

**Diseño e implementación de un prototipo robótico móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo rocker-bogie para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares**

Ruiz Sánchez, Jefferson Bayardo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

PhD. Aguilar Castillo Wilbert Geovanny

24 de agosto del 2022



TesisRuiz.pdf

Scanned on: 17:38 August 8, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	191
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	332
Omitted Words	165



WILBERT GEOVANY AGUILAR CASTILLO

.....  
**Dr. Aguilar Castillo, Wilbert Geovany.**  
**DIRECTOR**



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: "Diseño e implementación de un prototipo robótico móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo rocker-bogie para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares" fue realizado por el señor Ruiz Sánchez Jefferson Bayardo; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de agosto de 2022



firmado digitalmente por:  
WILBERT GEOVANNY  
AGUILAR CASTILLO

**PhD. Aguilar Castillo Wilbert Geovanny**

**C.C.: 0703844898**



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**  
**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Ruiz Sánchez Jefferson Bayardo**, con cédula de ciudadanía n°1002963732, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un prototipo robótico móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo rocker-bogie para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 11 de agosto de 2022

.....  
**Ruiz Sánchez Jefferson Bayardo**

C.C.: 1002963732



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**Autorización de Publicación**

Yo **Ruiz Sánchez Jefferson Bayardo**, con cédula de ciudadanía N°1002963732, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un prototipo robótico móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo rocker-bogie para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 11 de agosto de 2022

.....  
**Ruiz Sánchez Jefferson Bayardo**

**C.C.: 1002963732**

### **Dedicatoria**

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi tutor de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A mi querida Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

### **Agradecimiento**

No tengo palabras para expresar mi amor y mi gratitud por mi madre y mi padre, por su fe, su generosidad y su incansable ayuda en todo momento, gracias a ellos he llegado a culminar un peldaño más de mi vida, a mi tutor Wilbert Aguilar, quien desde el primer momento me brindó su amistad, su bondad, y fue de gran apoyo en la elaboración de este trabajo.

Mi agradecimiento a todos, mi familia y a mis amigos que de una u otra manera me brindaron su colaboración y se involucraron en este proyecto.

## Índice

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice.....	8
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras.....	17
Resumen .....	22
Abstract .....	23
Capítulo 1 generalidades .....	24
Antecedentes.....	24
Justificación e importancia.....	24
Área de influencia.....	26
Objetivos.....	26
Objetivo General .....	26
Objetivos Específicos.....	26
Alcance del proyecto .....	27
Sistema mecánico .....	29
Chasis .....	29
Sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas .....	30

Ruedas todo terreno .....	30
Sistema eléctrico / electrónico.....	31
Actuadores .....	31
Sensores .....	31
Transmisión de video .....	31
Conectividad.....	32
Microcontrolador .....	32
Sistema de control y software.....	32
Sistema de control .....	33
Interfaz de usuario .....	33
Capítulo 2 investigación previa .....	34
Robots móviles .....	34
Robots terrestres.....	35
Robots móviles con ruedas (RMR) .....	35
Tipos de ruedas .....	35
Rueda fija.....	36
Rueda de centro orientable .....	37
Rueda de centro orientable desplazado .....	37
Rueda omnidireccional o sueca .....	38
Configuración de robots móviles .....	39

	10
Robot con una rueda.....	40
Robot con dos ruedas .....	40
Robot con tres ruedas.....	41
Robot con cuatro ruedas.....	41
Tracción y dirección de robots móviles.....	42
Tracción y dirección en un mismo eje (Tracción diferencial).....	43
Tracción y dirección sobre todos los ejes .....	44
Telerobótica.....	44
Arquitectura de la telerobótica.....	45
Componentes del robot móvil.....	46
Sistema mecánico .....	46
Ruedas todo terreno .....	47
Sistema eléctrico / electrónico.....	48
Actuadores .....	48
Motores de corriente continua .....	48
Servomotor .....	49
Sensor de posición y velocidad .....	51
Encoder incremental.....	54
Sensores inerciales IMU .....	57
Adquisición de vídeo .....	59

	11
Conectividad.....	59
Microcontrolador .....	61
Arduino.....	63
Sistema de control .....	65
Control de supervisión .....	66
Control compartido.....	66
Control directo .....	67
Capítulo 3 diseño de subsistemas.....	68
Requerimientos del cliente.....	69
Diseño del mecanismo Rocker-bogie .....	74
Diseño de del mecanismo Roker-bogie.....	78
Selección de las llantas.....	82
Selección del motor.....	85
Diseño del mecanismo de transmisión .....	88
Diseño del eje del mecanismo de transmisión .....	95
Diseño del diferencial.....	108
Descripción de los engranes cónicos .....	110
Diseño de los ejes del Diferencial .....	112
Diseño del Chasis.....	116
Análisis mecánico del chasis .....	117

	12
Diseño eléctrico / electrónico.....	120
Arquitectura del prototipo .....	120
Selección de componentes .....	121
Diagramas de conexión.....	133
Diseño del modelo cinemático del robot .....	135
Simulación del modelo cinemático .....	145
Diseño de la HMI .....	147
Capítulo 4 integración del sistema.....	150
Implementación de los componentes mecánicos .....	150
Sistema de transmisión .....	151
Sistema del diferencial .....	154
Implementación de los componentes electrónicos .....	158
Capítulo 5 pruebas y resultados .....	165
Métricas de evaluación.....	165
Inclinación del piso.....	165
Altura de obstáculos .....	166
Funcionamiento en terreno con inclinaciones independientes.....	167
Autonomía Energética.....	168
Velocidades máximas.....	168
Diseño del Experimento .....	168

	13
Resultados .....	169
Inclinación del piso.....	169
Altura de obstáculos .....	170
Funcionamiento en terreno con inclinaciones independientes.....	171
Autonomía Energética.....	171
Velocidades máximas.....	172
Funcionamiento dado la vuelta.....	173
Discusión.....	174
Capítulo 6 conclusiones y recomendaciones.....	175
Conclusiones.....	175
Recomendaciones.....	176
Bibliografía .....	177
Apéndices.....	189

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Tabla de Estados de un encoder de cuadratura .....	56
<b>Tabla 2</b> Tabla de verdad de un encoder de cuadratura.....	57
<b>Tabla 3</b> Lista de Requerimientos y prioridades .....	69
<b>Tabla 4</b> Características técnicas del robot .....	69
<b>Tabla 5</b> Tabla simbólica de correspondencia entre necesidades y características técnicas .....	71
<b>Tabla 6</b> Tabla numérica de correspondencia entre necesidades y características técnicas .....	72
<b>Tabla 7</b> Orden de importancia de las características técnicas.....	73
<b>Tabla 8</b> Características técnicas ordenadas según su importancia .....	73
<b>Tabla 9</b> Selección del mecanismo de suspensión .....	78
<b>Tabla 10</b> Diferencia entre motores DC brushless y DC Brushed.....	85
<b>Tabla 11</b> Ponderaciones para la selección del tipo de motor.....	86
<b>Tabla 12</b> Opciones de motores .....	87
<b>Tabla 13</b> Matriz de ponderaciones para la selección de motores .....	87
<b>Tabla 14</b> Opciones de ruedas.....	84
<b>Tabla 15</b> Matriz de selección de ruedas .....	84
<b>Tabla 16</b> Factores de servicio para transmisiones por cadena (Mott, 2006) .....	91
<b>Tabla 17</b> Potencia en Hp para una cadena de rodillos simple numero 40 paso 0.5in.....	92
<b>Tabla 18</b> Resumen del diseño .....	94
<b>Tabla 19</b> Coeficientes de fricción a la rodadura .....	98
<b>Tabla 20</b> Resumen de las variables de los diagramas de fuerza cortante y momento flector.....	103
<b>Tabla 21</b> Factor de material Cm.....	105
<b>Tabla 22</b> Factores de confiabilidad aproximada .....	105

<b>Tabla 23</b> Factor de tamaño .....	105
<b>Tabla 24</b> Concentradores de esfuerzo según los tipos de chaflanes .....	107
<b>Tabla 25</b> Diámetros del eje en los puntos B, C y D .....	107
<b>Tabla 26</b> Propiedades del engranaje cónico .....	111
<b>Tabla 27</b> Requerimientos y restricciones del sistema eléctrico / electrónico .....	120
<b>Tabla 28</b> Opciones de Mini PC .....	122
<b>Tabla 29</b> Matriz de ponderaciones para la selección de mini pc.....	122
<b>Tabla 30</b> Opciones cámara.....	123
<b>Tabla 31</b> Matriz de ponderaciones para la selección de la cámara.....	124
<b>Tabla 32</b> Opciones de microcontrolador .....	124
<b>Tabla 33</b> Matriz de ponderaciones para la selección de microcontrolador .....	125
<b>Tabla 34</b> Opciones control inalámbrico .....	126
<b>Tabla 35</b> Matriz de ponderaciones para la selección del control inalámbrico.....	126
<b>Tabla 36</b> Opciones de drivers para los motores .....	127
<b>Tabla 37</b> Matriz de ponderaciones para la selección de drivers .....	128
<b>Tabla 38</b> Opciones de baterías para los motores .....	129
<b>Tabla 39</b> Matriz de ponderaciones para la selección de baterías para los motores .....	129
<b>Tabla 40</b> Opciones de batería para el control.....	130
<b>Tabla 41</b> Matriz de ponderaciones para la selección de batería para el control .....	131
<b>Tabla 42</b> Resultados de la selección de los componentes electrónicos .....	131
<b>Tabla 43</b> Métricas de evaluación para inclinaciones independientes para cada rueda .....	167
<b>Tabla 44</b> Resultados para ángulos variables con alturas mayores al radio de la llanta .....	169
<b>Tabla 45</b> Resultados para ángulos variables con alturas menores al radio de la llanta .....	170

<b>Tabla 46</b> Resultados para obstáculos con altura variable .....	170
<b>Tabla 47</b> Resultado para terreno con inclinaciones independientes para cada rueda .....	171
<b>Tabla 48</b> Resultados de autonomía energética para cada batería .....	172

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Sistemas y subsistemas del proyecto .....	28
<b>Figura 2</b> Sistema mecánico .....	29
<b>Figura 3</b> Esquema de distribución del chasis en el caso de que el robot se voltee .....	30
<b>Figura 4</b> Sistema eléctrico / electrónico .....	31
<b>Figura 5</b> Sistema de control y software .....	32
<b>Figura 6</b> Rueda fija (Reyes Cortés , 2011) .....	36
<b>Figura 7</b> Rueda de centro orientable (Reyes Cortés , 2011) .....	37
<b>Figura 8</b> Rueda de centro orientable desplazado (Reyes Cortés , 2011) .....	38
<b>Figura 9</b> Rueda omnidireccional (Reyes Cortés , 2011) .....	39
<b>Figura 10</b> Robot tipo bicicleta (Siciliano & Khatib, 2016) .....	40
<b>Figura 11</b> robot tipo péndulo invertido (Siciliano & Khatib, 2016) .....	41
<b>Figura 12</b> Robot con configuración de triciclo (Bambino , 2008) .....	41
<b>Figura 13</b> Configuración Ackerman (Reyes Cortés , 2011) .....	42
<b>Figura 14</b> Tracción y dirección en ejes independientes (Bambino , 2008) .....	43
<b>Figura 15</b> Tracción y dirección en un mismo eje (Bambino , 2008) .....	43
<b>Figura 16</b> Tracción y dirección sobre todo los ejes (Bambino , 2008) .....	44
<b>Figura 17</b> Esquema de la telerobótica (Siciliano & Khatib, 2016) .....	45
<b>Figura 18</b> Tipos de arquitecturas de control para la telerobótica .....	46
<b>Figura 19</b> Esquema de un mecanismo Rocker-Bogie (P. Miller & Lee, 2002) .....	47
<b>Figura 20</b> Labrado de llantas para robot todo terreno (Siciliano & Khatib, 2016) .....	48
<b>Figura 21</b> Esquema básico del funcionamiento de un motor eléctrico (Reyes Cortés , 2011) .....	49
<b>Figura 22</b> Componentes de un servomotor (Mecafenix, 2017) .....	50

	18
<b>Figura 23</b> Componentes de un motorreductor (Reyes Cortés , 2011) .....	51
<b>Figura 24</b> Configuración de un resolvers (MinebeaMitsumi, 2021) .....	52
<b>Figura 25</b> Potenciómetro utilizado como sensor de posición (Reyes Cortés , 2011) .....	53
<b>Figura 26</b> Tacómetro (Creus Solé , 2011).....	53
<b>Figura 27</b> Partes de un encoder (Creus Solé , 2011).....	54
<b>Figura 28</b> Esquema de un encoder incremental (Hoon Kim, 2017).....	55
<b>Figura 29</b> Encoder de cuadratura (Reyes Cortés , 2011) .....	56
<b>Figura 30</b> esquema de un acelerómetro (Siciliano & Khatib, 2016) .....	58
<b>Figura 31</b> Giroscopio mecánico (Siciliano & Khatib, 2016) .....	59
<b>Figura 32</b> Esquema de un microcontrolador .....	62
<b>Figura 33</b> Arduino UNO (Arduino, 2021) .....	64
<b>Figura 34</b> Raspberry Pi 4 (Halfacree, 2020) .....	65
<b>Figura 35</b> Metodología para él diseño .....	68
<b>Figura 36</b> Mecanismo de suspensión con un eje de rotación (Sandin, 2003) .....	75
<b>Figura 37</b> Mecanismo de suspensión con diferencial en el chasis (Sandin, 2003).....	76
<b>Figura 38</b> Mecanismo de suspensión diferencial que utiliza un tercer balancín (Sandin, 2003) .....	77
<b>Figura 39</b> Motor YIYUN 350W.....	88
<b>Figura 40</b> Síntesis estructural del mecanismo de suspensión .....	79
<b>Figura 41</b> Síntesis estructural del balancín tomando en cuenta la simetría en el eje x .....	80
<b>Figura 42</b> Variables de diseño a partir de las condiciones del suelo .....	80
<b>Figura 43</b> Análisis de movilidad del mecanismo .....	81
<b>Figura 44</b> Esquema del sistema de transmisión .....	89
<b>Figura 45</b> Modelo del sistema de transmisión de movimiento a las 4 ruedas .....	90

	19
<b>Figura 46</b> Fuerzas que intervienen en el diseño de los ejes .....	95
<b>Figura 47</b> Fuerzas que intervienen en el eje.....	97
<b>Figura 48</b> Diagrama de fuerzas del eje.....	99
<b>Figura 49</b> Diagrama simplificado de fuerzas y momentos.....	100
<b>Figura 50</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano “Z-X” .....	101
<b>Figura 51</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano “Y-X” .....	102
<b>Figura 52</b> Resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión (Mott, 2006).....	104
<b>Figura 53</b> Diseño final del eje del sistema de transmisión .....	107
<b>Figura 54</b> Montaje del sistema de transmisión .....	108
<b>Figura 55</b> Diferencial armado .....	109
<b>Figura 56</b> Engranaje cónico con rodamiento interno .....	110
<b>Figura 57</b> Engranaje cónico.....	111
<b>Figura 58</b> Esquema del diferencial.....	112
<b>Figura 59</b> Diagrama de fuerzas .....	113
<b>Figura 60</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector .....	114
<b>Figura 61</b> Medidas del eje 1.....	115
<b>Figura 62</b> Medidas para el eje 2.....	116
<b>Figura 63</b> Diseño del chasis.....	116
<b>Figura 64</b> Esfuerzo Von Mises vs Número de elementos de la malla.....	117
<b>Figura 65</b> Esfuerzo Von Mises para cargas aplicadas en la cara superior.....	118
<b>Figura 66</b> Desplazamiento estático al aplicar la carga.....	119
<b>Figura 67</b> Deformaciones unitarias.....	119
<b>Figura 68</b> Diagrama de bloques de la arquitectura del prototipo .....	121

<b>Figura 69</b> Conexión Raspberry Pi con el arduino nano .....	133
<b>Figura 70</b> Conexión del arduino nano con los controladores de los motores .....	134
<b>Figura 71</b> Posición del robot móvil en el plano “g” .....	136
<b>Figura 72</b> Posición del robot para un intervalo pequeño .....	137
<b>Figura 73</b> Ilustración de la velocidad lineal y angular .....	141
<b>Figura 74</b> Medidas del robot.....	143
<b>Figura 75</b> Implementación del modelo cinemático en Python.....	146
<b>Figura 76</b> Simulación de trayectoria circular .....	146
<b>Figura 77</b> Simulación de trayectoria lineal .....	147
<b>Figura 78</b> Diseño de la HMI.....	148
<b>Figura 79</b> Disposición de las teclas de movimiento en un teclado de PC.....	149
<b>Figura 80</b> Disposición de las teclas de movimiento en el control inalámbrico.....	149
<b>Figura 81</b> Diagrama de flujo de la integración del sistema.....	150
<b>Figura 82</b> Montaje de las tapas laterales en el perfil de aluminio.....	151
<b>Figura 83</b> Tapas laterales del sistema de transmisión .....	151
<b>Figura 84</b> Ejes del sistema de transmisión.....	152
<b>Figura 85</b> Acople de sujeción del piñón al eje .....	153
<b>Figura 86</b> Montaje del sistema de transmisión .....	153
<b>Figura 87</b> Torneado de los engranes cónicos .....	154
<b>Figura 88</b> Torneado de los engranajes cónicos.....	155
<b>Figura 89</b> Torneado de los ejes del diferencial .....	156
<b>Figura 90</b> Ensamblaje de los ejes del diferencial y los engranajes cónicos .....	156
<b>Figura 91</b> Ensamblaje del sistema diferencial con el chasis .....	157

<b>Figura 92</b> Ensamblaje del diferencial en el chasis.....	157
<b>Figura 93</b> Ensamblaje del sistema diferencial y el sistema de transmisión de cada rueda .....	158
<b>Figura 94</b> acoples para el ensamblaje de la electrónica sobre el chasis.....	159
<b>Figura 95</b> Impresión 3D de los soportes de la electrónica.....	160
<b>Figura 96</b> Ensamble de los principales componentes electrónicos del robot .....	161
<b>Figura 97</b> Vista lateral del ensamblaje electrónico.....	161
<b>Figura 98</b> Ubicación de las baterías dentro del sistema de transmisión .....	162
<b>Figura 99</b> Implementación de la carcasa impresa en 3D .....	163
<b>Figura 100</b> Renderizado del modelo 3D.....	164
<b>Figura 101</b> Robot terminado.....	164
<b>Figura 102</b> Plataforma de pruebas 1 .....	165
<b>Figura 103</b> Plataforma de pruebas 2 .....	166
<b>Figura 104</b> Plataforma de pruebas 3 .....	167
<b>Figura 105</b> Diseño del experimento.....	169

## Resumen

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, busca de forma permanente atender las necesidades y requerimientos del Ejército y de las Fuerzas Armadas, coordinando las actividades de investigación, desarrollo e innovación de tecnología para la defensa nacional. A nivel del Ejército y de las Fuerzas Armadas, los avances en robótica móvil se utilizan para reconocimiento y exploración de entornos de alto riesgo o de difícil acceso, donde las condiciones afectan con la integridad del personal militar.

La importancia de este proyecto en el ámbito de la investigación científica y tecnológica del ejército se refleja en avances del área de robótica móvil con énfasis en el sistema de locomoción. Esto permite a su vez una reducción de costos en actividades de reconocimiento y no menos importante salvaguardar valiosas vidas humanas.

El proyecto fue concebido para adquirir conocimiento y experiencia en el área de la robótica móvil. Con este fin se desarrolla un prototipo robótico multi terreno con un sistema mecánico robusto, que presenta como diseño principal un sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas, además posee un sistema electrónico confiable que en sinergia con el control implementado garantiza el pleno funcionamiento del prototipo.

Este proyecto cuenta con pruebas de funcionamiento del mecanismo Rocker-Bogie, las cuales mediante varios ángulos de inclinación de terreno y distintos obstáculos de diferentes alturas comprobaron su efectividad, lo que da paso para escalar el prototipo a otra clase de robots con aplicaciones más específicas.

*Palabras Clave:* fuerzas armadas, robótica móvil, mecanismo de locomoción, multi terreno, suspensión Rocker-bogie

### **Abstract**

The University of the Armed Forces – ESPE and the Center for Scientific and Technological Research of the Army CICTE, constantly seek to meet the needs and requirements of the Army and the Armed Forces, coordinating the activities of research, development and innovation of technology for the national defense. At the level of the Army and the Armed Forces, advances in mobile robotics are used for reconnaissance and exploration of high-risk or difficult-to-access environments, where conditions threaten the integrity of military personnel.

The importance of this project in the field of scientific and technological research for the army lies in the advances for the area of mobile robotics emphasizing the locomotion system. This manages to lower costs in reconnaissance activities and not least important to safeguard valuable human lives.

The project was conceived to gain knowledge and experience in the area of mobile robotics. To this end, a multi-terrain robotic prototype is developed with a robust mechanical system, which presents as its main design a four-wheel Rocker-Bogie suspension system, as well as a reliable electronic system that, in synergy with the implemented control, guarantees the full operation of the prototype.

This project has tests of the operation of the Rocker-Bogie mechanism, which verified its effectiveness by moving through variations in the slope of the terrain and different obstacles of various heights, which gives way to scaling the prototype to other kind of robots with more specific applications.

*Key words:* armed forces, mobile robotics, locomotion mechanism, multi terrain, Rocker-bogie suspension

## Capítulo 1 generalidades

### Antecedentes

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, busca de forma permanente atender las necesidades y requerimientos del Ejército y de las Fuerzas Armadas, coordinando las actividades de investigación, desarrollo e innovación de tecnología para la defensa nacional, el CICTE es un facilitador para la ejecución de proyectos de investigación, innovación y desarrollo. (CICTE, 2019)

A nivel del Ejército y de las Fuerzas Armadas, los avances en robótica móvil se utilizan para reconocimiento (Calderón, Aguilar, & Merizalde, 2020) y exploración (Merizalde, Aguilar, & Calderón, 2020) de entornos de alto riesgo o de difícil acceso, donde las condiciones afectan con la integridad del personal militar.

Por esto, se emplean robots móviles teledirigidos cuyas prestaciones tienen que acoplarse a terrenos de difícil acceso. Estos robots móviles emplean diferentes sistemas de movimiento, los más utilizados son: ruedas, patas y orugas, diseñados para adaptarse a entornos no estructurados, lo cual ha aumentado de manera significativa la investigación de la robótica en áreas de la tele operación, navegación asistida con visión artificial y diversos algoritmos de aprendizaje.

### Justificación e importancia

Este proyecto de tesis es parte del proyecto de investigación: “Vehículo terrestre no tripulado multipropósito de vigilancia y reconocimiento para apoyo de operaciones militares Fase 1 - GVMil1” del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE, en el cual se han conseguido avances significativos en el ámbito de la navegación autónoma (Aguilar, Asimbaya, Albán, & Fernández, 2020), búsqueda (Aguilar, Merizalde, Calderón, & Carrera, 2020), planificación de movimientos (Aguilar, Limaico,

Villegas-Pico, & Asimbaya, 2019), percepción (Galarza, Pérez, Serrano, Tapia, & Aguilar, 2018) (Aguilar, y otros, 2017), grasping (Caiza, Aguilar, Albán, & Fernández, 2020) y robótica cooperativa (Tenezaca, Canchignia, Aguilar, & Mendoza, 2019), entre otras líneas de investigación. No obstante, a nivel de mecanismos de locomoción, los avances han sido modestos; entre los cuales se puede destacar el desarrollo de una estructura tipo PackBot (Aguilar, Albán, Cruz, Tiuma, & Figueroa, 2020) que, si bien es capaz de subir escaleras, su velocidad es reducida. Con base en ello, la importancia de la presente tesis para el CICTE y Fuerzas Armadas radica en el desarrollo de nuevos sistemas de locomoción que permitan superar obstáculos complejos sin comprometer la velocidad del vehículo.

El ámbito militar está muy encauzado en la robótica pues el adquirir avances en ello implicaría un gran ahorro económico, debido a que es mucho más barato el mantenimiento de un robot en comparación con personas, la importancia es más evidente cuando el ahorro no solo es económico, sino que se ve reflejado en vidas humanas.

La relevancia de este proyecto radica en la falta de estudios cuantitativos en el área de la robótica móvil, que abalen los diseños de los medios de locomoción específicos. La escasez de estudios que cuenten con datos medibles dificulta identificar las características esenciales de diseño y las decisiones en cuanto a ubicación de los elementos móviles en el chasis, complicando la determinación y validez de un diseño hasta que esté completamente desarrollado y probado.

Por lo tanto, en este proyecto, es importante desarrollar un prototipo funcional con la finalidad de adquirir conocimiento y experiencia en el área de la robótica móvil, concretamente en un robot explorador todo terreno con un sistema de suspensión tipo Rocker-Bogie, para así poder analizar su funcionamiento y determinar los aspectos más relevantes en el sistema de locomoción.

Además, este proyecto contribuirá en la investigación de nuevas tecnologías en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE, dando una visión de los proyectos que se desarrollan dentro de la institución en las diferentes áreas de estudio, asimismo animará la innovación entre los alumnos y será útil para forjar vocación en nuevos estudiantes.

### **Área de influencia**

El prototipo de robot móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo Rocker-bogie a través de su ejecución impulsará el desarrollo tecnológico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE apoyado por el Centro de Investigaciones Científicas y tecnológicas del Ejército (CICTE), debido a que el presente proyecto de tesis se está desarrollando dentro la institución.

Su área de influencia indirecta ha sido considerada el Cantón Rumiñahui perteneciente a la Provincia de Pichincha en Ecuador; así también se recalca que el campo de aplicación y área de influencia se extiende de manera global puesto que las necesidades y requerimientos del personal que labora en el campo de la seguridad y defensa a nivel mundial es muy similar.

### **Objetivos**

#### ***Objetivo General***

Desarrollo e implementación de un prototipo robótico multi terreno teleoperado para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares.

#### ***Objetivos Específicos***

- Construir un sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas que permita al robot movilizarse en entornos de difícil acceso o de alto riesgo.

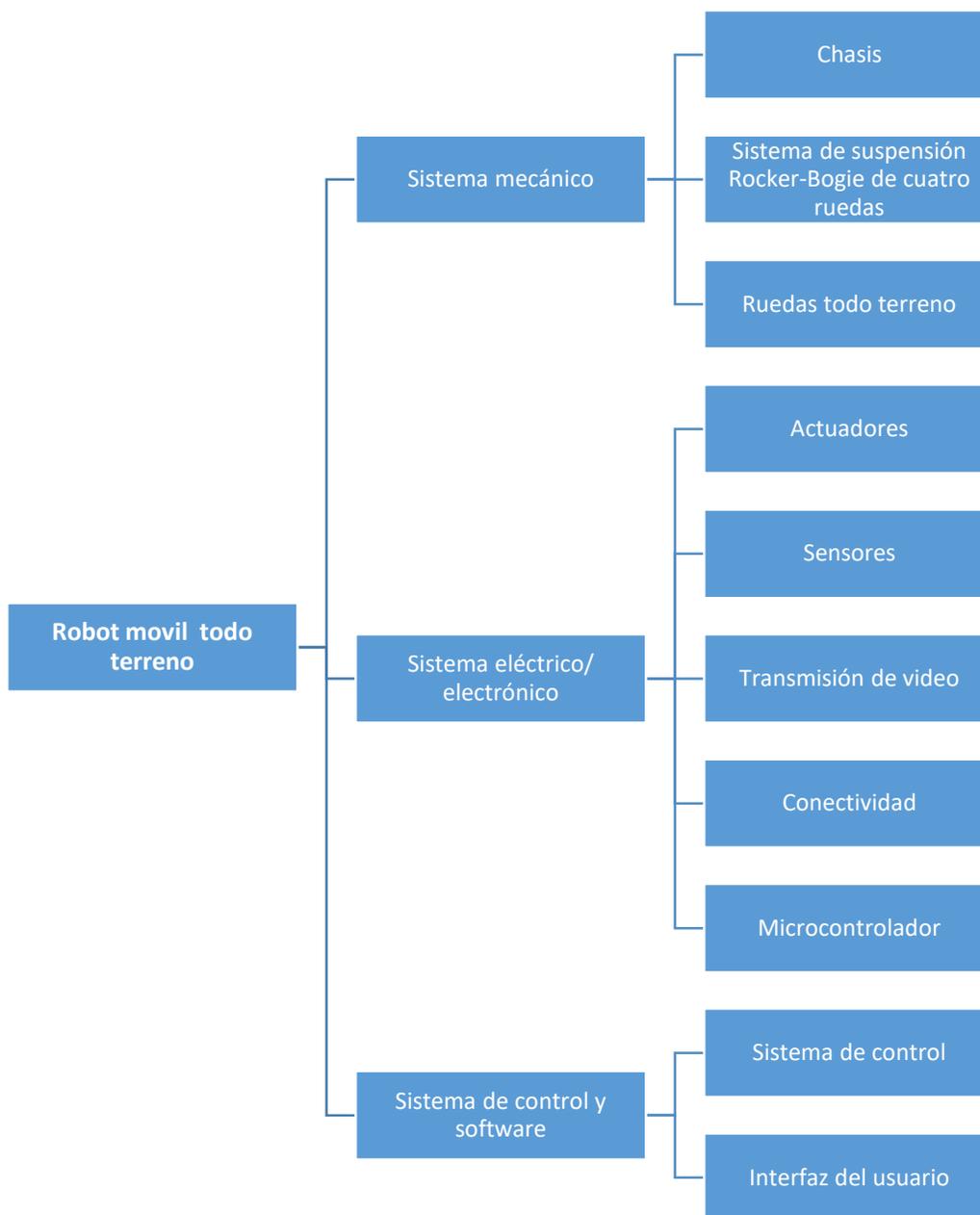
- Obtener resultados de funcionamiento del mecanismo Rocker-Bogie de suspensión, que en caso de ser acertados permita la réplica en robots más específicos.
- Implementar teleoperación en el prototipo robótico para la inspección de lugares de alto riesgo por medio de transmisión de video en tiempo real.
- Definir el diseño mecánico, electrónico y de control del prototipo para determinar las limitaciones y garantizar el pleno funcionamiento de este con el uso de pruebas experimentales.

### **Alcance del proyecto**

Para la descripción del alcance del proyecto, se plantea los sistemas que se muestran en la Figura

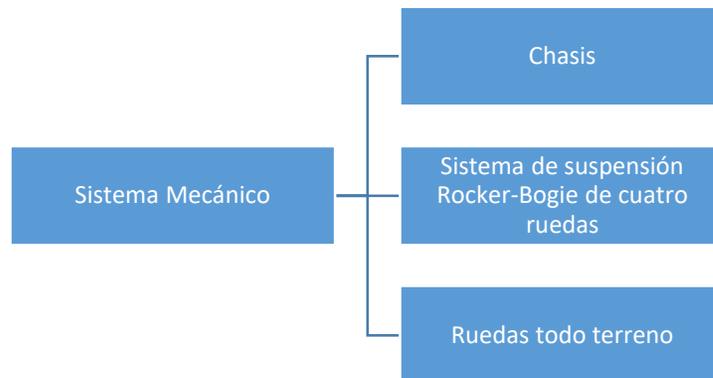
1.

Figura 1  
Sistemas y subsistemas del proyecto



## **Sistema mecánico**

Figura 2  
Sistema mecánico

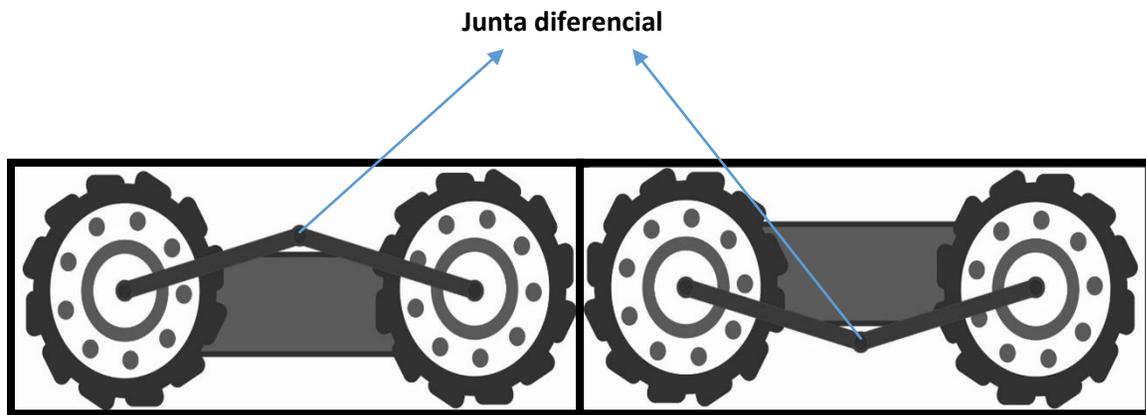


### **Chasis**

Se implementará una estructura capaz de trabajar en condiciones de exploración hostiles, la cual deberá funcionar de forma óptima en caso de que el robot se voltee (encuentre de cabeza). Para esto se debe considerar que el vehículo sea más plano y las ruedas sean más grandes que en la sección transversal del chasis (Figura 3). También es importante tomar en cuenta la disposición de los componentes electrónicos dentro del chasis, para que no afecte al centro de gravedad del prototipo.

**Figura 3**

Esquema de distribución del chasis en el caso de que el robot se voltee



#### ***Sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas***

El sistema de suspensión debe adaptarse a imperfecciones del entorno, manteniendo la tracción en el peor de los escenarios en tres de las cuatro ruedas (Chinchkar D. G., 2017).

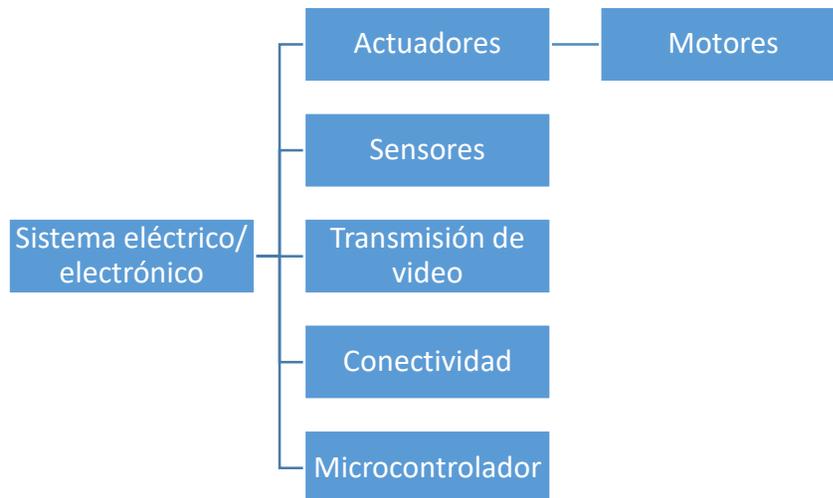
#### ***Ruedas todo terreno***

Las ruedas presentarán características que garanticen la adherencia y tracción en entornos adversos (Alfredo, 2007).

## **Sistema eléctrico / electrónico**

**Figura 4**

*Sistema eléctrico / electrónico*



### **Actuadores**

Como actuadores finales se utilizará motores que deberán ser dimensionados y seleccionados correctamente, para que el sistema robótico esté capacitado para desplazarse en lugares de terreno variado (piedra, césped, arena, mixto).

### **Sensores**

Se seleccionarán sensores para realizar el control de velocidad de las ruedas ya que el robot planteado tiene características de un robot diferencial el cual requiere que no exista variación de velocidades por cargas adicionales, por variaciones en el suelo, o por algún tipo de adversidad del terreno sinuoso (Baturone, 2005) (Basantes, y otros, 2018).

### **Transmisión de video**

Para la transmisión de video, se utilizará una cámara de video que presente un rango mínimo y máximo en su resolución, el cual sea capaz de diferenciar los objetos de la imagen. Un aspecto que debe

ser considerado es la iluminación, puesto que en ciertos entornos esta será media o baja, por lo que se puede implementar una cámara con visión nocturna o térmica (Torres F. C.-H., 2002) (Andrea, Byron, Jorge, Inti, & Aguilar, 2018). La cámara debe ser capaz de grabar en un formato de video universal para facilitar el envío de este hacia el mando receptor.

### ***Conectividad***

Para la conectividad del robot con el operador se deberá incluir un módulo bidireccional, con el objetivo de que el robot realice las acciones que el operador le envíe a través del mando. Para la transmisión de datos entre el operador y el robot, se deberá seleccionar el protocolo de comunicación adecuado para que el robot cumpla con las especificaciones de operación (Slawiński, 2010) (Jara-Olmedo A. , y otros, 2018).

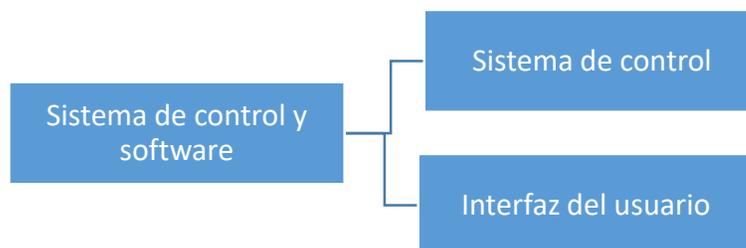
### ***Microcontrolador***

Se escogerá un microcontrolador acorde a las necesidades tanto del sistema robótico como del mando del robot.

