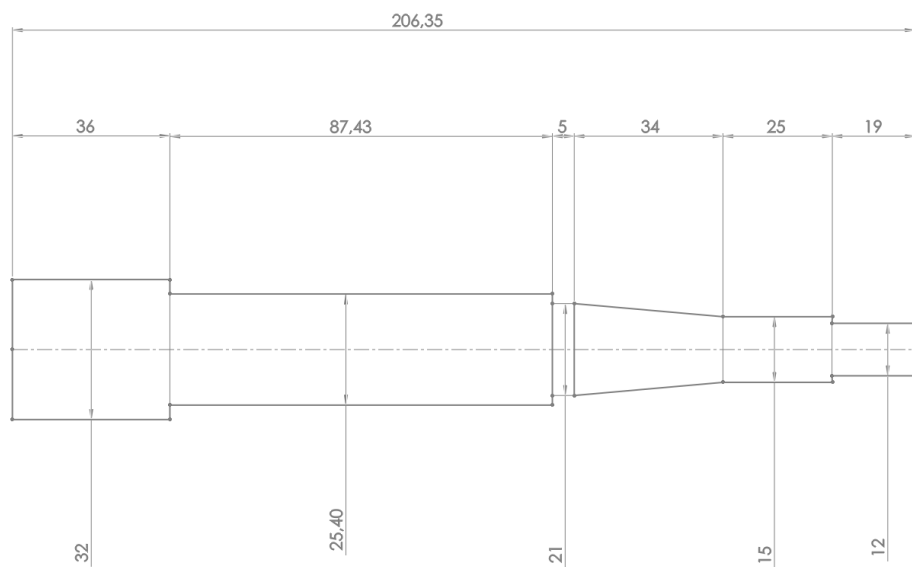
$$D = \sqrt[3]{\frac{F_s}{S_y} \times \frac{S_y \times \sigma_{eqar}}{S_{ef}}}$$

$$D = 23.99 \text{ mm}$$

Después de los cálculos realizados se concluye que el diámetro más crítico debe ser de 23.99 mm de diámetro, por motivos de estandarización se optara por 25.4mm, para hallar los demás diámetros se debe multiplicar o dividir según sea el caso por un factor de 1.2 a 1.5, los diámetros obtenidos se muestran en la Tabla 29 y el esquema de las dimensiones en la *Figura 37*.

**Tabla 29***Diámetros del eje a*

Diámetro	mm
D1	32
D2	25.4
D3	21
D4	15
D5	12

**Figura 37** Dimensiones en mm del eje a**Selección del pasador**

Datos para el pasador del piñón: Radio del eje  $r = 11 \text{ mm}$ , con lo cual del anexo # se selecciona el ancho de la cuña  $t = 6 \text{ mm}$  factor de seguridad  $Fs = 2$ , el material seleccionado debe ser de propiedades mecánicas menores que las del eje, para garantizar que sea la cuña el elemento que falle. Se selecciona un acero AISI

1020, con las siguientes propiedades mecánicas  $S_y = 470 \text{ MPa}$ ,  $S_u = 390 \text{ MPa}$ . Se calcula la fuerza ejercida sobre la cuña, ecuación 3-26, como se muestra en la *Figura 38*.

$$F = \frac{T}{r} \quad (3-26)$$

$$F = \frac{18800}{11} = 1.709 \times 10^3 \text{ N}$$

Se aplica la teoría de energía de distorsión TED

Se calcula  $S_{sy}$  la resistencia al cortante con la ecuación 3-26.

$$S_{sy} = 0.577S_y = 2.712 \text{ MPa} \quad (3-26)$$

$$S_{sy} = \frac{F}{t \times l} \quad (3-27)$$

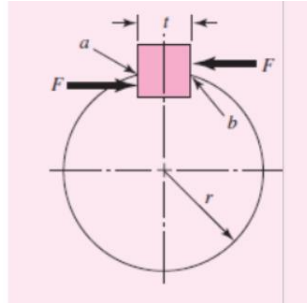
Se despeja la longitud del pasador de la ecuación 3-27.

$$l = \frac{F}{t \times S_{sy}} = 1.05 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Se analiza la longitud frente al aplastamiento ecuación 3-28.

$$\frac{S_y}{Fs} = \frac{F}{t \times \frac{l}{2}} \quad (3-28)$$

$$l = \frac{2F \times Fs}{t \times S_{sy}} = 2.424 \times 10^{-3} m$$



**Figura 38** Muestra la distribución de las fuerzas ejercidas en la cuña o pasador  
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

Se concluye que para el piñón es necesario un pasador de dimensiones *ancho* = 6mm, *largo* = 2.5mm, en Acero AISI 1020.

### Selección de cojinetes

Para la selección de los cojinetes se debe plantear algunas condiciones, que se puede encontrar en (Budynas & Nisbett, 2012) :

Se selecciona la vida recomendada para el cojinete,  $L_D = 10kh$ , maquinaria de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia. Se selección el tipo de aplicación,  $a_f = 1.5$ , maquinaria con impactos moderados.

Se calcula la fuerza total ejercida en el cojinete

$$F_D = \sqrt{Ay^2 + Az^2}$$

$$F_D = 0.32 \text{ kN}$$

Se calcula la carga que debe soportar el cojinete con la ecuación 3-29, con la cual se seleccionara el necesario de los catálogos anexo C.

$$C_{10} = af \times F_D \left( \frac{60L_D n_D}{60L_R n_R} \right)^{1/a} \quad (3-29)$$

$$C_{10} = af \times F_D \left( \frac{60(10000)(330)}{10^6} \right)^{1/a}$$

$$C_{10} = 2.794kN$$

Se concluye que se necesita un cojinete de bolas con una carga 3kN para una vida estimada de 10000h a una velocidad de 330 rpm con una confiabilidad del 90%, para aplicaciones de impacto moderado.

### Selección de anillo de retención

Para asegurar el piñón y la chumacera exterior, se necesitara un anillo de retención el cual esta seleccionado del catálogo de anillos de retención expuesto en el anexo D.

### Conclusión del diseño para el eje a

A continuación se muestra el resumen del diseño del eje a en la Tabla 30, el resumen de la selección de los cojinetes en la Tabla 31, y el resumen de la selección del pasador para el piñón en la Tabla 32, El plano detallado del eje se muestra en el anexo B.

**Tabla 30**

*Material y dimensiones del eje a*

Elemento	Material	Diámetro	mm	Sección	mm
Eje a	AISI 1075	D1	32	L1	36
		D2	25.4	L2	87.43
		D3	21	L3	5

CONTINUA



	D4-D5	19-15	L4	34
	D5	15	L5	25
	D6	12	L6	19

**Tabla 31**

*Características del cojinete seleccionado para el soporte del eje a*

Elemento	Serie	Carga(kN)	Soporte
Cojinete	Ucf205-16	3	Chumacera de pared

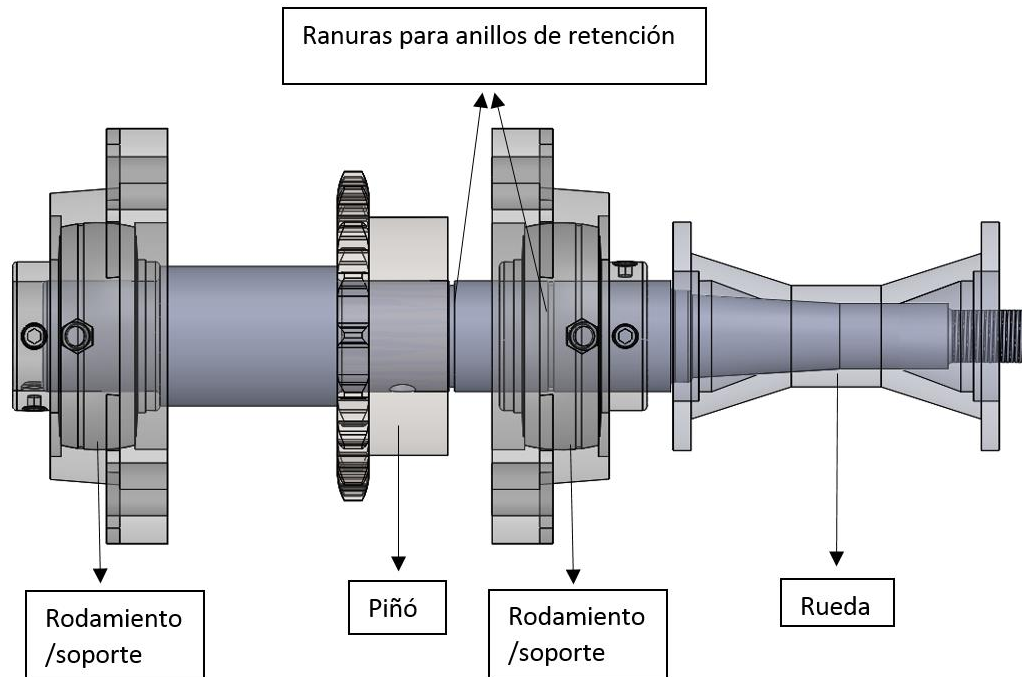
**Tabla 32**

*Material y dimensiones para el pasador del piñón*

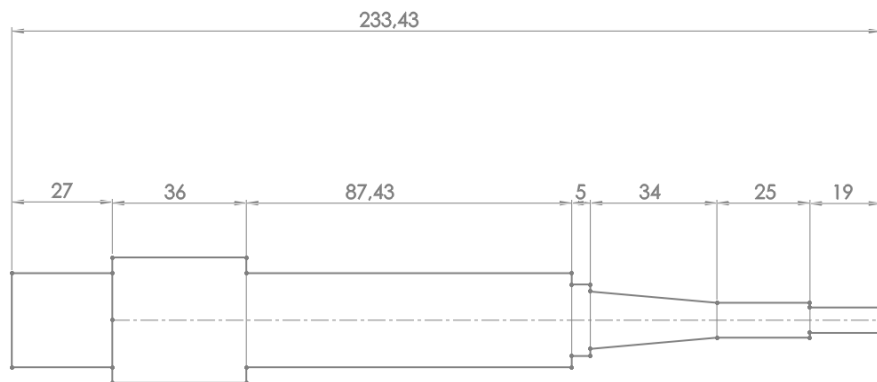
Elemento	Material	Largo mm	Diámetro mm
Pasador	AISI 1020	2,5	6

### Esquema del eje b

Se identifica los elementos que serán acoplados al eje, y se definir su forma y longitudes. En la *Figura 39* se muestra los elementos que serán acoplados al eje, la *Figura 40* muestra las dimensiones de longitud básicas del eje, así como un esquema básico de su forma.



**Figura 39** Distribución de los elementos en el eje b



**Figura 40** Forma y dimensiones básicas para el diseño del eje b

### Cálculo de las fuerzas que soporta el eje

Fuerza producida por el piñón

Datos:

$$p = 12.7 \text{ mm}$$

$$N = 17$$

$$n = 330 \text{ rpm}$$

$$H = 0.2714 \text{ kW}$$

Calculamos el diámetro del piñón con la ecuación 3-9.

$$D = 57.1 \text{ mm}$$

Fuerza tangencial ejercida por el piñón se utiliza la ecuación 3-10.

$$W_t = 0.275 \text{ kN}$$

Fuerza ejercida por la llanta

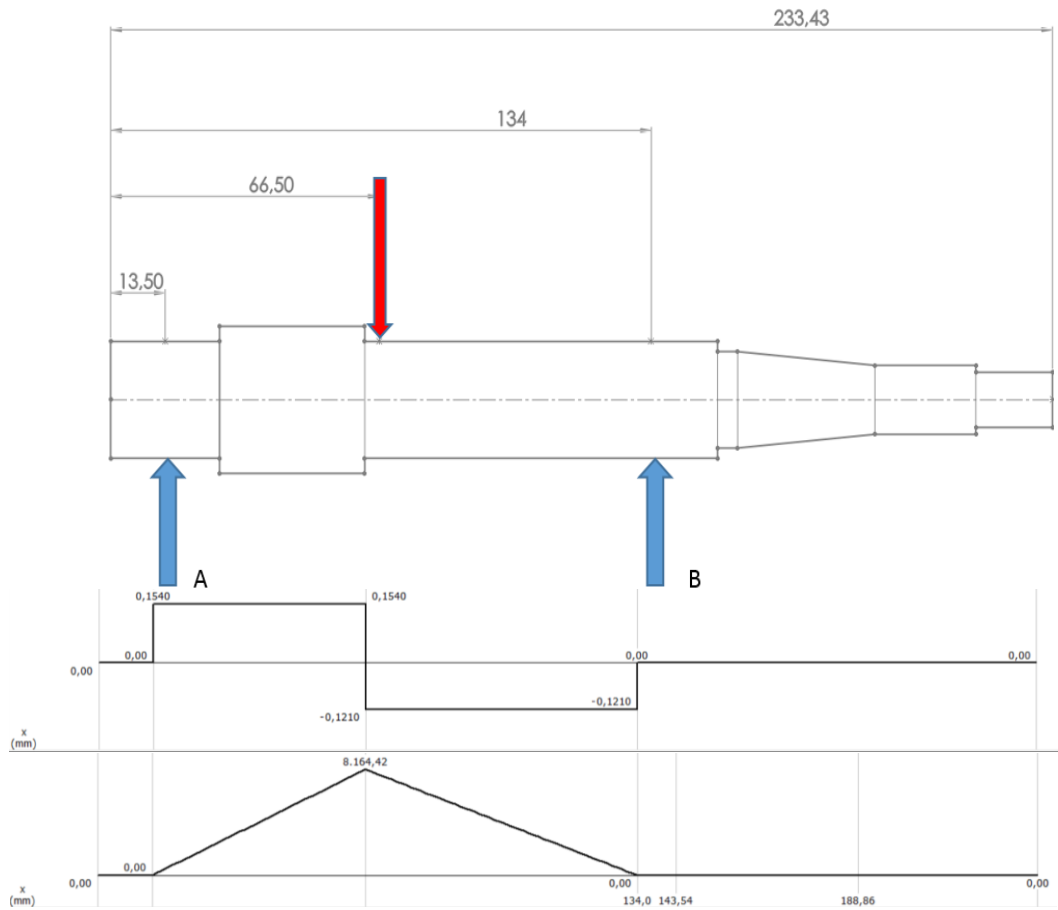
La fuerza ejercida por la llanta será el peso total de la estructura dividido para 4 por lo tanto

$$F_r = 196 \text{ N}$$

### **Gráficos de cortante y momento flector**

Plano  $xy$  *Figura 41.*





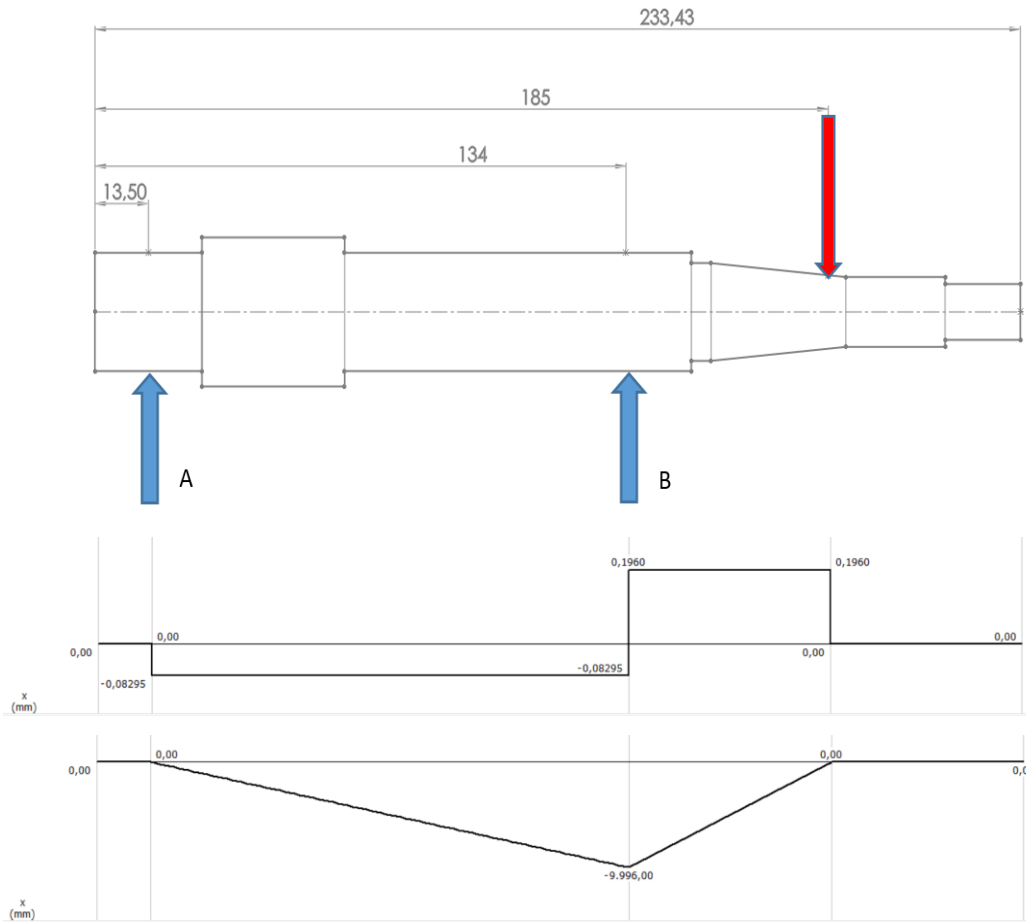
**Figura 41** Gráficos en el plano xy de carga, Cortante (kN) , momento flector( Nmm), eje b

Se obtiene las siguientes reacciones en los apoyos a partir de la sumatoria de fuerzas y momentos presentes en el eje:

$$A_y = 0,15 \text{ kN}$$

$$B_y = 0,12 \text{ kN}$$

Plano xz *Figura 42*



**Figura 42** Gráficos en el plano xz de carga, Cortante (kN) , momento flector( Nmm), eje b

Se obtiene las siguientes reacciones en los apoyos a partir de la sumatoria de fuerzas y momentos presentes en el eje:

$$A_z = 0.08 \text{ kN}$$

$$B_z = 0.28 \text{ kN}$$

De los gráficos obtenemos los valores máximos de los momentos

Momentos máximos

$$M1 = 8164.75 \text{ Nmm}$$

$$M2 = -9996 \text{ Nmm}$$

Torque máximo

$$T = 18800 \text{ Nmm}$$

$$Mc = \sqrt{M1^2 + M2^2}$$

$$Mc = 1.291 \times 10^4 \text{ Nm}$$

### Selección del material

AISI 4340

$$S_u = 1720 \text{ MPa}$$

$$S_y = 1590 \text{ MPa}$$

### Análisis estático

Se realiza el análisis estático de los esfuerzos que afectan al eje para obtener una primera aproximación del diámetro crítico del eje, con el cual se partirá para aplicar teorías de falla que nos entreguen una dimensión acorde al requerimiento.

Se calcula el esfuerzo equivalente producido por el torque y el momento crítico ecuación 3-11.

$$\sigma_{eq} = \frac{4.049 \times 10^5}{D^3}$$

Se aplica La ecuación 3-12 del factor de seguridad para la fluencia, para halla un valor estimado del diámetro del eje el cual será usado en la ecuación para hallar el factor de tamaño, utilizado en el criterio de Soderberg. Factor de seguridad  $F_s = 3$

$$D = \sqrt[3]{\frac{\sigma_{eq} \times F_s}{S_y}}$$

$$D = 9.142 \text{ mm}$$

### Análisis de fatiga

Se calcula los esfuerzos máximos ecuación 3-13 y mínimo ecuación 3-14, así como los pares de torsión máximo ecuación 3-15 y mínimo ecuación 3-16.

$$\sigma_{max} = \frac{32 M_c}{\pi D^3} = \frac{1.315 \times 10^5}{D^3}$$

$$\sigma_{min} = -\frac{32 M_c}{\pi D^3} = -\frac{1.315 \times 10^5}{D^3}$$

$$\tau_{max} = \frac{16 T}{\pi D^3} = -\frac{9.575 \times 10^5}{D^3}$$

$$\tau_{min} = -\frac{16 T}{\pi D^3} = -\frac{9.575 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula los esfuerzos medio  $\sigma_m$  ecuación 3-17 y alternante  $\sigma_a$  ecuación 3-18.

$$\sigma_m = 0$$

$$\sigma_a = \frac{1.315 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula los pares de torsión medio  $\tau_m$  ecuación 3-19 y alternante  $\tau_a$  ecuación 3-20.

$$\tau_m = 0$$

$$\tau_a = \frac{9.575 \times 10^5}{D^3}$$

Se selecciona los factores de concentración de esfuerzo debido a cambio de sección  $k_t = 1$ ,  $k_{f1} = 1.8$ , debido a chavetero  $k_{f2} = 2.2$ .

Se calcula el factor total de concentración de esfuerzos

$$k_f = k_{f1} \times k_{f2} = 3.982$$

Se calcula los esfuerzos medio resultante  $\sigma_{mr}$ , y alternante resultante  $\sigma_{ar}$

$$\sigma_{mr} = k_t \times \sigma_m = 0$$

$$\sigma_{ar} = k_t \times \sigma_a = \frac{5.235 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula los pares de torsión medio resultante  $\tau_{mr}$  y alternante resultante  $\tau_{ar}$

$$\tau_{mr} = k_t \times \tau_m = 0$$

$$\tau_{ar} = k_f \times \tau_a = \frac{3.813 \times 10^5}{D^3}$$

Se calcula el esfuerzo equivalente medio ecuación 3-21 y alternante ecuación 3-22

$$\sigma_{eqmr} = 0$$

$$\sigma_{eqar} = \frac{9.249 \times 10^5}{D^3}$$

### Se aplica el criterio de Soderberg

Se calcula  $k_b$  el factor de tamaño con la ecuación 3-23 haciendo uso de diámetro  $D$  calculado anteriormente, el factor de carga  $k_c = 1$  debido a que el eje está sometido a flexión, y el factor de superficie  $k_s$  obtenido de ecuación 3-23, los factores  $a = 4.51$  y  $b = -0.265$  debido a que la superficie es maquinada, con una resistencia última  $S_{ut} = 895 \text{ Mpa}$ . Los valores obtenidos para los factores de modificación por condición superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad, se encuentran tabulados en (Budynas & Nisbett, 2012).

$$k_b = 0.686$$

$$k_{c=1}$$

$$k_{s=0.74}$$

Se calcula el límite de resistencia a la fatiga mediante la ecuación 3-24, con un factor de seguridad  $F_s = 6$ , para una confiabilidad del 90%,  $k_{conf} = 0.897$

$$S_{ef} = 400.242$$

Se despeja el diámetro de la ecuación 3-25.

