

**CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT HÍBRIDO TELEOPERADO PARA LA
DESARTICULACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS**

CÓDIGO DE PROYECTO: PG-20-1-08



NICOLAS CORREDOR OTAVO

CÓDIGO: 1320154

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1032456519

FABIO ANDRES PATIÑO BUITRAGO

CÓDIGO: 1510523

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1022399737

JUAN SEBASTIAN VARGAS ROJAS

CÓDIGO: 1310319

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1032456519

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.
2021**

**CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT HÍBRIDO TELEOPERADO PARA LA
DESARTICULACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS**

NICOLAS CORREDOR OTAVO

CÓDIGO: 1320154

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1032456519

FABIO ANDRES PATIÑO BUITRAGO

CÓDIGO: 1510523

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1022399737

JUAN SEBASTIAN VARGAS ROJAS

CÓDIGO: 1310319

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1032456519

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

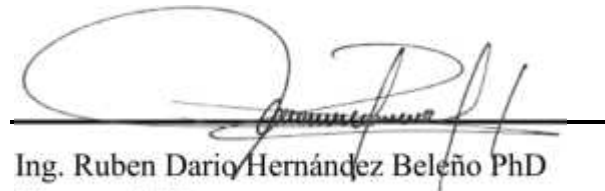
ING. RUBEN DARIO HERNANDEZ, PhD

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by 'D' and 'H' in a cursive script, positioned above a horizontal line.

Ing. Ruben Dario Hernández Beleño PhD
Director del Proyecto

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo quiero dedicar especialmente a mis padres, Rosalba Otavo Peña y German Corredor Romero por el apoyo incondicional que me han brindado, mis logros son fruto de su esfuerzo y dedicación.

Nicolas Corredor Otavo.

Este trabajo de grado lo dedico a mis padres Fabio y Stella, ya que, su apoyo y cariño me impulsaron siempre a ser mejor persona cada día, a no rendirme en los momentos difíciles y que después de años de lucha verán reflejado su esfuerzo en un profesional que nunca olvidará su institución, ni a cada una de las personas que lo acompañó en el camino; cada sonrisa y cada llanto se los debo a ellos.

Fabio Andrés Patiño Buitrago.

A Edilma Rojas y Adelmo Vargas que como padres me han apoyado en todos los momentos de mi vida, que con sus consejos, valores y amor me han permitido ser un mejor ser humano; sobre todo, que con su motivación y dedicación constante he logrado dimensionar mis metas las cuales el día de hoy se hacen realidad.

Juan Sebastian Vargas Rojas.

AGRADECIMIENTOS

A la primera persona, que le quiero agradecer es a mi tutor Rubén Darío Hernández, que sin su ayuda y conocimiento no hubiese sido posible realizar este proyecto. A mi familia, por haberme proporcionado esa compañía incondicional, y me guiaron siempre por un buen camino, a mis compañeros con los que he compartido grandes momentos, gracias infinitas a Dios por las oportunidades que me brindo y todas las bendiciones que me ha dado.

Nicolas Corredor Otavo.

Le agradezco a cada persona con la que me cruce en el camino académico de los últimos años, pero en especial, agradezco a mis profesores y entre todos ellos a los ingenieros Rubén Darío Hernández y Néstor Penagos que siempre fueron un ejemplo a seguir con su paciencia y compromiso por enseñar; ya que, nunca dudaron al momento de compartir sus conocimientos o corregir nuestros errores. También, quiero agradecer a mis compañeros Sebastián y Nicolás que siempre me brindaron una amistad desinteresada y que al final se vio reflejada en este trabajo de grado.

Fabio Andrés Patiño Buitrago.

Quiero expresar un sincero agradecimiento a Dios por brindarme salud, fortaleza y capacidad para llevar a cabo este proyecto y poder lograr una meta más en mi vida, también, al Ingeniero Rubén Darío Hernández que fue mi guía y amigo en estos años de formación académica; por último, a mis hermanos y amigos que estuvieron en todo momento, siendo un apoyo constante en mi vida.

Juan Sebastian Vargas Rojas.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Terminología general según ISO 8373.....	25
Tabla 2. Terminología robots móviles según ISO 19649	26
Tabla 3. terminología de la ISO 9787.....	26
Tabla 4. Comparación cañones EOD.....	37
Tabla 5. Resumen calificación técnica cañones EOD.	38
Tabla 6. Librerías (Fuente autores).	55
Tabla 7. Elementos usados en el ambiente.	60
Tabla 8. Características de motor "MOT_0676"	61
Tabla 9. Características servomotor "MG996R"	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de clasificación de AE en Colombia	21
Figura 2. Algunas de las minas terrestres encontradas en Colombia.	21
Figura 3. Diseño interno de algunas minas antipersona (centro nacional contra artefactos explosivos y minas, n.d.)	22
Figura 4. Artefacto explosivo improvisado	22
Figura 5. Diagrama de la metodología del desarrollo del dispositivo.	28
Figura 6. Robots y su interacción con el entorno (Fuente autores).	29
Figura 7. Plataforma móvil primera versión.....	31
Figura 8. Modelo plataforma propuesto por equipo.	31
Figura 9. diseño definitivo plataforma móvil.	32
Figura 10. Soporte principal Carrilera.	32
Figura 11. Soporte interior de tracción.	33
Figura 12. Brazo diseño por el equipo.	33
Figura 13. Manipulador repositorio de GradCAD	34
Figura 14. Diseño Final Manipulador.	35
Figura 15. Ilustración problema fuerza de retroceso.	36
Figura 16. Cañón disruptor referenciado por las medidas de fabricante (Fuente autores)..	39
Figura 17. Restricción holonómica.....	41
Figura 18. Diagrama robot móvil diferencial.	41
Figura 19. Diagrama robot diferencial con punto de interés a distancia “a”.....	43
Figura 20. Orientación del manipulador.....	44
Figura 21. Estudio tridimensional del Manipulador.....	45
Figura 22 Logo GAZEBO.....	47
Figura 23. CoppeliaSim (Tomado del sitio web).	48
Figura 24. Logo Webots	49
Figura 25. Exportación a formato VRML.	50
Figura 26. Ubicación punto origen.	50
Figura 27. Entorno Blender con plataforma móvil.....	51
Figura 28. Nodo Robot y sub-nodos.	52
Figura 29. Nodo Track.	53
Figura 30. Ajuste de Nodo HingeJoint para la primera articulación.	54
Figura 31. Vista de Robot desde BoundingBox.	55
Figura 32. Librerías y etiquetas	55
Figura 33. Función principal.	56
Figura 34. Función de Movimiento.	57
Figura 35. Función Motor.....	57
Figura 36. Función de movimiento de brazo.....	58
Figura 37. Función movimiento de cámara.....	58
Figura 38. Función distancia y Función Peligro.....	59
Figura 39. Mundo implementado	60

Figura 40. Sensor OMRON infrarrojo	61
Figura 41. Batería Turnigy	62
Figura 42. Modulo L298N.....	62
Figura 43. Raspberry Pi3 B.	62
Figura 44. Xbee PRO S3B	63
Figura 45. Diagrama de conexión	64
Figura 47 Trayectoria en línea recta.	65
Figura 48. Trayectoria circular.	66
Figura 49. Trayectoria en forma de 8.	66
Figura 50. Trayectoria senoidal.....	67
Figura 51. Trayectoria rectangular	68
Figura 52 Disposición del manipulador en trayectoria rectangular.....	68
Figura 53. Sistema robótico en simulación.	69
Figura 54. vista desde cámara.	69
Figura 55. Mando Xbox One.....	70
Figura 56. Lectura de Sensores.	70
Figura 57. Validación de locomoción	71
Figura 58. Giro hacia la derecha.....	71
Figura 59. Primera validación de movimiento del manipulador.	71

RESUMEN

La desactivación de los artefactos explosivos improvisados (AEI), las minas terrestres, entre otros explosivos; representan una amenaza en el territorio nacional y en el mundo entero. Por esta razón, esta propuesta de investigación se enfoca en el proceso de desarrollo y modelado de un robot híbrido tele operado para la desactivación de artefactos explosivos, teniendo en cuenta que, la cercanía a este tipo de artefactos explosivos resulta peligrosa y debe evitarse. Se consultaron diferentes fuentes bibliográficas. El robot propuesto en este trabajo está compuesto por una plataforma móvil de tracción tipo oruga que tiene acoplado un brazo de tres (3) grados de libertad, el cual, cuenta con cañón disruptor en el efector final del brazo; permitiendo la desactivación y/o destrucción de componentes eléctricos de los artefactos explosivos. La estructura principal contiene la cámara que envía imágenes del entorno a la unidad de control en tiempo real, lo que permite al operador ejecutar misiones en diferentes entornos y así, garantizar su seguridad y la del equipo de manejo de explosivos.

Palabras clave: Simulación, modelado cinemático, Webots.

ABSTRACT

The deactivation of improvised explosive devices (IED), land mines, among other explosives; they represent a threat in the national territory and in the whole world. Therefore, this research proposal focuses on the development and modeling process of a teleoperated hybrid robot for the deactivation of explosive devices, considering that proximity to this type of explosive device is dangerous and should be avoided. Different bibliographic sources were consulted. The robot proposed in this work is composed of a caterpillar-type traction mobile platform that has an arm with three (3) adhered degrees of freedom, which has a disruptor gun at the end effector of the arm, allowing the deactivation and / or destruction of electrical components of explosive devices. The main structure contains the camera that sends images of the environment to the control unit in real time, which allows the operator to carry out missions in different environments and thus guarantee his safety and that of the explosives handling team.