### ***Sistema de control y software***

#### ***Figura 5***

*Sistema de control y software*



***Sistema de control***

El prototipo robótico presentará un sistema de control en lazo abierto (Navarro, 2004), puesto que los comandos enviados por el operador desde el mando no tendrán una retroalimentación (Aguilar, Casaliglla, & Pólit, Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles, 2017).

***Interfaz de usuario***

La interfaz de usuario deberá ser capaz de enviar señales de control al robot, obtener la imagen de la cámara de video y tener botones de emergencia.

## Capítulo 2 investigación previa

La robótica se ha convertido en un campo esencial para el progreso de nuestro país, llegando a ser considerada equivalente al avance tecnológico, lo que permite abrir nuevas fronteras al desarrollo de la sociedad (Alabart, 2018).

En la actualidad existe variedad de robots con diversas estructuras geométricas y mecánicas, que hacen que posean su propia funcionalidad y aplicación, pero de forma general se los puede clasificar como: Móviles, humanoides e industriales. (Reyes Cortés , 2011)

### Robots móviles

Los robots móviles son diseñados para aumentar el campo de aplicación de la robótica, su principal característica es que poseen un campo de trabajo ilimitado, con esto pretenden aumentar la movilidad del robot y su espacio de trabajo (Sotelo, 2007). Estos robots poseen un sistema de locomoción que permite que se muevan libremente en el ambiente de trabajo, también pueden adaptarse a una diversidad de terrenos y actuar en ambientes no estructurados. (Reyes Cortés , 2011) Esto implica que se puede desarrollar nueva tecnología gracias a la implementación de robots no sedentarios y que a su vez cuenten con autonomía (Sotelo, 2007).

Existen varias maneras para lograr que un robot se desplace, de acuerdo con esta premisa los robots móviles se clasifican en:

- Robots Terrestres: en su mayoría son movidos por ruedas, aunque también existen robots que imitan a las piernas de humanos a las patas de algún animal (Alatise, 2020) (Aguilar & Angulo, Compensación de los efectos generados en la imagen por el control de navegación del robot Aibo ERS 7, 2012).

- Robots aéreos: los más comunes son los UAV (vehículos aéreos no tripulados) (Orbea, y otros, Math Model of UAV Multi Rotor Prototype with Fixed Wing Aerodynamic Structure for a Flight Simulator, 2017).
- Robots acuáticos: son los más adecuados para movilidad en entornos marinos, son más conocidos como vehículos acuáticos autónomos (Pollard, 2016) .

### **Robots terrestres**

Los robots terrestres se los clasifica por el medio de locomoción que utiliza, los sistemas de locomoción más usados en la actualidad son: ruedas, patas y orugas. (Reyes Cortés , 2011) Debido a la naturaleza de esta investigación nos vamos a centrar en el estudio de los robots móviles con ruedas.

### ***Robots móviles con ruedas (RMR)***

Los robots móviles con ruedas son vehículos capacitados para movilizarse sobre una superficie, obteniendo tracción de ruedas sujetadas al chasis del robot. Como ventajas de los robots con ruedas tenemos (Siciliano & Khatib, 2016):

- Consumen menos energía y se mueven más rápido que otros mecanismos de locomoción.
- Desde el punto de vista del control, es mucho más fácil realizarlo ya que posee mecanismos más simples y no presenta problemas de estabilidad.

Aunque una de sus grandes desventajas es la dificultad de superar condiciones de terrenos adversos o irregulares.

### ***Tipos de ruedas***

Los tipos de ruedas están atados a la restricción de movilidad que presenta el robot, por lo que cada rueda contribuye al movimiento del robot y a su vez le aplica restricciones en su movimiento reduciendo el grado de movilidad del vehículo. (Reyes Cortés , 2011)

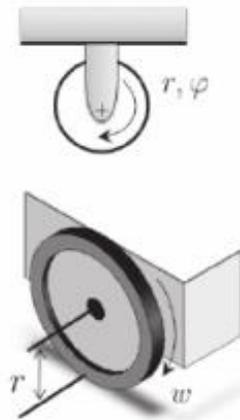
Según (Reyes Cortés , 2011) las ruedas se pueden clasificar en:

- Rueda fija
- Rueda de centro orientable
- Rueda de centro orientable desplazado
- Rueda omnidireccional o sueca

### **Rueda fija**

La rueda fija no consta de una articulación destinada para la dirección, su nombre se da porque su posición es fija con respecto a la estructura del robot móvil (Shabalina, Comparative analysis of mobile robot wheels design., 2018).

*Figura 6*  
*Rueda fija*



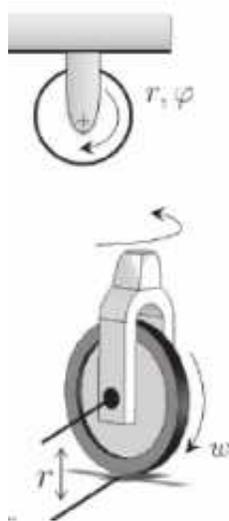
*Tomado de (Reyes Cortés , 2011)*

### ***Rueda de centro orientable***

La rueda de centro orientable cuenta con una articulación para la dirección, esta articulación permite que exista movimiento de la rueda con respecto a la estructura del robot móvil, una de sus características es que el eje de dirección pase por el centro de rotación de la rueda.

#### ***Figura 7***

*Rueda de centro orientable*

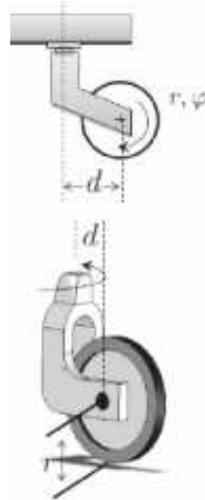


Tomado de (Reyes Cortés , 2011)

### ***Rueda de centro orientable desplazado***

La rueda de centro orientable desplazado es un tipo de rueda orientable que posee una articulación de dirección con respecto a la estructura del robot móvil, con la diferencia que el eje vertical no pasa por el centro de la rueda (Song, 2004).

**Figura 8**  
*Rueda de centro orientable desplazado*

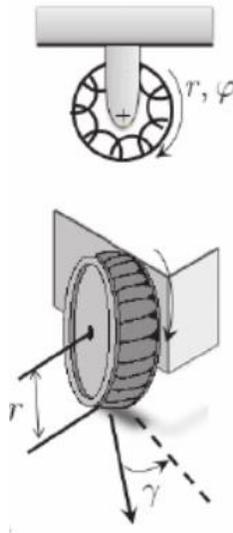


Tomado de (Reyes Cortés , 2011)

### **Rueda omnidireccional o sueca**

La rueda omnidireccional se caracteriza por poseer muchas ruedas direccionales pequeñas que se mueven a  $45^\circ$  o  $90^\circ$  con respecto a la superficie de rodado, con el objetivo de que la rueda grande se mueva hacia delante y hacia atrás mientras que las ruedas pequeñas se muevan indirectamente otorgando una movilidad en las cuatro direcciones. (Reyes Cortés , 2011)

**Figura 9**  
Rueda omnidireccional



Tomado de (Reyes Cortés , 2011)

### **Configuración de robots móviles**

Según la disposición y los tipos de ruedas se puede describir una variedad de configuraciones de robots móviles con distintos tipos de maniobrabilidad, esto se refleja en la selección del tipo de rueda y la ubicación de las ruedas en el cuerpo del robot, junto con la determinación de los parámetros cinemáticos. Según (Bambino , 2008) la clasificación de las configuraciones de los robots móviles es de acuerdo con el número de ruedas y son:

- Robot con una rueda
- Robot con dos ruedas
- Robot con tres ruedas
- Robot con cuatro ruedas

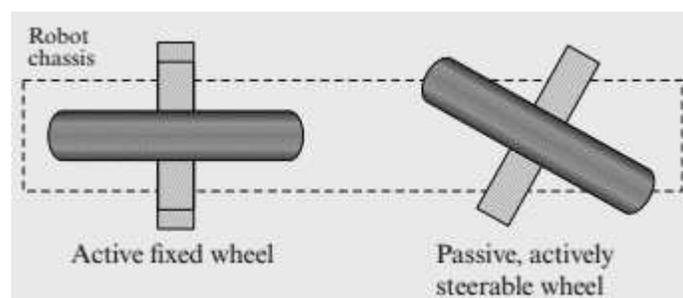
### ***Robot con una rueda***

Este tipo de robot móvil es considerado como inestable por su incapacidad de mantener el equilibrio, como ejemplos típicos tenemos robot monociclos con la rueda ensanchada y robot esféricos (Nukulwuthiopas, 2002). Estos robots no son muy utilizados en aplicaciones prácticas ya que requieren de mecanismos de equilibrio adicionales y el control dinámico es difícil.

### ***Robot con dos ruedas***

(Siciliano & Khatib, 2016) nos presenta dos configuraciones de robots de dos ruedas. La primera configuración es un robot tipo bicicleta (Figura 10), cuenta con una rueda trasera que genera movimiento y una rueda delantera encargada de la dirección, la estabilidad dinámica de este robot aumenta a medida que crece su velocidad, la desventaja de esta configuración es que no puede mantener su estabilidad si este detiene su movimiento.

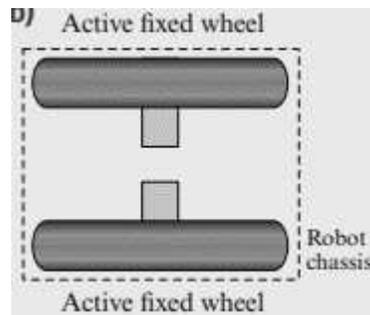
**Figura 10**  
*Robot tipo bicicleta*



*Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)*

La segunda configuración es un robot tipo péndulo invertido (Figura 11), también conocido como robot de accionamiento diferencial de dos ruedas, una de las desventajas de este tipo de configuración es la complejidad para realizar el control de equilibrio dinámico (Stefek, Energy comparison of controllers used for a differential drive wheeled mobile robot., 2020).

**Figura 11**  
Robot tipo péndulo invertido

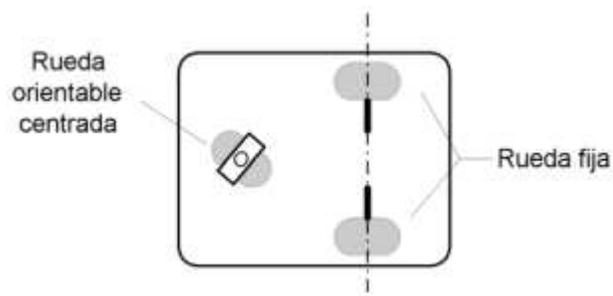


Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)

### **Robot con tres ruedas**

La configuración de triciclo más común está formada por dos ruedas fijas sobre un mismo eje y una rueda de centro orientable que realiza la función de dirección del robot (Chung J. H., 2003).

**Figura 12**  
Robot con configuración de triciclo



Tomado de (Bambino , 2008)

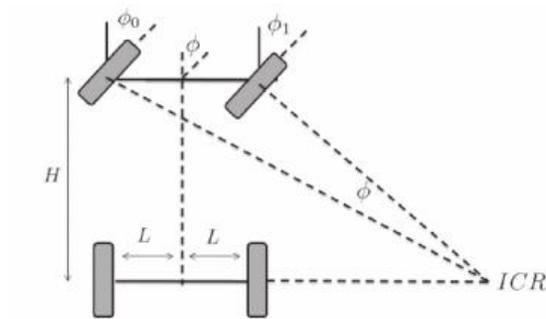
### **Robot con cuatro ruedas**

Existen varias configuraciones de robot de cuatro ruedas, una de las más usada es la configuración Ackerman (Ratner, 1999). Este diseño presta una buena estabilidad ya que cuenta con dos ruedas traseras

fijas sobre un mismo eje y dos ruedas delanteras que se dirige sincrónicamente con respecto al centro instantáneo de rotación ICR (Maulana, 2015).

**Figura 13**

*Configuración Ackerman*



Tomado de (Reyes Cortés, 2011)

### **Tracción y dirección de robots móviles**

La atracción y dirección de los robots móviles está dada por la ubicación de las ruedas, los algoritmos de control de los motores y la y la mecánica asociada a estos (Bambino, 2008). En el artículo expuesto por (Bambino, 2008) nos da a conocer tres configuraciones básicas de tracción y dirección:

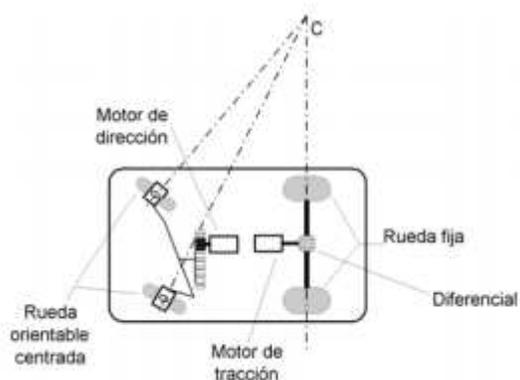
- Tracción y dirección en ejes independientes
- Tracción y dirección en un mismo eje
- Tracción y dirección sobre todos los ejes

### **Tracción y dirección en ejes independientes**

En esta configuración la tracción se efectúa en las ruedas traseras y la dirección en las ruedas delanteras (Song, 2004).

**Figura 14**

*Tracción y dirección en ejes independientes*



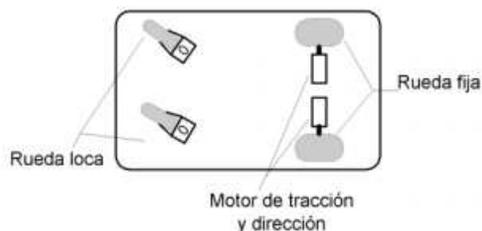
*Tomado de (Bambino , 2008)*

### **Tracción y dirección en un mismo eje (Tracción diferencial)**

Esta configuración también es conocida como tracción diferencial, la cual se logra ubicando motores independientes en las ruedas de un mismo eje. Una de las desventajas de esta configuración radica en que los motores deben poseer las mismas características con el fin de que el control sea más simple (Martínez-Clark, 2018).

**Figura 15**

*Tracción y dirección en un mismo eje*



*Tomado de (Bambino , 2008)*

Con esta configuración el robot puede realizar movimientos rectos, girar sobre sí mismo y trazar curvas. Para realizar estos movimientos se necesita la acción de dos motores uno para cada llanta, de tal forma que para realizar los giros se debe aplicar diferente velocidad a cada motor. Si se requiere girar a la

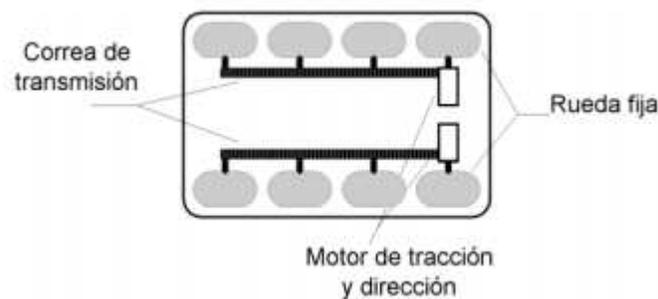
derecha se proporcionará una mayor izquierdo, mientras que si se requiere quiero la izquierda el motor derecho, con esta misma lógica sí se requiere que el robot se mueve en línea recta se deberá aplicar la misma velocidad a cada motor (Torres E. O., 2014).

### ***Tracción y dirección sobre todos los ejes***

En se observa una de las configuraciones más usadas de tracción sobre todos los ejes, ésta se aplica en terrenos de difícil acceso en donde la velocidad no es lo más importante, sino que requiere la mejor adherencia del terreno (Zhang, 2016).

**Figura 16**

*Tracción y dirección sobre todo los ejes*

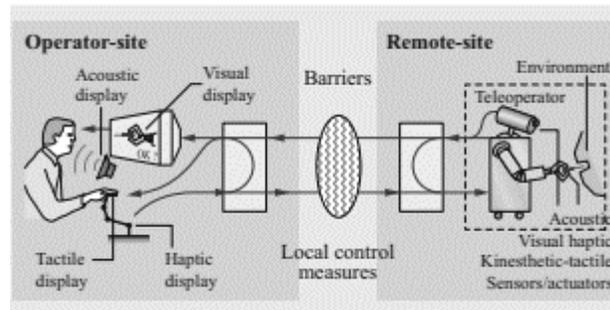


*Tomado de (Bambino , 2008)*

### **Telerobótica**

La telerobótica también conocida como robótica a distancia se le considera como una de las primeras expresiones de la robótica. Se entiende que la telerobótica debe tener un operador humano encargado de tomar las decisiones cognitivas y de planificación mientras que el robot se encarga únicamente de cumplirlas (Cabras, Rosell, Pérez, Aguilar, & Rosell, 2011).

La telerobótica es utilizada cuando surge la necesidad de sustituir a las personas en lugares de trabajo peligroso y de poca accesibilidad, evitando que el usuario interactuar directamente con el entorno (Ferre, 2007).

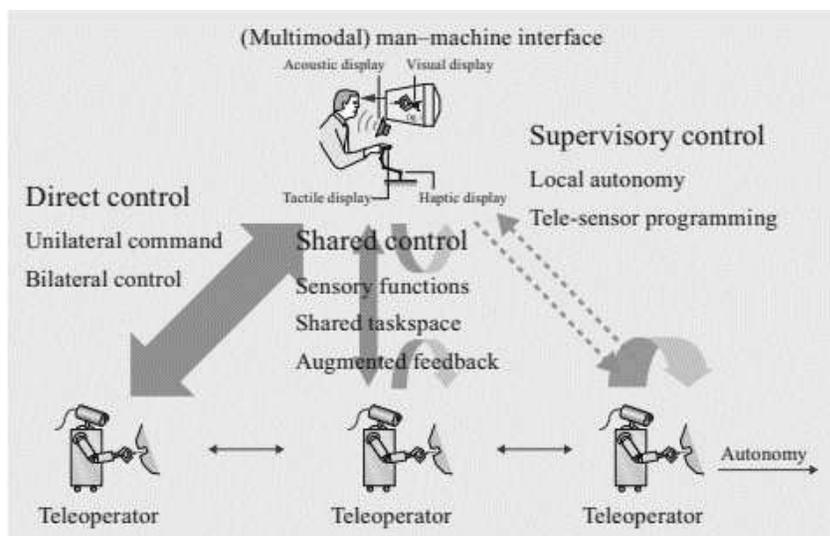
**Figura 17***Esquema de la telerobótica**Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)***Arquitectura de la telerobótica**

Los sistemas telerobóticos proporcionan información del entorno al operador, para que este envíe comandos y así el robot realiza su acción. Según (Siciliano & Khatib, 2016) se puede describir a las arquitecturas de la telerobótica según el estilo y el nivel de la conexión entre el operador y el robot, las tres categorías principales son:

- Control directo
- Control compartido
- Control de supervisión

**Figura 18**

Tipos de arquitecturas de control para la telerobótica



Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)

### Componentes del robot móvil

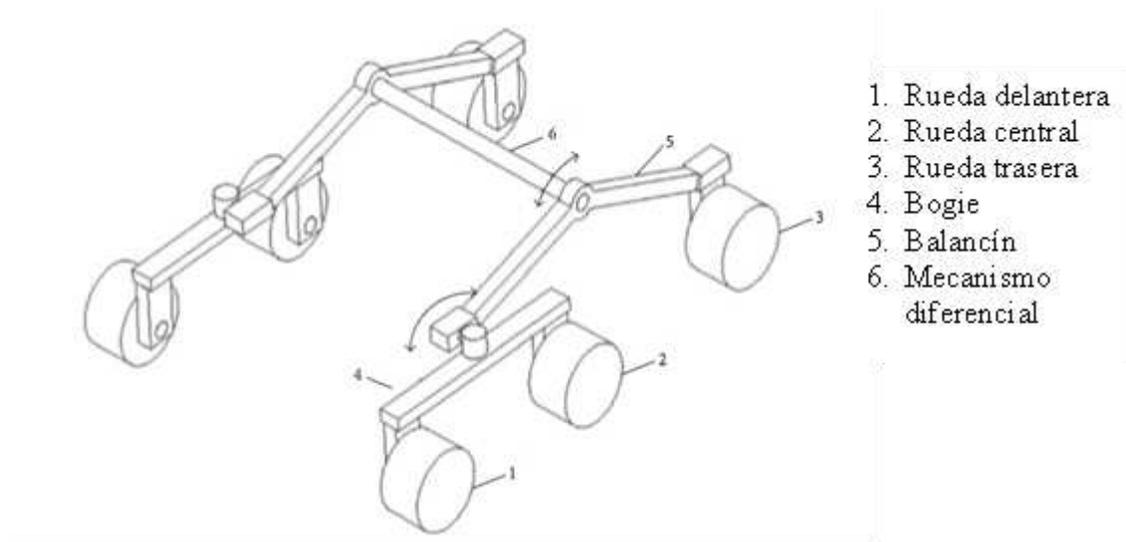
En esta sección se definirá los fundamentos teóricos básicos más importantes de los sistemas de este proyecto.

#### **Sistema mecánico**

Sistema de suspensión Rocker-Bogie.

El sistema de suspensión Rocker-Bogie es un mecanismo que consta en un extremo de un balancín conectado a la rueda trasera y del otro extremo conectado a un pequeño enlace que se llama bogie conectados con el chasis del vehículo por medio de un diferencial que permite que un vehículo mantenga todas las ruedas en contacto con la superficie, incluso cuando el terreno es irregular (Chinchkar D. G., 2017).

**Figura 19**  
Esquema de un mecanismo Rocker-Bogie



Tomado de (P. Miller & Lee, 2002)

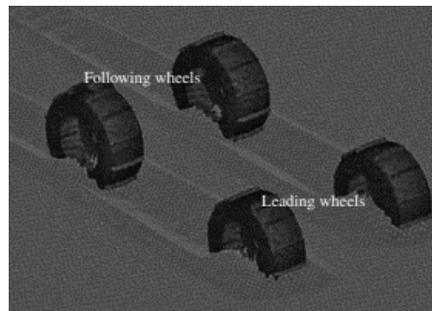
El sistema Rocker-Bogie para superar un obstáculo usa las ruedas delanteras las cuales son empujadas hacia el obstáculo por las ruedas traseras, la rotación de la rueda delantera eleva la parte frontal del robot y lo pasa por encima del obstáculo, la rueda del medio se presiona contra el obstáculo con la rueda trasera y se tira con la rueda delantera hasta que se levante, finalmente las dos ruedas delanteras tiran de la rueda trasera sobre el obstáculo. (D. Harrington & Voorhees, 2004)

### **Ruedas todo terreno**

La movilidad de un robot con ruedas se relaciona con las fuerzas generadas en el contacto entre la rueda y el terreno. El movimiento del robot en terrenos difíciles da como resultado la deformación del terreno, más aún cuando el terreno está compuesto de un material deformable como arena, piedras o arcilla (Zhao, 2021). Por esto las llantas cuenta como patrón de labrado que le permiten tener alta tracción en múltiples terrenos.

**Figura 20**

*Labrado de llantas para robot todo terreno*



*Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)*

**Sistema eléctrico / electrónico****Actuadores**

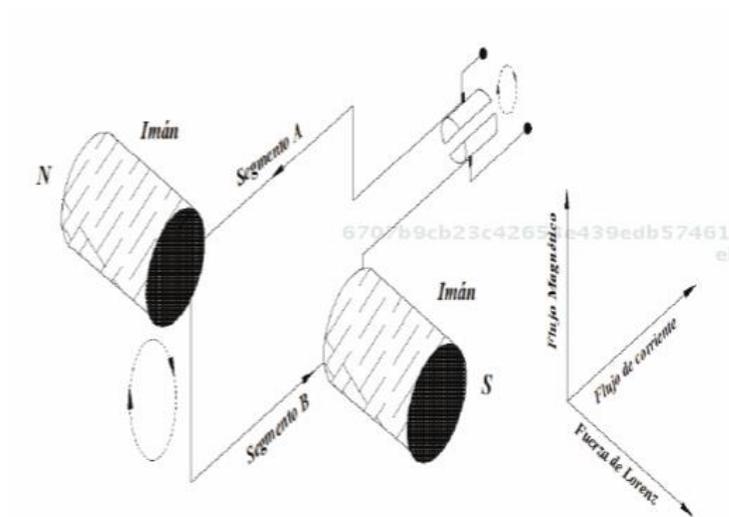
Los actuadores son los encargados de suministrar la fuerza motriz a los robots, existen 3 tipos de actuadores y son electromagnéticos hidráulicos y neumáticos; los más utilizados en robótica son los motores electromagnéticos ya que existe una amplia disponibilidad en el suministro de energía (Hunter, 1991). Los actuadores electromagnéticos accionan los eslabones del robot por medio de alguna transmisión mecánica para realizar tu trabajo (Boldea, 2004).

**Motores de corriente continua**

El motor de corriente continua es una máquina que transforma un tipo de energía (eléctrica) a otro tipo de energía (mecánica), provocando un movimiento rotatorio por medio de la acción de un campo magnético generado al conducir electricidad desde las escobillas hacia la bobina (rotor), permitiendo que el imán (estator) atraiga a la bobina de un lado y la repela del otro, esto obedece a la ley de Lorentz que establece “que cuando se coloca un conductor que transporte corriente dentro de un campo magnético, se genera una fuerza perpendicular al flujo de corriente” (Reyes Cortés , 2011, pág. 53).

**Figura 21**

Esquema básico del funcionamiento de un motor eléctrico

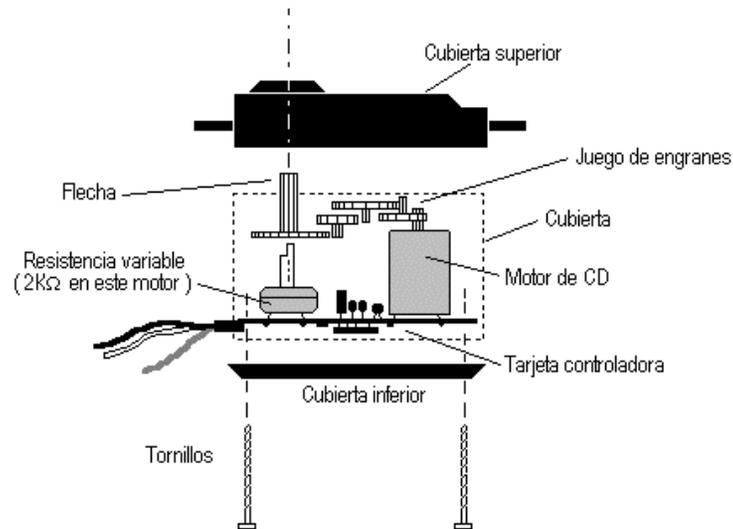


Tomado de (Reyes Cortés , 2011)

### **Servomotor**

En robótica es común que se maneje servomotores para realizar el movimiento, los servomotores son un tipo de actuadores giratorios de carácter electromecánico que están diseñados para seguir posición y velocidad. El servomotor está compuesto principalmente por un motor eléctrico un controlador electrónico y un sensor de posición, comúnmente también cuenta como un sistema mecánico (juegos de engranes) encargado de amplificar su fuerza de salida (HosseinNia, 2013).

**Figura 22**  
Componentes de un servomotor



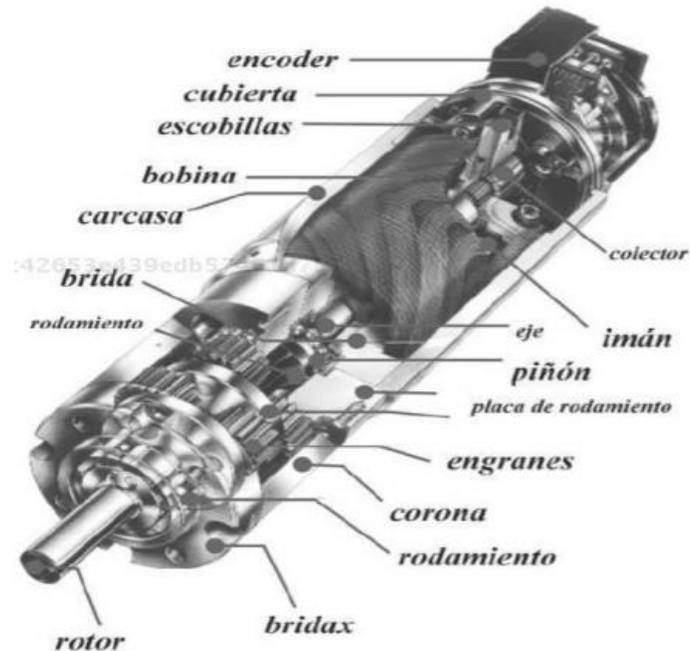
Tomado de (Mecafenix, 2017)

### **Motorreductores**

Los motorreductores son máquinas electromecánicas que combinan un motor eléctrico y un reductor de velocidad. El reductor de velocidad comúnmente posee un sistema de engranes ubicado en la parte frontal del motor que aparte de reducir la velocidad del rotor aumenta el torque (Prasanga, 2013). Algunos motorreductores poseen un sensor de posición localizado en la parte posterior del motor.

**Figura 23**

Componentes de un motorreductor

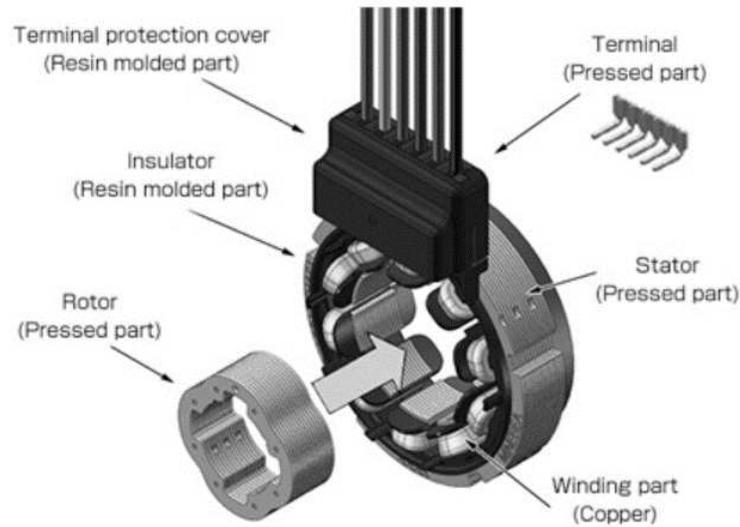


Tomado de (Reyes Cortés , 2011)

**Sensor de posición y velocidad**

(Reyes Cortés , 2011) nos da a conocer 4 tipos de sensores de posición velocidad que son más utilizados en la robótica, estos sensores son los potenciómetros, tacómetros, resolvers y encoders. A continuación, se presenta una breve descripción de los sensores posición velocidad más utilizados:

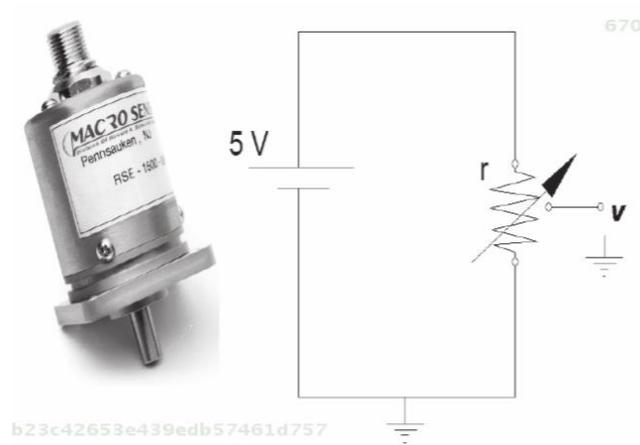
- **Resolvers:** este sensor mide la posición y velocidad angular de los motores, está formado por un estator multipolar y un rotor de imán permanente, al girar el rotor del motor pone en marcha el rotor del resolvers, proporcionando como señal de salida una variación de voltaje análogo, proporcional a la posición o velocidad angular del motor. (Creus Solé , 2011)

**Figura 24***Configuración de un resolvers**Tomado de (MinebeaMitsumi, 2021)*

- **Potenciómetros:** los potenciómetros son resistencias variables de accionamiento mecánico, estos son usados como sensores de posición angular de motores, ya que permiten realizar arreglos de resistencias para formar divisores de voltaje, generando como salida una variación de voltaje proporcional a la posición angular del motor, este tipo de sensor es muy utilizado en la fabricación de servomotores (Tosun, 2017).

**Figura 25**

Potenciómetro utilizado como sensor de posición

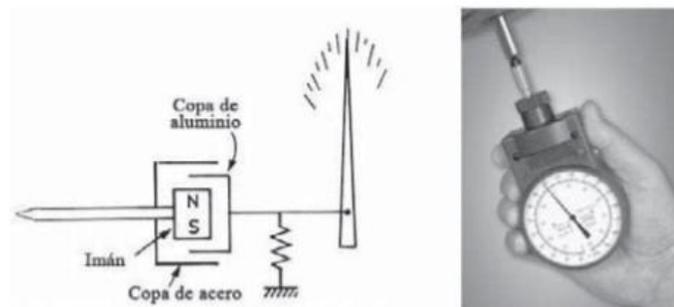


Tomado de (Reyes Cortés, 2011)

- **Tacómetro:** los tacómetros son sensores que se acoplan al eje motriz del motor para proporcionar un voltaje equivalente a la velocidad de giro del rotor. El tacómetro consiste en un rotor acoplado a un imán permanente y una bobina que al momento de gira induce una corriente proporcional a la velocidad angular (Alotaibi, 2013).

**Figura 26**

Tacómetro



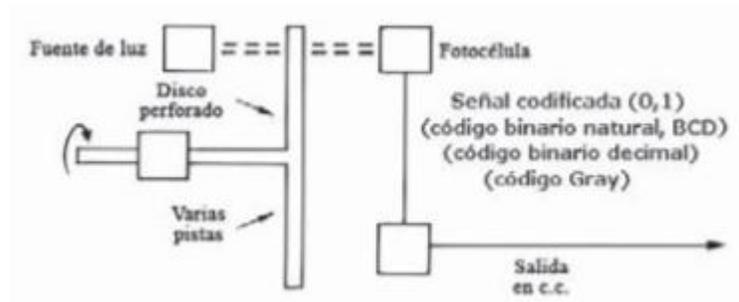
Tomado de (Creus Solé, 2011)

- **Encoders:** un encoder es un sensor digital que consta de un arreglo de diodos LED y de un disco giratorio con ranuras el cual está conectado al eje del motor, a medida que el motor gira la luz que pasa por las ranuras del disco giratorio es detectada por un

elemento fotosensible que genera un tren de pulsos proporcional al ángulo de giro del rotor (Cadena, 2016).

**Figura 27**

*Partes de un encoder*



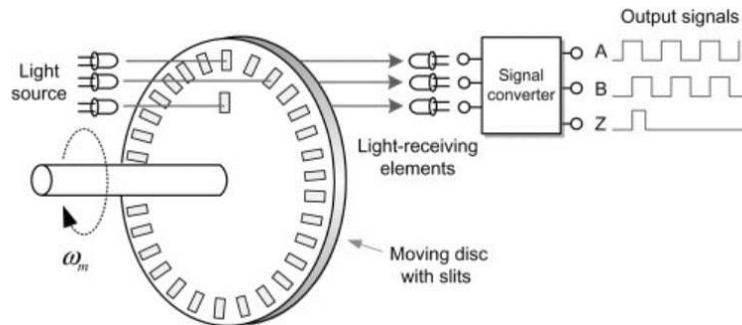
Tomado de (Creus Solé, 2011)

### **Encoder incremental**

El encoder incremental también conocido como relativo, cuenta con un disco giratorio y un arreglo de diodos LED que emiten luz a través de las ranuras del disco giratorio; este disco posee dos o tres ranuras nombradas "A, B y Z" (Figura 28) al pasar la luz por estas ranuras son detectados por elementos fotosensibles para formar una onda rectangular como un desfase entre A y B de 90° entre ellos. (Reyes Cortés, 2011)

**Figura 28**

Esquema de un encoder incremental

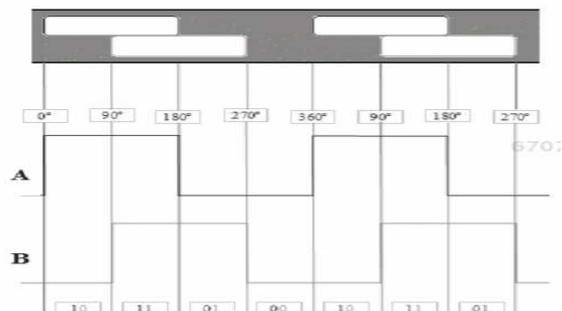


Tomado de (Hoon Kim, 2017)

El encoder incremental proporciona una salida de pulsos que son proporcionales al ángulo de rotación, el disco giratorio de este encoder es dividido en fracciones que representan desplazamiento rotacional del motor. Este encoder es llamado incremental ya que cambia su salida de debajo hacia alto cada que la luz pasa por una ranura, y también es llamado relativo debido a que la medida de posición es relativa a la posición última o anterior (Liu, 2004).