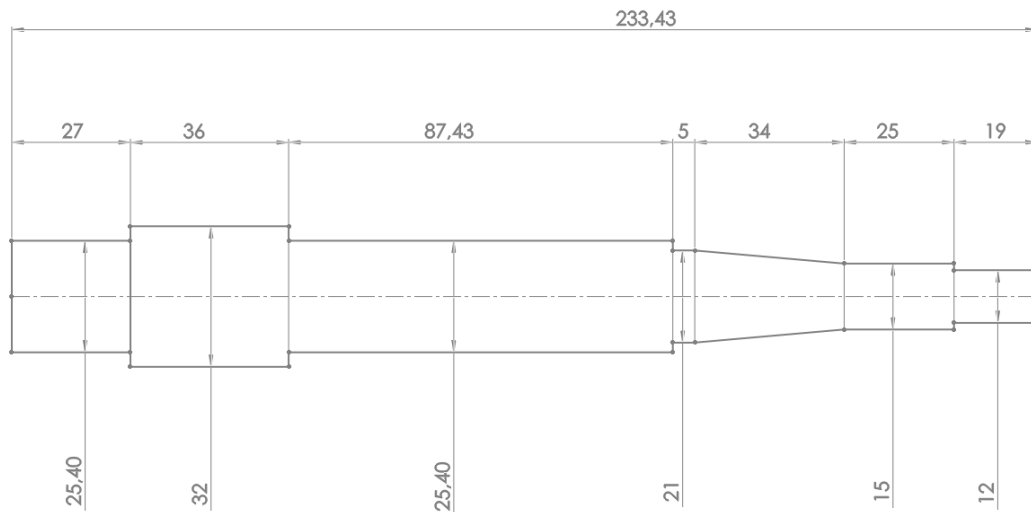
$$D = \sqrt[3]{\frac{F_s}{S_y} \times \frac{S_y \times \sigma_{eqar}}{S_{ef}}}$$

$$D = 24.024 \text{ mm}$$

Después de los cálculos realizados se concluye que el diámetro más crítico debe ser de 24 mm de diámetro, por motivos de estandarización se optara por 25.4mm, para hallar los demás diámetros se debe multiplicar o dividir según sea el caso por un factor de 1.2 a 1.5, los diámetros obtenidos se muestran en la Tabla 33 y el esquema de las dimensiones en la *Figura 43*.

**Tabla 33**  
*Diámetros del eje b*

Diámetro	mm
D1	25.4
D2	32
D3	25.4
D4	21
D5	15
D6	12



**Figura 43** Dimensiones en milímetros del eje b

### Selección de pasador

Datos para el pasador del piñón: Radio del eje  $r = 11 \text{ mm}$ , con lo cual del anexo I se selecciona el ancho de la cuña  $t = 6 \text{ mm}$  factor de seguridad  $Fs = 2$ , el material seleccionado debe ser de propiedades mecánicas menores que las del eje, para garantizar que sea el pasador el elemento que falle. Se selecciona un acero AISI 1020, con las siguientes propiedades mecánicas  $S_y = 470 \text{ MPa}$ ,  $S_u = 390 \text{ MPa}$ . Se calcula la fuerza ejercida sobre la cuña, ecuación 3-26, como se muestra en la *Figura 38*.

$$F = \frac{18800}{11} = 1.709 \times 10^3 \text{ N}$$

Se aplica la teoría de energía de distorsión TED

Se calcula  $S_{sy}$  la resistencia al cortante con la ecuación 3-26.

$$S_{sy} = 0.577S_y = 2.712 \text{ MPa}$$

Se despeja la longitud del pasador de la ecuación 3-27.

$$l = \frac{F}{t \times S_{sy}} = 1.05 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Se analiza la longitud frente al aplastamiento ecuación 3-28.

$$l = \frac{2F \times Fs}{t \times S_{sy}} = 2.424 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Se concluye que para el piñón es necesario un pasador de dimensiones *ancho* = 6mm, *largo* = 2.5mm, en Acero AISI 1020.



### Selección de cojinetes

Para la selección de los cojinetes se debe plantear algunas condiciones, que se puede encontrar en (Budynas & Nisbett, 2012) :

Se selecciona la vida recomendada para el cojinete,  $L_D = 10kh$ , maquinaria de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia. Se selección el tipo de aplicación,  $a_f = 1.5$ , maquinaria con impactos moderados.

Cojinete A

Se calcula la fuerza total ejercida en el cojinete A

$$F_D = \sqrt{Ay^2 + Az^2}$$

$$F_D = 0.17 \text{ kN}$$

Se calcula la carga que debe soportar el cojinete, con la cual se seleccionara el necesario de los catálogos anexo C.

$$C_{10} = a_f x F_D \left( \frac{60L_D n_D}{60L_R n_R} \right)^{1/a}$$

$$C_{10} = a_f x F_D \left( \frac{60(10000)(330)}{10^6} \right)^{1/a}$$

$$C_{10} = 1.486 \text{ kN}$$

Se concluye que se necesita un cojinete de bolas con una carga 2kN para una vida estimada de 10000h a una velocidad de 330 rpm con una confiabilidad del 90%, para aplicaciones de impacto moderado.

Cojinete B

Se calcula la fuerza total ejercida en el cojinete B

$$F_D = \sqrt{By^2 + Bz^2}$$

$$F_D = 0.305 \text{ kN}$$

Se calcula la carga que debe soportar el cojinete con la ecuación 3-29, con la cual se seleccionara el necesario de los catálogos anexo C.

$$C_{10} = af \times F_D \left( \frac{60(10000)(330)}{10^6} \right)^{1/a}$$

$$C_{10} = 2.663 \text{ kN}$$

Se concluye que se necesita un cojinete de bolas con una carga 3kN para una vida estimada de 10000h a una velocidad de 330 rpm con una confiabilidad del 90%, para aplicaciones de impacto moderado.

### **Selección de anillo de retención**

Para mantener en el lugar correspondiente el piñón se necesitara un anillo de retención el cual esta seleccionado del Anexo D

### Conclusión para el diseño del eje b

A continuación se muestra el resumen del diseño del eje a en la Tabla 34, el resumen de la selección de los cojinetes en la Tabla 35, y el resumen de la selección del pasador para el piñón en la Tabla 36, El plano detallado del eje se muestra en el anexo B.

**Tabla 34**

*Material y dimensiones del eje b*

Elemento	Material	Diámetro	mm	Sección	mm
Eje b	AISI 1075	D1	25.4	L1	27
		D2	32	L2	36
		D3	25.4	L3	87.43
		D4	21	L4	5
		D5-D6	19-15	L5	34
		D7	15	L6	25
		D8	12	L7	19

**Tabla 35**

*Características de los cojinetes seleccionados para el soporte del eje b*

Elemento	Serie	Carga(kN)	Soporte
Cojinete A	Ucf205-16	2	Chumacera de pared
Cojinete B	Ucf205-16	4	Chumacera de pared

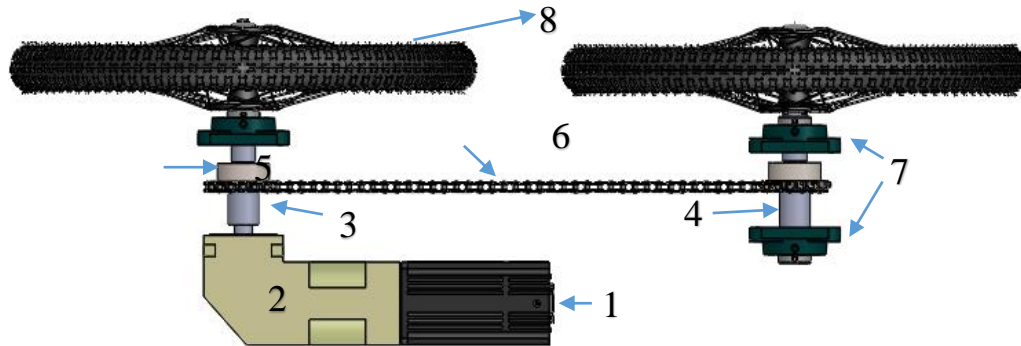
**Tabla 36**

*Material y dimensiones para el pasador para el piñón del eje b*

Elemento	Material	Largo mm	Diámetro mm
Pasador	AISI 1020	2,5	6

### 3.3.4. Conclusión del diseño para el módulo 1

A Continuación se concluye el diseño del módulo 1, ver *Figura 44*.



**Figura 44** Muestra los elementos que compone el módulo 1: 1) Motor, 2) Caja reductora, 3) Eje a, eje delantero, 4) eje b, eje trasero, 5) Piñón, 6) Cadena, 7) Chumaceras de pared, 8) Llantas

Se implementará el sistema diferencial como solución a la conducción de la plataforma móvil, los motores seleccionados son los servo motores Smart motor 34505D junto a una caja de reducción de relación 1:10 con un torque de 18.8 Nm. las características se pueden ver en la Tabla 37. Para realizar la conexión de los motores a la computadora abordo se muestra el siguiente esquema de conexión ver *Figura 45*, las dimensiones y materiales del eje así como sus componentes se muestran en la Tabla 38, Tabla 39 y Tabla 40. La selección de tracción en las cuatro ruedas es posible gracias a la transmisión por cadena para lo cual fueron seleccionados una relación de 1:1 con piñones de 17 dientes para una cadena número 40, por último las ruedas seleccionadas son las llantas de bicicleta rin # 20.

**Tabla 37**

*Características técnicas del motor SM 34505D*

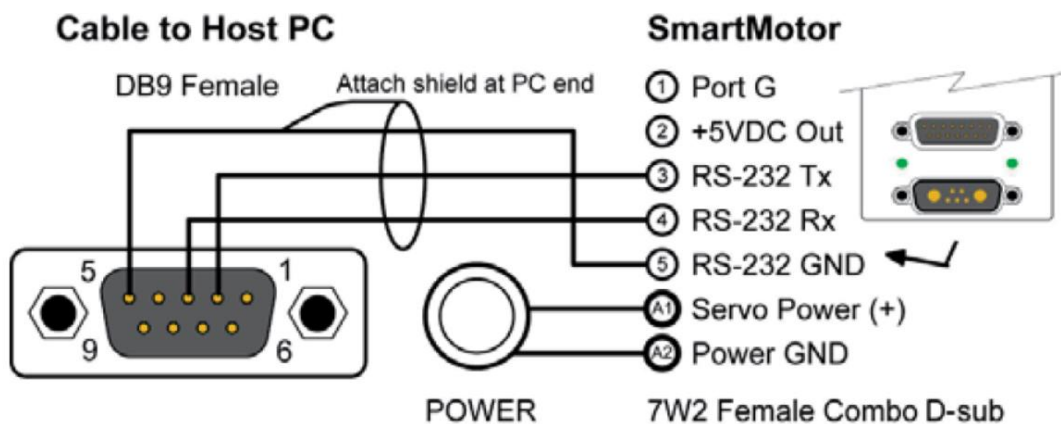
Torque continuo	<b>16.34</b>	<b>in-lb</b>
	261	oz-in
Torque pico	1.85	N-m
	<b>48.19</b>	<b>in-lb</b>
	771	oz-in

**CONTINUA**



	5.44	N-m
Potencia nominal continua	527	Watts
Velocidad sin carga	3,300	RPM
Max. Corriente continua* @ 3100 RPM	14.37	Amps
Potencia pico @ 2250 RPM	925	Watts
Voltaje constante	14.049	V/kRPM
Inductancia	0.871	mH
Encoder Resolución	8,000	Counts/Rev
Inercia del rotor	0.03	oz-in-sec <sup>2</sup>
	20.92	10 <sup>-5</sup> Kg-m <sup>2</sup>
Peso	6.5	lb
	2.95	kg
Diámetro del eje	0.375	in
	9.53	mm
Eje, carga radial	15	lb
	6.80	kg
eje, Carga axial de empuje	3	lb
	1.36	kg

Fuente:( **Animatics SmartMotor™ user guide, 2010**)



**Figura 45** Esquemático de la conexión Rx,Tx de los motores SM34505D

Fuente:( **Animatics SmartMotor™ user guide, 2010**)

**Tabla 38***Resumen de dimensiones de los ejes a y b*

Elemento	Material	Diámetro	mm	Sección	mm
<b>Eje a</b>	AISI 1075	D1	32	L1	36
		D2	25.4	L2	87.43
		D3	21	L3	5
		D4-D5	19-15	L4	34
		D5	15	L5	25
		D6	12	L6	19
<b>Eje b</b>	AISI 1075	D1	25.4	L1	27
		D2	32	L2	36
		D3	25.4	L3	87.43
		D4	21	L4	5
		D5-D6	19-15	L5	34
		D7	15	L6	25
		D8	12	L7	19

**Tabla 39***Resumen de los cojinetes para los eje a y b*

Eje	Elemento	Serie	Carga(kN)	Soporte
<b>a</b>	Cojinete	Ucf205-16	3	Chumacera de pared
<b>b</b>	Cojinete A	Ucf205-16	2	Chumacera de pared
<b>b</b>	Cojinete B	Ucf205-16	4	Chumacera de pared

**Tabla 40***Resumen de la selección de pasadores para los piñones del eje a y el eje b*

Eje	Elemento	Material	Largo mm	Diámetro mm
<b>a</b>	Pasador	AISI 1020	2,5	6
<b>b</b>	Pasador	AISI 1020	2,5	6

## **3.4. Módulo 2. Estructura**

### **3.4.1. Subsistema 1. Diseño del chasis**

A continuación se muestra las diferentes alternativas de materiales para seleccionar el más adecuado acorde a los requerimientos de impermeabilidad, resistente a condiciones medioambientales, e inoxidable.

#### **3.4.1.1. Alternativas para la selección del material.**

##### **3.4.1.1.1 Acero**

Aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono y que adquiere con el temple gran dureza y elasticidad, posee alta resistencia mecánica, es resistente a la corrosión

#### **Ventajas**

- Alta resistencia mecánica
- Dificultad de ensamble moderada
- Impermeable
- Costo medio

#### **Desventajas**

- Materiales adicionales para protección contra la corrosión
- Deformaciones no reversibles

##### **3.4.1.1.2 Aluminio**

Material de baja densidad, con alta resistencia a la corrosión, dúctil

**Ventajas**

- Resistencia elevada frente a la corrosión
- Fácil de mecanizar
- Ligero
- Baja densidad
- Bajo costo

**Desventajas**

- Dificultad de ensamblaje
- Deformaciones no reversibles

**3.4.1.1.3 Polometilmetacrilato**

Destaca frente a otros plásticos en cuanto a la resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado.

**Ventajas**

- Bajo costo
- Ligero.
- Facilidad de ensamble
- Impermeable
- Alta resistencia al impacto

**Desventajas**

- Vida útil media



- Fácil combustión

### 3.4.1.2. Evaluación y selección de alternativas

**Tabla 41**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de materiales del chasis*

Criterio	Resistencia	Permeabilidad	Ensamblaje	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Resistencia</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Permeabilidad</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Ensamblaje</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

Soluciones establecidas para materiales módulo 2

Solución 1	Acero
Solución 2	Aluminio
Solución 3	Polometilmetacrilato

**Tabla 42**

*Ponderación de resistencia para las soluciones del módulo 2*

<b>Resistencia</b>					
Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 43**

*Ponderación de permeabilidad para las soluciones del módulo 2*

<b>Permeabilidad</b>					
Criterio	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,50	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,50	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	0,50	0,50	-	2,00	0,33
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 44***Ponderación de facilidad de ensamble para las soluciones del módulo 2*

<b>Ensamblaje</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 45***Conclusión para la selección de material módulo 2*

<b>Conclusión</b>					
<b>Criterio</b>	Resistencia	Permeabilidad	Ensamblaje	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,25	0,11	0,06	0,42	1
<b>Solución 2</b>	0,17	0,11	0,03	0,31	2
<b>Solución 3</b>	0,08	0,11	0,08	0,28	3

### 3.4.1.3. Diseño CAD/CAE

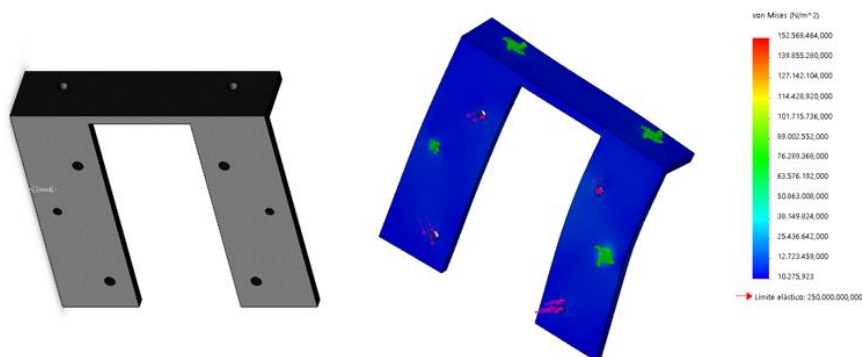
Una vez seleccionado el material, mediante la ayuda del software de diseño se crea el concepto del chasis para luego, someterlo a esfuerzos teóricos, analizar su comportamiento y comprobar si el diseño es satisfactorio.

Debido a la exigencia de robustez y la necesidad de soportar los distintos elementos en el chasis, Se construyó con tubo cuadrado ASTM 36 de 20x20x1.5 mm, como se muestra en la *Figura 48*, los planos de cada pieza se encuentran en el anexo B. La cobertura, para la base 2mm, para la cobertura frontal, lateral, y la tapa se usó tol de 0.5 mm, adicionalmente en la parte interna se diseñó una placa de madera triplex para sujetar los elementos de control, con lo cual se vuelve una pieza fácil de remplazar y de manufacturar según las futuras necesidades.

Dentro de los elementos mecánicos que debe soportar la estructura se encuentran el acople de las cajas reductoras y los motores, los ejes los cuales son soportados por chumaceras de pared para facilitar el mantenimiento y cambio de los rodamientos después de haber cumplido su vida útil. Dentro de los ejes, Se realizó el acople del piñón/ cadena para permitir la transmisión de potencia hacia el eje trasero, así como el acople de las ruedas.

#### 3.4.1.4. Diseño de los elementos de acople para las cajas de reducción

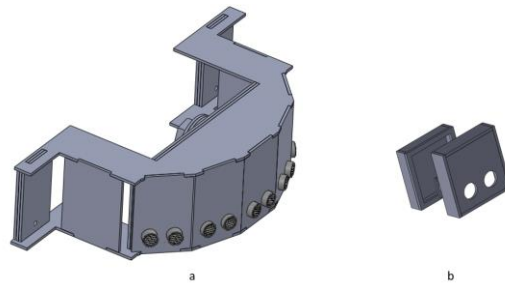
Para conseguir una mayor facilidad en el aspecto de ensamble/desensamble se acoplara las cajas de reducción por medio de una pieza en forma de L en acero A36. En la *Figura 46* se aprecia en las flechas de color morado la fuerza ejercida sobre la estructura producto del torque que generan los motores al estar activados de 18.8 Nm, mientras que las flechas de color verde indican los puntos de sujeción de la estructura, se puede apreciar que los esfuerzos máximos están por debajo del límite elástico del material utilizado en este caso acero A36.



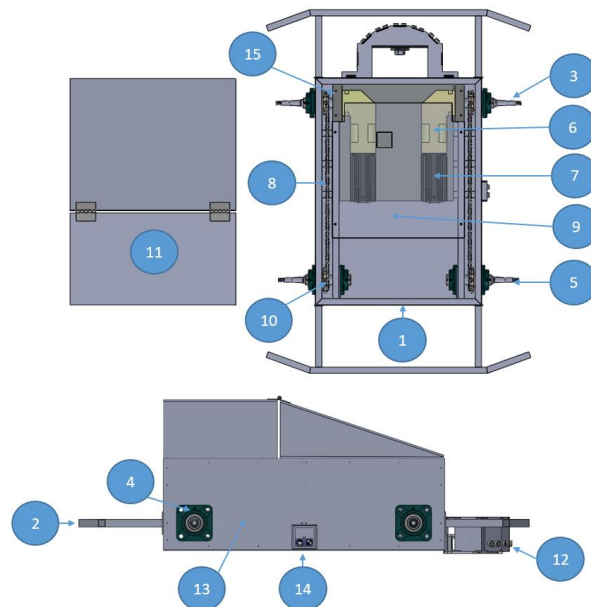
*Figura 46* Simulación del torque que ejercen los motores sobre el soporte

### 3.4.1.5. Diseño de las carcasas para sensores

El conjunto de sensores de proximidad serán protegidos y unidos al chasis por una carcasa realizada en acrílico, y tendrá un acople de  $\frac{3}{4}$  para permitir el paso de los cables sin comprometer la impermeabilización del chasis ver *Figura 47*.



**Figura 47** Diseño de las carcasas para los sensores de proximidad, a) Muestra la carcasa frontal, b) muestra las carcasas laterales.



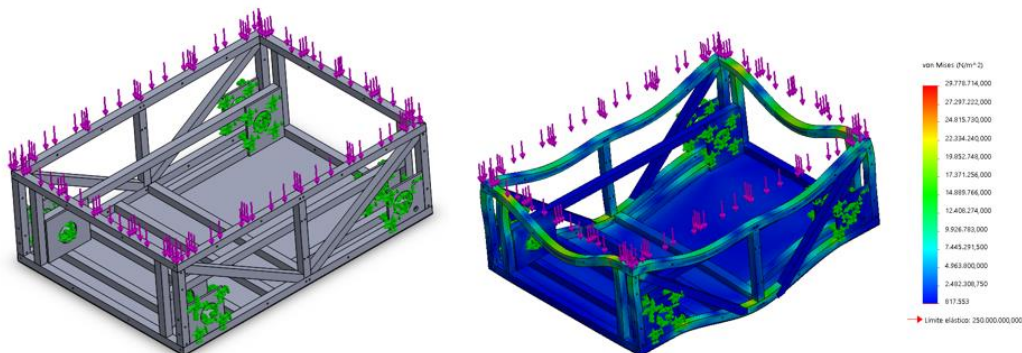
**Figura 48** Distribución de los elementos mecánicos en la plataforma robótica móvil: 1) Chasis, 2) parachoques 3) eje delantero, 4) chumacera de pared, 5) eje trasero, 6) caja de reducción, 7) motores, 8) cadena, 9) soporte para elementos de control, 10) piñón, 11) cobertura superior, 12) carcasa frontal para sensores ultrasónicos, 13) coberturas laterales, 14) carcasa lateral para sensores ultrasónicos, 15) acople para cajas reductoras

### 3.4.1.6. Comportamiento mecánico de la estructura frente a esfuerzos teóricos

A continuación se analizará el diseño CAD para validar la resistencia y la geometría de la estructura del chasis, así como su material frente a tres aspectos importantes: La carga total que resistirá la estructura del chasis, La carga producida por el torque generado por los motores en el sector donde van anclados los mismos, y por último la reacción del chasis frente al impacto producido por baches, tanto en la parte anterior como en la posterior.

#### 3.4.1.6.1. Carga total sobre la estructura

Para el siguiente análisis se ejercerá una fuerza de 800N sobre la estructura representada por las flechas de color morado, la cual será anclada a los puntos de soporte donde van colocadas las ruedas representado por las flechas verdes, ver *Figura 49*. Se puede apreciar que los esfuerzos máximos están por debajo del límite elástico del material utilizado en este caso acero A36, con lo cual se concluye que la forma geométrica y el material utilizado cumplen los requerimientos deseados.