TABLA DE CONTENIDO

NOTA DE ACEPTACIÓN.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
1.4 ANTECEDENTES.....	16
1.5 ALCANCES	17
1.6 LIMITACIONES	18
1.7 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	18
2 MARCO REFERENCIAL.....	20
2.1 MARCO TEÓRICO.....	20
2.1.1 ARTEFACTOS EXPLOSIVOS	20
2.1.2 ROBOT EOD	23
2.2 MARCO NORMATIVO.....	24
2.3 MARCO CONTEXTUAL	27
2.4 MARCO METODOLÓGICO.....	28
3 MODELAMIENTO MATEMÁTICO.....	28
3.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA ROBÓTICO	28
3.2 COMPONENTES DE UN ROBOT DESACTIVADOR DE EXPLOSIVOS	30
3.2.1 LOCOMOCIÓN	30
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE ACTUACIÓN	33
3.2.3 CAÑÓN	35
3.3 CINEMÁTICA DEL ROBOT.....	40

3.3.1	MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL	40
3.3.2	MODELO CINEMÁTICO DEL MANIPULADOR	43
3.3.3	MODELO CINEMÁTICO ACOPLADO	45
4	<u>ROBOT DESACTIVADOR DE EXPLOSIVOS</u>	<u>47</u>
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AMBIENTES ROBÓTICOS.....	47
4.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN WEBOTS	49
4.2.1	CONDICIONES NECESARIAS	49
4.2.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ROBOT MÓVIL EN EL ENTORNO	51
4.2.3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL AMBIENTE VIRTUAL DE SIMULACIÓN DEL ENTORNO	59
4.3	PROPUESTA DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y TELEOPERACIÓN DEL ROBOT	60
4.3.1	DIAGRAMA DE CONEXIÓN.....	63
5	<u>VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO</u>	<u>65</u>
5.1	VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO	65
5.2	VALIDACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO EN AMBIENTE CONTROLADO DE SIMULACIÓN	68
6	<u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>	<u>72</u>
	<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>74</u>

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, consiste en el desarrollo de un Robot de desactivación de explosivos; creado con el fin de disminuir el riesgo humano en esta tarea. Es denominado Robot EOD por sus siglas en inglés *Explosive Ordnance Disposal*, así mismo, el robot está compuesto por una plataforma móvil y un manipulador, la plataforma móvil está en configuración diferencial y cuenta con un sistema de tracción tipo oruga para que pueda movilizarse sobre todo tipo de terreno y el manipulador está acoplado a dicha plataforma y consta de tres (3) articulaciones de tipo rotacional. Además, contiene un cañón disruptor de explosivos de tipo comercial, donde este sistema es seleccionado para no generar daños sobre el robot al momento del disparo; por ende, se selecciona uno con menor retroceso. También, se integra una cámara y un sistema de control que permite ser tele operado a una distancia segura.

En cuanto al desarrollo del robot, los autores se basaron en el diseño de una proforma móvil adquirida previamente; a la cual, le realizaron unos ajustes que facilitaron el estudio cinemático. El propósito principal de estos ajustes es formar una estructura sólida, que permita estudiar el móvil como un objeto rígido; de modo que, se tuvo en cuenta las restricciones de tipo holonómicas para el desarrollo del modelo cinemático del móvil, el cual, tiene un comportamiento de tipo diferencial. De igual manera, se realizó el mismo proceso a un manipulador consultado en *GradCAD*, una biblioteca de CAD libres. A este diseño seleccionado, se le realizó unos ajustes como el redimensionamiento de las articulaciones, con el fin de tener un mejor espacio de trabajo; luego, se realizó el estudio para determinar el modelo cinemático directo del manipulador y, al finalizar el estudio cinemático de forma independiente. Así mismo, se procede a consolidar un solo modelo cinemático para el robot, donde se acopla el modelo del móvil con el modelo del manipulador.

Por consiguiente, la investigación del modelo cinemático se realizó con el interés de conocer el comportamiento del robot; por esta razón, se llevó a cabo una validación del comportamiento del robot en base a los modelos estudiados, reflejando de forma gráfica la trayectoria efectuada por dos puntos de interés en particular. El primer punto, está ubicado en la plataforma móvil y es donde estará empotrado el manipulador y el segundo punto, es el efector final del manipulador, donde se ubica el cañón disruptor y la cámara para la tele operación. Por otra parte, establecer los modelos cinemáticos del robot y el modelo cinemático acoplado, permite realizar una simulación del robot y su comportamiento para efectuar un breve control por instrucciones. De este modo, se realizó una implementación del robot en un ambiente controlado, permitiendo la realización de tareas sencillas como: desplazamientos y movimientos del manipulador por el ambiente, la cual, fue de gran utilidad. Cabe destacar, la limitación causada por la pandemia Covid-19, la cual, restringió la posible creación de un prototipo del robot, debido a, que no se podía hacer uso de los laboratorios de la Universidad Piloto de Colombia.

1.1 Planteamiento del problema

El conflicto que ha sufrido la sociedad colombiana en las últimas décadas se ve cuantificado en cifras que revelan la magnitud de los daños causados a lo largo de la historia. Según un reporte se estima que existen alrededor de 11.220 víctimas en el país, asociadas a la presencia de minas antipersonas, artefactos explosivos y munición sin explotar (Yanes *et al*, 2019). Es por lo anterior, que los Artefactos Explosivos Improvisados se conocen como (AEI), que están contruidos de forma manual; además, existen varios diseños y apariencias, todo depende de la creatividad del constructor con el objetivo de tener un camuflaje que no llame la atención en el lugar que fue seleccionado por el terrorista. Por lo general, el AEI se intenta instalar tan cerca a la víctima como sea posible para asegurar su efectividad (Mañas *et al*, 2007).

Los AEI representan un gran riesgo tanto para la población como para el personal encargado de la desactivación de estos artefactos, teniendo en cuenta la cantidad de población civil afectada por dichos artefactos hasta la fecha y el alto porcentaje de dispositivos explosivos activos en el territorio nacional. De esta manera, es indispensable la creación y el desarrollo de mecanismos para el manejo de estos residuos de guerra. Por ende, se requiere un dispositivo que ayude a la desactivación o detonación controlada de este tipo de materiales y una herramienta que aumente la seguridad del personal encargado del manejo de estos artefactos. Es por esto, que en los distintos países existen medidas para contrarrestar este tipo de dispositivos, una de estas consiste en que un técnico antiexplosivo se vista con un traje de protección e interactúe con el AEI y la otra opción es utilizar un robot diseñado específicamente para funciones de eliminación. La selección depende de algunos factores como: situación, ubicación del dispositivo, entorno, gravedad de la amenaza y la precisión del tiempo. (Scholtz *et al*, 2006). Por otra parte, las formas más comunes de neutralización de un artefacto explosivo son: la destrucción de componentes clave (baterías, circuitos, cables) por medio de cargas disruptivas (agua, arena, proyectiles de plastilina o de cobre, etc.), o por medio de contra cargas explosivas que se colocan cerca del artefacto (Ramírez *et al*, 2018).

1.2 Objetivos

En este apartado, se mencionan los objetivos planteados por los autores para el desarrollo del trabajo.

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y realizar la simulación de un robot híbrido tele operado que permita la desarticulación de artefactos explosivos, aplicando técnicas de adquisición de datos y transmisión de señales en tiempo real, con el fin de establecer un sistema de fácil manipulación.

1.2.2 Específicos

- Desarrollar el modelo matemático de un robot híbrido (móvil-manipulador), que permita realizar una simulación del funcionamiento del robot con el fin de validar los sistemas de tele operación.
- Diseñar e implementar un ambiente de simulación para el estudio cinemático de un robot híbrido y así establecer el correcto funcionamiento de las tareas de locomoción en ambientes controlados.
- Establecer y caracterizar las diferentes tecnologías disruptivas que neutralizan los dispositivos explosivos, con el fin de determinar el sistema de desactivación más pertinente de acuerdo con el sistema robótico propuesto.
- Proyectar los dispositivos electrónicos que permitan establecer un diagrama de conexiones funcional del robot, para verificar la estabilidad de operación del sistema propuesto.
- Simular en un programa ingenieril el robot y los sistemas diseñados según las necesidades identificadas y establecidas por medio del diseño usado.

1.3 Justificación

En este apartado, se explican los motivos que conllevaron a la realización de este proyecto, el cual, tendrá en cuenta el planteamiento del problema de investigación y se expondrá a base de argumentos de convivencia, relevancia social, implicaciones prácticas, valor teórico y utilidad metodológica. De esta manera, la simulación que será desarrollada en este proyecto de investigación permite analizar y verificar el comportamiento cinemático de un robot disruptor, disponiendo de varios componentes que son de fácil acceso y necesarios para comenzar con la fabricación.

Por otra parte, el resultado del estudio servirá como interfaz de pruebas de movimiento para robots móviles con acople de manipulador, analizando su rendimiento con el entorno y la gravedad que puede ser de utilidad para examinar si se necesitan mejoras en el diseño antes de su fabricación. En cuanto al desarrollo del manipulador, se identificó que solo son necesarios tres grados de libertad para cumplir con los requerimientos de posición del eslabón final, donde estarán dispuestos la cámara y el cañón y el manipulador tendrá una configuración planar, la cual reducirá los costos de diseño y fabricación.

Es así como, esta investigación permitirá salvaguardar las vidas de técnicos antiexplosivos, que se encuentran en constante contacto con estos artefactos. Además, la función principal del móvil es ser el medio de interacción principal entre el artefacto y el experto, garantizando una distancia moderada para la seguridad del operador.

1.4 Antecedentes

En los antecedentes de alcance internacional el Robot ROBIN 1 sobresale ya que comprende varios temas necesitados que son Robot disruptor, tele operación, cinemática, manipulador y plataforma móvil. El robot Robin 1, es un robot híbrido con una plataforma móvil y un manipulador acoplado con la función de desactivar explosivos, reacondicionado por los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas armadas de Ecuador en el año 2017; el robot presentaba una avería que no le permitía operar, los estudiantes reacondicionaron la parte motriz de la plataforma móvil y el manipulador, un sistema de control inalámbrico permite la operación a distancia y es controlado por un mando tipo joystick, Para una operación intuitiva, el sistema de tracción está compuesto por dos orugas, en las cuales se instalaron dos cámaras: una de desplazamiento y otra acoplada al efector final para la operación.

El Robin 1, cuenta con un cañón disruptor de carga de agua, en las pruebas de autonomía se asegura que Robin 1 es capaz de operar durante 2 horas sin intervención, a pruebas de 120 metros de distancia entre operador y robot no se presentaron errores de comunicación, haciendo pruebas en distintas plantas de un edificio se evidencia que la señal de control tienen mayor alcance que la de monitorio en el 3 piso de distancia entre receptor y emisor se presenta errores en la señal de monitor, pero la de operación está en óptimas condiciones. En las pruebas del cañón disruptor se presentaron errores de precisión de casi 2 cm, aunque el equipo argumenta que no afecta dado que las superficies serán mayores a los 2cm, los resultados de operación con técnicos que no tenían noción en el manejo de este tipo de Plataformas móviles demostraron que la operación del robot es intuitiva en gran medida facilitando la inducción a operadores con baja experimentación.

La siguiente investigación da como pautas el control del movimiento de los manipuladores tema primordial que nos permita profundizar acerca del manejo del manipulador del diseño de la presente investigación.