Una de las variaciones del encoder incremental es del encoder de cuadratura, este encoder es de tipo rotativo incremental y cuenta con la capacidad de indicar la posición, la velocidad y la dirección del movimiento del eje del motor. Este encoder genera dos señales de pulsos digitales desfasadas 90° eléctricos en cuadratura, a estas señales comúnmente se las llama A y B. Las señales de salida A y B se ponen en alto y bajo en una secuencia codificada que nos permite saber la dirección y el número de desplazamiento que ha ocurrido en el encoder (Reyes Cortés , 2011).

**Figura 29**  
Encoder de cuadratura



Tomado de (Reyes Cortés, 2011)

Para determinar el sentido de giro de un encoder de cuadratura se debe referenciar el desfase de las señales A y B, estas dos señales nos proporcionan una codificación de cuatro estados, que son una combinación de A y B.

**Tabla 1**  
Tabla de Estados de un encoder de cuadratura

Estados	A	B
<b>E0</b>	0	0
<b>E1</b>	1	0
<b>E2</b>	1	1
<b>E3</b>	0	1

El giro se determina al comparar el estado actual con el estado anterior. El giro del motor es en sentido horario si los estados del encoder incrementan (0, 1, 2, 3, 0) y es antihorario si los estados del encoder decrecen (3, 2, 1, 0, 3).

**Tabla 2**

Tabla de verdad de un encoder de cuadratura

	Estado Anterior	E0	E1	E2	E3
Estado Actual	AB	00	10	11	01
E0	00	0	+	E	-
E1	10	-	0	+	E
E2	11	E	-	0	+
E3	01	+	E	-	0

En la Tabla 2 se muestra la tabla de verdad del encoder de cuadratura en donde se compara el estado anterior con el actual para poder identificar el sentido de movimiento, por ejemplo si el estado actual es 10 y el estado anterior es 11 el giro sería en sentido horario, mientras que si el estado actual es 10 y el estado anterior es 00 el giro sería anti horario, en este contexto existen dos combinaciones más que no deberían aparecer en la tabla los cuales se marcan con cero (0) y con error (E).

### **Sensores inerciales IMU**

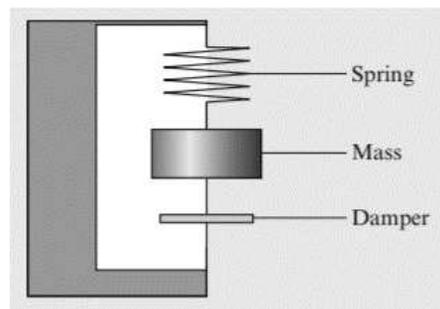
Los sensores IMU (Esser, 2009) por sus siglas en inglés “Inertial Measuring Unit” son utilizados para el análisis del movimiento mediante la toma de mediciones de aceleración y velocidad angular, para esto utilizan acelerómetros, giroscopios y magnetómetros (Segarra, Caballeros, Aguilar, Samà, & Rodríguez-Martín, 2019).

- **Acelerómetro:** El acelerómetro es un sensor utilizado para medir la aceleración que se produce al realizar un movimiento, la aceleración que se mide es la del objeto al que va unido el sensor respecto a la masa inercial interna (Keir, 2007). En otras palabras, el acelerómetro mide la fuerza de inercia que se genera cuando la masa del

objeto al que va unido es afectada por un cambio de velocidad (Grijalva, Cueva, Ramírez, & Aguilar, 2019). El acelerómetro puede medir las fuerzas externas que actúan sobre el robot móvil, una característica importante de los acelerómetros es que son sensibles a todas las fuerzas externas que actúan sobre ellos, entre estas fuerzas está incluida la gravedad. (Siciliano & Khatib, 2016)

**Figura 30**

*Esquema de un acelerómetro*

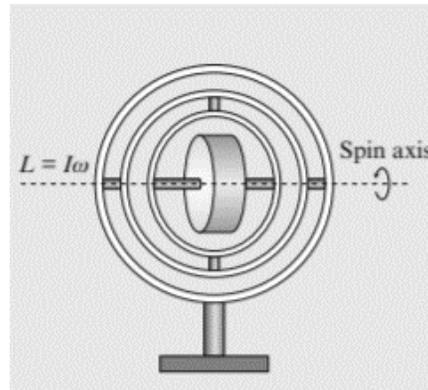


*Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)*

- **Giroscopio:** el giroscopio es un sensor de velocidad angular (Amaguaña, Collaguazo, Tituaña, & Aguilar, 2018), este nos permite conocer cómo varía un ángulo con respecto al tiempo permitiéndonos conocer forma de movimiento del objeto en el cual el giroscopio se encuentra ubicado. El principio de funcionamiento de este sensor consta de una masa que rota sobre un eje sostenido por gimbals, existe un eje por cada grado de libertad que presente el sensor (Chung H. O., 2001). Los gimbals hacen que la masa se encuentra estable en el eje permitiendo que el giroscopio apunte siempre en la misma dirección, hasta que exista una variación externa permitiendo así observar el cambio en el ángulo. En robótica móvil los giroscopios tienen el objetivo de medir los cambios de la orientación del vehículo (Zurita, Aguilar, &

Enríquez, 2019), utilizando para esto las leyes físicas que produce efectos predecibles durante la rotación. (Siciliano & Khatib, 2016)

**Figura 31**  
*Giroscopio mecánico*



Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)

### **Adquisición de vídeo**

La adquisición de vídeo es el proceso donde se intenta imitar la capacidad que tienen los seres vivos para ver una escena (Galindo, Aguilar, & Reyes Ch, 2019), mediante la adquisición de una imagen digital a través de sensores de imagen como cámaras de vídeo. (García S. & Caranqui S., 2015)

- **Cámaras de vídeo:** las cámaras de vídeo poseen un sensor que es capaz de captura una imagen y posteriormente ser transferida a un sistema electrónico para poder ser procesada (Safaric, 2001) (Pardo, Aguilar, & Toulkeridis, 2017). Las cámaras más utilizadas en telerobótica deben contar con un protocolo de comunicación que permita obtener y enviar la imagen en tiempo real.

### **Conectividad**

Tomando en cuenta que se está diseñando un robot móvil teleoperado se debe plantear un sistema de comunicación capaz de conectar el operador y el esclavo (Jara-Olmedo A. , Medina-Pazmiño,

Tozer, Aguilar, & Pardo, 2018). En el campo de la robótica móvil se emplea comunicación inalámbrica debido a los requerimientos de libre movilidad del robot, por lo que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio. En este contexto la comunicación inalámbrica se puede catalogar de acuerdo con el rango de frecuencias que se utilice para la transmisión de datos, por lo que existen distintos tipos de tecnologías en donde varían tanto la velocidad y la distancia de cobertura. Para para telerobótica las tecnologías que más se utiliza son: Wi-Fi, RF, Bluetooth, Zigbee (Garawi, 2006).

- **Wi-Fi:** El sistema Wi-Fi fue diseñado para el envío de datos entre redes computacionales de manera inalámbrica por medio de ondas electromagnéticas. Esta tecnología inalámbrica está basada en el estándar IEEE 802.11. Una red Wi-Fi permite el acceso de múltiples dispositivos conectados al mismo punto de red, con el único requerimiento que compartan la misma capacidad de transmisión de datos que el punto de acceso. La red Wi-Fi presenta interferencias o pérdidas de señal que se dan por consecuencia de cambios ambientales y del entorno, haciendo que exista una menor velocidad en comparación de una red cableada. La velocidad de transmisión de una red Wi-fi varía dependiendo del estándar y de la tecnología que se utilice, los más comunes son el estándar 802.11b con una velocidad de transmisión de 11 Mbps, otros de los más utilizados es el estándar 802.11g con una velocidad de transmisión de 54Mbps ampliables hasta los 108Mbps gracias a nuevas tecnologías (IEEE , 2020). Estos dos estándares trabajan a una frecuencia de 2.4 GHz.
- **Radiofrecuencia RF:** se conoce como radiofrecuencia al grupo de frecuencias que van entre los 3Hz y los 300Ghz (Orbea, y otros, Vertical take off and landing with fixed rotor, 2017), frecuencias que corresponden a la parte menos energética en el espectro electromagnético. Las ondas de RF son generadas por el paso de corriente

alterna a través de un conductor hacia un dispositivo de transmisión como una antena (Kim, 2008) (Lee, 2006). Para la comunicación inalámbrica se utiliza frecuencias que van entre los 30 y 3000Mhz con longitudes de onda que van entre 1m y 100m. La radiofrecuencia no cuenta con protocolos establecidos lo que hace más versátil la comunicación ya que sólo depende de las características de los dispositivos utilizados; uno de los protocolos más utilizados en radio frecuencia para la comunicación inalámbrica es el RS-232 (IEEE , 2020).

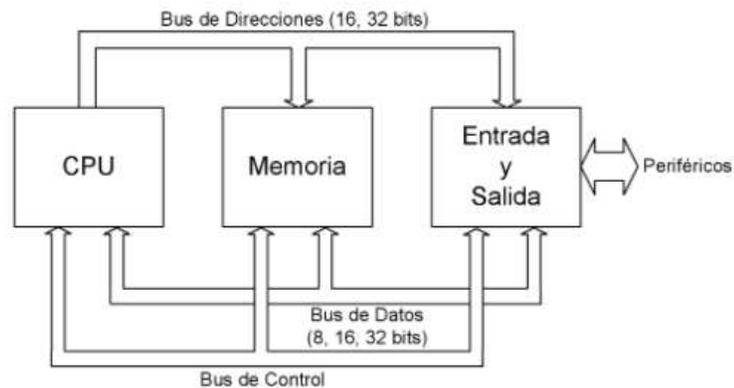
- **Bluetooth:** Esta tecnología de comunicación está diseñada para la transmisión inalámbrica de datos a corta y mediana distancia. Esta tecnología está diseñada para realizar conexiones sin cables a distancias cortas, además esta tecnología funciona por medio de la acción de transmisores y receptores de radio de alta frecuencia y baja potencia (Bellido outeirinho & De la Cruz Fernandez , 2004). La tecnología Bluetooth se rige a través de un estándar que define dos niveles de potencia que se relaciona con la distancia de alcance de la señal: el primer nivel cuenta con una potencia máxima de 1mW la cual cubre una distancia de hasta 10 metros, el segundo nivel nos proporciona una potencia máxima de 100mW dándonos como distancia máxima 100 m (Muller, 2002). La transmisión por Bluetooth está montada en la banda de frecuencia de 2.45Ghz y actúa contra los que van entre los 2400Mhz a los 2500Mhz (IEEE , 2020).

### ***Microcontrolador***

El microcontrolador es un circuito integrado digital compuesto por 3 bloques fundamentales que son el CPU, la memoria y la entrada y salida de datos. estos 3 bloques están interconectados dentro de él microcontrolador por medio de líneas eléctricas denominadas buses. (Valdes & Pallás Areny, 2007)

**Figura 32**

Esquema de un microcontrolador



Tomado de (Siciliano & Khatib, 2016)

Los microcontroladores son de un pequeño tamaño lo que los hace fáciles de ser agregados a muchos productos tanto industriales, electrónicos, mecánicos y de robótica, que necesiten tener un procesador programable (Aguilar, Manosalvas, Guillén, & Collaguazo, 2018). Además de su pequeño tamaño también son de un costo reducido y bajo consumo energético por lo que resultan ser apropiados para numerosas aplicaciones.

La mayoría de los microcontroladores son utilizados en sistema es de electrónicos como por ejemplo electrodomésticos, sistemas informáticos, sistemas de telecomunicaciones, sistemas de control de maquinaria y sistemas de automatización; en estas aplicaciones los microcontroladores sustituyen a antiguas tecnologías como como MSI y LSI (Mandado Pérez, 2007) .

En la actualidad existen plataformas de hardware libre basadas en microcontroladores que son diseñadas para facilitar el uso de la electrónica, entre ellas las más utilizadas son arduino y Raspberry pi (Lazarin, 2015).

**Arduino**

El arduino es una plataforma electrónica de código abierto basado en hardware y software de características amigables del usuario. La empresa arduino fábrica una variedad de plataformas de hardware con un amplio catálogo de microprocesadores y controladores, estas placas son equipadas con pines de entradas y salidas digitales y analógicas para que puedan interconectarse con placas de expansión, placas de prueba, sensores y actuadores de manera sencilla.

La mayoría de las placas de arduino cuenta un con una interfaz de comunicación serial incluyendo el protocolo USB, mientras que los modelos más recientes además de la comunicación serial cuenta con módulos de comunicación inalámbricos como Wi-Fi y Bluetooth especializados para IoT (Arduino, 2021).

Los microcontroladores presentes en estás placas se los puede programar en C, C++ (Salcedo, Aguilar, Cobeña, Pardo, & Zahira, 2018) y el lenguaje de programación propio de arduino, además la empresa proporciona un entorno de desarrollo IDE arduino que facilita la conexión y programación de sus placas (Arduino, 2021).

**Figura 33**  
*Arduino UNO*



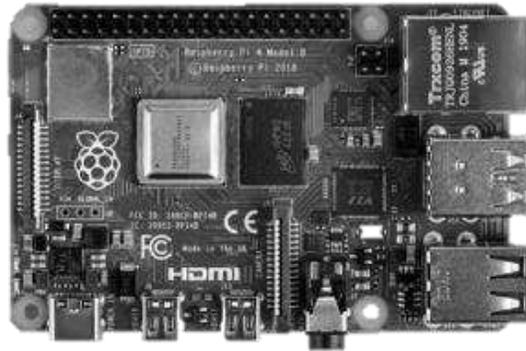
*Tomado de (Arduino, 2021)*

### **Raspberry Pi**

Raspberry Pi es una serie de computadoras completamente funcionales de pequeño tamaño y de placa única, fue creado en el Reino Unido por la fundación Raspberry Pi en el año 2012. Originalmente fue creada con el objetivo de poder enseñar informática en escuelas y colegios de todo el mundo a costos muy bajos y accesibles, gracias a sus múltiples prestaciones y tamaño reducido se popularizó hasta llegar a ser utilizado en hogares, oficinas, centros de datos, fábricas industriales, proyectos de robótica, proyectos de IoT e incluso proyectos espaciales (Halfacree, 2020).

Su tamaño reducido y sus distintos puertos de entrada y salida nos dan la posibilidad de conectar varios tipos de herramientas electrónicas que le permite utilizarse en varios tipos de tareas que van desde ser un pequeño computador doméstico hasta hacer el cerebro de distintos proyectos en el área de la electrónica, robótica e incluso en el área industrial (Halfacree, 2020).

**Figura 34**  
*Raspberry Pi 4*



*Tomado de (Halfacree, 2020)*

### **Sistema de control**

El control de un sistema robótico común es el que el robot ejecuta un movimiento únicamente con su programación, mientras que el control que utilizan los sistemas telerobóticos (Grijalva & Aguilar, Landmark-Based Virtual Path Estimation for Assisted UAV FPV Tele-Operation with Augmented Reality, 2019) proporcionan información hacia el usuario y requieren que el usuario envíe información hacia el robot (Figura 18). Con este preámbulo las arquitecturas de control de un sistema telerobótico se clasifican por el estilo y el nivel de la conexión en: control directo, control compartido y control de supervisión (Siciliano & Khatib, 2016). El control directo es aquel en el que no existe inteligencia ni autonomía por parte del robot ya que todo el control es realizado por parte del usuario mediante algún tipo de interfaz, si a este control se suma algún tipo de retroalimentación sensorial hacia el usuario se lo denomina control compartido; se considera control de supervisión cuando los comandos enviados por el usuario y la retroalimentación ocurren en un nivel superior, esto se da cuando el robot se le da una mayor autonomía local para que sea capaz de ejecutar tareas mucho más específicas y refinadas.

### ***Control de supervisión***

El control de supervisión se basa en que el supervisor da órdenes del alto nivel (Aguilar, Angulo, & Costa-Castello, Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking, 2017) y recibe información resumida del robot, esto lo compara con la acción de supervisar a un miembro humano con menor rango. En el control de supervisión los operadores humanos envían pocas secuencias de programación mientras reciben continuamente información del robot paralelamente el robot cumple un circuito de control autónomo a través de sensores, actuadores y su debida programación.

Las técnicas de control de supervisión otorgan al robot cada vez más autonomía para que este puede interactuar con el entorno, esto es muy útil para sistemas telerobóticos que poseen de retraso de tiempo de comunicación entre el operador y el robot, por ejemplo, en aplicaciones espaciales y submarinas (Chen, 2010). En estos casos no es factible que los operadores humanos manejen los movimientos del robot mediante retroalimentación visual con retardo, para esto se utiliza simulaciones predictivas que permiten al robot ser manipulado remotamente, también se utiliza HMIs de supervisión que permitan observar y configurar tanto los parámetros ambientales y las variables de control del robot (Gonzalez, 2017).

### ***Control compartido***

El control compartido es la mezcla de la confiabilidad y el sentido de presencia que nos proporciona el control directo y la capacidad de razonamiento que presente el control autónomo (Aguilar, Cobeña, Rodriguez, Salcedo, & Collaguazo, 2018). Un claro ejemplo de esto es la necesidad de un robot móvil de corregir su dirección, regular subsistemas o subtareas que necesite comandos adicionales que impliquen un retraso en el tiempo de la comunicación. También es muy común observar que el robot asuma el control de sus tareas que sean repetitivas durante largos periodos de tiempo (Quere, 2020).

***Control directo***

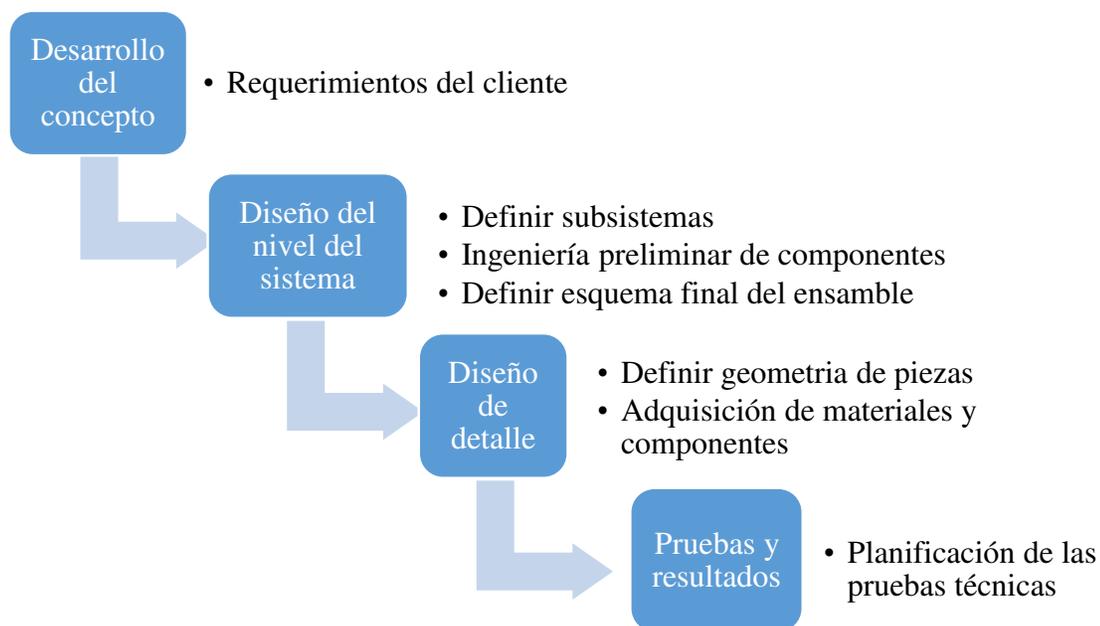
El control directo permite al operador especificar los movimientos del robot, esto implica controlar la posición, velocidad y la aceleración, generalmente el control directo se implementa unilateralmente evitando forzar la retroalimentación del operador (Siciliano & Khatib, 2016).

Para controlar la aceleración y la velocidad de un robot móvil que utilice control directo el dispositivo que se utiliza es un joystick o algún tipo de mecanismo maestro que sirve como dispositivo de entrada; la desventaja de estos dispositivos es que requieren de un esfuerzo considerable por parte del operador para mantener la posición la velocidad o la aceleración (Luo, 2000).

### Capítulo 3 diseño de subsistemas

En este capítulo se realizará el diseño de cada uno de los sistemas que conforman esta investigación, para esto utilizaremos una metodología para el diseño del producto que consta de 4 fases que son desarrollo de concepto, diseño a nivel del sistema, diseño a detalle pruebas y resultados.

**Figura 35**  
*Metodología para el diseño*



Para el diseño también se utilizará matrices de selección y matrices QDF las que nos ayudarán a establecer las necesidades del cliente y a seleccionar los elementos a utilizar en la construcción del robot (Yang, 2000).

## Requerimientos del cliente

El objetivo de plantear los requerimientos del cliente es crear un vínculo informativo entre el cliente y el desarrollador del prototipo, para esto se necesita una lista (Tabla 3) donde el cliente exponga los requerimientos del prototipo y la prioridad (en una escala donde 1 es el valor menor de importancia y 5 es de máxima importancia) de cada uno de los requerimientos del proyecto.

**Tabla 3**  
*Requerimientos y prioridades*

*Lista de*

N°	Requerimientos	Prioridad
1	Navegación por teleoperación	5
2	Transmisión de video en tiempo real	4
3	Sistema de suspensión tipo Rocker Bogie	4
4	Desplazamiento en cualquier tipo de suelo de ambientes interiores y exteriores.	4
5	Capacidad de funcionar de cabeza	4
6	precio bajo	3
7	Robusto	4
8	velocidad de 2m/s	3
9	Longitud máxima 60 cm	3
10	Fácil operación	3

Una vez obtenida la tabla de necesidades del cliente, se plantea una propuesta técnica ingenieril que satisfaga cada una de las necesidades planteadas por el cliente, como se puede observar en la Tabla 4.

**Tabla 4**  
*Características técnicas del robot*

N°	Características técnicas
1	Diseño del HMI
2	Protocolo de comunicación entre el robot y el operador
3	Selección de cámara de video
4	Diseño del Diferencial

<b>N°</b>	<b>Características técnicas</b>
<b>5</b>	Diseño del chasis
<b>6</b>	Diseño de los ejes
<b>7</b>	Diseño del mecanismo de transmisión
<b>8</b>	Diseño del mecanismo Rocker-bogie
<b>9</b>	Diseño de las ruedas
<b>10</b>	Selección de motores
<b>11</b>	Selección de materiales
<b>12</b>	Selección de componentes electrónicos

Después de plantear las características técnicas del robot se hace un análisis de relación que existen entre las necesidades del cliente y las características técnicas que satisfacen las necesidades, para esto se realiza una tabla de correspondencia que nos permite evaluar cuántos se relacionan las necesidades con las características técnicas. Para la correspondencia se toma en cuenta las siguientes condiciones de evaluación:

- Espacio en blanco: sin relación
- ①: relación débil
- ②: relación media
- ③: relación fuerte

**Tabla 5**

Tabla simbólica de correspondencia entre necesidades y características técnicas

	Diseño del HMI	Protocolo de comunicación entre el robot y el operador	Selección de cámara de video	Diseño del Diferencial	Diseño del chasis	Diseño de los ejes	Diseño del mecanismo de transmisión	Diseño de la suspensión	Diseño de las ruedas	Selección de motores	Selección de materiales	Selección de componentes electrónicos
Navegación por teleoperación	③	③	③									③
Transmisión de video en tiempo real	③	③	①									③
Suspensión tipo Rocker bogie				③	①	③	③	③	②	①	③	
Desplazamiento todo terreno			①	①	②	②	③	③	③	③	③	
Capacidad de funcionar de cabeza	①		①	②	③	①	①	③	②	①		
precio bajo		②	②	③	①	①	①	①	①	③	②	②
Robusto	①	②	①	②	③	③	②	②	③	②	③	②
Velocidad de 1,5m/s				③	②	①	③	①	②	③	③	①
Longitud máxima 60 cm					③	②	③	③	③			
Fácil operación	③							①	①			①

Para obtener la ponderación total de cada característica técnica y que esta ponderación mantenga una correlación con cada requerimiento es necesario evaluar las prioridades que el cliente otorga a cada requerimiento (Tabla 3), esta esta ponderación se calcula multiplicando la prioridad dada por el cliente a cada requerimiento, por las ponderaciones de las características técnicas (Tabla 5) y sumando todas las multiplicaciones realizadas en esa columna (Yacuzzi & Martín, 2003).

**Tabla 6**

Tabla numérica de correspondencia entre necesidades y características técnicas

	Prioridad	Diseño del HMI	Protocolo de comunicación entre el robot y el operador	Selección de cámara de video	Diseño del Diferencial	Diseño del chasis	Diseño de los ejes	Diseño del mecanismo de transmisión	Diseño de la suspensión	Diseño de las ruedas	Selección de motores	Selección de materiales	Selección de componentes electrónicos
Navegación por teleoperación	5	15	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Transmisión de video en tiempo real	3	9	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Suspensión tipo Rocker bogie	5	0	0	0	15	5	15	15	15	10	5	15	0
Desplazamiento todo terreno	4	0	0	4	4	8	8	12	12	12	12	12	0
Capacidad de funcionar de cabeza	4	4	0	4	8	12	4	4	12	8	4	0	0
precio bajo	4	0	8	8	12	4	4	4	4	4	12	8	8
Robusto	4	4	8	4	8	12	12	8	8	12	8	12	8
Velocidad de 1,5m/s	2	0	0	0	6	4	2	6	2	4	6	6	2
Longitud máxima 60 cm	3	0	0	0	0	9	6	9	9	9	0	0	0
Fácil operación	3	9	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3
Ponderación de la característica técnica		41	40	38	53	54	51	58	65	62	47	53	45
Orden de importancia		10	11	12	5	4	7	3	1	2	8	6	9

De la tabla numérica de correspondencia entre necesidades y características técnicas se obtiene

un orden de importancia para cada característica técnica esto implica el orden que se utilizará para la solución de los problemas.

**Tabla 7***Orden de importancia de las características técnicas*

Orden de importancia	Característica técnica
1	Diseño del mecanismo Rocker-bogie
2	Diseño de las ruedas
3	Diseño del mecanismo de transmisión
4	Diseño del chasis
5	Diseño del Diferencial
6	Selección de materiales
7	Diseño de los ejes
8	Selección de motores
9	Selección de componentes electrónicos
10	Diseño del HMI
11	Protocolo de comunicación entre el robot y el operador
12	Selección de cámara de video

Tomando en cuenta el orden de importancia de las características técnicas planteadas se puede observar que como prioridad consta el diseño del sistema mecánico, seguido a este se observa el diseño del sistema electrónico y al final el sistema de control el interfaz del usuario.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 7 se procede a agrupar las características técnicas en subsistemas según la orden de importancia, como se observa en la Tabla 8.

**Tabla 8***Características técnicas ordenadas según su importancia*

N°	Sistemas	Subsistemas	Característica técnica
1	Mecánico	Mecanismo de suspensión	Diseño del mecanismo Rocker-bogie
			Diseño del Diferencial
			Diseño del mecanismo de transmisión
		Selección de componentes	Diseño y selección de las ruedas
			Selección de motores
			Selección de materiales

N°	Sistemas	Subsistemas	Característica técnica
		Mecanismos importantes	Diseño de los ejes Diseño del chasis
2	Eléctrico/Electrónico	Selección de componentes	Selección de sensores Selección de módulos de conectividad Selección de microcontroladores Diagrama de conexión
3	Control y software	Teleoperación y control	Programación de controladores Programación de HMI Selección de cámara de video

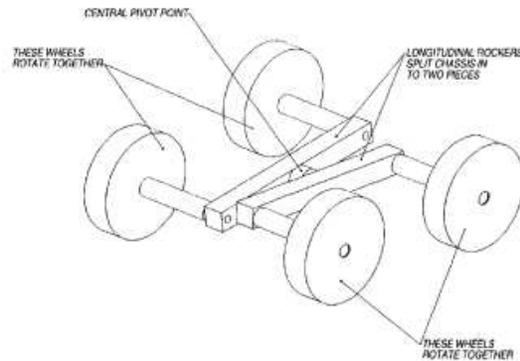
### Diseño del mecanismo Rocker-bogie

El mecanismo de suspensión que necesita un robot todo terreno debe contar con un sistema de tracción y suspensión que nos brinde la capacidad de mantenerse equilibrado, que tenga un control de postura con respecto al suelo y una maniobrabilidad adecuada para pasar obstáculos (Qian, 2017).

Uno de los problemas que presentan los robots todo terreno de 4 ruedas es que cuando el vehículo pasa por deformidades del suelo una rueda necesariamente se levanta del piso, para esto ha desarrollado distintos tipos de mecanismos de suspensión, uno de los más simples se basa en dividir el chasis del robot en dos (

Figura 36) formando un punto de rotación central entre el chasis, para esto se coloca una junta pivote pasiva entre las dos mitades del chasis (Sandin, 2003). La junta pivote se encuentra unida en cada extremo a un balancín con una rueda en cada extremo.

**Figura 36**  
 Mecanismo de suspensión con un eje de rotación



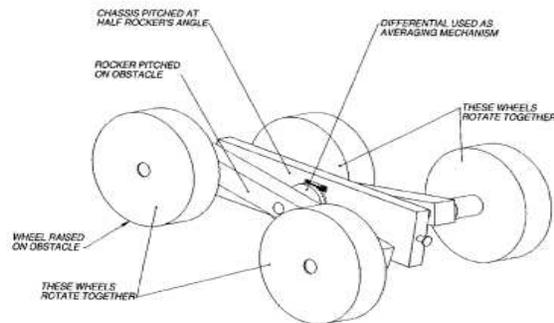
Tomado de (Sandin, 2003)

Este diseño hace que se conserve una carga casi igual en las cuatro ruedas cuando exista una variación del suelo y cualquiera de las dos ruedas conectadas en el balancín intenten subir o bajar, garantizando la movilidad del robot ya que se mantiene la tracción en cada rueda (Doroftei, 2007).

Una de las mejoras que se realizó el mecanismo antes mencionado se basa en agregar un diferencial entre las mitades del chasis sustituyendo el pivote pasivo (Figura 37). Este diferencial al ser conectado el engranaje de entrada el chasis cumple con la función de reducir el ángulo de inclinación del chasis a la mitad del ángulo de inclinación del balancín lateral (Sandin, 2003).

**Figura 37**

Mecanismo de suspensión con diferencial en el chasis



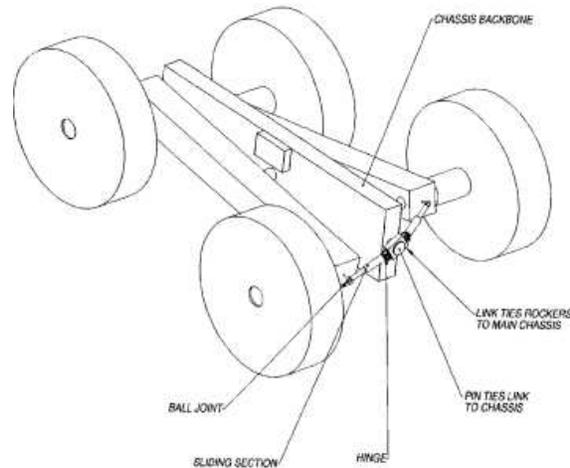
Tomado de (Sandin, 2003)

El diferencial en medio de los balancines minimiza el movimiento de cabeceo del robot manteniendo el chasis nivelado cuando cualquiera de las llantas se desplace sobre los resaltos del suelo (Martínez, 2008).

Otra variante del mecanismo de suspensión utiliza un tercer balancín unido a un punto de los balancines laterales (Figura 38), el pivote del tercer balancín se une a la mitad delantera o trasera del chasis, permitiendo que éste se desplace la mitad del ángulo de desplazamiento de los balancines laterales (Sandin, 2003).

**Figura 38**

Mecanismo de suspensión diferencial que utiliza un tercer balancín



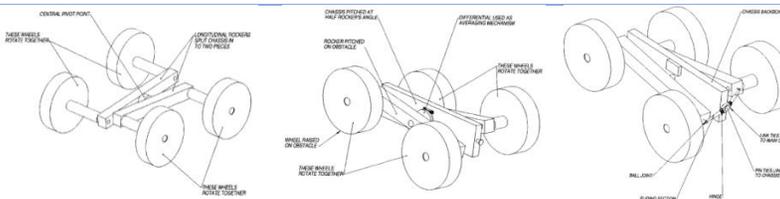
Tomado de (Sandin, 2003)

Una vez planteado los criterios técnicos de cada una de las variantes del mecanismo de suspensión se procede a realizar una tabla de selección (Tabla 9) en donde se comparan las tres variantes del mecanismo según los siguientes criterios:

- Funcionalidad del mecanismo: para este criterio se calificará en un rango de 1 – 5, donde se calificará con 5 al mecanismo que presente las mejores características de tracción, suspensión y posición del chasis.
- Facilidad de adquisición o fabricación: este criterio se calificará en un rango de 1 – 5, donde 5 será el mecanismo de más fácil adquisición vamos fabricación.
- Bajo costo: este criterio se calificará en un rango de 1 – 5, donde 5 es del mecanismo de menor costo.
- Tiempo de diseño: este criterio se calificará en un rango de 1 a 5, donde 5 será el que menos tiempo de diseño demande.
- Facilidad de ensamblaje: este criterio se calificará en un rango de 1 a 5, donde 5 sea el que presente menos complejidad al momento de ensamblar.

**Tabla 9**

Selección del mecanismo de suspensión



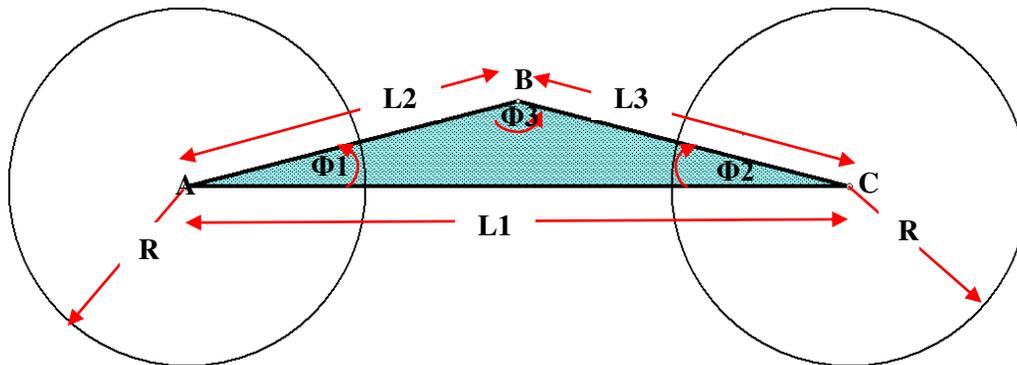
	Factor de ponderación	Mecanismo de suspensión con eje de rotación	Mecanismo de suspensión con diferencial en el chasis	Mecanismo de suspensión con tercer balancín
Funcionalidad del mecanismo	0.3	2	5	5
		0.6	1.5	1.5
Facilidad de adquisición o fabricación	0.3	5	5	2
		1.5	1.5	0.6
Bajo costo	0.1	4	3	2
		0.4	0.3	0.2
Tiempo de diseño	0.1	5	4	2
		0.5	0.4	0.2
Facilidad de ensamblaje	0.2	5	5	3
		1	1	0.6
Total	1	4	4.7	3.1

Gracias a los datos obtenidos en la Tabla 9 se puede concluir que la opción más viable es el mecanismo de suspensión con diferencial en el chasis, principalmente por su facilidad de adquisición o de mecanizado, y por la mejor funcionalidad del mecanismo.

### **Diseño de del mecanismo Roker-bogie**

Para poder realizar el diseño el mecanismo de suspensión se empieza analizando la geometría del balancín lateral, para esto vamos a descomponer dicho mecanismo en eslabones (Figura 39) para facilitar su análisis.

**Figura 39**  
*Síntesis estructural del mecanismo Rocker-bogie*



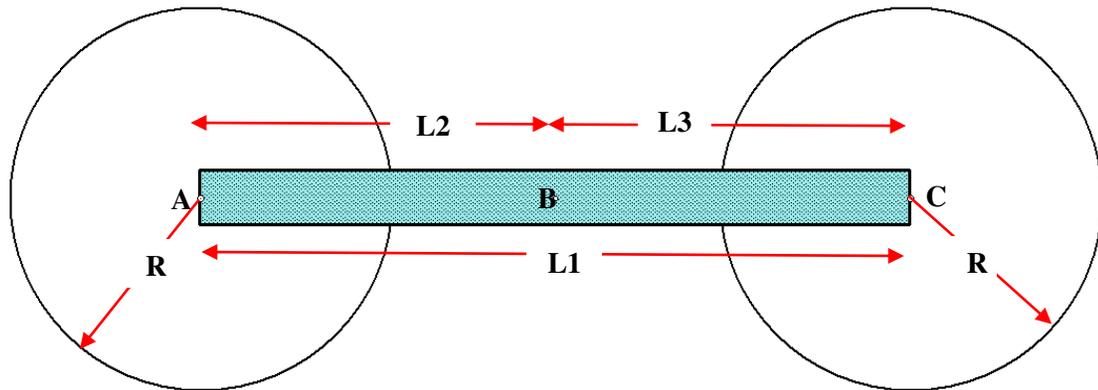
Este mecanismo está conformado principalmente por un eslabón ternario con tres nodos “A, B, C”, en el nodo A y C se encuentran ancladas las dos ruedas mientras que el nodo B es el punto de pivote del mecanismo.

