



**Diseño y construcción de un robot hexápodo todo terreno con geolocalización**

**“R-Hex”**

Pazmiño España, Luis Alejandro

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

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

Dr. Aguilar Castillo, Wilbert Geovanny

22 de febrero del 2023

# TesisPazmiño

< 1% **Similitudes** ○
< 1% **Texto entre comillas**  
 0% similitudes entre comillas  
0% **Idioma no reconocido**

Nombre del documento: TesisPazmiño.pdf  
 ID del documento: c8c5a2422d4e44ae1caa6c92982c10fb62e53d63  
 Tamaño del documento original: 2,33 Mo

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE  
 Fecha de depósito: 27/2/2023  
 Tipo de carga: interface  
 fecha de fin de análisis: 27/2/2023

Número de palabras: 16.466  
 Número de caracteres: 103.854

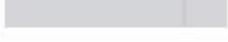
Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuente principal detectada

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/25184/5/T-ESPE-044580.pdf.txt">repositorio.espe.edu.ec   Sistema de patrullaje de drones para detección de person...</a> <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/25184/5/T-ESPE-044580.pdf.txt">http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/25184/5/T-ESPE-044580.pdf.txt</a> 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (41 palabras)

## Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/23661/5/T-ESPE-044250.pdf.txt">repositorio.espe.edu.ec   Reconocimiento de gestos corporales basado en SVM e im...</a> <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/23661/5/T-ESPE-044250.pdf.txt">http://repositorio.espe.edu.ec/8080/w/bitstream/21000/23661/5/T-ESPE-044250.pdf.txt</a>	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (29 palabras)
2	 <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25303">repositorio.espe.edu.ec   Sistema de monitoreo de frecuencia respiratoria por medi...</a> <a href="http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25303">http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25303</a>	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (26 palabras)
3	 <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/123456789/5727/1/51028_1.pdf">localhost   Diseño y construcción de un coche para transferencia de personas con di...</a> <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/123456789/5727/1/51028_1.pdf">http://localhost:8080/xmlui/bitstream/123456789/5727/1/51028_1.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (20 palabras)
4	 <a href="https://documentop.com/diseo-y-construccion-de-una-mano-robot-activada-por-seales-_598a501b172...">documentop.com   Diseño y construcción de una mano robot activada por señales ....</a> <a href="https://documentop.com/diseo-y-construccion-de-una-mano-robot-activada-por-seales-_598a501b172...">https://documentop.com/diseo-y-construccion-de-una-mano-robot-activada-por-seales-_598a501b172...</a>	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)
5	 <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/317/8562/3/T-UCSG-PRE-TEC-ITEU-229.pdf.txt">localhost   Diseño de una red con tecnología laser inalámbrica para el campus de la...</a> <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/317/8562/3/T-UCSG-PRE-TEC-ITEU-229.pdf.txt">http://localhost:8080/xmlui/bitstream/317/8562/3/T-UCSG-PRE-TEC-ITEU-229.pdf.txt</a>	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)



WILBERT GEOVANNY  
 AGUILAR CASTILLO



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

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación "**Diseño y construcción de un robot hexápodo todo terreno con geolocalización "R-Hex"**", fue realizado por el señor **Pazmiño España Luis Alejandro**, el mismo cumple con los requisitos 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 lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 27 de Febrero del 2023**



**WILBERT GEOVANNY  
AGUILAR CASTILLO**

---

**Dr. Aguilar Castillo Wilbert Geovanny**

C.C. 0703844696



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

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Pazmiño España Luis Alejandro**, con cédula de ciudadanía n° 1723951073 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Diseño y construcción de un robot hexápodo todo terreno con geolocalización "R-Hex"**", 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, 20 de Febrero del 2023**

Firma

**Pazmiño España Luis Alejandro**

C.C: 1723951073



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

**Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

**Autorización de Publicación**

Yo, **Pazmiño España Luis Alejandro**, con cedula de ciudadanía n° 1723951073 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "**Diseño y construcción de un robot hexápodo todo terreno con geolocalización "R-Hex"**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 20 de Febrero del 2023**

Firma

**Pazmiño España Luis Alejandro**

C.C: 1723951073

### **Dedicatoria**

El presente trabajo lo dedico, primeramente a Dios por darme la guía para lograr alcanzar las metas y objetivos propuestos, a mi madre que ha sido un pilar fundamental durante toda mi vida, siempre apoyándome y corrigiéndome cuando lo he necesitado; a mis hermanas por estar siempre a mi lado enfrentando los momentos difíciles y darme la fuerza para seguir adelante, a mis amigos que siempre han sabido darme palabras de incentivo y ayudarme a ver las cosas desde otra perspectiva y a una persona especial que me ha sabido enseñar que aunque las cosas se pongan difíciles siempre habrá una manera de encontrar una solución.

**Luis Alejandro Pazmiño España**

## Agradecimientos

A Dios por haberme guiado en cada una de las decisiones que he tomado y brindarme bienestar para avanzar durante esta etapa tan importante en mi vida.

A mi madre Alba Cecilia por todo el apoyo brindado, por demostrarme que siempre el querer es poder, por enseñarme y demostrarme con su ejemplo que los límites me los pongo yo, por la paciencia que me ha tenido y los consejos que me ha brindado durante toda mi vida.

A mis hermanas Gaby y Majo por su apoyo y ayuda incondicional, por las horas que me brindaban ayudándome a seguir adelante, por demostrarme que siempre se puede llegar un poco más lejos con la compañía indicada.

A mis amigos Diego, Paúl, Kathy y todos los que han pasado por mi vida dejando una enseñanza y dejando su marca en ella.

A Iván que me ha inculcado la disciplina, la amabilidad, el perdón, la importancia de la amistad y el valor que tiene la gente sin importar su estatus social; por brindarme muchos recuerdos y anécdotas que las llevaré conmigo para toda la vida.

A Adriana quien siempre ha estado pendiente de mí, impulsándome a avanzar y enseñándome que las mejores personas no son las que siempre están presentes a tu lado sino las que a pesar de la distancia se siguen preocupando por verte cumplir tus sueños.

A Erika por ayudarme a ver que no es necesario conocer a alguien muchísimo tiempo para que se vuelva especial y que a pesar de los conflictos que se pueda tener, si el cariño es sincero todo se vuelve más llevadero.

A los ingenieros David Loza, Byron Cortez, Jaime Echeverría y al doctor Wilbert Aguilar, quienes siempre estaban dispuestos a brindarnos su ayuda y conocimiento de la mejor manera posible, todo con la finalidad de que mejoremos día a día.

Al ingeniero Roberty Velasco y el Sr. Nelson Cárdenas por su apoyo incondicional y su apoyo durante toda la carrera.

A la abogada María Fernanda Jaramillo por su ayuda, paciencia y guía, razones por las que se me permite estar culminando esta etapa, misma que sin su tutela hubiera sido casi imposible llevarla a cabo.

Y finalmente a mis compañeros de carrera que de una u otra forma logramos cimentar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera llevando con nosotros muchas experiencias, algunas buenas otras malas, pero de todas hemos logrado sacar una enseñanza que estoy seguro en un futuro nos ayudaran a avanzar.

**Luis Alejandro Pazmiño España**

## Índice de Contenido

Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos .....	7
Resumen .....	18
Abstract.....	20
Capítulo 1 – Generalidades.....	22
Introducción.....	22
Justificación e importancia .....	23
Área de influencia .....	24
Objetivos .....	25
Objetivo General.....	25
Objetivos Específicos .....	25
Alcance del Proyecto.....	25
Estructura del documento .....	26
Capítulo 2 – Estado del arte.....	28
Locomoción de sistemas robóticos.....	28

	10
Prototipos de robots tele operados.....	48
Prototipos del robot hexápodo “R - HEX”.....	56
Componentes del robot RHEX. ....	60
Componentes mecánicos.....	60
Componentes electrónicos/eléctricos.....	62
Componentes del subsistema de control.....	63
Movimiento del robot “R-HEX” y funcionamiento del robot. ....	65
Modos de comunicación.....	68
Sistema de comunicación por cable.....	70
Sistema de comunicación por Ultrasonido.....	72
Sistema de comunicación por luz infrarroja.....	73
Sistema de comunicación por Bluetooth.....	77
Sistema de comunicación por Wi-Fi.....	78
Sistema de comunicación ZigBee.....	80
Geolocalización de dispositivos. ....	82
Capítulo 3 – Diseño Mecatrónico.....	85
Requerimientos de ingeniería.....	85
Requerimiento principal.....	85
Funciones.....	85
Requisitos de confiabilidad.....	86

Requisitos de seguridad.....	86
Requisitos de costos de desarrollo y fabricación.....	86
Especificación.....	87
Diseño del subsistema mecánico.....	89
Diseño estructural interno y externo.....	90
Selección de motores.....	100
Diseño del subsistema electrónico.....	101
Tarjeta principal:.....	101
Tarjeta de control de motores:.....	102
Alimentación del sistema:.....	102
Diseño del subsistema de control.....	103
Interfaz HMI:.....	103
Capítulo 4 – Integración y Validación.....	106
Integración estructural.....	106
Integración de dispositivos sensoriales.....	108
Integración del subsistema eléctrico.....	110
Integración del subsistema control.....	111
Pruebas y resultados de los subsistemas.....	114
Subsistema mecánico:.....	114
Subsistema electrónico:.....	115

Subsistema control: .....	116
Pruebas y resultados del prototipo .....	119
Conclusiones y recomendaciones.....	125
Conclusiones .....	125
Recomendaciones.....	126
Bibliografía .....	127
Apéndices.....	145

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Desempeño de sistemas de locomoción en diferentes terrenos de prueba</i> .....	32
<b>Tabla 2.</b> <i>Clasificación de la luz de acuerdo a la longitud de onda</i> .....	74
<b>Tabla 3.</b> <i>Clasificación de los dispositivos bluetooth de acuerdo a su potencia máxima y su alcance</i> .....	77
<b>Tabla 4.</b> <i>Análisis de tensiones de Von Mises de la pata del robot “R-Hex”</i> .....	94
<b>Tabla 5.</b> <i>Análisis de desplazamientos resultantes de la pata del robot “R-Hex”</i> .....	95
<b>Tabla 6.</b> <i>Análisis de deformación unitarias equivalentes de la pata del robot “R-Hex”</i> .....	96
<b>Tabla 7.</b> <i>Análisis de tensión de von Mises de la viga en C del robot “R-Hex”</i> .....	97
<b>Tabla 8.</b> <i>Análisis de desplazamientos resultantes de la viga en C del robot “R-Hex”</i> .....	98
<b>Tabla 9.</b> <i>Análisis de deformaciones unitarias equivalentes de la viga en C del robot “R-Hex”</i> .....	99
<b>Tabla 10.</b> <i>Pines de conexión de la tarjeta</i> .....	102
<b>Tabla 11.</b> <i>Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos</i> .....	121
<b>Tabla 12.</b> <i>Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)</i> .....	122
<b>Tabla 13.</b> <i>Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)</i> .....	123
<b>Tabla 14.</b> <i>Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)</i> .....	124

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Clasificación de tipos de locomoción</i> .....	30
<b>Figura 2.</b> <i>Fortalezas y debilidades de los robots según su tipo de locomoción</i> .....	31
<b>Figura 3.</b> <i>Simulación de movimiento del robot biocangura</i> .....	33
<b>Figura 4.</b> <i>Prototipo del robot ASIMO</i> .....	34
<b>Figura 5.</b> <i>Robot LittleDog</i> .....	35
<b>Figura 6.</b> <i>Robot ANYmal</i> .....	35
<b>Figura 7.</b> <i>Prototipo del robot “Whegs”</i> .....	36
<b>Figura 8.</b> <i>Robot “Hopping”</i> .....	37
<b>Figura 9.</b> <i>Robot “RT-Mover”</i> .....	38
<b>Figura 10.</b> <i>Prototipo de silla de ruedas</i> .....	39
<b>Figura 11.</b> <i>Robot esférico móvil</i> .....	40
<b>Figura 12.</b> <i>Robot “Quince”</i> .....	41
<b>Figura 13.</b> <i>Robot de locomoción híbrida “L-W”</i> .....	42
<b>Figura 14.</b> <i>Robot “Rising STAR”</i> .....	43
<b>Figura 15.</b> <i>Robot “Mantis”</i> .....	44
<b>Figura 16.</b> <i>Robot “Walk’n Roll”</i> .....	45
<b>Figura 17.</b> <i>Movimientos del robot “Walk’n Roll” para subir un obstáculo</i> .....	45
<b>Figura 18.</b> <i>Prototipo robot “Epi.q”</i> .....	46
<b>Figura 19.</b> <i>Robot “WheTLHLoc”</i> .....	47
<b>Figura 20.</b> <i>Robot “MOBIT”</i> .....	48
<b>Figura 21.</b> <i>Robot Ofro</i> .....	49
<b>Figura 22.</b> <i>Modelo del robot MICROBOT</i> .....	50
<b>Figura 23.</b> <i>Prueba de campo del robot ATHLETE</i> .....	51

<b>Figura 24.</b> <i>Robot experimental HALLUC II</i> .....	52
<b>Figura 25.</b> <i>Prototipo de robot T-Hex 4DOF</i> .....	53
<b>Figura 26.</b> <i>Prueba del robot T-Hex</i> .....	54
<b>Figura 27.</b> <i>Prototipo del robot A-Pod</i> .....	55
<b>Figura 28.</b> <i>Diseño de robot escorpión</i> .....	56
<b>Figura 29.</b> <i>Evolución de diseños del robot R-Hex</i> .....	57
<b>Figura 30.</b> <i>Modelo de robot R-Hex</i> .....	58
<b>Figura 31.</b> <i>Prueba de robot R-Hex en superficies inclinadas</i> .....	59
<b>Figura 32.</b> <i>Diseño de patas del robot R-Hex</i> .....	59
<b>Figura 33.</b> <i>Modelo de estructura interna del robot R-Hex</i> .....	61
<b>Figura 34.</b> <i>Desglose del diseño estructural del robot R-Hex</i> .....	62
<b>Figura 35.</b> <i>Desglose del diseño del sistema eléctrico del robot R-Hex</i> .....	63
<b>Figura 36.</b> <i>Desglose del diseño del sistema de control del robot R-Hex</i> .....	65
<b>Figura 37.</b> <i>Fases de posicionamiento de patas del robot R-Hex al momento de caminar</i> .....	66
<b>Figura 38.</b> <i>Prototipos de patas empleados en modelos R-Hex</i> .....	67
<b>Figura 39.</b> <i>Trayectorias del robot R-Hex con cada prototipo de pata diseñado</i> .....	67
<b>Figura 40.</b> <i>Trayectoria del centro de masa del robot R-Hex al momento de caminar</i> .....	68
<b>Figura 41.</b> <i>Conector DB 25 Macho y Hembra</i> .....	71
<b>Figura 42.</b> <i>Conector DB 9 Macho y Hembra</i> .....	71
<b>Figura 43.</b> <i>Esquema de funcionamiento de un sistema ultrasónico</i> .....	73
<b>Figura 44.</b> <i>Diagrama de relación Voltaje de lectura - Distancia</i> .....	75
<b>Figura 45.</b> <i>Funcionamiento y componentes de los sistemas FSO</i> .....	76
<b>Figura 46.</b> <i>Ejemplo de funcionamiento de red generada por un sistema WiFi</i> .....	79
<b>Figura 47.</b> <i>Tipos de topologías utilizadas en los sistemas ZigBee</i> .....	81

<b>Figura 48.</b> <i>Esquema de funcionamiento de la localización R-CNN rápida</i> .....	84
<b>Figura 49.</b> <i>Modelo de motor DC de 12 voltios</i> .....	90
<b>Figura 50.</b> <i>Modelado de la estructura interna del robot R-Hex</i> .....	91
<b>Figura 51.</b> <i>Modelado del prototipo de robot R-Hex (Estructura externa)</i> .....	92
<b>Figura 52.</b> <i>Modelado del prototipo de robot R-Hex (patas)</i> .....	93
<b>Figura 53.</b> <i>Propiedades de la estructura del robot R-Hex simulada</i> .....	100
<b>Figura 54.</b> <i>Convertor de voltaje DC-DC step down</i> .....	103
<b>Figura 55.</b> <i>Diseño de la aplicación móvil para el control del robot R-Hex</i> .....	104
<b>Figura 56.</b> <i>Programación de la aplicación móvil del robot R-Hex</i> .....	105
<b>Figura 57.</b> <i>Cortado y doblado de piezas estructurales del robot R-Hex</i> .....	106
<b>Figura 58.</b> <i>Piezas de prueba para el robot R-Hex</i> .....	107
<b>Figura 59.</b> <i>Integración de la estructura interna</i> .....	107
<b>Figura 60.</b> <i>Estructura del robot R-Hex</i> .....	108
<b>Figura 61.</b> <i>Prueba de sensor GPS</i> .....	109
<b>Figura 62.</b> <i>Prueba de sensor de luz</i> .....	109
<b>Figura 63.</b> <i>Colocación del sensor ultrasónico en el robot R-Hex</i> .....	110
<b>Figura 64.</b> <i>Pruebas del subsistema eléctrico del robot R-Hex</i> .....	111
<b>Figura 65.</b> <i>Diagrama de flujo del control de movimiento y control de luz</i> .....	112
<b>Figura 66.</b> <i>Programa de control del sensor GPS</i> .....	113
<b>Figura 67.</b> <i>Programa de control de la tarjeta ESP32 para control a distancia</i> .....	113
<b>Figura 68.</b> <i>Programa de control de sensor ultrasónico</i> .....	114
<b>Figura 69.</b> <i>Integración completa del sistema R-Hex</i> .....	115
<b>Figura 70.</b> <i>Integración del sistema electrónico del robot R-Hex</i> .....	116
<b>Figura 71.</b> <i>Funcionamiento del subsistema electrónico del robot R-Hex</i> .....	116

<b>Figura 72.</b> <i>Realización de la aplicación móvil y generación del código de descarga</i> .....	117
<b>Figura 73.</b> <i>Código QR para descargar la aplicación de control del robot R-Hex</i> .....	117
<b>Figura 74.</b> <i>Visualización del programa de control del robot R-Hex en un celular</i> .....	118
<b>Figura 75.</b> <i>Pantalla de la aplicación de control del robot R-Hex</i> .....	118
<b>Figura 76.</b> <i>Prueba del robot R-Hex en cerámica</i> .....	119
<b>Figura 77.</b> <i>Prueba del robot R-Hex en cemento</i> .....	119
<b>Figura 78.</b> <i>Prueba del robot R-Hex en tierra y césped</i> .....	120

## Resumen

El presente proyecto nace de la necesidad de obtener una herramienta que facilite al personal militar el realizar tareas tales como búsqueda, reconocimiento y mapeo de terrenos o vigilancia de zonas poco transitables, razón por la cual en este trabajo se procede a presentar el proceso de investigación, diseño y construcción de un robot semiautónomo tipo "R-Hex", mismo que permita realizar tareas de exploración en ambientes de difícil acceso procurando de esta manera garantizar la protección de la integridad física del operario encargado de estas tareas. El robot será controlado de manera remota, el operador recibirá los datos en tiempo real, mismos que serán analizados e interpretados por el operador y el software implementado permitiendo un control más amigable y fluido. Además, debido al tipo de ambientes en los que se desea que el robot se movilice, se buscará un diseño mecánico que permita realizar una navegación continua y fluida, para lo cual se requerirá que el prototipo sea capaz de evitar o traspasar los obstáculos presentes en su zona de exploración.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado y con el fin de alcanzar el objetivo propuesto, el presente tema de tesis se ha estructurado de la siguiente manera:

El capítulo 1 planteará las generalidades del problema por el cual nace el presente proyecto, se justifica su importancia, el área en el que influirá, los objetivos propuestos y su alcance.

El capítulo 2 da una reseña sobre los trabajos previos sobre este tipo de robots, así como los mecanismos de movilidad, su forma de funcionamiento y su forma de tele operar los prototipos, tipos de comunicaciones y formas de implementación.

El capítulo 3 explica todo lo concerniente al diseño del prototipo, cálculos, análisis de materiales, simulaciones y desarrollo de subsistemas, así como el desarrollo de interfaces de control necesarias.

En el capítulo 4 se describe lo referente a la integración y validaciones de los sistemas, así como el funcionamiento en conjunto y los resultados obtenidos.

Finalmente, el capítulo 5 detalla las conclusiones y las recomendaciones del proyecto, mismas que servirán en trabajos futuros.

*Palabras claves:* R-Hex, geolocalización, robot, locomoción, control inalámbrico, teleoperación.

## Abstract

This project arises from the need to obtain a tool that makes it easier for military personnel to perform tasks such as search, reconnaissance and mapping of land or surveillance of areas that are not very passable, which is why in this work we proceed to present the research process, design and construction of a semi-autonomous robot type "R-Hex", which allows exploration tasks in environments with difficult access, thus seeking to guarantee the protection of the physical integrity of the operator in charge of these tasks. The robot will be controlled remotely, the operator will receive the data in real time, which will be analyzed and interpreted by the operator and the implemented software allowing a friendlier and more fluid control. In addition, due to the type of environments in which the robot is to be mobilized, a mechanical design will be sought that allows continuous and fluid navigation, for which the prototype will be required to be able to avoid or cross obstacles present in the environment. your scanning area.

Taking into account the aforementioned and in order to achieve the proposed objective, this thesis topic has been structured as follows:

In chapter 1, the generalities of the problem for which this project was born will be presented, its importance is justified, the area in which it will influence, the proposed objectives and its scope.

Chapter 2 gives a review of the previous work on this type of robot, as well as the mobility mechanisms, their way of functioning and their way of teleoperating the prototypes, types of communications and ways of implementation.

Chapter 3 explains everything related to the design of the prototype, calculations, material analysis, simulations and development of subsystems, as well as the development of necessary control interfaces.

Chapter 4 describes what refers to the integration and validation of the systems, as well as the operation as a whole and the results obtained.

Finally, in chapter 5 the conclusions and recommendations of the project are detailed, which will serve in future works.

Keywords: R-Hex, geolocation, robot, locomotion, wireless control, teleoperation.

## Capítulo 1 – Generalidades

### Introducción

Durante mucho tiempo uno de los trabajos que más uso de recursos y personal ha requerido en el campo militar (Sanchez & Aguilar, 2019) es el de búsqueda de objetos, reconocimiento y mapeo de terrenos o vigilancia de zonas poco transitables; esto se debe a que constantemente los encargados de este tipo de trabajos requieren trasladar una cantidad determinada de personal a la zona dependiendo de la amplitud y dificultad de exploración de la misma, a la vez este personal requiere el equipo adecuado y el conocimiento necesario para utilizarlo de manera correcta haciendo difícil el encontrar a los candidatos adecuados para el trabajo (Reyes, Pérez, Paredes, Montoya, & Aguilar, 2017). Por otra parte, se debe tomar en cuenta los riesgos existentes al realizar estas operaciones debido a que no siempre se está en una zona libre de explosivos, materiales peligrosos o donde las imperfecciones propias de la tierra no son detectables a simple vista. Estos factores hacen que este tipo de trabajos se vuelva demoroso, ineficiente e impreciso; razones por la que se ha buscado automatizar estos procesos utilizando la implementación de herramientas tecnológicas, mismas que han venido generando un gran desempeño en este campo (Collaguazo, Tituaña, Aguilar, & Amaguaña, 2018).

En la actualidad y a medida que la tecnología ha ido avanzando se ha vuelto bastante común el uso de plataformas automatizadas y mecanismos robóticos, los cuales se han involucrado de manera importante en esta área, pero la mayoría de los mismos son costosos y difíciles de operar sin una capacitación adecuada, razón por la que la mayoría de estos mecanismos y sistemas han sido confinados a un uso en ambientes controlados. Sin embargo, este mismo avance de tecnología (Ramírez & Aguilar, 2019) ha generado la necesidad de desarrollar e implementar sistemas autónomos y semiautónomos

que permitan realizar tareas tales como búsqueda de objetos, reconocimiento y mapeo de zonas; para lo que se necesita que pueda andar en superficies altamente irregulares, que a su vez sea relativamente económico y fácilmente operable a distancia reproduciendo los movimientos que se requiere de manera fiel.

(Nuño Ortega & Basañez Villaluenga, 2004) define la tele operación como el conjunto de tecnologías que ayudan a operar o controlar dispositivos a distancia, en el caso de (Montalvo, Garcia, Naranjo, Ortiz, & Garcia, 2020) define a un sistema tele operado como aquel que permite otorgar la destreza de un operario humano hacia un robot con la finalidad de realizar tareas en ambientes cambiantes, llamando a su vez a este tipo de interacción como bilateral, misma que se da cuando las acciones del dispositivo manipulador como del dispositivo manipulado se reflejan en los dos de manera mutua.

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollar un robot el cual cumpla con el principio de un sistema tele operado maestro-esclavo, el cual según (Nuño Ortega & Basañez Villaluenga, 2004) está compuesto por un sistema el cual será manipulado denominado esclavo y será el encargado de reproducir las ordenes de un dispositivo manipulador al cual se lo denomina maestro, y a su vez será controlado de manera manual por un operador humano. Permitiendo de esta manera garantizar el bienestar del operario a cargo y reducir los riesgos existentes al realizar los trabajos mencionados.

### **Justificación e importancia**

El proyecto titulado “Vehículo terrestre no tripulado multipropósito de vigilancia y reconocimiento para apoyo de operaciones militares Fase 1 – GVMil1”, el cual es desarrollado en el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejercito CICTE bajo la dirección del Dr. Wilbert Aguilar, tiene como objetivo el desarrollar y estudiar diferentes alternativas de vehículos

no tripulados con navegación semiautónoma los cuales servirán de apoyo en operaciones militares.

En base al proyecto mencionado nace el sistema semiautónomo propuesto en este documento, el prototipo realizado se basa en diseños de robots hexápodos tipo R-Hex, los cuales presentan una solución bastante viable ante la problemática expuesta, generando un robot todo terreno de fácil uso y de bajo costo de desarrollo.