La investigación de (Hernández, 2015), sistema de control de movimiento para un manipulador móvil aporta información de alta relevancia que apoyara en el desarrollo del estudio cinemático del manipulador. Dominar el funcionamiento del sistema embebido que tiene instalado el manipulador móvil y así desarrollar la cinemática directa de aparte del manipulador y la plataforma móvil para estudiar las estrategias de seguimiento de trayectorias y así crear los algoritmos que permitan el control del robot estos códigos se pondrán a prueba por medio de simulaciones. Se procederá a buscar referencias bibliográficas con la palabra clave de manipuladores móviles y de sistemas embebidos como desarrollando algoritmos de control discreto, que serán de vital importancia para el correcto movimiento del manipulador de configuración diferencial y para probar y realizar ajustes se recurrirán a simulaciones. al ser una plataforma abierta fue sencillo realizar modificaciones, los sistemas de algoritmos de lazo cerrado permitieron reducir el tiempo de respuesta mejorando los índices de operación del manipulador Móvil.

La programación se escogerá a prueba y error, el ensamble de este brazo será controlado directamente con el software que se va a crear. Se cumplieron todos los objetivos, pero se superó el tiempo estimado por limitaciones en el manejo del Matlab y dificultades en el armado físico del brazo.

Como fuente nacional principal se utiliza la investigación VALI, dado que los métodos la mayoría de los métodos que utiliza Ramírez y equipo fueron guía para ubicar y darle un orden a la presente investigación. En (Ramírez, et al, 2019), se presenta a VALI como el Desarrollo y Evolución de un Robot Para Neutralizar Explosivos, este es un vehículo antiexplosivo Liviano, que ayudara a las fuerzas armadas en las tareas de disrupción de explosivos en Colombia. Tomando como punto de partida el VALI 1 mejorando los aspectos que no se alcanzaron por el corto tiempo de desarrollo del VALI 1, se dividirá el proyecto en dos partes la mecánica y eléctrica para posteriormente unirlos. La configuración del robot VALI 2 con plataforma de orugas, con servomotores DC, con cajas reductores que permiten un aumento en el torque natural del motor, con un manipulador de 4 grados de libertad, con sistema de cámaras y luces que facilitaran la operación en lugares oscuros donde la cámara no pueda captar, instalando una base de Tele operación, con un sistema embebido, con sistema operativo Linux conectado a una red Canope. Se evidencia que las orugas se salían de las guías, es necesario instalar las guías más altas, para el cálculo de los motores es necesario tener en cuenta que los motores deben estar sobredimensionados por si se requiere explorar superficies no estructuradas, hubo un error al seleccionar los motores causando un desaprovechamiento los motores de altas revoluciones.

1.5 Alcances

Este proyecto pretende investigar y explorar el estado actual de las investigaciones sobre mecanismos y tecnologías de disrupción, con el propósito de poder comprender el funcionamiento de tal proceso y así, ofrecer una solución a la problemática a partir del estudio de física de fuerza de retroceso. Además, permite escoger el cañón disruptor apropiado para cubrir las necesidades del robot, en este caso, es el que tenga el menor coeficiente de fuerza de retroceso para no afectar de manera negativa la estructura del robot y no dañar los componentes importantes del móvil.

Por ende, realizar el diseño del robot en un software de diseño CAD, tomando como referencia la plataforma móvil que se adquirió por el equipo en el pedido prepandemia COVID – 19 e implementando los ajustes necesarios para que la exitosa exportación a otras plataformas de entornos 3d se realicen en los procesos posteriores.

Para de esta manera, poder simular la plataforma robótica en el software Webots que ofrece un entorno 3d simulado, en el cual, se replican de manera precisa las fuerzas de gravedad, de rozamiento y otros componentes en los que está expuesto un cuerpo en la vida real. También, se puede analizar el comportamiento del robot con el entorno y verificar si es necesario algún ajuste antes de seguir su posible fabricación.

Finalmente, analizar y verificar el comportamiento del movimiento del robot por medio de los estudios referentes a la cinemática del manipulador, el análisis de la cinemática diferencial para la plataforma móvil y analizar el Robot con el modelo cinemático acoplado en Matlab; el cual, permite generar las gráficas de movimiento del punto de interés de la plataforma móvil del robot y del eslabón final del manipulador, siendo este el que tendrá acoplado el cañón disruptor y la cámara.

1.6 Limitaciones

Debido al restringido uso de explosivos, los autores no tienen disposición alguna para realizar pruebas de desactivación de explosivos; por lo tanto, el proyecto se enfoca en el estudio de los modelos cinemáticos y la validación de estos, por medio de un software de ingeniería. Entre las limitaciones encontramos que se restringió posibles comprobaciones del sistema electrónico y tele operación, ya que, los protocolos contra el covid-19 hicieron que no se pudiera usar los laboratorios de la universidad. Por esta razón, se proponen componentes eléctricos y electrónicos que habían sido usados por los autores en proyectos realizados para actividades académicas anteriores. Por lo tanto, no hay manera de obtener la distancia permisible para la comunicación inalámbrica, lo cual, dificulta poder establecer la distancia máxima entre el operador y el robot; también, el de estimar el tiempo de carga para la batería propuesta, haciendo improbable estimar el tiempo máximo de operación para el robot.

Cabe destacar, que no se puede establecer una comparación entre el comportamiento del movimiento en la vida real y el movimiento en un programa de modelamiento robótico; puesto que, las físicas de los simuladores de movimiento emulan comportamientos reales, por lo que, suelen tener un margen de error.

1.7 Línea de investigación

La línea de investigación en la cual se enmarca el desarrollo del proyecto es Robótica y biomecatrónica.

1.8 Organización del documento

El documento está dividido en seis capítulos, el capítulo uno presenta un preámbulo sobre el contenido de este documento, en el cual, se expone, justificará, demostrará, entre otras, las razones del por qué se realizó esta investigación. También se agregarán los alcances del proyecto identificados previamente. En el capítulo dos, se recopilará la información de distintos autores que sirve como referencia en los procesos que se ejecutarán en el proyecto, e indicará las normativas que lo reglamentan. Así mismo, en el capítulo tres se presenta el resultado de haber adaptado las teorías matemáticas de los autores que fueron consultados

anteriormente, explicando la conformación de un robot desactivador de explosivos que se recomienda en las investigaciones documentadas en el capítulo 2. Además, se presentarán los modelos cinemáticos que fueron ajustados para que cumplieran con las especificaciones del robot que se está desarrollando. En el capítulo cuatro, muestra el diseño que se desarrolló del robot desactivador de bombas y se profundizará en los softwares de diseño en los que se soportó este proyecto. De igual forma, se mencionará de manera específica los entornos de simulación 3D que se utilizaron para el análisis del movimiento del robot y se propondrá la distribución electrónica que contendrá el sistema con la función de tele operación. En el capítulo cinco se presenta la comprobación de los cálculos, estudios, teorías, entre otros; que fueron utilizados durante el desarrollo del proyecto. A su vez, se validará la configuración propuesta para la conformación del sistema; también, se evaluarán los entornos de simulación 3D que sirvieron como apoyo para el análisis de movimiento del robot. Finalmente, en el capítulo seis, se exponen las conclusiones que permiten establecer el cumplimiento de los objetivos propuestos.

2 MARCO REFERENCIAL

Este capítulo, contendrá el soporte bibliográfico de varios autores, que son los precursores de los temas que se van a consultar en este proyecto; puesto que, esta información será la base principal para generar una guía de los procesos que encaminarán al cumplimiento de los objetivos que se plantearon en esta investigación, para dar solución a la problemática identificada. Así mismo, adicionar la parte normativa, donde se establecerá los lineamientos que se deben de seguir en los aspectos técnicos.

2.1 Marco teórico

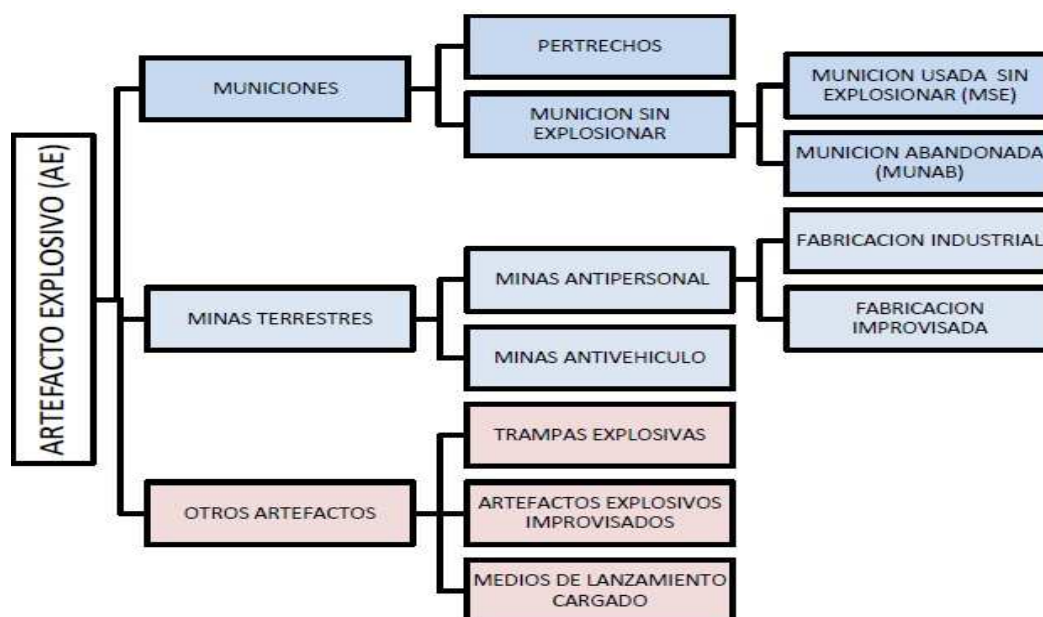
En este apartado, se presenta información sobre los artefactos explosivos, profundizando en los que son de fabricación artesanal o improvisada; ya que, son de uso frecuente en el territorio colombiano. Posterior a esto, se documenta la definición de robot y los robots usados en la eliminación de artefactos explosivos.

2.1.1 Artefactos explosivos

Colombia, antes del tratado de paz sufrió una intensificación en el uso de explosivos, por parte de grupos armados al margen de la ley como medida de defensa; con la intención de impedir el ingreso y delimitar los territorios por los cuales avanzaban las fuerzas del estado; debido, al rápido avance que tenían los cuerpos militares para localizar, encontrar y desactivar artefactos explosivos. Así mismo, los terroristas empezaron a implementar diferentes partes plásticas para incrementar su dificultad de detección y la ubicación de dicho artefacto. A su vez, le incorporaron un accionador tipo jeringa, en la cual, colocaban dos terminales conductoras en lo más profundo de la mina; ya que, la hace más sensible y mucho más peligrosa cuando se trate de desactivar el AEI (Artefacto Explosivo Improvisado) (DISPOSICIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS Y MANEJO DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS., 2017).