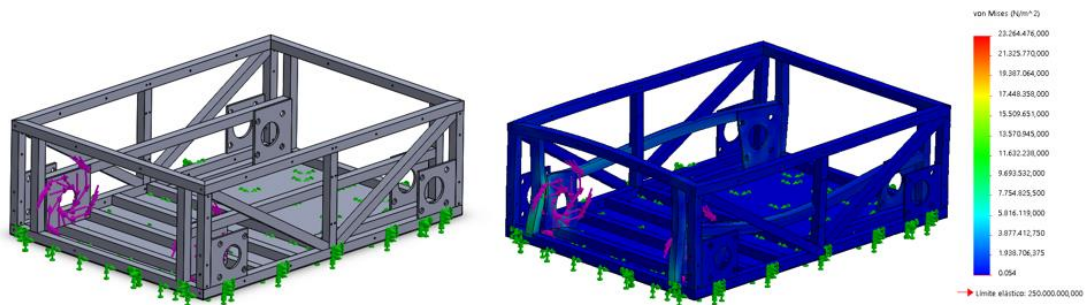


**Figura 49** Simulación de la resistencia del chasis frente a una carga de 800N

#### 3.4.1.6.2 Esfuerzo producido por los motores

En la siguiente *Figura 50* se aprecia en las flechas de color morado la fuerza ejercida sobre la estructura producto del torque que generan los motores al estar activados de 18.8 Nm, mientras que las flechas de color

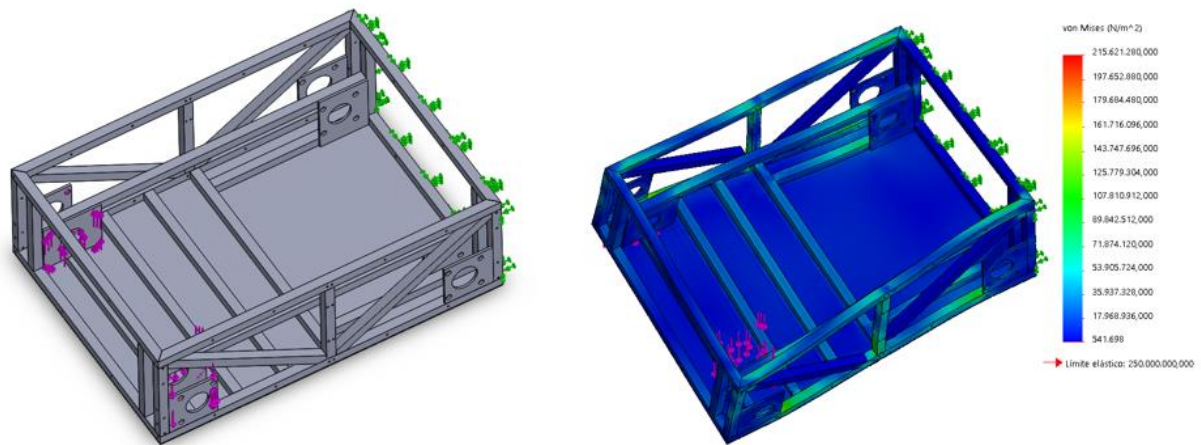
verde indican los puntos de sujeción de la estructura, se puede apreciar que los esfuerzos máximos están por debajo del límite elástico del material utilizado en este caso acero A36, con lo cual se concluye que el sector de la estructura que soporta la carga de los materiales y el material utilizado cumplen los requerimientos deseados.



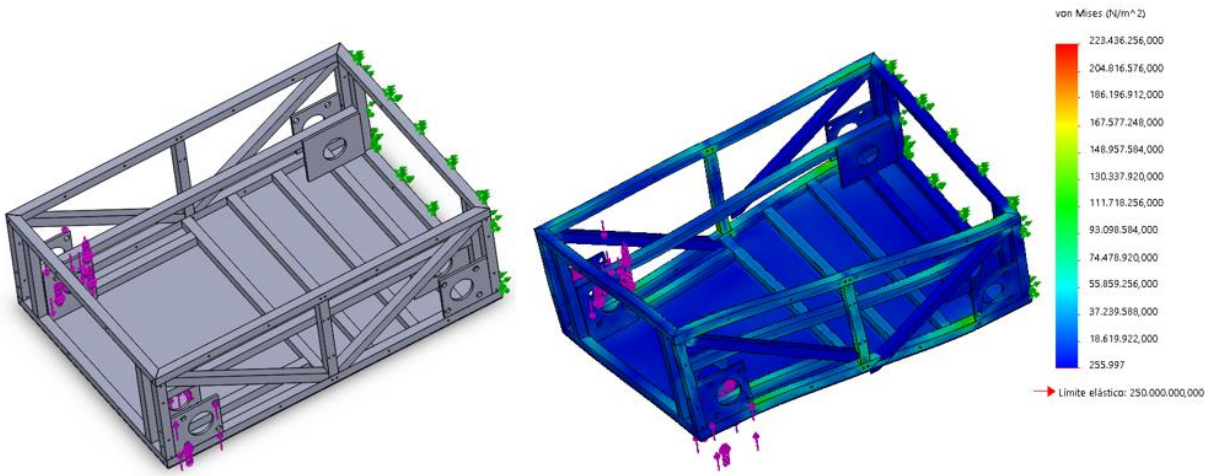
**Figura 50** Simulación del toque que ejercen los motores sobre el chasis

#### 3.4.1.6.3. Reacción frente a baches.

Se analiza el chasis frente a un esfuerzo producido por el impacto en un bache, el comportamiento del chasis ha sido analizado para los dos casos, uno si el tren delantero impacta en un bache *Figura 51*, dos si el tren posterior impacta en un bache *Figura 52*, la fuerza equivalente a una caída de 20 cm ejercida por el impacto se representa por las flechas moradas mientras que las flechas verdes simulan la sujeción del sistema. Puesto que los esfuerzos en la estructura para ambos casos están por debajo del límite elástico del material acero A36, se concluye que la estructura es satisfactoria y garantiza la integridad frente al impacto en baches.



*Figura 51* Simulación de impacto en bache tren delantero



*Figura 52* Simulación de impacto en bache tren posterior

**3.4.1.7. Alternativas para impermeabilización**





**Tabla 49***Ponderación resistencia de impermeabilización para las soluciones del módulo 2*

<b>Resistencia</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 50***Ponderación de disponibilidad para la impermeabilización para las soluciones del módulo 2*

<b>Disponibilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,50	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,50	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	0,50	0,50	-	2,00	0,33
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 51***Conclusión para la selección de impermeabilización módulo 2*

<b>Conclusión</b>						
<b>Criterio</b>	Costo	Manejo	Resistencia	Disponibilidad	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,06	0,04	0,06	0,11	0,26	3
<b>Solución 2</b>	0,08	0,04	0,11	0,11	0,35	2
<b>Solución 3</b>	0,03	0,08	0,17	0,11	0,39	1

Debido a la necesidad de desensamblar la plataforma la mejor opción es el empaque de caucho lo cual permitirá la impermeabilización interna de la plataforma robótica sin restarle la capacidad de ser desensamblada para mantenimiento, o mejoras.

### **3.4.2. Conclusión para el diseño del Módulo 2**

Se concluye el módulo 2, con las siguientes características material de la estructura acero A36, selección de método de impermeabilización empaques de caucho, sujeción de elementos, para las cajas de reducción un acople en forma de L, para garantizar el montaje, desmontaje, y mantenimiento del sistema de locomoción, los sensores de proximidad serán acoplados al chasis por medio de una carcasa impresa en plástico ABS, los elementos internos de control serán ubicados en una plataforma de triplex que permitirá fácilmente añadir nuevos elementos.

## **3.5. Módulo 3. Ubicación, Adquisición y procesamiento de datos**

El siguiente modulo es el encargado de adquirir los datos provenientes de los sensores internos y externos del robot con la finalidad de enviarlos a los procesos de alto nivel, así como realizar la estimación de la posición del robot mediante la técnica de odometría.

### **3.5.1. Adquisición y procesamiento de datos**

Este módulo se encarga de procesar y enviar los datos provenientes de los sensores al sistema de control, el cual está encargado de los procesos de alto nivel y del control de la locomoción, así como del envío de imágenes. Dentro de las alternativas se debe tomar en cuenta los aspectos ya mencionados en la QFD y la capacidad de poder instalar sistemas operativos, así como la posibilidad de poder expandir la plataforma para otras funciones.

### **3.5.1.1. Alternativas para la selección de Tarjetas de adquisición.**

#### **3.5.1.1.1. Placa Arduino**

Plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.

#### **Ventajas**

- Bajo costo
- No es multi tarea
- Compatible con una gran cantidad de sensores
- Fácil de conectar
- Fácil de programar
- No necesita de sistema operativo para funcionar
- Puede ser apagado en cualquier momento si sufrir daños

#### **Desventajas**

- No soporta sistemas operativos
- Poca memoria

#### **3.5.1.1.2. RaspBerry PI**

Sistema embebido que integra una computadora completamente funcional, la cual cuenta con procesador central, memoria RAM , puertos USB, Puerto Ethernet, y puerto HDMI, a un precio económico

#### **Ventajas**

- Bajo costo

- Multi tarea
- Soporta sistemas operativos
- Disco duro de estado solido
- Barios Pines I/O
- Bajo consumo energético

### **Desventajas**

- Necesita un sistema operativo para funcionar
- Puede sufrir daños si no se apagada adecuadamente
- Requiere hardware especial para la lectura de algunos sensores

#### 3.5.1.1.3. USB-6009 tarjeta de adquisición de datos

El USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas

### **Ventajas**

- Tarjeta especializada en implementaciones de automatización
- Fácil de conectar
- Alta precisión
- Trabaja con tecnología TTL

### **Desventajas**

- Costo elevado

- Necesita software especializado
- Requiere calibración
- No posee muestreo simultaneo

### 3.5.1.2. Evaluación de alternativas

**Tabla 52**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección para la tarjeta de adquisición*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Procesador</b>	<b>Flexibilidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	1,00	0,50	1,00	3,50	0,35
<b>Procesador</b>	1,00	-	0,00	0,5	2,00	0,20
<b>Flexibilidad</b>	0,50	1,00	-	0,5	2,50	0,25
<b>Disponibilidad</b>	0	0,5	0,5	-	2,00	0,20
				<b>Suma</b>	<b>10,00</b>	<b>1,00</b>

Soluciones establecidas para la tarjeta de adquisición módulo 3

Solución 1	Arduino
Solución 2	Raspberry PI
Solución 3	USB-6009

**Tabla 53**

*Ponderación de costos de tarjetas de adquisición para las soluciones del módulo 3*

<b>Costo</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			<b>Suma</b>	<b>6,00</b>	<b>1,00</b>

**Tabla 54***Ponderación de velocidad de procesamiento de tarjetas de adquisición para las soluciones del módulo 3*

<b>Procesador</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,50	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	1,00	-	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 3</b>	0,50	0,00	-	1,50	0,25
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 55***Ponderación de flexibilidad de operación de tarjetas de adquisición para las soluciones del módulo 3*

<b>Flexibilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,50	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	1,00	-	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 3</b>	0,50	0,00	-	1,50	0,25
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 56***Conclusión para la selección de la tarjeta de adquisición módulo 3*

<b>Conclusión</b>						
<b>Criterio</b>	Costo	Procesamiento	Flexibilidad	Disponibilidad	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,18	0,05	0,06	0,08	0,37	1
<b>Solución 2</b>	0,12	0,10	0,13	0,08	0,43	2
<b>Solución 3</b>	0,06	0,05	0,06	0,03	0,20	3

### 3.5.1.3. Alternativas para la selección del hardware para el procesamiento de datos.

#### 3.5.1.3.1 Mini PC

##### Ventajas

- Alto nivel procesamiento
- Soporta sistemas operativos

- Puerto Ethernet
- Posibilidad de extender la capacidad de memoria RAM

### **Desventajas**

- Costo medio
- Alto consumo energético

#### 3.5.1.3.2 RaspBerry PI

### **Ventajas**

- Bajo costo
- Disco duro de estado solido
- Soporta sistemas operativos
- Barios Pines I/O
- Puerto ethernet
- Bajo consumo energético

### **Desventajas**

- Memoria del CPU limitada por la capacidad de las micro SD
- Memoria RAM limitada
- Requiere hardware especial para la lectura de algunos sensores

#### **3.5.1.4. Evaluación de alternativas**

**Tabla 57**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de hardware para procesamiento de datos*

<b>Criterio</b>	<b>Memoria interna</b>	<b>Velocidad de ciclo de procesamiento</b>	<b>I/O</b>	<b>Capacidad de Expansión</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Memoria interna</b>	-	0,00	0,00	0,50	1,00	0,12
<b>Velocidad de ciclo de procesamiento</b>	1,00	-	0,00	0,50	2,00	0,24
<b>I/O</b>	1,00	1,00	-	0,50	3,00	0,35
<b>Capacidad de Expansión</b>	0,50	0,50	0,50	-	2,50	0,29
				<b>Suma</b>	<b>8,50</b>	<b>1,00</b>

Soluciones establecidas para hardware para procesamiento de datos módulo 3

Solución 1      Mini PC

Solución 2      Raspberry PI

**Tabla 58**

*Ponderación de memoria interna de hardware para procesamiento de datos para las soluciones del módulo 3*

<b>Memoria interna</b>				
<b>Criterio</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>	-	1,00	2,00	0,67
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	0,33
		<b>Suma</b>	<b>3,00</b>	<b>1,00</b>



**Tabla 59**

*Ponderación de velocidad de procesamiento de hardware para procesamiento de datos para las soluciones del módulo 3*

<b>Velocidad de ciclo de procesamiento</b>				
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	2,00	0,67
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	0,33
		Suma	3,00	1,00

**Tabla 60**

*Ponderación de puertos de entrada y salida de hardware para procesamiento de datos para las soluciones del módulo 3*

<b>I/O</b>				
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	1,50	0,50
<b>Solución 2</b>	0,50	-	1,50	0,50
		Suma	3,00	1,00

**Tabla 61**

*Ponderación de Capacidad de expansión que presenta el hardware para procesamiento de datos para las soluciones del módulo 3*

<b>Capacidad de Expansión</b>				
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	2,00	0,67
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	0,33
		Suma	3,00	1,00

**Tabla 62**

*Conclusión para la selección de hardware para procesamiento de datos módulo 3*

<b>Criterio</b>	<b>Memoria interna</b>	<b>Velocidad de ciclo de procesamiento</b>	<b>I/O</b>	<b>Capacidad de Expansión</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Orden de Selección</b>
<b>Solución 1</b>	0,08	0,16	0,18	0,20	0,61	1
<b>Solución 2</b>	0,04	0,08	0,18	0,10	0,39	2

### 3.5.2. Odometría

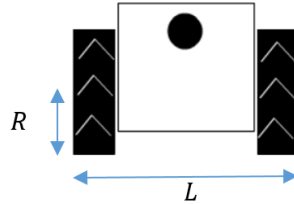
La odometría es un método para la estimación de la posición de un vehículo, el cálculo de la odometría está relacionado con la cinemática del vehículo, hace uso de sensores situados en los ejes de las ruedas, llamados encoders, extrayendo los pulsos emitidos por los encoders se obtiene el desplazamiento angular de las ruedas, este debe ser transformado para obtener el desplazamiento lineal de cada rueda, con lo cual se obtiene el desplazamiento del punto central del vehículo, una vez obtenida la distancia que recorre el punto central se calcula la su posición y la orientación las mismas que son actualizadas a medida que el desplazamiento del punto central varia.

Se analizará los pasos para obtener una estimación de la posición y orientación de un robot de configuración cinemática diferencial por el método de odometría, la *Figura 56* muestra el diagrama de flujo para la implementación del sistema de odometría:

- Definición de parámetros

Cinemática del robot: Diferencial, este parámetro rige las ecuaciones que se van a utilizar.

Se define el Radio  $R$  de las ruedas y la distancia entre ellas  $L$  ver *Figura 53*.



**Figura 53** Dimensiones del vehículo diferencial utilizadas para el cálculo odométrico

Se define un punto de inicio el cual se considera como el punto central del marco de referencia global  $x = 0, y = 0, \theta = 0$ . Este punto es cualquier punto en el cual se encuentra el robot al iniciar el programa de odometría.

- Recolección de datos de los encoders

Se debe sacar una muestra de la variación de pulsos en un intervalo de tiempo

- Obtención del desplazamiento lineal en base al desplazamiento angular y la información del encoder

Mediante la ecuación 3-30 se obtiene el desplazamiento lineal de cada rueda en función del desplazamiento angular y el número de pulsos enviado por los encoders, en un intervalo de tiempo, donde  $R$  representa el radio de las ruedas,  $\Delta P_i$  representa la variación de pulsos del encoder izquierdo,  $N$  representa la resolución del encoder.

$$D_i = 2\pi R \times \frac{\Delta P_i}{N} \quad (3-30)$$

- Obtención del desplazamiento del centro del robot

Para hallar el desplazamiento que realiza el punto central del robot  $D_c$  se debe realizar el promedio de los desplazamientos realizados por cada rueda  $D_i$  y  $D_d$  ecuación 3-31.

$$D_c = \frac{D_i + D_d}{2} \quad (3-31)$$

- Calculo de la posición y orientación del centro del robot

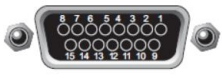
A medida que el desplazamiento angular de cada rueda varia, el robot cambia su orientación y posición este fenómeno está representado por las siguientes ecuaciones que permiten, una vez obtenido el desplazamiento realizado por el punto central del robot  $D_c$ , estimar su posición y orientación. Donde  $x', y', \theta'$ , representan la nueva posición del robot,  $x, y, \theta$ , representan la posición anterior del robot.

$$x' = x + D_c \times \cos(\theta)$$

$$y' = y + D_c \times \sin(\theta)$$

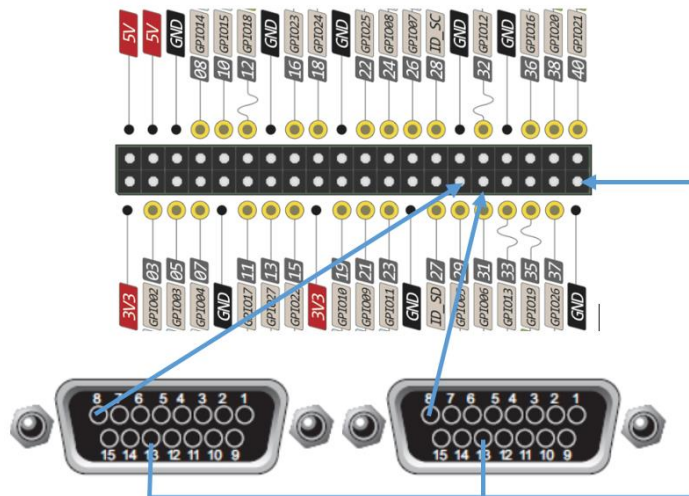
$$\theta' = \theta + \frac{D_d - D_i}{L}$$

En la siguiente *Figura 54* se muestra la distribución de pines del conector DB9 que poseen los motores smart motor. Se usaran los pines 8 y 13 para adquirir la información enviada por los encoders internos y realizar el cálculo odométrico, el esquemático de la conexión con el sistema embebido raspberry PI se muestra en la *Figura 55*.

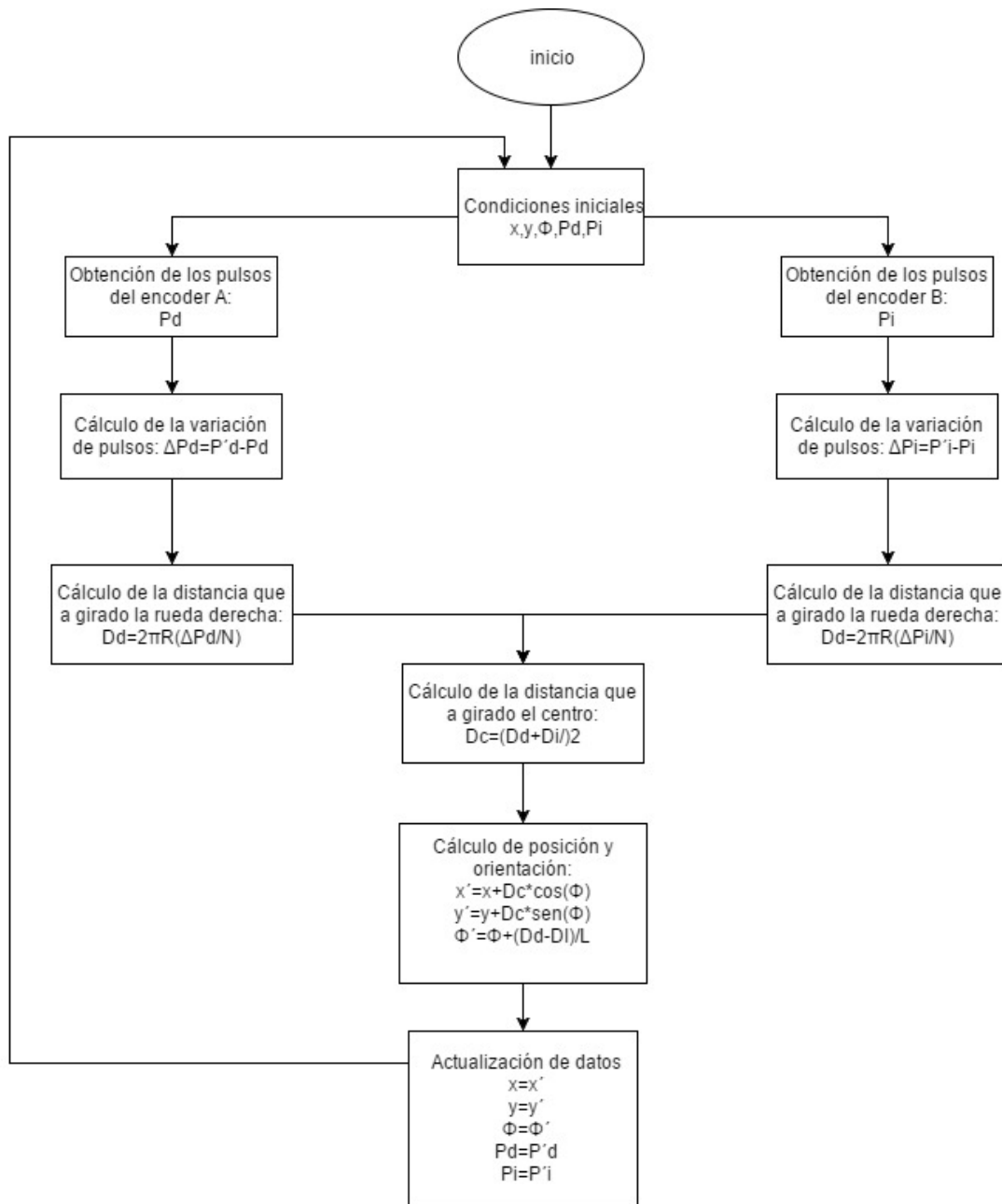
PIN	5V I/O Connector	Specifications:	Notes:	Diagram:
1	I/O – 0 GP or Enc. A or Step Input	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D	1.5MHz max as Enc or Step input	<b>DB-15 D-sub Connector</b> 
2	I/O – 1 GP or Enc. B or Dir. Input	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D	1.5MHz max as Enc. Or Dir. Input	
3	I/O – 2 Positive Over Travel or GP	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D		
4	I/O – 3 Negative Over Travel or GP	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D		
5	I/O – 4 GP or RS-485 A Com(1)	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D	115.2KBaud Max	
6	I/O – 5 GP or RS-485 B Com(1)	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D	115.2KBaud Max	
7	I/O – 6 "G" command or GP	25mA Sink/Source 10Bit 0-5VDC A/D	Redundant connection on Main Pwr Connector	
8	Phase A Encoder Output	25mA Sink/Source		
9	Phase B Encoder Output	25mA Sink/Source		
10	RS-232 Transmit Com(0)		115.2KBaud Max	
11	RS-232 Receive Com(0)		115.2KBaud Max	
12	+5VDC Out	50mA Max		
13	Ground			
14	Ground			
15	Main Power: +12.5VDC to +48VDC	If -DE Option, Control Power separate from Main Power	With -DE option, this becomes separate control power input.	

**Figura 54** Distribución y función de pines del conector DB15

Fuente: (Animatics SmartMotor™ user guide, 2010)



**Figura 55** Esquemático de la conexión del puerto DB15 de los motores Smart motor y el sistema embebido RaspberryPi 2 modelo B



**Figura 56** Diagrama de flujo para odometría

### 3.5.3. Posición global

Para reforzar la localización de la plataforma se sumara un dispositivo GPS, a continuación se muestran algunas alternativas de dispositivos GPS.