En Ecuador, el desarrollo de estos sistemas no ha sido muy explorado por lo que el propósito de este trabajo de investigación es el de diseñar e implementar un sistema que permita el reconocimiento y vigilancia de áreas específicas por medio de un manejo remoto, mismo que facilitará la realización de estas acciones en las zonas que se encuentran dentro del rango de cobertura de la señal del sistema, y a su vez se buscará aumentar la efectividad al momento de realizar estos procesos.

La ejecución de este proyecto resulta importante al momento de realizar estudios de campo en terrenos desconocidos, así como el mapeo de áreas no documentadas, reduciendo el peligro de los operarios o trabajadores que deben realizar este tipo de procedimientos de manera manual. El automatizar este proceso puede resultar de gran importancia en el Ecuador, tomando en cuenta que la mayor parte del territorio está compuesto de zonas montañosas y de gran irregularidad, esto facilitaría el proceso, así como la precisión del mismo de manera que se puedan analizar zonas extensas de una manera segura tanto para los operarios como para los entornos analizados.

Otra de las ventajas que presenta el sistema es el de ser poco invasivo al entorno lo que generaría un impacto ambiental mínimo al momento de realizar el estudio de las zonas, así como el mapeo y vigilancia de las mismas.

### **Área de influencia**

Como se menciona previamente, se desea que el prototipo propuesto en este proyecto sirva de apoyo en operaciones militares de búsqueda y exploración de terrenos con la ayuda de vehículos no

tripulados cuya operación sea semiautónoma, facilitando de esta forma el realizar estas tareas haciendo que sean más rápidas, precisas y seguras.

Debido a la forma que está diseñado se espera que el robot se desenvuelva en ambientes externos que posean una dificultad de movilidad media, es decir que existan obstáculos de dimensiones no superiores a las especificadas en este documento y a su vez se deberá cumplir con el tipo de terreno documentado.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Diseñar y construir un sistema autónomo todoterreno usando un modelo hexápodo tipo “R-Hex”.

### ***Objetivos Específicos***

- Diseñar un prototipo de robot hexápodo, basado en el diseño desarrollado por Boston Dynamics.
- Desarrollar un sistema de control enfocado en el sistema robótico diseñado
- Implementar un sistema de geolocalización que permita conocer la posición del robot en tiempo real.
- Implementar dispositivos de detección de luz y de obstáculos para facilitar el traslado del sistema.
- Evaluar el nivel de respuesta en diferentes ambientes, mediante un muestreo con pruebas en campo del dispositivo.

## **Alcance del Proyecto**

En el presente proyecto se desarrollará un prototipo robótico de 550x550x295 mm, el cual será capaz de movilizarse en terrenos de asfalto, tierra, pasto, cerámica y ripio; a su vez

estos terrenos tendrán obstáculos los cuales el prototipo podrá bordear o trepar dependiendo si la altura del obstáculo es menor a 80mm.

El prototipo robótico será controlado de manera remota, su alcance de comunicación es de 10m para garantizar una buena visibilidad del prototipo por parte del operario y a su vez una comunicación sin interrupciones.

### **Estructura del documento**

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto previo a su desarrollo, se ha estructurado este documento de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se plantearán las generalidades del problema por el cual nace el proyecto de tesis desarrollado en este documento, se justifica la importancia del desarrollo del mismo, el área en el que influirá, los objetivos propuestos y el alcance que tiene el proyecto.

El capítulo 2 da una reseña sobre los trabajos previos existentes sobre este tipo de robots, así como los mecanismos de movilidad que se pueden implementar, su forma de funcionamiento y su forma de tele operar los prototipos, tipos de comunicaciones existentes y formas de implementación de los mismos.

En el capítulo 3 se explica todo lo concerniente al diseño del prototipo, cálculos, análisis de materiales, simulaciones y desarrollo de subsistemas, así como el desarrollo de interfaces de control necesarias para el funcionamiento del proyecto.

En el capítulo 4 se describe lo referente a la integración y validaciones de los sistemas, así como el funcionamiento en conjunto y los resultados obtenidos con el prototipo desarrollado.

Finalmente, en el capítulo 5 se obtienen las conclusiones del proyecto, mismas que se alinean a los objetivos planteados inicialmente, así como las recomendaciones de mejora que se podrían desarrollar en trabajos futuros.

## Capítulo 2 – Estado del arte

En los últimos tiempos se han desarrollado diversos prototipos tele operados con el fin de ayudar a suplir las necesidades en diversos campos, entre ellos el de búsqueda y rescate para lo cual se han desarrollado diversos tipos de robots, la mayoría basados en organismos vivos debido a su forma de desenvolverse en entornos difíciles de transitar. Tomando en cuenta esto, en el presente capítulo, se ha realizado la respectiva recopilación de información por medio de la investigación con el fin de conocer los tipos de robots desarrollados, su desempeño, la forma de funcionamiento y los mecanismos utilizados en cada uno. Esto permitirá el generar ideas en base a las fortalezas y debilidades de cada robot investigado; y esto a su vez ayudará a reducir los tiempos de diseño del modelo y a la vez descartar modelos fallidos que puedan afectar al funcionamiento del prototipo.

### **Locomoción de sistemas robóticos**

La locomoción en los sistemas robóticos móviles es uno de los puntos más estudiados dentro del campo de la robótica, esto se debe a que siempre se busca el mejor diseño que pueda solventar las tareas requeridas en cierta área, supliendo de esta manera una necesidad específica (Segarra, Caballeros, & Aguilar, Visual based autonomous navigation for legged robots, 2018). Pero debido a esto se necesita buscar las mejores soluciones al momento de diseñar los sistemas, razón por la cual, diversos autores se ha enfocado en estudiar a varios organismos vivos los cuales se desenvuelven con facilidad en cada uno de sus entornos, haciendo que de esta manera nazcan estudios como los realizados por (Watson , Ritzmann, & Pollack, 2002), (Marosan, Constantin, Cofaru, & Inta, 2021) y (Niola, y otros, 2021), (Luna M. A., Moya, Aguilar, & Vanessa, 2017) donde se centran en el estudio de la pata de un insecto con la finalidad de analizar y posiblemente replicar la funcionalidad de la pata en un sistema robótico para mejorar el desempeño y la movilidad del sistema. (Quinn, Offi, Kingsley, & Ritzmann, 2002), (Alatise & Hancke, 2020), (Hong, 2006) y (Allen, Quinn, Bachmann, & Ritzmann, 2003) en sus trabajos se enfocan en explicar la importancia de utilizar modelos biológicos como inspiración para la

ceración de los sistemas de movimiento de los prototipos autónomos debido a que ayuda a simplificar el trabajo en gran manera.

(Bruzzone & Quaglia, 2012), (Nie, Pacheco, & Spenko, 2013) y (Conduraru, Doroftei, & Conduraru, 2013) en sus trabajos explican que existen principalmente tres tipos de sistemas de locomoción, los cuales son:

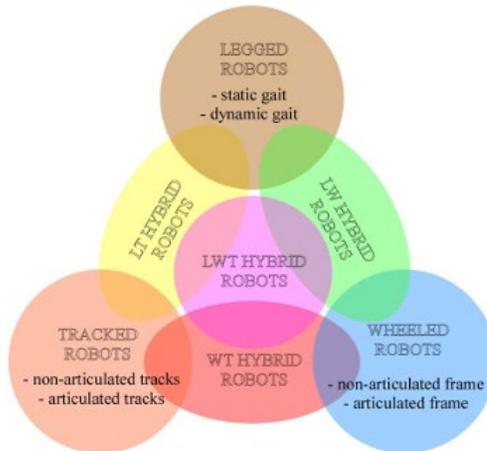
- Robots con ruedas (W)
- Robots con orugas (T)
- Y robots con patas (L)

Pero muy aparte de ello hay otros tipos de robots que poseen dos o los tres tipos de locomociones los cuales van alternando dependiendo cual sea la necesidad, a estos robots se los conoce como mixtos o híbridos y pueden combinarse según la necesidad y diseño que posea cada prototipo, por lo que tendríamos las siguientes combinaciones:

- Patas y ruedas (LW)
- Patas y orugas (LT)
- Ruedas y orugas (WT)
- Patas, ruedas y orugas (LWT)

**Figura 1.**

*Clasificación de tipos de locomoción*



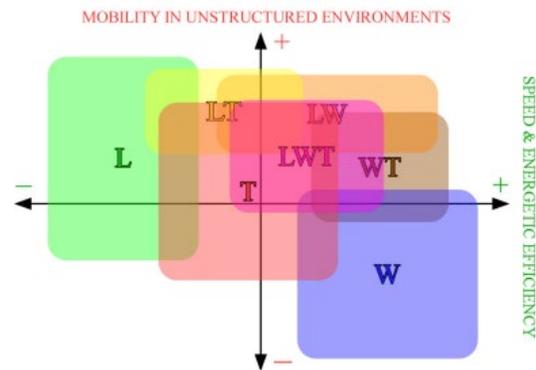
*Nota.* Tomado de Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments, por Bruzzone & Quaglia, 2012, Mechanical Sciences.

Pero cuando hablamos de modelos robóticos hay muchas maneras de clasificar los tipos de robots, ya sea por el medio en el que se desenvuelven, la forma que posee el robot y entre las más comunes es por el tipo de locomoción que poseen.

Pero al hablar de varios tipos de movilizarse también se debe tener en cuenta que las formas de locomoción de los robots tienen sus fortalezas y fallas, (Bruzzone, Nodehi, & Fanghella, Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review, 2022) y (Shafaei & Mousazadeh, 2023) en sus trabajos realizan análisis de las fortalezas y debilidades de las diferentes formas de movilización de los robots, los parámetros analizados en el trabajo son la velocidad y eficiencia energética versus la movilidad que posee cada uno de las estructuras móviles, la **Figura 2.** muestra los resultados obtenidos de este análisis.

**Figura 2.**

*Fortalezas y debilidades de los robots según su tipo de locomoción*



*Nota.* Tomado de Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review, por Bruzzone, Nodehi & Fanghella, 2022, Machines.

Debido a las fortalezas y debilidades que presentan los diferentes tipos de locomoción (Hardarson, 1997), (Nie, Pacheco, & Spenko, 2013) y (Conduraru, Doroftei, & Conduraru, 2013) en sus respectivos trabajos explican la importancia y los puntos a tener en cuenta para realizar la selección del tipo de locomoción necesaria para un sistema robótico dependiendo el tipo de trabajo que va a realizar y el terreno en el que se desenvuelva el sistema, obteniendo los resultados expuestos en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.**

*Desempeño de sistemas de locomoción en diferentes terrenos de prueba*

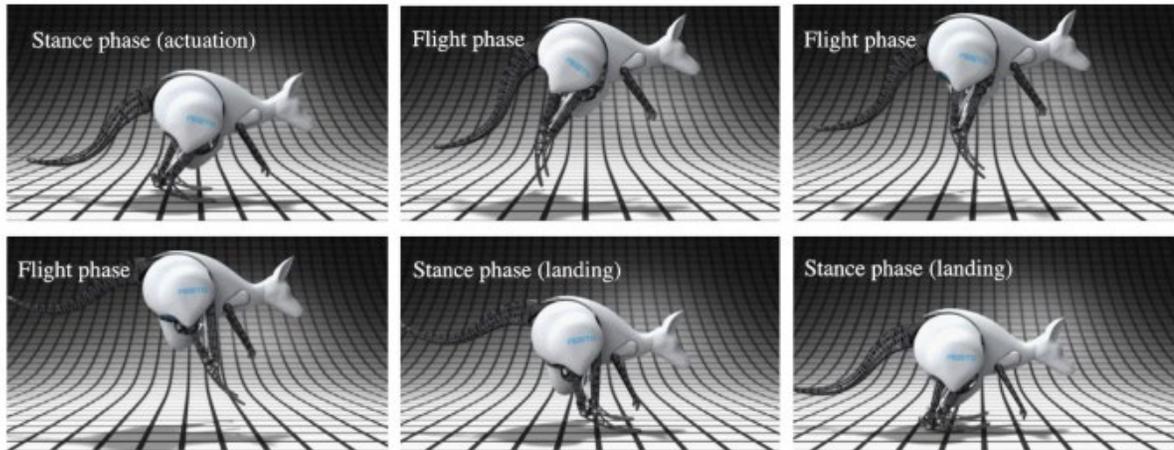
<b>Características\Locomoción</b>	<b>Ruedas</b>	<b>Orugas</b>	<b>Patas</b>	<b>Híbridos</b>
<b>Terreno blando</b>	0	+	0	+
<b>Terreno duro</b>	+	0	+	+
<b>Velocidad</b>	+	0	-	0
<b>Agilidad</b>	+	0	0	+
<b>Estabilidad</b>	0	+	0	-
<b>Adaptabilidad</b>	0	-	0	+
<b>Complejidad</b>	+	+	-	-
<b>Carga útil</b>	+	+	-	0
<b>Eficiencia</b>	+	0	-	-
<b>Confiabilidad</b>	+	0	-	-
<b>Tolerancia a fallas</b>	0	0	+	+
<b>Efectos ambientales</b>	0	-	+	0

*Nota.* Tomado de Locomotion for difficult terrain, por Hardarson, 1997, Sweden: Royal Institute of Technology.

Hay diversos tipos de robots movilizados por patas, en su trabajo de estudio (Graichen, y otros, 2015) desarrollan eficazmente el control para el control de un biocanguro, dando como resultado el control de un robot que imita los movimientos del animal vivo en cada paso, manteniendo su estabilidad y velocidad al momento de actuar (**Figura 3.**).

**Figura 3.**

*Simulación de movimiento del robot biocanguro*

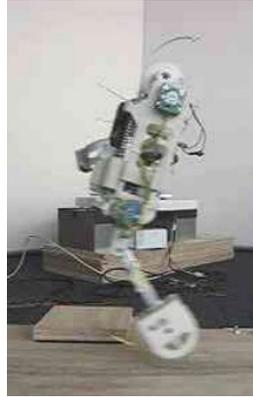


*Nota.* Tomado de Control design for a bionic kangaroo, por Graichen y otros, 2015, Control Engineering Practice.

En su lugar (Vu, Pfeifer, Iida, & Yu, 2015) (Ridden, 2016) realizan el análisis del robot humanoide ASIMO (**Figura 4.**) el cual asemeja al movimiento de un ser humano permitiendo caminar, correr y subir gradas, en las pruebas que realizan en el trabajo, el robot ASIMO muestra un muy buen desempeño exhibiendo su eficiencia y mostrando un bajo consumo, ante todo.

**Figura 4.**

*Prototipo del robot ASIMO*



*Nota.* Tomado de Improving energy efficiency of hopping locomotion by using a variable stiffness actuator, por Vu, Pfeifer, Iida & Yu, 2015, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics

Como se ha visto en los dos modelos anteriores, los sistemas robóticos siempre buscan asemejarse a algún organismo vivo para obtener sus propiedades de movimiento (Grijalva, Cueva, Ramírez, & Aguilar, 2019), y aunque los modelos que fueron mencionados previamente también son modelos cuya locomoción es realizada por patas su funcionamiento varía. Otro modelo cuya locomoción es realizado por patas es el estudiado por (Shkolnik, Levashov, Manchester, & Tedrake, 2011), que presentan a LittleDog (**Figura 5.**), el mismo que es un robot movilizad por cuatro patas y diseñado por Boston Dynamics, el objetivo de LittleDog es la de demostrar lo robusto de su sistema ante el cambio de entornos o terrenos en los que se moviliza, un modelo similar a LittleDog es el presentado por (Hutter, y otros, 2017) y (Bellicoso, y otros, 2018) el cual fue diseñado para búsqueda y rescate o para realizar inspecciones industriales (**Figura 6.**), ANYmal posee como principal ventaja y diferencia el hecho de ser modular, permitiendo de esta manera el realizar cambios en los elementos que posee para realizar diferentes actividades según lo que se requiera.

**Figura 5.**

*Robot LittleDog*



*Nota.* Tomado de Bounding on rough terrain with the LittleDog robot, por Shkolnik, Levashov, Manchester, & Tedrake, 2011, The International Journal of Robotics Research.

**Figura 6.**

*Robot ANYmal*

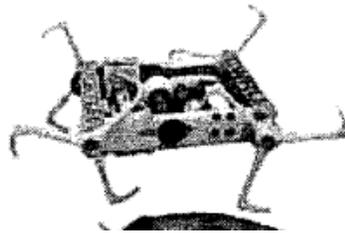


*Nota.* Tomado de ANYmal - toward legged robots for harsh environments, por Hutter, y otros, 2017, Advanced Robotics.

(Schroer, Boggess, Bachmann, Quinn, & Ritzmann, 2004) en su trabajo muestran al robot “Whegs” (**Figura 7.**) cuya movilidad viene dada por el movimiento de patas basándose en el principio de locomoción de las patas de cucarachas, esto según explican los autores en su trabajo le permite al robot moverse a lo largo de campos irregulares de manera rápida y eficiente. Al igual que la mayoría de modelos el robot “Whegs” basa sus movimientos en un animal, en este caso las cucarachas, en el trabajo realizado por (Gart & Li, 2018) se realiza una comparación entre los dos dando como resultado que, en los diferentes escenarios de pruebas, tanto el robot como la cucaracha realizan movimientos similares, demostrando que mantienen la similitud al momento de realizar ciertas acciones.

**Figura 7.**

*Prototipo del robot “Whegs”*

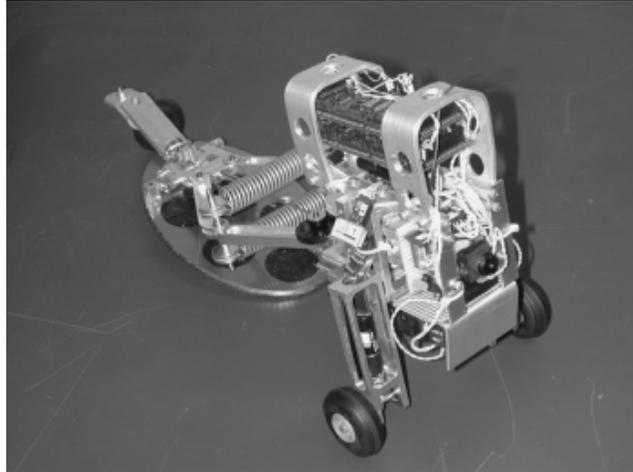


*Nota.* Tomado de Comparing cockroach and Whegs robot body motions., por Schroer, Boggess, Bachmann, Quinn, & Ritzmann, 2004, IEEE International Conference on Robotics and Automation.

Otro tipo de locomoción bastante usado en los sistemas robóticos es el realizado por medio ruedas como el modelo estudiado en el trabajo de (Fiorini & Burdick, 2003), el robot hopping (**Figura 8.**) es un sistema autónomo diseñado para la exploración, aunque debido a la forma del robot y a su tipo de locomoción se tiene que el sistema posee una limitante ante el tamaño de obstáculos que es capaz de sortear.

**Figura 8.**

*Robot “Hopping”*



*Nota.* Tomado de *The Development of Hopping Capabilities for Small Robots*, por Fiorini & Burdick, 2003, *Autonomous Robots*.

Otro ejemplo de un sistema robótico cuya forma de movimiento es impulsada por ruedas es el diseñado por (Nakajima, 2020), el cual es una silla de ruedas diseñada de tal manera que permite al usuario subir escaleras de manera sencilla y segura, el robot “RT-Mover” (**Figura 9.**) utiliza la fuerza de sus motores y su suspensión para lograr sortear obstáculos que encuentre en el camino.

**Figura 9.**

*Robot “RT-Mover”*



*Nota.* Tomado de Stair-climbing gait for a four-wheeled vehicle., por Nakajima, 2020, ROBOMECH Journal.

Un sistema similar al “RT-Mover” es el presentado por (Sasaki & Suzuki, 2018), este sistema móvil (**Figura 10.**) cuenta con un sistema de patas rotatorias las cuales dan funcionalidad al sistema al momento de requerir el subir y bajar escalones.

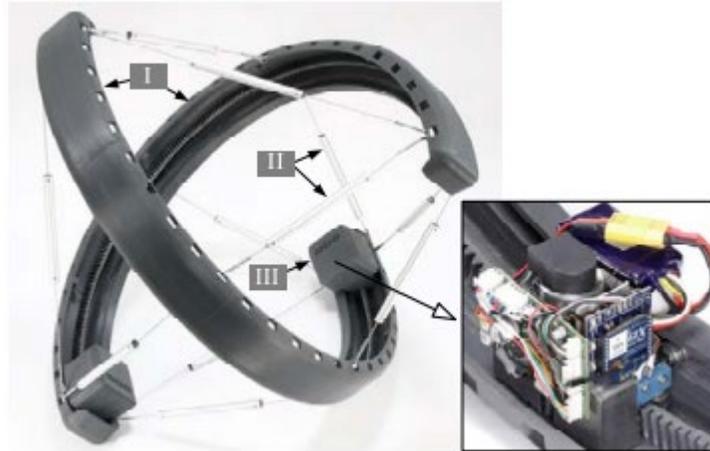
**Figura 10.**

*Prototipo de silla de ruedas*



*Nota.* Tomado de Active Rotary-Legs Mechanism for Stair-Climbing Mobility Vehicle, por Sasaki & Suzuki, 2018, IEEE Robotics and Automation Letters.

(Kaufhold, Schale, Bohm, & Zimmermann, 2017) presentan en su proyecto de investigación un robot cuya locomoción se basa en ruedas, pero su diseño es completamente diferente a muchos modelos debido a su forma, el sistema denominado robot esférico móvil (**Figura 11.**) es una estructura pretensada mecánicamente, que consiste en un conjunto de elementos comprimidos desconectados los cuales se hayan unidos por una red continua de elementos tensionados flexibles.

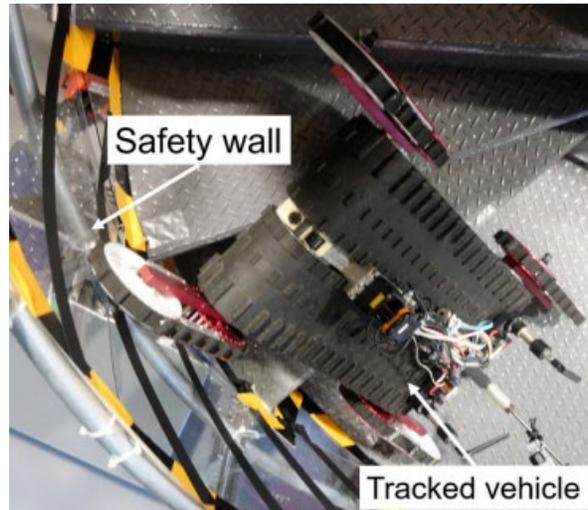
**Figura 11.***Robot esférico móvil*

*Nota.* Tomado de Indoor locomotion experiments of a spherical mobile robot based on a tensegrity structure with curved compressed members, por Kaufhold, Schale, Bohm, & Zimmermann, 2017, IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM).

Un tipo de locomoción también usado en los robots es por medio del uso de orugas, en trabajos realizado por (Kojima, y otros, 2020) y (Tiuma, Figueroa, Aguilar, Albán, & Cruz, 2020) realizan la prueba con uno de los terrenos más dificultosos para los robots que es la subida de estructuras en espiral, frente a esta necesidad crean el robot movido por orugas llamado “Quince” (**Figura 12.**), este robot con seis grados de libertad posee dos orugas principales para realizar movimientos normales y cuatro orugas secundarias que se encargan de dar apoyo al momento de presentarse una dificultad frente al terreno, un sensor LiDar es utilizado para analizar la forma del obstáculo y de esta manera poder realizar la acción asignada de la mejor manera posible.

**Figura 12.**

*Robot "Quince"*



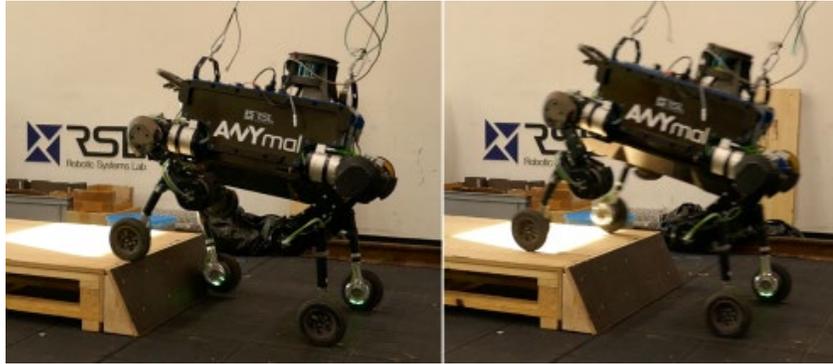
*Nota.* Tomado de Stable Autonomous Spiral Stair Climbing of Tracked Vehicles Using Wall Reaction Force, Kojima, y otros, 2020, IEEE Robotics and Automation Letters.

(Shun & Jason, 2015) y (Schempf, Chemel, & Everett, 1995) en sus trabajos nos explican la importancia de los modelos mixtos o híbridos, a también hace mención de varios robots cuya locomoción es híbrida los cuales son analizados, mostrando que cada uno de los mismos ha ido ganando las fortalezas de cada uno de los sistemas de locomoción que fueron mezclados para obtener el prototipo.

En el trabajo realizado por (Medeiros, y otros, 2020) muestran el desarrollo de un robot cuyo tipo de locomoción es mixta, basada en un sistema de movimiento por medio de patas y ruedas, cuyo objetivo es mejorar la movilidad en cualquier terreno sin sacrificar la velocidad y eficiencia del robot, esto se debe a que gana las fortalezas de los dos tipos de movimientos y se reducen las debilidades de cada sistema individual dando como resultado el robot que posee 4 patas en las cuales se equipan ruedas al final de cada una, tal y como se muestra en la **Figura 13**.

**Figura 13.**

*Robot de locomoción híbrida "L-W"*



*Nota.* Tomado de Trajectory Optimization for Wheeled-Legged Quadrupedal Robots Driving in Challenging Terrain, por Medeiros, y otros, 2020, IEEE Robotics and Automation Letters.