Normalmente para fabricarlos, se utilizan explosivos de uso militar o dinamita comúnmente empleada en la construcción y, en caso de no disponer de ninguno, se utilizan materiales de fácil obtención como: triple óxido de triacetona o bombonas de butano. En cuanto, a los mecanismos comúnmente utilizados para la detonación a distancia son: radios, teléfonos móviles, buscapersonas, controles de puerta de garaje, controles remotos de juguetes o mangueras de goma, que conduzcan una presión determinada (Hernández, 2003). Los artefactos explosivos se clasifican de acuerdo con la convención de Ottawa, la cual, cataloga la intencionalidad del explosivo. El siguiente esquema presenta en orden de intencionalidad los AE (artefactos explosivos) para Colombia. Se puede observar la clasificación en la **Figura 1**. Cabe mencionar, que por el conflicto armado interno vivido en Colombia se hablará de artefactos explosivos de fabricación improvisada.

Figura 1. Esquema de clasificación de AE en Colombia



Tomado de: Explosivos et al., 2017.

La mina terrestre, es un dispositivo explosivo diseñado para destruir o dañar un vehículo y, a su vez, inmovilizar, herir o matar personas cercanas al artefacto. Este tipo de minas son sensibles a presión directa, cable de tropiezo, control remoto o una combinación de estos métodos ya nombrados (Enke, 2015). Estos artefactos en la mayoría de los casos están ocultos en el entorno, por lo que son difíciles de detectar, debido a que son camuflados en las hierbas o entre los árboles aledaños. Usualmente, en la guerra estos dispositivos son instalados siguiendo un modelo de barrera a lo largo de las vías y en puntos estratégicos. Actualmente, existen más de 600 tipos de minas terrestres, sin tener en cuenta los numerosos artefactos explosivos improvisados a las que se enfrentan las fuerzas militares al momento del combate (Enke, 2015). En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se observan algunas minas terrestres.

Figura 2. Algunas de las minas terrestres encontradas en Colombia.



Tomado de: centro nacional contra artefactos explosivos y minas, n.d.

Este tipo de artefactos, son diseñados para ser detonados en su mayoría al contando de una persona con su sistema de activación y otra parte, pueden ser detonados de forma remota.

Por este motivo, son camuflados en los alrededores y caminos que suelen transitar las fuerzas militares y personal civil. En la ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se puede observar el mecanismo usado para activar estos artefactos explosivos.~~

Figura 3. Diseño interno de algunas minas antipersona (centro nacional contra artefactos explosivos y minas, n.d.)



Tomado de: centro nacional contra artefactos explosivos y minas, n.d.

Las minas normalmente se activan mediante proximidad o contacto de una persona, y tiene la función de lesionar o matar varias personas; debido a la onda de choque o la metralla impulsada por la explosión. Las minas antipersonales se encuentran enterradas bajo tierra o ancladas a cierta altura, y suelen ser dispositivos pequeños de diversas formas y muy baratos, que los convierte en uno de los tipos de dispositivos más comunes; sus dimensiones están entre 10 cm x 18 cm y 15 cm x 30 cm. La mayoría de los explosivos tienen una carga pequeña y pesan menos de 100 gramos. La muerte o lesiones suelen ser causadas por una explosión concentrada de explosivos.

Artefacto explosivo improvisado y armas trampa. Es un dispositivo explosivo artesanal, que está deliberadamente dispuesto para causar daño cuando alguien manipula este objeto aparentemente inofensivo o realiza operaciones normalmente seguras (como abrir una puerta o encender un televisor). En circunstancias normales, los artefactos explosivos improvisados y las trampas explosivas son producidos por las fuerzas armadas de oposición; que tienen oportunidades relativamente limitadas para usar armas o intentar encubrir su participación en ataques. Debido a la falta de materias primas y herramientas adecuadas, la construcción del AEI no cumple con los estándares de seguridad de las municiones fabricadas industrialmente.

Figura 4. Artefacto explosivo improvisado



Prácticamente, cualquier objeto es susceptible de convertirse en un arma trampa o en un AEI. Las armas trampa y los AEI se hallan en casi cualquier lugar y adquieren la forma de todo tipo de objetos. Incluso, se colocan armas trampa en los cadáveres para infligir lesiones a quienes traten de retirarlos. El propósito de las armas trampa y los AEI es resultar indetectables.

2.1.2 Robot EOD

La Comisión Europea, define un robot como: una máquina de autocontrol y acción independiente, equipada con herramientas específicas para manejar o mecanizar; cuyos movimientos, son programables con respecto a la orientación, posición y secuencia (siciliano et al, 2008). Existen varios tipos, entre ellos: manipulador o industrial, móviles androides o humanoides zoomórficos.

Los robots móviles son ideales en el momento de hacer operaciones, cuya finalidad consiste en la identificación o reconocimiento de lugares remotos de difícil acceso. Se diferencian con el resto de las categorías, ya que tienen diferentes mecanismos integrados; establecidos como patas o ruedas, que les permite desplazarse de un lugar a otro de forma eficiente (Jurus et al, 2016). Los robots son empleados por plantas industriales para el transporte de mercancías normalmente en modo automático. Actualmente, su demanda ha ido en aumento por los fanáticos que disfrutan llevándolos al extremo en competencias, por las fuerzas militares que han desarrollado configuraciones muy útiles; con el fin, de proteger vidas humanas. Son denominados robots de eliminación de artefactos explosivos, conocidos a nivel técnico como robots EOD por sus siglas en inglés *Explosive Ordnance Disposal* (Ruiz, 2010). Existen varias configuraciones para estas máquinas, una de las más solicitadas por los cuerpos de antiexplosivos, es la configuración que trae equipada con sigo la tracción tipo “oruga”. Con el fin, de no tener dificultad en el desplazamiento por cualquier terreno, incorporando un manipulador, el cual tendrá varias funciones y herramientas dependiendo la circunstancia y el lugar (Goldenberg et al, 2000). La conducción de este robot está basada en mapas que ayudan a mantener la conciencia situacional y es útil para los movimientos de larga distancia (Fong et al, 2001). Una correcta práctica para el pilotaje de los robots (EOD), consiste en el proceso de entrenamiento que se le brinda al operador antes de utilizar la máquina (Scholtz et al, 2006); esto es posible, gracias a la comunicación entre los dos actores. Además, esto hace parte del proceso de tele operación, que es una parte de la ingeniería de control y en particular de los sistemas de control en red. El controlador es un dispositivo maestro operado por un ser humano, y la planta es un dispositivo esclavo que reproduce en la medida de lo posible los movimientos del operador. Los últimos estudios de tele operación se concentran fundamentalmente, en la adaptación de los parámetros de estabilidad y pasividad de las variables de onda a redes con retardos y con pérdida de paquetes (Díaz et al, 2012).

Los robots (EOD) tienen varios accesorios, entre ellos se dispone de las pinzas o más conocidas como “grippers” de dos y tres dedos que permiten cargar el artefacto sospechoso

para introducirlo en un contenedor especial, capaz de resistir la energía que expulsa o libera el explosivo. También, puede realizar múltiples acciones relacionadas a la manipulación de herramientas que facilitan la desarticulación de los artefactos (Andrews, 2010).

La forma más común de neutralización de un artefacto explosivo es la destrucción de componentes claves (baterías, circuitos, cables) del artefacto por medio de cargas disruptivas (agua, arena, proyectiles de plastilina o de cobre, etc.), o por medio de contra cargas explosivas que se colocan cerca del artefacto (Ramírez *et al*, 2019). Para el desarrollo de contramedidas, definidas como un sistema diseñado para prevenir que un arma guiada por sensores destruya su objetivo, en la lucha contra los AEI se fundamentan dos grandes principios: la neutralización del artefacto y la protección frente a su acción. Gracias al desarrollo de tecnologías disruptivas, el cañón se vuelve un accesorio esencial; este concentra una alta cantidad de energía, lo que permite que el proyectil sea capaz de atravesar hasta un tanque de propano. Es importante identificar la fuerza de retroceso que es el impulso negativo que produce el cañón al disparar, este puede inmovilizar el robot o dañar gran parte de los componentes. Existen algunas maneras para minimizar esta fuerza, una es el rebote mecánico que consiste en la adecuación de una carcasa con un resorte capaz de contrarrestar la fuerza, y otra es disparar una pequeña cantidad de agua en forma de rocío al sentido contrario con varios agujeros alrededor de la circunferencia del cañón. Esta propuesta puede convertir la fuerza de retroceso en cero, pero, necesita de más energía para no afectar la potencia de disparo (Chantrasmi et al, 2015).

2.2 Marco normativo

En este apartado, se involucran las normas que rigen los diferentes ámbitos que abarcan las investigaciones de este proyecto. En la parte de la robótica se encuentran normativas ISO, que son las que se tomaron como referencia para la construcción del robot EOD. En Colombia, no se han profundizado las restricciones de la robótica, por lo cual, es necesario tener un punto de vista global robusto.

ISO 8373 del 2012 (Robots y dispositivos robóticos – Vocabulario) fue redactada por el Comité Técnico ISO / TC 184, *Sistemas e integración de automatización*, Subcomité SC 2, *Robots y dispositivos robóticos*. La presente norma internacional precisa el vocabulario utilizado con los dispositivos robóticos y los robots que operan tanto en entornos industriales como no industriales. Definiendo y dando una breve introducción a los términos que más se utilizan.

Este proyecto sigue de forma estricta esta normativa, ya que, es necesario seguir la estandarización de la denominación de los distintos componentes y accesorios que se utilizan en la robótica, tomando las distintas directrices de esta ley en la **Tabla 1**, Terminología general según ISO 8373. Se relacionarán los términos con su respectivo apartado con el que se ubica en el documento de la normativa ISO 8373.

Tabla 1. Terminología general según ISO 8373.

Vocabulario Según ISO 8373.

Apartado	Concepto
2.1	Manipulador.
2.2	Autonomía
2.3	Alteración Física
2.6	Robot.
2.7	Sistema de Control.
2.8	Dispositivo Robótico
2.13	Sistema de robot.
2.17	Operador.
2.20	Instalación.
2.22	Integración.
2.29	Interacción Humano-robot.