Alternativa 1: RasPiGNSS.- Es una tarjeta de expansión únicamente para rasp Berry Pi, posee 26 pines, con compatibilidad a GPS, GLONASS, GAIILEO

Alternativa 2 : EM-506.- GPS con receptor de 8 canales, de alta sensibilidad , inicio rápido de 1 cuenta con una precisión de 2.5 m, con conexión de tipo UART

Alternativa 3: BU-353-SA.- El receptor GPS BU-353-S4 ES EL ÚLTIMO MODELO DE RECEPTOR GPS. PARA VEHÍCULOS, BARCO, AVIACIÓN, MOTO ETC. Chip Prolific PL2303 compatible con WAAS es magnético e impermeable con una base antideslizante. Cuenta con el último chipset GPS SiRF Star IV y con una antena patch para una mejor precisión de la señal. Sus aplicaciones incluyen y no se limitan a los ambientes marinos, aéreos, y comerciales, los camiones de bomberos, los coches de policía, los autobuses, los vehículos utilitarios y los transportes de larga distancia.

### 3.5.3.1. Evaluación de alternativas

**Tabla 63**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de GPS*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Precisión</b>	<b>Implementación</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	0,00	1,00	0,00	2,00	0,24
<b>Precisión</b>	1,00	-	1,00	0,50	3,00	0,35
<b>Implementación</b>	0,00	0,00	-	1,00	1,00	0,12
<b>Disponibilidad</b>	1,00	0,50	0,00	-	2,50	0,29
				<b>Suma</b>	<b>8,50</b>	<b>1,00</b>

Soluciones establecidas para GPS módulo 3

Solución 1 RasPiGNSS

Solución 2 EM-506

Solución 3 BU-353-SA

**Tabla 64**

*Ponderación de costo de GPS para las soluciones del módulo 3*

<b>Costo</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,60
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,20
<b>Solución 3</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,20
			Suma	5,00	1,00

**Tabla 65**

*Ponderación de Precisión de GPS para las soluciones del módulo 3*

<b>Precisión</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	0,50	1,00	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 66**

*Ponderación de implementación de GPS para las soluciones del módulo 3*

<b>Implementación</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,50	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 2</b>	0,50	-	0,00	1,50	0,25
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00



**Tabla 67***Ponderación de Disponibilidad de GPS para las soluciones del módulo 3*

<b>Disponibilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,50	2,50	0,42
<b>Solución 3</b>	1,00	0,50	-	2,50	0,42
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 68***Conclusión para la selección de GPS módulo 3*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Manejo</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Disponibilidad</b>	$\Sigma$	<b>Orden de Selección</b>
<b>Solución 1</b>	0,14	0,15	0,03	0,05	0,37	3
<b>Solución 2</b>	0,03	0,06	0,03	0,12	0,24	2
<b>Solución 3</b>	0,05	0,15	0,06	0,12	0,38	1

La selección es el sensor BU-353-SA, sus características se mencionan a continuación en la Tabla 69.

**Tabla 69***Características técnicas del GPS BU-353-SA*

<b>Característica</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Número de canales</b>	48
<b>GPS Chipset</b>	Sirf star IV
<b>Frecuencia</b>	L1,1575,42MHZ
<b>Sensibilidad</b>	(-) 163 dBm
<b>Precisión</b>	2,5m
<b>I/O interfaz</b>	USB 2.0
<b>Inicio en caliente</b>	1s
<b>Inicio en temperado</b>	35s
<b>Inicio en frio</b>	35s
<b>Reactualización</b>	0,1s
<b>frecuencia de actualización</b>	1 Hz
<b>GPS Protocolo</b>	NMEA 0183

**CONTINUA**

<b>Gps salida de datos</b>	posición, velocidad, altitud, status y protocolo de control NMEA 0183 V3.0
<b>Límite de velocidad</b>	515m/s
<b>Límite de altura</b>	18000 m
<b>Límite de aceleración</b>	menor a 4g
<b>Voltaje</b>	4,5-5,5V
<b>Corriente</b>	55mA máximo
<b>Temperatura de operación</b>	(-)40° a 85 °C
<b>Trabaja en ambientes de humedad</b>	95%

### 3.5.4. Conclusión para el diseño del módulo 3

Para la tarjeta de adquisición se selecciona la RaspBerry PI, puesto que abre la posibilidad de ser utilizada simultáneamente como un cerebro secundario, y ofrece un precio bajo en relación precio /prestaciones. Para la selección del hardware de procesamiento de datos, se ha seleccionado la mini PC puesto que cumple totalmente las exigencias de manejo de datos, es una versión compacta que puede ser fácilmente instalada en la plataforma móvil, gracias a las prestaciones de la mini PC la plataforma tiene opción a extenderse en áreas como odometría visual, SLM visual, reconocimiento de objetos y rostros, etc, puesto que la gran cantidad de información que es necesario procesar en estos métodos de localización y detección , serian perfectamente cubiertos por la mini PC. La estimación de la posición se realizara por el método de odometría extrayendo la señal de los encoders internos, también se contara con la ubicación GPS para lo cual es dispositivo selecciona es BU-353-SA.

## 3.6. Módulo 4. Comunicación

Este módulo debe realizar el intercambio de datos entre el usuario y la plataforma robótica móvil, mediante la interfaz hombre máquina.

### 3.6.1. Alternativas para la selección de teleoperación.

#### 3.6.1.1. Comunicación bluetooth

La tecnología bluetooth es una especificación abierta para la comunicación inalámbrica de datos y voz. Se basa en un enlace de radio de bajo y corto alcance. Posee la cualidad de formar pequeños grupos conectados mutuamente de forma privada, fuera de cualquier estructura fija de red.

##### **Ventajas**

- Puede crear una red privada
- Fácil de comunicar con múltiples dispositivos

##### **Desventajas**

- Alcance corto
- Difícil mantenimiento

#### 3.6.1.2. WLAN

Una red de área local inalámbrica, también conocida como WLAN, es un sistema de comunicación con el fin de minimizar las conexiones cableadas. Trabaja mediante el envío de paquetes informáticos, estableciendo comunicación entre diferentes dispositivos con la capacidad de envío y recepción.

##### **Ventajas**

- Varias ondas pueden existir en igual tiempo sin interferencia.
- Fácil de adquirir.
- Gran alcance.
- Fácil implementación.

- Alta integridad de datos

#### **Desventajas**

- Alcance medio.
- Alto costo.

#### **3.6.1.3. Radiofrecuencia**

Es una tecnología que transmite datos en una frecuencia establecida mediante el espectro de ondas electromagnéticas, tiene un rango de trabajo que va de los 3 hercios (Hz) hasta los 300 gigahercios (GHz).

#### **Ventajas**

- Se dispone de varios canales
- Fácil de adquirir.
- Gran alcance.

#### **Desventajas**

- Costo elevado
- Susceptible a interferencia.
- Dificultad media de implementación.

#### **3.6.2. Evaluación y selección de alternativas**

**Tabla 70***Ponderación de criterios de evaluación para la selección de tele operación*

<b>Criterio</b>	<b>Alcance</b>	<b>Implementación</b>	<b>Robustez frente al ruido</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Portabilidad</b>	-	0,00	1,00	2,00	0,33
<b>Eficiencia</b>	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Capacidad Energética</b>	0,00	1,00	-	2,00	0,33
			Suma	6,00	1,00

Soluciones establecidas para motores módulo 4

Solución 1      BluetooH

Solución 2      WLAN

Solución 3      Radiofrecuencia

**Tabla 71***Ponderación de alcance de envío y recepción de datos para las soluciones del módulo 4*

<b>Alcance</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 3</b>	1,00	0,00	-	2,00	0,33
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 72***Ponderación implementación de los sistemas de teleoperación para las soluciones del módulo 4*

<b>Implementación</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	1,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	1,00	-	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 3</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 73***Ponderación robustez frente al ruido de los sistemas de teleoperación para las soluciones del módulo 4*

<b>Robustez frente al ruido</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	0,00	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 2</b>	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 74***Conclusión para la selección del sistema de teleoperación módulo 4*

<b>Conclusión</b>					
<b>Criterio</b>	Resistencia	Permeabilidad	Capacidad Energética	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,06	0,11	0,06	0,22	1
<b>Solución 2</b>	0,17	0,17	0,11	0,44	2
<b>Solución 3</b>	0,11	0,06	0,17	0,33	3

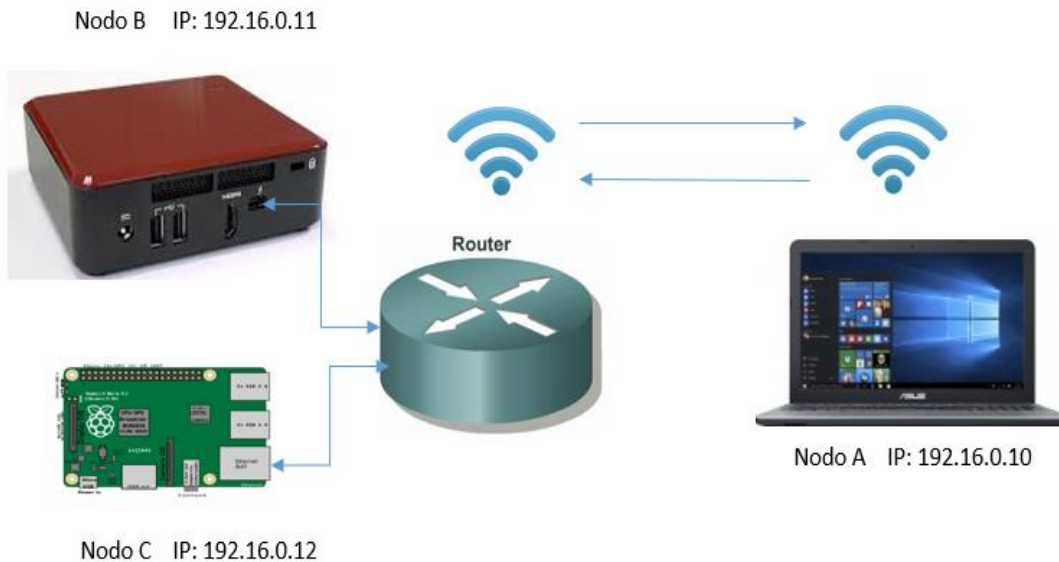
### 3.6.3. Conclusión para el diseño del módulo 4

Gracias a la gran capacidad de manejo de datos y velocidad de transferencia de los mismos, que caracteriza a la tecnología WLAN, permite cubrir en tiempo real la recepción y envío de datos entre la estación de trabajo y la plataforma robótica móvil. La topología a implementar será topología Peer to peer totalmente descentralizada con las siguientes características:

Intercambio directo de información en cualquier formato, entre los ordenadores interconectados, optimización del ancho de banda, robustez, descentralizada, se garantiza la integridad de los datos puesto que en el envío y recepción no sufrirán pérdidas ni alteraciones, control de acceso con lo cual se permite el acceso a datos autorizados.

### 3.6.3.1. Topología de red

Siendo el primer nodo de comunicación la estación de control nodo A, el segundo nodo la computadora a bordo de la plataforma robótica nodo B, y un tercer nodo que es la raspberry PI nodo C, los cuales estarán conectada a la red mediante un router inalámbrico, los nodos A, B y C deben conocer mutuamente sus IPs , un esquema básico es representado en la *Figura 57*.



**Figura 57** Esquema de las conexiones de red topología Peer to Peer

## **3.7. Módulo 5. Suministro de energía**

Dentro de este módulo se seleccionara y dimensionara las fuentes de alimentación más adecuadas así como los circuitos necesarios para abastecer los distintos tipos de elementos presentes en la plataforma móvil robótica, los cuales son:

### **3.7.1. Subsistema 1. Potencia**

A continuación se muestra las diferentes alternativas de fuentes de alimentación primaria destina al abastecimiento de los motores.

#### **3.7.1.1. Alternativas para la selección de fuentes de alimentación.**

##### **3.7.1.1.1 Baterías**

Dispositivo con una o varias celdas electroquímicas que pueden convertir energía química almacenada en energía eléctrica.

#### **Ventajas**

- Portable.
- Fácil adquisición.
- Variedad de modelos.
- Facilidad de repuestos

#### **Desventajas**



- Envejecimiento.
- Sistema de carga especial.
- Costo según la potencia.
- Vida útil corta alrededor de 3 a 5 años

#### 3.7.1.1.2 Panel fotovoltaico

Paneles formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad mediante la luz que incide sobre ellos, a partir del efecto fotoeléctrico.

#### **Ventajas**

- Portable.
- Ecológico.
- Se basa en el efecto fotoeléctrico para generar energía.
- Económico a largo plazo.
- Recurso inagotable.
- Vida útil larga superior a los 20 años

#### **Desventajas**

- Necesita de un medio de almacenamiento de energía
- Potencia limitada al área.
- No trabaja en condiciones sin sol
- Adquisición difícil.

- Disponibilidad variable dependiendo de las condiciones climáticas

### 3.7.1.1.3 Conexión a corriente alterna por cable

#### Ventajas

- Potencia fija
- Capacidad de abastecer gran número de elementos eléctricos y electrónicos
- Económico
- Puede ser transportada a grandes distancias.
- Amplia gama de voltajes.

#### Desventajas

- No es portable
- Depende de cableado
- Necesita rectificadores para trabajar con circuitos electrónicos

### 3.7.1.2. Evaluación y selección de alternativas

**Tabla 75**

*Ponderación de criterios de evaluación para la selección de suministro de energía*

<b>Criterio</b>	<b>Portabilidad</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Capacidad Energética</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Portabilidad</b>	-	0,00	1,00	2,00	0,33
<b>Eficiencia</b>	1,00	-	0,00	2,00	0,33
<b>Capacidad Energética</b>	0,00	1,00	-	2,00	0,33
			Suma	6,00	1,00

Soluciones establecidas para motores módulo

Solución 1	Batería
Solución 2	Panel fotovoltaico
Solución 3	Conexión a corriente alterna por cable

**Tabla 76**

*Ponderación de portabilidad del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5*

<b>Portabilidad</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	1,00	3,00	0,50
<b>Solución 2</b>	0,00	-	1,00	2,00	0,33
<b>Solución 3</b>	0,00	0,00	-	1,00	0,17
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 77**

*Ponderación de la eficiencia energética del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5*

<b>Eficiencia</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 78**

*Ponderación de Capacidad de almacenamiento energético del sistema de suministro de energía para las soluciones del módulo 5*

<b>Capacidad Energética</b>					
<b>Criterio</b>	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>	-	1,00	0,00	2,00	0,33
<b>Solución 2</b>	0,00	-	0,00	1,00	0,17
<b>Solución 3</b>	1,00	1,00	-	3,00	0,50
			Suma	6,00	1,00

**Tabla 79**

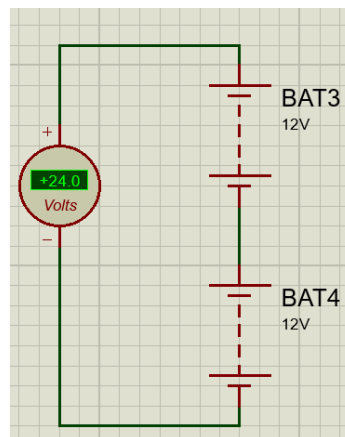
*Conclusión para la selección del sistema de suministro de energía módulo 5*

<b>Conclusión</b>					
<b>Criterio</b>	Resistencia	Permeabilidad	Capacidad Energética	$\Sigma$	Orden de Selección
<b>Solución 1</b>	0,17	0,11	0,11	0,39	1
<b>Solución 2</b>	0,11	0,06	0,06	0,22	2
<b>Solución 3</b>	0,06	0,17	0,17	0,39	3

Debido a la necesidad de cubrir grandes distancias, es necesario que la plataforma pueda portar un suministro de energía que le permite operar por al menos 1 hora, para lo cual la mejor opción de abastecimiento son las baterías recargables.

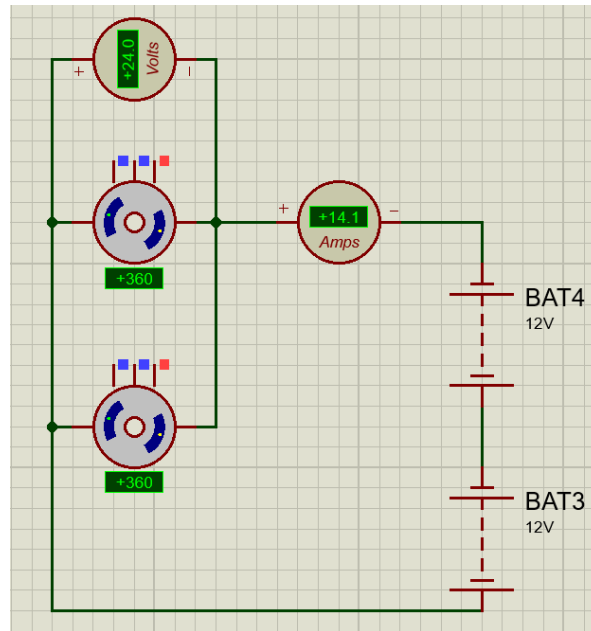
### 3.7.1.3. Diseño Electrónico

Se utilizara un paquete de baterías de 12V conectadas en serie para obtener 24V, y para la conexión de las baterías se muestra en la *Figura 58*.



**Figura 58** Arreglo de baterías

La carga producida por los motores será simulada por una resistencia interna del bobinado de 1.7 ohms para verificar si el conjunto de baterías cumple con los requerimientos.



**Figura 59** Voltaje y amperaje proporcionado por las baterías

Se puede apreciar en la *Figura 59* que el arreglo de baterías cumple con los requerimientos para alimentar a los dos motores. A continuación la Tabla 80 muestra las características de las baterías seleccionadas.

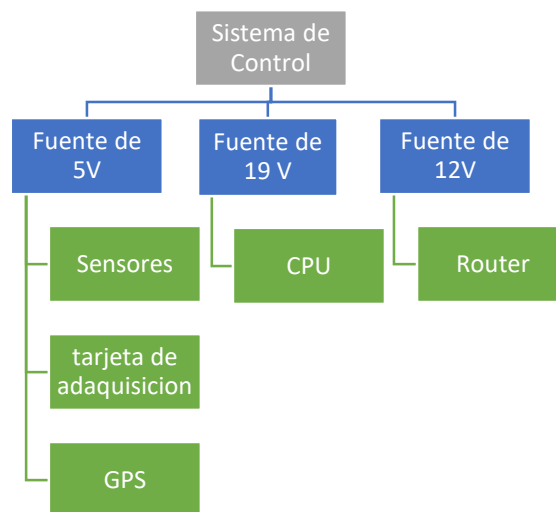
**Tabla 80**

*Características baterías de 12 V*

Característica	
Modelo	E3-42HPI
Voltaje (V)	12
Capacidad	55Ah
Largo(mm)	233
ancho(mm)	174
Alto(mm)	172
Peso(kg)	12

### 3.7.2. Subsistema 2. Control

El subsistema de control se encarga de proporcionar la fuente de alimentación adecuada para los elementos: NUC, tarjeta de adquisición, sensores de proximidad, router, GPS, en la siguiente *Figura 60* se muestra un esquema de la distribución de los requerimientos de voltaje de los dispositivos.



**Figura 60** Esquema de la distribución de los requerimientos de voltaje de los dispositivos, fuente de 5V, 19V, 12V

La Tabla 81 muestra los requerimientos de amperaje de los elementos del sistema de control

**Tabla 81**

*Requerimientos del sistema de control*

Elemento	Amperaje (A)
Computadora abordo	4,76
Raspberry PI	0,8
Router	1
Sensores	0,5
GPS	0,55
<b>Amperaje total</b>	<b>7,71</b>

Para el dimensionamiento de las baterías, el amperaje suministrado debe ser 70 a 100% del requerimiento del dispositivo, para evitar daños en las mismas.

Se optara por suministrar la energía hacia los componentes utilizando baterías individuales para cada requerimiento la Tabla 82, la Tabla 83, la Tabla 84, presentan las características de las baterías seleccionadas para el sistema de control.

**Tabla 82**

*Características de la batería 5V*

<b>Característica</b>	
<b>Modelo</b>	PL-E6002
<b>Voltaje (V)</b>	5
<b>Capacidad</b>	3.6Ah
<b>Largo(mm)</b>	130
<b>Ancho(mm)</b>	90
<b>Alto(mm)</b>	
<b>Peso(kg)</b>	3

**Tabla 83**

*Características de la batería 12V*

<b>Característica</b>	
<b>Modelo</b>	FP1223
<b>Voltaje (V)</b>	12
<b>Capacidad</b>	20hr 2.8Ah
<b>Largo(mm)</b>	95
<b>Ancho(mm)</b>	65
<b>Alto(mm)</b>	
<b>Peso(kg)</b>	0.4

**Tabla 84***Características de la batería. 19 V*

<b>Característica</b>	
<b>Modelo</b>	BRS PA5024U-
<b>Voltaje (V)</b>	19
<b>Capacidad</b>	4200mAh
<b>Largo(mm)</b>	200
<b>ancho(mm)</b>	50
<b>Alto(mm)</b>	
<b>Peso(kg)</b>	0.5

### 3.7.3. Conclusión para el diseño del módulo 5

Se concluye la selección de dos baterías de 12V 55Ah, conectadas en paralelo para obtener un suministro de energía de 24V 55Ah, para suministrar energía a los motores con un aproximado de duración de 1 hora, para el sistema de control se concluye el uso de 3 baterías: batería de 5V 4Ah para la tarjeta de adquisición, y sensores, con una duración estimada de 1 hora, batería de 19V 4.2A para la computadora abordo con una duración de estimada de 2 horas. La Tabla 85 muestra el requerimiento de amperaje total de la plataforma robótica móvil.

**Tabla 85***Requerimiento de amperaje de los elementos de la plataforma móvil*

<b>Elemento</b>	<b>Amperaje (A)</b>
<b>Smart Motor</b>	14,37
<b>Smart Motor</b>	14,37
<b>Computadora abordo</b>	4,76
<b>Raspbery PI</b>	0,8
<b>Router</b>	1
<b>Sensores</b>	0,5
<b>GPS</b>	0,55
<b>Amperaje total</b>	36,35



## **3.8. Módulo 6. Monitoreo y seguridad**

El modulo Monitoreo, y seguridad está encargado de proveer un entorno grafico que permita operar y monitorear la plataforma robótica, así como la selección de la cámara abordo para proporcionar un video en tiempo real del entorno.

### **3.8.1. Subsistema 1. Cámara a bordo**

A continuación se muestra las diferentes alternativas de cámaras, de las cuales se seleccionara la más adecuada acorde a la necesidad.

#### **3.8.1.1. Alternativas para la selección de cámaras.**

##### **3.8.1.1.1 Cámara Web**

Dispositivo de video diseñado para ser usado en conjunto con un ordenador, que permita la captura y transmisión de video a través de una red privada o pública

#### **Ventajas**

- Conexión plug and play
- Fácil instalación
- Bajo consumo energético
- Bajo costo

#### **Desventajas**

- Conexión por cable

- Dificultad en exteriores

#### 3.8.1.1.2Cámara IP

Dispositivo capaz de conectarse a la red por medio de una dirección IP, muchas de ellas traen incorporado un sistema de movimiento de dos grados de libertad, permite el envío de paquetes de datos comprimidos con lo cual se consigue velocidad y calidad en la transmisión de datos.

#### **Ventajas**

- Sistema mecánico de dos grados de libertad
- Buena calidad de video
- Conexión inalámbrica
- Compatibilidad con varios sistemas operativos

#### **Desventajas**

- Alto costo
- Alto consumo energético
- Se necesita software dedicado
- Difícil implementación

#### **3.8.1.2. Evaluación y selección de alternativas**

El factor más importante es la transmisión de video en tiempo real, para lo cual las dos cámaras cumplen con el requerimiento, debido al costo y a la facilidad de instalación y control se seleccionó la cámara web. En la Tabla 86 se enlistan las características técnicas de la cámara web:

**Tabla 86***Características técnicas cámara web*

<b>Característica</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Sensor de imagen</b>	color CMOS
<b>Cuadros por segundo</b>	25 Fps en adelante
<b>Angulo de visión</b>	desde 3cm
<b>balance de blancos</b>	automático
<b>Compensación de color</b>	automático
<b>Formato de imagen</b>	24bit RGB
<b>I/O interfaz</b>	USB 2.0

### 3.8.2. Subsistema 2. Interfaz

El subsistema Interfaz es el encargado de proporcionar una herramienta de comunicación, control y monitoreo para que la plataforma robótica móvil pueda ser operada desde una estación de trabajo por un operador.