Otro ejemplo de un robot con sistema de locomoción mixta se puede observar en el robot Rising STAR (**Figura 14.**), robot que fue estudiado en el trabajo realizado por (Zarrouk & Yehezkel, 2018) en el cual analizan un robot cangrejo miniatura cuyas funciones para las que fue diseñado con un bajo peso y alta navegabilidad son las de búsqueda y rescate, excavación y misiones de reconocimiento, esto se debe a que sus características le dan velocidad al momento de realizar estas tareas.

**Figura 14.**

*Robot "Rising STAR"*



*Nota.* Tomado de Rising STAR: A Highly Reconfigurable Sprawl Tuned Robot., Zarrouk & Yehezkel, 2018, IEEE Robotics and Automation Letters.

Mantis (**Figura 15.**) es un robot híbrido que utiliza ruedas y patas para su locomoción, este robot presentado por (Bruzzone & Fanghella, Mantis, 2014) tiene como objetivo el sortear obstáculos algo más altos que el propio robot buscando que tenga estabilidad en el proceso, se moviliza por medio de las ruedas en su funcionamiento normal y al momento de sortear algún obstáculo utiliza las patas para realizar un soporte que le ayude dando estabilidad.

**Figura 15.**

*Robot "Mantis"*

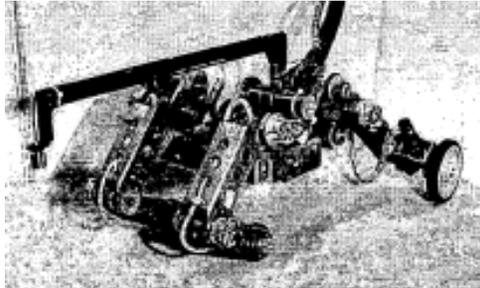


*Nota.* Tomado de Mantis: hybrid leg-wheel ground mobile robot., Bruzzone & Fanghella, 2014, Industrial Robot: An International Journal.

En la misma categoría de robot con pata y ruedas tenemos al robot denominado por (Adachi, Koyachi, Arai, Shimiza, & Nogami, 1999) como el robot "Walk'n Roll" (**Figura 16.**), el mismo que usa las ruedas como principal forma de locomoción, pero en caso de necesitar sortear un obstáculo gran parte del cuerpo del robot es móvil permitiendo de esta manera colocar al robot en una posición determinada para avanzar sin importar el tipo de obstáculo como se muestra en la **Figura 17.**

**Figura 16.**

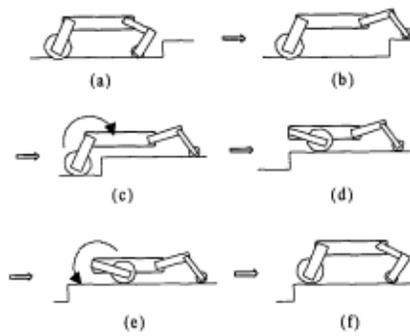
Robot "Walk'n Roll"



*Nota.* Tomado de Mechanism and control of a leg-wheel hybrid mobile robot., por Adachi, Koyachi, Arai, Shimiza, & Nogami, 1999, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*

**Figura 17.**

*Movimientos del robot "Walk'n Roll" para subir un obstáculo*



*Nota.* Tomado de Mechanism and control of a leg-wheel hybrid mobile robot., por Adachi, Koyachi, Arai, Shimiza, & Nogami, 1999, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*

En cambio, en el trabajo realizado por (Quaglia, Oserio, Bruzzone, & Razzoli, 2013) desarrolla el análisis de la familia de prototipos de robots móviles denominados Epi.q (**Figura 18.**), mismos que son robots de locomoción híbrida ruedas-patas, cuyo propósito es el de realizar exploraciones en terrenos de difícil acceso.

**Figura 18.**

*Prototipo robot "Epi.q"*

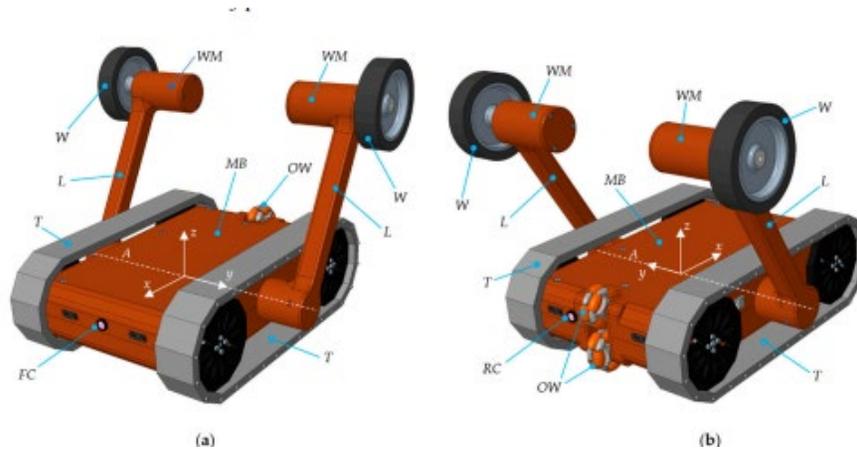


*Nota.* Tomado de A Modular Approach for a Family of Ground Mobile Robots., por Quaglia, Oserio, Bruzzone, & Razzoli, 2013, International Journal of Advanced Robotic Systems.

(Bruzzone, Baggetta, Nodehi, Bilancia, & Fanghella, 2021) en su trabajo muestra el desarrollo de un modelo híbrido que posee los tres tipos de locomoción, el robot llamado "WheTLHLoc" (**Figura 19.**) busca mejorar la eficiencia y mejorar el desempeño del robot en los diferentes terrenos en los que puede actuar buscando de esta manera aumentar las fortalezas de cada uno de los sistemas de locomoción y reducir las debilidades presentadas por los mismos.

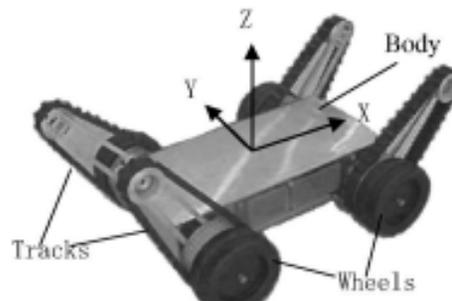
**Figura 19.**

*Robot “WheTLHLoc”*



*Nota.* Tomado de *Functional Design of a Hybrid Leg-Wheel-Track Ground Mobile Robot.*, por Bruzzone, Baggetta, Nodehi, Bilancia, & Fanghella, 2021, Machines.

El robot “MOBIT” (**Figura 20.**) estudiado por (Duan, Huang, Rahman, Li, & Du, 2006) también es otro sistema autónomo que posee los tres principales sistemas de locomoción, en el caso de este robot posee cuatro orugas, cuatro ruedas y cuatro patas, el robot va cambiando de sistema de locomoción según lo que el usuario considere inconveniente, pero por lo general el sistema de locomoción más empleado en el robot será el que usa las ruedas del sistema.

**Figura 20.***Robot "MOBIT"*

*Nota.* Tomado de Kinematic Modeling of a Small Mobile Robot with Multi-Locomotion Modes., por Duan, Huang, Rahman, Li, & Du, 2006, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

### **Prototipos de robots tele operados**

En la actualidad se han desarrollado diversos tipos de robots móviles tele operados (Jara-Olmedo A. , Medina-Pazmiño, Tozer, Aguilar, & Pardo, 2018), mismos que una vez que se han encontrado operativos han sido de gran utilidad en el campo de la inspección (Basantes, et al., 2018) y la vigilancia (Zurita, Aguilar, & Enríquez, 2019) de ciertas zonas sin la necesidad de exponer a algún peligro al operario, resguardando de esta manera la integridad física del mismo (Calderón, Aguilar, & Merizalde, 2020). Debido a la ventaja que suponen el elaborar robots móviles, se han realizado muchos estudios y proyectos que han permitido desarrollar este tipo de sistemas móviles tele operados, diferenciándolos en su mayoría por el tipo de locomoción que estos utilizan para trasladarse.

Un gran ejemplo de este tipo de robots es el robot OFRO (Robotic-Lab, 2007) el cual es un robot construido por Du Robo y está diseñado específicamente para la vigilancia de grandes áreas, esto gracias a las cámaras que tiene incorporadas, su sistema de localización GPS y facilidad de acceso a redes

locales inalámbricas. El robot OFRO (**Figura 21**) se moviliza a una velocidad de 7 km/h y su peso es de 50kg, permite el registro y transmisión de datos y alertas a una central.

**Figura 21.**

*Robot Ofro*



*Nota.* Tomado de (Robotnews, 2007)

El robot OFRO al movilizarse con orugas de goma entra en la clasificación de locomoción mediante pista de deslizamiento debido a que sus movimientos vienen dados por medio de bandas de tracción o pistas de deslizamiento, este tipo de sistema tiene como desventaja su reducción de velocidad comparado con un sistema de locomoción por ruedas y adicional a esto su consumo energético aumenta debido a que aumenta el rozamiento entre las orugas y el suelo, pero como ventaja tiene que este sistema posee una gran movilidad en cualquier tipo de terreno y le permite generar una gran estabilidad.

En el artículo escrito por (Plata, Serrano, & Chio Cho, 2007) se describe el desarrollo del robot MICROBOT (**Figura 22**), el cual es un robot cuyo sistema de locomoción es de tipo

Ackerman (Sandoval, Limaico, Villegas-Pico, Asimbaya, & Aguilar, 2019), es decir es un sistema parecido al de cualquier automóvil de cuatro ruedas (Asimbaya, Albán, Aguilar, & Fernández, 2020).

**Figura 22.**

*Modelo del robot MICROBOT*



*Nota.* Tomado de Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Móvil Teleoperado para Inspección Visual.,por Plata, Serrano, & Chio Cho, 2007.

El objetivo de este robot es realizar inspecciones visuales, nace de la necesidad de realizar revisiones en zonas de difícil acceso y pensando específicamente en aplicarlo como sistema de seguridad (Limaico, et al., 2018). El robot mencionado cuenta con una cámara inalámbrica, misma que se encuentra ubicada en un mecanismo cuya función es la de realizar movimientos como un cuello humano.

Otro ejemplo de robot tele operado, es ATHLETE el cual es mencionado por (Smith, Smith, Barreiro, & SunSpiral, 2008) en su artículo en el que se describe de manera detallada el proceso de desarrollo del robot. El robot ATHLETE (All – Terrain Hex – Limbed Extra – Terrestrial Explorer) (**Figura 23**) es un robot desarrollado para realizar funciones de transporte, exploración y construcción (Caiza, Aguilar, Albán, & Fernández, 2020) enfocados en la superficie lunar principalmente, para realizar estas

tareas el robot cuenta con un sistema de locomoción mixto o híbrido, mismo que cuenta con un sistema de patas y ruedas lo que permite su movilidad en terrenos difíciles.

**Figura 23.**

*Prueba de campo del robot ATHLETE*



*Nota.* Tomado de Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Móvil Teleoperado para Inspección Visual., por Smith, Smith, Barreiro, & SunSpiral, 2008, California: Stanford.

Debido a la complejidad del sistema del robot ATHLETE se tiene que este robot posee 36 grados de libertad cinemática, el software de control es bastante robusto para evitar fallas en el momento de cambiar el modo de locomoción dándole una mayor autonomía y una mejor operatividad.

La libertad de movilidad de las seis articulaciones que posee el robot ATHLETE permite que este se movilice a lo largo de cualquier terreno sin importar lo irregular que sea este, ya que si el robot no se logra movilizar haciendo uso de sus ruedas procede a utilizar sus articulaciones

que le permitirán andar con sus patas alternando el movimiento en forma de trípode (Hauser, Bretl, Latombe, Harada, & Wilcox, 2008).

Un robot similar al robot ATHLETE es el robot HALLUC II (Chiba Institute of Technology, 2007), (Grzelczyk, Szymanowska, & Awrejcewicz, 2019) el cual es un modelo cuya locomoción consta de 8 módulos de patas las cuales se encuentran equipadas con ruedas (**Figura 24**) lo que le permite realizar el cambio en modo de desplazamiento entre caminata con las patas del robot o movilización por medio de las ruedas permitiendo de esta manera una mejor movilidad, más rápida y eficiente.

**Figura 24.**

*Robot experimental HALLUC II*



*Nota.* Tomado de (Chiba Institute of Technology, 2007)

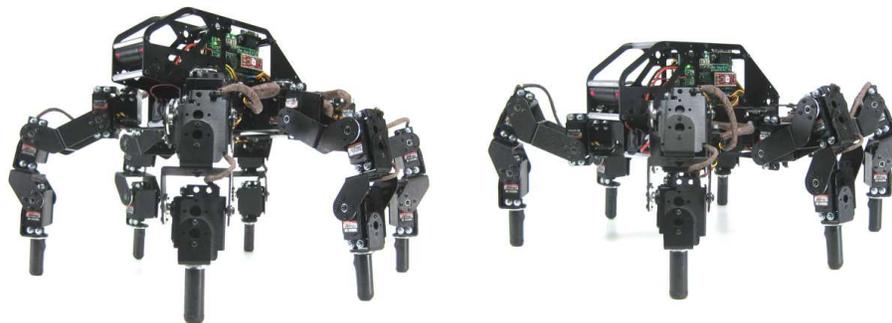
De igual manera en esta categoría de robots tele operados tenemos a los robots hexápodos. Un sistema robótico hexápodo es un mecanismo autónomo el cual basa su inspiración de construcción en los sistemas de locomoción de diferentes insectos como es el caso de las hormigas (Rodríguez-Calderón, Ramos-Parra, & Peña-Giraldo, 2015). Esta referencia es tomada debido a la necesidad de ofrecer una locomoción eficiente en superficies irregulares, ya que a diferencia de los sistemas robóticos cuyo

sistema de locomoción se basan en ruedas, los robots con patas permiten la coordinación de movimientos y traslación de los mismos.

Este tipo de robots se asemejan a varios insectos hexápodos y a su vez da al modelo la capacidad de adaptación y desenvolvimiento en diferentes terrenos (Argote, Castellanos, Vargas, Baquero, & Barrero, 2009). Entre este tipo de robots existen varios modelos (Caballeros, Segarra, Castro, & Aguilar, 2018) y diseños como lo es el T-HEX 4 DOF (**Figura 25**), mismo que es un robot creado por Lynxmotion, el cual usa soportes compensadores en las piernas lo que le proporciona un rango adicional de movimiento. Este prototipo está diseñado con cuatro grados de libertad por pata.

**Figura 25.**

*Prototipo de robot T-Hex 4DOF*

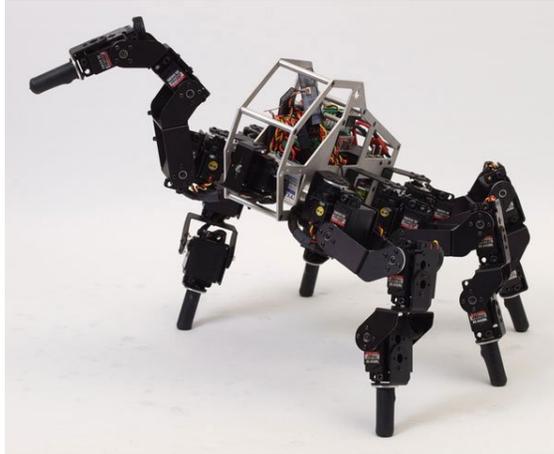


*Nota.* Tomado de (Lynxmotion)

La estructura principal o cuerpo del robot T-Hex está inspirado en la movilidad de los arácnidos, usa soportes desplazados en las extremidades permitiendo un mayor rango de movimiento, y debido a su diseño y grados de libertad en las extremidades puede desplazarse en cualquier dirección.

**Figura 26.**

*Prueba del robot T-Hex*



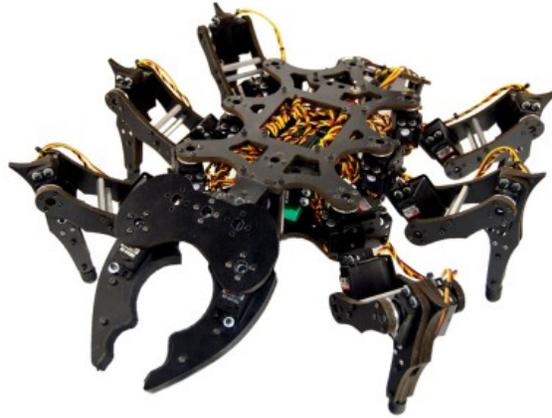
*Nota.* Tomado de (Horsey, 2009)

El diseño del robot T-Hex permite el uso de 24 servos HS-645 para movimiento de sus extremidades, el principal material de construcción del mismo es de aluminio ultrarresistente de alta calidad, permitiendo que el robot posea una alta resistencia sin exceder su peso (Lynxmotion) (Terryn, Flamand, & Saldien, 2016).

Otro modelo de robot hexápodo es el A – POD, el cual es un robot hexápodo operado de manera remota cuya apariencia es la de un insecto (hormiga) (**Figura 27**). En su estructura se puede encontrar partes como el abdomen el cual posee 2 grados de libertad, una cabeza con mandíbulas grandes que posee 3DOF y 6 patas o extremidades encargadas de la movilidad, las cuales poseen 3DOF cada una. Debido a esto ha sido necesario la utilización de 25 servomotores para otorgar la movilidad requerida por el prototipo robótico A-Pod (Lynxmotion) (Tokhi & Virk, 2016) (Rodríguez, Ramos, & Peña, 2015).

**Figura 27.**

*Prototipo del robot A-Pod*



*Nota.* Tomado de (RobotShop, 2018)

Y de igual manera está el prototipo robótico llamado SCORPION HEXAPOD ROBOT, el cual fue diseñado por estudiantes de la universidad de Ghent en Bélgica. El modelo consiste en un robot hexápodo de seis patas, dos tenazas y una cola, asemejando la apariencia de un escorpión como se aprecia en la **Figura 28**.

**Figura 28.***Diseño de robot escorpión*

*Nota.* Tomado de (Liberatore, 2016)

El robot escorpión consta de 3 motores por pierna y 1 motor por brazo, lo cual le permite realizar movimientos precisos y bastante realistas. Por otra parte, posee una estructura ligera, lo que le permite tener mayor agilidad en el momento de realizar movimientos en cualquier dirección (Tokhi & Virk, 2016).

**Prototipos del robot hexápodo “R - HEX”**

El robot hexápodo “R -HEX” el cual fue lanzado como proyecto en 1998 por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA) de Estados Unidos, lugar donde en 1999 gracias al apoyo de la universidad de Michigan y a la universidad McGill como principales colaboradoras y tras una inversión de \$5 millones de dólares se obtuvo el primer prototipo del robot “RHEX”, a partir del cual se han realizado nuevas investigaciones, revisiones y mejoras de estructura y de algoritmos de control que ha permitido desarrollar diversos modelos a lo largo de los años y cada modelo desarrollado posee características diferentes (**Figura 29**).

**Figura 29.**

*Evolución de diseños del robot R-Hex*



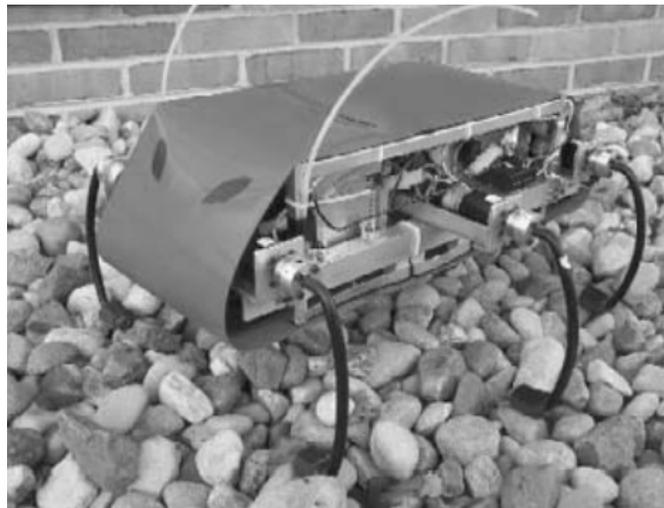
*Nota.* Tomado de (Rhex web)

A diferencia de otros robots, los robots RHEX se caracterizan por tener 6 actuadores, uno en cada extremidad lo que permite el control individual de cada pata. En promedio los robots RHEX poseen una velocidad de 9.72 km/h y tienen la capacidad para subir pendientes de 45° o subir gradas (Romero & Cueva, 2015); aunque con el avance de los modelos se aumentan las características como es el caso de T-RHEX (Sanchez & Aguilar, 2019), mismo que fue desarrollado por la universidad de Carnegie Mellon, el cual busca mejorar la forma de escalar pendientes (**Figura 31**) con la ayuda de seis espinas las cuales son las encargadas de sostener al robot pegado a la superficie, adicional posee una pieza en la parte trasera la cual da apoyo al robot para que las espinas puedan girar permitiendo de esta manera el avance del robot.

Debido a sus características muchos investigadores buscan diseñar y construir este modelo de robots, esto se debe a las ventajas que ofrece este modelo de robot, (Saranli, Buehler, & Koditschek, 2001) en su trabajo diseña y controla un modelo de robot RHex el mismo que después de su desarrollo demuestra ser un robot que posee una locomoción robusta y fiable para utilizarse en los terrenos irregulares y con obstáculos. Otros diseños realizados por (Chou, Yu, Huang, & Lin, 2012) y (Song, Zhang, Meng, Chen, & Huang, 2022) en estos trabajos los autores adicionales al punto de movilizarse en terrenos irregulares, los investigadores buscaron el solucionar el problema de subir obstáculos, para esto se basaron en las cucarachas para obtener información de las acciones de locomoción que debería realizar para realizar este trabajo con satisfacción.

**Figura 30.**

*Modelo de robot R-Hex*



*Nota.* Tomado de (Saranli, Buehler, & Koditschek, 2001)

**Figura 31.**

*Prueba de robot R-Hex en superficies inclinadas*

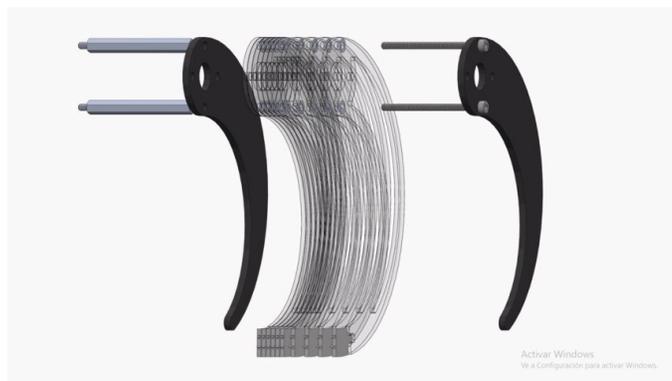


*Nota.* Tomado de (Zeloof, 2019)

La característica más estudiada en el T-RHEX es el diseño de las patas que posee (**Figura 32**), debido a que sin un correcto funcionamiento de las mismas no se podría cumplir el objetivo que tenían los investigadores al momento de desarrollar el modelo.

**Figura 32.**

*Diseño de patas del robot R-Hex*



*Nota.* Tomado de (Zeloof, 2019)

### **Componentes del robot RHEX.**

Para establecer un correcto funcionamiento del proyecto se especificaron componentes claramente identificables que interactuaran de manera armoniosa y colaborativa, permitiendo visualizar un desempeño adecuado y que cumplan los objetivos planteados al inicio de la investigación.

#### ***Componentes mecánicos***

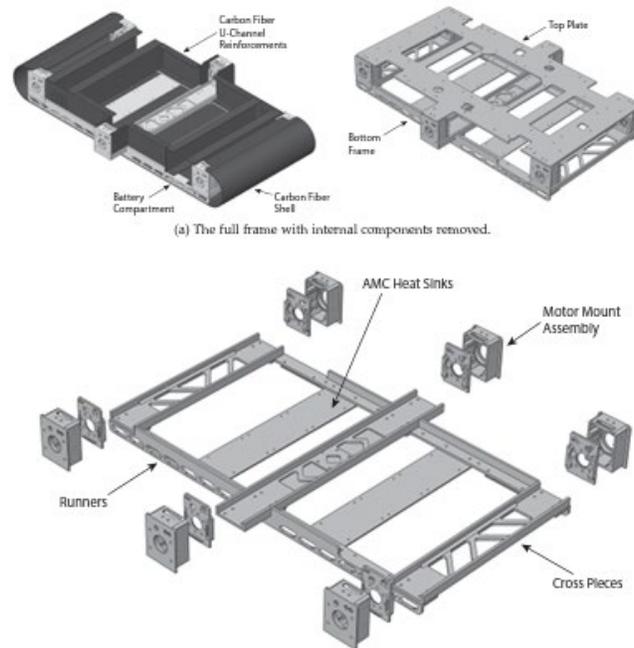
Como se puede observar en el esquema de la **Figura 34**. El subsistema mecánico se compone de tres estructuras básicas como son:

- Estructura de soporte: esta estructura fue realizada en aluminio y es la encargada de mantener la forma del modelo robótico, así como de mantener en su interior el resto de componentes electrónicos y mecánicos que requiere el robot R-Hex.
- Estructura externa: es la encargada de recubrir la estructura de soporte dándole una protección adicional a los elementos que se encuentran en el interior del robot.
- Patas: son las encargadas de dar el movimiento en todas las direcciones requeridas por el robot, dándole apoyo y estabilidad en todo momento.

La implementación mecánica del cuerpo del proyecto se tomó como base la investigación realizada por (Galloway, Haynes, Ilhab, Johnson, & Knopf, 2010) debido a la detallada explicación y los resultados obtenidos teniendo un modelo base previo al diseño del prototipo.