Tomado de: Propia del autor.

La tabla anterior, relaciona el vocabulario general que se utilizó en los distintos apartados, para definir o dar alusión a los distintos componentes del robot a lo largo del presente documento.

ISO 19649 del 2017 (Robots móviles – Vocabulario). Este documento fue preparado por el Comité Técnico ISO / TC 299, Robótica. Esta ISO se especializa en definir términos enfocados a robots móviles que viajan en superficies sólidas, incluyendo robots que operan en aplicaciones industriales y de servicio.

Por ende, fue necesario acogerse a la terminología de esta norma, para el correcto nombramiento de los términos que se enfocan en la parte móvil; siendo notable la necesidad de identificar cada parte y proceso para que este trabajo cumpla con los estándares internacionales que ofrece la ISO. En la **Tabla 2**, Terminología robots móviles según ISO 19649., se relaciona la terminología de la ISO 19649 que se utiliza en este proyecto.

La ISO 19649 es un complemento de la ISO 8373, toma terminología específica de esta para ofrecer un marco de referencia global, dirigida a los distintos desarrolladores y fabricantes de robots en el mundo para poder tener concordancia en el nombramiento de procesos de los robots móviles.

ISO 9787 del 2013 (Robots y dispositivos robóticos: sistemas de coordenadas y nomenclaturas de movimiento). Norma socializada por el Comité Técnico ISO / TC 184, Sistemas e integración de automatización, Subcomité SC 2, Robots y dispositivos robóticos. La norma define los sistemas de coordenadas para la configuración de la programación y orientación de los robots, también, incluye nomenclaturas con notaciones para lograr la estandarización entre los desarrolladores.

Tabla 2. Terminología robots móviles según ISO 19649

Vocabulario Según ISO 19649.	
Apartado	Concepto
3.1.1	Robot Móvil.
3.1.2	Plataforma Móvil.
3.1.4	Dirección
3.1.5	Configuración.
3.1.8	Terreno de Viaje.
3.1.10	Locomoción
3.2.1	Suspensión.
3.3.2	Rueda motriz.
3.3.7	Accionamiento Diferencial.
3.4.1	Paso.
3.4.8	Diagrama de marcha
3.5.4	Tracción.
3.5.6	Ángulo de dirección.
3.5.7	Viaje hacia Adelante.
3.5.15	Radio de giro
3.5.16	Ancho de giro
3.6.3	Guía.

Tomado de: Propia del autor

Los lineamientos de esta norma sirvieron como base para realizar los correspondientes ajustes y configuraciones para simular el sistema robótico en los distintos ambientes de simulación que se utilizan en este proyecto, cumpliendo las exigencias que contiene esta norma. La investigación de este proyecto utilizó vocabulario de esta ISO, que se relaciona en la **Tabla 3.** terminología de la ISO 9787.

Tabla 3. terminología de la ISO 9787

Vocabulario Según ISO 9787	
Apartado	Concepto
3.1	Sistema de Coordenadas Mundial.
3.8	Espacio de Trabajo.
3.10	Punto de referencia de la plataforma móvil.
3.13	Sistema de Coordenadas de la cámara
3.14	Pinza de Agarre.

Tomado de: Propia del autor.

La ISO 9787, utiliza términos que fueron definidos con antelación en la norma ISO 8373, ayudando a definir la correcta nomenclatura de las coordenadas 3D, que se utilizan para

definir los estudios matemáticos para el desarrollo de los distintos análisis de cinemática del movimiento del robot EOD.

ISO 13399 (Representación e intercambio de datos de herramientas de corte). Norma desarrollada por el comité técnico de ISO TC 29, compuesta de varias partes que se van publicando en determinado tiempo. Esta norma estandariza los procesos y las herramientas de corte, que comúnmente son utilizados en los programas de diseño asistido por computadora. En el diseño asistido siempre se basa de formas geométricas y se cortan para dar forma al producto final, la idea de esta norma es lograr el intercambio de estos archivos en plataformas CAD (diseño asistido por computadora), CAM (Fabricación asistida por computadora), CAE (ingeniería asistida por computadora), PDM/EDM (gestión de datos de productos), MRP (planeación de productos de fabricación), ERP (planeación de recursos empresariales) y CAX (tecnologías asistidas por computadora).

Se siguió de manera activa los estatutos que exige esta norma para permitir la estandarización y poder compartir archivos entre plataformas, usando como editor principal de diseño 3D el software SolidWorks. Posteriormente, analizando la simulación de los estudios cinemáticos de Robots EOD en el Software Matlab; por último, realizando la validación de los sistemas del robot propuesto en el Software robótico Webots, llevando a cabo, cortes de tornillos, de flanche o de figuras para convertirlas en estructuras simples como los describe la ISO 13399.

2.3 Marco contextual

En este apartado se describirá el escenario físico del proyecto de investigación. En el momento de iniciar, se tenía planeado realizar el montaje de un robot EOD, pero, por causa de la pandemia que se vivió en el mundo, en el año 2020, fue necesario modificar el alcance del proyecto a un prototipo de simulación; con el cual, se analizará y estudiará los modelos cinemáticos de un robot híbrido (manipulador-móvil). No obstante, los objetos 3D de este trabajo, se realizará por medio del programa de diseño SolidWorks la versión trial para estudiantes con la posibilidad de exportar los diferentes diseños a otras plataformas de análisis. Por otra parte, para realizar el estudio de movimiento del robot EOD, se utilizará el programa de ingeniería Matlab; el cual, ofrece una manera de realizar el estudio de la matemática necesaria para una exitosa relación entre la programación y el equipo Robótico a modelar.

Para finalizar, este proyecto de investigación también tendrá el análisis de un cañón disruptor, que es una parte vital en el tipo de robot que se va a desarrollar en el presente estudio. Se compararán las características técnicas de cañones que estén a la venta a determinado tipo de público, por medio de una tabla comparativa se seleccionará el cañón más acorde a las necesidades de la configuración del móvil, con base en el estudio de la física llamada fuerza de retroceso.

2.4 Marco metodológico

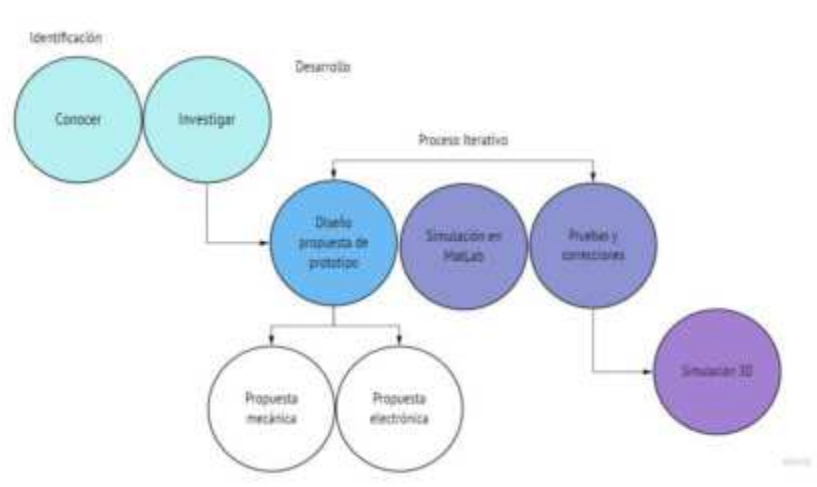
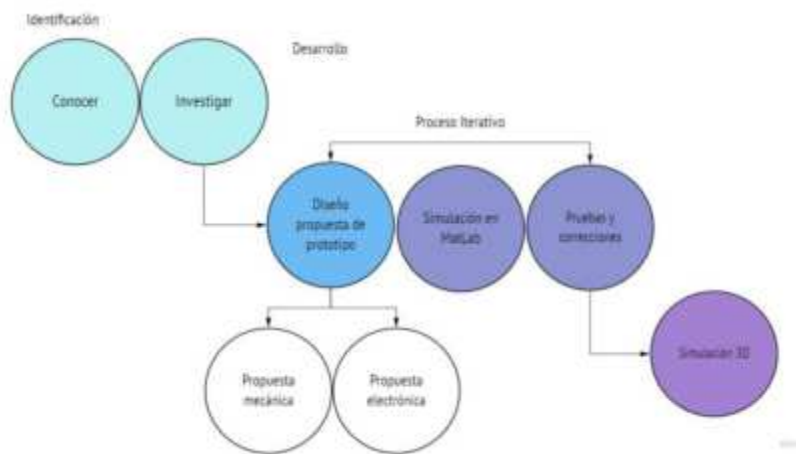
El diseño y desarrollo del robot tele operado, hizo uso de una metodología de estudio de tipo descriptivo; ya que, se realizó la identificación del problema, luego se indagó en los elementos que dan base para abordar la solución, finalmente se desarrolló el sistema. En la  se encuentra el origen de la referencia., se muestra el diagrama del proceso metodológico seguido en el desarrollo del proyecto.

Figura 5. Diagrama de la metodología del desarrollo del dispositivo.



Tomado de: Propia del autor

3 MODELAMIENTO MATEMÁTICO

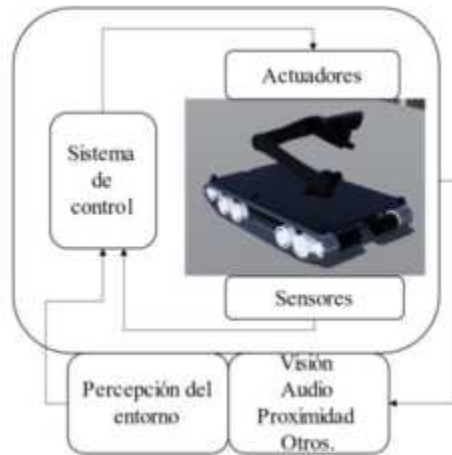
En este capítulo, se estudia una breve definición de sistema robótico, se abordan los componentes usados para el robot desactivador de explosivos, se explora las características de la plataforma de locomoción, su origen y evolución por parte de los autores, las características del manipulador, los criterios de selección del cañón a usar. Finalmente, se efectúa el modelamiento cinemático del robot, en el cual, se abordan los dos modelos individuales, el de la plataforma móvil, siendo estudiada como un robot diferencial y el modelo del manipulador. Estos estudios terminan en el modelo cinemático acoplado entre estos dos modelos.