#### 3.8.2.1. Alternativas para diseño

Para la selección del software a utilizar se tomara como partida los criterios mencionados en la tabla QFD.

Software libre

Software escalable y adaptable

Orientado hacia robótica

Entorno para desarrollo de HMI

HMI de fácil manejo

Capacidad de recibir video en tiempo real

Opciones para el software a utilizar:

### **Framework**

- Robot Operating System (ROS)
- Gobot
- Microsoft Robotics Studio

### **HMI**

- QT Designer
- 4D WORKSHOP IDE
- GTK+

#### **3.8.2.2. Evaluación y selección de alternativas**

##### **Sistema operativo ROS**

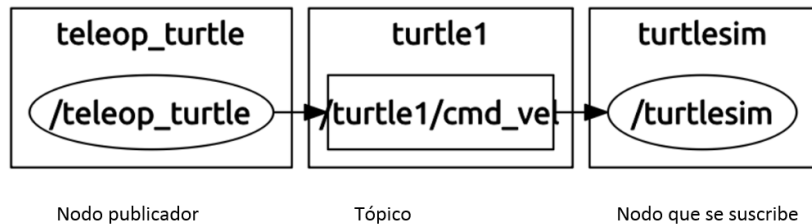
**Diseño modular:** ROS fue diseñado para ser lo más distribuido y modular posible, de modo que los usuarios pueden utilizar tanto o tan poco de ROS como deseen. La modularidad de ROS permite elegir qué partes son útiles para usted y qué partes prefiere implementar

**Soporte:** En los últimos años, ROS ha crecido para incluir una gran comunidad de usuarios de todo el mundo. Históricamente, la mayoría de los usuarios estaban en laboratorios de investigación, pero cada vez más estamos viendo la adopción en el sector comercial, particularmente en la robótica industrial y de servicios.

**Licencia permisiva:** El núcleo de ROS está licenciado bajo la licencia estándar BSD de tres cláusulas. Esta es una licencia abierta muy permisiva que permite la reutilización en productos comerciales y de código cerrado

**Entorno colaborativo:** ROS por sí mismo ofrece mucho valor a la mayoría de los proyectos de robótica, pero también ofrece una oportunidad de trabajar en red y colaborar con los robotistas de clase mundial que forman parte de la comunidad ROS. Una de las filosofías centrales en ROS es el desarrollo compartido de componentes comunes.

Está basado en arquitectura de grafos, maneja nodos que son los programas que se comunican a través de tópicos que son los canales por los cuales se envía y recibe mensajes ver *Figura 61*.



**Figura 61** Esquema de comunicación entre nodos sistema ROS

Los sistemas operativos que soportan ROS, son las plataformas con Unix, principalmente Ubuntu y MAC OSX. Dentro de las ventajas que destacan el uso de ROS se encuentra el ros-pkg el cual es una red de paquetes aportados por la contribución de usuarios que implementan todo tipo de funciones. Al ser un software libre se puede encontrar una gran cantidad de programas en internet.

### QT Designer

Potente editor de interfaces gráficas, con un gran número de herramientas, compatible con ROS mediante RQT, posee soporte para GNU/Linux, Mac OS x, Windows xp y superiores, se centra en

proporcionar características que ayudan a los nuevos usuarios, entre las cuales están: Editor de código con soporte para C+, QML y ECMAScript, Herramientas para la rápida navegación del código, Resaltado de sintaxis y auto-completado de código, Control estático de código y estilo a medida que se escribe, Soporte para refactoring de código, Ayuda sensitiva al contexto, Plegado de código (code folding). Cuenta con un depurador visual que muestra la información en bruto procedente de GDB de una manera clara y concisa.

### 3.8.3. Conclusión para el diseño del módulo 6

El diseño de software debe permitir la expansión de funciones tanto en la parte gráfica como en la de procesamiento y comunicación de información, Dentro de la interfaz gráfica se distribuirá de la siguiente manera la información y los controles de la plataforma robótica móvil.

Se compondrá de un ventana principal compuesta de dos pestañas, la primera pestaña mostrara la presentación del proyecto, institución y quien lo realizo, la segunda pestaña mostrara los controles y etapas de monitoreo de la plataforma ver *Figura 62*. A continuación se describen las diferentes secciones que compondrán la pestaña de control:

Sección 1: Contiene información de la distancia entregada por los sensores de proximidad.

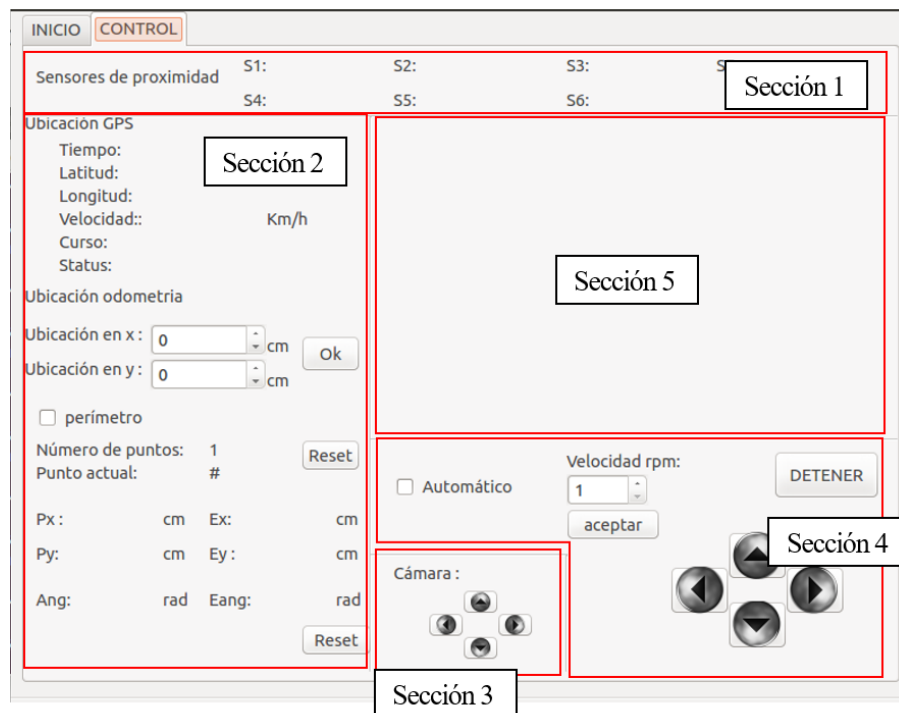
Pantalla de comandos: Esta sección posee los controles de movimiento de la plataforma móvil, así como los controles para el movimiento de la cámara.

Sección 2: Se visualizaran los datos de la ubicación global de la plataforma móvil enviada por el GPS, contiene la ubicación por odometria, posee campos que permiten el ingreso de las coordenadas del punto deseado, se visualiza los datos de la posición xy de la plataforma, su ángulo de orientación, así como la diferencia entre la posición actual y la posición deseada, así como la activación del modo perímetro.

Sección 3: Contiene los controles para mover la cámara abordo.

Sección 4: Contiene los controles principales de la plataforma robótica móvil los cuales permiten desplazar la plataforma, ingresar la velocidad de desplazamiento en rpm y cambiar el modo de operación de la plataforma de manual a automático.

Sección 5: Se visualizará el video enviado por la cámara web en tiempo real.

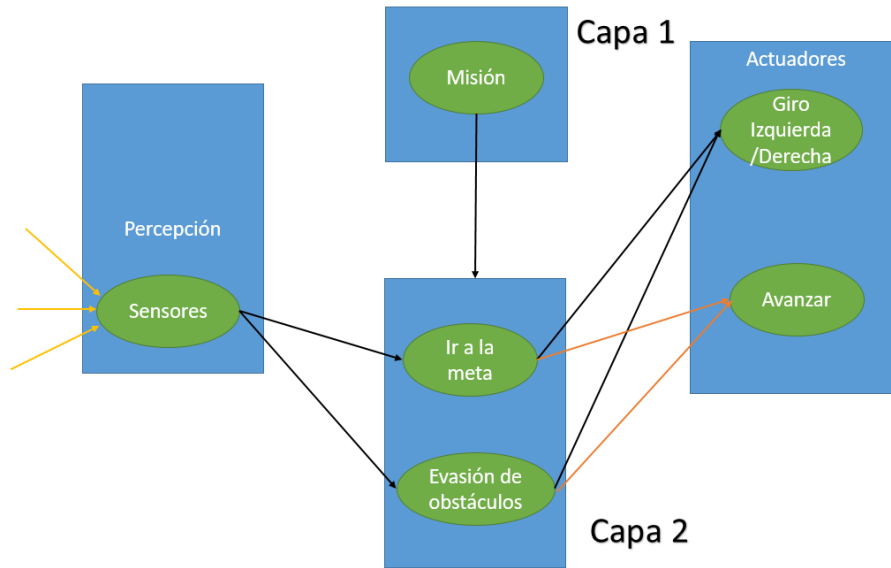


**Figura 62** Distribución de secciones de la pestaña de control de la HMI

### 3.9. Módulo 7. Navegación reactiva

El módulo se encarga de la descripción de los comportamientos necesarios para lograr que la plataforma robótica realice el desplazamiento de un punto a otro con la capacidad de evadir obstáculos que se presenten en su ruta, se muestra los diagramas de flujo que corresponde al conjunto de comportamientos a implementar.

La *Figura 63* muestra el esquemático de la arquitectura implementada.



**Figura 63** Arquitectura para la implementación de la navegación reactiva

El sistema de percepción consta de:

- Sensores internos: Encoders
- Sensores Externos: Cámara abordo, GPS, Conjunto de sensores Ultrasónicos

Capa 1: Se encarga de enviar al comportamiento ir a la meta, la información del punto que especifica el usuario a través de la interfaz gráfica. Este comportamiento de alto nivel proporciona la interacción entre las órdenes del usuario y la acción de la plataforma robótica móvil.

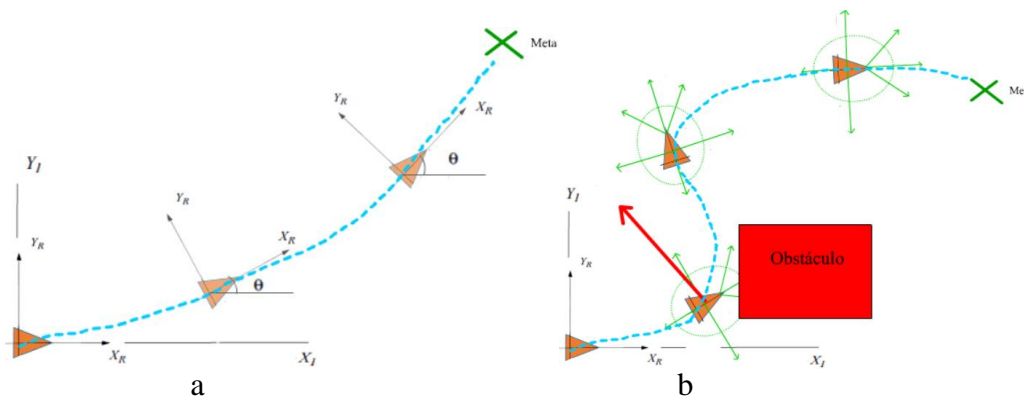
Capa 0: Se compone de dos comportamientos que se combinan para posicionar y orientar el robot en el punto objetivo entregado por la capa 1, si algún objeto se presenta en la ruta el comportamiento evadir obstáculos modifica la trayectoria del robot para lograr esquivar el obstáculo, una vez evadido el obstáculo, el robot vuelve a retomar el comportamiento de ir a la meta, la activación de los comportamientos están gobernada por una máquina de estados que constantemente está verificando la información enviada por los sensores de proximidad cada comportamiento de esta etapa tiene total acceso al sistema de percepción, así



como al sistema de control de bajo nivel que opera el comportamiento de los motores. A continuación se describe el funcionamiento de cada comportamiento de la capa 0. Comportamiento Ir a la meta: Se encarga de procesar la información enviada por el nodo que realiza la odometría, compara esta información con la información enviada por el comportamiento misión de la capa 1, obteniendo un error de posición y orientación el cual se corrige a través de un controlador PID, esta información es transformada a velocidades en rpm que son enviadas al controlador de bajo nivel para modificar el comportamiento de los motores el diagrama de flujo que describe el comportamiento se puede ver en la *Figura 65*, Consiguiendo así que el error entre la posición actual y la que especifica el usuario tienda a ser cero, este ciclo se repite constantemente hasta que la plataforma robótica móvil alcance el punto objetivo, si los sensores de proximidad detectan una distancia crítica de operación el comportamiento se detiene dando paso al siguiente comportamiento, una vez que la distancia crítica deje de ser detectada, el comportamiento vuelve a operar. La representación del funcionamiento se puede ver en la *Figura 64a*, donde la línea entrecortada marca la trayectoria que sigue el robot.

Comportamiento Evasión de obstáculos: Se activa cuando los sensores de proximidad detectan una distancia igual o menor a la distancia de detección, una vez el sistema de percepción detecta que ha salido de la distancia de detección el comportamiento se desactiva. El comportamiento obtiene las señales percibidas por los sensores de proximidad, mediante la ayuda de matrices de Rotación se ubica la distancia medida por cada sensor en función de su ubicación en la plataforma robótica y del marco de referencia global, realizando un conjunto de vectores los cuales se suman, los vectores de menores dimensiones correspondientes a los sensores que detectan obstáculos más próximos, dichos vectores serán los que menos aporten a la suma vectorial, por lo tanto el vector resultante ubicara un punto que aleja a la plataforma de los obstáculos detectados, la plataforma corrige el rumbo mediante un controlador PID que genera que el error de posición

y orientación entre el vector resultante y la posición actual del robot tiende a cero, esta información es transformada a velocidades en rpm que son enviadas al controlador de bajo nivel para modificar el comportamiento de los motores. La *Figura 65* muestra el diagrama de flujo para la implementación del comportamiento. La representación del funcionamiento se puede ver en la *Figura 64b*.



**Figura 64 a)** Muestra el marco de referencia global  $X_I, Y_I$ , y el marco de referencia local  $X_R, Y_R$ , el robot empieza en un punto 0,0,0 en el cual coinciden el marco de referencia global y local, a medida que se desplaza corrige el rumbo para alcanzar la posición de la meta. **b)** Muestra el conjunto de vectores obtenidos de los sensores de proximidad representados por las flechas verdes, el círculo verde representa la distancia de detección, la flecha roja representa el vector resultante, que modifica el rumbo del robot hasta que sale de la distancia de detección y retoma el rumbo hacia la meta.

### 3.9.1. Comportamiento Ir a la meta

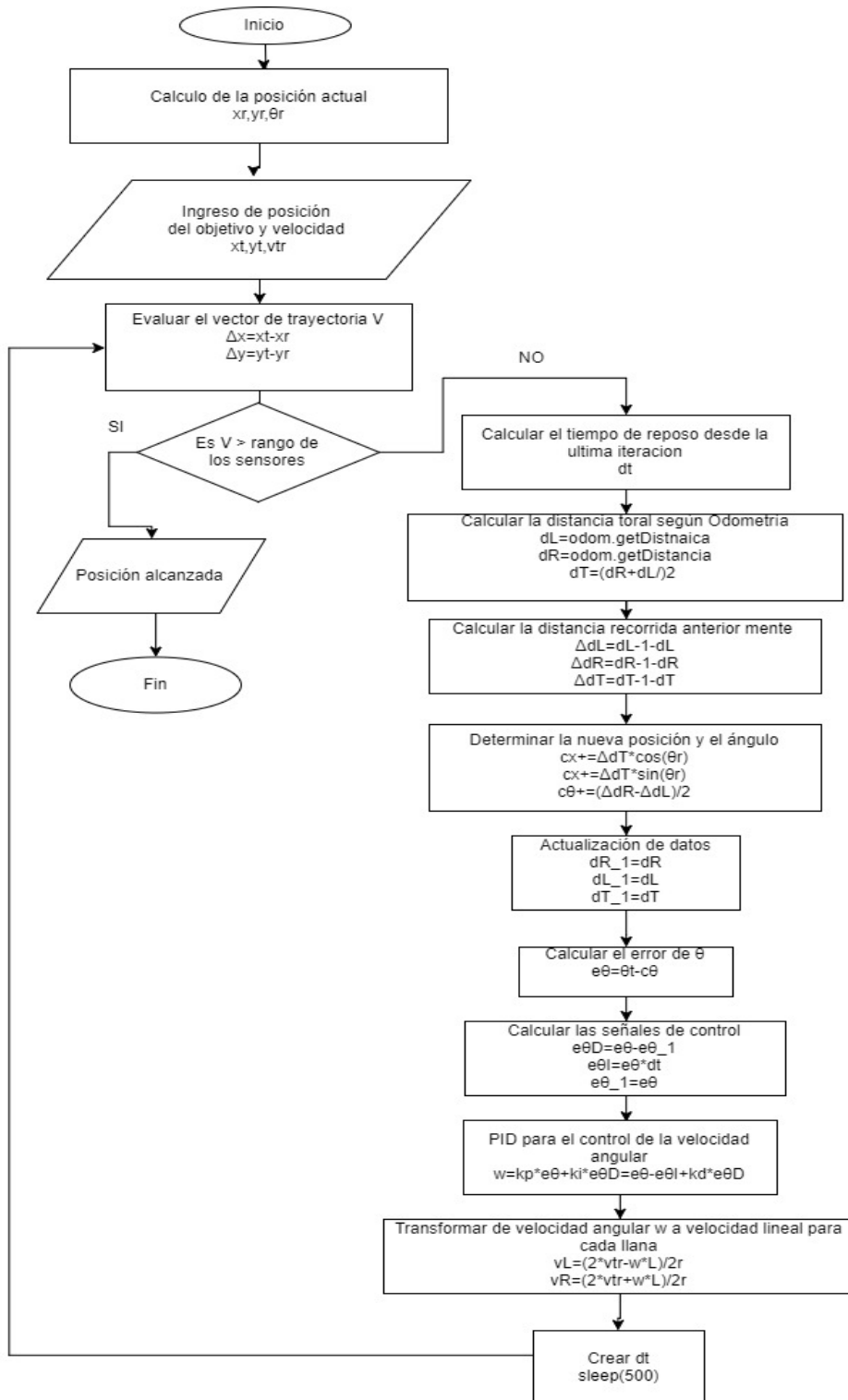
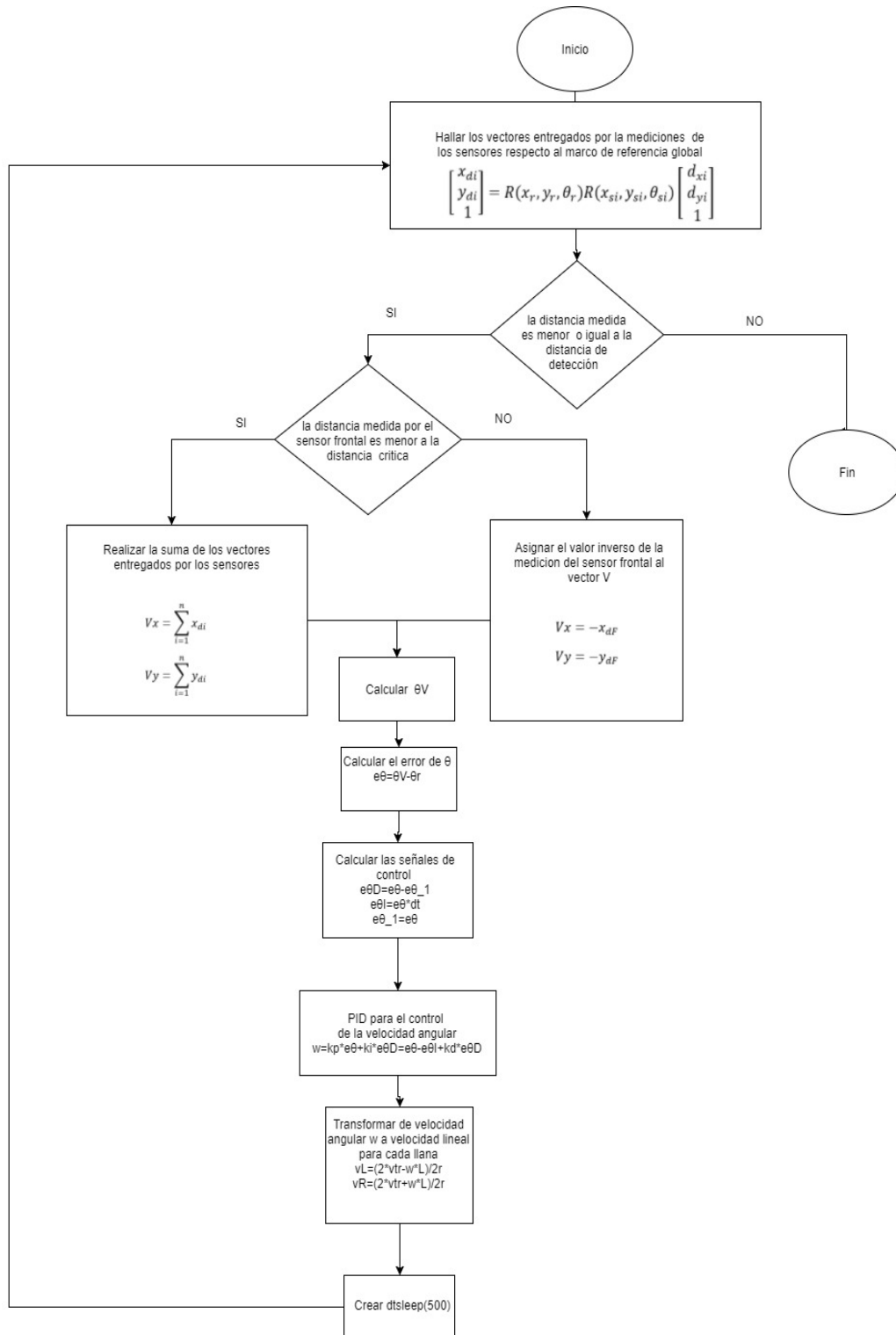


Figura 65 Diagrama de flujo comportamiento Ir a la meta

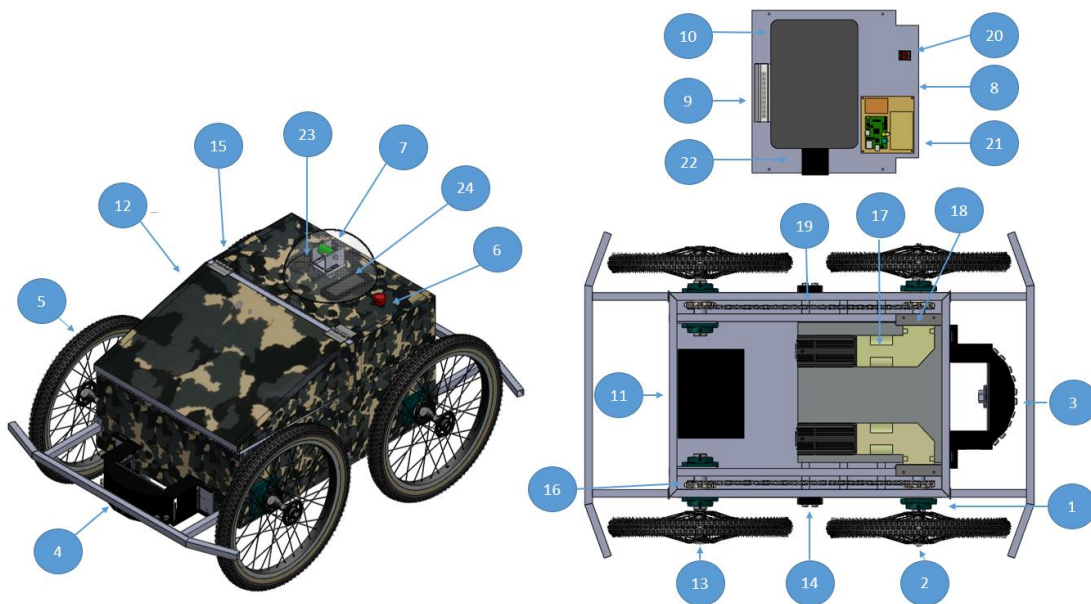
### 3.9.2. Comportamiento evasión de obstáculo