**Figura 33.**

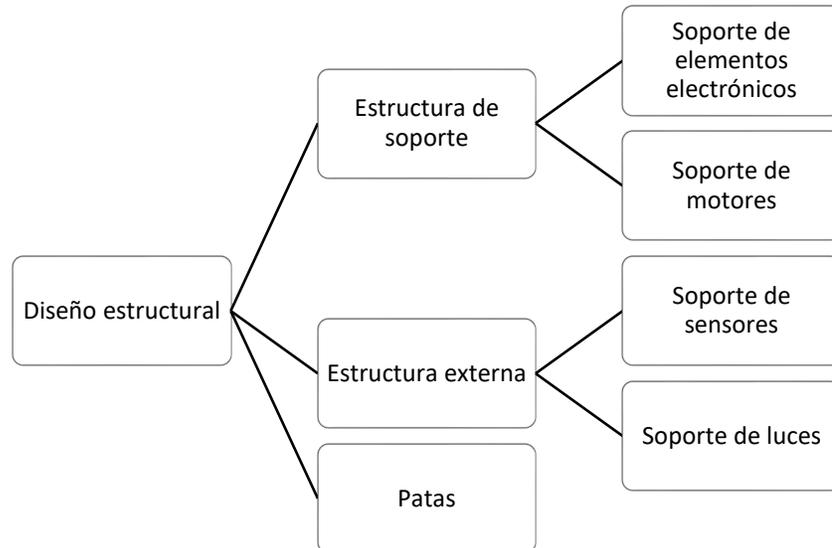
*Modelo de estructura interna del robot R-Hex*



*Nota.* Tomado de X-RHex: A Highly Mobile Hexapedal Robot for Sensorimotor Tasks., por Galloway, Haynes, Ilhab, Johnson, & Knopf, 2010, Penn Libraries.

**Figura 34.**

*Desglose del diseño estructural del robot R-Hex*



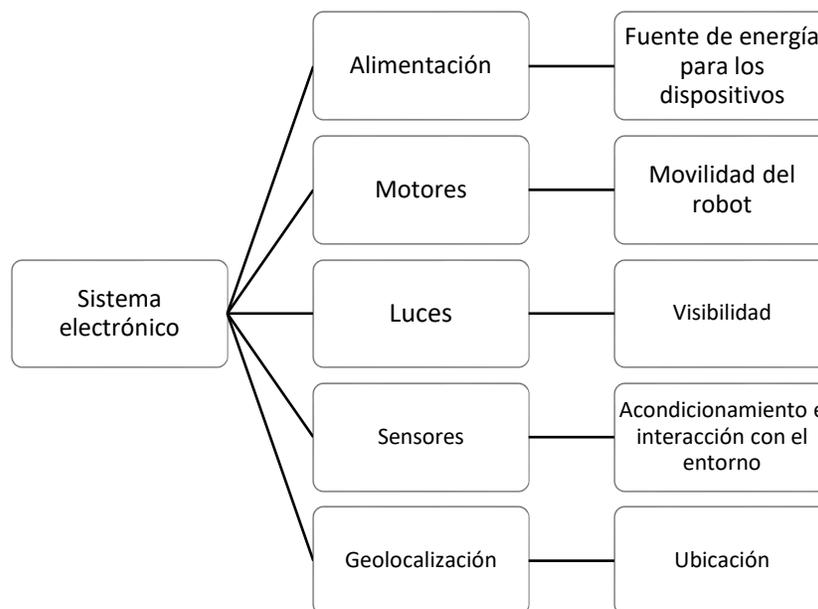
### ***Componentes electrónicos/eléctricos***

En el esquema de la **Figura 35** se puede observar las estructuras que componen al subsistema electrónico:

- Alimentación: es la encargada de proveer la energía necesaria para el funcionamiento del sistema robótico en general.
- Motores: permiten el movimiento del robot de acuerdo a la trayectoria que deba seguir y los obstáculos presentes en la ruta.
- Dispositivo luces: mediante este dispositivo se permite mejorar la visibilidad obtenida.
- Dispositivo sensores: determinaran los obstáculos y falta de luz en el entorno.
- Dispositivo de geolocalización: su función es la de permitir localizar de manera precisa la ubicación del robot.

**Figura 35.**

*Desglose del diseño del sistema eléctrico del robot R-Hex*



### ***Componentes del subsistema de control***

Uno de los aspectos más importantes en la elaboración de sistemas robóticos es la parte de control de los mismos y su comunicación con el usuario. (Iba, Weghe, Paredis, & Khosla, 1999) en su publicación explica la importancia de un buen interfaz de comunicación (Moposita, y otros, 2017), que sea entendible y fácil de manipular (Cobeña, Rodriguez, Salcedo, Collaguazo, & Aguilar, 2018) debido a que no siempre los usuarios serán expertos en el uso de los distintos softwares de control, razones por las que se debe buscar que estos sean lo más intuitivos posibles para evitar percances.

Tomando en cuenta este aspecto se ha ido creando y modificando las formas de comunicación entre humanos y robots, haciendo que por medio de la evolución de los mismos este proceso sea más sencillo, (Steels, 2003), (Amer, Zamzuri, Hudha, & Kadir, 2017) y (Wolf, Assad, Vernacchia, Fromm, & Jathani, 2013) explican lo relevante que es este tema en cuanto a

las aplicaciones robóticas, así como la evolución de los diferentes lenguajes de comunicación entre humanos y robots o entre robots.

También hay que tomar en cuenta la coordinación existente al momento de comandar un sistema robótico, ya sea que el sistema conste de un solo robot o de múltiples sistemas robóticos que deben actuar en conjunto para desarrollar así una buena operación como se muestra en los trabajos de investigación realizados por (Doriya, Mishra, & Gupta, 2015), (Stump, Jadbabaie, & Kumae, 2008), (Ollero & Merino, 2004) y (Dongjun, Martinez, & Spong, 2006) (Orbea, y otros, 2017). En estos trabajos también explican que existen dos tipos de control para realizar la coordinación de dispositivos; el uno centralizado, mismo que consiste en que todos los robots se coordinan de acuerdo a los movimientos de un robot, y el descentralizado en el cual cada uno de los robots coordinan sus movimientos de tal manera que no existan colisiones (Rojas, Aguilar, Álvarez, & Grijalva, 2019) (Quisaguano, y otros, 2018) (Tinizaray, Aguilar, & Lucio, 2022) (Quisaguano, Alvarez, Pardo, Zahira, & Aguilar, 2018).

(Mondada, Franzi, & lenne, 1994) y (Michael, Fink, & Kumar, 2007) en sus investigaciones proceden a hablar de otro aspecto importante que es la comunicación de los equipos para así poder realizar el envío y retorno de señales a las unidades, esto a su vez permitirá que interactúen los sistemas con el entorno en el que están realizando sus funciones respectivas de acuerdo al trabajo que esté realizando el o los sistemas de robots.

En la **Figura 36** se puede observar la estructura general del subsistema de control del robot R-Hex, el cual se basó en el manejo del robot por medio de una aplicación, la cual fue programada de tal manera que logre cumplir con los criterios de movilidad y envío/recepción de datos del proyecto. Por otra parte, se realizó un HMI dentro del sistema operativo, el cual permitirá el control del robot manipulando de manera física por medio de la pantalla táctil de un dispositivo móvil.

**Figura 36.**

Desglose del diseño del sistema de control del robot R-Hex



### **Movimiento del robot “R-HEX” y funcionamiento del robot.**

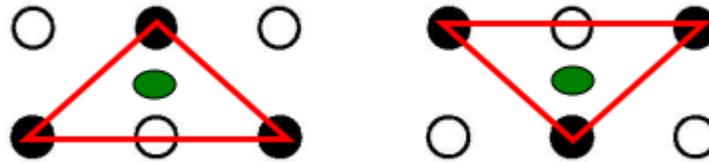
El robot R-HEX al igual que la mayoría de robots toma prestada la forma de un organismo viviente, en este caso un insecto de seis patas, razón por la que se ha estudiado la forma de movimiento de los insectos, así como la estructura y forma de las extremidades, esto ayuda a analizar de manera más eficaz la forma de locomoción que debe poseer el robot para un correcto funcionamiento y movilidad.

Tomando en cuenta esto se tiene que para obtener una estabilidad al momento de moverse el robot RHEX al igual que los insectos en los que se basa debe poseer un mínimo de 3 patas en reposo o soportando el peso mientras las otras tres rotan para dar el avance del modelo (Moore, 2002), este movimiento garantiza la estabilidad del prototipo.

En la **Figura 37** se muestra la posición que deben poseer la patas del robot RHEX en el momento de realizar su traslado, como se observa el objetivo de esto es que entre las patas asentadas se garantice que se forma un triángulo en cuya mitad se encuentre posicionado el centro de gravedad de todo el robot, razón por la que es necesario mantener equilibrado los pesos de los componentes que conforman al robot RHEX.

**Figura 37.**

*Fases de posicionamiento de patas del robot R-Hex al momento de caminar*



*Nota.* Tomada de Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod , por Moore, 2002, Canada: McGill University.

Sin importar la dirección de movimiento el robot RHEX deberá mantener siempre el apoyo en tres de sus patas para garantizar de esta manera una mayor estabilidad al momento de realizar movimientos de avance o de giro, haciendo de esta manera que el robot RHEX este siempre de pie y listo para realizar otra acción.

En cuanto al movimiento vertical que se genera en el robot al subir una superficie dependerá del modelo de patas que posea, para esto en el trabajo publicado por (Moore, 2002) se realiza un análisis con tres tipo diferentes de patas (**Figura 38**), las cuales dan los resultados de movimiento del prototipo dependiendo el punto de apoyo de la pata, más específicamente en lo que se refiere al subir obstáculos, el estudio especifica el movimiento que se genera con cada una de las patas que se probaron como se muestra en la **Figura 39**.

**Figura 38.**

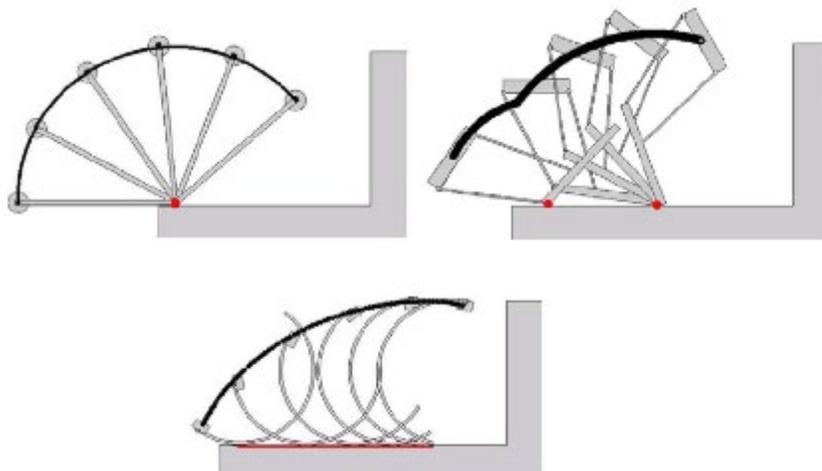
*Prototipos de patas empleados en modelos R-Hex*



*Nota.* Tomada de Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod, por Moore, 2002, Canada: McGill University.

**Figura 39.**

*Trayectorias del robot R-Hex con cada prototipo de pata diseñado*



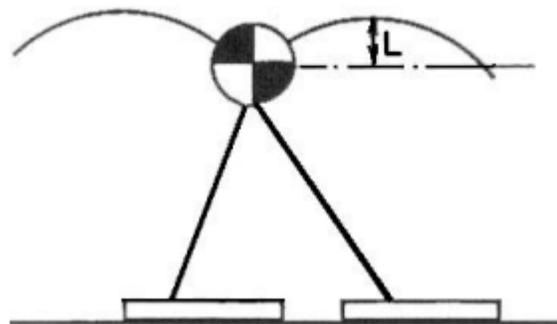
*Nota.* Tomada de Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod, por Moore, 2002, Canada: McGill University.

En este mismo estudio se realiza el análisis de diversos puntos para seleccionar un modelo de patas para que el robot sea más eficiente, obteniendo como resultado que las patas de media circunferencia son las más adecuadas para este tipo de robot permitiendo mejorar las características de movilidad de robot tanto en terrenos planos como al momento de evadir obstáculos o subir gradas.

En cuanto al movimiento que se genera en el centro de masa del robot mientras avanza en línea recta es el mostrado en la **Figura 40**, donde (Moore, 2002) especifica en su estudio que el centro de gravedad sigue una trayectoria semicircular que se repite de manera constante mientras se repite el movimiento realizado por el robot.

**Figura 40.**

*Trayectoria del centro de masa del robot R-Hex al momento de caminar*



Nota. Tomada de Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod , por Moore, 2002, Canada: McGill University.

**Modos de comunicación.**

Otro ámbito importante al hablar de tele operación es la de la comunicación que debe existir entre equipos (Cabras, Rosell, Pérez, Aguilar, & Rosell, 2011), en el caso de los robots tele operados entre el ordenador que es controlado por un operario humano el cual decidirá las acciones a realizar por el robot y el robot controlado el cual es el encargado de realizar las acciones solicitadas.

En robótica existen muchos sistemas de comunicación que permiten realizar estas acciones de control de equipos, la selección del medio de comunicación dependerá de las funciones o tareas que realizará el robot, esto se debe a que por las características propias de cada forma de comunicación tendrá fortalezas y debilidades entre las cuales resaltan la rapidez de transmisión, el rango de alcance y la autonomía que los sistemas otorgaran al robot (Grijalva & Aguilar, Landmark-Based Virtual Path Estimation for Assisted UAV FPV Tele-Operation with Augmented Reality, 2019).

Por ejemplo, al elegir una comunicación por medio de cable se podrá hacer una comunicación rápida, fiable y robusta con el equipo a controlar, pero la capacidad de movilidad del equipo se vería restringida por la longitud de cable que se utiliza, haciendo que un robot de exploración se vea limitado en alcance y en movilidad entorpeciendo en gran manera la labor para la que fue diseñado, o en caso de utilizar un sistema de comunicación infrarroja se vería limitado por el alcance de la recepción de la luz así como la posibilidad de falla al momento de existir un obstáculo que impida el paso de la señal infrarroja.

(Wilke & Braunl, 2001) en su trabajo explica que hay tres elementos que muchos autores han considerado en sus estudios que son requeridos para realizar una buena comunicación, los cuales son:

- **Rango de comunicación:** el autor explica que el rendimiento de los sistemas de comunicación no es proporcional a su rango de amplitud. Para calcular el rango de comunicación se realiza una minimización del tiempo de retraso de las comunicaciones existentes entre robots en movimiento.
- **Contenido de las comunicaciones:** la eficiencia de las comunicaciones se ve influenciada por el contenido que posee y la forma en la que este se transmite. En cuanto al contenido de las

comunicaciones se distinguen tres formas: ninguna comunicación en absoluto, transmisión de información de estado y transmisión de información de objetivo.

- **Garantía de la comunicación:** este factor se refiere a que la arquitectura que establece la comunicación de un sistema debe ser adaptable, confiable, sin demoras indebidas y resistente a fallas.

A continuación, se detallarán diversos sistemas de comunicación empleados en robótica.

### ***Sistema de comunicación por cable***

La transmisión de información por medio de cable, según (Pazmiño & Astudillo, 1998) este sistema de comunicación consiste en realizar el envío señales a través de un cable especial diseñado específicamente para esta función, se tiene una gran variedad de cables dependiendo la aplicación como por ejemplo existen cables sólidos, gemelos, unifilares, multifilares, multiconductores, multipares, pares trenzados, blindados, coaxiales y de fibra óptica, siendo estos últimos uno de los más recientes y efectivos, todos estarán fabricados con diferentes materiales y aislamientos según el uso de cada cable.

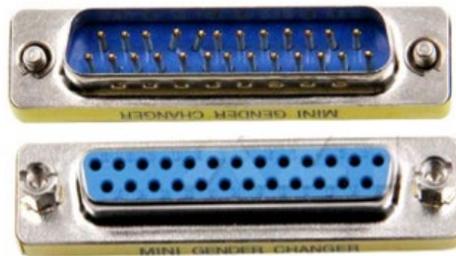
Una de las comunicaciones más utilizadas en este tipo de sistema es la que se realiza a través de los puertos seriales de distintas computadoras y/o tarjetas de control electrónicas, la razón por la que se conoce como comunicación serial se debe a que los datos o bits se envían y se reciben uno detrás de otro o “en serie”. (Carrasco, 2015) en su trabajo explica que este tipo de comunicación es asíncrona y para realizar una comunicación es necesario disponer de un bit adicional, este bit permitirá que el emisor y el receptor cambien la señal del pulso, permitiendo de esta manera el flujo de datos.

Para la comunicación serial comúnmente se utiliza el protocolo RS-232, este protocolo permite alternar los datos de información de estado, toda esta información será determinada por el emisor y receptor al momento de generar una conexión de acuerdo a la programación realizada en los puertos seriales. El protocolo RS-232 consiste en enviar señales digitales de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico) a

través de un conector denominado DB-25 de 25 pines (**Figura 41**) o un puerto DB-9 de nueve pines (**Figura 42**), esto se da en el caso de entrada y salida de datos, en el caso de las señales de control se invierten los valores de las señales digitales.

**Figura 41.**

*Conector DB 25 Macho y Hembra*



*Nota.* Tomado de (Megatronica)

**Figura 42.**

*Conector DB 9 Macho y Hembra*



*Nota.* Tomado de Diseño, construcción e implementación mecatrónica, por DCIM.

(Romero & Cueva, 2015) en su trabajo también explica que existe otro tipo de comunicación que es la síncrona, este tipo de comunicación requiere dos líneas, una por la que se transmiten los datos y la otra para transmitir pulsos por medio de un reloj, esto ayudará a determinar cuándo un dato es válido y cuando no. Al igual explica sobre otros protocolos de comunicación serial como el RS-422, RS-485, entre otros permitiendo ampliar el tema sobre la comunicación serial.

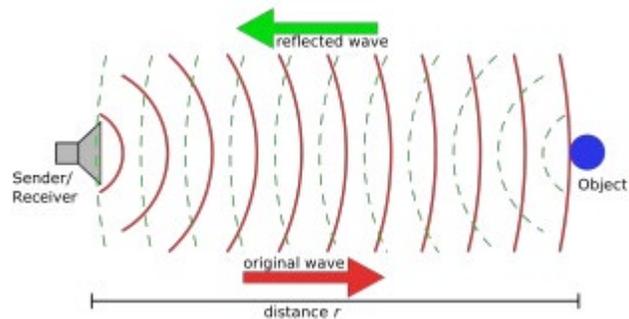
### ***Sistema de comunicación por Ultrasonido***

Este tipo de sistemas se basan en el uso de ondas acústicas cuyas frecuencias están por encima del límite que puede ser percibido por el ser humano (>20 kHz), estos sonidos son percibidos por sensores ultrasónicos, los mismos que específicamente están diseñados para este trabajo de envío y recepción de estas señales.

El funcionamiento de este sistema de comunicación de datos es bastante sencillo, (Foguet, 2016) explica que el sistema funciona por medio de un transmisor que genera una radiación ultrasónica, misma que al encontrar un objeto es reflejada o rebota en dirección del receptor y es captada (**Figura 43**). Posteriormente, se realiza una medición del tiempo transcurrido en la generación de la onda inicial hasta que se captó el eco generado tras chocar la onda original, con estos datos y con ayuda de fórmulas matemáticas se determina la distancia existente entre el sensor y el objeto en cuestión.

**Figura 43.**

*Esquema de funcionamiento de un sistema ultrasónico*



*Nota.* Tomado de Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa., por Foguet, 2016, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Este tipo de sistemas son utilizados frecuentemente para reconocimiento de entornos y medición de distancias, esta última aplicación puede ser modificada para utilizar este sistema como un sistema de prevención de colisiones o en su defecto puede ser empleado como sonar permitiendo conocer objetos que se hallan sumergidos bajo el agua. En el trabajo realizado por (Dominguez & Guerrero) se ve una aplicación adicional que es la de transmitir datos entre dos transductores usando la modulación de amplitud de las ondas ultrasónicas, permitiendo de esta manera la comunicación entre robots submarinos.

### ***Sistema de comunicación por luz infrarroja***

Similar al sistema de comunicación por ultrasonido, este sistema se basa en la emisión de una luz infrarroja cuya característica principal es la longitud de onda a la que trabaja (**Tabla 2.**), refiriéndonos a una longitud entre los 780nm y 1 mm, siendo esta una longitud muy superior a los 400 a 780 nm de longitud de onda donde se encuentra el espectro visible al ojo humano.

**Tabla 2.**

*Clasificación de la luz de acuerdo a la longitud de onda*

	<b>Radiación</b>	<b>Longitud de onda</b>
<b>Ultravioleta</b> <b>100-400 nm</b>	Ultravioleta C	100 nm – 280 nm
	Ultravioleta B	280 nm – 315 nm
	Ultravioleta A	315 nm – 400 nm
<b>Visible</b> <b>400-780 nm</b>	Violeta	400nm – 455 nm
	Azul	455nm – 490 nm
	Verde	490 nm – 570 nm
	Amarillo	570 nm – 590 nm
	Anaranjado	590 nm – 620 nm
	Rojo	620 nm – 780 nm
	Infrarroja A	780 nm -1400 nm
<b>Infrarroja</b> <b>780 nm-1 mm</b>	Infrarroja B	1400 nm – 3000 nm
	Infrarroja C	3000 nm – 1 mm

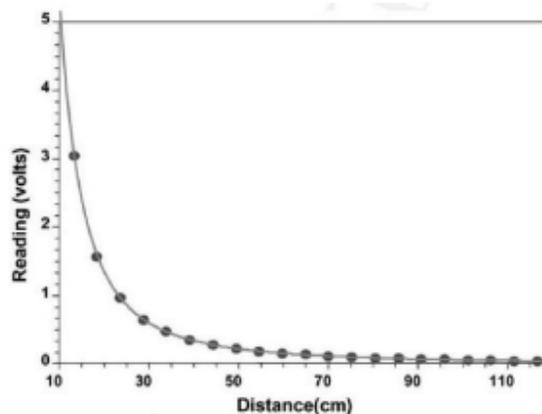
*Nota.* Tomado de (DSCAsturias)

Como se observa en la **Tabla 2.**, la luz infrarroja posee tres niveles dependiendo su longitud. Este tipo de sistemas son empleados en aplicaciones de control de distancia (Jara-Olmedo A. , et al., 2018), rendimiento térmico de sistemas (Nasimba, 2017), en detección de obstáculos (Aguilar, Casalglla, & Pólit, Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles, 2017) entre otras. Este tipo de sistemas de comunicación ofrece una respuesta más rápida a un menor costo, la desventaja que posee es la necesidad de que tanto el emisor como el receptor estén en el mismo campo visual haciendo

que su funcionamiento óptimo sea a cortas distancias y en espacios donde no haya obstáculos entre los dispositivos de transmisión-recepción (Córdova, Jiménez, Pardo, Toalombo, & Aguilar, 2018).

**Figura 44.**

*Diagrama de relación Voltaje de lectura - Distancia*



*Nota.* Tomado de Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa., por Foguet, 2016, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

(Zambrano & Serrano, 2002) explica las características que poseen los sistemas de comunicación infrarroja, características tales como el ser inmunes a las interferencias y ruido que se genera en las comunicaciones de tipo radio eléctrico, también explica que por sus características como el no atravesar cuerpos sólidos es más fácil confinar la señal infrarroja, evitando de esta manera la filtración de información o la interceptación de la misma mejorando la seguridad sin necesidad de utilizar complejos sistemas de protección. También hay que tomar en cuenta que de igual manera los sistemas infrarrojos también pueden sufrir de interferencia por el ruido infrarrojo que podrían venir de fuentes como son el sol o la luz incandescente o fluorescente, esto junto a las pérdidas que se producen en la propagación de la onda limita el

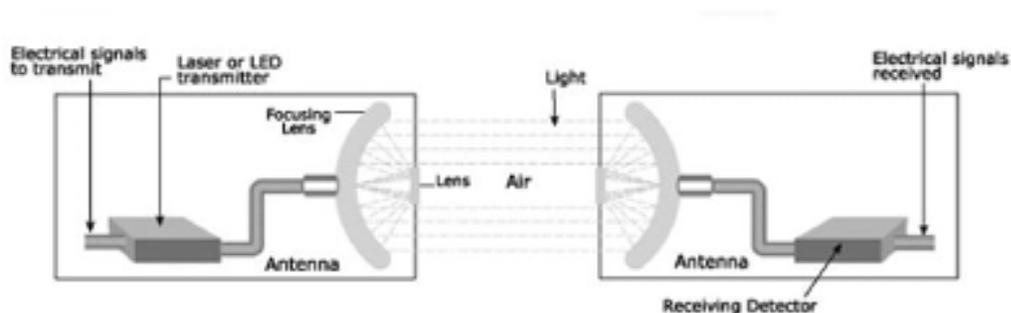
alcance de este tipo de sistemas debido a la relación señal ruido en el receptor, esta relación disminuye a medida que se alejan el receptor y el transmisor (**Figura 44.**).

Entre los sistemas de comunicación por luz infrarroja tenemos el sistema FSO. Este sistema de comunicación, según lo explicado por (Foguet, 2016), se basa en la transmisión de señales ópticas en el espacio, este tipo de señales son similares a las enviadas a través de los cables de fibra óptica. El envío de señales inalámbricas en este tipo de sistemas se produce por medio de un diodo emisor de luz o un láser los mismos que funcionan como fuente de transmisión.

Este sistema convierte la señal estándar de datos enviada por el diodo emisor de luz o el láser y lo convierte a formato digital, esta señal es enviada libremente por el espacio hasta ser captada por un receptor y la convierte a formato eléctrico luego se modulan para obtener los datos enviados (**Figura 45.**).