Como puntos de inicio para el análisis de la geometría del mecanismo se toma en cuenta dos de los requerimientos del cliente que son: “Capacidad de funcionar de cabeza” y “longitud máxima de 60 cm”.

Para que el mecanismo pueda cumplir con la necesidad de funcionar de cabeza, este debe presentar una simetría a lo largo del eje x, para que el mecanismo presente las mismas características de funcionalidad cuando se encuentre en cualquiera de las dos posiciones. En la Figura 40 se plantea una variación del eslabón ternario en donde existe una simetría en el eje x reduciendo así el número de variables de diseño del mecanismo.

**Figura 40**

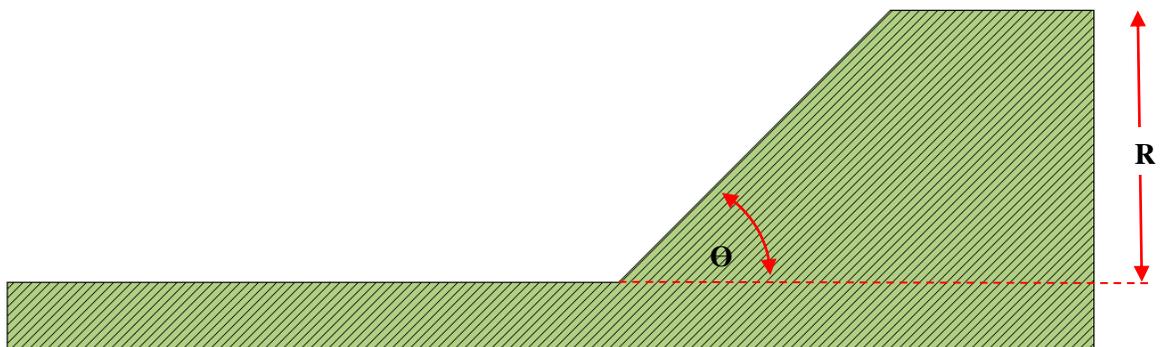
*Síntesis estructural del balancín tomando en cuenta la simetría en el eje x*



También se necesita plantear variables de diseño que involucren a las condiciones del suelo, como punto de partida tomamos un terreno boscoso en donde las imperfecciones podrán tener una altura máxima de un radio de la llanta del robot y una inclinación máximo de  $45^\circ$ .

**Figura 41**

*Variables de diseño a partir de las condiciones del suelo*

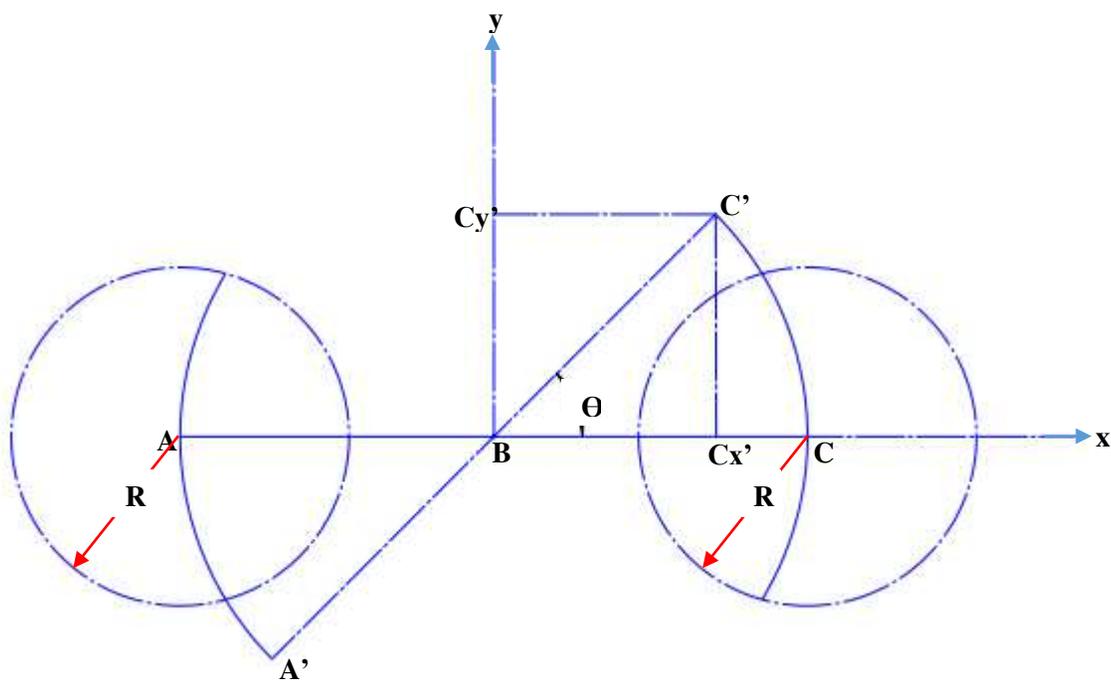


Para el diseño geométrico empezamos con un análisis de movilidad del mecanismo balancín tomando en cuenta las variables presentadas por el cliente y las condiciones del suelo para eso tenemos como datos de entrada los siguientes:

- simetría del eje x
- Largo del robot  $AC + 2R \leq 600mm$
- Inclinación del piso  $\theta = 45^\circ$
- altura de la imperfección igual a un radio de la llanta "R"

**Figura 42**

*Análisis de movilidad del mecanismo*



Del análisis de la Figura 42 se puede obtener las siguientes ecuaciones:

*Ecuación 1 Análisis geométrico y requerimientos del usuario*

$$BC + R \leq 300mm$$

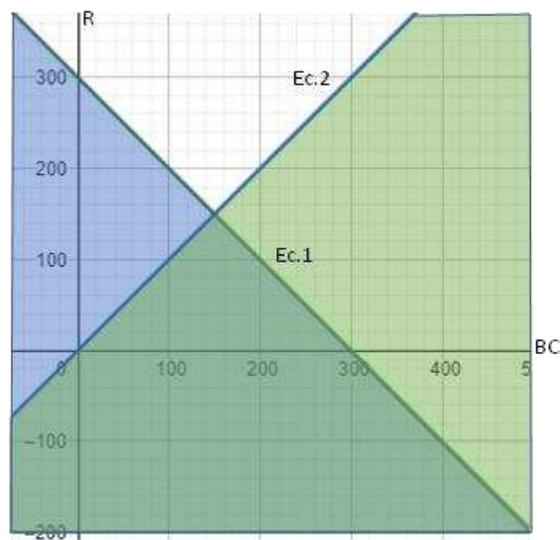
Ecuación 2 Restricción de longitud

$$BC > R$$

$$R < BC \leq 300 - R$$

**Figura 43**

Rango de convergencia de las inecuaciones 1 y 2



Convergiendo las inecuaciones (Ecuación 1, Ecuación 2) para poder determinar el rango de radios R y distancias entre BC. Se determina que:

- $0 < R < 150\text{mm}$
- $0 < BC < 300\text{mm}$

### **Selección de las llantas**

Para la selección de llantas se considera que la presión ejercida sobre el suelo por parte de los neumáticos no supere la presión crítica del suelo, ya que tanto el neumático como la superficie del terreno pueden sufrir deformaciones, por lo que se requiere considerar los fenómenos relacionados con la

deformación del suelo como con la deformación del neumático. En los últimos años se han desarrollado distintos modelos semi empíricos basados en la teoría de Bekker (Siciliano & Khatib, 2016).

Bekker propone en su teoría que la deformación de la llanta sirve para aumentar el tamaño de la zona de contacto entre la rueda y el terreno, por lo tanto se reduce la presión promedio sobre el suelo y se minimiza el hundimiento, en su teoría también nos da a conocer el concepto de círculo sustituto, que no se expresa que el neumático deformable puede reemplazar de manera equivalente a un neumático de mayor diámetro ya que ambos producen el mismo hundimiento (Siciliano & Khatib, 2016).

Tomando en cuenta esto se concluye que para el diseño del proyecto se considera una llanta deformable que nos ayudará a evitar el hundimiento del suelo. Otra de las variables importantes para la selección de los neumáticos es el peso de estos, ya que se debe considerar que los componentes del robot deben ser livianos, para mejorar la movilidad del robot y disminuir las pérdidas de energía por rozamiento.

Para el diámetro de llanta se considera los cálculos geométricos expuestos anteriormente por lo que se seleccionó llantas cuyos diámetros sean menores a los 300mm.

En la Tabla 10 se exponen 3 tipos de ruedas encontradas en el mercado local con sus principales características.

**Tabla 10***Opciones de ruedas*

N°	Rueda	Características	
1	Imsa 2.50/2.80-4	Peso (g)	700
		presión de llenado PSI	50
		Diámetro (mm)	210
		Precio (\$)	25
2	Imsa 8NN	Peso (g)	1100
		Presión de llenado PSI	Rígida
		Diámetro (mm)	210
		Precio (\$)	35
3	Imsa 6x2 4 lonas	Peso (g)	900
		presión de llenado PSI	40
		Diámetro (mm)	155
		Precio (\$)	40

Para la selección compararemos las tres opciones otorgándoles una ponderación a las características principales según la metodología utilizada en tablas anteriores.

**Tabla 11***Matriz de selección de ruedas*

		Imsa 2.50/2.80-4		Imsa 8NN		Imsa 6x2 4 lonas	
	F.P.	Calificaci ón	Ponderac ión	Calificació n	Ponderaci ón	Calificaci ón	Ponderaci ón
<b>Peso</b>	0.4	5	2	2	0.8	3	1.2
<b>Presión de llenado</b>	0.1	4	0.4	0	0	2	0.2
<b>Diámetro</b>	0.3	5	1.5	5	1.5	3	0.9
<b>Precio</b>	0.2	4	0.8	3	0.6	3	0.6
<b>Total</b>	1		4.7		2.9		2.9

Una vez realizado el análisis de la tabla de selección se concluye que es la mejor opción disponible en el mercado es la llanta “Imsa 2.50/2.80-4”, ya que cuenta con un diámetro quiere estar dentro de la escala del robot y posee el mejor peso de entre las opciones encontradas en el mercado.

### **Selección del motor**

Para la selección de motores se tomará en cuenta los 2 tipos de motores de corriente continua más utilizados en la fabricación de robots móviles, estos son motores DC brushed (con escobillas) y motores DC brushless (sin escobillas) (Neto, 2009). En la Tabla 12 se presenta las principales diferencias que existe entre los 2 tipos de motores mencionados anteriormente.

**Tabla 12**

*Diferencia entre motores DC brushless y DC Brushed*

	<b>DC brushless</b>	<b>DC brushed</b>
<b>Mantenimiento</b>	Mínimo	Periódico
<b>Durabilidad</b>	Mayor	menor
<b>Eficiencia</b>	Alta, sin caída de tensión	moderada
<b>Tamaño</b>	menor tamaño, debido a mejores características térmicas	el calor es disipado dentro de la armadura. que no sea pura desesperada
<b>Inercia del rotor</b>	baja	alta
<b>Rango de velocidad</b>	Alto, sin limitaciones por escobillas	Bajo, El límite lo impone las escobillas
<b>Control</b>	Complejo	Sencillo
<b>Costo</b>	Alto	Bajo

Una vez planteadas las diferencias entre los motores DC brushed (con escobillas) y DC brushless (sin escobillas) se procede a cuantificar cada característica siendo 1 la calificación más baja y 3 la calificación más alta (Tabla 13), con el fin de seleccionar el motor más conveniente para el prototipo.

**Tabla 13**

*Ponderaciones para la selección del tipo de motor*

	F.P.	DC brushless		DC brushed	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Mantenimiento</b>	0.2	3	0.6	1	0.2
<b>Durabilidad</b>	0.18	3	0.54	2	0.36
<b>Eficiencia</b>	0.15	3	0.45	2	0.3
<b>Tamaño</b>	0.07	2	0.14	1	0.07
<b>Inercia del rotor</b>	0.05	3	0.15	2	0.1
<b>Rango de velocidad</b>	0.1	3	0.3	2	0.2
<b>Control</b>	0.1	2	0.2	3	0.3
<b>Costo</b>	0.15	1	0.15	3	0.45
<b>Total</b>	1		2.53		1.98

En la Tabla 13 se observa que las características del motor DC brushless son más favorables para la construcción del prototipo.

Se debe analizar el prototipo cuando la inclinación sea la máxima requerida es decir de 45° (Figura 41), en este caso la fuerza que se opone al movimiento es la componente del peso total del prototipo sobre el eje de 45° y la fuerza requerida para que el robot suba es la entregada por el torque del motor. Para el cálculo del torque se asume una masa estimada de 10kg

Con esta información Se plantea una tabla de características de los motores DC brushless disponibles en el mercado, tomando como referencia la velocidad angular, la potencia y el precio. En la Tabla 14 se observa cuatro opciones de motores y sus características técnicas más relevantes para el proyecto.

**Tabla 14**

Opciones de motores

N°	Motor	Características	
1	YIYUN B01HPSY1VI	Voltaje (V)	15 - 36
		Velocidad (RPM)	600
		Potencia (W)	300
		Precio (\$)	67.0
2	VGEBY B08QVXHKP8	Voltaje (V)	24 - 36
		Velocidad (RPM)	500
		Potencia (W)	350
		Precio (\$)	204.0
3	COTTEEAMY B07PNMYHFT	Voltaje (V)	18 - 42
		Velocidad (RPM)	3500
		Potencia (W)	2900
		Precio (\$)	120
4	HOBBYSKY B07K7FMN7G	Voltaje (V)	7.4 - 44.4
		Velocidad (RPM)	3000
		Potencia (W)	3600
		Precio (\$)	90

Para la selección de los motores se utiliza una tabla de ponderaciones en función de la importancia de cada parámetro del motor, utilizando la metodología de la selección de mecanismos expuestos en la Tabla 9.

**Tabla 15**

Matriz de ponderaciones para la selección de motores

	F.P.	YIYUN B01HPSY1VI		VGEBY B08QVXHKP8		COTTEEAMY B07PNMYHFT		HOBBYSKY B07K7FMN7G	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Voltaje</b>	0.2	4	0.8	1	0.2	3	0.6	2	0.4
<b>Velocidad</b>	0.3	5	1.5	4	1.2	2	0.6	1	0.3
<b>Potencia</b>	0.2	4	0.8	4	0.8	3	0.6	2	0.4
<b>Precio</b>	0.3	5	1.5	1	0.3	2	0.6	4	1.2
<b>Total</b>	1		4.6		2.5		2.4		2.3

Una vez realizado el análisis de ponderaciones entre los motores disponibles en el mercado, se decidió utilizar el motor “YIYUN B01HPSY1VI” ya que éste cumple con un buen balance entre velocidad potencia y se podrá ajustar mediante el sistema de transmisión a los requerimientos del usuario. Además, el modelo de este motor (Figura 44) cuenta con una rueda de 2,1 pulgadas integrada al cubo del motor; así mismo cuenta con sensores de efecto hall que se los puede utilizar al realizar el control

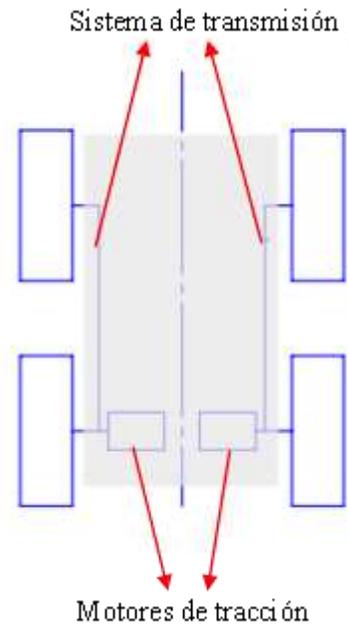
**Figura 44**  
*Motor YIYUN 350W*



### ***Diseño del mecanismo de transmisión***

Para el sistema de transmisión se propone un sistema de tracción y dirección sobre todos los cuatro ejes como se observa en la Figura 45.

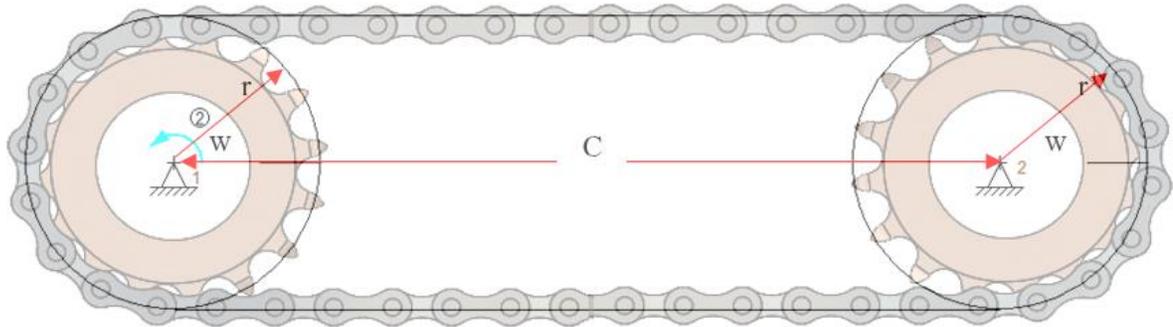
**Figura 45**  
*Esquema del sistema de transmisión*



Con esta premisa se considera que el sistema de transmisión debe tener un sistema de transmisión encargado de transferir el movimiento y la tracción a las cuatro ruedas, proponiendo el siguiente mecanismo.

**Figura 46**

Modelo del sistema de transmisión de movimiento a las 4 ruedas



Para iniciar el cálculo del sistema de transmisión es necesario plantear la velocidad lineal propuesta que es de 2m/s, además conocer la velocidad angular del motor y el radio de la llanta, con estos datos iniciales se procede con el cálculo del sistema de transmisión de movimiento.

Se inicia calculando la velocidad lineal del robot suponiendo que el sistema de transmisión tiene una relación 1:1, entonces la velocidad angular que se transmite hacia las llantas será la misma que la velocidad angular generada por el motor.

*Ecuación 3 Velocidad lineal*

$$Vl = w \times r$$

r = radio de la llanta

$$Vl = 600 \text{ rpm} \times 0.105\text{m}$$

$$Vl = 6.597 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sabiendo que el motor es capaz de cumplir con la velocidad lineal propuesta, se limitara la velocidad angular del motor para que no sobrepase la velocidad requerida de 2m/s.

Para el sistema de transmisión de potencia del motor a la rueda conducida, se usa como elementos de transmisión el conjunto cadena catalina; este diseño otorga al mecanismo flexibilidad, y permite además que la cadena transmita grandes fuerzas de tensión. Para el diseño de transmisión por cadena vamos a seguir los siguientes lineamientos:

- Se especifica un factor de servicio para calcular la potencia de diseño, para esto se toma en cuenta el tipo de motor impulsor que en este caso es un motor eléctrico y el tipo de carga. Los factores de servicio se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16  
Factores de servicio para transmisiones por cadena

Tipo de carga	Tipo de impulsor		
	Impulsor hidráulico	Motor eléctrico o turbina	Motor de combustión interna con transmisión mecánica
Uniforme (agitadores, ventiladores, transportadores con carga ligera y uniforme)	1.0	1.0	1.2
Choque moderado (máquinas herramienta, grúas, transportadores pesados, mezcladoras de alimento y molinos)	1.2	1.3	1.4
Choque pesado (prensas de troquelado, molinos de martillos, transportadores alternos, accionamientos de molino de rodillos)	1.4	1.5	1.7

Fuente:

(Mott, 2006)

Conociendo que el tipo de carga del robot es moderada y que el impulsor es un motor eléctrico se selecciona un  $FS=1.3$ . Con este factor de servicio se calcula la potencia de diseño según la Ecuación 4, y conociendo la potencia del motor es de 300W.

## Ecuación 4 Potencia de diseño

$$Pd = FS \times P$$

$$Pd = 1.3 \times 300W$$

$$Pd = 390W = 0.523Hp$$

- Para seleccionar el paso de la cadena se considera utilizar una cadena simple de rodillos número ANSI 40 de paso 0.5 in,
- Debido a que son las más comunes en el mercado local. Tomando en cuenta que nuestro sistema de transmisión es de relación 1:1 y que la velocidad angular a 2m/s es de 181 rpm, con estos datos previos se selecciona el número de dientes de la catalina según la Tabla 17.

**Tabla 17**

Potencia en Hp para una catalina de rodillos simple numero 40 paso 0.5in

Núm. de dientes	0.500 pulgadas de paso					Velocidad mínima de giro de la catarina, rev/min														
	10	25	50	100	180	200	300	500	700	900	1000	1200	1400	1600	1800	2100	2500	3000		
11	0.06	0.14	0.27	0.52	0.91	1.00	1.48	2.42	3.34	4.25	4.70	5.60	6.49	5.57	4.66	3.70	2.85	2.17		
12	0.06	0.15	0.29	0.56	0.99	1.09	1.61	2.64	3.64	4.64	5.13	6.11	7.09	6.34	5.31	4.22	3.25	2.47		
13	0.07	0.16	0.31	0.61	1.07	1.19	1.75	2.86	3.95	5.02	5.56	6.62	7.68	7.15	5.99	4.76	3.66	2.79		
14	0.07	0.17	0.34	0.66	1.15	1.28	1.88	3.08	4.25	5.41	5.98	7.13	8.27	7.99	6.70	5.31	4.09	3.11		
15	0.08	0.19	0.36	0.70	1.24	1.37	2.02	3.30	4.55	5.80	6.41	7.64	8.86	8.86	7.43	5.89	4.54	3.45		
16	0.08	0.20	0.39	0.75	1.32	1.46	2.15	3.52	4.86	6.18	6.84	8.15	9.45	9.76	8.18	6.49	5.00	3.80		
17	0.09	0.21	0.41	0.80	1.40	1.55	2.29	3.74	5.16	6.57	7.27	8.66	10.04	10.69	8.96	7.11	5.48	4.17		
18	0.09	0.22	0.43	0.84	1.48	1.64	2.42	3.96	5.46	6.95	7.69	9.17	10.63	11.65	9.76	7.75	5.97	4.54		
19	0.10	0.24	0.46	0.89	1.57	1.73	2.56	4.18	5.77	7.34	8.12	9.66	11.22	12.64	10.59	8.40	6.47	4.92		
20	0.10	0.25	0.48	0.94	1.65	1.82	2.69	4.39	6.07	7.73	8.55	10.18	11.81	13.42	11.44	9.07	6.99	5.31		
21	0.11	0.26	0.51	0.98	1.73	1.91	2.83	4.61	6.37	8.11	8.98	10.69	12.40	14.10	12.30	9.76	7.52	5.72		
22	0.11	0.27	0.53	1.03	1.81	2.01	2.96	4.83	6.68	8.50	9.40	11.20	12.99	14.77	13.19	10.47	8.06	6.13		
23	0.12	0.28	0.56	1.08	1.90	2.10	3.10	5.05	6.98	8.89	9.83	11.71	13.58	15.44	14.10	11.19	8.62	6.55		
24	0.12	0.30	0.58	1.12	1.98	2.19	3.23	5.27	7.28	9.27	10.26	12.22	14.17	16.11	15.03	11.93	9.18	6.99		
25	0.13	0.31	0.60	1.17	2.06	2.28	3.36	5.49	7.59	9.66	10.69	12.73	14.76	16.78	15.98	12.68	9.76	7.43		
26	0.13	0.32	0.63	1.22	2.14	2.37	3.50	5.71	7.89	10.04	11.11	13.24	15.35	17.45	16.95	13.45	10.36	7.88		
28	0.14	0.35	0.67	1.31	2.31	2.55	3.77	6.15	8.50	10.82	11.97	14.26	16.53	18.79	18.94	15.03	11.57	8.80		
30	0.15	0.37	0.72	1.41	2.47	2.74	4.04	6.59	9.11	11.59	12.82	15.28	17.71	20.14	21.01	16.67	12.84	9.76		
32	0.16	0.40	0.77	1.50	2.64	2.92	4.31	7.03	9.71	12.38	13.68	16.30	18.89	21.48	23.14	18.37	14.14	10.76		
35	0.18	0.43	0.84	1.64	2.88	3.19	4.71	7.69	10.62	13.52	14.96	17.82	20.67	23.49	26.30	21.01	16.17	12.30		
40	0.21	0.50	0.96	1.87	3.30	3.65	5.38	8.79	12.14	15.45	17.10	20.37	23.62	26.85	30.06	25.67	19.76	15.03		
45	0.23	0.56	1.08	2.11	3.71	4.10	6.08	9.89	13.66	17.39	19.24	22.92	26.57	30.20	33.82	30.63	23.58	17.53		

Fuente: (Mott, 2006)

Observando la tabla concluimos que para la potencia del motor se puede usar catalinas con 11 dientes en adelante cumpliendo con la potencia de diseño (Ecuación 1, Ecuación 4). Entonces para la selección de catalina se tomará en cuenta la disponibilidad del mercado local, teniendo catalinas con un mínimo de 16 dientes.

- Con estos datos se procede a calcular el diámetro de paso de la catalina según la Ecuación 5.

*Ecuación 5 Diámetro de paso*

$$Dp = \frac{\rho}{\sin \frac{180^\circ}{Nd}}$$

Donde:

$$\rho = 0.5 \text{ in} = 12.7 \text{ mm}$$

$$Nd = 16$$

$$Dp = 65.098 \text{ mm}$$

Siendo este diámetro aceptable geoméricamente en el diseño.

- El siguiente punto para calcular es la longitud de la cadena, para esto tenemos que tomar en cuenta que la longitud debe ser un múltiplo entero del paso y preferiblemente un numero par de pasos. Para esto es necesario saber la distancia entre centros que debe cumplir la relación planteada en la Ecuación 2, donde se expone que la distancia entre centros  $C$  debe ser mayor a 210mm y menor que 390mm. De acuerdo con lo mencionado vamos a calcular una longitud de cadena (Ecuación 6) asumiendo una distancia entre centros de  $C = 20 \times \rho = 254 \text{ mm}$  que es

un valor que cumple con las condiciones planteadas anteriormente y permite una holgura en el centro de las dos llantas.

*Ecuación 6 Longitud de la cadena*

$$L = 2 \times C + \frac{N2 + N1}{2} + \frac{(N2 - N1)^2}{4 \times \pi^2 \times C}$$

Siendo el número de dientes de la catalina  $N1 = N2 = 16$

$$L = 516.522mm$$

Para que cumpla con las condiciones de que la longitud sea un múltiplo del paso y que sea un numero par de pasos se plantea una longitud  $L=508mm = 40 \rho$ . Se recomienda que en el ensamblaje la longitud de centros sea ajustable para que pueda adaptarse a la longitud de la cadena y sea adaptable a la tolerancia y al desgaste.

**Tabla 18**

*Resumen del diseño*

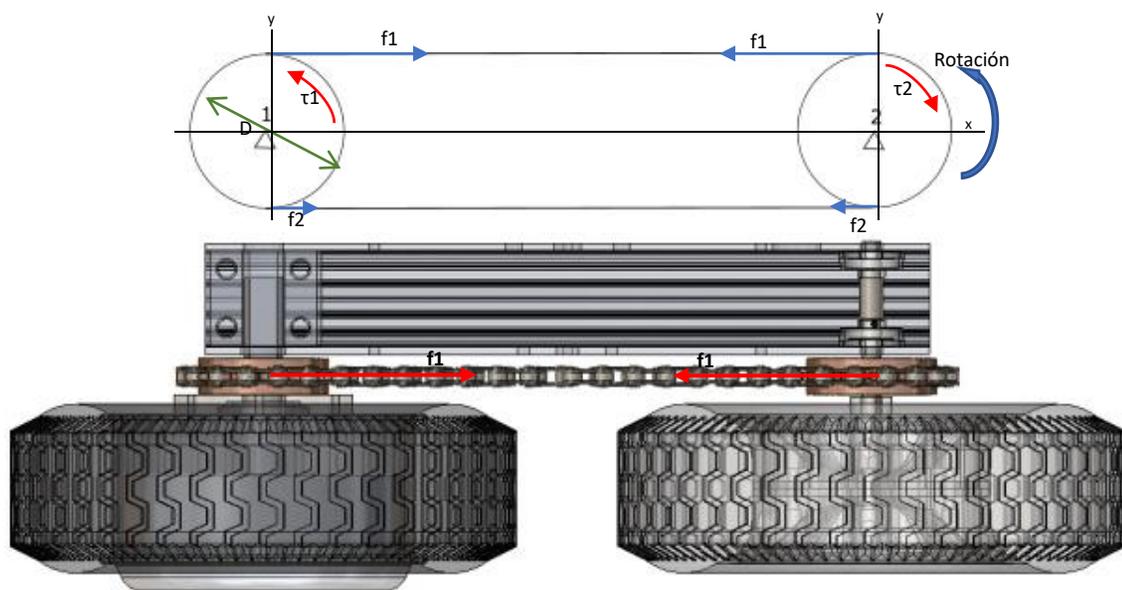
<b>Paso de la cadena [<math>\rho</math>]</b>	0.5in =12.7mm
<b>Longitud de la cadena [L]</b>	40 $\rho$ = 508mm
<b>Distancia entre centros [C]</b>	20 $\rho$ =254mm
<b>Catalinas</b>	Hilera simple, número 40, 0.5in, 16 dientes,  $D_p = 65.098mm$

### Diseño del eje del mecanismo de transmisión

Para el diseño del eje vamos a empezar identificando y calculando las fuerzas que intervienen en cada uno de los ejes como se observa en la Figura 47.

**Figura 47**

Fuerzas que intervienen en el diseño de los ejes



En la Figura 47 también se puede observar un diseño preliminar de la ubicación de los componentes que se monta sobre el eje, entre ellos los cojinetes que son los encargados de sostener el eje. Es necesario explicar que solo se diseña el eje de la rueda conducida ya que el eje de la rueda conductora no es constructivo ya que es parte del motor.

Para el cálculo de las fuerzas tenemos las siguientes variables conocidas:

- $w = 600 \text{ rpm}$

- $P_{real} = 300 \text{ W}$
- $D_p = 65.098 \text{ mm}$

*Ecuación 7 Torque en función de la potencia y la velocidad angular*

$$T = \frac{P_{real}}{\omega} = \frac{300[W]}{600[rpm]}$$

$$T = 4.775 [Nm]$$

El torque calculado en la Ecuación 7 es el que se transmite desde el motor hacia el eje uno.

La parte superior de la cadena está sometida a tensión ( $f_1$ ), lo que produce un par torsional en cada catalina. Mientras que la parte inferior de la cadena, comúnmente llamado lado flojo no ejerce ninguna fuerza sobre la catalina ( $f_2=0$ ), por lo que la fuerza de flexión total ejercida por la catalina al eje es igual a la fuerza del lado tenso de la cadena (Mott, 2006).

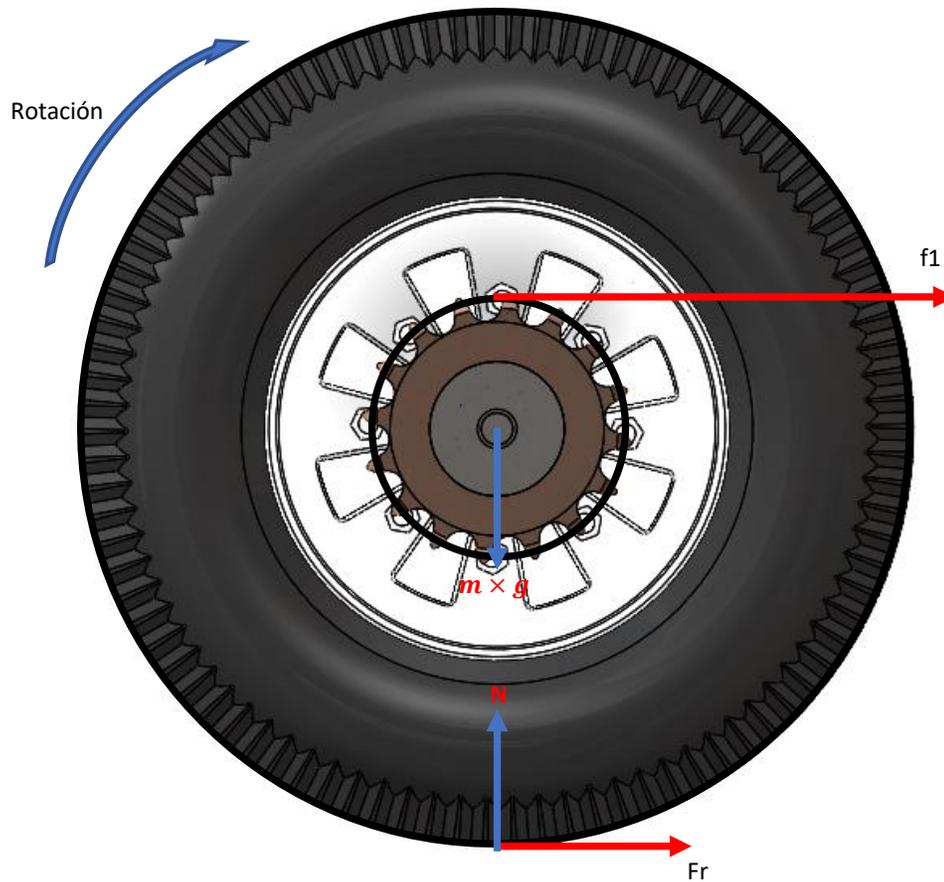
*Ecuación 8 Fuerza normal a la catalina*

$$f_1 = \frac{T}{\frac{D_p}{2}}$$

$$f_1 = 146.691 \text{ N}$$

Otra de las fuerzas que intervienen en el diseño del eje es la producida por la rodadura de la llanta, esta fuerza se produce al rotar y trasladarse sobre una superficie y es opuesta al sentido de rotación.

**Figura 48**  
Fuerzas que intervienen en el eje.



La resistencia a la rodadura está en función del material de la rueda y de la fuerza normal ejercida en ella (Resnick, Halliday, & S., 2001).

*Ecuación 9 Resistencia a la rodadura*

$$Fr = Crr \times N$$

Donde  $Crr$  es el coeficiente de fricción a la rodadura (Tabla 19) y  $N$  es la fuerza normal en función de la masa y la gravedad. La masa se la obtuvo sumando el peso de la electrónica, los motores las llantas y del prediseño de la parte mecánica, teniendo un valor total de 14.217Kg.

**Tabla 19**

Coeficientes de fricción a la rodadura

$C_r$	$d$	Descripción
0.0002 a 0.0010	0.5 mm	Ruedas de ferrocarril sobre rieles de acero
	0.1 mm	Rodamientos de bolas en acero sobre acero
0.0025		Neumáticos especiales Michelin para automóvil solar/eco-marathon
0.005		Rieles estándar de tranvía
0.0055		Neumáticos BMX de bicicleta usados para automóviles solares3
0.006 a 0.01		Neumáticos de automóvil de baja resistencia y neumáticos de camión sobre carretera lisa
0.010 a 0.015		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre losas de piedra
0.02		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hormigón
0.030 a 0.035		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre alquitrán o asfalto
0.055 a 0.065		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena
0.34		Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena

Fuente (Miranda, 2015)

Según la Tabla 19 el coeficiente de fricción a la rodadura que más se acopla a nuestro caso sería

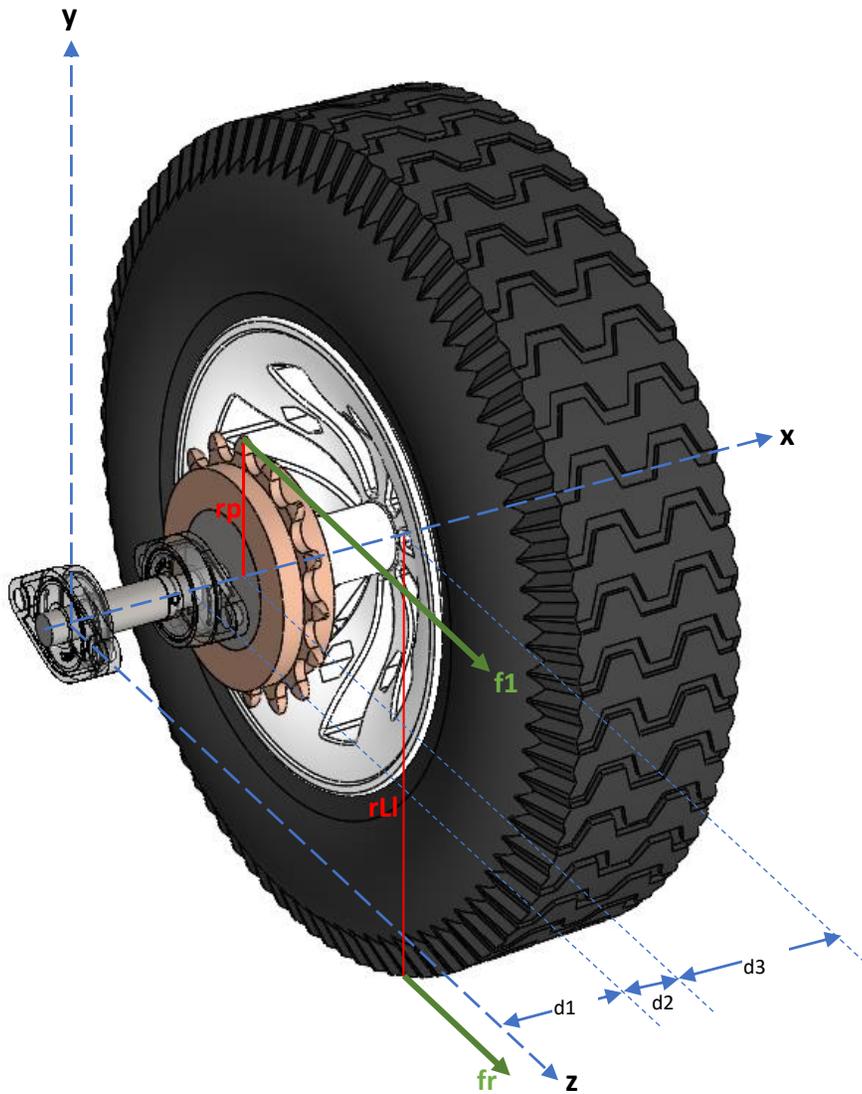
$C_{rr} = 0.34$ , reemplazando estos datos en la Ecuación 9 tenemos:

$$F_r = 0.34 \times \frac{15Kg}{4} \times 9.8m/s^2$$

$$F_r = 11.843 N$$

Con estos datos preliminares se calcula la geometría de los ejes partiendo de un diagrama de fuerza (Figura 49).