3.1 Definición de un sistema robótico

El término robot nace asociado a la idea del trabajo y producción. En 1915, Leonardo Torres Quevedo declaró a la revista “Scientific American” (Eames, 1973): “Los antiguos autómatas imitaban la apariencia y movimientos de los seres vivos, lo cual, no tiene mucho interés práctico. Lo que yo busco es una clase de aparatos que, sin necesidad de reproducir los gestos más visibles del hombre, intenta obtener los mismos resultados que una persona”.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se muestra el esquema básico de un robot. En esta se identifica un sistema mecánico, actuadores, sensores y el sistema de control como elemento básico necesario para cerrar la cadena actuación-medidas-actuación, que integran el concepto.

Figura 6. Robots y su interacción con el entorno (Fuente autores).



Tomado de: Propia del autor.

El sistema mecánico puede distinguirse en el brazo articulado y en la plataforma móvil, donde se emplean actuadores para desempeñar movimientos y desplazamientos. Desde el punto de vista del procesamiento de la información, en la robótica se involucran funciones de control de movimientos, percepción y planificación en un sentido amplio. El sistema de control involucra bucles de realimentación de la información suministrada por los sensores internos como del entorno.

Los sensores internos miden el estado de la estructura mecánica y en particular los giros o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, y fuerzas. Así mismo, estos sensores permiten cerrar bucles de control de las articulaciones para la estructura mecánica del manipulador. Los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot. La información que se suministra es utilizada por el sistema de percepción para aprehender la realidad del entorno. Los sistemas de percepción sensorial hacen posible que un robot pueda adaptar automáticamente su comportamiento en función de las variaciones que se producen en su entorno, haciendo frente a situaciones imprevistas.

El desarrollo de sistemas de percepción en robótica surge a partir de los progresos tecnológicos en sensores tales como: los de visión, tacto y audición. Sin embargo, la percepción no solo involucra la captación de la información medida por los sensores, sino que también, implica su tratamiento e interpretación. Es claro que la complejidad de la percepción artificial depende de lo estructurado en este entorno. Por último, la planificación tiene el objetivo de encontrar una trayectoria desde una posición inicial a una posición objetiva, sin colisiones; esto es, de la forma más simple posible.

En los robots teleoperados las tareas de percepción del entorno, planificación y manipulación compleja son realizadas por humanos, es decir, el operador actúa en tiempo real cerrando el bucle de control de alto nivel. Los sistemas evolucionados suministran al operador realimentación sensorial del entorno (imágenes, fuerzas, distancias). En la manipulación se emplean brazos con controladores automáticos que actúan según lo desee el operador.

3.2 Componentes de un robot desactivador de explosivos

Para el robot desactivador de explosivos se proponen dispositivos ya adquiridos por los autores que eran de fácil acceso a excepción del cañón. Para esto, se plantea un estudio y posterior selección, el cual, permita un buen funcionamiento del robot. Por otra parte, las posibles afectaciones que se puede originar con el uso de un cañón desproporcionado. La locomoción está encargada de una plataforma móvil de tracción tipo oruga dispuesta por los autores, a la cual, se le realizaron algunas modificaciones que permiten una mejor implementación. La manipulación del cañón y cámara están sujetos al efector final de un brazo de tres grados de libertad obtenido en la web, este diseño estuvo también sujeto a modificaciones. En los títulos posteriores se aborda específicamente cada uno de estos componentes.

3.2.1 Locomoción

El diseño del robot EOD no es propiamente creación de los autores de este trabajo, algunas partes del robot se compraron y de ahí se dio inicio con el proceso de modelamiento, por medio del programa de dibujo asistido por computadora. Además, fue necesario hacer varias pruebas para decidir cuál era el programa que cubría las necesidades que demandaba el diseño. Inicialmente, se hizo uso del programa que ofrece la Universidad Piloto de Colombia llamado AutoCAD, este es un software muy útil con una intuitiva y agradable interfaz para el usuario nuevo.

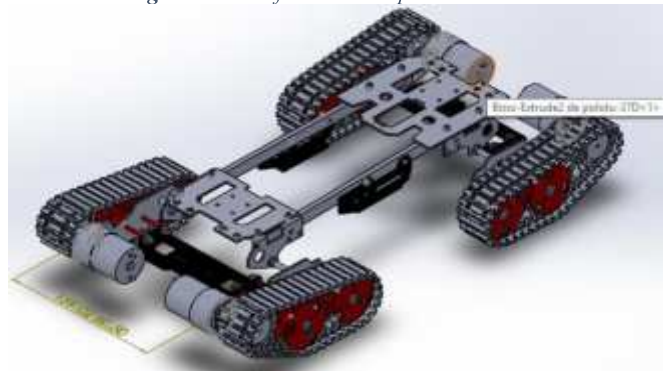
La desventaja de este programa relució al momento de ensamblar y hacer una relación de ejes entre varias piezas, debido a, que se producían muchos errores y daba muy pocas opciones para convertir a otros formatos para su posterior exportación a otras plataformas requeridas para hacer la simulación de forma. Posteriormente, al identificar que AutoCAD no cumplía con las especificaciones para suplir las necesidades, se probó otro software llamado SolidWorks, la versión Trial para estudiantes; este programa tiene algunos aspectos semejantes al AutoCAD y tiene herramientas que pueden ser de mayor provecho para cumplir las expectativas. Por tanto, al tener el programa se procedió a modelar la plataforma móvil que fue obtenida con antelación a la pandemia.

Para empezar el diseño de la plataforma móvil, se desarmaron y consignaron las medidas de cada pieza de esta. Para este proceso se recomienda hacer uso de la instrumentación apropiada para medir las distancias como, el calibrador de 6 pulgadas, el cual, es el ideal para

la toma de medidas. Por otra parte, la interfaz de usuario de la aplicación SolidWorks es más compleja que la de AutoCAD, porque tiene más herramientas a disposición, entre estas, la que más se destaca es la cota inteligente, que permite cambiar cualquier vértice de una imagen ya terminada. Para el ensamble del diseño en SolidWorks, se tiene un apartado en donde se agregan las piezas separadas para luego juntarlas; posteriormente, completar el modelo que se requiere.

La herramienta de SolidWorks facilita el ensamble, la cual, es llamado relación en cadena, que tienen la capacidad de posicionar varios patrones según el recorrido que se necesite y que haya sido la mejor opción para replicar las cintas de las orugas. Para ahorrar tiempo es posible hacer subensambles, así mismo, ir agregando las piezas dependiendo la necesidad. El resultado de este proceso se puede ver reflejado en la **Figura 7**.

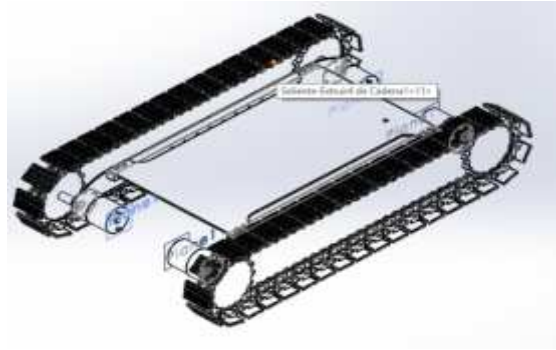
Figura 7. Plataforma móvil primera versión.



Tomado de: Propia del autor.

Después de haber ensamblado toda la plataforma móvil, surgió un inconveniente con el modelo de la plataforma, este tenía muchas piezas móviles por medio de ejes que no estaban asegurados de la forma correcta y las piezas mecánicas con las que se aseguran los ejes no lo estaban, interviniendo en el recorrido que tiene las orugas en la plataforma. Por ende, se tomó la decisión de modificar el diseño a una plataforma móvil rígida y cambiar el diseño de cuatro orugas a dos orugas distribuidas por toda la longitud de la plataforma, evitando utilizar piezas móviles extras a las necesarias. Por lo tanto, mejorando los criterios para el modelamiento cinemático y la posición de la plataforma móvil, ya que, es un requerimiento para este robot móvil. Considerando que, debe ser una posición rígida para no afectar a la hora de detonar el cañón disruptor. La plataforma móvil de la **Figura 8**, es una propuesta de diseño que fue realizado por el equipo.

Figura 8. Modelo plataforma propuesto por equipo.



Tomado de: Propia del autor.

El modelo de la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se diseñó con la intención de volverlo simplista y se buscaba el modularidad en el diseño de las orugas, en el cual se tomó, la medida de los eslabones de la cadena de una bicicleta corriente; facilitando la fabricación de los componentes y poniendo a disposición a cualquier entusiasta que quiera modificar el diseño, porque será compartido en la plataforma del GradCAD. Después, evidenciando que el equipo no quería dejar atrás el estilo visual de la plataforma móvil, con el fin de utilizar componentes que se habían adquirido físicamente. De esta manera, se dispuso a la primera plataforma a hacer modificaciones de algunas partes que la hacen más minimalista y resistente a cualquier terreno.

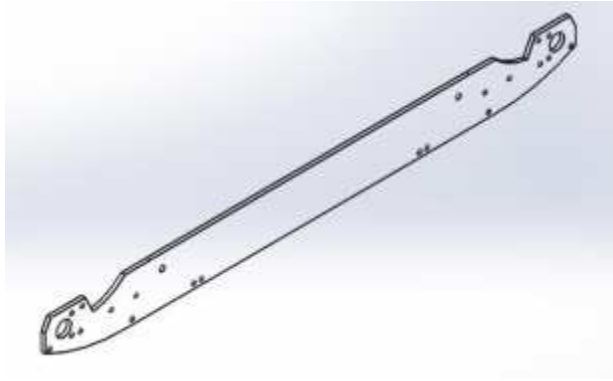
Figura 9. diseño definitivo plataforma móvil.



Tomado de: Propia del autor.

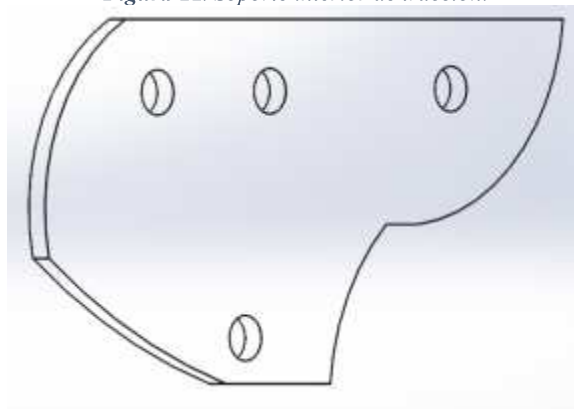
La ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., muestra el diseño definitivo con base al estilo visual de la plataforma móvil de la **Figura 7**. A su vez, se diseñó nuevas piezas como el soporte principal de la carrilearía, observado en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y es aquí, donde se soporta toda la carrilearía de la tracción tipo oruga. También hubo la necesidad de rediseñar los soportes interiores para cambiar la longitud de la carrilearía de la oruga, como se observa en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 10. Soporte principal Carrilera.