**Figura 45.**

*Funcionamiento y componentes de los sistemas FSO*



*Nota. Tomado de Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa., por Foguet, 2016, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.*

### ***Sistema de comunicación por Bluetooth***

Los sistemas de comunicación por bluetooth son sistemas que usan la radiofrecuencia para realizar el envío y recepción de datos, este sistema es uno de los más utilizados en lo que se refiere a robots móviles autónomos, esto se debe a que los sistemas bluetooth a diferencia de la comunicación IR no requieren estar en el mismo campo visual el receptor y el transmisor, aunque si es recomendable que lo estén. Este sistema de comunicaciones según explica (Foguet, 2016) es típico de las redes WPAN (Wireless Personal Area Network) y usa el estándar internacional IEEE 802.15.1. También explica que dependiendo de su potencia de alcance máximo los sistemas bluetooth se clasifican en tres clases como se muestra en la **Tabla 3.:**

**Tabla 3.**

*Clasificación de los dispositivos bluetooth de acuerdo a su potencia máxima y su alcance*

<b>Dispositivo</b>	<b>Potencia máxima</b>	<b>Alcance</b>
<b>Clase 1</b>	100 mW (20 dBm)	100 m
<b>Clase 2</b>	2.5 mW (4dBm)	10 – 15 m
<b>Clase 3</b>	1 mW (0 dBm)	1 m

*Nota.* Tomado de Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa., por Foguet, 2016, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

(Lorefice, 2003) explica varias características de los sistemas de comunicación bluetooth, entre las cuales tenemos:

- Entre las principales características se tiene que estos sistemas permiten transmisiones más rápidas y seguras tanto de voz como de datos, aun cuando los dispositivos se encuentran alejados.

- Dependiendo la clase del dispositivo y debido a que su función está orientada principalmente al uso personal las distancias de comunicación va de los 10 a 15 metros, pero con los adecuados amplificadores y antenas se puede expandir esta distancia a un aproximado de 100 metros.
- Las conexiones de este tipo de comunicaciones son de manera inmediata y su conexión se mantiene incluso cuando los dispositivos se encuentran fuera del rango de acción.
- Los sistemas de comunicación bluetooth no necesitan que haya una línea de visión directa entre los dispositivos a diferencia de otros sistemas de comunicación existentes.

### ***Sistema de comunicación por Wi-Fi***

Este sistema de comunicación al igual que el sistema bluetooth permite la transmisión de información por medio del uso de las ondas de radio, es decir es un sistema inalámbrico el cual fue diseñado principalmente para el uso en redes de área local WLAN (Wireless Local Area Network) (Pardo, Aguilar, & Toulkeridis, 2017). La tecnología Wi-Fi tiene la ventaja de permitir conexiones bastante rápidas y seguras, y su área de cobertura varía entre los 90 a 100 metros.

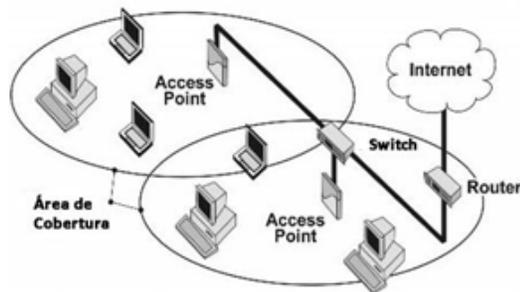
El sistema Wi-Fi según menciona (Foguet, 2016) en su trabajo, tiene una infraestructura (**Figura 46.**) que está compuesta de tres elementos esenciales los cuales son:

- Estaciones, son los dispositivos electrónicos los cuales son utilizados por los usuarios para conectarse a la red, estos dispositivos deberán obligatoriamente poseer una interfaz de red que sea compatible con el estándar IEEE 802.11.
- Medio, es el espacio libre que permite la transmisión de las ondas electromagnéticas que llevan la información.

- Puntos de acceso, este es el tercer elemento necesario para formar la infraestructura de la comunicación Wi-Fi, este elemento actúa como enlace entre el medio y el sistema de distribución que nos comunicara con la red.

**Figura 46.**

*Ejemplo de funcionamiento de red generada por un sistema WiFi*



*Nota.* Tomado de Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa., por Foguet, 2016, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Al igual que el resto de sistemas de comunicación el sistema Wi-Fi tiene sus ventajas y desventajas, (Cárdenas Villavicencio, Molina Ríos, Morocho Román, Novillo Vicuña, & Moreno Sotomayor, 2017) y (Kahar, Sulaiman, Prabuwno, Akma, & Abu, 2012) las menciona en sus investigaciones, entre las ventajas que tiene el sistema es la de permitir un acceso rápido y fácil a internet, también la instalación es más rápida y sencilla a la de una red cableada, también permite que los equipos que están al alcance de la red se conecten de manera sencilla, esto permite tener una gran movilidad de los equipos; la tecnología Wi-Fi también permite extender el alcance de una red cableada, encontrar equipos para armar una red es fácil debido a su alta comercialización.

Las desventajas que poseen los sistemas Wi-Fi serian en parte que la velocidad y transmisión es menor si la comparamos con una red cableada, la señal de la red puede verse afectada por interferencias provocadas por el clima u otros fenómenos (Cruz, Meneses, Aguilar, & Andrade-Miranda, 2019). Otra desventaja que presentan los sistemas Wi-Fi es que debido a su libre propagación personas ajenas pueden proceder a penetrar ilegalmente a la red y a la información que guarda y una de las desventajas más fuertes que posee es que este tipo de sistemas no puede ser utilizada en sitios donde la radiofrecuencia podría afectar otros equipos como es el caso de hospitales y aviones.

### ***Sistema de comunicación ZigBee***

Los autores en (Foguet, 2016) explican en sus trabajos que este sistema de comunicación fue desarrollado con la finalidad de satisfacer necesidades de fácil aplicación, mismas que requieran alta fiabilidad, bajo costo, bajo consumo energético y que no requieran grandes velocidades de transmisión de datos. Estas razones hacen que el sistema de comunicación ZigBee sea empleado comúnmente en redes de sensores donde no se requiera una tasa de envío de datos alta.

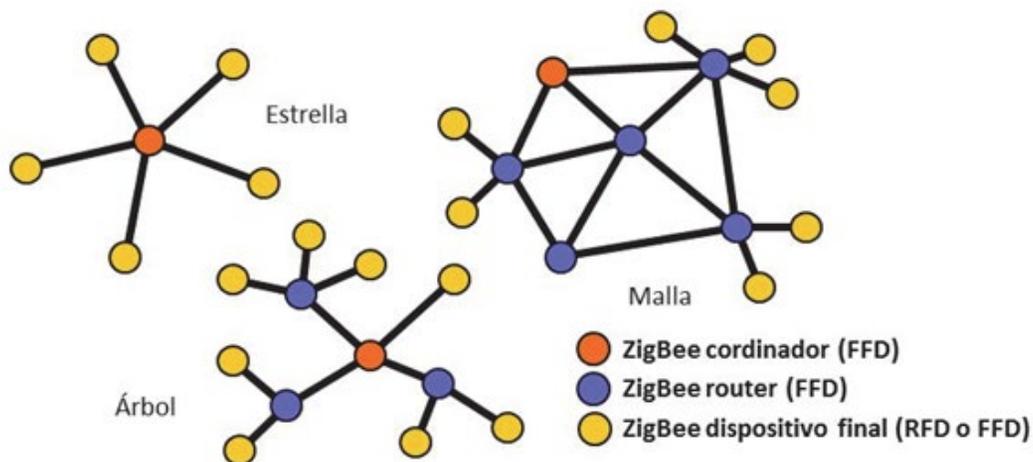
La velocidad de transmisión máxima de los sistemas ZigBee es de 250Kbps y opera en bandas sin licencias como 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz, estas características serían suficientes para satisfacer las necesidades que se requieran por sensores destinados para automatización. ZigBee también permite crear redes inalámbricas siempre y cuando la cantidad de datos transmitidos no sea grande. Al armar una red ZigBee se puede observar dos tipos de dispositivos diferentes los cuales son:

- Full Function Device – FFD, son llamados también nodos activos, esto gracias a la capacidad que poseen para computar gracias a que llevan implementados un módulo general de comunicación, el mismo que le permite establecer un intercambio de datos con dispositivos RFD o con otros FFD. Estos dispositivos pueden operar como coordinador, router o como dispositivo final de la red.

- Reduced Function Device – RFD, llamados también nodos pasivos, este tipo de dispositivos solo pueden comunicarse con dispositivos FFD, jamás entre dispositivos RFD's, se puede decir que estos dispositivos actúan como sensores en la red ZigBee armada

Otra de las características del sistema de comunicación ZigBee es que soporta tres tipos de topologías de red diferentes (estrella, malla y árbol) (Salgado, Tierra, Sandoval, & Aguilar, 2017) (Tierra, F, & Aguilar, 2017), en las cuales se encontraran los dispositivos cumpliendo las diferentes modalidades de operatividad mencionados como se muestra en la **Figura 47**.

**Figura 47.** Tipos de topologías utilizadas en los sistemas ZigBee



*Nota.* Tomado de REDES INALÁMBRICAS., por Salazar, 2017, Barcelona.

La topología estrella se caracteriza por estar formada por un coordinador central o coordinador de la WPAN al cual se conectan varios dispositivos finales, también se conoce a esta topología como comunicación punto – multipunto. Uno de los inconvenientes que presenta este tipo de red es que el alcance máximo se limita al alcance que posea el nodo coordinador. En la topología malla, se tiene la característica de que cualquier dispositivo que pertenezca a la red

puede conectarse a otro siempre y cuando estén dentro del alcance de comunicación el uno del otro, para esto utilizan los dispositivos routers como repetidores de la información, al poderse comunicar entre distintos dispositivos se genera la ventaja de que no se tiene un solo camino para el envío de datos, garantizando que la información llegara a su destino en el caso de existir un nodo caído. Por último, se tiene la topología tipo árbol, esta topología es un caso especial de la red en malla, en esta red la mayoría de dispositivos son FFD y al extremo de una rama se conecta un dispositivo RFD como un nodo hoja dando fin de esta manera a la secuencia de esa línea de transmisión, esta estructura es propiamente jerárquica y al igual que la topología malla este tipo de topología favorece a la expansión de la red.

Existen otros tipos de comunicación utilizados para realizar el envío de señales a sistemas robóticos y muchos de estos lenguajes de comunicación son compatibles entre sí, razón por la que robots como el mencionado por (Garawi, Istepanian, & Abu-Rgheff, 2006). OTELO, es un robot que es adaptable para operar con diversos tipos de comunicación (satelital, 3G, Wireless y terrestre), el robot no disminuye su operatividad con cada uno de los tipos de programación, al contrario, su desempeño se mantiene estable y sin fallas.

### **Geolocalización de dispositivos.**

Durante el desarrollo de los sistemas robóticos autónomos y semiautónomos, uno de los principales retos ha sido el de conseguir un rastreo de los diferentes dispositivos móviles que se encuentran en una determinada zona, ya sea con el fin de ubicar al equipo (Tituaña, Amaguaña, Calderón, Merizalde, & Aguilar, 2020) (Merizalde, Aguilar, & Calderón, 2020), mapear una zona (Rodríguez, et al., 2017) o saber la posición del sistema con respecto a otros del mismo o de diferente tipo que se encuentren en el entorno en que se desarrolla la actividad (Tenezaca, Canchignia, Aguilar, & Mendoza, 2019) (Galarza, Pérez, Serrano, Tapia, & Aguilar, 2018).

Según (Lamon & Siegwart, 2007) y (Botta & Quaglia, 2020), las tareas de la localización se dividen en dos fases; la primera consiste en la colocación de sensores estimación de posición instantánea, y la segunda fase que en cambio consiste en la utilización de mecanismos de detección exteroceptivo absoluto. Dicha detección exteroceptivo busca mantener la localización predicha actualizada (Salcedo, Aguilar, Cobeña, Pardo, & Zahira, 2018) (Manosalvas, Guillén, Collaguazo, & Aguilar, 2018) (Salcedo, Sandoval, Cobeña, & Aguilar, 2017). No obstante, es común que se generen problemas en el caso de superficies irregulares, para lo cual se hace una estimación completa del estado del móvil en 3D (Aguilar & Morales, 3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms, 2016) y de cómo está posicionado el modelo robótico (Aguilar & Angulo, Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles, 2016), permitiendo una mejor estimación de localización del robot y evitar el aumento del error de posición generado en el robot (Segarra, Caballeros, Aguilar, Samà, & Rodríguez-Martín, Orientation Estimation Using Filter-Based Inertial Data Fusion for Posture Recognition, 2019) (Carrera, Merizalde, Calderón, & Aguilar, 2020).

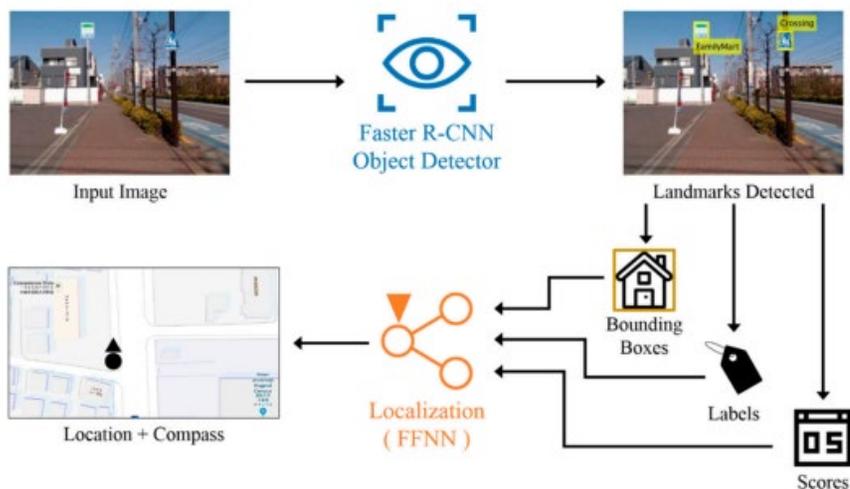
Un método, usado por varios sistemas de geolocalización, que (Nerguizian, Belkhou, Azzouz, Nerguizian, & Saad, 2004), (Rehman & Zheng, 2013) y (Cabrera & Jizhong, 2008) exponen en sus respectivos trabajos, es el sistema de geolocalización utilizando la técnica de huellas dactilares, el mismo que usa la intensidad de información de señal recibida (RSS por sus siglas en inglés), que a su vez es recopilada en múltiples ubicaciones de receptores para encontrar las coordenadas del usuario. No obstante, Este método es considerado como muy poco confiable debido a su vulnerabilidad a los factores externos.

(Nilwong, Hossain, Kaneko, & Capi, 2019) explica otro método de geolocalización llamado localización R-CNN rápida (Falconí, Pérez, & Aguilar, 2019). Este método consiste en que mientras el robot navega el dispositivo R-CNN detecta puntos de referencia en la imagen

capturada por la cámara (Angulo & Aguilar, 2013), posteriormente los componentes de cada punto de referencia son enviados al FFNN (Conci, Falconi, Perez, & Aguilar, 2020) (Falconi, Perez, Aguilar, & Conci, 2020) para su localización (**Figura 48.**).

**Figura 48.**

*Esquema de funcionamiento de la localización R-CNN rápida*



*Nota.* Tomado de Deep Learning-Based Landmark Detection for Mobile Robot Outdoor Localization., por Nilwong, Hossain, Kaneko, & Capi, 2019, Machines.

### Capítulo 3 – Diseño Mecatrónico

Para la parte de desarrollo del proyecto se ha tomado la metodología mecatrónica basada en la norma VDI 2206 (Modelo en V) (VDI Richtlinien, 2004), esto se debe a que permite seguir una guía adecuada para el desarrollo e implementación física del proyecto, lo cual otorga una interacción adecuada de conocimientos.

#### Requerimientos de ingeniería

##### *Requerimiento principal*

Se requiere un producto mecatrónico capaz de movilizarse de manera remota en terrenos irregulares mientras transmite la localización del prototipo en tiempo real hacia el operador.

##### *Funciones*

**Localización GPS:** Por medio de un dispositivo de posicionamiento global (GPS) se procede a enviar los datos de longitud y latitud del prototipo robótico, dando como resultado el conocimiento de la ubicación real del sistema.

**Movilización en zonas complicadas:** El sistema de movimiento coordinado de los motores del sistema permite la rotación de las 6 patas del robot de tal forma que tenga movilidad en distintos tipos de terrenos irregulares.

**Control remoto:** El sistema es controlado a distancia por el operador, enviando señales de manera inalámbrica lo cual permite el control de movimiento y funciones del prototipo robótico.

### ***Requisitos de confiabilidad***

**Repetibilidad de posicionamiento:** El robot hexápodo “R-Hex” envía los datos respectivos de ubicación del robot de manera continua según lo especificado por el programa lo cual permite que se conozca la ubicación del robot durante su funcionamiento.

**Intercambiabilidad de elementos:** Los elementos electrónicos utilizados en la elaboración del proyecto son elementos estandarizados y comerciales de fácil obtención. En el prototipo realizado se puede observar que las partes correspondientes a la estructura del robot no son estandarizadas, los cuales serían los únicos elementos que en caso de sufrir algún daño deberían ser fabricados de acuerdo a los planos del robot “R-Hex”, pero a su vez, aunque las piezas no son estandarizadas el material que las conforma si lo es. Esto permite reducir el tiempo de fabricación de los elementos.

**Manejo de software:** El software de control del robot se lo realizó de tal manera que su manejo es similar a un control de juegos, los botones que controlan cada una de las partes o acciones del robot son visibles y de fácil manipulación.

### ***Requisitos de seguridad***

**Protección de zonas móviles:** El robot “R-Hex” de acuerdo con su diseño solo posee como elementos móviles sus articulaciones, mismas que le permiten movilizarse con cada giro de las mismas, debido a que no pueden estar cubiertas u ocultas debido a la función que realizan, se recomienda tener cuidado al momento de manipular el robot, los motores se encuentran firmemente sujetos a la estructura del robot y protegidos dentro de la misma.

### ***Requisitos de costos de desarrollo y fabricación***

**Bajo costo:** Se desarrollo un producto de bajo costo, capaz de competir con robots de exploración existentes en el mercado.

**Materiales livianos y resistentes:** Es necesario que la estructura pueda transportarse con facilidad, por lo que se deben estudiar materiales livianos pero que no comprometan la integridad de la estructura y funcionamiento de los sistemas.

**Materiales reciclables:** Como compromiso con el medio ambiente, los materiales empleados en su mayor parte son reciclables con el fin de reducir la cantidad de desperdicios que se generen al momento de sustituir elementos del prototipo.

Como materiales principales el robot posee partes de aluminio, plástico (acrílico) y madera mdf, mismos que pueden ser reciclados de diversas maneras.

### **Especificación**

**Nombre del producto:** Robot experimental "R-Hex"

**Funciones básicas del producto:** El robot "R-Hex" permitirá realizar operaciones de búsqueda y mapeo de zonas por medio de comunicación remota.

**Características especiales del producto:** El robot "R-Hex" permitirá la inspección de zonas irregulares y de difícil acceso para lo cual deberá poder moverse con relativa facilidad en este tipo de zonas.

### **Módulos del sistema:**

- **Subsistema mecánico:** Para la estructura externa del modelo se utilizó una lámina de aluminio compuesto debido a la resistencia que presenta el material y su peso es bajo en comparación con otros materiales. La parte interna del prototipo se elaboró en madera mdf por su bajo costo, bajo peso y sus características físicas, mismas que evitan la deformación del prototipo.

- **Subsistema Eléctrico:** El sistema posee el cableado respectivo el cual permite la transmisión de señales desde la tarjeta de control instalada hacia los distintos actuadores y sensores adaptados en el prototipo, permite la comunicación entre tarjetas y elementos propios del sistema.
- **Subsistema de control:** Para el control del prototipo se realizó una aplicación para celular la cual permite, por medio de la pulsación de los diferentes botones, activar o desactivar las funciones del modelo.

#### **Especificaciones Técnicas:**

- **Peso del cuerpo:** 13 Kg
- **Peso de la pierna:** 0.13 Kg
- **Dimensiones:** 550x550x110 mm
- **Tecnología:** Comunicación WiFi
- **Longitud de la pierna:** 150 mm.
- **Espacio entre piernas:** 160 mm.

**Ambiente de servicio:** Debido a sus características, el robot "R-Hex" está pensado para el funcionamiento en exteriores, en lugares de difícil acceso y en zonas de alto riesgo sin importar si la zona es irregular o posee obstáculos.

Esto se debe a que la estructura del robot es resistente a impactos moderados, sus patas rotatorias le permitirán moverse sobre escombros o áreas irregulares a la vez que disminuyen el impacto de golpes sobre la estructura del robot. Por otro lado, el control a distancia del robot garantiza la seguridad del operario.

**Entrenamiento requerido por el usuario:**

- Manejo de robots a distancia
- Manejo de software para conexión con el producto

**Limitaciones del sistema:**

El prototipo estará diseñado para resistir las condiciones que puedan presentarse en un ambiente externo como polvo, piedras, y salpicaduras, pero debido a las características de diseño el robot no es sumergible.

La temperatura de operación del robot se encuentra entre 8°C y 40°C, esto a su vez restringe el funcionamiento del mismo a zonas con temperaturas que se encuentren fuera del rango especificado.

La distancia de control se encuentra comprendida en un rango de 8 a 10 metros para el correcto funcionamiento del robot, una vez superado el rango se podría perder la comunicación entre dispositivos lo que provocaría que el sistema deje de responder a los comandos enviados por el usuario.

**Diseño del subsistema mecánico**

Para el desarrollo del diseño mecánico de este prototipo se empleó el diseño asistido por computador, lo cual permitió obtener un mayor enfoque de acuerdo a las dimensiones del prototipo preparado y las piezas que serían indispensables para lograr ensamblarlo.

### ***Diseño estructural interno y externo***

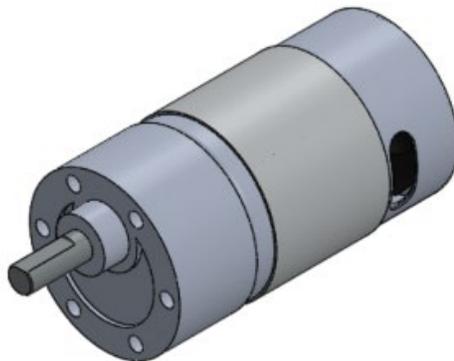
Como se ha mencionado previamente se realizó el prototipo del robot basándolo en diseños ya elaborados, dando como resultado un grupo de ideas que han permitido desarrollar al prototipo robótico R-HEX de manera eficiente.

**Diseño interno.** La parte interna de la estructura del robot R-Hex, también conocida como chasis, es la parte que soporta el peso del prototipo, por lo que se la realizó de un material que genere buena resistencia, pero a la vez sea liviano, teniendo en cuenta que mientras más aumente el peso del robot más robustos deberán ser los motores a utilizar. Para iniciar el modelado del chasis del robot se procedió a seleccionar los motores a utilizarse.

Se escogieron motores DC de 12 Voltios (**Figura 49.**), mismos que son de alto torque para permitir el movimiento del robot sin ningún problema.

### **Figura 49.**

*Modelo de motor DC de 12 voltios*

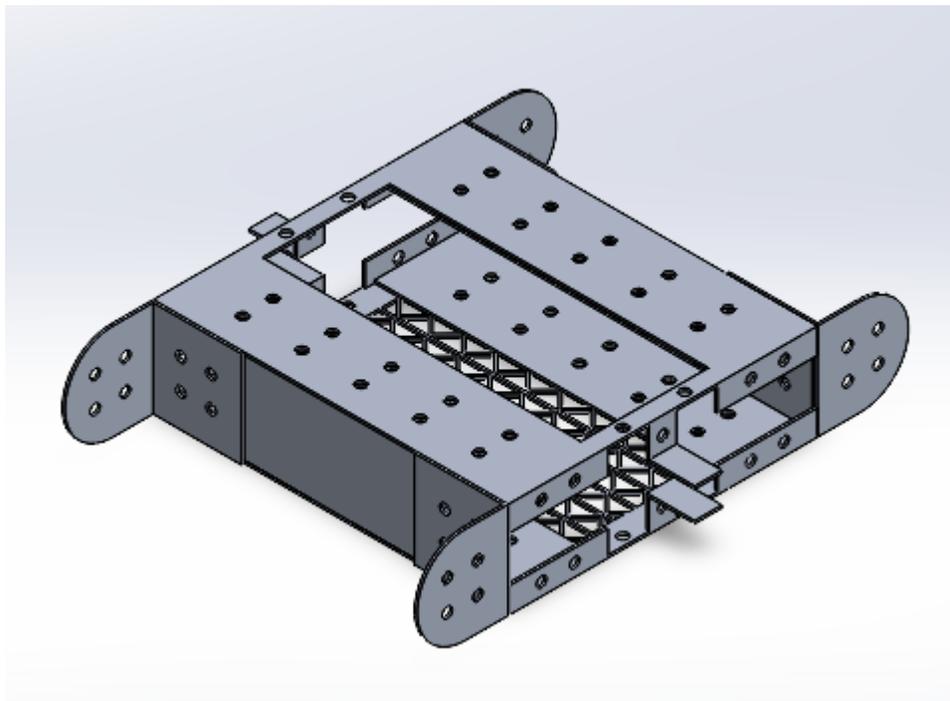


Teniendo en cuenta de que se debe conocer el espacio que ocuparan los elementos dentro de la estructura para realizar el diseño de manera adecuada, se procedió a modelar el motor como primer elemento.

Ya con el diseño del motor realizado, tomando en cuenta que es uno de los elementos que determinan el tamaño del robot, se generó el diseño del chasis del robot R-Hex.

**Figura 50.**

*Modelado de la estructura interna del robot R-Hex*

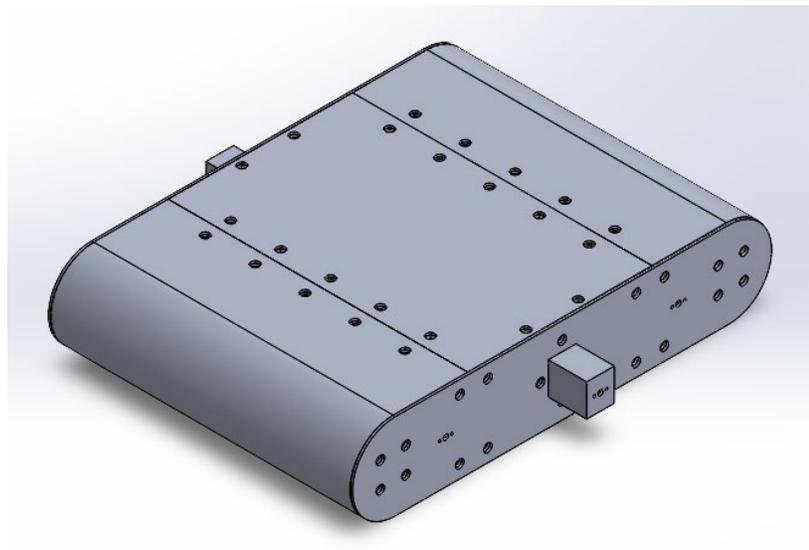


Como se observa en la **Figura 50.**, el diseño del chasis del robot desarrollado busca guardar similitud con los modelos de los prototipos investigados, dando como resultado una estructura conformada por 8 partes individuales las mismas que no se necesitan soldar entre sí, lo cual facilita en gran manera el cambio de piezas en caso de requerirlo.