**Figura 49**  
Diagrama de fuerzas del eje

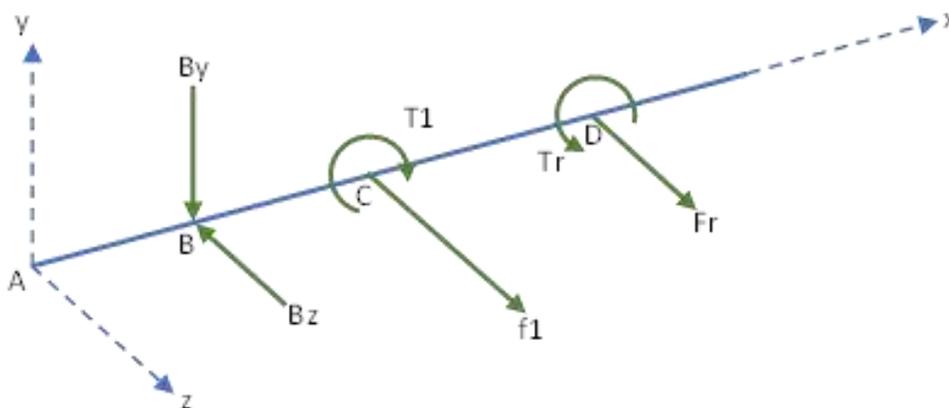


- $d_1=33\text{mm}$
- $d_2=15.7\text{mm}$
- $d_3=46.5\text{mm}$
- $r_p=32.549\text{mm}$
- $r_{Ll}=105\text{mm}$

En la Figura 50 se presenta un diagrama simplificado de fuerzas y momentos en donde se trasladan todas las fuerzas al centro del eje permitiendo el cálculo de las reacciones en el punto B.

**Figura 50**

Diagrama simplificado de fuerzas y momentos



Del diagrama de fuerzas se calcula el torque producido por las fuerzas de la siguiente manera:

*Ecuación 10 Torque producido por la  $f_1$  sobre el eje*

$$T_1 = r_p \times f_1$$

$$T_1 = 4.775 \text{ Nm}$$

*Ecuación 11 Torque producido por la  $Fr$  sobre el eje*

$$Tr = r_{Ll} \times Fr$$

$$Tr = 1.244 \text{ Nm}$$

Para resolver el diagrama de fuerzas del eje 1 y encontrar las reacciones en los rodamientos, se realiza la sumatoria de fuerzas en "z" y en "y".

*Ecuación 12 Equilibrio de fuerzas en "Z"*

$$f1 + Fr - Bz = 0$$

$$Bz = 158.534N$$

*Ecuación 13 Equilibrio de fuerzas en el eje "Y"*

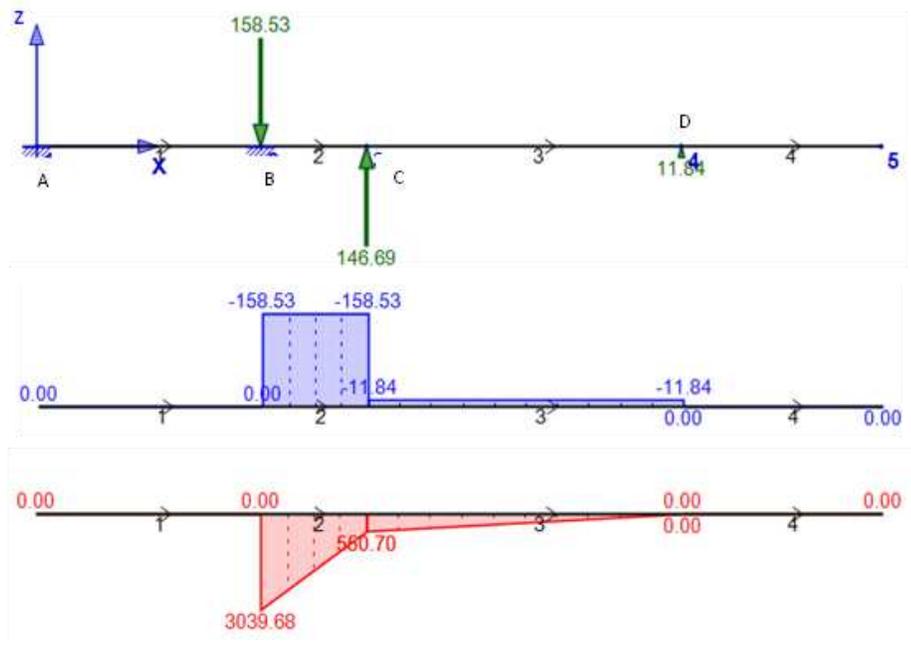
$$N - By = 0$$

$$By = 34.832 N$$

Una vez obtenidos los valores de las reacciones de los puntos de apoyo se procede a calcular el momento máximo ejercido sobre el eje mediante los gráficos de fuerza cortante y momento flector.

**Figura 51**

*Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano "Z-X"*

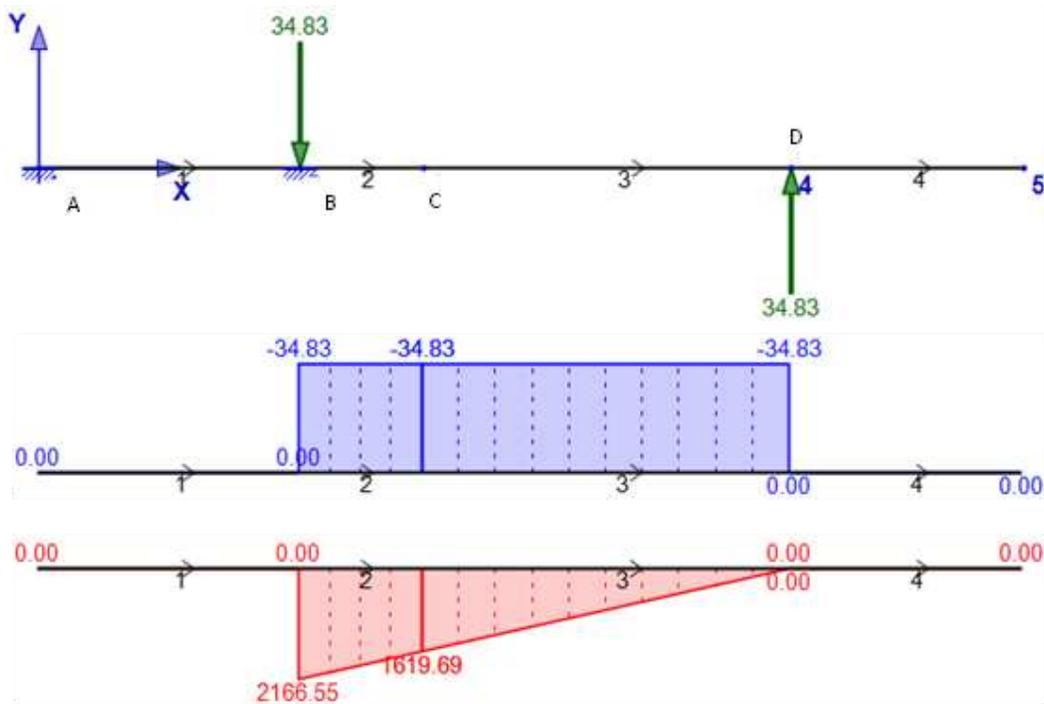


Del análisis del diagrama de fuerza cortante y momento flector de la Figura 51 podemos obtener los siguientes datos:

- $M_{zB} = 3039.68 \text{ Nmm}$
- $M_{zC} = 580.70 \text{ Nmm}$
- $M_{zD} = 0 \text{ Nmm}$
- $V_{zB} = -158.53 \text{ N}$
- $V_{zC} = -158.53 \text{ N}$
- $V_{zD} = -11.84 \text{ N}$

**Figura 52**

Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano "Y-X"



Del análisis del diagrama de fuerza cortante y momento flector de la Figura 52 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** podemos obtener los siguientes datos:

- $M_{yB} = 2166.55 \text{ Nmm}$
- $M_{yC} = 1619.69 \text{ Nmm}$
- $M_{yD} = 0 \text{ Nmm}$
- $V_{yB} = -34.83 \text{ N}$
- $V_{yC} = -34.83 \text{ N}$
- $V_{yD} = -34.83 \text{ N}$

Los datos obtenidos en las dos figuras podemos deducir la siguiente tabla:

**Tabla 20**

*Resumen de las variables de los diagramas de fuerza cortante y momento flector*

Punto	$M_z$ (Nmm)	$M_y$ (Nmm)	$M$ (Nmm)	$V_y$ (N)	$V_z$ (N)	$V$ (N)
B	<b>3039.68</b>	<b>2166.55</b>	<b>3732.77</b>	<b>34.83</b>	<b>158.53</b>	<b>162.31</b>
C	<b>580.70</b>	<b>1619.69</b>	<b>1720.64</b>	<b>34.83</b>	<b>158.53</b>	<b>162.31</b>
D	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34.83</b>	<b>11.84</b>	<b>36.79</b>

Para el cálculo de los diámetros mínimos permitirles sin que existan fallas en el eje vamos a utilizar la teoría de esfuerzo normal de carga por fatiga. Para esto es necesario conocer el material con el que se va a construir el eje, sabiendo que el material que se utiliza el acero inoxidable AISI 304, se listan las propiedades mecánicas:

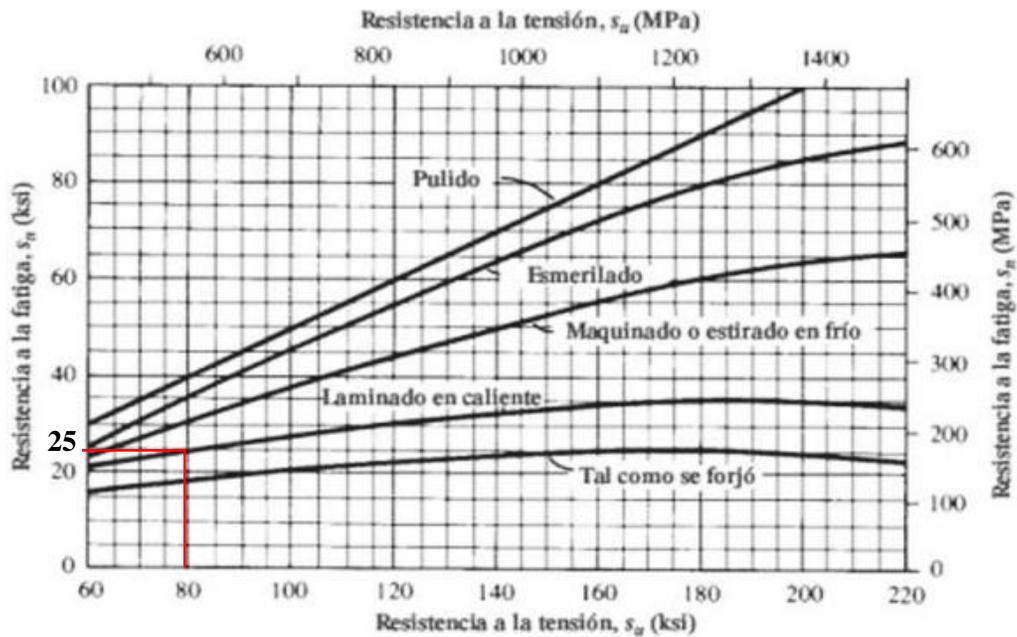
- Resistencia a la tensión ( $S_u$ ) = 568 Mpa = 82.381 ksi
- Resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) = 276 Mpa

Para determinar la resistencia a la fatiga real es necesario seguir un procedimiento en el cual se multiplica la resistencia a la fatiga del material por una serie de factores que vienen dados con las características físicas y de funcionamiento del eje.

El primer paso es de estimar la resistencia a la fatiga modificada en función de la resistencia a la tensión, para esto nos ayudamos de la Figura 53.

**Figura 53**

Resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión



Tomado de (Mott, 2006)

Tomamos como datos de entrada la resistencia a la tensión  $S_u=82.31$ Ksi y el tipo de tratamiento del material para obtener la resistencia a la fatiga estimada de  $S_n=25$ Ksi. el siguiente paso es identificar el valor de cada una de las constantes:

- Factor de material  $C_m$ : Según la Tabla 21  $C_m=1$

**Tabla 21***Factor de material Cm*

	Cm
acero forjado	<b>1.00</b>
acero colado	<b>0.80</b>
acero pulverizado	<b>0.76</b>

*Fuente (Mott, 2006)*

- Factor de tipo de esfuerzo Cts.: esta toma el valor de 1 si el esfuerzo es flexionante.
- Factor de confiabilidad Cr: según la Tabla 22 para una confiabilidad de 0.9 Cr=0.9.

**Tabla 22***Factores de confiabilidad aproximada*

Confiabilidad deseada	Factor de confiabilidad Cr
0.5	<b>1</b>
0.9	<b>0.9</b>
0.99	<b>0.81</b>
0.999	<b>0.75</b>

*Fuente (Mott, 2006)*

- Factores del tamaño Cs: Según la Tabla 23 y tomando en cuenta que el diámetro aproximado es de D=10mm, el factor de tamaño se calcula según la Ecuación 14.

**Tabla 23***Factor de tamaño*

Rango de tamaño	Cs para Diámetro en mm
<b><math>D \leq 7.62</math></b>	<b><math>Cs = 1.0</math></b>
<b><math>7.62 &lt; D \leq 50</math></b>	<b><math>Cs = (D/0.3)^{-0.11}</math></b>
<b><math>50 &lt; D &lt; 250</math></b>	<b><math>Cs = 0.859 - 0.02125D</math></b>

*Fuente (Mott, 2006)**Ecuación 14 Factor de tamaño para diámetros de entre 7.62 y 50 mm*

$$Cs = \left(\frac{D}{0.3}\right)^{-0.11}$$

$$C_s = 0.971$$

Para calcular la resistencia a la fatiga estimada real se utiliza la Ecuación 15.

*Ecuación 15 Resistencia a la fatiga real*

$$S_n' = S_n \times C_m \times C_{st} \times C_r \times C_s$$

$$S_n' = 150.633 \text{ MPa}$$

Ahora para el cálculo de diámetros, se parte de la hipótesis de que el esfuerzo flector en el eje es repetido y se invierte cuando gira el eje mientras que el esfuerzo cortante por torsión es uniforme en todo el eje (Mott, 2006). Con esta premisa se deduce la Ecuación 16 utilizada para el cálculo de diámetros de ejes, misma que es compatible con la norma ANSI B106.IM.

*Ecuación 16 Relación de diámetros para el diseño de ejes sometidos a torsión y flexión*

$$D = \left[ \frac{32 \times N}{\pi} \times \sqrt{\left( \frac{K_t \times M}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{1/3}$$

Donde  $K_t$  es una constante de concentración de esfuerzos de los ejes, que se calcula a partir de los diámetros del eje y de las geometrías de los chaflanes, debido a que los diámetros del eje son las variables por encontrar, se utiliza valores preliminares dentro de un rango conservador. Tomando en cuenta que nuestro diseño, los concentradores de esfuerzos más considerables son los escalones que se produce por el cambio de diámetro y que este concentrador de esfuerzos depende de los diámetros y del radio del chaflán, considerando que mientras mayor sea el radio del chaflán será menor el concentrador de esfuerzo, para fines de diseño se clasifica los chaflanes en dos categorías: chaflanes agudos y chaflanes bien redondeados (Mott, 2006).

**Tabla 24**

Concentradores de esfuerzo según los tipos de chaflanes

Kt	Tipo de chaflán
2.5	<b>chaflán agudo</b>
1.5	<b>chaflán bien redondeado</b>

Fuente (Mott, 2006)

Para nuestro diseño tomaremos el valor de  $K_t = 2.5$  para obtener un diseño conservador y un factor de seguridad  $N=1.5$ . Sabiendo esto calcularemos los diámetros mínimos admisibles en los puntos B, C y D.

**Tabla 25**

Diámetros del eje en los puntos B, C y D

	Diámetro (mm)
Punto B	<b>9.512</b>
Punto C	<b>7.898</b>
Punto D	<b>3.907</b>

Quedando como diseño final del eje el planteado en la Figura 54, en la cual se observa un refrentado en la parte final del eje de una distancia de 60mm en el cual entra el aro de la llanta, sin bajar el diámetro de 10mm.

**Figura 54**

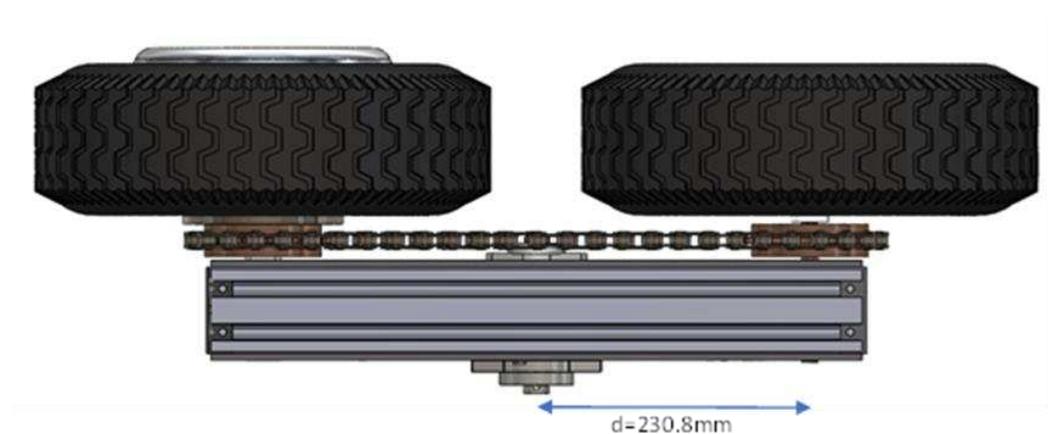
Diseño final del eje del sistema de transmisión



- $D1 = 10\text{mm}$
- $D2 = 11\text{mm}$
- $D3 = 10\text{mm}$

Es importante mencionar que se usara dos rodamientos, de ser posible, en los extremos de los elementos que transmiten potencia para proporcionar soporte estable y minimizar los momentos de flexión.

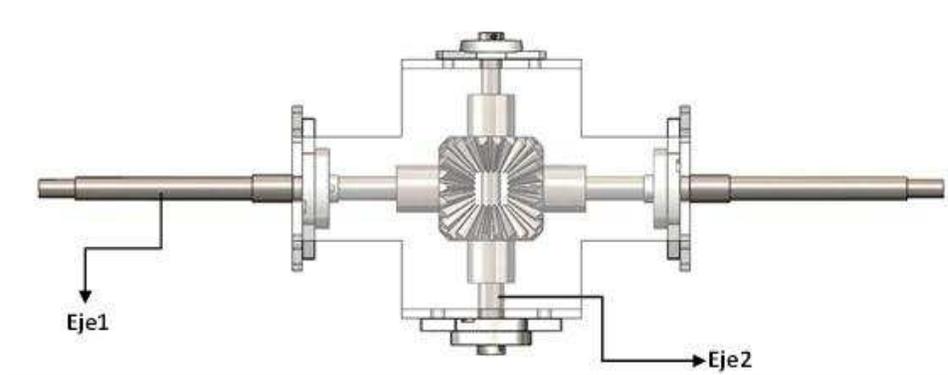
**Figura 55**  
Montaje del sistema de transmisión



### ***Diseño del diferencial***

Este mecanismo conecta los dos brazos Rocker con el cuerpo del vehículo; esta estructura permite mantener balanceado el vehículo, incluso cuando los ejes se encuentran a diferentes alturas. El conjunto, sistema diferencial y estructura articulada, busca que las ruedas se mantengan siempre en contacto con el suelo, garantizando una permanente tracción. Este diferencial al ser conectado por el sistema de engranajes al chasis cumple con la función de reducir el ángulo de inclinación del chasis a la mitad del ángulo de inclinación del balancín lateral (Sandin, 2003).

**Figura 56**  
Diferencial armado



Este está compuesto de 4 engranajes cónicos con un ángulo primitivo del cono  $\varphi = 45^\circ$  formando un ángulo recto entre ejes (

Figura 56), dos que componen la entrada y salida del movimiento y dos de transmisión de movimiento. De estos, uno gira libre en el eje para que funcione el diferencial y de los otros 3 ejes dos son iguales (el de entrada y salida de movimiento) y en el tercero está sujeto los engranajes de transmisión de movimiento (

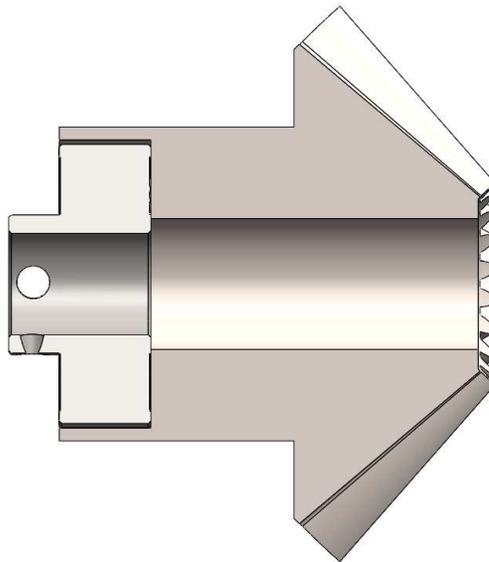
Figura 56).

Con respecto al montaje del eje 2 (

Figura 56), compuesto de dos rodamientos, y dos engranes cónicos, de los cuales uno de ellos (

**Figura 57)** tiene un rodamiento interno para que pueda girar libremente en el mismo eje, acción realizada para no cortar el eje 2 y evitar poner dos chumaceras extras dentro del chasis.

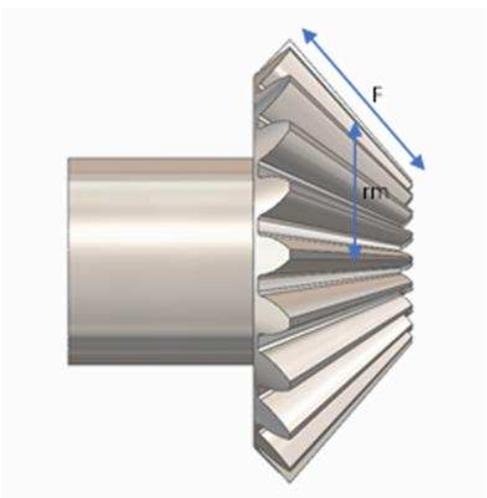
**Figura 57**  
*Engranaje cónico con rodamiento interno*



#### **Descripción de los engranes cónicos**

Los cuatro engranajes cónicos, serán construidos de nylon o duralón, un material que asegura poseer menor peso, mayor resistencia a la corrosión y más silencioso. Las características geométricas fueron diseñadas para que cumpla con las medidas del chasis y son expuestas en la Tabla 26.

**Figura 58**  
Engranaje cónico



**Tabla 26**  
Propiedades del engranaje cónico

<b>Número de dientes (z)</b>	20
<b>Ángulo de presión (<math>\alpha</math>)</b>	20°
<b>Modulo</b>	2
<b>Anchura de cara</b>	18 mm
<b>Diámetro de cubo</b>	20 mm
<b>Distancia de montaje</b>	40 mm
<b>Diámetro de eje nominal</b>	10 mm
<b>Material</b>	duralón

Es necesario también calcular el diámetro primitivo, en este caso el diámetro primitivo del engrane “ $D_p$ ” y el diámetro primitivo del piñón “ $d_p$ ” son iguales ya que poseen una relación 1:1, y se lo calcula con la siguiente formula:

Ecuación 17 Diámetro primitivo

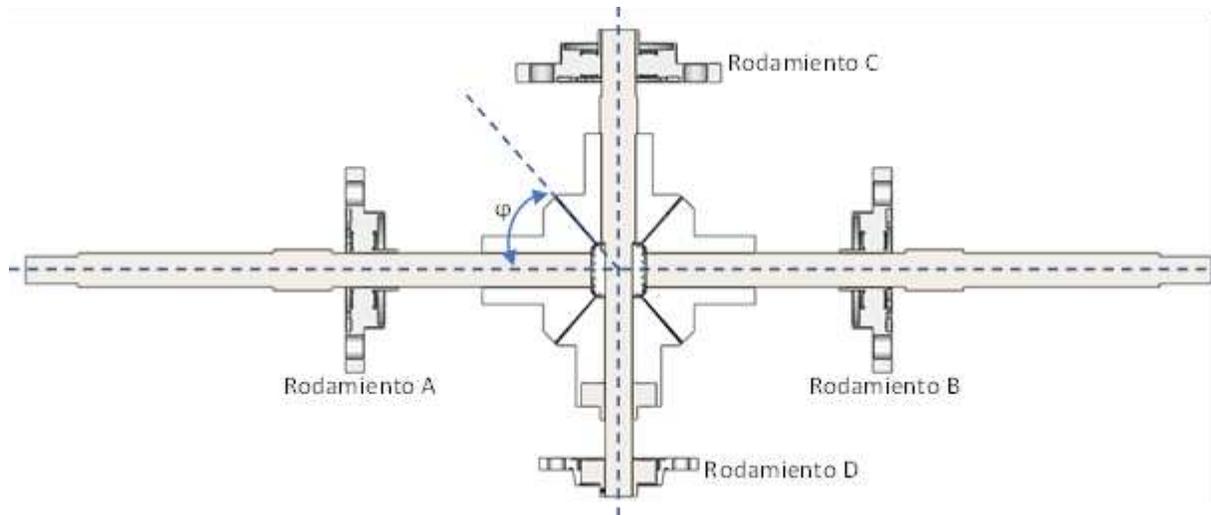
$$D_p = z \times m$$

$$D_p = 40\text{mm}$$

### **Diseño de los ejes del Diferencial**

En la Figura 59 se representa el montaje del diferencial en donde se observa los rodamientos en los engranes, que son los encargados de soportar las cargas radiales, y los rodamientos de los piñones en configuración de pórtico, esto aporta rigidez y mantiene el alineamiento en los dientes durante la transmisión de movimiento (Mott, 2006).

**Figura 59**  
Esquema del diferencial



Debido a que los engranes no rotan, el cálculo de los ejes se realiza bajo un diseño estático de vigas (Figura 60), en donde el diámetro está función de los esfuerzos producidos por el peso de los componentes electrónicos y de las tapas plásticas ( $m_e = 3.265 \text{ Kg}$ ) que están apoyados en la cara superior

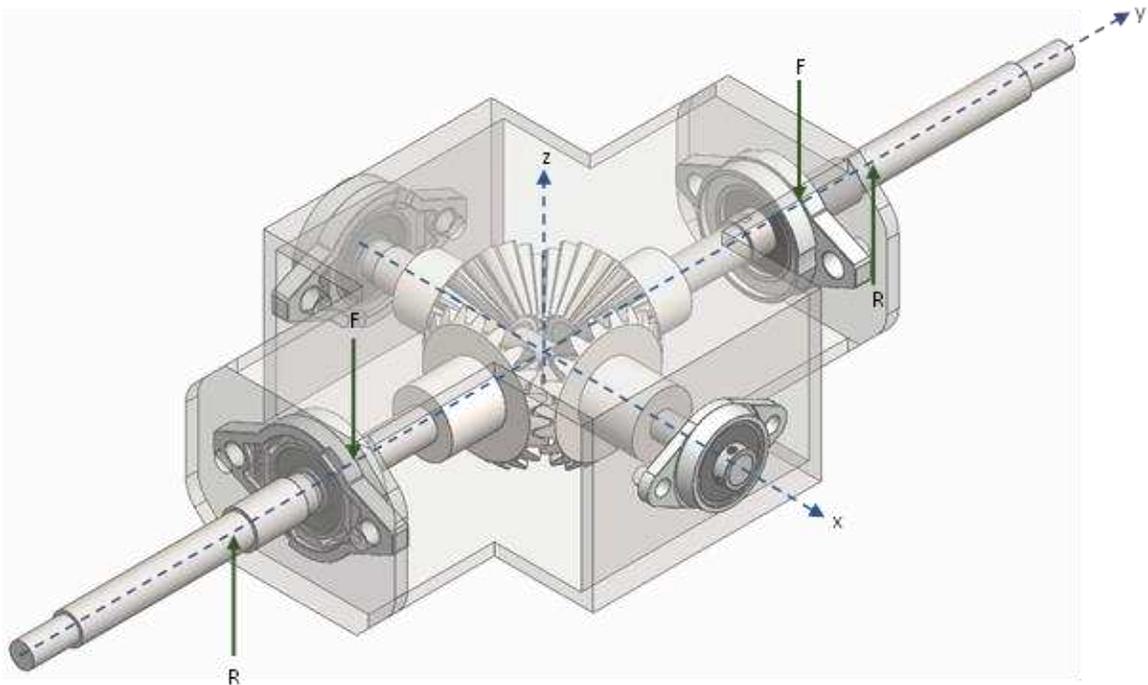
de chasis. Hay que tomar en cuenta que el chasis se encuentra apoyado en los rodamientos A y B por lo que la fuerza producida por la masa se divide en dos reacciones una en cada rodamiento:

*Ecuación 18 Fuerza producida por la masa*

$$F = \frac{me \times g}{2}$$

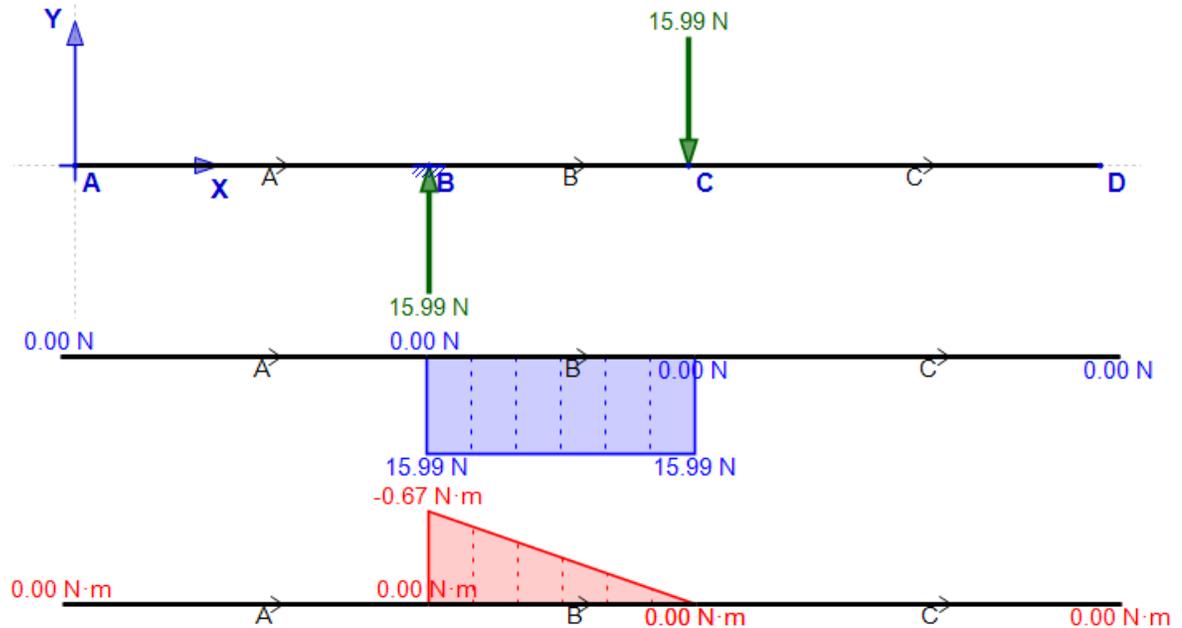
$$F = \frac{3.265 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2}{2} = 15.99 \text{ N}$$

**Figura 60**  
*Diagrama de fuerzas*



Del diagrama de la Figura 60 se aísla el eje 1 y se hace sumatoria de fuerzas en dirección del eje z teniendo como resultado que la reacción R es igual a la fuerza F. Con estos valores se obtiene los siguientes diagramas de fuerza cortante y momento flector:

**Figura 61**  
Diagrama de fuerza cortante y momento flector



Del mismo modo podemos asumir que el torque que soporta el eje esta dado por el peso de las llantas, catalina y eje que es de  $mt=1.25\text{kg}$  y la distancia al centro de la rotación (Figura 55).

*Ecuación 19 Torque que soporta el eje*

$$T_o = mt \times g \times dcr$$

$$T_o = 1.25\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 \times 230.8\text{mm}$$

$$T_o = 2.83\text{ Nm}$$

Con estos datos procedemos a calcular el diámetro mínimo permisible según la teoría de esfuerzo normal de carga por fatiga Ecuación 16. Se toma en cuenta que se utiliza el mismo material es por eso que se utiliza la misma resistencia a la fatiga expuesta en la Ecuación 15.

Consideramos el momento máximo ( $M = -0.67 \text{ Nm}$ ) como el que está produciendo fatiga en el eje, mientras que el esfuerzo cortante por torsión ( $T_0$ ) es uniforme en todo el eje, obteniendo un diámetro de:

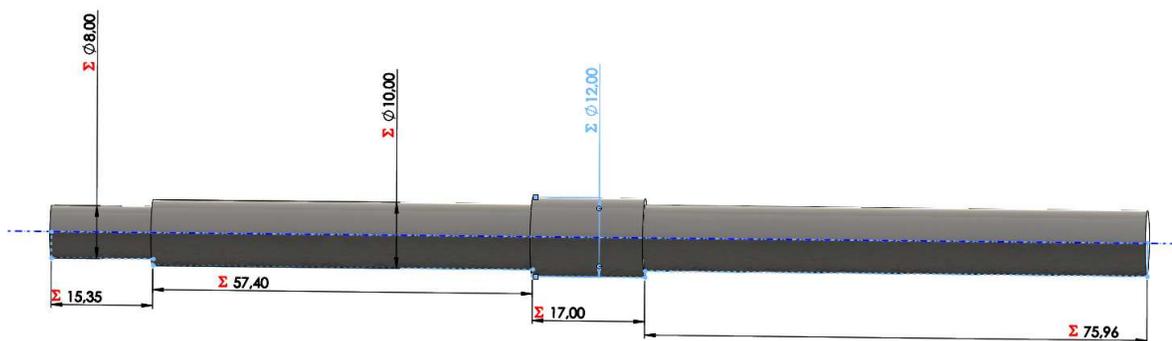
*Ecuación 20 Cálculo del diámetro en el punto de máximo momento*

$$D = \left[ \frac{32 \times N}{\pi} \times \sqrt{\left( \frac{Kt \times M}{Sn'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{1/3}$$

$$D = \left[ \frac{32 \times 2}{\pi} \times \sqrt{\left( \frac{2.5 \times -0.67 \text{ Nm}}{150.633 \text{ MPa}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{2.83 \text{ Nm}}{276 \text{ Mpa}} \right)^2} \right]^{1/3} = 6.618 \text{ mm}$$

Una vez obtenido el diámetro mínimo que se puede utilizar en el eje procedemos a realizar el diseño según la geometría de los elementos que se van a montar en él, como se observa en la

**Figura 62**  
Medidas del eje 1



Tomando en cuenta la consideración que los engranes no rotan, entonces se desprecia las cargas en los engranes por lo que para el diseño del eje 2 solo se toma en cuenta un diseño geométrico,



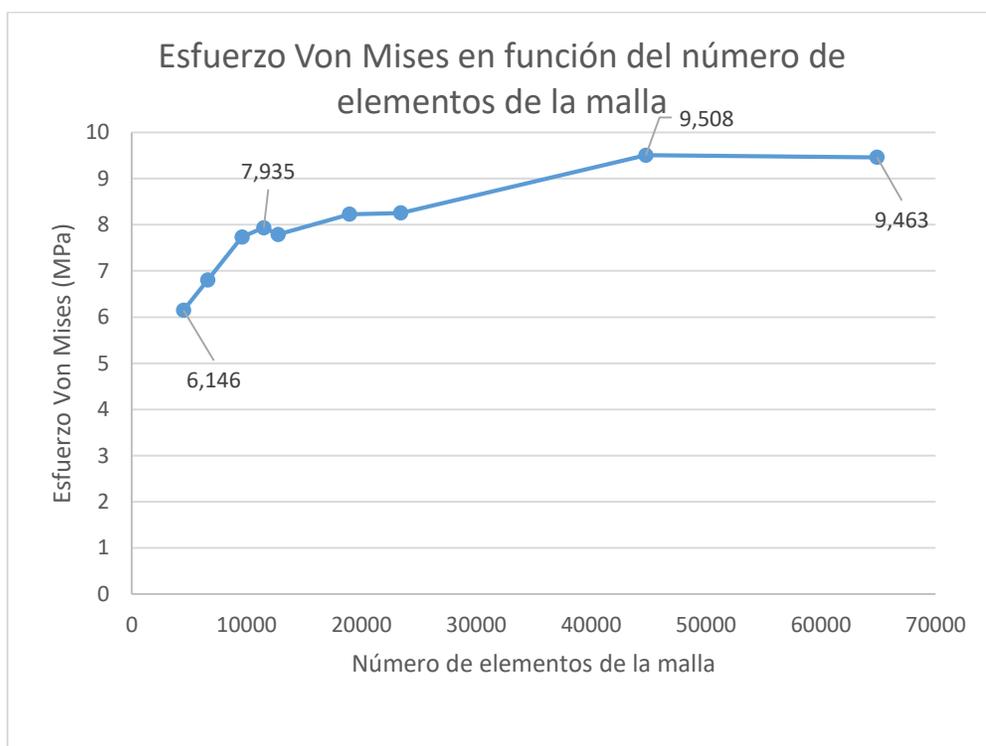
### **Análisis mecánico del chasis**

El análisis mecánico se lo realiza mediante el modelado 3D y se aplica un análisis de estático asistido por computadora para con esto poder validar el diseño del chasis.