**Figura 66** Diagrama de flujo comportamiento evadir obstáculos

### 3.10. Diseño del concepto final

Se concluye el diseño de la plataforma robótica móvil con la unión de todos los módulos anteriormente diseñados para dar lugar al concepto final, a continuación se muestra en la *Figura 67*, los elementos que conforman la plataforma robótica móvil. En la *Tabla 87* se enlistan los componentes



**Figura 67** Elementos del diseño final: 1), Chumacera de pared 2) Eje delantero, 3) Carcasa frontal sensores de proximidad, 4) Parachoques, 5) Ruedas, 6) paro de emergencia, 7) Cámara, 8) Tablero de control, 9) Modem, 10) Computadora abordo, 11) Baterías 12v 55Ah, 12) Chasis, 13) Eje trasero, 14) Carcasas laterales sensores de proximidad, 15) Tapa, 16), 17) Piñón 17 dientes, 18,) Acople para cajas de reducción 19) Cadena número 40, 20) Switch de control, 21) RaspberryPi, circuito de acondicionamiento y circuito de energía 5V, 22) Batería 12V, 23) GPS, 24) Batería 5V

**Tabla 87**

*Descripción de elementos que conforman la plataforma móvil*

Denominación	Descripción	Modulo
1	Chumacera de pared	Estructura
2	Eje delantero	Locomoción
3	Carcasa frontal sensores de proximidad	Estructura

CONTINUA



4	Parachoques	Estructura
5	Ruedas	Locomoción
6	Botón paro de emergencia	Suministro de energía
7	Cámara	Monitoreo y seguridad
8	Tablero de control	Estructura
9	Modem	Monitoreo y seguridad
10	Computadora abordo	Ubicación. Procesamiento y adquisición de datos
11	Baterías 12v 55Ah	Suministro de energía
12	Chasis	Estructura
13	Eje trasero	Locomoción
14	Carcasas laterales sensores de proximidad	Estructura
15	Tapa	Estructura
16	Piñón 17 dientes	Locomoción
17	Caja de reducción 10:1	Locomoción
18	Acople para cajas de reducción	Estructura
19	Cadena numero 40	Locomoción
20	Conmutadores	Suministro de energia
21	Raspberry Pi, circuito de acondicionamiento y circuito de energía 5V	Ubicación. Procesamiento y adquisición de datos
22	Batería 12V	Suministro de energía
23	GPS	Ubicación. Procesamiento y adquisición de datos
24	Batería 5V	Suministro de energía

### 3.11. Resumen

- Mediante la identificación de las necesidades del cliente se recogen los aspectos fundamentales del producto a desarrollar, dichas necesidades se transforman a un lenguaje técnico, para formular una lista de características y requerimientos con lo cual se aborda el proyecto de una forma clara y objetiva.
- Las principales características técnicas de la plataforma robótica móvil son: Estructura sellada e impermeable, Materiales resistentes a impacto, Dispositivos internos ubicados en posiciones accesibles, Diámetros de ruedas y distancia entre ejes acorde a las dimensiones del robot móvil, Tracción en las 4 llantas, Baterías capaces de abastecer todo el sistema durante 1 hora, Alcance de tele operación de 50 metros, Transmisor de video, posición, en tiempo real, Sensor de detección de objetos, Software de programación robótica de acceso libre, Odometría, Sensor de posición global, Motores de alto torque, Capacidad de desensamble de los elementos internos y externos.
- Mediante el análisis de las características técnicas y haciendo uso de la matriz QFD se crea una estructura funcional que distribuye en módulos las características técnicas a fin de plantear diversas soluciones y escoger la que mejor se adapte a las necesidades planteadas para cada módulo. Los módulos obtenidos son: 1) Locomoción, 2) Estructura, 3) Ubicación, procesamiento y adquisición de datos, 4) Comunicación 5) Suministro de energía, 6) Monitoreo y seguridad, 7) Navegación reactiva.
- Utilizando el método ordinal corregido de criterio ponderado se generan soluciones para cada módulo, las soluciones seleccionadas para cada módulo se exponen en la Tabla 88.

**Tabla 88***Soluciones a los módulos planteados*

<b>N°</b>	<b>Módulo</b>	<b>Subsistemas</b>	<b>Solución</b>
<b>1</b>	Locomoción	Trasmisión	Smart motor, Sistema diferencial, transmisión por cadena.
		Ruedas	Ruedas de bicicleta rin #20
		Diseño de ejes	Acero 4340
<b>2</b>	Estructura	Diseño del chasis	Acero A 36 geometría rectangular.
		Impermeabilización	Empaques de caucho.
<b>3</b>	Ubicación, adquisición y procesamiento de datos	Adquisición y procesamiento de datos	Raspberri PI 2
		Edometría	Uso de encoder internos
		Posición global	GPS BU-353-SA
<b>4</b>	Comunicación	N/A	Tecnología WLAN
<b>5</b>	Suministro de energía	Potencia	Baterías
		Control	Baterías
<b>6</b>	Monitoreo y seguridad	Cámara abordo	Cámara web
		Interfaz	ROS, Python y Qtdecing
<b>7</b>	Navegación reactiva	N/A	ROS, Python



## Capítulo 4

# Construcción y pruebas

El siguiente capítulo se expone los procesos de construcción y ensamble de los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, que conforman la plataforma robótica de exteriores, exponiendo también las pruebas y resultados obtenidos a partir de evaluar los distintos componentes de la misma.

### 4.1. Elementos mecánicos

A continuación se mencionan los procesos de manufactura realizados para la elaboración de los componentes mecánicos de la plataforma robótica móvil así como su ensamble.

#### 4.1.1. Construcción del chasis

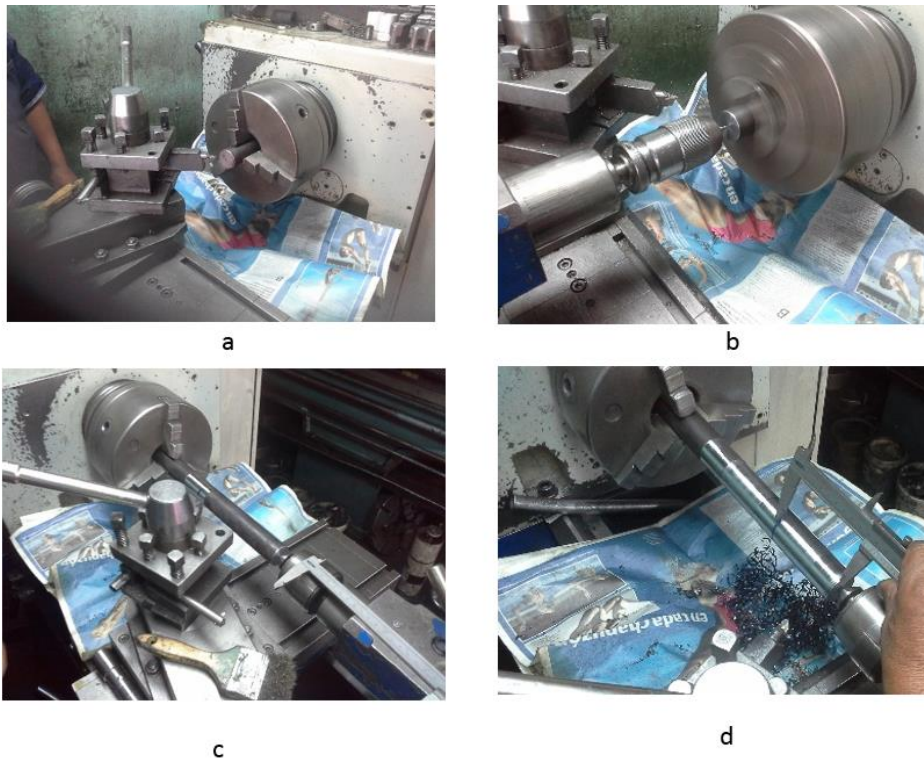
Se realizó el corte de las diferentes piezas de tubo cuadrado ASTM A36 de 20x20x1.5 mm, después se taladrado con broca de 3 mm, según los planos realizados, la base fue realizada en tol ASTM A36 de 1mm de espesor, las distintas piezas de tubo cuadrado y la base fueron soldadas con electrodo E6011 acorde al modelo CAD con lo cual se consiguió formar un solo cuerpo ver *Figura 68*, los planos se muestran en el anexo B.



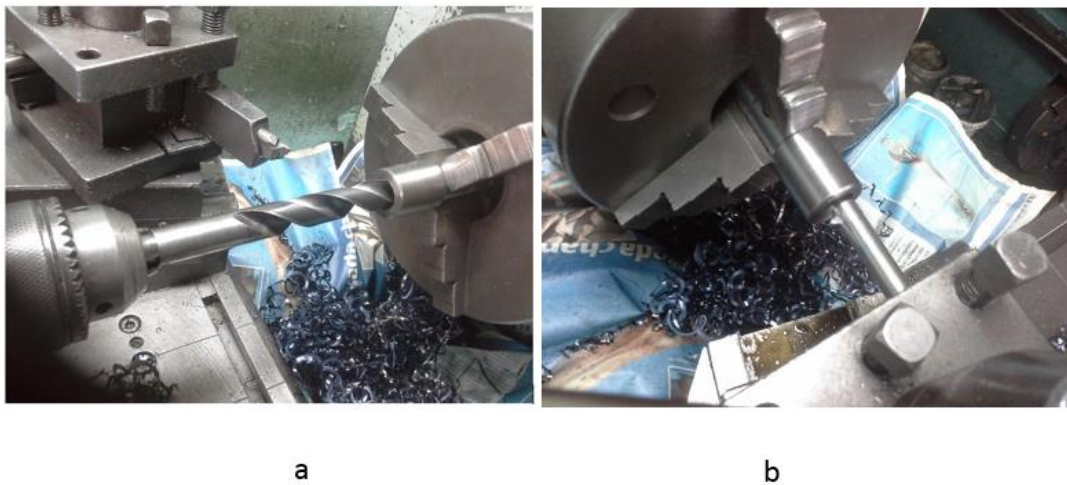
*Figura 68* Chasis para plataforma robótica móvil

#### 4.1.2. Mecanizado de los ejes

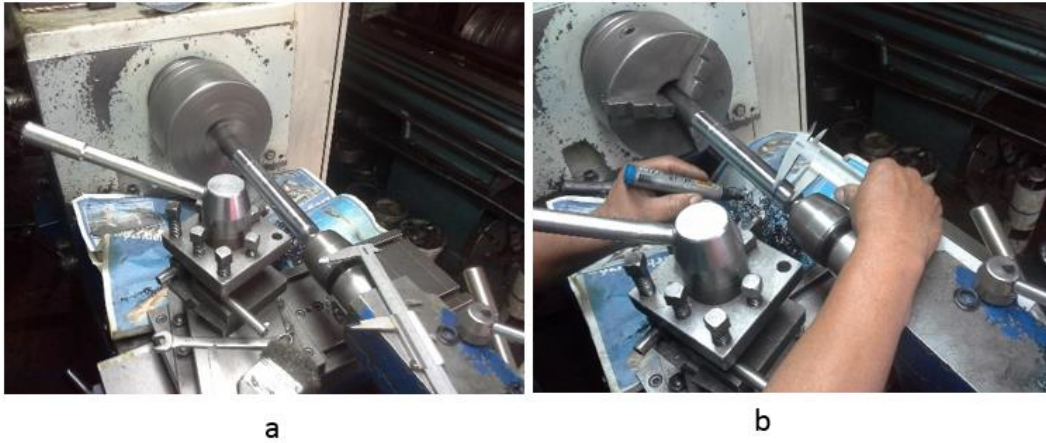
La plataforma robótica móvil consta de dos pares de ejes fabricados en acero AISI 4043, los ejes fueron, refrenados ver *Figura 69a*, después se tomó la medida total, y se cilindro el diámetro de mayor dimensión ver *Figura 69c*, para continuar con el cilindrado de las demás secciones que permitirán acoplar los distintos elementos, tales como chumaceras, piñones, cajas de reducción. El par de ejes delantero consta de un agujero circular interno de 19 mm de diámetro realizado mediante taladrado ver *Figura 70a* y mandrinado ver *Figura 70b*, esta sección tiene dos pasadores roscados M6 que se consiguió taladrando y machuelando los orificios ver figura 70, que les permiten acoplarse a las cajas reductoras, seguido de una sección la cual fue cilindrada para obtener un diámetro de 1 pulgada ver *Figura 71*, donde se ubica el piñón, el cual es asegurado por dos pasadores roscados M6 separados por un Angulo de  $90^\circ$ , mediante la operación de tronzado se realizó una ranura para anillo de retención de 1.3 mm de ancho y 1.05 mm de profundidad para prevenir posibles deslizamientos axiales del piñón y la chumacera externa ver *Figura 72*, mediante el torneado cónico se realizó una sección cónica que facilita el acople de la manzana de la rueda la cual queda solidaria al eje mediante presión, ejercida por el conjunto de arandela de presión y tuerca de seguridad ubicadas en la rosca mecanizada en la última sección del eje. El par de ejes posteriores posee una sección la cual fue cilindrada para obtener un diámetro de 1 pulgada en la cual se acopla la chumacera de pared interna ver *Figura 74*, al igual que el par de ejes delanteros poseen una sección cónica y el acople de la llanta se realiza por medio del conjunto de arandela de presión y tuerca de seguridad ubicadas en la última sección roscada del eje ver *Figura 73 a*, los ejes terminados se muestran en la *Figura 75*.



**Figura 69** Procesos de manufactura iniciales para el torneado de los ejes, a) Refrentado, b) Punto, c) Cilindrado, d) Toma de medidas.



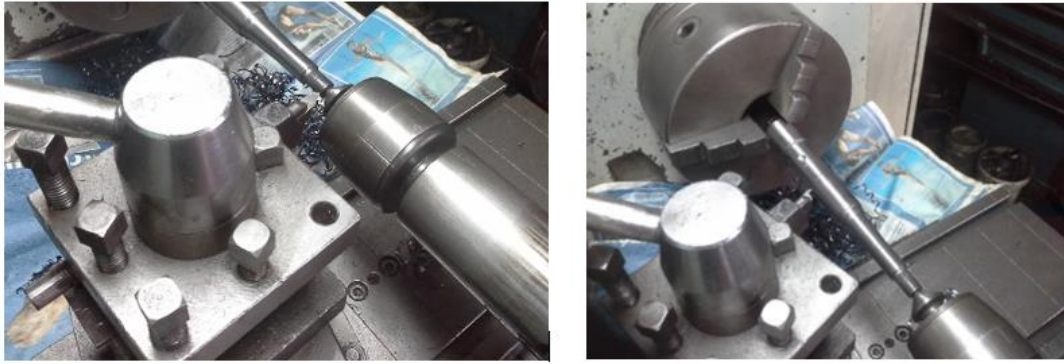
**Figura 70** Operaciones para acoplar la caja de reducción, a) Taladrado, b) Mandrinado



**Figura 71** Muestra la operación de a) cilindrado del diámetro de 1 pulgada, b) División de las secciones



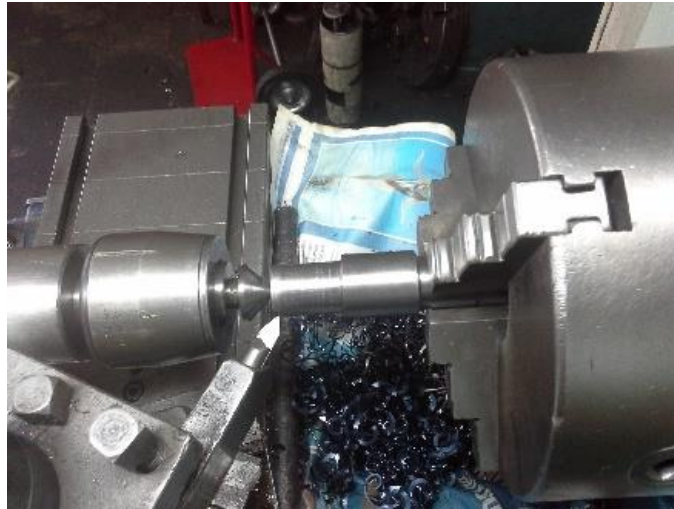
**Figura 72** Se muestra las operaciones realizadas para los pasadores roscados M6 a) Taladrado, b) Machuelado



a

b

**Figura 73** Muestra las operaciones para los elementos de sujeción a) Roscado, b) Tronzado



**Figura 74** Cilindrado de la primera sección eje b



*Figura 75* Ejes a y b

#### 4.1.3. Mecanizado de las manzanas de las llantas

Para conseguir acoplar las llantas al eje, se realizó la operación de mandrinado para agrandar uno de los agujeros laterales ver *Figura 76*, obteniendo un agujero de mm de diámetro, permitiendo así que se acople al eje ver *Figura 77*.



*Figura 76* Proceso de mandrinado en la cara lateral de manzana



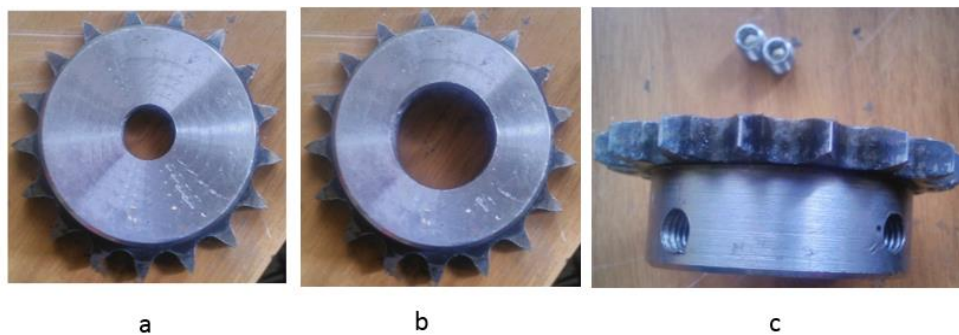
**Figura 77** En la izquierda se muestra la manzana antes del mecanizado, a la derecha se muestra la manzana ya mecanizada

#### 4.1.4. Mecanizado de piñones

EL mecanizado de los piñones consistió en taladrar y mandrilar el agujero central para obtener un agujero central de 1 pulgada de diámetro, así como el taladrado de dos agujeros laterales separados  $90^\circ$ , realizados con broca mm que luego fueron machuelados para pasadores 8M rosca fina. El conjunto de operaciones se muestra en la *Figura 78*, el resultado se muestra en la *Figura 79*.



**Figura 78** Procesos de manufactura realizada en el piñón, a) Taladrado agujero central, b) Mandrinado, c) Taladrado para pasadores, d) Machuelado.



**Figura 79** Piñón mecanizado a) Muestra el piñón antes del mecanizado, b) Muestra el mecanizado del agujero central, c) Muestra el mecanizado para los pasadores M8



#### 4.1.5. Mecanizado de elementos de sujeción para las cajas de reducción

Con la finalidad de facilitar el ensamble y desensamble de las cajas reductoras se realizó un elemento de acople para las mismas la cual consta de dos piezas de acero AISI A36 de espesor 6 mm soldadas con electrodo E6011. Luego se taladro y rosco cuatro agujeros M5 rosca fina que permiten unir las cajas de reducción. Se taladro dos agujeros superiores para tornillos M5 y dos agujeros laterales para tornillos M5, que permiten anclar las piezas al chasis ver *Figura 80*.



*Figura 80* Elemento de sujeción para las cajas de reducción

#### 4.1.6. Corte de coberturas laterales

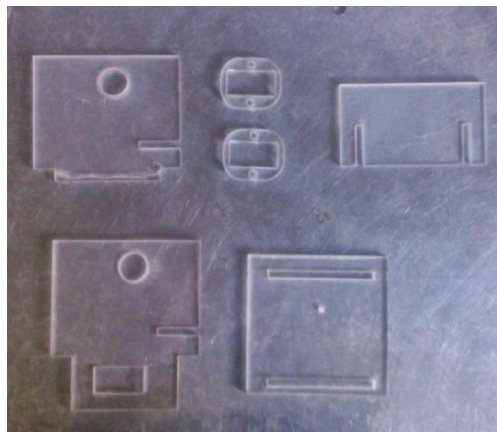
Para realizar la cobertura de lateral y frontal de la plataforma se cortó 6 planchas de tol de 0.5 mm ASTM A36, después se taladro los agujeros con broca de 3mm según el anexo B, después se cubrió con adhesivos con lo cual se consigue protección frente a las condiciones del medio ambiente, y se mejora la estética de la plataforma. Ver *Figura 81*.



*Figura 81* Coberturas laterales

#### 4.1.7. Carcasa para cámara web

Para poder dotar de dos grados de libertad a la cámara web, se diseñó una carcasa en acrílico de 2 mm que junto a dos servo motores S permiten mover la cámara. También se diseñó un domo protector, el cual fue realizado en acrílico transparente termo formado, en la *Figura 82* se muestran las partes y el ensamble.



*Figura 82* Elementos de la estructura de la cámara

#### 4.1.8. Carcasa para sensores ultrasónicos

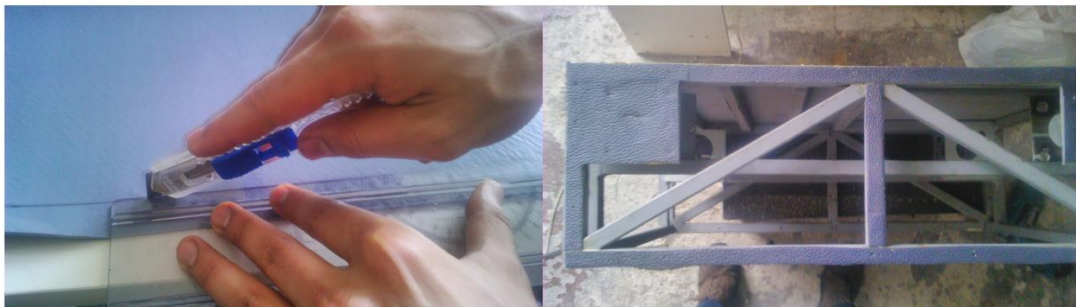
Las carcasas para los sensores ultrasónicos se realizaron en impresión 3D según el modelo CAD. Costa de 3 carcasas dos laterales y una central. La carcasa central tiene un acople de  $\frac{3}{4}$  de pulgada conectado a una manguera, para proteger el ingreso de los cables a la plataforma y mantenerla impermeable, *Figura 83*.



*Figura 83* Piezas que componen la carcasa para los sensores ultrasónicos

#### 4.1.9. Impermeabilización de la estructura

Para lograr una impermeabilización completa se fabricó un empaque en plancha de caucho de 1mm, que recubre los bordes de la plataforma robótica y la tapa, lo cual impide el ingreso de polvo y agua a la plataforma sin interferir con la característica de desmontaje. El proceso se puede ver en la *Figura 84*.