**Diseño externo.** En cuanto al diseño externo del robot se procedió a diseñar las cubiertas que calcen de manera perfecta sobre cada una de las partes del robot (**Figura 51.**), dando como resultado un acople perfecto entre las partes del robot y garantizando que el ensamble del robot será el óptimo.

**Figura 51.**

*Modelado del prototipo de robot R-Hex (Estructura externa)*



**Diseño de las patas:** Las patas son parte del sistema que permitirá el movimiento del robot, por lo que para que permita el desplazamiento de manera correcta al igual que en la estructura se tomó en cuenta las investigaciones previas realizadas en otros trabajos estudiados.

Teniendo en cuenta que las patas semicirculares son la mejor opción para este tipo de robots se procedió a diseñar las patas dando como resultado un grupo de seis patas realizadas en acrílico

**Figura 52.**

*Modelado del prototipo de robot R-Hex (patas)*



Como se logra observar en la **Figura 52.** la pata está conformada por la unión de piezas lo cual permitió dar mayor firmeza al elemento sin aumentar el peso en gran medida.

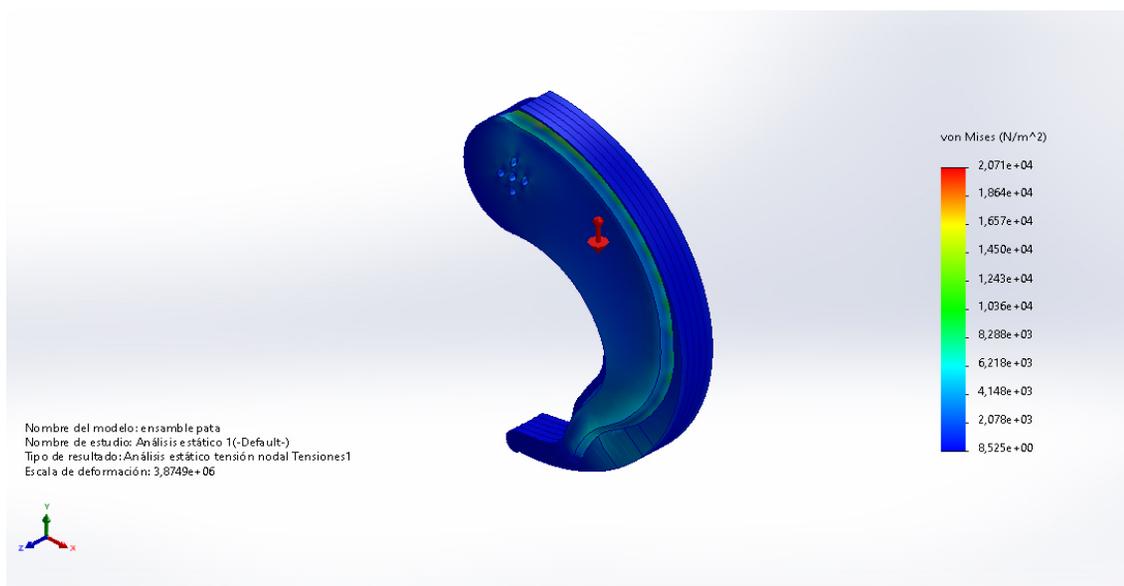
Una vez culminado el diseño de los elementos mecánicos que van a conformar el prototipo del modelo robótico “R-Hex”, se realizó un análisis las partes diseñadas y se tomó los resultados de las dos piezas que podrían presentar fallas con el paso del tiempo, esto se deberá a las funciones que realizan cada uno, los elementos que se consideraron más críticos en el modelo fueron las patas del robot las cuales soportan el peso del robot y le dan movilidad, y las vigas en “C” que se encargan de sujetar la parte superior e inferior de la estructura interna del robot.

Los resultados obtenidos después de analizar la pata del robot “R-Hex” se muestran en la **Tabla 4., Tabla 5. y Tabla 6.**

Tabla 4.

## Análisis de tensiones de Von Mises de la pata del robot "R-Hex"

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von	8,525e+00N/m <sup>2</sup>	2,071e+04N/m <sup>2</sup>
	Mises	Nodo: 23547	Nodo: 3

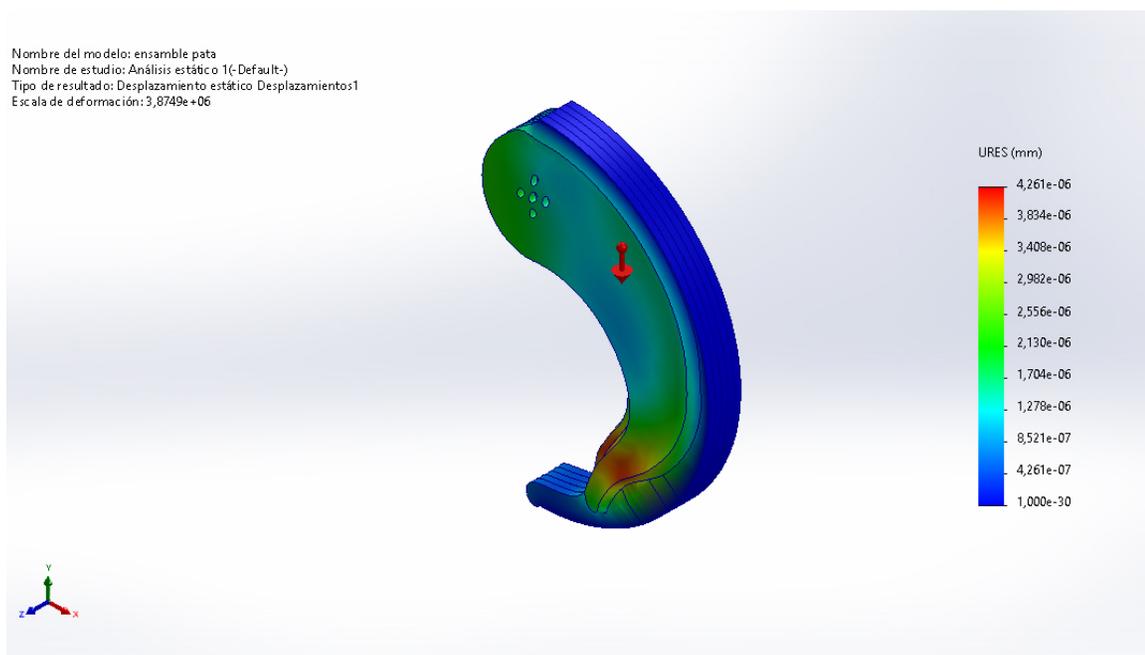


ensamble pata-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1

Tabla 5.

*Análisis de desplazamientos resultantes de la pata del robot "R-Hex"*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00mm Nodo: 7157	4,261e-06mm Nodo: 20075

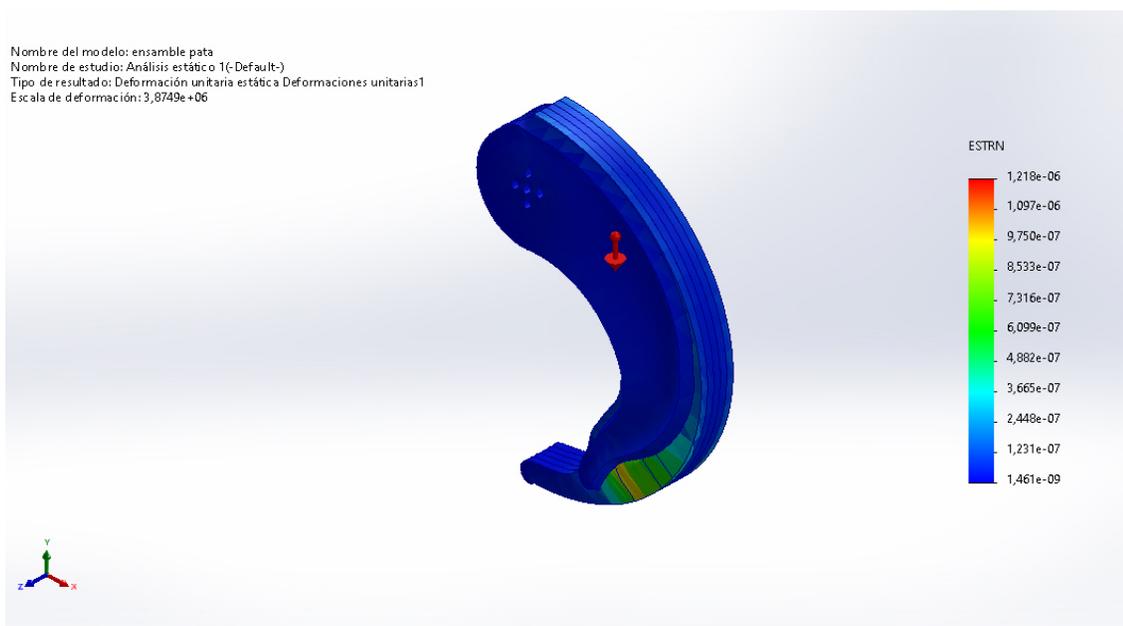


ensamble pata-Análisis estático 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

Tabla 6.

## Análisis de deformación unitarias equivalentes de la pata del robot "R-Hex"

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1,461e-09 Elemento: 2492	1,218e-06 Elemento: 9450



ensamble pata-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

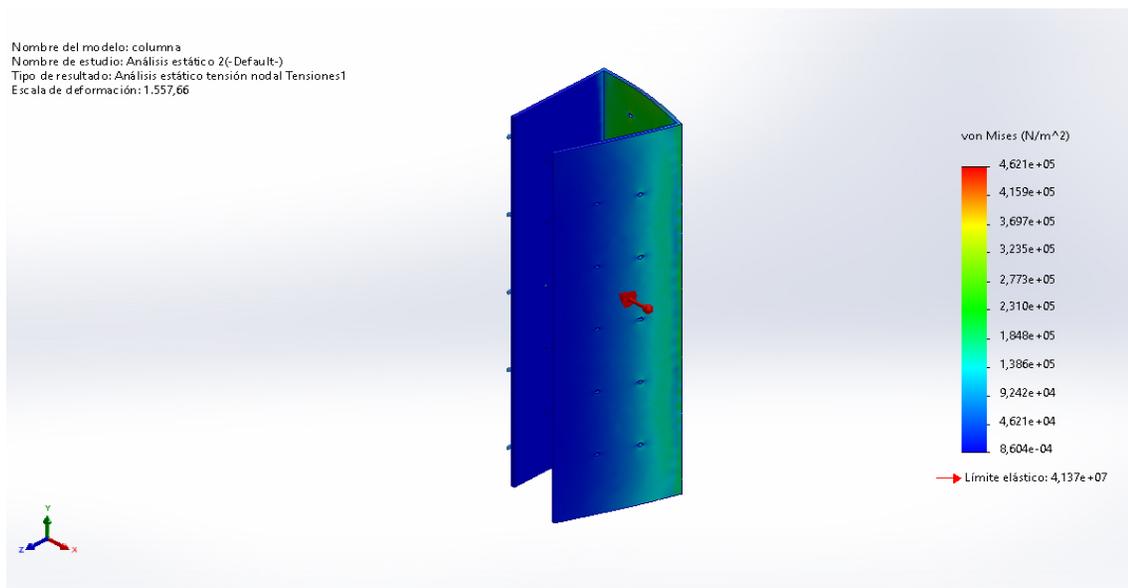
Los resultados del estudio realizado a la viga en forma de "C", de igual manera se muestran en la

**Tabla 7., Tabla 8. y Tabla 9.,** mostradas a continuación:

Tabla 7.

## Análisis de tensión de von Mises de la viga en C del robot "R-Hex"

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von	8,604e-04N/m <sup>2</sup>	4,621e+05N/m <sup>2</sup>
	Mises	Nodo: 32375	Nodo: 161

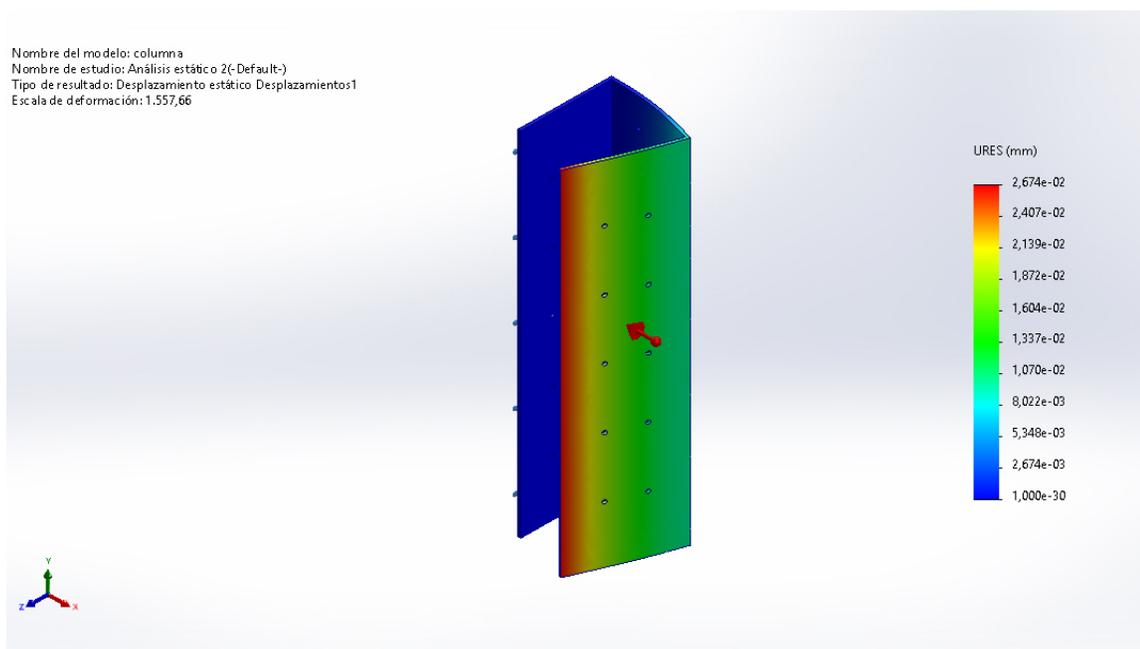


columna-Análisis estático 2-Tensiones-Tensiones1

Tabla 8.

*Análisis de desplazamientos resultantes de la viga en C del robot "R-Hex"*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00mm Nodo: 21	2,674e-02mm Nodo: 30274

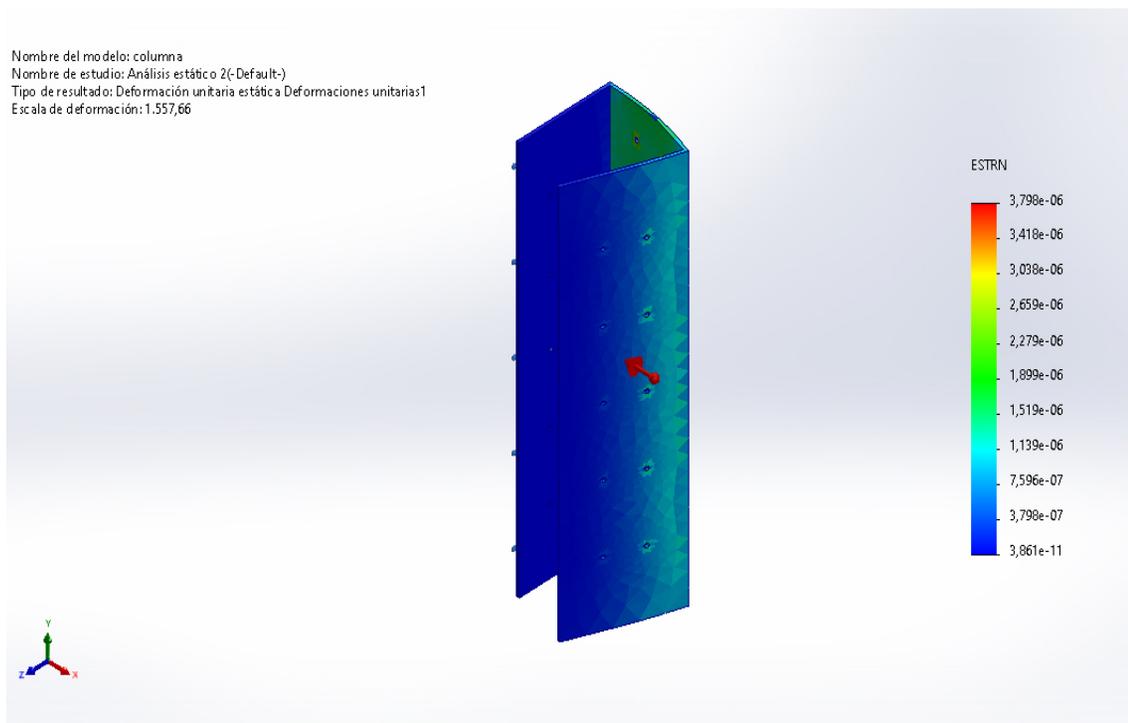


columna-Análisis estático 2-Desplazamientos-Desplazamientos1

Tabla 9.

*Análisis de deformaciones unitarias equivalentes de la viga en C del robot "R-Hex"*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3,861e-11 Elemento: 7923	3,798e-06 Elemento: 11552



columna-Análisis estático 2-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

Tomando en cuenta los máximos valores resultantes en cada uno de los estudios se puede tener la certeza que la estructura física va a soportar el trabajo para el que está diseñado, teniendo en cuenta que las patas, al ser los elementos que mayor uso tiene en el robot serán las que más carga deban resistir, el estudio demuestra que los materiales, así como el diseño que realizado cumplen con los parámetros necesarios para garantizar la integridad de la estructura.

## Selección de motores

Una vez que se tiene el modelo físico simulado, se procedió a realizar el cálculo para la selección de motores y verificar si los motores que se escogieron para modelar son los correctos.

Para esto se utilizarán los datos obtenidos de la simulación del modelo (**Figura 53.**) para obtener los datos necesarios para el cálculo de selección de motores.

### Figura 53.

#### *Propiedades de la estructura del robot R-Hex simulada*

```

Propiedades de masa de robot rhex
Configuración: Default
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 8878.43 gramos
Volumen = 3288308.03 milímetros cúbicos
Área de superficie = 2307185.49 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )
X = 276.80
Y = 279.27
Z = 381.49

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Medido desde el centro de masa.
Ix = ( 0.00, 0.00, 1.00)   Px = 178053051.17
Iy = ( 1.00, 0.00, 0.00)   Py = 229784482.14
Iz = ( 0.00, 1.00, 0.00)   Pz = 370992530.57

Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados. (Usando notación tensorial positiva.)
Lxx = 229784528.63   Lxy = -81474.98   Lxz = 5197.27
Lyx = -81474.98     Lyy = 370992480.46   Lyz = 24455.12
Lzx = 5197.27       Lzy = 24455.12     Lzz = 178053054.79

Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Medido desde el sistema de coordenadas de salida. (Usando notación tensorial positiva.)
Ixx = 2214352019.58   Ixy = 686244563.84   Ixz = 937554229.88
Iyx = 686244563.84   Iyy = 2343393871.71   Iyz = 945920003.55
Izx = 937554229.88   Izy = 945920003.55   Izz = 1550759046.69

```

Se estimará que la aceleración del robot a una velocidad de 60 rpm en 1 segundos lo cual será la velocidad máxima del robot, la inercia del robot según lo simulado es de 370992.8 g\*cm<sup>2</sup>.

Con estos datos se podrá calcular el par del motor, para se usó la siguiente fórmula:

$$M_{\alpha} = J_L * \frac{\pi}{30} * \frac{(\Delta n)}{(\Delta t)}$$

$$M_{\alpha} = 0.371 * \frac{\pi}{30} * \frac{60}{1} = 2.331Nm$$

Debido a que esta fuerza se dividirá para un mínimo de 3 motores por lo que este valor se dividirá entre tres dando como resultado que cada motor debe proporcionar un par de:

$$M_{\alpha} = 0.77 Nm$$

Una vez realizado los cálculos se puede observar que los motores escogidos entregarían la fuerza necesaria para mover el motor ya que están diseñados para entregar un par de toque de 1.2 Nm dando un margen de seguridad para el movimiento del robot.

### **Diseño del subsistema electrónico**

Para el desarrollo del subsistema electrónico del robot se procedió a analizar los diferentes elementos que se requiere para el correcto funcionamiento del robot R-Hex.

#### ***Tarjeta principal:***

Tomando en cuenta las especificaciones que posee el robot R-Hex, se utilizó como tarjeta principal una tarjeta Arduino MEGA, misma que es la encargada de controlar cada una de las funciones del robot, captar las diferentes señales enviadas por el resto de elementos electrónicos y generar las diferentes rutinas programadas para permitir su movimiento.

La **Tabla 10.** que se muestra a continuación describe los diferentes pines ocupados para el control del robot.

**Tabla 10.**

*Pines de conexión de la tarjeta*

<b>Pines</b>	<b>Detalle</b>
<b>2 al 13</b>	Control de giro de los motores
<b>30 al 36</b>	Captación de señales de los motores
<b>40 al 47</b>	Captación de señales de la tarjeta ESP32
<b>0 - 1</b>	Conexión del sensor ultrasónico
<b>16 - 17</b>	Conexión del sensor GPS

***Tarjeta de control de motores:***

Para realizar el control de los motores se utilizó 3 módulos de puente H L298, los mismos que por medio de sus pines de control permiten el control de giro, así como la sincronización de los motores para permitir el movimiento de los mismos por etapas.

***Alimentación del sistema:***

Para realizar la alimentación del sistema se usó una batería recargable como se muestra en la **Figura 54**. Debido a que los elementos a utilizarse dentro del sistema en su mayoría trabajan a 5 voltios se procedió a conectar un convertor de voltaje dc-dc step down, mismo que permite regular el voltaje de 12 voltios a 5 voltios los cuales son requeridos por la tarjeta Arduino, en cuanto a los módulos L298 soportan una alimentación de 12 voltios por lo que los mismos serán conectados directamente a la batería.

El convertor dc-dc step down posee 4 pines de conexión lo cuales tienen las siguientes opciones según el orden mostrado en la **Figura 54**.

**Figura 54.**

*Convertor de voltaje DC-DC step down*



El pin 1 es la entrada positiva de los 12 voltios de la batería, este pin está conectado a un diodo de 3A el cual brinda protección en caso de que los terminales de la batería sean conectados de manera opuesta, el pin 2 es la entrada negativa de la batería o GND, el pin 3 es la salida que se puede regular con precisión gracias al potenciómetro que tiene incorporado, esto permite obtener un voltaje exacto a la salida del convertor y por último el pin 4 es la salida negativa del convertor o GND.

### **Diseño del subsistema de control**

Para el control del prototipo R-Hex se elaboró una aplicación para celular la cual permite dirigir el robot de acuerdo a la necesidad del usuario, la misma cuenta con una interfaz de usuario amigable y fácil de manejar.

### **Interfaz HMI:**

Para realizar la app que permite la interacción entre el usuario y el robot R-Hex se utilizó la plataforma web “MIT APP INVENTOR”, la misma que, por medio de la utilización de medios gráficos permite la colocación de botones y la programación se realiza mediante programación gráfica utilizando bloques, los mismos que generan comandos que permiten el envío de señales.

**Figura 55.**

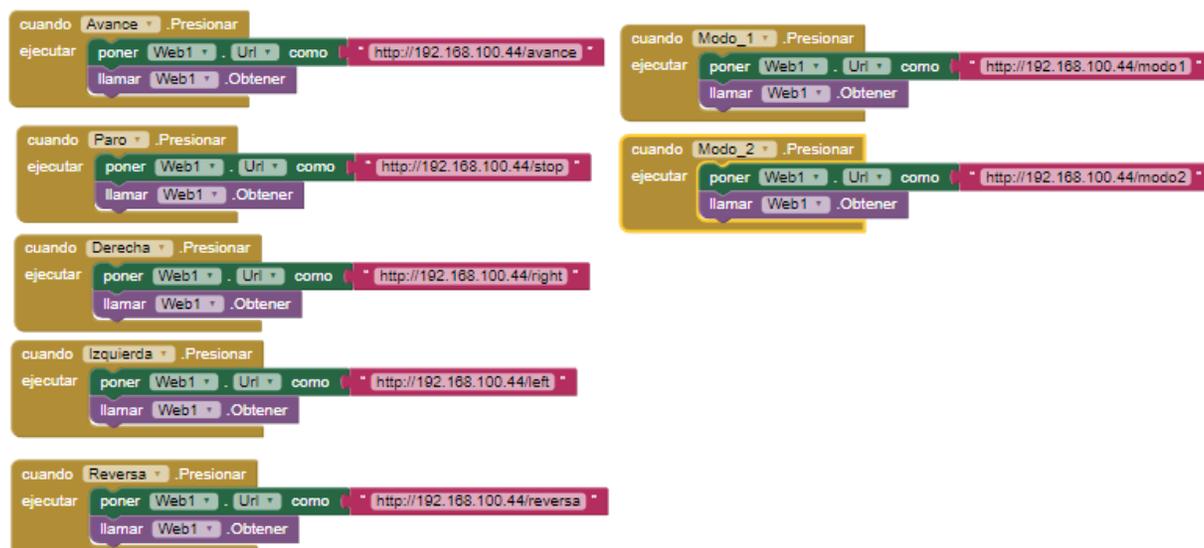
*Diseño de la aplicación móvil para el control del robot R-Hex*



La **Figura 55.** muestra la pantalla de la aplicación de control del robot, como se observa el HMI realizado posee botones para realizar los movimientos básicos del robot (avance, retroceso, giros a izquierda y derecha), también posee botones los cuales, con el uso de la plataforma en línea, se podrán programar para aumentar los tipos de funciones del robot como subir escaleras o entrar en modo de reposo según lo requiera el usuario. Los botones de velocidad permiten que el usuario cambie la velocidad de giro de los motores permitiendo que el robot avance de forma más veloz o lenta dependiendo el gusto del usuario.