Para el diseño del chasis se asume que soportará el peso de los componentes electrónicos y de las tapas plásticas ( $m_e = 3.265 \text{ Kg}$ ) que están apoyados en la cara superior de chasis. El análisis se lo aplica considerando un caso de máximo de esfuerzo para con esto poder validar la estructura.

La estructura no fue sometida a múltiples simulaciones en las que se varió el número de elementos de la malla obteniéndose los valores de esfuerzos que se muestra en la Figura 65.

**Figura 65**  
*Esfuerzo Von Mises vs Número de elementos de la malla*

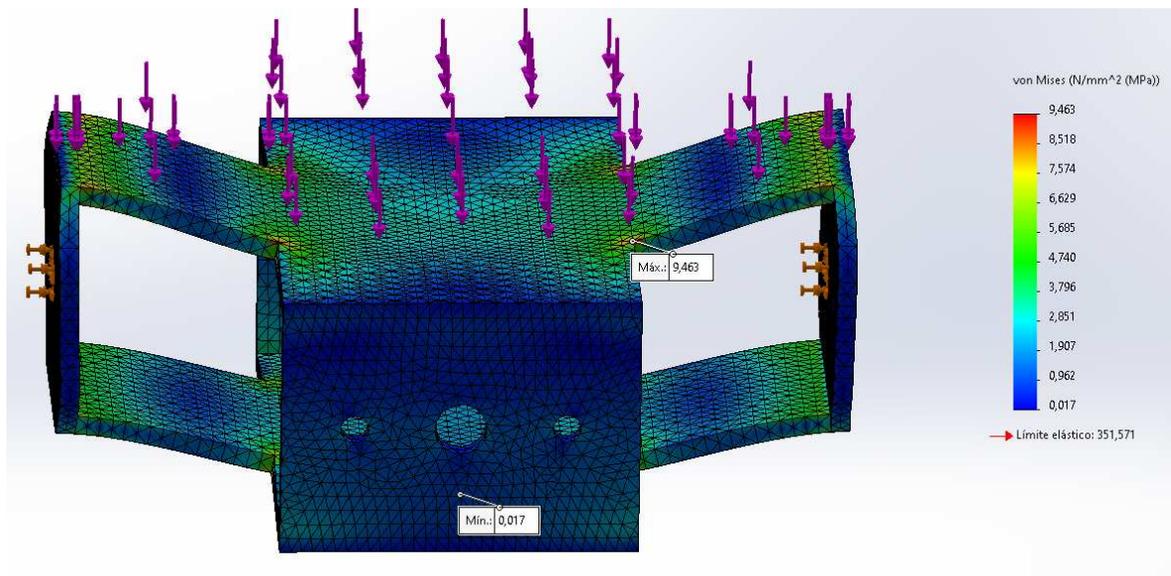


Es así que se interpreta que las mallas basadas en curvatura van desde una malla gruesa con 4507 elementos hasta una malla fina con 64884 elementos, convergiendo con un esfuerzo de Von Mises de 9.463Mpa.

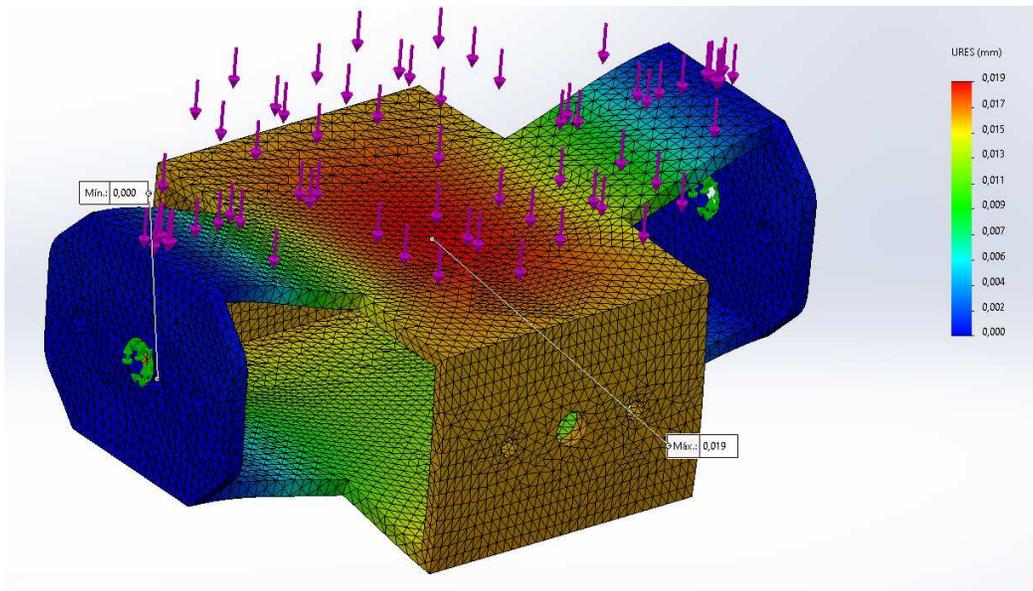
Para las simulaciones de la estructura se utilizó el mercado correspondiente al esfuerzo de 9.463 Mpa, ya que este esfuerzo permite evaluar el diseño en condiciones más realistas.

En las simulaciones se puede observar los resultados del esfuerzo Von Mises (Figura 66), desplazamiento estático (Figura 67) y deformaciones unitarias (Figura 68) cuando se aplica la carga en la cara superior del chasis, y la sujeción en los agujeros por los cuales pasan los ejes del diferencial simulando el peso de los componentes electrónicos sobre el chasis.

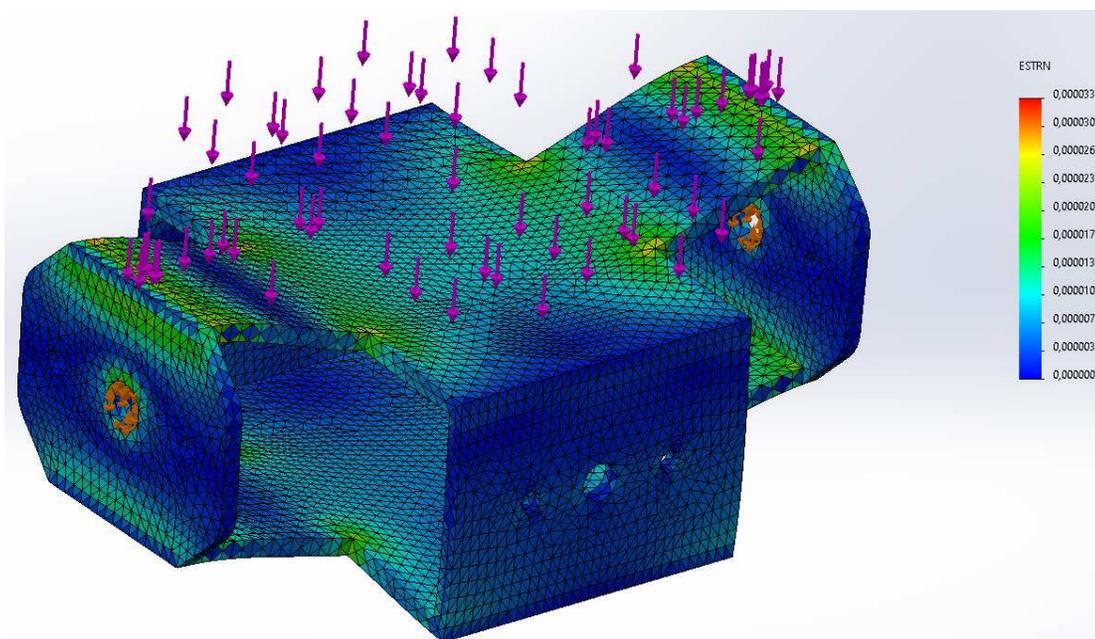
**Figura 66**  
*Esfuerzo Von Mises para cargas aplicadas en la cara superior*



**Figura 67**  
Desplazamiento estático al aplicar la carga



**Figura 68**  
Deformaciones unitarias



Cómo se puede observar en las simulaciones Hola tenemos un desplazamiento estático en el punto máximo de 0.019mm y un valor de deformaciones unitarias muy bajo, por lo que se puede concluir que el material seleccionado y el diseño del chasis son óptimos para resistir las cargas ocasionadas por el peso de la electrónica.

### **Diseño eléctrico / electrónico**

Para empezar con el diseño y la selección del sistema eléctrico / electrónico se realiza una lista de requerimientos y limitaciones presentados en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Requerimientos y restricciones del sistema eléctrico / electrónico*

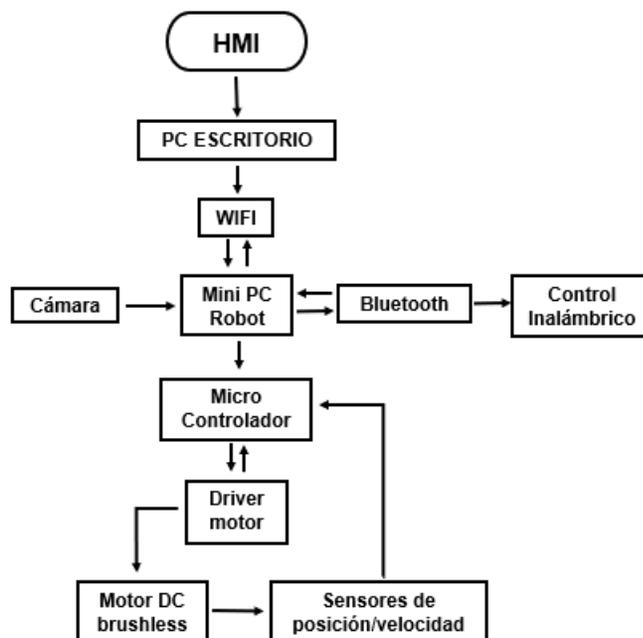
Requerimientos	Restricciones
Fuente de alimentación para la electrónica 5V	<b>Espacio dentro del carrocería</b>
Fuente de alimentación para los motores 30V	<b>Costo de los elementos</b>
Microcontrolador para el control de los motores	<b>Disponibilidad de adquisición</b>
Microcontrolador principal (comunicación, transmisión de video)	
Cámara inalámbrica	
Controladores de los motores	
Mando a distancia	

### **Arquitectura del prototipo**

Arquitectura del prototipo está basado en una estructura maestro-esclavo que se divide principalmente en dos partes, con un elemento intermedio de comunicación que se encuentre dentro del robot que cuente con los canales de comunicación wifi y bluetooth, mismos que funcionan en paralelo. El wifi se conecta a un pc de escritorio con una HMI donde se puede controlar el robot, mientras que el Bluetooth se conecta a un control inalámbrico desde el cual se pueda enviar señales de control.

**Figura 69**

Diagrama de bloques de la arquitectura del prototipo



### Selección de componentes

Para la determinación de los componentes idóneos para este prototipo se ha tomado en consideración tres posibles opciones para el diseño y se ha elegido la mejor opción tomando en cuenta parámetros de rendimiento, eficiencia y costo. Todo ello está resumido en las siguientes tablas con sus respectivas ponderaciones para la selección del componente con mayor calificación.

Tabla 28  
Opciones de Mini PC

N°	Mini PC	Características	
1	<b>Tinker Board 2</b> 	<b>Procesador</b>	<b>Dual-core Arm Cortex-A53 (1.5 GHz)</b>
		<b>RAM</b>	<b>2 GB</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2.4 GHz</b>
		<b>Bluetooth</b>	<b>Si (5.0)</b>
		<b>Costo</b>	<b>149 \$</b>
2	<b>Raspberry Pi 3B+</b> 	<b>Procesador</b>	<b>64 bits Broadcom BCM2837 (1.4 GHz)</b>
		<b>RAM</b>	<b>1 GB</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2.4GHz / 5GHz</b>
		<b>Bluetooth</b>	<b>Si (4.2)</b>
		<b>Costo</b>	<b>50 \$</b>
3	<b>Raspberry Pi 4</b> 	<b>Procesador</b>	<b>64 bits Broadcom BCM2711 (1.5 GHz)</b>
		<b>RAM</b>	<b>Hasta 4 GB</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2,4 GHz / 5 GHz</b>
		<b>Bluetooth</b>	<b>Si (5.0)</b>
		<b>Costo</b>	<b>99 \$</b>

Tabla 29  
Matriz de ponderaciones para la selección de mini pc

		Tinker Board 2		Raspberry Pi 3B+		Raspberry Pi 4	
	F.P.	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Procesador</b>	<b>0.2</b>	<b>2</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>
<b>RAM</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>
<b>Red inalámbrica</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>
<b>Bluetooth</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>
<b>Costo</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>0.6</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>2.5</b>		<b>4.1</b>		<b>3.7</b>

Hay que considerar que Raspberry Pi 3B+, se instala el sistema operativo propio de la placa (Raspberry Pi SO 32bits) el cual está basado en Debian 11. Este sistema operativo soporta Python en todas sus versiones lenguaje en el cual se programará el robot.

Para la selección de la Cámara se toma en cuenta dispositivos compatibles con él Raspberry Pi 3B+ y que se puedan programar en Python para lo cual se proponen las siguientes opciones.

**Tabla 30**  
Opciones cámara

N°	Cámara	Características	
			Velocidad
1	<b>ARDUCAM OV5647</b> 	<b>Corriente</b>	<b>300 mA</b>
		<b>Foco</b>	<b>Fijo</b>
		<b>Calidad</b>	<b>5 MP</b>
		<b>Costo</b>	<b>21.99 \$</b>
		<b>Velocidad</b>	<b>30 fps @ 640P</b>
2	<b>ARDUCAM OV7251</b> 	<b>Corriente</b>	<b>300 mA</b>
		<b>Foco</b>	<b>Ajustable</b>
		<b>Calidad</b>	<b>0.31MP</b>
		<b>Costo</b>	<b>25.99 \$</b>
		<b>Velocidad</b>	<b>60 fps 1080P</b>
3	<b>ARDUCAM IMX135</b> 	<b>Corriente</b>	<b>300 mA</b>
		<b>Foco</b>	<b>Fijo</b>
		<b>Calidad</b>	<b>13 MP</b>
		<b>Costo</b>	<b>39.99 \$</b>

**Tabla 31**

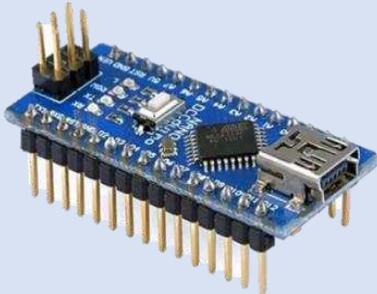
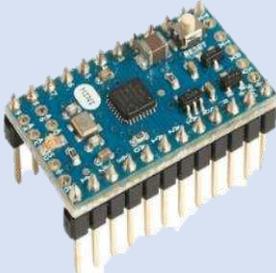
Matriz de ponderaciones para la selección de la cámara

		Arducam OV5647		Arducam OV7251		Arducam IMX135	
	F.P.	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Velocidad</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>2</b>	<b>0.4</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>
<b>Corriente</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>
<b>Foco</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>
<b>Calidad</b>	<b>0.3</b>	<b>4</b>	<b>1.2</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>
<b>Costo</b>	<b>0.2</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>1</b>	<b>0.2</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>4</b>		<b>2.5</b>		<b>3.3</b>

Como opción de microcontrolador, se plantea varias versiones de arduino que sean capaz de procesar las señales enviadas por los sensores de los motores y con eso enviar señales de movimiento. También se considera el tamaño y el peso del microcontrolador, por lo que se proponen las siguientes opciones.

**Tabla 32**

Opciones de microcontrolador

N°	Microcontrolador	Características	
1	 <b>Arduino nano</b>	<b>Voltaje de alimentación</b>	<b>5 V</b>
		<b>Frecuencia de operación</b>	<b>16 MHz</b>
		<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega328P</b>
		<b>Costo</b>	<b>21.99 \$</b>
2	 <b>Arduino mini</b>	<b>Voltaje de alimentación</b>	<b>5 V</b>
		<b>Frecuencia de operación</b>	<b>16 MHz</b>
		<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega328P</b>
		<b>Costo</b>	<b>29.75 \$</b>

N°	Microcontrolador	Características	
3	Arduino micro		
		Voltaje de alimentación	5 V
		Frecuencia de operación	16 MHz
		Microcontrolador	ATmega32U4
		Costo	32.95 \$

**Tabla 33**

*Matriz de ponderaciones para la selección de microcontrolador*

		Arduino nano		Arduino mini		Arduino micro	
	F.P.	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Voltaje de alimentación	0.4	5	2.0	5	2.0	5	2.0
Frecuencia de operación	0.1	4	0.4	4	0.4	4	0.4
Microcontrolador	0.3	5	1.5	5	1.5	4	1.2
Costo	0.2	5	1.0	4	0.8	3	0.6
Total	1		4.9		4.7		4.2

Para el mando a distancia, se seleccionó entre dispositivos que cuenten con un teclado QWERTY, un PAD para el control del puntero y principalmente conexión vía Bluetooth, es así que se propuso los siguientes modelos de control inalámbrico.

**Tabla 34**

Opciones control inalámbrico

N°	Control inalámbrico	Características	
1	<b>Teclado Bluetooth VILROS</b> 	<b>Sistema operativo</b>	<b>Windows + Android + Linux</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2.4 GHz</b>
		<b>Rango</b>	<b>10 m</b>
		<b>Adaptabilidad</b>	<b>Tipo control</b>
		<b>Costo</b>	<b>16.50 \$</b>
2	<b>Teclado táctil Rii i8+</b> 	<b>Sistema operativo</b>	<b>Windows + Android + Linux</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2.4 GHz</b>
		<b>Rango</b>	<b>5 m</b>
		<b>Adaptabilidad</b>	<b>Tipo control</b>
		<b>Costo</b>	<b>29.99 \$</b>
3	<b>Teclado Rii mini</b> 	<b>Sistema operativo</b>	<b>Windows + Android + Linux</b>
		<b>Red inalámbrica</b>	<b>2.4 GHz</b>
		<b>Rango</b>	<b>10 m</b>
		<b>Adaptabilidad</b>	<b>Tipo teclado convencional</b>
		<b>Costo</b>	<b>17.99 \$</b>

**Tabla 35**

Matriz de ponderaciones para la selección del control inalámbrico

		Teclado Bluetooth VILROS		Teclado táctil Rii i8+		Teclado Rii mini	
	F.P.	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Sistema operativo</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>
<b>Red inalámbrica</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>
<b>Rango</b>	<b>0.3</b>	<b>4</b>	<b>1.2</b>	<b>2</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>1.2</b>

	F.P.	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Adaptabilidad</b>	<b>0.2</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>
<b>Precio</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>4.2</b>		<b>3.4</b>		<b>3.8</b>

Una de las principales características que se deben tomar en cuenta para elegir el driver que controle los motores es que cumpla con el voltaje y con la potencia de funcionamiento establecidas en la Tabla 14. Otra de las características a tomar en cuenta es que posea una entrada de la señal que envíen los sensores de efecto Hall que posee el motor, una salida de señal de pulso que se la pueda procesar para el cálculo de velocidad, una señal de control de velocidad por medio de PWM a 0-5V y un control de dirección que permita seleccionar entre avanzar y reversa. las placas que más se ajustan a las características son las de expuestas en la Tabla 36.

**Tabla 36**

*Opciones de drivers para los motores*

N°	Drivers	Características
1	<b>Rio Rand ZS-X11H V1</b> 	<b>Voltaje</b> 6-60 V
		<b>Potencia</b> 400 W
		<b>Corriente</b> 25 A
		<b>Costo</b> 33 \$
2	<b>Walfront B076ZNLDT3</b> 	<b>Voltaje</b> 5 - 36V
		<b>Potencia</b> 350 W
		<b>Corriente</b> 16 A
		<b>Costo</b> 22 \$
3	<b>JYQD_V6.3E1</b> 	<b>Voltaje</b> 12 - 36 V
		<b>Potencia</b> 400 W
		<b>Corriente</b> 20 A
		<b>Costo</b> 28 \$

**Tabla 37**

Matriz de ponderaciones para la selección de drivers

		Rio Rand X11H V1	ZS- V1	Walfront B076ZNLDT3	JYQD_V6.3E1		
	F.P.	Calific ación	Ponde ración	Calific ación	Ponde ración	Calific ación	Ponde ración
<b>Voltaje</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>1.6</b>	<b>3</b>	<b>1.2</b>	<b>3</b>	<b>1.2</b>
<b>Potencia</b>	<b>0.3</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>0.9</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>
<b>Corriente</b>	<b>0.2</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>2</b>	<b>0.4</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>
<b>Costo</b>	<b>0.1</b>	<b>3</b>	<b>0.3</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>4.4</b>		<b>2.9</b>		<b>3.7</b>

Como premisa para la selección de las baterías es que el robot es un prototipo y no requiere de tener un uso extendido, con esto se propone que la duración de las baterías sea de aproximadamente de 30 min.

*Ecuación 21 Capacidad requerida de la batería*

$$\text{Capacidad} = I(\text{mA}) * t(\text{h})$$

$$\text{Capacidad} = 10000(\text{mA}) * 0.5(\text{h})$$

$$\text{Capacidad} = 5000(\text{mAh})$$

También se debe considerar que los motores trabajan con un rango de voltaje de 15V a 36V. Las baterías que más se ajustan a las necesidades son las expuestas en la Tabla 38.

**Tabla 38**

Opciones de baterías para los motores

N°	Baterías	Características	
		1	<b>Zee Power</b>
		<b>Voltaje</b>	<b>14.8 V</b>
		<b>Descarga</b>	<b>100 C</b>
		<b>Peso</b>	<b>8.82 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>35.99 \$</b>
2	<b>Venom</b>	<b>Capacidad</b>	<b>5000 mAh</b>
		<b>Voltaje</b>	<b>7.2 V</b>
		<b>Descarga</b>	<b>50 C</b>
		<b>Peso</b>	<b>7 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>44.99 \$</b>
3	<b>Zee Power</b>	<b>Capacidad</b>	<b>5200 mAh</b>
		<b>Voltaje</b>	<b>7.4 V</b>
		<b>Descarga</b>	<b>50 C</b>
		<b>Peso</b>	<b>8.82 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>19.99 \$</b>

**Tabla 39**

Matriz de ponderaciones para la selección de baterías para los motores

	F.P.	Zee Power de 14.8 V		Venom		Zee Power de 7.4 V	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Capacidad</b>	<b>0.2</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>
<b>Voltaje</b>	<b>0.1</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>
<b>Descarga</b>	<b>0.3</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>0.9</b>	<b>3</b>	<b>0.9</b>
<b>Peso</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>
<b>Costo</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>4.6</b>		<b>3.7</b>		<b>4.1</b>

La batería ganadora en entre las expuestas anteriormente es la Zee Power de 14.8 V, por lo que es necesario utilizar 2 baterías para cumplir con el voltaje de funcionamiento del motor. Cabe recalcar

que los cálculos de capacidad de la batería (Ecuación 21) fueron hechos para la máxima potencia del motor lo que no se utilizará con continuidad por lo que el tiempo de uso será más que el requerido.

Mientras que para la selección de la batería para el control se realiza el análisis del consumo de la Raspberry Pi que es de 5V a 3A teniendo un consumo de 15W, teniendo como opciones las baterías expuestas en la Tabla 40.

**Tabla 40**

*Opciones de batería para el control*

N°	Baterías	Características	
1	<b>Dongguan Haoxun</b> 	<b>Capacidad</b>	<b>25800 mAh</b>
		<b>Corriente</b>	<b>1A-2.1A</b>
		<b>Potencia</b>	<b>10W</b>
		<b>Peso</b>	<b>11 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>27.50 \$</b>
2	<b>Power Bank BOMT</b> 	<b>Capacidad</b>	<b>26800mAh</b>
		<b>Corriente</b>	<b>2A-3A</b>
		<b>Potencia</b>	<b>20W</b>
		<b>Peso</b>	<b>8 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>30.00 \$</b>
N°	Baterías	Características	
3	<b>Anker B07S829LBX</b> 	<b>Capacidad</b>	<b>20000 mAh</b>
		<b>Corriente</b>	<b>1A-2.1A</b>
		<b>Potencia</b>	<b>10W</b>
		<b>Peso</b>	<b>12.1 oz</b>
		<b>Costo</b>	<b>59.99 \$</b>

**Tabla 41**

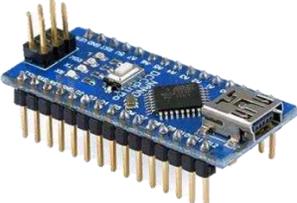
Matriz de ponderaciones para la selección de batería para el control

		Dongguan Haoxun		Power Bank BOMT		Anker B07S829LBX	
	F.P.	Calific ación	Ponde ración	Calific ación	Ponde ración	Calific ación	Ponde ración
<b>Capacidad</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.8</b>	<b>5</b>	<b>1.0</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>
<b>Corriente</b>	<b>0.3</b>	<b>2</b>	<b>0.6</b>	<b>4</b>	<b>1.2</b>	<b>2</b>	<b>0.6</b>
<b>Potencia</b>	<b>0.1</b>	<b>2</b>	<b>0.2</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>2</b>	<b>0.2</b>
<b>Peso</b>	<b>0.3</b>	<b>4</b>	<b>1.2</b>	<b>5</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>0.9</b>
<b>Costo</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>	<b>0.4</b>	<b>3</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>0.1</b>
<b>Total</b>	<b>1</b>		<b>3.2</b>		<b>4.4</b>		<b>2.4</b>

Una vez obtenidos los resultados de las tablas de ponderación, se resume los elementos electrónicos seleccionados en la Tabla 42.

**Tabla 42**

Resultados de la selección de los componentes electrónicos

Mini PC Robot	Raspberry Pi 3B+	
Cámara	Arducam OV5647	
Microcontrolador	Arduino nano	

Control inalámbrico	<b>Teclado Bluetooth VILROS</b>	
Driver para los motores	<b>Rio Rand ZS- X11H V1</b>	
Batería para los motores	<b>Zee Power de 14.8 V</b>	
Batería para el control	<b>Power Bank BOMT</b>	

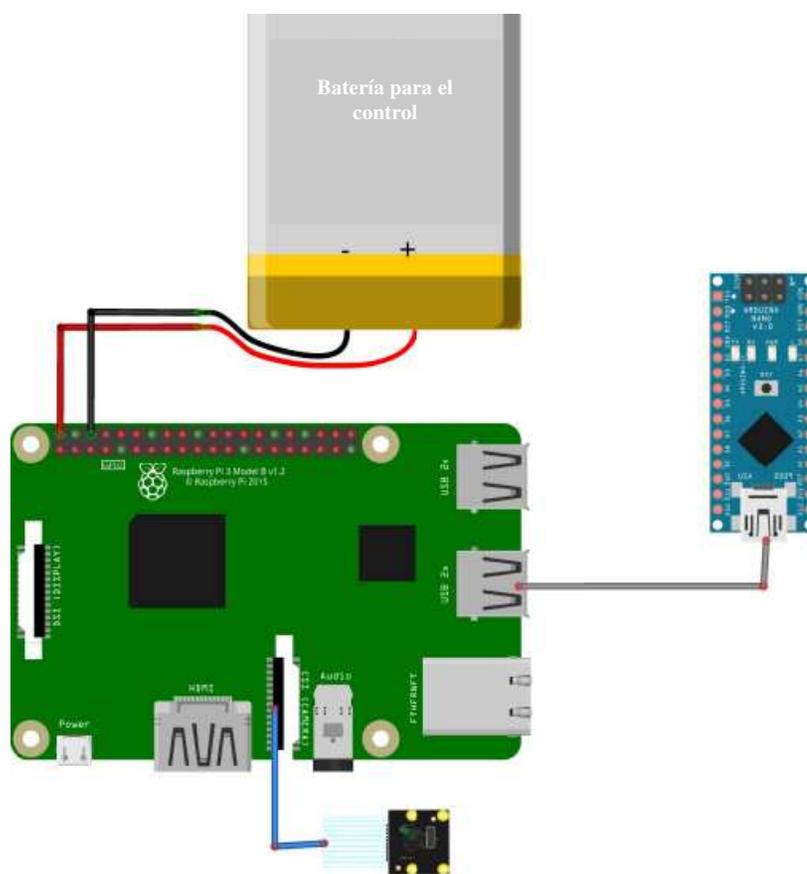
---

### Diagramas de conexión

La conexión del sistema eléctrico se le divide en 2 partes, de la primera se visualiza la conexión del Raspberry Pi 3B+ con la batería, la cámara a través del puerto y el Arduino nano me mediante un cable USB, como se observa en Figura 70

**Figura 70**

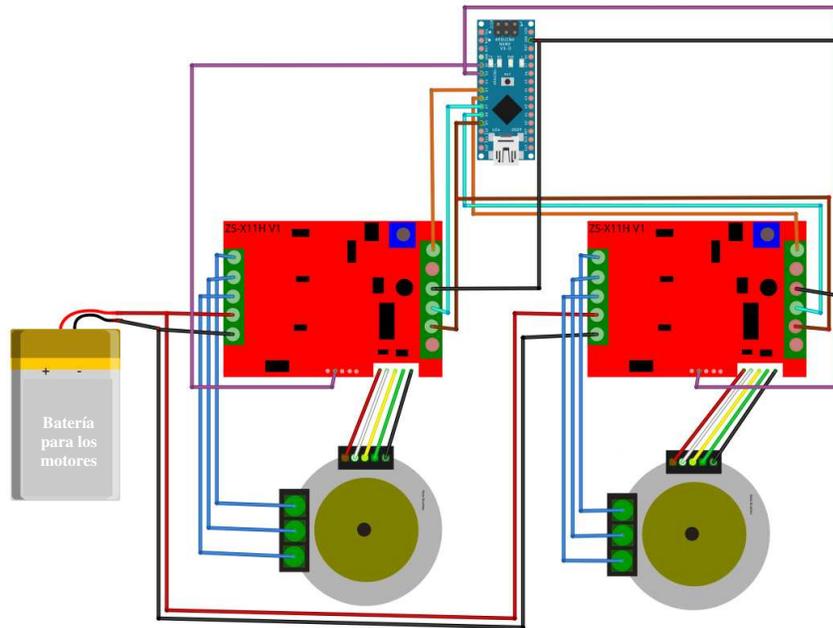
Conexión Raspberry Pi con el arduino nano



Mientras que en la segunda parte (Figura 71) se visualiza el diagrama de conexión del Arduino nano con los 2 controladores de los motores y la batería que se encarga de energizar los motores.

**Figura 71**

Conexión del arduino nano con los controladores de los motores



Para complemento de la Figura 71, se tiene la siguiente descripción de las conexiones hechas entre cada componente:

- Rojo: 30 V
- Negro: GND
- Azul: 3 fases de los motores brushless
- Rojo, Blanco, Amarillo, Verde, Negro: Sensores hall del motor
- Naranja: PWM para control del motor
- Morado: Señal de salida de pulsos para medir la velocidad del motor (PWM salida)
- Cian: Señal de dirección del motor
- Café: Señal de STOP

### Diseño del modelo cinemático del robot

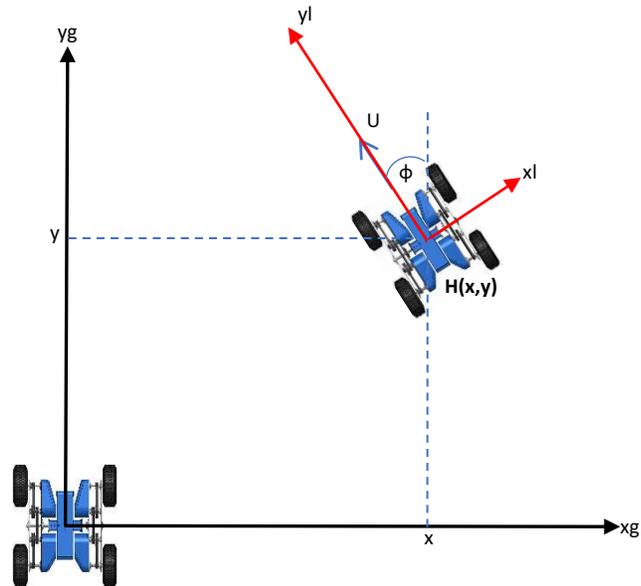
Para el diseño del modelo cinemático partimos de que el robot móvil se basa en un sistema de tracción diferencial, es decir que el chasis se mueve por acción de dos motores independientes (Baño Azcón & Oller Pujol, 2003). También es necesario plantear las siguientes hipótesis que simplifican la caracterización del modelo cinemático:

- La superficie de movimiento del robot es plana y sin imperfecciones.
- Las ruedas presentan condición de movimiento de rodadura pura, el deslizamiento es despreciable.
- Se considera al robot como un sólido rígido.

Para empezar con el modelado cinemático se propone un sistema referencial “g” y un sistema instantáneo “l” que se encuentra en el centro del robot con el eje “yl” en dirección al vector velocidad “U”.

**Figura 72**

Posición del robot móvil en el plano "g"



El vector velocidad lineal "U" se lo puede descomponer en el plano de referencia "g" en función del ángulo "θ" mediante geometría.

*Ecuación 22 Componente en x del vector velocidad "U"*

$$hx = x$$

$$Ux = \dot{hx} = -U \times \text{sen}\theta$$

*Ecuación 23 Componente en y del vector velocidad "U"*

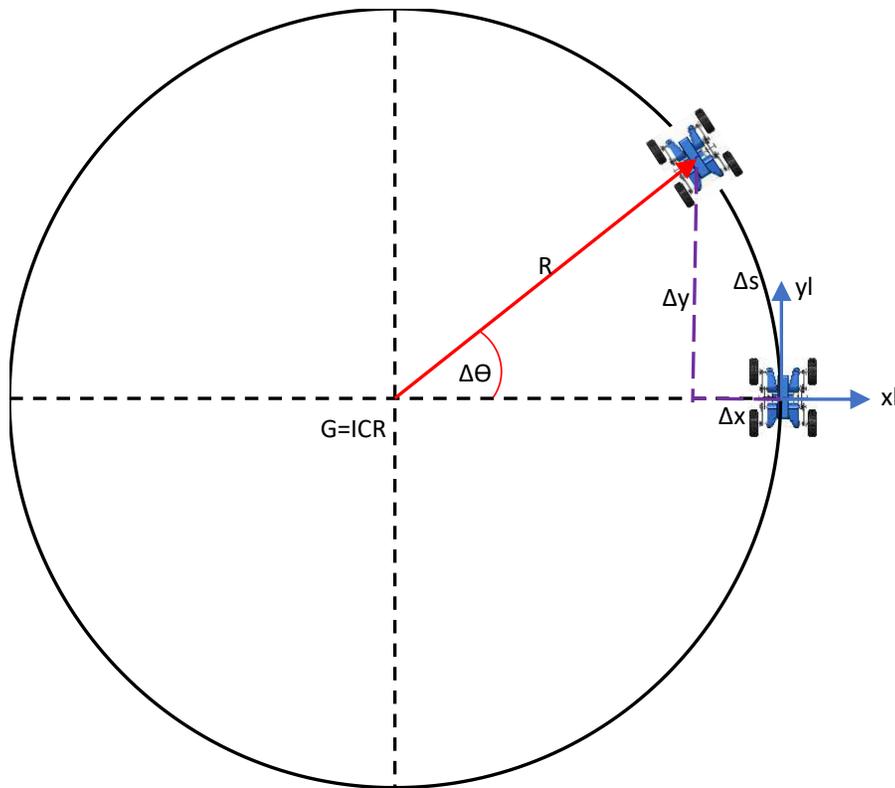
$$hy = y$$

$$Uy = \dot{hy} = U \times \text{cos}\theta$$

Para el análisis es necesario expresar el movimiento del robot en un intervalo de control pequeño que sigue una trayectoria circular como se muestra en la Figura 73.