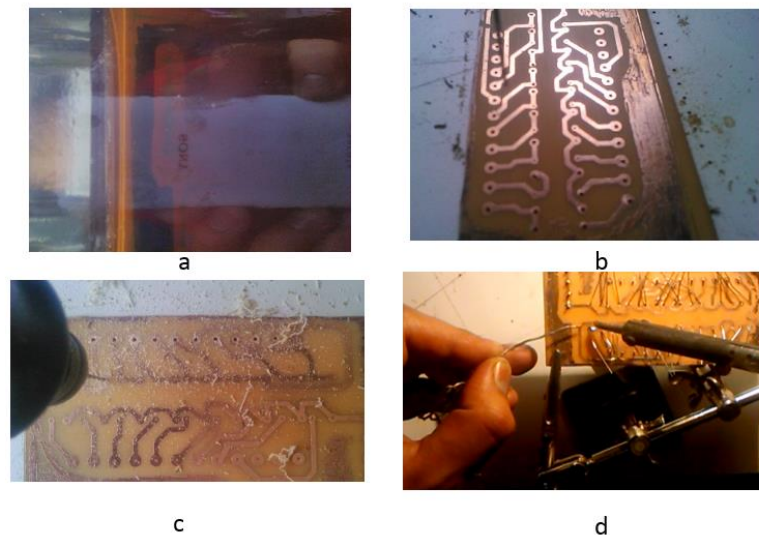
*Figura 84* Manufactura y colocación de empaques

## 4.2. Elementos electrónicos

El sistema electrónico consta de dos placas PCB, una destina a servir de acondicionamiento para la señal que envían los sensores ultrasónicos, mientras otra sirve para administrar la fuente de 5V.

### 4.2.1. Construcción de la placa

Para elaborar las dos placas PCB la primera que servirá para la de etapa de acondicionamiento de los sensores ultrasónicos, la segunda que servirá para las conexiones a 5V, Una vez elaborado el circuito se imprimió el diseño en la baquelita, a continuación se la sumergió en ácido Percloruro de Hierro y se la dejó reposar por 1 hora, se taladro los terminales y se ubicó los elementos de cada placa para posteriormente soldar con estaño los elementos a la placa ver *Figura 85*.



**Figura 85** Se muestra el proceso de manufactura para fabricar las placas PCB a) colocación de la placa en ácido Percloruro de Hierro, b) Se extrae y limpia la placa, c) Taladrado de los agujeros para los elementos electrónicos, d) Suelda de los elementos electrónicos.

#### 4.2.2. Construcción de cables

Se realizó la adaptación de los cables que permiten comunicar los motores Smart motos con la computadora abordo siguiendo el esquema presentado en el módulo 1 *Figura 86.*, también se realizó los cables para el puerto DB 15 que poseen los motores con los cuales se transmite la información de los encoders internos a la tarjeta de adquisición.



*Figura 86* Cables para el conector DB9 a ) Suelda de cables, b) Cable terminado

### 4.3. Sistema de control

El sistema de control constas de 9 nodos, desarrollados en el sistema operativo para robots (ROS), y Python, y dos nodos utilizados del paquete de percepcion los cuales nos permiten controlar la plataforma robótica por medio de una interfaz gráfica desarrollada en QT4 designer.

#### 4.3.1. Desarrollo de los nodos de control

El desarrollo de los nodos fue pensado para mantener cada nodo dedicado a un proceso específico, con lo cual se agiliza la detección de problemas o la adición de futuros nodos, la plataforma robótica está diseñada en base a una estructura de comunicación WLAN, esto permite correr diferentes partes del sistema total en las tres computadoras que conforman el sistema de control. La lista de nodos desarrollados se muestra en la Tabla 89, la Tabla 90 muestra los tópicos que permiten la intercomunicación entre ellos. Del grupo de 11

nodos, 4 corren en el sistema embebido Raspberry pi, 6 corren en la computadora abordo mientras que en el computador remoto corre 1.

**Tabla 89**

*Lista de nodos del sistema.*

<b>Nodo</b>	<b>Función</b>
<b>OA</b>	Comportamiento de evasión de obstáculos
<b>encoder</b>	Recibe y envía el número de pulsos detectados por los encoders internos de los motores
<b>gps</b>	Recibe y Envía la información captada por el gps
<b>gtg</b>	Comportamiento de ir a la meta
<b>hmi_ugv</b>	Interfaz humano maquina
<b>imagen_view</b>	Envía la imagen captada por la cámara
<b>motor</b>	Controla el giro de los motores
<b>odom</b>	Realiza el cálculo odométrico
<b>radar</b>	Recibe y Envía las distancias captadas por los sensores ultrasónicos
<b>servo</b>	Modifica la posición de los servo motores de la cámara
<b>usb_cam</b>	permite el uso de la cámara usb

**Tabla 90**

*Lista de tópicos del sistema*

<b>Tópico</b>	<b>información</b>
<b>cmov</b>	Posición de los servo motores de la cámara
<b>exey_topic</b>	Errores de posición y orientación
<b>gpst</b>	Datos del gps
<b>imagen_view/parameter_descriptions</b>	Contiene los parámetros de la imagen
<b>imagen_view/parameter_updates</b>	Actualiza los parámetros de la imagen
<b>usb_cam/imagen_raw</b>	Contiene la imagen sin modificaciones
<b>man_aut</b>	Estado de la plataforma robótica manual o automático
<b>obs</b>	Contiene vector resultante obtenido por el nodo OA
<b>raspodo</b>	Contiene los pulsos enviados por el nodo encoder
<b>rst</b>	Resetea el nodo de odometría
<b>sensores</b>	Comunica las distancias de los sensores ultrasónicos
<b>target</b>	Comunica la posición del objetivo ingresada por el usuario en la interfaz humano maquina
<b>vel</b>	Comunica la velocidad de los motores
<b>xyt</b>	Comunica la posición y orientación de la plataforma robótica calculada por el nodo de odometría

#### 4.3.2. Desarrollo de la Interfaz humano maquina

Dentro del desarrollo de la interfaz gráfica se tomó en cuenta la distribución de la información necesaria para monitorear y controlar la plataforma robótica, se ubicaron los elementos dentro de los espacios asignados en la etapa de diseño.

La interfaz consta de dos pestañas, la primera es la pestaña de inicio donde se indica el título del proyecto y quien lo realizo ver *Figura 87*, la segunda pestaña es la pestaña de control en la cual podemos identificar las siguientes 5 secciones cada una encargada de una función de control o monitoreo de la plataforma como se muestra en la *Figura 88*.

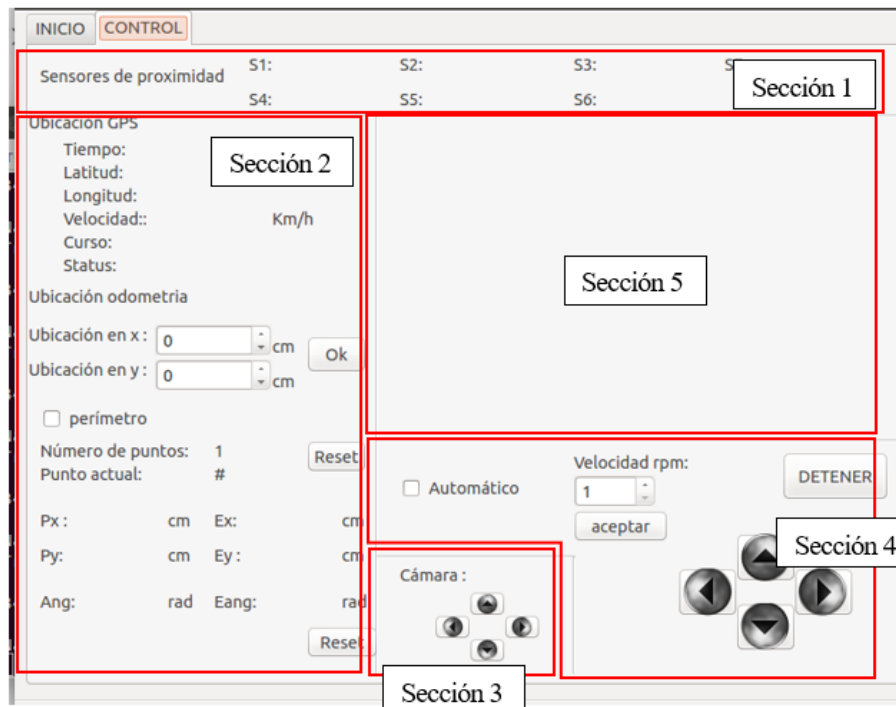
Pestaña INICIO: Muestra la presentación del proyecto en está pestaña podemos identificar la institución, el nombre del proyecto y quien lo realizó.



*Figura 87* Pestaña de inicio

Pestaña CONTROL: Nos muestra la información necesaria para operar y monitorear la plataforma, a continuación se describe sus elementos y funcionamiento:





**Figura 88** Pestaña de control, se identifican las diferentes secciones

Sección 1: muestra las distancias enviadas por los sensores de proximidad, *Figura 89*

Sensores de proximidad	S1:	S2:	S3:	S7:
	S4:	S5:	S6:	

**Figura 89** Sección 1 se identifican la distribución de la información enviada por los sensores de proximidad

Sección 2:

**Figura 90** Sección 2 Ubicación GPS, y Ubicación por odometría

Está compuesta por:

- Ubicación GPS Muestra la posición y orientación de la plataforma, Aquí podemos apreciar los datos enviados por el sistema de posicionamiento global GPS, podemos identificar los siguientes campos: Tiempo, longitud, latitud, velocidad, curso, estatus ver *Figura 90*.
- Ubicación odometría, podemos identificar tres aspectos principales.
  1. Ingreso del punto coordenado al cual se desea mover la plataforma *Figura 91*.

**Figura 91** Casilleros para el ingreso del punto coordenado

2. Configuración de modo perímetro *Figura 92*.

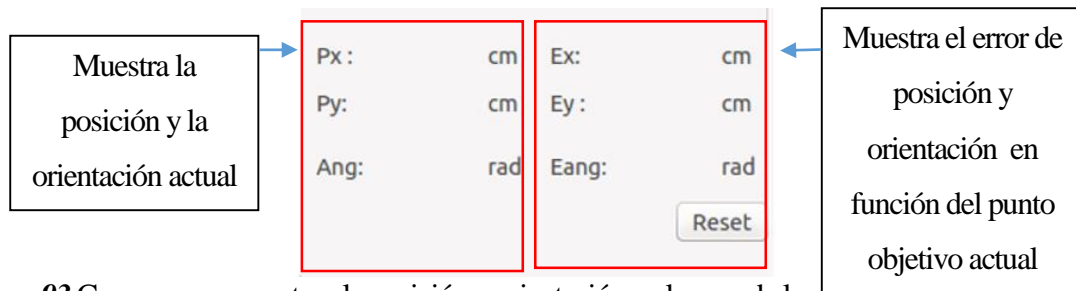
**Figura 92** Campos para activar el modo perímetro

- El check box  `perimetro` si se encuentra activado, permite asignar hasta cuatro puntos diferentes para que la plataforma robótica se mantenga realizando un perímetro.
- El texto número de puntos: Muestra la cantidad de puntos clave que forman el perímetro
- El texto de punto actual: Indica a qué punto se está dirigiendo la plataforma robótica

Estos campos solo se activan si la plataforma robótica está en modo perímetro.


- El botón `Reset` nos permite resetear todos los puntos del perímetro, para poder ingresar un nuevo conjunto de puntos.

### 3. Posición y orientación



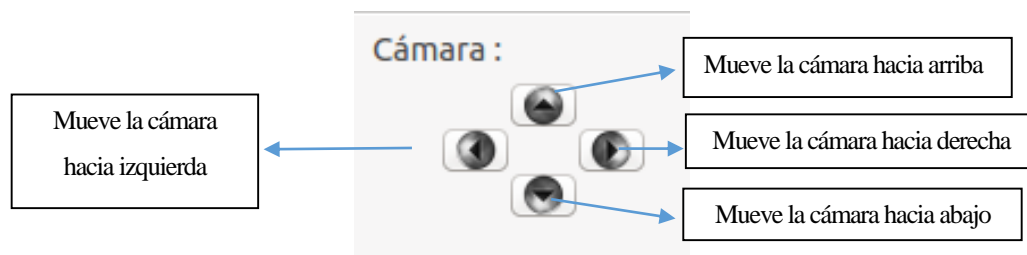
**Figura 93** Campos que muestran la posición y orientación y el error de la plataforma respecto al punto objetivo

En la *Figura 93* en el lado izquierdo se muestran la posición en  $x$ ,  $y$  así como la orientación de la plataforma en radianes, en el lado derecho se muestra el error de posición y orientación actual de la plataforma respecto al punto objetivo. Los campos de error solo se activan si la plataforma está en modo automático.

El botón de  nos permite encerrar la posición y orientación de la plataforma robótica móvil para generar un nuevo marco de referencia global.

Sección 3: Muestra los controles que permiten mover la cámara hacia arriba, abajo, izquierda, derecha

*Figura 94.*




**Figura 94** Controles de la cámara

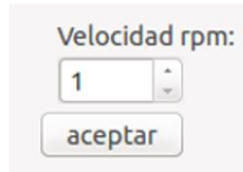
Sección 4: muestra los controles de operación principales ver *Figura 95*.



**Figura 95** Controles principales de la plataforma robótica.

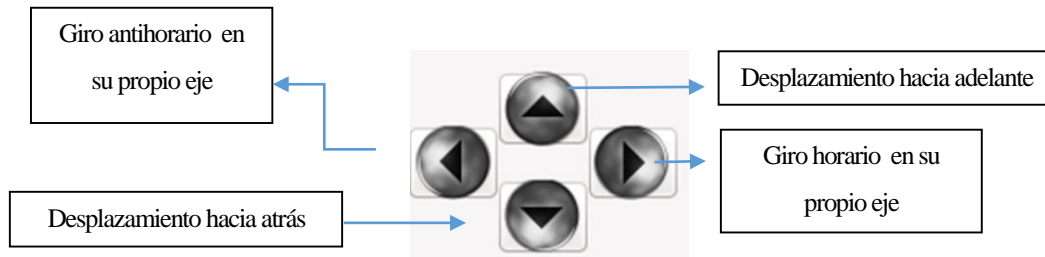
Está compuesta por:

- Un check box  **Automatico** que permite cambiar el funcionamiento de la plataforma robótica de modo manual a modo automático, para que la plataforma funcione en modo automático se debe ingresar previamente un punto coordinado en los campos de la ubicación por odometría (sección 2).
- Un texto de ingreso y un botón de aceptar los cuales permiten ingresar la velocidad de la plataforma en rpms teniendo la capacidad de ingresar un rango entre 1-30 rpms ver *Figura 96*.



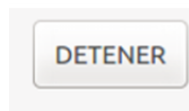
**Figura 96** Casillero para ingresar la velocidad en rpms

- Controles principales: permiten desplazar manualmente a la plataforma ver Figura 97.



**Figura 97** Controles de desplazamiento de la plataforma robótica.

- Botón Detener detiene la plataforma robótica ver Figura 98.



**Figura 98** Botón de paro.

Sección 5: Muestra el video en tiempo real entregado por la cámara abordo ver Figura 99.



**Figura 99** Sección 5, video en tiempo real

### 4.3.3. Router y cámara web

Se realizó la instalación del router y la cámara web con su carcasa y domo de protección, así como sus respectivas conexiones, la cámara web esa conectada al puerto USB de la computadora abordo, la computadora abordo y el sistema embebido raspberrypi se conectan al router por medio de cable de red, ver *Figura 100*.



*Figura 100* Instalación de a) Modem, b) Cámara abordo

## 4.4. Pruebas y resultados

Se realizaran las pruebas necesarias para verificar el funcionamiento y desempeño de la plataforma robótica móvil. En seis aspectos fundamentales, empezando por comprobar individualmente los nodos encargados de recolectar la información de entorno y del estado de la plataforma robótica, luego se evaluara la conexión entre los dispositivos que componen la red y la intercomunicación de los nodos del sistema, a continuación se pondrá a prueba el sistema mecánico en distintos terrenos, para apreciar la capacidad de realizar trayectorias rectas, subir pendientes y realizar giros, una vez realizadas las pruebas mecánicas se

pondrá a prueba el desempeño del sistema de navegación reactiva, posteriormente se finalizaran las pruebas midiendo el alcance de la comunicación inalámbrica y el consumo energético.

#### 4.4.1. Primera evaluación

La primera evaluación tiene como objetivo probar el sistema de percepción para lo cual se correrán individualmente cada nodo encargado de recolectar la información y se imprimirá en la terminal los datos entregados, a continuación se presenta los resultados obtenidos de cada nodo.

##### 4.4.1.1. Respuesta de los sensores de proximidad

En la siguiente figura podemos apreciar la información entregada por el conjunto de sensores ultrasónicos los cuales envían 7 distancias que se imprimen en pantalla ver *Figura 101*. Se obtuvo una distancia máxima de detección de 400 cm.

```

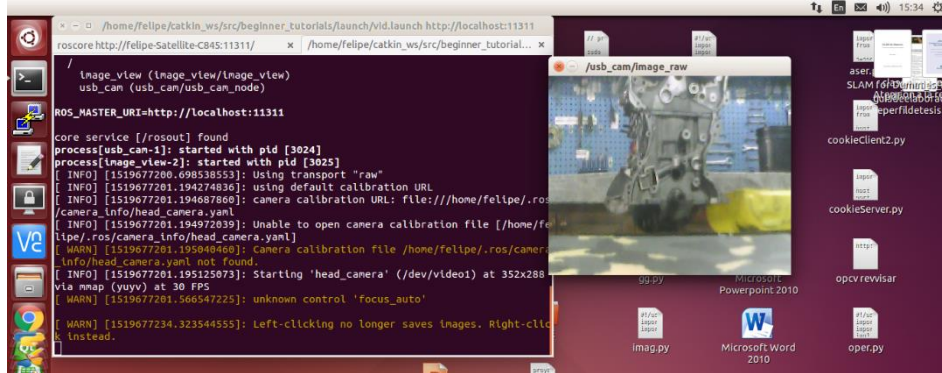
File Edit Tabs Help
roscore http:// pi@raspberr... x
pi@raspberrypi ~$ rosrun beginner_tutorials radar5.py
272.204828262 162.169015408 109.81092453 10.1322412491 5.77758550644 114.132869244 61.2064242363
271.812295914 164.160299301 105.644357204 10.1363301277 180.143725872 114.631712437 60.6094429561
277.652243990 164.546193367 105.340507200 10.1526856422 153.991258144 114.594912529 61.55397892
271.812295914 164.708209338 111.524164677 10.0831747055 151.419353485 114.100158215 61.2391352654
272.290694714 163.935410976 106.842398643 10.2181077003 2986.0221982 115.453577042 61.7052674294
272.339761257 162.892746925 104.650759697 10.0872635841 5.93296289444 114.304602146 59.9388718605
272.666871548 163.02767992 104.360004921 10.0831747055 153.578281493 114.631712437 63.3203744898
273.133003712 164.585542679 108.935904503 10.066819191 2985.11081409 114.599001488 62.0691775276
272.666871548 164.262521267 109.843635559 10.169041568 5.81438541412 115.437221527 61.6357564926
272.736382484 162.598347664 114.513134956 10.066819191 182.26994276 115.146911144 62.0814442635
273.52553686 163.407945633 105.987823099 10.1363301277 153.578281493 114.648067951 63.2999200957
272.650516033 163.350701332 114.439535141 10.1526856422 153.578281493 115.420866013 63.3530855179
271.432030201 162.516570091 107.255375385 10.169041568 180.932879448 115.400421619 63.3898854256
271.828651428 163.097190857 106.846487522 10.222196579 153.631436825 116.741573811 63.3694410324
271.775496006 162.618702057 105.660712719 10.1363301277 180.65892458 116.809995869 62.9728198051
271.828651428 163.886344433 103.428184986 10.09953022 170.743393898 114.218735695 62.3226881027
272.687315941 163.011324406 107.2717309 10.2017521858 2927.33043432 116.688418388 61.6889119148
274.433267117 161.79283573 117.583882809 10.1199746132 7.11464881897 113.740336895 61.58689949
272.307050228 162.169015408 112.521851053 10.1526856422 150.609755516 115.028333664 61.5703344345
272.24162817 163.833189011 100.480103493 10.1526856422 180.503547192 115.024244785 63.3162856102

```

*Figura 101* Funcionamiento individual del nodo radar

##### 4.4.1.2. Respuesta de la cámara

Para probar el nodo de la cámara se correrán un archivo launch y un programa para recibir la imagen ver *Figura 102*.



**Figura 102** Nodos de la cámara

#### 4.4.1.3. Respuesta del GPS

En la siguiente figura podemos ver los datos enviadas por el nodo del GPS ver Figura 103.

```

roscore http://felipe-satellite-C845:11311/
pi@raspberrypi:~$ rosrun beginner_tutorials gps.py
$GPGGA,030950.000,0009.8574,S,07828.6229,W,1,05,3.6,2826.1,M,13.7,M,,0000*6B
07828.6229 1
$GPGGA,030951.000,0009.8574,S,07828.6229,W,1,05,3.6,2826.1,M,13.7,M,,0000*6A
07828.6229 1
$GPGGA,030952.000,0009.8574,S,07828.6229,W,1,05,3.6,2826.1,M,13.7,M,,0000*69
07828.6229 1
$GPGGA,030953.000,0009.8574,S,07828.6229,W,1,05,3.6,2826.1,M,13.7,M,,0000*68
07828.6229 1
$GPGGA,030954.000,0009.8574,S,07828.6229,W,1,05,3.6,2826.0,M,13.7,M,,0000*6E

```

**Figura 103** Funcionamiento individual del nodo gps

#### 4.4.1.4. Respuesta de los encoders

Para realizar la prueba del nodo encargado de enviar la señal de los encoders es necesario probar conjuntamente el nodo encargado de operar los motores. En la siguiente *Figura 104* vemos los datos enviados por el nodo de los encoders y por el nodo que opera los motores.



```

pi@raspberrypi: ~ $ rosrund beginner_tutorials encoder.py
RPM 0.0 ENC 0 RPM2 0.0 ENC2 0
RPM 2.25 ENC 30 RPM2 2.1 ENC2 28
RPM 2.4 ENC 32 RPM2 2.7 ENC2 36
RPM 3.0 ENC 40 RPM2 2.775 ENC2 37
RPM 3.225 ENC 43 RPM2 2.775 ENC2 37
RPM 3.6 ENC 48 RPM2 3.075 ENC2 41
RPM 3.15 ENC 42 RPM2 3.6 ENC2 48
RPM 3.825 ENC 51 RPM2 3.9 ENC2 52
RPM 4.5 ENC 60 RPM2 4.35 ENC2 58
RPM 3.975 ENC 53 RPM2 4.875 ENC2 65
RPM 4.725 ENC 63 RPM2 5.325 ENC2 71
RPM 4.8 ENC 64 RPM2 5.25 ENC2 70
RPM 5.55 ENC 74 RPM2 5.7 ENC2 76
RPM 6.075 ENC 81 RPM2 6.45 ENC2 86
RPM 6.225 ENC 83 RPM2 6.525 ENC2 87
RPM 6.525 ENC 87 RPM2 6.3 ENC2 84
RPM 6.975 ENC 93 RPM2 6.3 ENC2 84
RPM 7.05 ENC 94 RPM2 6.75 ENC2 90

```

**Figura 104** Funcionamiento individual del nodo encoder

#### 4.4.1.5. Resultados

Se pudo comprobar el buen funcionamiento de todos los nodos y dispositivos que conforma el sistema de percepción.

#### 4.4.2. Segunda evaluación

La segunda evaluación tiene por objetivo comprobar la comunicación entre los dispositivos que conforma la red así como la intercomunicación de los nodos que conforman el sistema de la plataforma robótica móvil. Una vez instalada la red WLAN, es necesario que todos los dispositivos que conforman la red tengan comunicación plena esto quiere decir que tengan la posibilidad de recibir y enviar paquetes de datos, el primer paso para realizar las pruebas del sistema es constatar que todos los dispositivos están en comunicación lo cual se realizara haciendo ping de una maquina a otra, los resultados se muestra en la Tabla 91.