Figura 56.

*Programación de la aplicación móvil del robot R-Hex*



La programación gráfica por bloques mostrada en la **Figura 56**. muestra las acciones que realiza el programa para entablar comunicación con el robot de manera inalámbrica vía internet.

## Capítulo 4 – Integración y Validación

En este capítulo se procede a explicar el proceso de integración de los diferentes subsistemas pertenecientes al prototipo del robot R-Hex y la validación de funcionamiento.

### Integración estructural

Como se explicó en el capítulo 3, la parte estructural del proyecto está compuesto de tres partes, el chasis, que se encarga de darle la forma al prototipo; el armazón externo, mismo que se encarga de recubrir al chasis y de brindar protección a los elementos internos del robot; y por último las patas que son las encargadas de sostener al robot en pie y darle movilidad.

#### Figura 57.

*Cortado y doblado de piezas estructurales del robot R-Hex*



**Figura 58.**

*Piezas de prueba para el robot R-Hex*



**Figura 59.**

*Integración de la estructura interna*



**Figura 60.**

*Estructura del robot R-Hex*

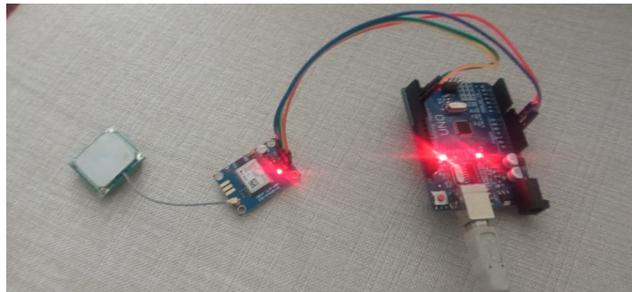


### **Integración de dispositivos sensoriales**

El prototipo robótico R-Hex dispone de un sensor GPS mismo que permite conocer la longitud y latitud del robot; un sensor ultrasónico mismo que permite medir la distancia que hay entre un obstáculo y el robot R-Hex, posee un sensor de luz que le permite activar de manera automática la luz del prototipo en caso de haber poca iluminación.

**Figura 61.**

*Prueba de sensor GPS*

**Figura 62.**

*Prueba de sensor de luz*



**Figura 63.**

*Colocación del sensor ultrasónico en el robot R-Hex*



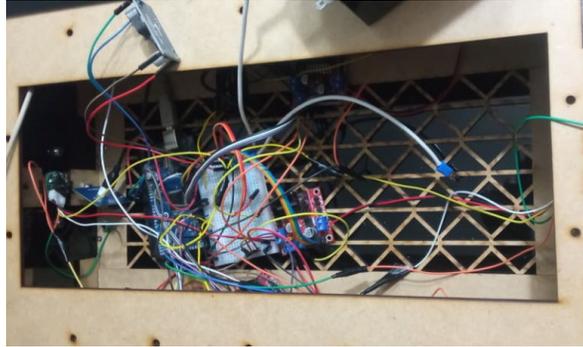
### **Integración del subsistema eléctrico**

Para la implementación de este sistema se ocuparon diferentes tarjetas electrónicas, las cuales son requeridas para el correcto funcionamiento de los actuadores, así como la alimentación que el sistema completo requiere. Entre las tarjetas ocupadas se tiene una tarjeta Arduino Mega, la cual cumple la función de tarjeta de control principal, esta es la encargada de enviar señales a las tarjetas secundarias que controlan los actuadores del sistema y recibir las señales de los sensores incorporados.

Otra de las tarjetas utilizadas en el prototipo es el convertidor dc-dc step down, misma que se encarga de proveer una alimentación de 5 voltios al sistema, la alimentación principal del sistema viene dado por una batería de 12 voltios la cual alimenta a los controladores de los motores, todas las conexiones entre tarjetas se realizaron con cables conectados a los pines de cada uno de las tarjetas según lo requieren.

**Figura 64.**

*Pruebas del subsistema eléctrico del robot R-Hex*

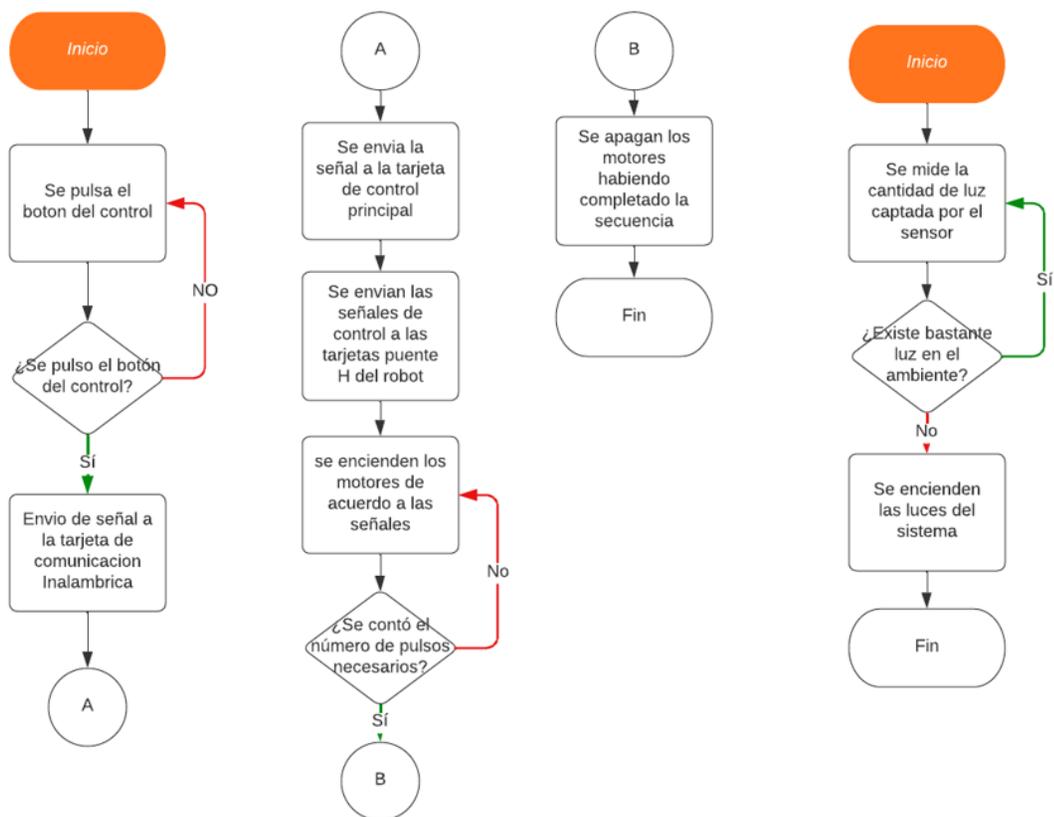


### **Integración del subsistema control**

La programación requerida para controlar el sistema es una parte esencial del proyecto, ya que permite la sincronización de los actuadores, así como las acciones a realizar en cada uno de los casos requeridos por el usuario. Debido a esto el programa debe seguir un flujo o una secuencia, la **Figura 65.** muestra el flujo que debe seguir cada parte del sistema de manera sencilla.

Figura 65.

Diagrama de flujo del control de movimiento y control de luz.



La mayor parte del subsistema de control se lo realizó en la interfaz de Arduino IDE, el resto de programación del subsistema se lo elaboro como se mencionó previamente en la herramienta online de MIT App Inventor, herramienta en la que se realizó la aplicación para manipular al robot por medio de un dispositivo móvil inteligente.

Figura 66.

*Programa de control del sensor GPS*

```

DeviceExample.ino
It requires the use of SoftwareSerial, and assumes that you have a
4800 baud serial GPS device hooked up on pins 4(rx) and 3(tx).
7
8 static const int RXPin = 4, TXPin = 3;
9 static const uint32_t GPSBaud = 9600;
10
11 // The TinyGPSPlus object
12 TinyGPSPlus gps;
13
14 // The serial connection to the GPS device
15 SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin);
16
17 void setup()
18 {
19   Serial.begin(115200);
20   ss.begin(GPSBaud);
21
22   Serial.println("DeviceExample.ino");
23   Serial.println("A simple demonstration of TinyGPSPlus with an attached GPS module");
24   Serial.print("Testing TinyGPSPlus library v. "); Serial.println(TinyGPSPlus::libraryVersion());
25 }
26
27 void loop()
28 {
29   // Read data from the GPS
30   while (ss.available() > 0) {
31     gps.encode(ss.read());
32   }
33
34   // Print location and time
35   if (gps.location.isUpdated()) {
36     Serial.print("Location: "); Serial.print(gps.location.lat(), 6);
37     Serial.print("-"); Serial.print(gps.location.lng(), 6);
38     Serial.print(" Date/Time: "); Serial.print(gps.time.hour(), 2);
39     Serial.print("/"); Serial.print(gps.time.minute(), 2);
40     Serial.print("/"); Serial.print(gps.time.day(), 2);
41     Serial.print("/"); Serial.print(gps.time.month(), 2);
42     Serial.print("/"); Serial.print(gps.time.year(), 4);
43     Serial.println();
44   }
45 }
46
47 // End of file

```

Output Serial Monitor x

```

Not connected. Select a board and a port to connect automatically.
-----
Location: -0.314100,-78.479423 Date/Time: 2/7/2023 17:38:52.00
Location: -0.314102,-78.479423 Date/Time: 2/7/2023 17:38:53.00

```

Figura 67.

*Programa de control de la tarjeta ESP32 para control a distancia*

```

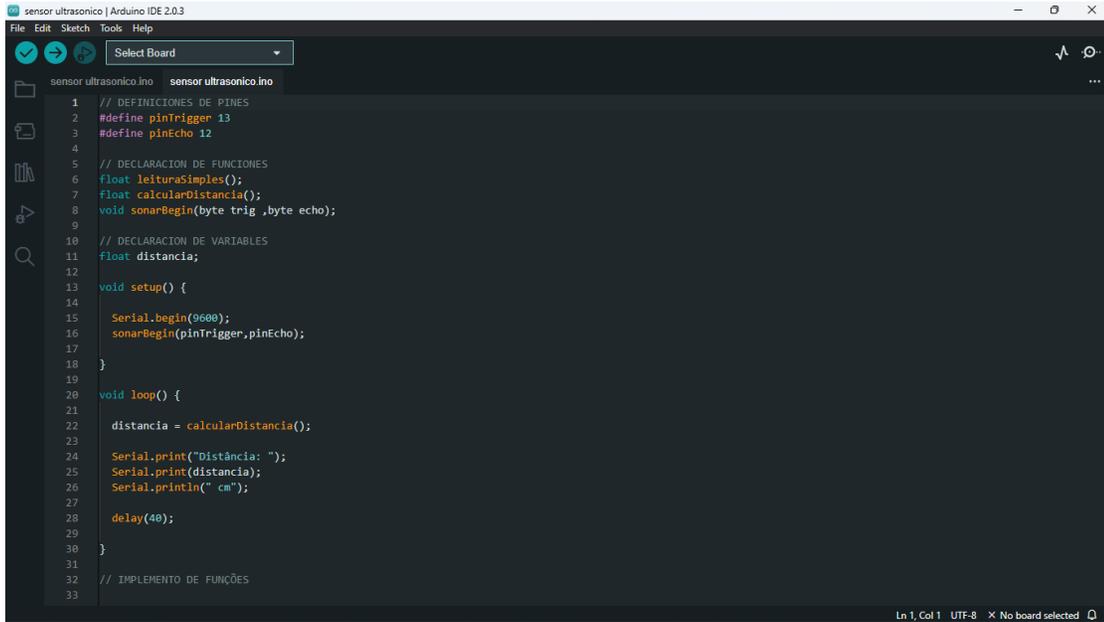
conexion esp32wifi.ino
1 //include <ESP8266WiFi.h>
2 #include <WiFi.h>
3
4 const char* ssid = "*****";
5 const char* password = "*****";
6
7 WiFiServer server(80);
8
9 String header;
10
11 unsigned long lastTime, timeout = 2000;
12
13 const int pin1 = 36;
14 const int pin2 = 39;
15 const int pin3 = 34;
16 const int pin4 = 35;
17 const int pin5 = 32;
18 const int pin6 = 33;
19 const int pin7 = 25;
20 const int pin8 = 26;

```

Output

Figura 68.

Programa de control de sensor ultrasónico



```

1 // DEFINICIONES DE PINES
2 #define pinTrigger 13
3 #define pinEcho 12
4
5 // DECLARACION DE FUNCIONES
6 float lecturaSimples();
7 float calcularDistancia();
8 void sonarBegin(byte trig ,byte echo);
9
10 // DECLARACION DE VARIABLES
11 float distancia;
12
13 void setup() {
14
15     Serial.begin(9600);
16     sonarBegin(pinTrigger,pinEcho);
17 }
18
19
20 void loop() {
21
22     distancia = calcularDistancia();
23
24     Serial.print("Distancia: ");
25     Serial.print(distancia);
26     Serial.println(" cm");
27
28     delay(40);
29 }
30
31
32 // IMPLEMENTO DE FUNCIONES
33

```

## Pruebas y resultados de los subsistemas

Previo al ensamblado general se procedió a probar cada subsistema por separado.

### ***Subsistema mecánico:***

Se elaboró la estructura del sistema de acuerdo al diseño CAD elaborado, para esto se ocuparon tres materiales, el uno fue aluminio compuesto, el otro fue madera MDF y el ultimo plástico acrílico. Al momento de realizar las pruebas el subsistema funciona sin ningún problema sosteniendo y protegiendo las partes internas del robot.

**Figura 69.**

*Integración completa del sistema R-Hex*



***Subsistema electrónico:***

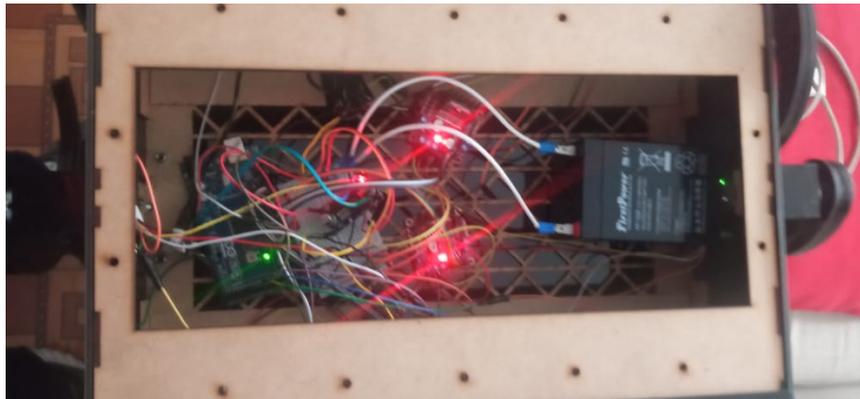
Para las pruebas de este sistema se procedió a realizar programas individuales, los cuales ayudaron a verificar que el sistema funciona correctamente por partes y asegurar su funcionamiento en conjunto. Garantizando que las conexiones de igual manera están bien realizadas.

**Figura 70.**

*Integración del sistema electrónico del robot R-Hex*

**Figura 71.**

*Funcionamiento del subsistema electrónico del robot R-Hex*

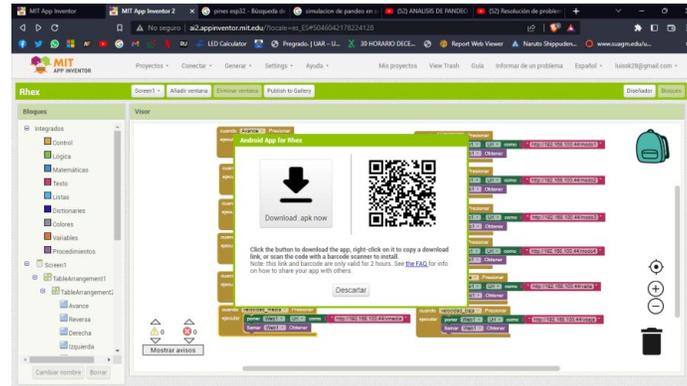


***Subsistema control:***

Este sistema se fue realizando, en su mayor parte, a la par con el sistema electrónico debido a que los mismos programas utilizados para la prueba de los elementos electrónicos fueron los implementados en el subsistema de control del modelo combinado.

**Figura 72.**

*Realización de la aplicación móvil y generación del código de descarga*



**Figura 73.**

*Código QR para descargar la aplicación de control del robot R-Hex*



**Figura 74.**

*Visualización del programa de control del robot R-Hex en un celular*

**Figura 75.**

*Pantalla de la aplicación de control del robot R-Hex*



### Pruebas y resultados del prototipo

Una vez probado cada uno de los subsistemas de manera individual se procedió a realizar el ensamblado completo del prototipo robótico y se realizaron pruebas de movilidad en diferentes terrenos para comprobar la eficacia del prototipo.

#### Figura 76.

*Prueba del robot R-Hex en cerámica*



#### Figura 77.

*Prueba del robot R-Hex en cemento*



**Figura 78.**

*Prueba del robot R-Hex en tierra y césped*



Después de haber realizado las pruebas en los distintos terrenos se tienen resultados los cuales serán expuestos en la **Tabla 11.** mostrada a continuación:

**Tabla 11.***Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos*

Terreno	Inclinación	Observaciones
	0°	El robot se mueve con cierta dificultad debido a que las patas se resbalan levemente, pero aún logra moverse sobre la superficie a una velocidad aceptable, aunque mientras más rápida es la velocidad su movimiento se vuelve más errático.
Cerámica	10°	La dificultad de moverse aumenta levemente pero aún logra movilizarse sobre la superficie de manera aceptable.
	30°	El robot no logra subir o moverse a esta inclinación, al contrario, procede a resbalarse debido al peso del mismo

**Tabla 12.***Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)*

Terreno	Inclinación	Observaciones
	0°	El robot se mueve con gran facilidad y sin ningún inconveniente, no tiene problemas para realizar los movimientos programados.
Cemento	10°	No se nota una variación en los movimientos realizados por el robot, el robot se mueve con facilidad y sigue las órdenes que están programadas en él.
	30°	Se nota una disminución en la velocidad del robot, igual los movimientos del robot son realizados con mayor dificultad.
Césped	0°	El robot se mueve sin ningún problema, la velocidad se puede observar que es normal y los movimientos los realiza sin ningún inconveniente
	10°	El robot muestra buen agarre por lo que no tiene problemas para moverse y cumplir con las órdenes impartidas por el operario.
	30°	Al igual que en el cemento la velocidad se ve reducida, pero, aun así, logra moverse con facilidad y realizar los movimientos solicitados.

**Tabla 13.***Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)*

<i>Terreno</i>	<i>Inclinación</i>	<i>Observaciones</i>
	0°	<i>El robot tiene dificultad para realizar las órdenes dadas debido a que el terreno no es firme, las patas resbalan al mover el material.</i>
<i>Ripio</i>	10°	<i>Las dificultades para moverse aumentan en gran manera y el robot no logra desarrollar una velocidad estable debido a que las patas giran en banda.</i>
	30°	<i>El robot casi no logra moverse, se resbalan las patas.</i>
	0°	<i>Los resultados obtenidos por el robot fueron muy buenos, el robot se mueve con facilidad y no presenta reducciones en la velocidad.</i>
<i>Tierra</i>	10°	<i>El robot tiene de perder pista en ciertas ocasiones debido a la falta de adherencia de la superficie del terreno por lo que se desvía levemente y su velocidad presenta una leve reducción.</i>
	30°	<i>Los resultados que presenta son similares a los presentados en el ángulo de 10°, pierde algo de pista y se desvía levemente al moverse, pero la movilidad sigue siendo buena.</i>

**Tabla 14.**

*Pruebas del robot R-Hex en distintos terrenos (Continuación)*

---

Terreno	Inclinación	Observaciones
	0°	El robot no presenta dificultad al moverse, su velocidad es la deseada y no presenta desviaciones en sus trayectorias.
Asfalto	10°	Los resultados no varían en esta prueba, el robot se mueve de manera óptima y sin presentar errores, los movimientos realizados son los deseados.
	30°	En esta prueba los resultados no cambiaron mayormente, su velocidad se ve algo reducida pero los movimientos del robot se mantuvieron precisos.

---

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Se diseñó y construyó un sistema autónomo todoterreno hexápodo tipo R-Hex, el cual es capaz de movilizarse en terrenos de asfalto, tierra, pasto, cerámica y ripio. Además, es capaz de bordear o trepar obstáculos siempre y cuando la altura del mismo sea menor a 80mm.

El prototipo construido se encuentra basado en el diseño desarrollado por Boston Dynamics, sin embargo, fue realizado con materiales de fácil adquisición en caso de requerir el reemplazo de alguno de sus componentes.

Se desarrolló un sistema capaz de controlar el robot de manera óptima para su correcto funcionamiento en cada uno de los terrenos para los que fue diseñado.

Se implementó un sistema de geolocalización el cual permite conocer la posición en tiempo real del robot para de esta manera facilitar su ubicación con respecto al usuario y al terreno que se esté explorando.

Se implementó dispositivos de detección de luz y de obstáculos con el fin de facilitar el desplazamiento del sistema en caso de encontrarse en terrenos con condiciones adversas en las cuales sea difícil la movilidad del mismo.

Se realizaron pruebas de campo del dispositivo en diferentes ambientes para los cuales fue diseñado y se evaluó el nivel de respuesta del mismo, de acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el sistema se encuentra apto para trabajar en diferentes tipos de terrenos con cualquier tipo de obstáculos cumpliendo así con los parámetros con los que fue diseñado.

Al momento de realizar el prototipo se tuvieron que cambiar los motores previamente seleccionados ya que, a pesar de tener las características requeridas, al momento de poner en funcionamiento el sistema no lograron cumplir con los requerimientos establecidos, teniendo como resultado el daño de dichos motores y la sustitución obligatoria de los mismos.

### **Recomendaciones**

Se podría diseñar otro tipo de llantas que logren trepar obstáculos mayores a 150mm para poder lograr un mayor alcance de aplicaciones del robot, como por ejemplo tareas de localización para rescate en zonas de desastre en las cuales puedan existir obstáculos de mayores dimensiones.

Implementar un sistema de visión artificial que permita al usuario evaluar el tipo de ambiente en el que se encuentra el robot en tiempo real, así como documentar hallazgos importantes de la exploración de manera visual sin necesidad de que el operario acuda a la zona ya explorada.

Implementar rutinas que permitan al robot retornar de manera automática al punto de partida en caso de pérdida de señal y/o desconexión de los dispositivos, esto garantizará que el robot no se pierda al momento de desconexión.

Diseñar las patas del robot en un material que genere un mayor coeficiente de fricción para evitar deslizamientos en terrenos que generen mayor dificultad en el agarre como por ejemplo cerámica, hielo, entre otros.

## Bibliografía

- Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., Shimiza, A., & Nogami, Y. (1999). Mechanism and control of a leg-wheel hybrid mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99)*. 3, págs. 1792-1797. Kyongju, South Korea: IEEE. doi:10.1109/IROS.1999.811738
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2016). Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles. *Neural Processing Letters*, 43(2), 459-477.
- Aguilar, W. G., & Morales, S. (2016). 3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms. *Electronics*, 5(4), 70.
- Aguilar, W. G., Casaliglla, V., & Pólit, J. (2017). Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles. *Electronics*, 6(1), 10.
- Alatise, M., & Hancke, G. (2020). A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*, 8, 39830-39846. doi:10.1109/ACCESS.2020.2975643
- Allen, T., Quinn, R., Bachmann, R., & Ritzmann, R. (2003). Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles. *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2, págs. 1370-1375. Las Vegas, NV, USA: IEEE. doi:10.1109/IROS.2003.1248835
- Amer, N., Zamzuri, H., Hudha, K., & Kadir, Z. (05 de 2017). Modelling and Control Strategies in Path Tracking Control for Autonomous Ground Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 86(2), 225-254. doi:10.1007/s10846-016-0442-0
- Angulo, C., & Aguilar, W. (2013). Estabilización robusta de vídeo basada en diferencia de nivel de gris. *VIII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*.