**Figura 73**

Posición del robot para un intervalo pequeño



De la Figura 73 podemos expresar la velocidad lineal “U” en función de un desplazamiento pequeño como se observa en:

*Ecuación 24 Velocidad lineal para un desplazamiento pequeño.*

$$U = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

De la misma manera se puede expresar la velocidad angular “w” que viene dada por:

*Ecuación 25 Velocidad angular para un desplazamiento pequeño*

$$w = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

Sabiendo que  $\Delta s$  y  $\Delta\theta$  son el desplazamiento recorrido por el robot en un intervalo pequeño de tiempo  $\Delta t$ .

La variable  $\Delta s$  expresa la longitud de arco recorrida por el robot, y conociendo que la trayectoria propuesta es un círculo podemos expresarla de la siguiente manera:

*Ecuación 26 Longitud de arco en función del radio y del ángulo de giro*

$$\Delta s = R \times \Delta\theta$$

Siendo R el radio de giro de la circunferencia que va desde el centro instantáneo de rotación al centro del robot.

Para obtener las ecuaciones de desplazamiento para intervalos pequeños vamos a descomponer la posición del robot en el sistema de referencia "l" (Figura 73) en función de una variación de ángulo  $\Delta\theta$  y el radio, como se expresa a continuación.

*Ecuación 27 Componente del desplazamiento en el "eje y"*

$$\Delta y = R \times \text{sen}(\Delta\theta)$$

*Ecuación 28 Componente del desplazamiento en el "eje x"*

$$R = R \times \cos(\Delta\theta) + \Delta x$$

$$\Delta x = R(1 - \cos(\Delta\theta))$$

Es necesario obtener las ecuaciones de desplazamiento del robot con respecto al sistema referencial "g", para esto es necesario rotar un ángulo " $\theta$ ". Para ello es necesario multiplicar la matriz desplazamiento por la matriz de rotación.

*Ecuación 29 Matriz de rotación multiplicada por la matriz de desplazamiento*

$$D_L^G = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

Sabiendo que “ $\Delta x$ ” y “ $\Delta y$ ” son las obtenidas en la Ecuación 27 y Ecuación 28, obteniendo:

*Ecuación 30 Resolución de la ecuación 19*

$$D_L^G = \begin{bmatrix} \Delta x \times \cos\theta - \Delta y \times \text{sen}\theta \\ \Delta x \times \text{sen}\theta + \Delta y \times \cos\theta \end{bmatrix}$$

*Ecuación 31 Sustituyendo la ecuación de  $\Delta x$  y  $\Delta y$*

$$D_L^G = \begin{bmatrix} R(1 - \cos(\Delta\theta)) \times \cos\theta - R \times \text{sen}(\Delta\theta) \times \text{sen}\theta \\ R(1 - \cos(\Delta\theta)) \times \text{sen}\theta + R \times \text{sen}(\Delta\theta) \times \cos\theta \end{bmatrix}$$

Sabiendo que las ecuaciones fueron deducidas para un intervalo de control pequeño se puede suponer que:

- $\Delta t \approx 0$
- $\cos(\Delta\theta) \approx 1$
- $\text{sen}(\Delta\theta) \approx \Delta\theta$

*Ecuación 32 Desplazamiento tomando en cuenta las consideraciones para un intervalo pequeño*

$$D_L^G = \begin{bmatrix} 0 - R \times \Delta\theta \times \text{sen}\theta \\ 0 + R \times \Delta\theta \times \cos\theta \end{bmatrix}$$

Considerando la Ecuación 26 Longitud de arco en función del radio y del ángulo de giro y reemplazando en la Ecuación 32, tenemos:

*Ecuación 33 Matriz de desplazamiento en función de la longitud de arco y el ángulo de rotación*

$$D_L^G = \begin{bmatrix} -\Delta s \times \text{sen}\theta \\ \Delta s \times \text{cos}\theta \end{bmatrix}$$

Obteniendo:

*Ecuación 34 Desplazamiento "x"*

$$\Delta x = -\Delta s \times \text{sen}\theta$$

*Ecuación 35 Desplazamiento "y"*

$$\Delta y = \Delta s \times \text{cos}\theta$$

Para obtener las ecuaciones cinemáticas de la velocidad lineal en cada punto es necesario dividir las ecuaciones de desplazamiento (Ecuación 34 y Ecuación 35) para una variación de tiempo " $\Delta t$ " como se observa:

*Ecuación 36 Desplazamiento "x" dividida para  $\Delta t$*

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = -\frac{\Delta s}{\Delta t} \times \text{sen}\theta$$

*Ecuación 37 Desplazamiento "y" dividida para  $\Delta t$*

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \text{cos}\theta$$

Conociendo la ecuación de la velocidad lineal para un desplazamiento pequeño (Ecuación 24 ) y que la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo nos da la velocidad lineal obtenemos:

*Ecuación 38 Velocidad lineal en el eje x*

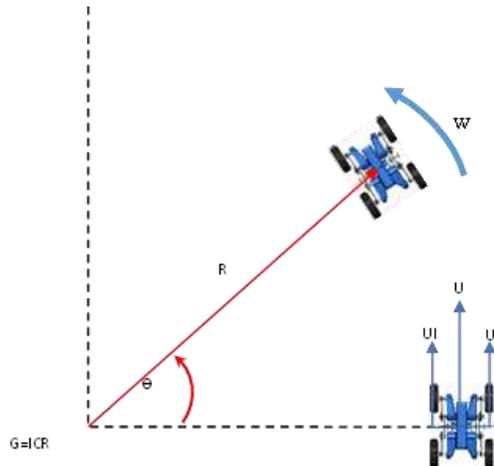
$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = U_x = -U \times \text{sen}\theta$$

Ecuación 39 Velocidad lineal en el eje y

$$\dot{y} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = U_y = U \times \cos\theta$$

**Figura 74**

Ilustración de la velocidad lineal y angular



Para expresar la variación de la orientación en función de la velocidad angular (Figura 74) se lo expresa de la siguiente manera:

Ecuación 40 Velocidad angular

$$\dot{\theta} = w$$

Ecuación 41 Modelo cinemático expresado en su forma matricial

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{cos}\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ w \end{bmatrix}$$

El modelo cinemático planteado en la Ecuación 41 está en función de una velocidad global  $U$  y  $w$ , para el caso del robot se necesita tener las ecuaciones cinemáticas en función de una relación entre velocidades angulares de cada una de las ruedas y la velocidad angular y lineal del robot (Figura 74). Ahora

es necesario conocer la relación entre la velocidad lineal “U” con las velocidades lineales de cada rueda “Ur” “Ul”, la cual se expresa como:

*Ecuación 42 Velocidad lineal en función de las velocidades lineales de cada rueda*

$$U = \frac{U_r + U_l}{2}$$

También debemos conocer una relación de la velocidad angular y las velocidades lineales de cada rueda, para esto partimos de que la velocidad lineal de cada una de las ruedas motrices es perpendicular al eje de giro en cualquier punto de la trayectoria, por lo que el movimiento de giro es producido por una mezcla de las velocidades lineales de cada rueda.

Si sabemos que el centro instantáneo de giro ICR es el centro de la rotación del robot, se puede expresar la velocidad lineal “U” como un producto de la velocidad angular por el radio de giro “R” (Figura 74).

*Ecuación 43 Velocidad lineal en función de la velocidad angular*

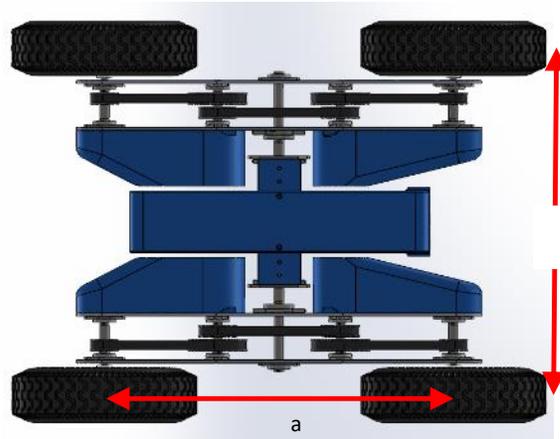
$$U = w \times R$$

De la misma manera se puede calcular la velocidad lineal para cada una de las ruedas, para esto es necesario conocer la distancia entre las ruedas “b” que se muestra en la Figura 75.

$$\dot{x} = -\frac{U_r + U_l}{2} \times \text{sen}\theta$$

$$\dot{y} = \frac{U_r + U_l}{2} \times \text{cos}\theta$$

**Figura 75**  
Medidas del robot



Sabiendo esto las ecuaciones de la velocidad lineal de cada rueda que expresado como:

*Ecuación 44 Velocidad lineal de la rueda izquierda en función de la velocidad angular*

$$U_l = w \times \left(R - \frac{b}{2}\right)$$

*Ecuación 45 Velocidad lineal de la rueda derecha en función de la velocidad angular*

$$U_r = w \times \left(R + \frac{b}{2}\right)$$

Para obtener una relación entre la velocidad angular global y las velocidades lineales de cada una de las ruedas procedemos a despejar "R" de la Ecuación 44 y remplazarla en la Ecuación 45, obteniendo:

*Ecuación 46 Velocidad angular en función de las velocidades lineales de cada rueda*

$$w = \frac{U_r - U_l}{b}$$

Con estas relaciones procedemos a remplazar en el modelo cinemático obtenido anteriormente (Ecuación 41) teniendo:

*Ecuación 47 Velocidad lineal en el eje x en función de la velocidad de cada rueda*

$$\dot{x} = -\frac{Ur + Ul}{2} \times \text{sen}\theta$$

*Ecuación 48 Velocidad lineal en el eje y en función de la velocidad de cada rueda*

$$\dot{y} = \frac{Ur + Ul}{2} \times \text{cos}\theta$$

*Ecuación 49 Velocidad angular en función de la velocidad de cada rueda*

$$\dot{\theta} = \frac{Ur - Ul}{b}$$

Para poner el modelo cinemático en función de la velocidad angular de cada rueda “wr” y “wl” utilizamos el concepto de velocidad lineal en donde se expresa que es igual a la multiplicación de la velocidad angular a la que gira el motor por el radio de la llanta “ra” como se observa:

*Ecuación 50 Velocidad lineal de la rueda derecha*

$$Ur = wr \times ra$$

*Ecuación 51 Velocidad lineal de la rueda izquierda*

$$Ul = wl \times ra$$

Estas ecuaciones se las reemplazan en las ecuaciones de la cinemática y se obtiene:

*Ecuación 52 Velocidad lineal en el eje x en función de la velocidad angular de cada rueda*

$$\dot{x} = -\frac{\text{sen}\theta \times ra}{2} \times wr - \frac{\text{sen}\theta \times ra}{2} \times wl$$

*Ecuación 53 Velocidad lineal en el eje y en función de la velocidad angular de cada rueda*

$$\dot{y} = \frac{\text{cos}\theta \times ra}{2} \times wr + \frac{\text{cos}\theta \times ra}{2} \times wl$$

*Ecuación 54 Velocidad angular en función de la velocidad angular de cada rueda*

$$\dot{\theta} = \frac{ra}{b} \times wr - \frac{ra}{b} \times wl$$

*Ecuación 55 Modelo cinemático en función de la velocidad angular expresado en su forma matricial*

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\text{sen}\theta \times ra}{2} & -\frac{\text{sen}\theta \times ra}{2} \\ \frac{\text{cos}\theta \times ra}{2} & \frac{\text{cos}\theta \times ra}{2} \\ \frac{ra}{b} & \frac{ra}{b} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} wr \\ wl \end{bmatrix}$$

Para programar el modelo cinemático en la tarjeta de control del robot es necesario simplificarlo mediante la manipulación de la Ecuación 42 y Ecuación 46 obteniendo:

*Ecuación 56 Velocidad lineal del motor izquierdo en función de las velocidades globales*

$$Ul = U - w \frac{b}{2}$$

*Ecuación 57 Velocidad lineal del motor izquierdo en función de las velocidades globales*

$$Ur = U + w \frac{b}{2}$$

Estas ecuaciones nos permiten enviar datos de velocidades globales y que el robot interprete si tiene que ir de frente, reversa o dar giros.

### **Simulación del modelo cinemático**

Para esta simulación se usó el complemento de Python conocido como pyRobotics, librería que sirve para cargar el modelo CAD del robot, crear el área de trabajo e inicializar la simulación del robot en el entorno virtual. La simulación se realizó para comprobar la validez del modelo cinemático expresado en la Ecuación 55, como se observa en la Figura 76.

**Figura 76**  
Implementación del modelo cinemático en Python

```

hx[0] = 0; # Posicion inicial en el eje x en metros [m]
hy[0] = 0; # Posicion inicial en el eje y en metros [m]
phi[0] = 0*(np.pi/180) # Orientacion inicial en radianes [rad]

##### VELOCIDADES DE REFERENCIA #####

wrRef = 1.1*np.ones(N) # Velocidad angular en radianes/segundos [rad/s]
wlRef = 1*np.ones(N) # Velocidad angular en radianes/segundos [rad/s]
wRef = (ra/b)*(wrRef - wlRef)

##### BUCLE #####
for k in range(N):
    # Integral numerica
    phi[k+1] = phi[k]+ts*wRef[k]

    # Modelo cinemático
    hxp = ((-ra * np.sin(phi[k+1])) / (2)) * (wrRef[k] + wlRef[k])
    hyp = ((ra * np.cos(phi[k+1])) / (2)) * (wrRef[k] + wlRef[k])

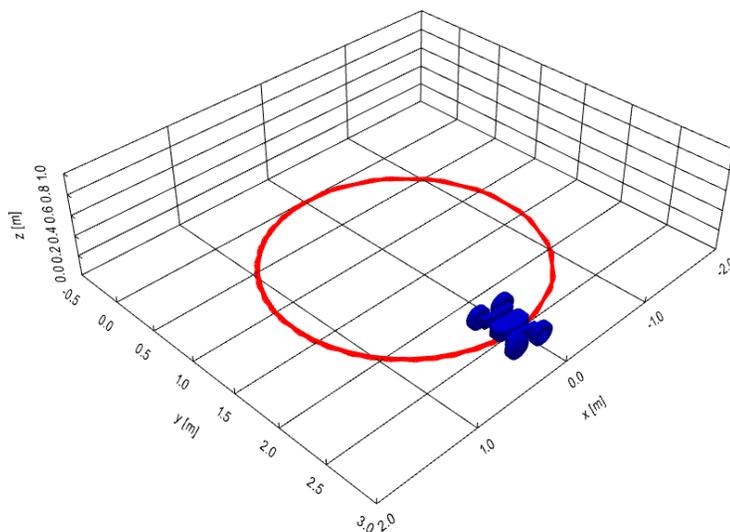
    #print(hxp)

    # Integral numerica
    hx[k+1] = hx[k] + ts*hxp
    hy[k+1] = hy[k] + ts*hyp

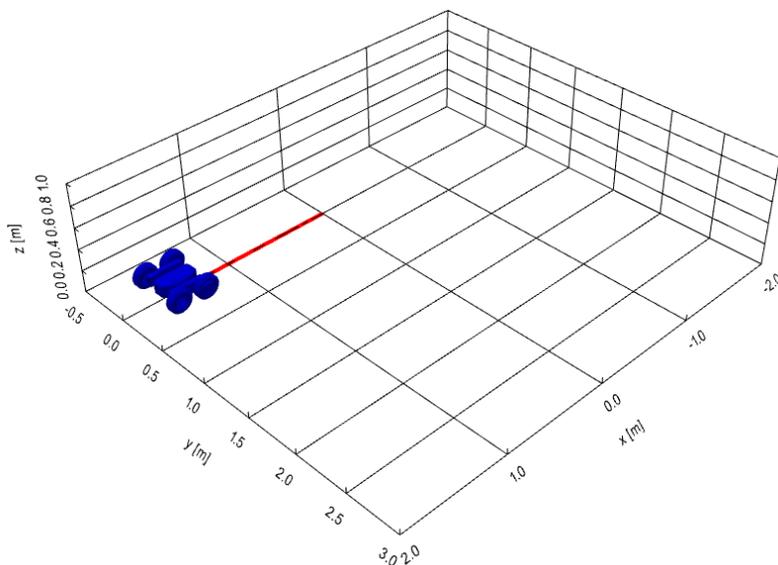
```

En las figuras (Figura 77 y Figura 78) se observa los resultados obtenidos de la simulación para 2 tipos de trayectorias una circular y una línea comprobando así la validez del modelo matemático. Con este modelo se procede a realizar la programación en la placa arduino nano.

**Figura 77**  
Simulación de trayectoria circular



**Figura 78**  
*Simulación de trayectoria lineal*

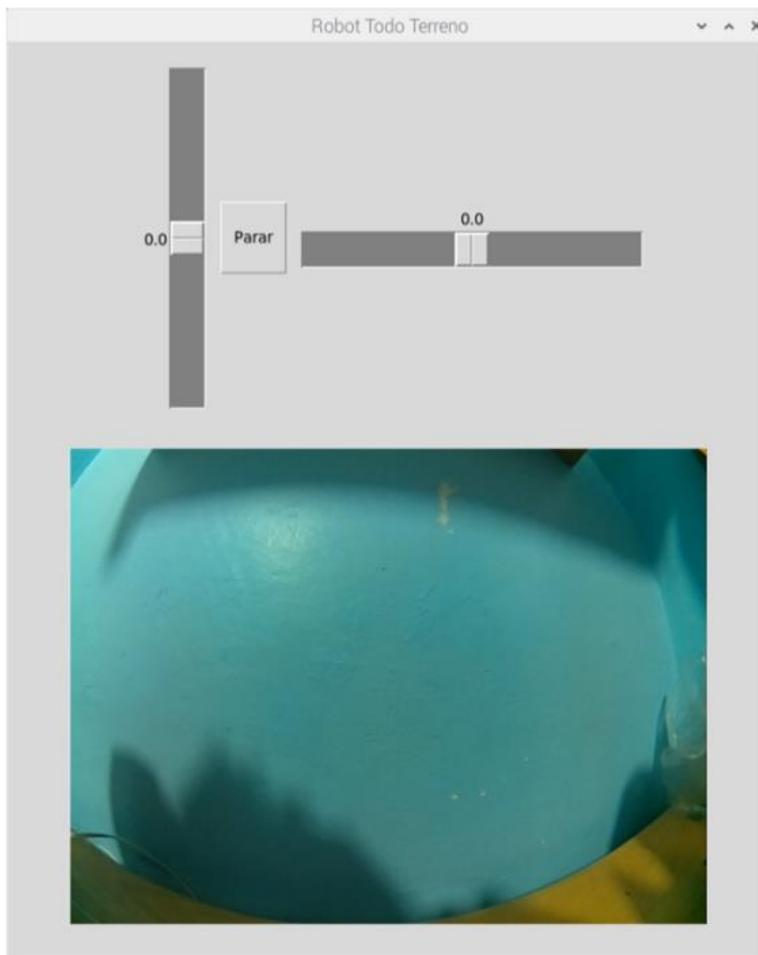


### **Diseño de la HMI**

Antes de empezar a realizar la implementación de la interfaz humano-maquina (HMI), hay que tener en cuenta varios criterios entre los que se destacan el criterio de usabilidad. En cuanto al criterio de usabilidad se tuvo en cuenta que la interfaz no debería estar saturada de información, ya que esto hace que el operario demore en realizar las acciones para operar al robot.

El HMI está diseñado en Python con la herramienta Tkinter que es el paquete más utilizado para crear interfaces gráficas, Tkinter es una capa orientada a objetos basada en TCL. El HMI cuenta con 2 barras para el movimiento y un botón para el frenado (en caso de que el robot se maneje desde un dispositivo táctil), además cuenta con una interfaz que muestra la cámara en tiempo real como se observa en la Figura 79.

**Figura 79**  
Diseño de la HMI



El HMI se ejecuta en el Raspberry Pi y se transmite mediante conexión Wifi mediante el software VNC hasta en cualquier dispositivo sea una PC o un o algún dispositivo portable. En el caso que el HMI se ejecute en una PC se utilizará el teclado para dar movimiento al robot, utilizando las teclas Q para aumentar la velocidad, A para disminuir la velocidad, y las flechas para realizar los movimientos en el plano.

**Figura 80**

Disposición de las teclas de movimiento en un teclado de PC



También funciona mediante un control inalámbrico conectado mediante Bluetooth, para esto utiliza la misma disposición de teclas las teclas en verde para el control de velocidad y las teclas en azul para el movimiento del robot en el plano.

**Figura 81**

Disposición de las teclas de movimiento en el control inalámbrico

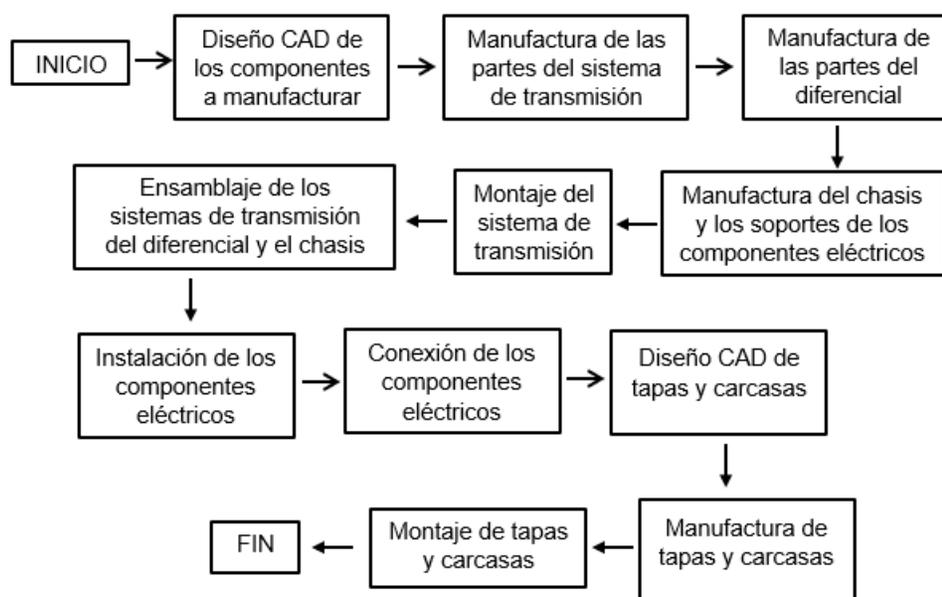


## Capítulo 4 integración del sistema

En este capítulo se desarrolla la integración de los sistemas diseñados en el capítulo anterior. La integración de todo el prototipo robótico empieza con el diseño CAD de todos los componentes, desde aquellos que integran el sistema mecánico hasta el eléctrico, procediendo con su respectiva manufactura

**Figura 82**

*Diagrama de flujo de la integración del sistema*



### Implementación de los componentes mecánicos

Como premisa de la fabricación de los componentes del robot se realizó el diseño CAD de cada uno de ellos para comprobar que todos cumplan con su función, garantizar que el método de fabricación y el ensamblaje sea correcto y lógico.

La implementación de los componentes mecánicos comienza con la manufactura de las partes de los sistemas de transmisión, diferencial y el chasis para con esto proceder al montaje del sistema de

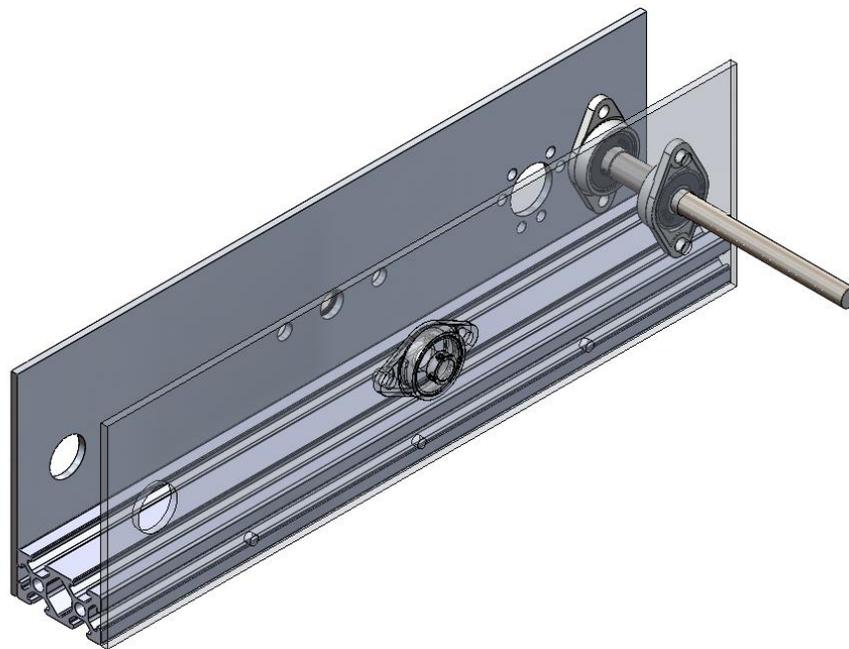
transmisión y del diferencial dentro del chasis. Una vez montados por separado se ensambla los dos sistemas de transmisión con el chasis, esto se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 82.

### ***Sistema de transmisión***

El sistema de transmisión está montado en un perfil con ranura en T de 40x20 de aluminio (Figura 83), cubierto de dos tapas laterales fabricadas en aluminio de 3mm en donde se montan los ejes, los piñones y la cadena del sistema de transmisión.

#### ***Figura 83***

*Montaje de las tapas laterales en el perfil de aluminio*



Para la fabricación de las tapas laterales del sistema de transmisión se utilizó procesos de manufactura como corte, taladrado y limado (Figura84)

**Figura84**

*Tapas laterales del sistema de transmisión*



Los ejes del sistema de transmisión fueron elaborados a partir de un eje de acero AISI 304 de diámetro 10mm y manufacturados por medio de torneado y fresado (Figura 85).

**Figura 85**

*Ejes del sistema de transmisión*



Par ensamblar los piñones a los ejes del sistema de transmisión y al eje del motor se utilizó acoples, los cuales fueron elaborados en acero AISI 1020 y para su construcción se manejó procesos de corte, torneado y taladrado (Figura 86).

**Figura 86**

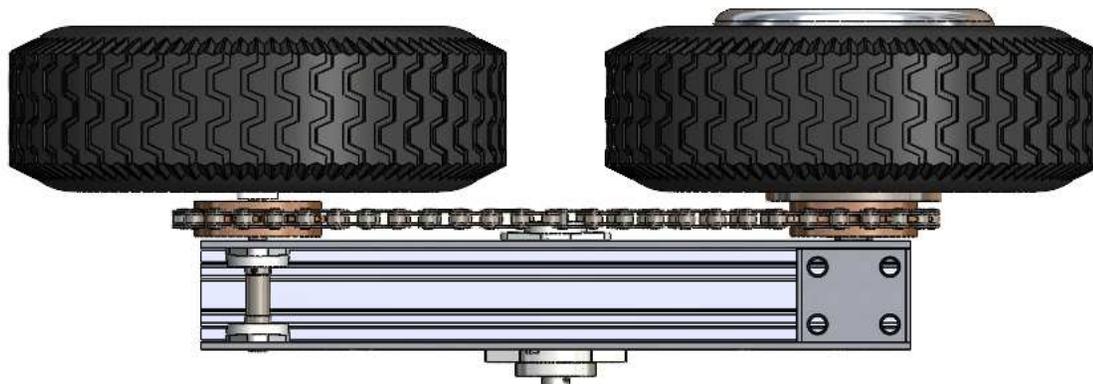
*Acople de sujeción del piñón al eje*



Una vez manufacturadas las piezas del sistema de transmisión se realiza el montaje como se ve en la vista superior del diseño, dejando la rueda conducida a la izquierda y está conectada por su respectiva cadena hacia la rueda del motor (Figura 87).

**Figura 87**

*Montaje del sistema de transmisión*

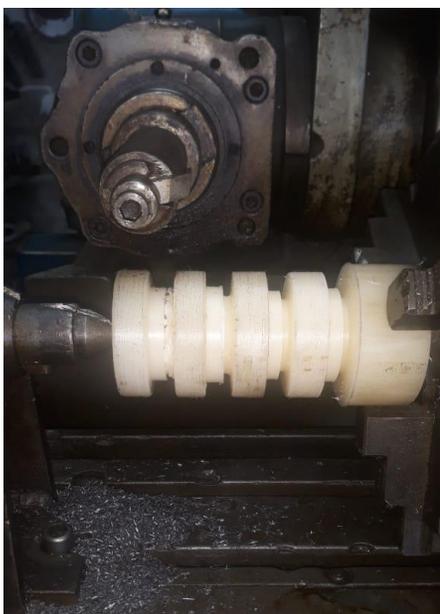


### ***Sistema del diferencial***

Para el diferencial, se procede con el torneado y ensamblaje tanto de los engranajes cónicos, como de sus respectivos ejes. Con el diseño CAD realizado previamente se tornea los engranajes cónicos y se pulen sus respectivos detalles para mayor eficiencia del sistema mecánico.

#### ***Figura 88***

*Torneado de los engranajes cónicos*



**Figura 89**

*Torneado de los engranajes cónicos*



El material utilizado para la manufactura de los engranajes cónicos es Duralón (

**Figura 89).**

**Figura 90**

*Torneado de los ejes del diferencial*

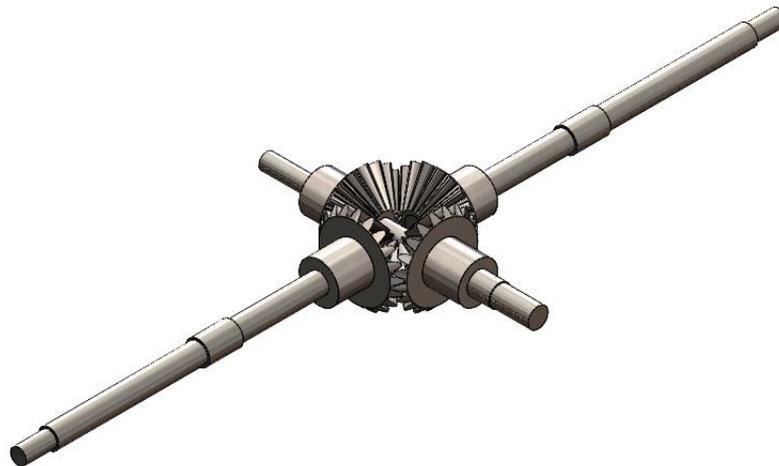


Mientras que el material que se utilizó para la manufactura de los ejes del diferencial es Acero AISI 304 de 10mm de diámetro. Los engranajes cónicos y los ejes se los ensambla como se muestra en la

Figura 91.

**Figura 91**

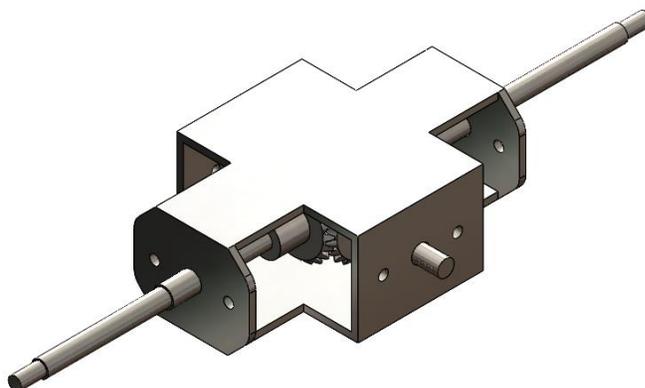
*Ensamblaje de los ejes del diferencial y los engranajes cónicos*



El chasis (Figura 64) es el encargado de contener el mecanismo del diferencial y está construido en una plancha de acero inoxidable de 3mm de espesor: Para la fabricación se utilizó procesos de corte, limado taladrado y doblado.

**Figura 92**

*Ensamblaje del sistema diferencial con el chasis*

**Figura 93**

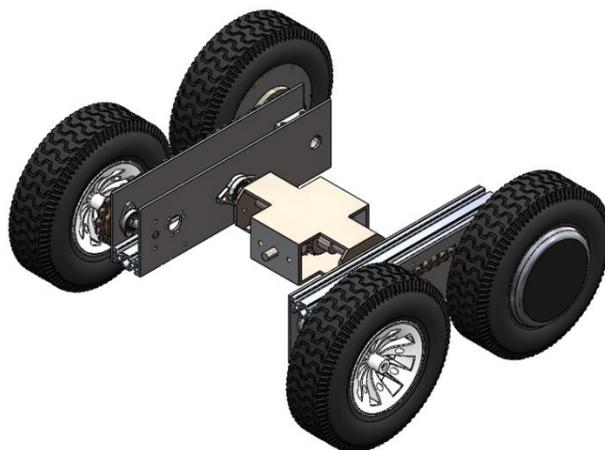
*Ensamblaje del diferencial en el chasis*



Con los dos sistemas de transmisión ensamblados se procede a montar cada uno en los ejes del chasis como se muestra en la Figura 94.

**Figura 94**

*Ensamblaje del sistema diferencial y el sistema de transmisión de cada rueda*

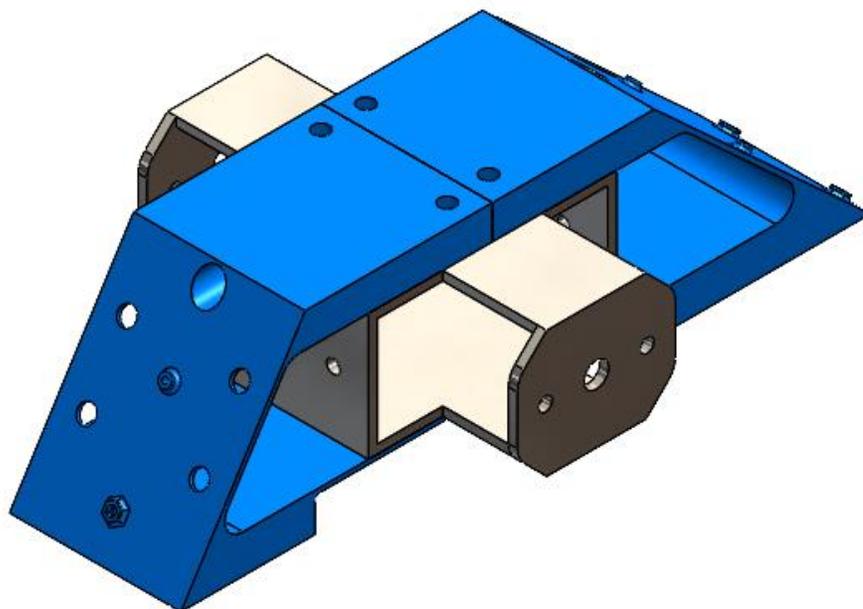


### **Implementación de los componentes electrónicos**

Para montar los componentes electrónicos se diseñó dos piezas que se acoplen al chasis y no sobrepasen los límites longitudinales del robot, también deben poseer las ranuras y agujeros necesarios para que se pueda montar sobre ellos las placas electrónicas, cables y la batería (Figura 95).

**Figura 95**

*Acoples para el ensamblaje de la electrónica sobre el chasis*



Los soportes de la electrónica se elaboraron de PLA mediante manufactura aditiva (Figura 96).

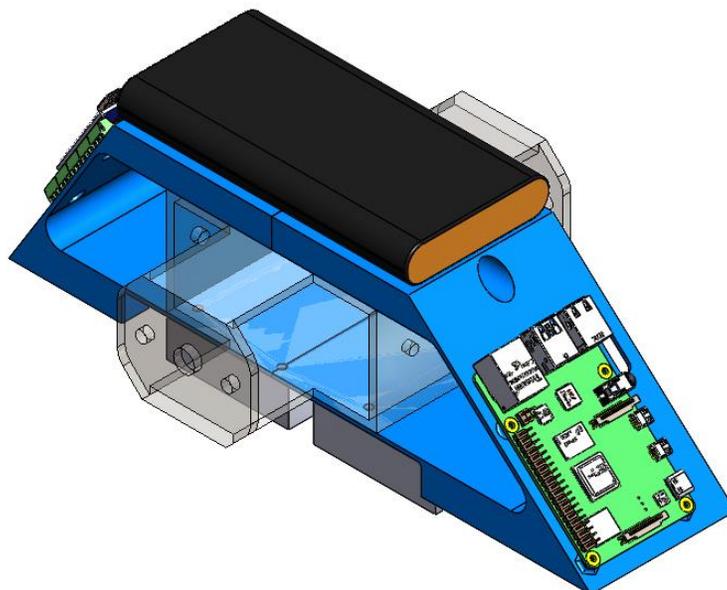
**Figura 96**

*Impresión 3D de los soportes de la electrónica*

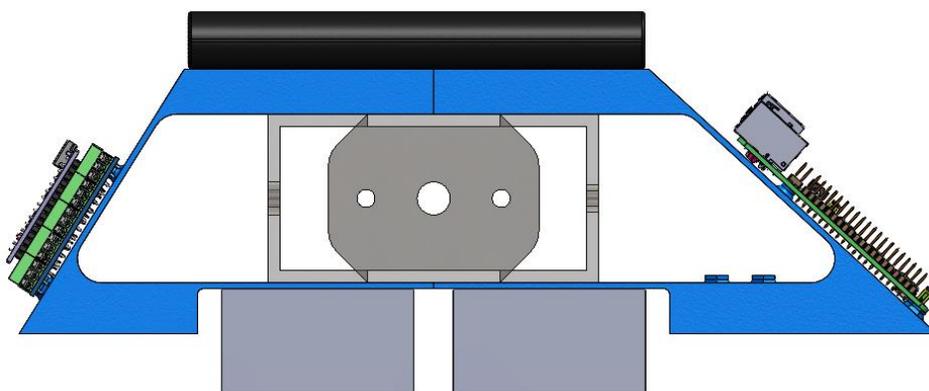


En la Figura 97 y Figura 98 se observa el montaje de los componentes electrónicos donde se puede ver la distribución de las placas y batería tomando en cuenta que los componentes más pesados estén en el centro y en la parte baja del chasis; es por esto que se colocó la batería en la parte superior y los Controladores de los motores en la parte inferior.