Tomado de: Propia del autor.

Figura 11. Soporte interior de tracción.



Tomado de: Propia del autor.

Por tanto, el resto de las piezas de la estructura de la plataforma móvil se mantuvieron con el diseño de la primera versión, ya que, no había necesidad de rediseñar más piezas. Por otro lado, para hacer el cambio de cuatro a dos orugas, siempre se contempló la opción de reutilizar todas las piezas posibles y de esa manera, ahorrar tiempo de diseño.

3.2.2 Características de actuación

A la hora de diseñar el manipulador, se analizaron la cantidad de grados de libertad que serían necesarios para cumplir el requerimiento; es así que, se espera que la punta del manipulador llegue al espacio deseado, como mínimo se necesita un brazo de 3 grados de libertad. Ya definido este punto, se procede a consultar varios modelos de manipulador, con el propósito de, que satisfagan la necesidad móvil y visual que complemente el diseño del robot EOD entre tantos modelos. También, el equipo de este proyecto diseñó un manipulador básico, este se puede observar en la [Figura 12](#). No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 12. Brazo diseño por el equipo.



Tomado de: Propia del autor.

El manipulador que aparece en la [Figura 12](#), cumple las especificaciones de diseño, pero se quedaba corto, dado que, no contemplaba la integración de motores y mecanismos necesarios para el desarrollo de las aplicaciones del robot, obligando a seguir buscando uno apropiado.

Por consiguiente, se encontró en la comunidad de GradCAD un nuevo diseño y se encuentra disponible un brazo de cuatro grados de libertad, el cual, se acoplaba de manera exitosa en el robot móvil, como se observa en la [Figura 13](#). De este modo, fue el seleccionado, debido a que cumplía con los requerimientos y complementaba el diseño mostrado en la [Figura 12](#). En cuanto a la comunidad GradCAD, es una comunidad donde varios autores comparten sus diseños en un blog dedicado al diseño.

Figura 13. Manipulador repositorio de GradCAD



Tomado de: GradCAD.

Por lo tanto, era necesario rediseñar y realizar algunas modificaciones como: suprimir el grado de libertad rotacional de la base, ya que, este movimiento sería realizado por la

plataforma móvil; así mismo, el gripper se reemplazó por un tubo que estaba destinado para ser la boca del cañón, posterior a esto, se alargaron los eslabones, viendo que la distancia que comprendía era muy corta por si se necesitaba alcanzar un punto más elevado al ser un diseño libre; en el cual, se puede modificar los parámetros del CAD tanto como se desea. De manera que, modificando los eslabones se contempló el mismo estilo visual del manipulador de la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 14. Diseño Final Manipulador.



Tomado de: Propia del autor.

La ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., muestra el diseño final del manipulador ya montado al resto de la plataforma, donde hubo la necesidad de diseñar una base en lamina para empotrar el manipulador en la plataforma móvil y ubicar de manera funcional los sensores de proximidad que se muestran en el plano completo, ubicado en el apartado anexos en la sección de planos.

3.2.3 Cañón

Cuando se habla de un robot EOD, es importante tener en cuenta la fuerza de retroceso que ejerce el cañón disruptor al momento del disparo, esta fuerza afecta de manera negativa los componentes mecánicos y electrónicos (Graham, 2003). Después de hacer este análisis, se establecerán los parámetros que se deben tener en cuenta en la selección del cañón disruptor, considerando que este, sea el más apropiado para el Robot EOD de la presente investigación.

Por consiguiente, el comportamiento del proyectil al ser disparado cumple con los parámetros para ser un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (M.R.U.A), el cual, utiliza las

ecuaciones de movimiento y posición que son las que permiten descubrir la fuerza de retroceso. Por tanto, las ecuaciones son:

$$\text{velocidad: } v = v_0 + (at) \quad (1)$$

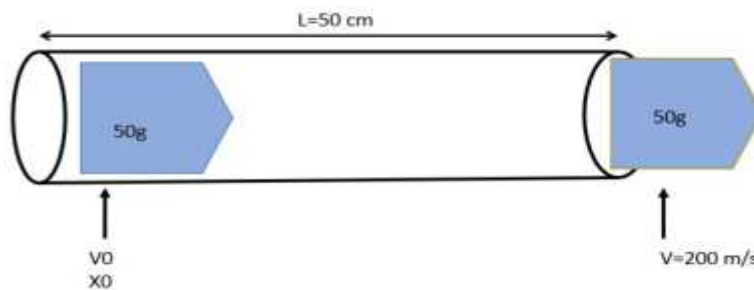
De la ecuación (1), podemos decir que v_0 es la velocidad inicial. Generalmente, para el estudio de los cañones disruptores este valor siempre será cero, ya que, el proyectil está en reposo. Por otro lado, a es la aceleración del cuerpo al salir de la boca del cañón y t es el tiempo en el que se realiza el estudio.

$$\text{Posición: } x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (2)$$

De la ecuación (2), podemos decir que x_0 es la posición inicial del proyectil y los índices v_0 , t y a tienen el mismo significado que tienen en la ecuación (1).

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se resuelve un problema del libro de física de Serway y Jewett (1988), el cual, tiene como principal objetivo encontrar la fuerza de retroceso que produce un cañón al disparar los datos que facilita el texto. De este modo, la longitud del cañón es de 50 cm, la masa de la bala 50g, la velocidad de salida de la boca del cañón 200m/s. esto queda plasmado de manera sencilla en la

Figura 15. Ilustración problema fuerza de retroceso.



Tomado de: Propia del autor.

Luego, se procede a reemplazar los valores de las ecuaciones que se despejan para poder encontrar la aceleración del proyectil; con el objetivo de calcularla al salir de la boca del cañón.

$$0,5m = \frac{1}{2} at^2 \quad (3)$$

$$a = \frac{200}{t} \quad (4)$$

Reemplazar la ecuación (4), en la aceleración de la ecuación (3).

$$0,5m = \frac{1}{2} \left(\frac{200}{t} \right) t^2 \quad (5)$$

$$t = 0.005s \quad (6)$$

Reemplazar t en la ecuación (4).

$$a = \frac{200}{0.005} = 40000 \text{ m/s}^2 \quad (7)$$

Para continuar, es necesario utilizar el segundo principio de la dinámica, el cual es $F = m * a$, entonces al reemplazar los valores se obtiene:

$$F_p = 0.05g(40000) = 2000N \quad (8)$$

La fuerza F_p , es la fuerza con la que sale disparado el proyectil.

Por otro lado, Serway y Jewett utilizan el tercer principio de la dinámica “Acción = Reacción”, puesto que, la fuerza de retroceso que recibe el cañón es la misma en la dirección contraria a la fuerza del proyectil; obteniendo que la fuerza de retroceso es:

$$f_r = -2000N \quad (9)$$

Después de hacer el análisis, se evidencia que entre más largo el cañón la fuerza de retroceso es mínima, a diferencia que, con un cañón corto, el peso de la carga debe de ser ligera para que la fuerza de rebote no sea grande. Es así como, el área de la boca del cañón afecta en la precisión del impacto; esto es, entre más grande la boca, entonces, se pierde precisión a largas distancias.

De esta manera, se comparan varios cañones que se encuentran disponibles en el mercado, por una empresa que se enfoca en crear productos que ayuden a combatir dispositivos peligrosos, llamado Chemring. En la **Tabla 4**, se dispondrán los cañones con sus características técnicas buscando las que minimicen la fuerza de retroceso.

Tabla 4. Comparación cañones EOD
Comparativa Dispositivos EOD.

Nombre	WASP	PIGSTICK	HOTROD
			
Calibre.	26,5	26,5	40
Longitud mm	445	485	465
Peso Kg.	0,86	2,75	3,5
Capacidad C.	100 ml	100 ml	200ml
Munición.	Proyectil de agua	Proyectil de agua	Proyectil de agua
E. disparo.	Eléctrico/Percutor.	Eléctrico/Percutor.	Eléctrico/Percutor.
P.Ktit Kg	2,76	7	5,5
D. Kit. Mm	420*190*140	500*300*200	500*300*200
Compensador	Soporte	Soporte	Soporte
Nombre	RE12g Midi	RE50-28 Midi	RE70-M3 Plus
			
Calibre.	19 mm	12.7mm	40mm
Longitud mm	450	455	475
Peso Kg.	1,1	2,6	3,5
Capacidad C.	50 g	100 g	290 g
Munición.	Proyectil Agua o sólido.	Proyectil Agua o sólido.	Proyectil sólido.
E. disparo.	Eléctrico/Percutor.	Eléctrico/Percutor.	Eléctrico/Gas.
P. Ktit Kg	10.5	12,9	26
D. Kit. Mm	610*325*213	620*490*215	620*490*215
Compensador	Agua	Agua	Soporte

Tomado de: Propia del autor.

Teniendo en cuenta los datos técnicos mostrados en la **Tabla 4**, se evalúan las diferentes características y se califican con los requerimientos que se establecieron después del estudio de fuerza de retroceso. Al finalizar, para poder seleccionar un cañón se obtiene el promedio de las calificaciones escogiendo el que tenga mayor puntuación.

Tabla 5. Resumen calificación técnica cañones EOD.