- Argote, I., Castellanos, D., Vargas, J., Baquero, A., & Barrero, H. (2009). *Robot Movil Caminador Hexápodo con 12 Grados de Libertad*. Villavicencio - Colombia: Universidad de los llanos.  
Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090028751/downloads/20090028751.pdf>
- Asimbaya, I., Albán, P., Aguilar, W., & Fernández, Y. (2020). Ackermann UGV with 2D Mapping for Unknown Environments. En *International Conference of Research Applied to Defense and Security* (págs. 45-53).
- 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.
- Bellicoso, C., Bjelonic, M., Wellhausen, L., Holtmann, K., Gunther, F., Tranzatto, M., . . . Hutter, M. (12 de 2018). Advances in real-world applications for legged robots. *Journal of Field Robotics*, 35(8), 1311-1326. doi:10.1002/rob.21839
- Botta, A., & Quaglia, G. (02 de 06 de 2020). Performance Analysis of Low-Cost Tracking System for Mobile Robots. *Machines*, 8(2), 29. doi:10.3390/machines8020029
- Bruzzo, L., & Fanghella, P. (14 de 01 de 2014). Mantis: hybrid leg-wheel ground mobile robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 41(1), 26-36. doi:10.1108/IR-02-2013-330
- Bruzzo, L., & Quaglia, G. (12 de 07 de 2012). Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments. *Mechanical Sciences*, 3(2), 49-62. doi:10.5194/ms-3-49-2012
- Bruzzo, L., Baggetta, M., Nodehi, S., Bilancia, P., & Fanghella, P. (12 de 01 de 2021). Functional Design of a Hybrid Leg-Wheel-Track Ground Mobile Robot. *Machines*, 9(1), 10. doi:10.3390/machines9010010

- Bruzzone, L., Nodehi, S., & Fanghella, P. (04 de 08 de 2022). Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review. *Machines*, 10(8), 648. doi:10.3390/machines10080648
- Caballeros, J., Segarra, D., Castro, P., & Aguilar, W. (2018). RRT Path Planning and Morphological Segmentation Based Navigation for a Tetrapod Robot. *Ubiquitous Networking: 4th International Symposium, UNet* (págs. 273-280). Springer International Publishing.
- Cabras, P., Rosell, J., Pérez, A., Aguilar, W., & Rosell, A. (2011). Haptic-based navigation for the virtual bronchoscopy. *18th IFAC World Congress*. Milano, Italy.
- Cabrera, F., & Jizhong, X. (2008). Preprocessing technique to signal strength data of wireless sensor network for real-time distance estimation. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (págs. 1537-1542). Pasadena, CA, USA: IEEE.  
doi:10.1109/ROBOT.2008.4543420
- Caiza, O., Aguilar, W., 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., & 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).
- Cárdenas Villavicencio, O. E., Molina Ríos, J. R., Morocho Román, R. F., Novillo Vicuña, J. P., & Moreno Sotomayor, G. R. (29 de 12 de 2017). Estudio entre las tecnologías WIFI – LIFI en la optimización del servicio de internet. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 2(8), 50. doi:10.26910/issn.2528-8083vol2iss8.2017pp50-53
- Carrasco, B. (2015). *DocPlayer*. Obtenido de <https://docplayer.es/3668887-Capitulo-3-la-comunicacion-serial.html>

- Carrera, A., Merizalde, D., Calderón, M., & Aguilar, W. (2020). Monte Carlo-Based Localization for Kidnapped Robot Problem. En *International Conference of Research Applied to Defense and Security* (págs. 101-109).
- Chiba Institute of Technology. (2007). *Future Robotics Technology Center*. Obtenido de <https://www.furo.org/en/works/halluc2/halluc2.html>
- Chou, Y.-C., Yu, W.-S., Huang, K.-J., & Lin, P.-C. (01 de 09 de 2012). Bio-inspired step-climbing in a hexapod robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 7(3), 036008. doi:10.1088/1748-3182/7/3/036008
- Cobeña, B., Rodríguez, G., Salcedo, V. S., Collaguazo, B., & Aguilar, W. (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.
- Collaguazo, B., Tituaña, J., Aguilar, W., & Amaguaña, F. (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.
- Conci, A., Falconi, L. G., Perez, M., & Aguilar, W. (2020). Transfer learning and fine tuning in breast mammogram abnormalities classification on CBIS-DDSM database. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J*, 154-165.
- Conduraru, A., Doroftei, I., & Conduraru, I. (11 de 2013). An Overview on the Design of Mobile Robots with Hybrid Locomotion. *Advanced Materials Research*, 837, 555-560. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.837.555
- Córdova, A., Jiménez, B., Pardo, J., Toalombo, I., & Aguilar, W. (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.

- Cruz, H., Meneses, J., Aguilar, W., & Andrade-Miranda, G. (2019). Detection and Segmentation of Ecuadorian Deforested Tropical Areas Based on Color Mean and Deviation. *Information Technology and Systems: Proceedings of ICITS* (págs. 452-461). Springer International Publishing.
- DCIM. (s.f.). *Diseño, construcción e implementación mecatrónica*. Obtenido de <https://dcimecuador.com/producto/cable-db9-macho-a-db9-hembra-2-metros/>
- Dominguez, F., & Guerrero, D. (s.f.). *Control de Comunicación Inalámbrica por Ultrasonido*. Argentina: Universidad Nacional de San Juan. Obtenido de [http://dea.unsj.edu.ar/ultrasonido/pdfs/Trabajos%20finales/Elo/Control%20de%20Comunicaci%C3%B3n%20Inalambrica%20por%20ultrasonido\\_2017.pdf](http://dea.unsj.edu.ar/ultrasonido/pdfs/Trabajos%20finales/Elo/Control%20de%20Comunicaci%C3%B3n%20Inalambrica%20por%20ultrasonido_2017.pdf)
- Dongjun, L., Martinez, O., & Spong, M. (2006). Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed communication network. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. (págs. 3298-3303). Orlando, FL, USA: IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2006.1642205
- Doriya, R., Mishra, S., & Gupta, S. (2015). A brief survey and analysis of multi-robot communication and coordination. *2015 International Conference on Computing, Communication & Automation (ICCCA)* (págs. 1014-1021). Greater Noida, India: IEEE. doi:10.1109/CCAA.2015.7148524
- DSCAsturias. (s.f.). *linternas Profesionales*.
- Duan, X., Huang, Q., Rahman, N., Li, J., & Du, Q. (2006). Kinematic Modeling of a Small Mobile Robot with Multi-Locomotion Modes. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (págs. 5582-5587). Beijing, China: IEEE. doi:10.1109/IROS.2006.282276
- Falconí, L. G., Pérez, M., & Aguilar, W. (2019). Transfer learning in breast mammogram abnormalities classification with mobilenet and nasnet. *International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, (págs. 109-114).

- Falconi, L. G., Perez, M., Aguilar, W., & Conci, A. (2020). Transfer learning and fine tuning in mammogram bi-rads classification. *IEEE 33rd International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*, (págs. 475-480).
- Fiorini, P., & Burdick, J. (2003). The Development of Hopping Capabilities for Small Robots. *Autonomous Robots*, 14(2/3), 239-254. doi:10.1023/A:1022239904879
- Foguet, A. (2016). *Estudio de sistema de comunicaciones para aplicación en robótica cooperativa*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Obtenido de [https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/673225/Foguet\\_Carrasco\\_Alvaro\\_pfc.pdf?sequence=1](https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/673225/Foguet_Carrasco_Alvaro_pfc.pdf?sequence=1)
- Galarza, J., Pérez, E., Serrano, E., Tapia, A., & Aguilar, W. (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., & 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.
- Galloway, K., Haynes, G., Ilhab, D., Johnson, A., & Knopf, R. (2010). X-RHex: A Highly Mobile Hexapedal Robot for Sensorimotor Tasks. *Penn Libraries*, 35.
- Garawi, S., Istepanian, R., & Abu-Rgheff, M. (04 de 2006). 3G wireless communications for mobile robotic tele-ultrasonography systems. *IEEE Communications Magazine*, 44(4), 91-96. doi:10.1109/MCOM.2006.1632654
- Gart, S., & Li, C. (02 de 02 de 2018). Body-terrain interaction affects large bump traversal of insects and legged robots. *Bioinspiration & Biomimetics*, 13(2), 026005. doi:10.1088/1748-3190/aaa2d0
- Graichen, K., Hentzelt, S., Hildebrandt, A., Karcher, N., Gaibert, N., & Knubben, E. (09 de 2015). Control design for a bionic kangaroo. *Control Engineering Practice*, 42, 106-117. doi:10.1016/j.conengprac.2015.05.005

- Grijalva, S., & Aguilar, W. (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. (2019). HSVM-Based Human Activity Recognition Using Smartphones. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 217-228).
- Grzelczyk, D., Szymanowska, O., & Awrejcewicz, J. (2019). Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(4), 400-417.  
doi:10.1177/0959651818800187
- Hardarson, F. (1997). *Locomotion for difficult terrain*. Royal Institute of Technology, Mechatronics Division, Department of Machine Design. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology.  
Obtenido de  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4d62521f1669e20327505441dc3fb2e5f4f21e8a>
- Hauser, K., Bretl, T., Latombe, J.-C., Harada, K., & Wilcox, B. (11 de 2008). Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 27(11-12), 1325-1349.  
doi:10.1177/0278364908098447
- Hong, D. (2006). Biologically Inspired Locomotion Strategies: Novel Ground Mobile Robots at RoMeLa. *The 3rd International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2006)* , (pág. 6). Virginia. Obtenido de  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4957f35f70a327c3d5581be2a53d4f4857f1991f>
- Horseý, J. (10 de 12 de 2009). Obtenido de Gadgets: <https://www.geeky-gadgets.com/t-rex-hexapod-robot-10-12-09/>

- Hutter, M., Gehring, C., Lauber, A., Gunther, F., Bellicoso, C., Tsounis, V., . . . Meyer, K. (02 de 09 de 2017). ANYmal - toward legged robots for harsh environments. *Advanced Robotics*, 31(17), 918-931. doi:10.1080/01691864.2017.1378591
- Iba, S., Weghe, J., Paredis, C., & Khosla, P. (1999). An architecture for gesture-based control of mobile robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99)*. 2, págs. 851-857. Kyongju, South Korea: IEEE. doi:10.1109/IROS.1999.812786
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Mesías, R., Araujo-Villaroel, B., Aguilar, W., & 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., & Pardo, J. A. (2018). E-services from Emergency Communication Network: Aerial Platform Evaluation. *International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)* (págs. 251-256). IEEE.
- Kahar, S., Sulaiman, R., Prabuwo, A., Akma, N., & Abu, M. (2012). A Review of Wireless Technology Usage for Mobile Robot Controller. *2012 International Conference on System Engineering and Modeling (ICSEM 2012)* (pág. 7). Singapore: IACSIT Press.
- Kaufhold, T., Schale, F., Bohm, V., & Zimmermann, K. (2017). Indoor locomotion experiments of a spherical mobile robot based on a tensegrity structure with curved compressed members. *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (págs. 523-528). Munich, Germany: IEEE. doi:10.1109/AIM.2017.8014070
- Kojima, S., Ohno, K., Suzuki, T., Okada, Y., Westfechtel, T., & Tadokoro, S. (10 de 2020). Stable Autonomous Spiral Stair Climbing of Tracked Vehicles Using Wall Reaction Force. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6575-6582. doi:10.1109/LRA.2020.3015463
- Lamon, P., & Siegwart, R. (02 de 2007). 3D Position Tracking in Challenging Terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 26(2), 167-186. doi:10.1177/0278364906075170

- Liberatore, S. (04 de 03 de 2016). Terrifying giant scorpion robot can STAB victims with its tail: Six legged machine can move and attack like an insect. *Dailymail.com*. Obtenido de <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3477469/Terrifying-giant-scorpion-robot-STAB-victims-tail-Six-legged-machine-attack-like-insect.html>
- Limaico, A., Rodríguez, G., Quisaguano, F., Aguilar, W., Sandoval, D., Caballeros, J., & Alvarez, L. (2018). Graph Based RRT Optimization for Autonomous Mobile Robots. *Intelligence Science and Big Data Engineering: 8th International Conference, ISIDE* (págs. 12-21). Springer International Publishing.
- Lorefice, G. (12 de 2003). TECNOLOGÍA INALÁMBRICA BLUETOOTH SOBRE LOS SERVICIOS DE COMUNICACIONES EN LOS ÁMBITOS SOCIAL Y EMPRESARIAL. *Telématique*, 2(2), 36-49. Obtenido de [www.redalyc.org/pdf/784/78420205.pdf](http://www.redalyc.org/pdf/784/78420205.pdf)
- Luna, M. A., Moya, J. F., Aguilar, W., & Vanessa, A. (2017). Robot salamandra anfibio con locomoción bioinspirada. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 51-59.
- Luna, M. A., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Aguilar, W. (2017). Real-time detection and simulation of abnormal crowd behavior. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 420-428).
- Lynxmotion. (s.f.). *Lynxmotion*. (RobotShop) Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de <http://www.lynxmotion.com/c-151-t-hex-4-dof.aspx>
- Lynxmotion. (s.f.). *Lynxmotion*. (RobotShop) Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de <http://www.lynxmotion.com/c-154-a-pod.aspx>
- Manosalvas, J. F., Guillén, J. A., Collaguazo, B., & Aguilar, W. (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.

- Marosan, I., Constantin, G., Cofaru, N., & Inta, M. (2021). Design of a modular locomotion system for autonomous mobile robots. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08006.  
doi:10.1051/mateconf/202134308006
- Medeiros, V., Jelavic, E., Bjelonic, M., Siegart, R., Meggiolaro, M., & Hutter, M. (07 de 2020). Trajectory Optimization for Wheeled-Legged Quadrupedal Robots Driving in Challenging Terrain. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 4172-4179. doi:10.1109/LRA.2020.2990720
- Megatronica. (s.f.). *Megatrónica - Robótica y Electrónica*. Obtenido de <https://megatronica.cc/producto/db25-para-cable-macho-y-hembra/>
- Merizalde, D., Aguilar, W., & 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).
- Michael, N., Fink, J., & Kumar, V. (2007). Controlling a team of ground robots via an aerial robot. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (págs. 965-970). San Diego, CA, USA: IEEE. doi:10.1109/IROS.2007.4399589
- Mondada, F., Franzi, E., & Jenne, P. (1994). Mobile robot miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms. *Experimental Robotics III, Proceedings of the 3rd International Symposium on Experimental Robotics, Kyoto, Japan, October 28-30*, (págs. 501-513). Londres: Spenger Verlag.
- Montalvo, W., Garcia, C., Naranjo, J., Ortiz, A., & Garcia, M. (2020). Sistema de Tele-operación para Robots Móviles en la industria del Petróleo y Gas. *RISTI*, 351-365.
- Moore, E. (2002). *Leg Design and Stair Climbing Control for the RHex Robotic Hexapod*. Canada: McGill University.
- Moposita, J., Orbea, D., Aguilar, W., 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.

- Moya, J. F., Abad, V., Parra, H., Ruiz, H., Aguilar, W., & Luna, M. A. (2017). Pedestrian detection for UAVs using cascade classifiers with meanshift. *IEEE 11th international conference on semantic computing (ICSC)*.
- Nakajima, S. (12 de 2020). Stair-climbing gait for a four-wheeled vehicle. *ROBOMECH Journal*, 7(1), 20. doi:10.1186/s40648-020-00168-z
- Nasimba, J. (2017). *Estimación de la altura de columnas explosivas en el volcán Tungurahua basado en procesamiento de imágenes visuales y térmicas*. Riobamba: ESPOCH.
- Nerguizian, C., Belkhou, S., Azzouz, A., Nerguizian, V., & Saad, M. (2004). Mobile robot geolocation with received signal strength (RSS) fingerprinting technique and neural networks. *2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04*. 3, págs. 1183-1185. Hammemet, Tunisia: IEEE. doi:10.1109/ICIT.2004.1490728
- Nie, C., Pacheco, X., & Spenko, M. (12 de 2013). Robots on the Move: Versatility and Complexity in Mobile Robot Locomotion. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(4), 72-82. doi:10.1109/MRA.2013.2248310
- Nilwong, S., Hossain, D., Kaneko, S.-i., & Capi, G. (18 de 04 de 2019). Deep Learning-Based Landmark Detection for Mobile Robot Outdoor Localization. *Machines*, 7(2), 25. doi:10.3390/machines7020025
- Niola, V., Gasparetto, A., Botta, A., Cavallone, P., Tagliavini, L., & Quaglia, G. (2021). Modelling and Experimental Validation of Articulated Mobile Robots with Hybrid Locomotion System. En *Advances in Italian Mechanism Science* (Vol. 91, págs. 758-767). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-55807-9\_84
- Nuño Ortega, E., & Basañez Villaluenga, L. (2004). *Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*. Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials.

Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/570/IOC-DT-P-200405.pdf?sequence=1>

- Ollero, A., & Merino, L. (01 de 2004). Control and perception techniques for aerial robotics. *Annual Reviews in Control*, 28(2), 167-178. doi:10.1016/j.arcontrol.2004.05.003
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W., 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).
- Pardo, J. A., Aguilar, W., & 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.
- Pazmiño, J., & Astudillo, H. (1998). *Estudio de un sistema de cable dedicado para la utilización de varios servicios de telecomunicaciones y diseño de un sistema de TV por cable dedicado para la zona residencial del sur occidente de Quito*. Quito: Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11209/1/T1381pt.1.pdf>
- Plata, F., Serrano, R., & Chio Cho, N. (2007). Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Móvil Teleoperado para Inspección Visual. 101-109. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/ep/vol1/iss8/10/>
- Quaglia, G., Oserio, R., Bruzzone, L., & Razzoli, R. (01 de 07 de 2013). A Modular Approach for a Family of Ground Mobile Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(7), 296. doi:10.5772/56086
- Quinn, R., Offi, J., Kingsley, D., & Ritzmann, R. (2002). Improved mobility through abstracted biological principles. *IROS 2002: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 3, págs. 2652-2657. Lausanne, Switzerland: IEEE. doi:10.1109/IRDS.2002.1041670

- Quisaguano, F. J., Alvarez, L. G., Pardo, J. A., Zahira, P., & Aguilar, W. (2018). Monocular depth perception on a micro-UAV using convolutional neuronal networks. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 392-397).
- Quisaguano, F. J., Rodríguez, G. A., Alvarez, L. G., Limaico, A., S, S. D., & Aguilar, W. (2018). Convolutional neuronal networks based monocular object detection and depth perception for micro UAVs. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 401-410).
- Ramírez, Ó., & Aguilar, W. (2019). Conciencia situacional en la frontera, proporcionada por sensores de alta tecnología. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 169-178.
- Rehman, U., & Zheng, B. (2013). *Using Robots and SLAM for Indoor Wi-Fi Mapping in Indoor Geolocation*. Worcester Polytechnic Institute.
- Reyes, R., Pérez, H., Paredes, M., Montoya, L., & Aguilar, W. (2017). MilNova: An approach to the IoT solution based on model-driven engineering for the military health monitoring. *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (págs. 1-5). IEEE.
- Rhex web. (s.f.). *Rhex Web*. Obtenido de <https://www.rhex.web.tr/>
- Ridden, P. (04 de Marzo de 2016). *New Atlas*. Recuperado el 13 de Agosto de 2020, de <https://newatlas.com/scorpion-hexapod/42171/>
- Robotic-Lab. (13 de 06 de 2007). *Robotic-Lab*. Obtenido de <https://www.robotic-lab.com/blog/2007/06/13/ofro-un-robot-guardian/>
- Robotnews. (03 de 04 de 2007). Obtenido de Robot News: <https://robotnews.wordpress.com/2007/04/03/ofro-first-outdoor-security-patrol-robot/>
- RobotShop. (26 de 03 de 2018). *RobotShop*. Obtenido de <https://www.robotshop.com/us/es/lynxmotion-kit-robot-hexapodo-a-pod-sin-componentes-electronicos.html>

- Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., Limaico, A., & Aguilar, W. (2017). On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 298-308).
- Rodríguez, J., Ramos, M., & Peña, M. (2015). Simulación de un Robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio. *Lámpsakos*(14), 33-39.
- Rodríguez-Calderón, J. P., Ramos-Parra, M. F., & Peña-Giraldo, M. V. (2015). Simulación de un Robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio. *Lámpsakos*(14), 33. doi:10.21501/21454086.1636
- Rojas, I., Aguilar, W., Álvarez, L., & Grijalva, S. (2019). Monocular Vision-Based Dynamic Moving Obstacles Detection and Avoidance. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 386-398).
- Romero, H., & Cueva, J. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT HEXÁPODO TIPO RHEX PARA LA EXPLORACIÓN DE AMBIENTES INFLAMABLES CONTROLADO VÍA INALÁMBRICA*. Quito: Universidad Politecnica Salesiana.
- Salazar, J. (2017). *REDES INALÁMBRICAS*. Barcelona: UPC. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf)
- Salcedo, V. S., Aguilar, W., 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).
- Salcedo, V., Sandoval, D., Cobeña, B., & Aguilar, W. (2017). Developing of a Video-Based Model for UAV Autonomous Navigation. *Communications in Computer and Information Science*, 94-105.
- Salgado, M. F., Tierra, A., Sandoval, D., & Aguilar, W. (2017). Travel Time Estimation of Public Transport Networks Based on Commercial Incidence Areas in Quito Historic Center. *Analysis*.
- Sanchez, E., & Aguilar, W. (2019). Apoyo logístico de FF.AA ante un desastre natural. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 23-33.

- Sandoval, S., Limaico, A., Villegas-Pico, M., Asimbaya, I., & Aguilar, W. (2019). Path planning based navigation using LIDAR for an Ackerman unmanned ground vehicle. En *International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (págs. 399-410).
- Saranli, U., Buehler, M., & Koditschek, D. (07 de 2001). RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7), 616-631.  
doi:10.1177/02783640122067570
- Sasaki, K., & Suzuki, K. (07 de 2018). Active Rotary-Legs Mechanism for Stair-Climbing Mobility Vehicle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 2237-2244. doi:10.1109/LRA.2018.2812224
- Schempf, H., Chemel, B., & Everett, N. (06 de 1995). Neptune: above-ground storage tank inspection robot system. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2(2), 9-15. doi:10.1109/100.392414
- Schroer, R., Boggess, M., Bachmann, R., Quinn, R., & Ritzmann, R. (2004). Comparing cockroach and Whegs robot body motions. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. 4*, págs. 3288-3293. New Orleans, LA, USA: IEEE.  
doi:10.1109/ROBOT.2004.1308761
- Segarra, D., Caballeros, J., & Aguilar, W. (2018). Visual based autonomous navigation for legged robots. *Intelligence Science and Big Data Engineering: 8th International Conference, IScIDE* (págs. 22-34). Springer International Publishing.
- Segarra, D., Caballeros, J., Aguilar, W., 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).
- Shafaei, S., & Mousazadeh, H. (02 de 2023). Experimental comparison of locomotion system performance of ground mobile robots in agricultural drawbar works. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100131. doi:10.1016/j.atech.2022.100131

- Shkolnik, A., Levashov, M., Manchester, I., & Tedrake, R. (02 de 2011). Bounding on rough terrain with the LittleDog robot. *The International Journal of Robotics Research*, 30(2), 192-215.  
doi:10.1177/0278364910388315
- Shun, H., & Jason, T. (2015). Recent Advances on Locomotion Mechanisms of Hybrid Mobile Robots. *Recent Advances on Locomotion Mechanisms of Hybrid Mobile Robots*, 14, 11-25. Obtenido de <http://www.wseas.us/journal/pdf/systems/2015/a045702-471.pdf>
- Smith, T., Smith, D., Barreiro, J., & SunSpiral, V. (2008). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Móvil Teleoperado para Inspección Visual*. California: Stanford. Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090028751/downloads/20090028751.pdf>
- Song, X., Zhang, X., Meng, X., Chen, C., & Huang, D. (01 de 2022). Gait optimization of step climbing for a hexapod robot. *Journal of Field Robotics*, 39(1), 55-68. doi:10.1002/rob.22037
- Steels, L. (07 de 2003). Evolving grounded communication for robots. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 308-312. doi:10.1016/S1364-6613(03)00129-3
- Stump, E., Jadbabaie, A., & Kuma, V. (2008). Connectivity management in mobile robot teams. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (págs. 1525-1530). Pasadena, CA, USA: IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2008.4543418
- Tenezaca, D., Canchignia, C., Aguilar, W., & 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).
- Terryn, R., Flamand, S., & Saldien, J. (2016). Innovative Design of a Hexapod Scorpion Through Digital Production Techniques. *19th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2016)* (págs. 267-277). Ghent, Bélgica: Ghent University.

- Tierra, A., F, S. M., & Aguilar, W. (2017). Travel Planning in Public Transport Networks Applying the Algorithm A\* for Metropolitan District of Quito. *Analysis*.
- Tinizaray, P., Aguilar, W., & Lucio, J. (2022). Fast segmentation of point clouds using a convolutional neural network for helping visually impaired people find the closest traversable region. *Inteligencia Artificial*, 50-63.
- Tituaña, J., Amaguaña, F., Calderón, M., Merizalde, D., & Aguilar, W. (2020). Visual and Inertial Data-Based Virtual Localization for Urban Combat. En *International Conference of Research Applied to Defense and Security* (págs. 65-74).
- Tiuma, A., Figueroa, J., Aguilar, W., Albán, P., & Cruz, H. (2020). Low cost multitask mobile robot for military application. En *XV Multidisciplinary International Congress on Science and Technology* (págs. 462-473).
- Tokhi, M., & Virk, G. (2016). *Advances in Cooperative Robotics: Proceedings of the 19th International Conference on CLAWAR 2016*. WORLD SCIENTIFIC. doi:DOI: 10.1142/10261
- VDI Richtlinien. (2004). *Design methodology for mechatronic systems*. VDI 2206.
- Vu, H., Pfeifer, R., Iida, F., & Yu, X. (2015). Improving energy efficiency of hopping locomotion by using a variable stiffness actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1. doi:10.1109/TMECH.2015.2428274
- Watson, J., Ritzmann, R., & Pollack, A. (1 de 02 de 2002). Control of climbing behavior in the cockroach, *Blaberus discoidalis*. II. Motor activities associated with joint movement. *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 188(1), 55-69. doi:10.1007/s00359-002-0278-x
- Wilke, P., & Braunl, T. (01 de 06 de 2001). Flexible wireless communication network for mobile robot agents. *Industrial Robot: An International Journal*, 28(3), 220-232. doi:10.1108/01439910110389380

- Wolf, M., Assad, C., Vernacchia, M., Fromm, J., & Jathani, H. (2013). Gesture-based robot control with variable autonomy from the JPL BioSleeve. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (págs. 1160-1165). Karlsruhe, Germany: IEEE.  
doi:10.1109/ICRA.2013.6630718
- Zambrano, J., & Serrano, G. (2002). *Sistemas infrarrojos de comunicaciones inalámbricas*. México: UAM Azcapotzalco. Obtenido de  
<http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n47ne/infra.pdf>
- Zarrouk, D., & Yehezkel, L. (7 de 2018). Rising STAR: A Highly Reconfigurable Sprawl Tuned Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 1888-1895. doi:10.1109/LRA.2018.2805165
- Zeloof, A. (08 de 05 de 2019). *Adam Zeloof*. Obtenido de <https://adam.zeloof.xyz/2019/05/08/t-rhex/>
- Zurita, M., Aguilar, W., & 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