**Figura 97**  
*Ensamble de los principales componentes electrónicos del robot*



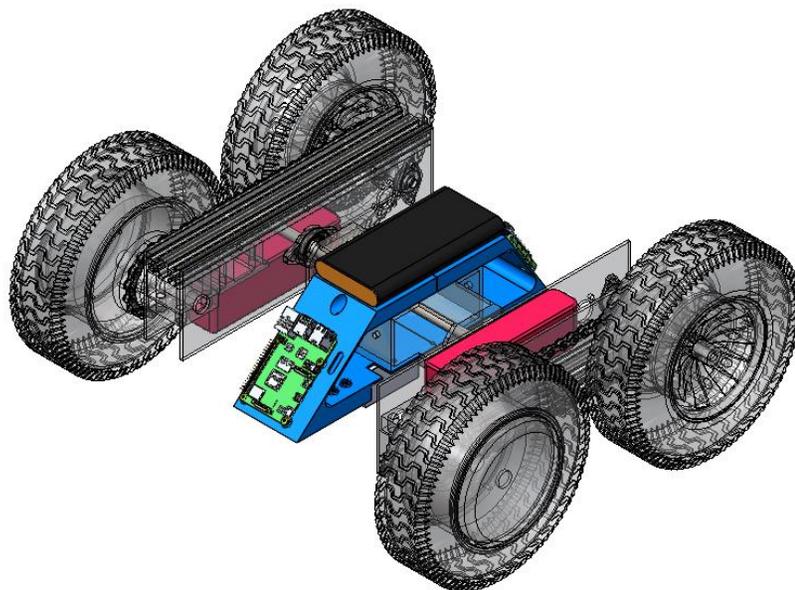
**Figura 98**  
*Vista lateral del ensamblaje electrónico*



Las dos baterías para los motores se encuentran ubicadas dentro del sistema de transmisión, ya que son las partes más pesadas y por diseño de los ejes no se le podía agregar peso extra al diferencial. En la Figura 99 se observa el lugar donde se ubicó las baterías, estas están resaltadas en color rojo.

**Figura 99**

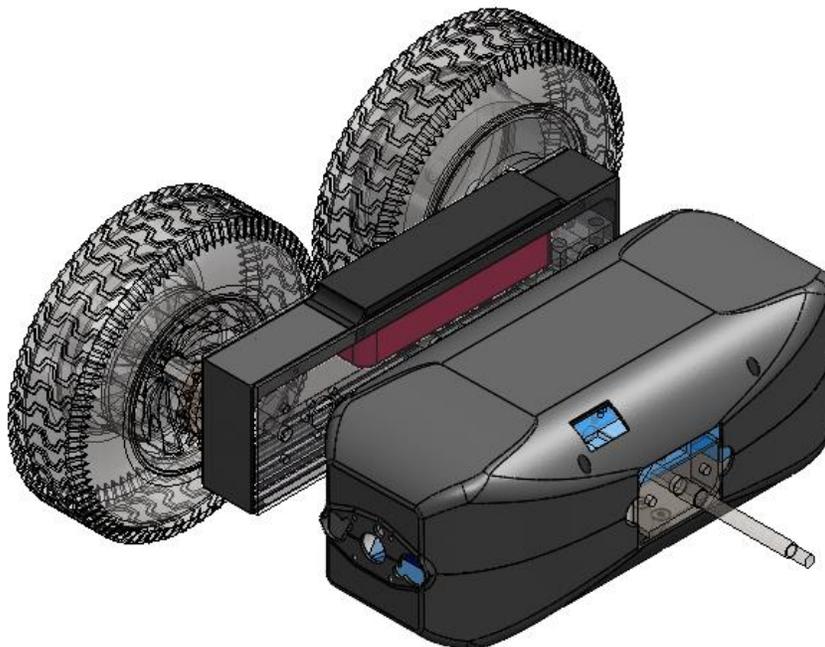
*Ubicación de las baterías dentro del sistema de transmisión*



Para tapar la parte electrónica se implementó tapas que protejan de polvo y demás agentes externos tanto a la electrónica del chasis como a las baterías que están dentro del sistema de transmisión. Estas tapas fueron elaboradas en PLA mediante manufactura aditiva.

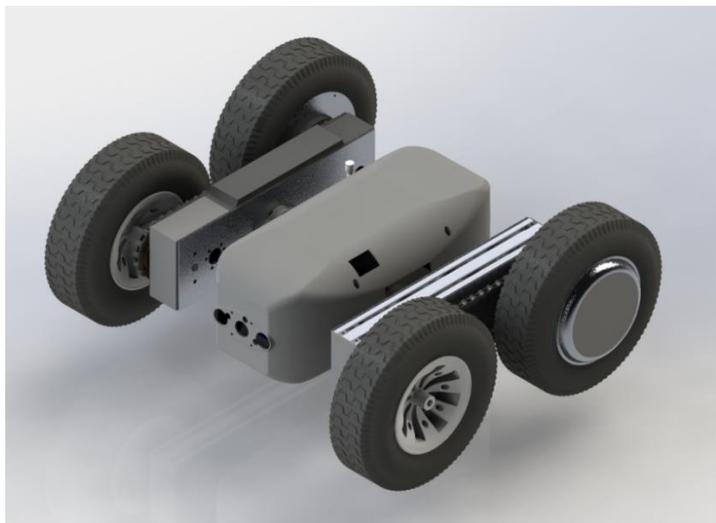
**Figura 100**

*Implementación de la carcasa impresa en 3D*



En la Figura 101 se muestra el renderizado final del robot y en la Figura 102 se muestra el resultado final del robot despues de superar todas las etapas de diseño.

**Figura 101**  
*Renderizado del modelo 3D*



**Figura 102**  
*Robot terminado*



## Capítulo 5 pruebas y resultados

En este capítulo se plantea pruebas para evaluar si el prototipo cumple con los objetivos planteados, para esto se diseña un plan que pone a prueba al prototipo funcionando con todos sus componentes y subsistemas trabajando de manera simultánea.

### Métricas de evaluación

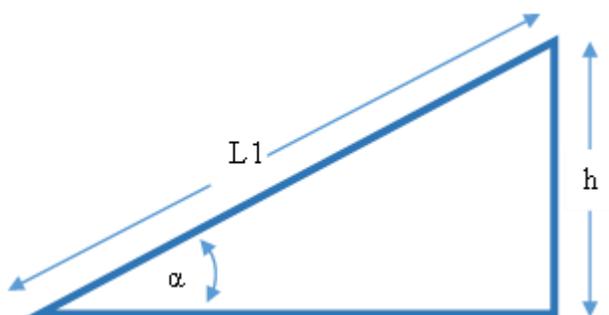
Las métricas se seleccionan para validar el desempeño del robot en distintas condiciones de terreno, en donde se pueda poner a prueba el sistema de transmisión y el diferencial que son los objetivos principales de este prototipo. Para validar el desempeño se propone evaluar la capacidad del robot para sortear diversos obstáculos con ángulos y alturas establecidas.

### *Inclinación del piso*

Para esta prueba se propone ángulos variables con alturas mayores al radio de la llanta, manteniéndose la longitud “L1” constante y variando la altura “h” y el ángulo “ $\alpha$ ” para 5 pruebas distintas.

**Figura 103**

*Plataforma de pruebas 1*



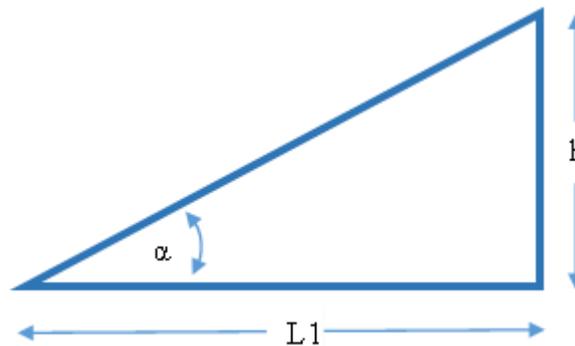
Las pruebas se las realizaran para las 5 combinaciones de ángulo y altura:

- $L1=48\text{cm}$  (distancia longitudinal del robot)
- $\alpha=20^\circ$ ,  $h=16\text{cm}$

- $\alpha_2=30^\circ$ ,  $h_2=23\text{cm}$
- $\alpha_3=40^\circ$ ,  $h_3=30\text{cm}$
- $\alpha_4=50^\circ$ ,  $h_1=36\text{cm}$
- $\alpha_5=60^\circ$ ,  $h_1=42\text{cm}$

Con el fin de acercarnos más a las condiciones de funcionamiento se realizará pruebas para ángulos variables con alturas menores al radio de la llanta, pero con una distancia constante  $L_1 = 15\text{cm}$  mientras que las dimensiones variables serían el ángulo " $\alpha$ " y la altura " $h$ ".

**Figura 104**  
Plataforma de pruebas 2



- $\alpha_1=40^\circ$ ,  $h_1=15\text{cm}$
- $\alpha_2=35^\circ$ ,  $h_2=12\text{cm}$
- $\alpha_3=30^\circ$ ,  $h_3=10\text{cm}$
- $\alpha_4=25^\circ$ ,  $h_4=8\text{cm}$
- $\alpha_5=20^\circ$ ,  $h_5=5\text{cm}$

#### **Altura de obstáculos**

Para esta prueba se realiza obstáculos sin inclinación (Figura 105) para 5 alturas diferentes.

**Figura 105**  
Plataforma de pruebas 3



- $h_1=5\text{cm}$
- $h_2=8\text{cm}$
- $h_3=10\text{cm}$
- $h_4=12\text{cm}$
- $h_5=15\text{cm}$

**Funcionamiento en terreno con inclinaciones independientes**

Con el fin de comprobar el funcionamiento del diferencial se realizará pruebas con inclinaciones y alturas independientes para cada llanta, basándonos en la Tabla 43.

**Tabla 43**

*Métricas de evaluación para inclinaciones independientes para cada rueda*

Rueda izquierda	Rueda derecha
$\alpha_1=20^\circ$ , $h_1=16\text{cm}$	$\alpha_2=35^\circ$ , $h_2=12\text{cm}$
$\alpha_3=30^\circ$ , $h_3=10\text{cm}$	$\alpha_2=30^\circ$ , $h_2=23\text{cm}$
$\alpha_4=25^\circ$ , $h_4=8\text{cm}$	$h_3=10\text{cm}$
$h_3=10\text{cm}$	$\alpha_5=20^\circ$ , $h_5=5\text{cm}$
$\alpha_4=50^\circ$ , $h_1=36\text{cm}$	$\alpha_1=40^\circ$ , $h_1=15\text{cm}$

### ***Autonomía Energética***

Indicará el tiempo máximo de autonomía (calculado a máxima potencia de 0.5h) en el cual el robot puede estar en funcionamiento de forma continua.

### ***Velocidades máximas***

Sabiendo que las ruedas sin ninguna carga alcanzan una velocidad lineal de 6.597m/s (Ecuación 3) y la velocidad requerida es de 2m/s la cual forma parte de los requerimientos (Tabla 3). Se debe aclarar que mediante programación se hizo una restricción para que la velocidad lineal no supere este límite, también se otorgó de 10 niveles de velocidad los cuales se probarán en un recorrido de 4m, para esto se tomará el tiempo que se demore en recorrer esta distancia con el fin de encontrar la velocidad lineal real en cada nivel de velocidad.

### **Diseño del Experimento**

Las pruebas se realizaron en interiores bajo un ambiente controlado, para esto se establece una longitud constante desde el robot hasta el inicio del obstáculo  $L=40\text{cm}$ , también se mantiene una velocidad constante  $V=0.3\text{m/s}$  tomando en cuenta que el robot a esa velocidad mantiene su máximo torque. Todas las pruebas mencionadas anteriormente se realizaron manteniendo estas condiciones, y se realizó 3 pruebas para cada caso.

Los obstáculos se los elaboro en madera MDF, mientras que el piso es de cerámica de textura dura sin presencia de agua ni tierra suelta.

**Figura 106**  
Diseño del experimento



## Resultados

### *Inclinación del piso*

Para inclinaciones con ángulos variables y alturas mayores al radio de llanta, se pudo observar que el robot funcionó de manera normal hasta los 40° de inclinación, a partir de esta inclinación al robot le costó trabajo llegar al final de la trayectoria y empezó a girar sobre el eje de la rueda trasera poniéndose de cabeza.

**Tabla 44**

*Resultados para ángulos variables con alturas mayores al radio de la llanta*

Angulo [°]	Altura [cm]	Resultado
20	16	Cumple
30	23	Cumple
40	30	Cumple
50	36	No Cumple
60	42	No cumple

Las pruebas realizadas en ángulos variables, pero con alturas menores al radio de llanta el robot no tuvo problema en cumplir todas las pruebas, llegando a superar el radio de llanta con alturas de hasta 15cm con una inclinación de 40°.

**Tabla 45**

*Resultados para ángulos variables con alturas menores al radio de la llanta*

Angulo [°]	Altura [cm]	Resultado
20	5	Cumple
25	8	Cumple
30	10	Cumple
5	12	Cumple
40	15	Cumple

### **Altura de obstáculos**

El segundo tipo de obstáculo en donde no cuenta con ninguna inclinación, pero varia la altura, el robot supero la prueba de los 8 cm. Mientras que para la altura de 10cm tuvo problemas ya que solo logro cumplir 1 de los 3 intentos.

**Tabla 46**

*Resultados para obstáculos con altura variable*

Altura [cm]	Resultado
5	Cumple
8	Cumple
10	No cumple
12	No cumple
15	No cumple

### ***Funcionamiento en terreno con inclinaciones independientes***

En esta práctica el robot cumplió con 4 de las 5 pruebas propuestas (Tabla 47) lo que, valida el funcionamiento del diferencial, tomando en cuenta que la prueba que se le da por fallida tiene ángulos y alturas altas y que por la geometría del robot no pudo ser superada.

**Tabla 47**

*Resultado para terreno con inclinaciones independientes para cada rueda*

<b>Rueda Izquierda</b>		<b>Rueda derecha</b>		<b>Resultado</b>
<b>Angulo [°]</b>	<b>Altura [cm]</b>	<b>Angulo [°]</b>	<b>Altura [cm]</b>	
20	16	35	12	Cumple
30	10	30	23	Cumple
25	8		10	Cumple
	10	20	5	Cumple
50	36	40	15	No cumple

### ***Autonomía Energética***

Baterías fueron seleccionadas para una autonomía de 30 min, pero varía dependiendo de las condiciones del terreno y la velocidad de del robot. En la Tabla 48 se muestra los resultados para pruebas de duración de cada batería obtenidos en terreno regular de hormigón y a una velocidad de 0.1 a 0.2m/s.

**Tabla 48**

Resultados de autonomía energética para cada batería

Batería	Duración [min]
Power Bank BOMT	240
Zeee Power 14.8V	90
Zeee Power 14.8V	100

**Velocidades máximas**

Para obtener la velocidad lineal real del robot se tomó 4 tiempos para cada nivel de velocidad, teniendo como constante la distancia de recorrido de 4m obteniendo las velocidades como se observa en la Tabla 49. Obteniendo como resultado que la velocidad lineal máxima real en el 10mo nivel es de 1.88m/s velocidad cercana a la planteada de 2m/s

**Tabla 49**

Velocidad para cada nivel de velocidad

Niveles de velocidad	Tiempo [s]	Tiempo promedio [s]	Velocidad [m/s]
<b>1</b>	12,5	12,23	0,33
	11,7		
	12,8		
	11,9		
<b>2</b>	10,9	11,33	0,35
	11,1		
	11,8		
	11,5		
<b>3</b>	9,8	10,13	0,40
	10,5		
	9,9		
	10,3		
<b>4</b>	8,5	8,48	0,47
	9,4		
	8,1		
	7,9		

Niveles de velocidad	Tiempo [s]	Tiempo promedio [s]	Velocidad [m/s]
5	8,5	7,88	0,51
	8,2		
	7,3		
	7,5		
6	6,4	6,18	0,65
	5,7		
	6,8		
	5,8		
7	5,2	5,90	0,68
	6,7		
	6,8		
	4,9		
8	4,3	4,63	0,86
	5,2		
	4,2		
	4,8		
9	2,9	3,55	1,13
	3,4		
	3,8		
	4,1		
10	1,9	2,13	1,88
	2,3		
	2,5		
	1,8		

### ***Funcionamiento dado la vuelta***

Tomando en cuenta que el diámetro de llantas es mayor al ancho del cuerpo del robot y después de pruebas de funcionamiento en ambos lados del robot, se observó el correcto funcionamiento del robot, también se observó que el diferencial funciona correctamente en ambos sentidos del robot.

## Discusión

El robot cumple con el objetivo de funcionar en distintos terrenos ya que el labrado de las llantas, el sistema de suspensión y los motores permiten que se desplace sin presentar ningún tipo de percance estructural ni electrónico.

El sistema de suspensión permite que el robot alcance inclinaciones de hasta 40° en las condiciones propuestas en el experimento, puede alcanzar inclinaciones mayores en terrenos con mayor rugosidad y si el robot va a mayor velocidad. En el caso de superar gradas posee una deficiencia ya que se lo probó en otros ambientes y no pudo sobrepasar la altura alcanzada en el experimento.

El robot puede funcionar de manera invertida debido a que el diseño es simétrico tanto de arriba como de abajo, esto facilita la operación ya que si el terreno o algún factor externo llega a voltear al robot este puede seguir funcionando con normalidad.

En el caso de la carcasa, está diseñada para proteger la electrónica del robot de agentes externos, sin embargo, no es capaz de repeler polvo ni agua ya que no cuenta con ningún sistema de impermeabilización, debido a esto no se recomienda que el robot sea usado en lluvia ni en terrenos mojados.

En el caso de la teleoperación el robot cumple su funcionamiento bajo condiciones controladas, mientras que condiciones ambientales normales el robot presenta deficiencias producidas por la temperatura, humedad y por la propia estructura del robot. Se recalca que se obtuvo un mejor rendimiento usando el control inalámbrico bluetooth ya que cuando se usó el computador se observó más retraso en la comunicación, principalmente en la transmisión de video.

## Capítulo 6 conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

- Se desarrollo un prototipo de robot móvil multi terreno con un sistema mecánico robusto que le permite la exploración de entornos de alto riesgo, además posee un sistema electrónico confiable que permite tener una comunicación en tiempo real con el operario.
- Se implemento un sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas, este presento un excelente desempeño ya que es más compacto que el diseño de 6 ruedas, lo que le permite ser más ágil para movilizarse en terrenos de difícil acceso o de alto riesgo.
- Se realizó pruebas de funcionamiento del mecanismo Rocker-Bogie mediante distintos experimentos que comprobaron su efectividad, lo que da paso para escalar el prototipo a otro tipo de robots con aplicaciones más específicas.
- Se implemento dos tipos de teleoperación, gracias a que se utilizó la tarjeta de control Rasberry Pi 3+ la cual cuenta con conexión vía Bluetooth y conexión vía Wifi, lo que le brinda más robustez al sistema de teleoperación.
- Se implemento una HMI que funciona mediante conexión Wifi en la que se puede controlar el robot y observar las tomas de video captadas por la cámara, esto es útil en la inspección de lugares de alto riesgo.
- La parte mecánica se manufacturo las piezas del robot utilizando materiales como aluminio, acero inoxidable, duralón y PLA de acuerdo con criterios de peso, resistencia, durabilidad y costos, otorgando al prototipo robustez para poder cumplir a altas exigencias en terrenos de alto riesgo y cumpliendo con características de peso y costo.

- Se selecciono un sistema electrónico confiable que en sinergia con el control implementado garantiza el pleno funcionamiento del prototipo en todas las pruebas realizadas, obteniendo excelentes resultados.

### **Recomendaciones**

- En la parte mecánica se recomienda analizar la posibilidad de aligerar el peso del robot mediante el uso de plásticos compuestos o materiales más livianos sin descuidar las piezas donde se concentra máximos esfuerzo, con la finalidad de otorgarle más movilidad y facilidad para darse la vuelta.
- Para un futuro trabajo se recomienda el uso de motores en las cuatro ruedas lo que facilitaría la movilidad y evitaría el uso de un sistema de transmisión de movimiento de una ruada a la otra, reduciendo así la complejidad mecánica en cuanto a manufactura y ensamblaje.
- Se recomienda realizar unas carcasas que aíslen la parte electrónica del exterior evitando que ingresen partículas de polvo o agua la que pueden dañar e interrumpen el funcionamiento del robot, otorgando así fiabilidad para pruebas en terrenos complicados.
- Gracias a que el prototipo cuenta con cámara y un sensor inercial se recomienda implementar un sistema de auto navegación con visión artificial, lo que brindaría al robot más autonomía ampliando el campo de aplicación de este.
- En futuros trabajos se recomienda implementar un algoritmo que detecte si el robot esta dado la vuelta y modifique la orientación de los controles en los mandos de control, para esto se puede utilizar el sensor inercial que posee el robot.

### Bibliografía

- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2012). Compensación de los efectos generados en la imagen por el control de navegación del robot Aibo ERS 7. *VII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2012). Compensación y aprendizaje de efectos generados en la imagen durante el desplazamiento de un robot. *X Simposio CEA de Ingeniería de Control*, (págs. 165-170).
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2013). Estabilización robusta de vídeo basada en diferencia de nivel de gris. *VIII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*.
- Aguilar, W. G., Albán, P., Cruz, H., Tiuna, A., & Figueroa, J. (2020). Low cost multitask mobile robot for military application. En *XV Multidisciplinary International Congress on Science and Technology* (págs. 462-473).
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Costa-Castello, R. (2017). Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 287-297).
- Aguilar, W. G., Asimbaya, I., Albán, P., & Fernández, Y. (2020). Ackermann UGV with 2D Mapping for Unknown Environments. En *International Conference of Research Applied to Defense and Security* (págs. 45-53).
- Aguilar, W. G., Casaliglla, V. P., & Pólit, J. L. (2017). Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles. *Electronics*, 6(1), 10.
- Aguilar, W. G., Cobeña, B., Rodríguez, G., Salcedo, V. S., & Collaguazo, B. (2018). SVM and RGB-D Sensor Based Gesture Recognition for UAV Control. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 713-719). Springer.

- Aguilar, W. G., Limaico, A., Villegas-Pico, M., & Asimbaya, I. (2019). Path planning based navigation using LIDAR for an Ackerman unmanned ground vehicle. En *International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (págs. 399-410).
- Aguilar, W. G., Manosalvas, J. F., Guillén, J. A., & Collaguazo, B. (2018). Robust Motion Estimation Based on Multiple Monocular Camera for Indoor Autonomous Navigation of Micro Aerial Vehicle. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 547-561). Springer.
- Aguilar, W. G., Merizalde, D., Calderón, M., & Carrera, A. (2020). Monte Carlo-Based Localization for Kidnapped Robot Problem. En *International Conference of Research Applied to Defense and Security* (págs. 101-109).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 298-308).
- Alabart, S. D. (2018). *Robots y responsabilidad civil*. Reus.
- Alatise, M. B. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access*, 39830-39846.
- Alfredo, O. S. (2007). Robot Móvil Todo Terreno. *Congreso Nacional de Mecatrónica, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí*.
- Alotaibi, A. M. (2013). Modeling and Motion Control Selection and Design of Electric Motor for Mechatronics Robotics Applications. *International journal of control, automation and systems*,.

- Amaguaña, F., Collaguazo, B., Tituaña, J., & Aguilar, W. G. (2018). Simulation System Based on Augmented Reality for Optimization of Training Tactics on Military Operations. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 394-403). Springer.
- Andrea, C. C., Byron, J. Q., Jorge, P. I., Inti, T. C., & Aguilar, W. G. (2018). Geolocation and Counting of People with Aerial Thermal Imaging for Rescue Purposes. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 171-182). Springer.
- Arduino. (2021). *Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/main/products>
- Bambino, I. (2008). *Una introducción a los robots móviles*. Obtenido de [http://www.aadeca.org/pdf/CP\\_monografias/monografia\\_robot\\_movil.pdf](http://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf).
- Baño Azcón, A., & Oller Pujol, A. (2003). Análisis y diseño del control de posición de un robot móvil de tracción diferencial. *Inginyeria en Automática i Electrónica industrial*, 81.
- Basantes, J., Godoy, L., Carvajal, T., Castro, R., Toulkeridis, T., Fuertes, W., . . . Addison, A. (2018). Capture and processing of geospatial data with laser scanner system for 3D modeling and virtual reality of Amazonian Caves. *IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. Samborondón, Ecuador.
- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo.
- Bellido outeiriño, F., & De la Cruz Fernandez, J. L. (2004). Comunicación Inalambrica con Bluetooth. *Técnica Industrial Especial Electricidad y Electrónica*.
- Boldea, I. (2004). Linear electromagnetic actuators and their control: A review. *EPE Journal*, 43-50.
- Cabras, P., Rosell, J., Pérez, A., Aguilar, W. G., & Rosell, A. (2011). Haptic-based navigation for the virtual bronchoscopy. *18th IFAC World Congress*. Milano, Italy.

- Cadena, C. D. (2016). Multi-modal Auto-Encoders as Joint Estimators for Robotics Scene Understanding. *Robotics: Science and systems*.
- Caiza, O., Aguilar, W. G., Albán, P., & Fernández, Y. (2020). Kinect and Manipulator-Based Sample Collection System for Military Robot. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 75-87).
- Calderón, M., Aguilar, W. G., & Merizalde, D. (2020). Visual-Based Real-Time Detection Using Neural Networks and Micro-UAVs for Military Operations. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 55-64).
- Chen, J. Y.-S. (2010). Supervisory control of multiple robots: Human-performance issues and user-interface design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(4), 435-454.
- Chinchkar, D. G. (2017). Design of rocker bogie mechanism. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 46-50.
- Chinchkar, D. G. (2017). Design of rocker bogie mechanism. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 46-50.
- Chung, H. O. (2001). Sensor fusion for mobile robot dead-reckoning with a precision-calibrated fiber optic gyroscope. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3588-3593.
- Chung, J. H. (2003). The dynamic modeling and analysis for an omnidirectional mobile robot with three caster wheels. In *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 521-527.

CICTE. (10 de 2019). *cicte.espe.edu.ec*. Obtenido de <https://cicte.espe.edu.ec/filosofia/>

Creus Solé , A. (2011). *Instrumentación industrial*. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

D. Harrington, B., & Voorhees, C. (2004). The Challenges of Designing the Rocker-Bogie Suspension.

Doroftei, I. G. (2007). *Omnidirectional mobile robot-design and implementation* . London, UK: INTECH Open Access Publisher.

Esser, P. D. (2009). IMU: inertial sensing of vertical CoM movement. *Journal of biomechanics*, 42(10), 1578-1581.

Ferre, M. A. (2007). *Advances in telerobotics (Vol. 31)*. Berlin, Germany: Springer.

Fields, L. (2016). Comparación de sistemas de comunicación inalámbrica para robots móviles. *Revista Prisma Tecnológico*, 22-24.

Galarza, J., Pérez, E., Serrano, E., Tapia, A., & Aguilar, W. G. (2018). Pose estimation based on monocular visual odometry and lane detection for intelligent vehicles. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 562-566).

Galindo, R., Aguilar, W. G., & Reyes Ch, R. P. (2019). Landmark based eye ratio estimation for driver fatigue detection. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 565-576). Germany: Springer.

Garawi, S. I.-R. (2006). 3G wireless communications for mobile robotic tele-ultrasonography systems. *IEEE Communications Magazine*, 44(4), 91-96.

García S., I., & Caranqui S., V. (2015). La Visión Artificial y los Campos de Aplicación. *TIERRA INFINITA N°*

- Gates. (2015). *Gates*. Obtenido de [gates.com/pdf/Catalogo%20PTI](https://www.gates.com/pdf/Catalogo%20PTI)
- Gonzalez, A. G. (2017). Supervisory control-based navigation architecture: a new framework for autonomous robots in industry 4.0 environments. . *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1732-1743.
- Grijalva, S., & Aguilar, W. G. (2019). Landmark-Based Virtual Path Estimation for Assisted UAV FPV Tele-Operation with Augmented Reality. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 688-700).
- Grijalva, S., Cueva, G., Ramírez, D., & Aguilar, W. G. (2019). HSVM-Based Human Activity Recognition Using Smartphones. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 217-228).
- Halfacree, G. (2020). *The official Raspberry Pi Beginner's Guide*. Raspberry Pi Trading Ltd.
- Hoon Kim, S. (2017). *Electric Motor Control*. Elsevier.
- Hosseini, S. H. (2013). Fractional-order reset control: Application to a servomotor. *Mechatronics*, 781-788.
- Hunter, I. W. (1991). A comparative analysis of actuator technologies for robotics. *Robotics Review*, 299-342.
- IEEE . (2020). *IEEE 802.11-1999 - Estándar para tecnología de la información - Telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas - Redes de área local y metropolitana - Requisitos específicos - Parte 11: Especificaciones de control de acceso al medio (MAC)*.
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Mesías, R., Araujo-Villaroel, B., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). Interface of Optimal Electro-Optical/Infrared for Unmanned Aerial Vehicles. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 372-380).

- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Tozer, T., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). E-services from Emergency Communication Network: Aerial Platform Evaluation. *International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)* (págs. 251-256). IEEE.
- Keir, M. S. (2007). Accelerometer-based orientation sensing for head tracking in AR & robotics.
- Kim, M. &. (2008). Direction sensing RFID reader for mobile robot navigation. . *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 6(1), 44-54.
- KumarSaha, S. (2010). *Introducción a la robótica*. McGraw-Hill Interamericana.
- Lazarin, N. M. (2015). Lazarin, Nilson Mori, and Carlos Eduardo Pantoja. "A robotic-agent platform for embedding software agents using raspberry pi and arduino boards. *9th Software Agents, Environments and Applications School*, 13-20.
- Lee, H. J. (2006). Localization of mobile robot based on radio frequency identification devices. *In 2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 5934-5939.
- Liu, G. G. (2004). Precise slow motion control of a direct-drive robot arm with velocity estimation and friction compensation. *Mechatronics*, 14(7), 821-834.
- Luo, R. C. (2000). Development of a multi-behavior based mobile robot for remote supervisory control through the Internet. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 5(4), 376-385.
- Mandado Pérez, E. (2007). *Microcontroladores PIC: sistema integrado para el autoaprendizaje*.
- Martínez, J. S. (2008). Multifunction all-terrain mobile robot iwvan: design and first prototype. . *In 2nd Israeli Conference on Robotics*.

- Martínez-Clark, R. C.-H.-J.-D. (2018). Control algorithms for the emergence of self-organized behaviours in swarms of differential-traction wheeled mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Maulana, E. M. (2015). Inverse kinematic implementation of four-wheels mecanum drive mobile robot using stepper motors. *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, 51-56.
- Mecafenix. (18 de 04 de 2017). *Ingeniería Mecafenix*. Obtenido de <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/>
- Merizalde, D., Aguilar, W. G., & Calderón, M. (2020). Autonomous Navigation Based on Proportional Controller with GPS Setpoint for UAV in External Environments. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 89-99).
- MinebeaMitsumi. (2021). *minebeamitsumi*. Obtenido de <https://www.minebeamitsumi.com/english/strengths/column/resolver/>
- Miranda, J. C. (25 de 05 de 2015). *APUNTES DE INGENIERIA MECANICA*. Obtenido de <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2015/05/titulo-friccion-subtitulo-friccion-por.html>
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México DF: Pearson Educacion.
- Muller, N. (2002). *Tecnología bluetooth*. McGraw-Hill .
- Navarro, R. C. (2004). *Ingeniería de control*. McGraw Hill.
- Neto, H. V. (2009). Mobile robotics as a tool for teaching and learning embedded systems design. . *Towards Autonomous Robotics Systems*,, 268-274.

- Nukulwuthiopas, W. L. (2002). Dynamic modeling of a one-wheel robot by using Kane's method. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 524-529.
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., León, G., & Jara-Olmedo, A. (2017). Math Model of UAV Multi Rotor Prototype with Fixed Wing Aerodynamic Structure for a Flight Simulator. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 199-211).
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., Reyes, R. P., & Montoya, L. (2017). Vertical take off and landing with fixed rotor. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- P. Miller, D., & Lee, T.-L. (2002). High-Speed Traversal of Rough Terrain Using a.
- Pardo, J. A., Aguilar, W. G., & Toulkeridis, T. (2017). Wireless communication system for the transmission of thermal images from a UAV. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Pollard, B. &. (2016). An aquatic robot propelled by an internal rotor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,, 931-939.
- Prasanga, D. K. (2013). Compensation of backlash for teleoperated geared motor drive systems. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* , 4067-4072.
- Qian, J. Z. (2017). The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system. *Sensors*, 17(9),.
- Quere, G. H. (2020). Shared control templates for assistive robotics. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1956-1962.

- Ratner, D. &. (1999). Dynamics of the Titan four-wheel drive mobile robot with floating Ackerman steering. *ACRA* , 144-149.
- Resnick, R., Halliday, D., & S., K. K. (2001). *Física Vol.1*. México: Compañía Editorial Continental .
- Reyes Cortés , F. (2011). *Robótica Control de robots manipuladores* . México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Safaric, R. D. (2001). Telerobotics experiments via internet. *IEEE transactions on industrial electronics*, 48(2), 424-431.
- Salcedo, V. S., Aguilar, W. G., Cobeña, B., Pardo, J. A., & Zahira, P. (2018). On-board target virtualization using image features for UAV autonomous tracking. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 384-391).
- Sandin, P. (2003). *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. New York : McGraw-Hill.
- Segarra, D., Caballeros, J., Aguilar, W. G., Samà, A., & Rodríguez-Martín, D. (2019). Orientation Estimation Using Filter-Based Inertial Data Fusion for Posture Recognition. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 220-233).
- Shabalina, K. S. (2018). Comparative analysis of mobile robot wheels design. In *2018 11th International Conference on Developments in esystems Engineering (dese)*, 175-179.
- Shabalina, K. S. (2018). Comparative analysis of mobile robot wheels design. *11th International Conference on Developments in esystems Engineering*, 175-179.
- Siciliano , B., & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics* . Berlin: Springer-Verlag.

- Slawiński, E. P. (2010). Experiencias en teleoperación bilateral de robots. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 29-38.
- Song, J. B. (2004). Design and control of an omnidirectional mobile robot with steerable omnidirectional wheels. *Journal of Robotic Systems*, 193-208.
- Sotelo, V. R. (2007). Robots móviles: Evolución y estado del arte. *Polibits*, 12-17.
- Stefek, A. V. (2020). Energy comparison of controllers used for a differential drive wheeled mobile robot. *IEEE Access*, 8,, 170915-170927.
- Stefek, A. V. (2020). Energy comparison of controllers used for a differential drive wheeled mobile robot. *IEEE Access*, 8,, 170915-170927.
- Tenezaca, D., Canchignia, C., Aguilar, W. G., & Mendoza, D. (2019). Implementation of Dubin Curves-Based RRT\* Using an Aerial Image for the Determination of Obstacles and Path Planning to Avoid Them During Displacement of the Mobile Robot. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 205-215).
- Torres, E. O. (2014). Study of wheel slip and traction forces in differential drive robots and slip avoidance control strategy. In *2014 American Control Conference*, 3231-3236.
- Torres, F. C.-H. (2002). *Laboratorio virtual remoto para la enseñanza de robótica*.
- Tosun, T. E. (2017). Paintpots: Low cost, accurate, highly customizable potentiometers for position sensing. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1212-1218.
- Valdes, F., & Pallás Areny, R. (2007). *Microcontroladores Fundamentos y Aplicaciones con PIC*.

- Yacuzzi, E., & Martín, F. (2003). QFD: conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos. *Econstor Make Your Publications Visible*.
- Yang, Y. N. (2000). Evaluating robotic safety using quality function deployment. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 1(2-3), 241-256.
- Zhang, P. G. (2016). Study on control schemes of flexible steering system of a multi-axle all-wheel-steering robot. *Study on control schemes of flexible steering system of a multi-axle all-wheel-steering robot*.
- Zhao, J. H. (2021). Design and Research of All-Terrain Wheel-Legged Robot. *Sensors*.
- Zurita, M., Aguilar, W. G., & Enríquez, V. (2019). Toward the Development of Surveillance and Reconnaissance Capacity in Ecuador: Geolocation System for Ground Targets Based on an Electro-Optical Sensor. En *Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 123-133).

## Apéndices