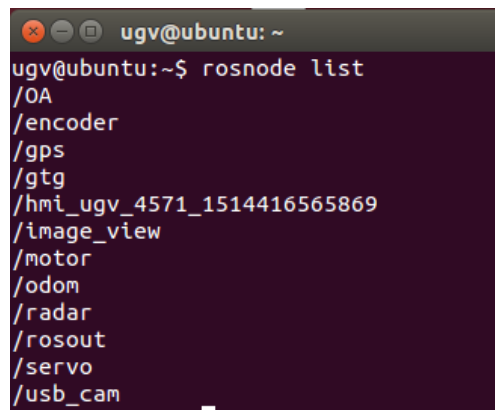
**Tabla 91**

*Respuesta de ping entre los dispositivos que componen la red WLAN*

IP	Equipo	Computadora central	Abordo	Raspberrypi
192.168.1.4	Computadora central	-	Si	Si
192.168.1.2	Abordo	Si	-	Si
192.168.1.3	Raspberrypi	Si		-

#### 4.4.2.1. Comunicación entre nodos

Para verificar que el paquete de nodos que forma el sistema operacional de la plataforma robótica móvil, se utilizara el comando `rostopic list`, el cual muestra la lista de nodos que se encuentran actualmente funcionando la lista se puede ver en la *Figura 105*.



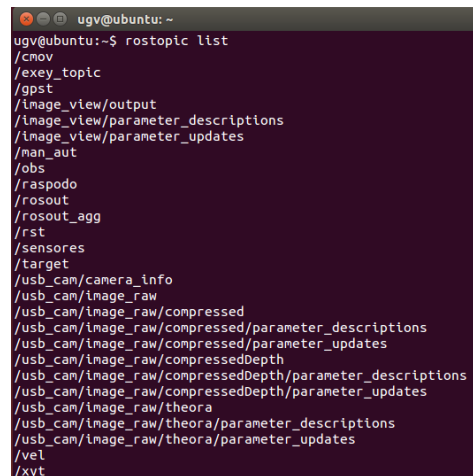
```

ugv@ubuntu:~$ rostopic list
/OA
/encoder
/gps
/gtg
/hmi_ugv_4571_1514416565869
/image_view
/motor
/odom
/radar
/rosout
/servo
/usb_cam

```

*Figura 105* Lista de nodos total corriendo en el sistema

Para verificar que los nodos que están comunicando y recibiendo información usaremos la herramienta `rostopic list` que permite ver la lista de tópicos que activos en el sistema ver *Figura 106*.



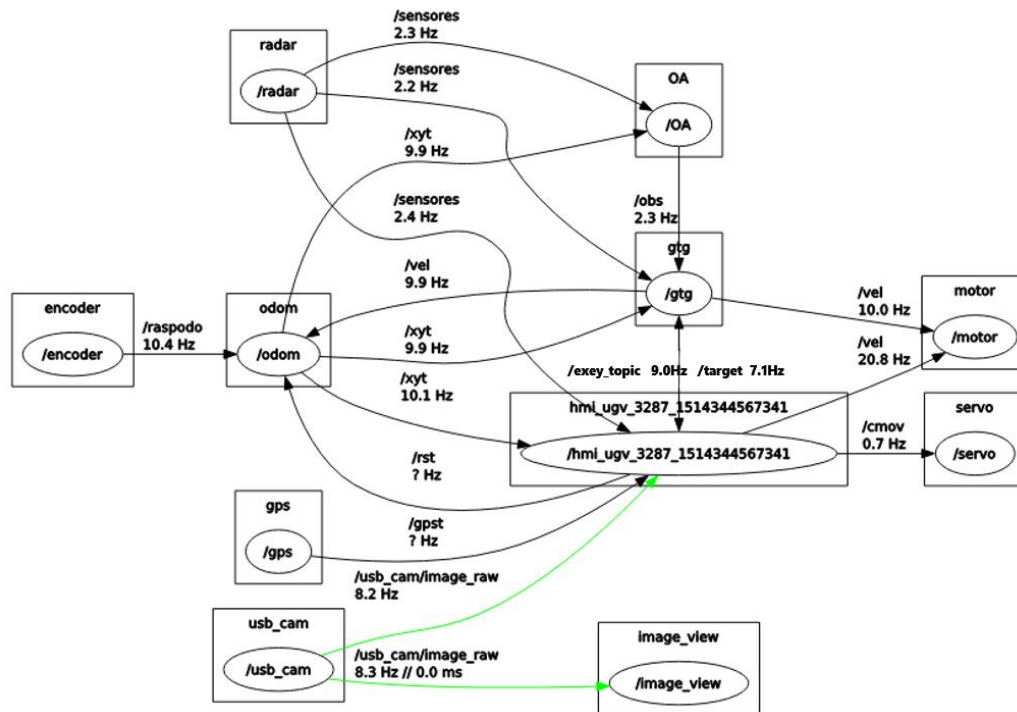
```

ugv@ubuntu:~$ rostopic list
/cmov
/exey_topic
/gpst
/image_view/output
/image_view/parameter_descriptions
/image_view/parameter_updates
/man_aut
/obs
/raspodo
/rosout
/rosout_agg
/rst
/sensores
/target
/usb_cam/camera_info
/usb_cam/image_raw
/usb_cam/image_raw/compressed
/usb_cam/image_raw/compressed/parameter_descriptions
/usb_cam/image_raw/compressed/parameter_updates
/usb_cam/image_raw/compressedDepth
/usb_cam/image_raw/compressedDepth/parameter_descriptions
/usb_cam/image_raw/compressedDepth/parameter_updates
/usb_cam/image_raw/theora
/usb_cam/image_raw/theora/parameter_descriptions
/usb_cam/image_raw/theora/parameter_updates
/vel
/xyt

```

*Figura 106* Lista de todos los tópicos que corren en el sistema.

Una vez confirmado que todos los nodos y tópicos están activos utilizamos la herramienta `rqt_grah` para ver un esquema de la interacción de los nodos a través de los tópicos por medio de un grafo. El diagrama de nodos, tópicos y la interconexión entre ellos se muestran en la *Figura 107*.



*Figura 107* Interacción entre nodos y tópicos del sistema total

#### 4.4.2. Resultados

Se obtuvo satisfactoriamente la comunicación entre los elementos que conforman la red WLAN así como la intercomunicación de los nodos que conforma el sistema de la plataforma robótica móvil.

#### 4.4.3. Tercera evaluación

Una vez instalados los componentes mecánicos en el chasis y conectado el sistema de control y comunicación, se procederá a evaluar el desempeño mecánico de la plataforma robótica móvil en distintos

terrenos, el objetivo es comprobar la capacidad de realizar trayectorias rectas, subir pendientes, superar obstáculos y realizar giros en distintos terrenos irregulares.

#### 4.4.3.1. Desempeño del sistema mecánico en línea recta y maniobra de giro

Se evaluó el sistema mecánico en un trayectoria de 10 m para comprobar la desviación existente, también se realizó giros en distintos terrenos para apreciar la dificultad que presenta la plataforma al realizar esta maniobra, la Tabla 92 muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 92**

*Desempeño de la plataforma robótica móvil en distintos terrenos realizando trayectorias rectilíneas y giros*

<b>Terreno</b>	<b>Línea recta</b>	<b>Desviación [cm]</b>	<b>Giro</b>	<b>Dificultad</b>
<b>Concreto</b>	Si	3	Si	Alta
<b>Asfalto</b>	Si	4	No	Alta
<b>Césped</b>	Si	5	No	Alta
<b>Tierra</b>	Si	6	Si	Alta
<b>Tierra húmeda</b>	Si	10	Si	Media

#### 4.4.3.2. Desempeño del sistema mecánica frente a inclinaciones del terreno

Posterior mente se intentó superar cuestas con una inclinación de 10, 15 y 20 grados en distintos terrenos los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 93.

**Tabla 93**

*Resultados del desempeño de la plataforma robótica móvil en inclinaciones de 10,15 y 20 grados en distintos terrenos*

<b>Terreno</b>	<b>Inclinación</b>	<b>Dificultad</b>
<b>Cemento</b>	10	Ninguna
	15	Media
	20	Alta
<b>Asfalto</b>	10	Ninguna
	15	Ninguna
	20	Alta
<b>Césped</b>	10	Media
	15	Alta
	20	Alta
<b>Tierra</b>	10	Media
	15	Media
	20	Alta

#### 4.4.3.3. Desempeño del sistema mecánico frente a obstáculos

Por último se evaluó la capacidad del sistema mecánico para superar obstáculos de 5, 10, 15, 20 cm los resultados se muestran en la Tabla 94.

**Tabla 94**

*Resultados del desempeño de la plataforma robótica móvil al momento de superar obstáculos*

<b>Altura [cm]</b>	<b>Supera</b>
<b>5</b>	Si
<b>10</b>	Si
<b>15</b>	Si
<b>20</b>	No

#### 4.4.3.4. Resultados

Después de probar el desempeño mecánico de la plataforma robótica móvil se obtuvo que desviaciones presentes en los terrenos de tierra humedad y césped presentan valores elevado comparados con los resultados obtenidos en los otros terrenos esto es debido a que dichos terrenos presenta mayores posibilidades de provocar que la ruedas resbalen lo cual provoca un error de medida en el sistema odométrico. El sistema es capaz de superar obstáculos de máximo 15 cm de altura, y no presenta una dificultad de operación significativa en desplazamientos rectilíneos dentro de los terrenos de prueba, se observan problemas en la maniobra de giro sobre su propio eje puesto que los motores no poseen el torque suficiente para realizar esta maniobra, además existe demasiada adherencia de las llantas a las superficies de prueba superficies de prueba, siendo el cemento el cual presenta mejor desempeño.

#### 4.4.4. Cuarta evaluación

La cuarta evaluación tiene por objetivo probar el desempeño del sistema del sistema de navegación reactiva, para lo cual se probara individualmente los dos comportamientos que componen el sistema. El comportamiento ir a la meta ir a la meta será evaluado en distintos terrenos tales como cemento, césped, tierra, comprobando el error que se produce entre el punto coordinado enviado por el usuario, el punto alcanzado por el sistema odometrico y la posición real alcanzada por la plataforma. El comportamiento evasión de obstáculos será puesto a prueba desplazando la plataforma robótica móvil en línea recta, con un obstáculo en la mitad de la trayectoria, para verificar la capacidad de respuesta del comportamiento. La Tabla 95 muestra los resultados de la prueba del comportamiento ir a la meta, en la cual se comparó la ubicación enviada por el usuario, la calculada por el sistema odométrico y la posición real alcanzada, las Tabla 96, Tabla 97, muestran los errores obtenidos en distintos terrenos.

**Tabla 95**

*Posiciones alcanzadas por la plataforma robótica móvil en la prueba del comportamiento ir a la meta*

<b>Posición</b>	<b>A</b>			<b>B</b>		
<b>Usuario</b>	200,200			-300,200		
	Cemento	Césped	Tierra	Cemento	Césped	Tierra
<b>Estimación</b>	190,180	170,185	180,175	-275,190	-270,180	-280,170
<b>Real</b>	190,180	210,215	185,190	-280,190	-320,170	-275,195

**Tabla 96**

*Error porcentual posición enviada por el usuario vs posición alcanzada por la estimación*

<b>Error porcentual estimación vs usuario</b>				
<b>Puntos coordenados</b>	<b>A</b>		<b>B</b>	
	x	y	x	y
<b>Cemento</b>	5	10	8,33	5
<b>Césped</b>	15	7,5	10	10
<b>Tierra</b>	10	12,5	6,67	15

**Tabla 97**

*Error porcentual posición enviada por el usuario vs posición alcanzada real*

<b>Error porcentual real vs usuario</b>				
<b>Puntos coordenados</b>	<b>A</b>		<b>B</b>	
	x	y	x	y
<b>Cemento</b>	5	10	6,67	5
<b>Césped</b>	-5	-7,5	-6,67	15
<b>Tierra</b>	7,5	5	8,33	3

Una vez puesto a prueba el primer comportamiento se procederá a probar el comportamiento de evasión de obstáculos en distintos terrenos, el cual se realizará dirigiendo a la plataforma en línea reata a un objetivo ubicado a 20 metros con un obstáculo ubicado a 10 metros de la trayectoria la Tabla 98 muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 98***Resultados de la prueba del comportamiento evasión de obstáculos*

<b>Terreno</b>	<b>Evasión</b>	<b>Dificultad</b>
<b>Cemento</b>	Si	Media
<b>Asfalto</b>	No	Alta
<b>Césped</b>	No	Alta
<b>Tierra</b>	No	Alta

#### 4.4.4.1. Resultados

El comportamiento ir a la meta cumplió satisfactoriamente su objetivo en trayectorias de línea recta pero presento problemas para alcanzar trayectorias curvas debido a las limitaciones mecánicas obtenidas en la maniobra de giro, Esto a su vez dificulta el que la plataforma evada obstáculos puesto que no puede girar el Angulo necesario en el tiempo requerido para corregir la trayectoria y evadir el obstáculo.

#### 4.4.5. Quinta evaluación

La quinta evaluación tiene por objeto medir la distancia máxima de tele operación, para lo cual se enviara a la plataforma robótica en un línea recta a puntos espaciados 10 metros entre sí.

##### 4.4.5.1. Resultados

Después de realizar la evaluación se obtuvo una distancia máxima de 50 metros.

#### 4.4.6. Sexta evaluación

La sexta evaluación tiene el objetivo de medir el uso de las baterías con relación al tiempo de uso de la plataforma para lo cual se tomara la medida del voltaje entregada por las misma en intervalos de 15 minutos.



#### 4.4.6.1. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 99 obteniendo un tiempo de autonomía energética de una hora.

**Tabla 99**

*Voltaje de las baterías versus tiempo de uso*

<b>Tiempo de uso (min)</b>	<b>Voltaje batería (V)</b>	<b>Porcentaje de carga</b>
<b>Inicio</b>	12.65	100
<b>15</b>	12.5	90
<b>30</b>	12.4	80
<b>45</b>	12.3	70
<b>60</b>	12.1	60

## 4.5. Resumen

- La construcción de la plataforma robótica móvil de exteriores cumple un proceso de construcción distribuido en varias etapas. Primero se construyó el chasis al cual se anclan los demás elementos. Segundo se maquinaron los ejes, y los elementos que van acoplados al mismo. Tercero realizo el corte e instalación de las coberturas laterales. Cuarto último se realizó el cableado de los circuitos eléctricos, electrónicos, y la instalación del router que permite la comunicación inalámbrica. Por último se implementó el sistema de control que consiste en el desarrollo de los nodos encoder, gps, servo, radar, motor, odo, gtg, AO, hmi-ugv.
- Se evalúa el funcionamiento de la plataforma robótica móvil para exteriores en seis etapas. La primera etapa se encarga de evaluar el funcionamiento del sistema de adquisición. La segunda etapa evalúa

comunicación entre los dispositivos que conforma la red así como la intercomunicación de los nodos que conforman el sistema de la plataforma robótica móvil. La tercera etapa evalúa el desempeño mecánico de la plataforma robótica móvil en distintos terrenos. La cuarta etapa pone a prueba el funcionamiento del sistema de navegación reactiva. La quinta etapa evalúa la distancia de teleoperación de la plataforma robótica. La sexta etapa evalúa el tiempo de uso de la plataforma robótica.

## Capítulo 5

# Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en la realización del presente trabajo, tomando en cuenta mejoras y el desarrollo de nuevos sistemas como líneas de investigación futuras para el mejoramiento y aprendizaje dentro del campo de la robótica móvil.

### 5.1. Conclusiones

- El diseño de la plataforma robótica móvil se enfocó en proporcionar un diseño modular con lo cual se facilita el mantenimiento y cambio de los elementos así como la posibilidad de añadir nuevos dispositivos o sistemas. Consiguiendo así un prototipo capaz de soportar condiciones adversas como polvo y lluvia, manteniendo intactos los componentes internos, logrando operar en terrenos de poca adherencia. El chasis consta de una estructura cuadrada formada por tubo cuadrado de  $20 \times 20 \times 1.5$  mm y tol de 2mm de acero A36, para la parte inferior, para las coberturas laterales se seleccionó tol de 0.5mm, el arreglo de sensores está sujetado al chasis mediante una carcasa de acrílico, Los motores seleccionados son los SM34505D junto a una caja de reducción 10:1 con lo cual se consigue un torque de 18.8 Nm. El material seleccionado para los ejes es ASTM 4340, los cuales son sujetados por medio de chumaceras de pared, la transmisión de potencia entre los ejes delanteros y traseros se realiza mediante un conjunto de piñones de 17 dientes y cadena número 40, las ruedas seleccionadas son ruedas estándar de bicicleta rin #20, para solventar los requerimientos energéticos se utilizarán una batería de 5V 2A, 12V 2A, y un arreglo en serie de dos baterías de 12 V 55A, El sistema de control se realiza por medio de

ROS y Python, El sistema de navegación reactiva extrae la información entregada por el arreglo de sensores ultrasónicos y lo combina con la instrucción del punto al que debe dirigirse. La plataforma consta de una cámara con dos servomotores que le permiten cubrir un amplio campo visual, por último el control y monitoreo se realizara por medio de un red WLAN. La plataforma es capaz de superar obstáculos de 15 cm, subir pendientes de 15°, con autonomía energética de 1h, la teleoperación posee un alcance de 50m máximo.

- Mediante investigación, análisis y recopilación de diferentes aportes sobre el tema de navegación reactiva, se implementó una arquitectura de subsunción con el cual se consigue un sistema capaz de dirigir de un punto a otro autónomamente la plataforma robótica, presentando dificultades en evasión de obstáculos debido a que la respuesta mecánica no es lo suficientemente rápida. El sistema sensorial consta de un arreglo de sensores ultrasónicos montados a la plataforma mediante carcasas diseñadas en acrílico.
- El control de la plataforma es realizado por una computadora abordo y un sistema embebido (Raspberry Pi modelo B). Los componentes utilizados son: 2 motores Smart Motor 34505D, Una placa PCB encargada de acondicionar los sensores, Una placa PCB encargada de distribuir la energía de las baterías de 5V hacia los distintos componentes, un router, una cámara web, 2 servo motores encargados de posicionar la cámara, dos baterías de 5V 2A, 12V 2A, y un arreglo en serie de dos baterías de 12 V 55A.
- Se implementó nueve nodos en el sistema operativo robótico (ROS) mediante python, los cuales son: Servo, radar, gps, encoder, gtg, OA, motor, odo, hmi-ugv adicionalmente se usó el paquete de percepción para adquirir la imagen de la cámara del cual se utilizan los nodos imagen\_view, y usb\_cam, de los nodos anterior mente mencionados los cuatro primeros corren en el sistema

embebido, su función es enviar la información de los encoders, las distancias entregadas por los sensores ultrasónicos, posicionar los servomotores que ubican la cámara, y recibir la señal enviada por el GPS. Los nodos encoder, gtg, OA, motor, imagen\_view, y usb\_cam corren en la computadora abordo los cuales se encargan de: Realizar el proceso de odometría, dirigir el rumbo de la plataforma, evadir los obstáculos, activar los motores, y recibir la información de la cámara. El ultimo nodo hmi-ugv corre en la computadora remota el cual está conectado a todos los demás nodos permitiendo al usuario controlar y monitorear la plataforma robótica móvil.

## 5.2. Recomendaciones

- La plataforma robótica móvil tiene la capacidad de ubicarse en entornos interiores y exteriores gracias al sistema de odometría y la recepción de datos del GPS, sin embargo el sistema de ubicación puede ser reforzado añadiendo sistemas de odometría visual.
- La estructura de software que presenta la plataforma robótica permite delegar tareas de procesamiento a otros computadores externos que estén conectados a la red, lo cual abre las posibilidades a una cantidad muy extensa de procesamiento y almacenamiento de información, sin la necesidad de incrementar el peso, consumo energético, o la necesidad de incrementar las características del hardware interno de la plataforma, por lo tanto es recomendable la adición de nuevos comportamientos para conseguir mayor autonomía en la plataforma robótica, tales como ir a una estación de carga, seguimiento de corredores, reconocimiento de figuras, evasión de

obstáculos en movimiento, seguimiento de objetos móviles, ordenes por comandos de voz, entre otros.

- Se recomienda el diseño de un sistema de abastecimiento de energía más liviano.
- Es recomendable el uso de materiales más livianos para la fabricación de la plataforma robótica móvil, tales como plástico o aluminio.
- Para facilitar la maniobrabilidad en terrenos agrestes se recomienda la implementación del tipo de conducción mediante el sistema ackerman. con lo cual se facilitan las maniobras de giro
- Se recomienda incrementar el número de sensores ultrasónicos y añadir sensores infrarrojos para solventar los errores de los sensores ultrasónicos frente a cierto tipo de superficies, con lo cual se conseguirá un mayor espectro de detección de objetos mejorando el rendimiento del comportamiento evasión de obstáculos.

## Bibliografía

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc. Graw Hill.

DST robot. (29 de 08 de 2016). *DST robot*. Obtenido de <http://www.dongburobot.com/jsp/cms/view.jsp?code=100803>

Globalsat Technology Corporation. (10 de Agosto de 2013). Globalsat GPS Module; Hardware Datasheet, Product No. EM-506. GlobalSat Worldcom Group. Obtenido de [www.globalsat.com.tw](http://www.globalsat.com.tw)

Guano Chicaiza, M. S., & Sevilla Riofrío, A. W. (2015). *Diseño y Construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de Manufactura*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Gutmar group. (29 de 08 de 2016). *AQUILES robotic systems*. Obtenido de <http://www.aquilesrobotic.com/>

Holland, J. M. (2004). *Desisgningv Autonomous Mobile Robots*. U.S.A: Elsevier Inc.

I-mas. (29 de 08 de 2016). *I-MAS, Ingeniería de Procesos y Producto*. Obtenido de <http://blog.i-mas.com/2190/robot-de-vigilancia-de-seguridad-argos/>

Intplus. (10 de 01 de 2018). <http://www.superrobotica.com>. Obtenido de <http://www.superrobotica.com>

Ivan bohman. (18 de 07 de 2017). *IVAN BOHMAN C.A*. Obtenido de <http://www.ivanbohman.com.ec/>

Leon Vasquez, I. A., & Vasquez Tapia, A. J. (2013). *Diseño e implementacion de un robot movil autonomo y teleoperado para labores agricolas*. Sangolqui.

- Mohammad Ali Hidalgo, M. H. (2014). *Diseño y construcción de un robot móvil experimental 8x8 articulado para salvar obstáculos*. Sangolquí.
- Murphy, R. R. (2000). *Introductions to AI Robotics*. Londres: Cambrigde.
- Obando Maldonado, C. A., & Garzón Jaramillo, P. M. (2016). • *Desarrollo de un sistema de ubicación para la plataforma robótica para exteriores tele-operada del laboratorio de manufactura*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Ollero, A. (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles*. España: Marcombo,S.A.
- Omron. (29 de 08 de 2016). *Mobile robot systems for research and development*. Obtenido de <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/ResearchPatrolBot.aspx>
- Quezada Cepeda, D. P. (2014). *Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema ROCKER-BOGIE y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*. Sangolquí.
- Reuter, A. F. (Febrero de 2001). *Sistemas de Posicionamiento Global - Sistema GPS*. Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Rotor clip company,inc. (15 de 08 de 2017). *Rotor clip*. Obtenido de [www.rotorclip.com](http://www.rotorclip.com)
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Londres: Cambridge.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- Yacuzzi, E., & Martín, F. (2003). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Buenos Aires: C.E.M.A.



# **ANEXOS**