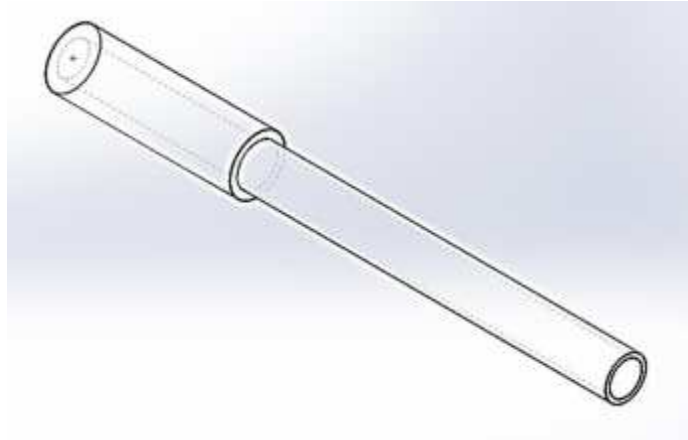
RESUMEN CAÑONES EOD.						
Nombre	WASP	PIGSTICK	HOTROD	RE12g Midi	RE50-28 Midi	RE70-M3 Plus
Calibre.	26,5mm	26,5mm	40mm	19 mm	12.7mm	40mm
Calificación.	3	3	2	4	5	2
Longitud mm	445	485	465	450	455	475
Calificación.	2	5	4	3	3.5	4.5
Peso Kg.	0,86	2,75	3,5	1,1	2,6	3,5
Calificación.	5	2	1	4	3	1
Capacidad C.	100 ml	100 ml	200ml	50 g	100 g	290 g
Calificación.	3	3	1	5	3	1
Munición.	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA-SOLIDO	AGUA-SOLIDO	SOLIDO
Calificación.	2	2	2	5	5	2
E. disparo.	ELEC-PER	ELEC-PER	ELEC-PER	ELEC-PER	ELEC-PER	ELEC-GAS
Calificación.	4	4	4	4	4	5
Compensador	Soporte	Soporte	Soporte	Agua	Agua	Soporte
Calificación.	2,5	2,5	2,5	5	5	2,5
Promedio	3,07143	3,071429	2,3571429	4,285714	4,1666667	2,25

Tomado de: Propia del autor.

Fue muy importante consignar en las tablas la información del compensador, ya que este, disminuye la fuerza que se transmite a la estructura del robot móvil; así que, solo en dos cañones se utiliza el compensador de agua que es eficiente comparado con la sujeción que le instalan al soporte. Por esta razón, se les asigno la mayor calificación en comparación de los otros. También, es muy útil que tengan munición doble propósito, como la de agua, que es muy eficiente desarticulando artefactos explosivos; en cambio, la sólida se utiliza en lugares en que la temperatura desciende a grados bajos como 0°C. Igualmente, la munición sólida funciona para limpiar el cañón de las impurezas que se vayan adhiriendo después de varios disparos. La energía de disparo se califica de la variedad y sin sistema mecánicos como el del percutor, ya que, este necesita mucha energía y tecnología especial para poder accionar a distancia.

Con las calificaciones obtenidas, se puede concluir que, el cañón que se acomoda a las necesidades del robot EOD es el R12g- Midi.

Figura 16. Cañón disruptor referenciado por las medidas de fabricante (Fuente autores).



Tomado de: Propia del autor.

Después de hacer la selección el cañón por el método de comparación se analizó cual era el que cumplía con todas las necesidades que se debían tener en cuenta para no afectar su correcto funcionamiento. Por ende, se tomaron las dimensiones que ofrecía el fabricante para su respectiva modelación en el programa de SolidWorks, como se observa en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*

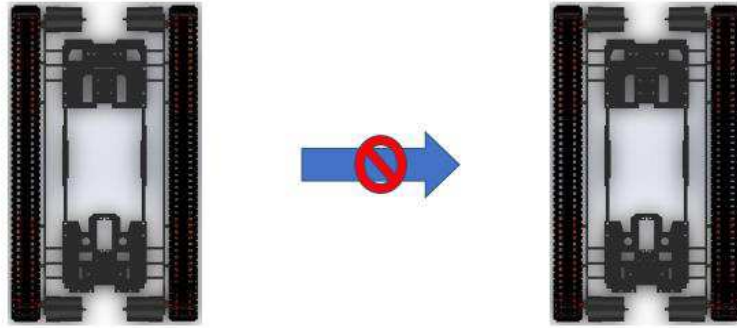
3.3 Cinemática del robot

En este apartado se estudian los modelos cinemáticos del robot. Estos modelos se emplean para la futura simulación del comportamiento del Robot y posterior validación; inicialmente, se empieza por el estudio en dos dimensiones de cada modelo cinemático, empezando por el modelo del robot móvil sobre el plato XY, luego, se realiza el estudio del manipulador sobre el plano XZ. Finalmente, se termina con el acoplamiento de los dos modelos para realizar uno solo que integre el estudio del robot en el espacio XYZ.

3.3.1 Modelo cinemático del robot móvil

Para realizar el modelado del robot, se deben tener en cuenta las siguientes hipótesis simplificadoras: el robot se mueve sobre una superficie plana, los ejes de guiado son perpendiculares al suelo, se asume que los rodamientos son puros, es decir, su coeficiente de fricción es despreciable, el robot no tiene puntos flexibles y se comporta como un sólido rígido. También, se deben tener en cuenta las restricciones no holonómicas del sistema, es decir, el robot puede desplazarse hacia atrás o adelante, pero no puede trasladarse a los lados sin que exista una fuerza externa que obligue el movimiento, como se observa en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..* De tal manera que, para realizar un desplazamiento netamente lateral se debe realizar un movimiento en partes.

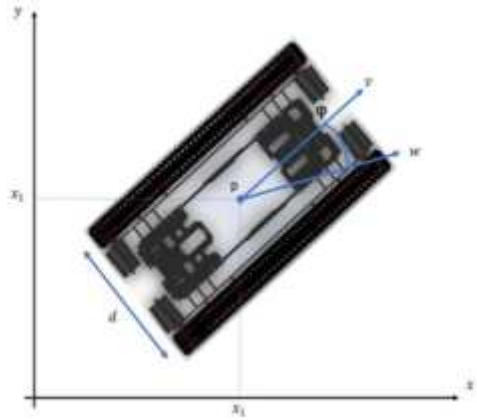
Figura 17. Restricción holonómica.



Tomado de: Propia del autor.

Para realizar el modelado del robot de manera correcta, es necesario conocer las condiciones físicas del sistema y en especial las dimensiones del robot. Las medidas de interés en el proceso de modelado son: la distancia entre las orugas ($d = 0.22\text{m}$), la distancia de contacto entre la cadeneta de la oruga con la superficie ($r = 0.3\text{m}$) y la altura del robot ($b = 0.18\text{m}$); esto con base a la plataforma móvil mostrado en la **Figura 18**.

Figura 18. Diagrama robot móvil diferencial.



Tomado de: Propia del autor.

Generalmente, se define el diagrama del robot móvil con respecto al sistema global, para esto, es de interés las velocidades v y w , sea v la velocidad lineal y w la velocidad angular del móvil y φ el ángulo formado entre estas. Ahora veamos las velocidades correspondientes:

$$v = \left(\frac{r}{2}\right) (w_R + w_L) \quad (10)$$

$$w = \left(\frac{r}{d}\right) (w_R - w_L) \quad (11)$$

Donde w_R es la velocidad angular de la rueda derecha y w_l de la rueda izquierda, respecto a la ecuación (10) y (11).

Para calcular la cinemática del robot, se debe asignar el punto de interés, que generalmente está ubicado en medio del robot móvil o en medio del eje de las orugas, de manera que, este punto lo llamaremos P, donde el punto P se encuentra en las coordenadas (x_1, y_1) , cómo se observa en la **Figura 18**.

Diagrama robot móvil diferencial. La componente en X está definida por $x_p = x_1$, la componente Y está definida por $y_p = y_1$ y la componente Z está definida por $z_p = b$; donde se tiene en cuenta el eje Z, debido a, la altura del robot que se tiene para las simulaciones. Luego, de tener estas condiciones se procede a derivarlas, para obtener las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}_p = \dot{y}_1 = v \cos \varphi \quad (12)$$

$$\dot{y}_p = \dot{y}_1 = v \sin \varphi \quad (13)$$

$$\dot{\varphi} = w \quad (14)$$

Considerando lo anterior, podemos expresar el modelo cinemático del robot móvil de la forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (15)$$

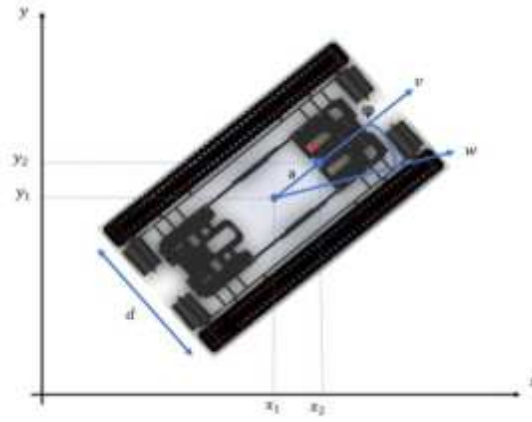
Para definir el modelo pertinente para esta aplicación, es necesario ubicar nuestro punto de interés P a una distancia “a” del centro del eje de las orugas. Observar en la **Figura 19**. Esto se realiza con el fin de, ampliar el espacio de trabajo abarcado por el manipulador que irá empotrado en este punto.

Como en este caso, el punto de interés del robot móvil este desplazado a una distancia $a = 65$ [mm] del punto anteriormente estudiado. Por tanto, al punto (x_1, y_1) se le suma la distancia a, para llegar al nuevo punto de interés P en las coordenadas (x_2, y_2) .

$$x_p = x_1 + a \cos \varphi \quad (16)$$

$$y_p = y_1 + a \sin \varphi \quad (17)$$

Figura 19. Diagrama robot diferencial con punto de interés a distancia “a”.



Tomado de: Propia del autor.

Al derivar la ecuación (16) y (17) obtenemos las ecuaciones siguientes:

$$\dot{x}_p = \dot{x}_1 - a \dot{\varphi} \sin \varphi \quad (18)$$

$$\dot{y}_p = \dot{y}_1 + a \dot{\varphi} \cos \varphi \quad (19)$$

$$\dot{\varphi} = w \quad (20)$$

Sustituyendo $\dot{\varphi}$ en la ecuación (18) y (19), obtendremos el modelo cinemático con el punto de interés desplazado:

$$\dot{x}_p = v \cos \varphi - a w \sin \varphi \quad (21)$$

$$\dot{y}_p = v \sin \varphi + a w \cos \varphi \quad (22)$$

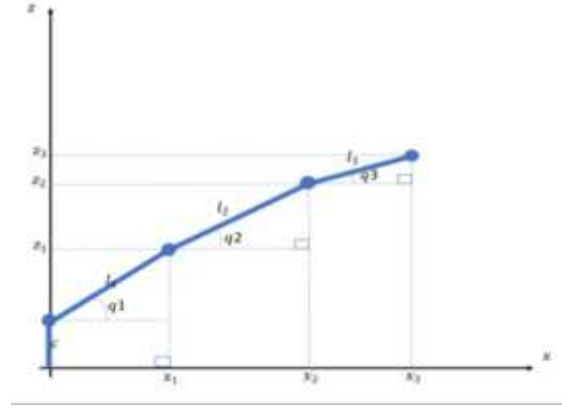
De forma matricial, el modelo cinemático queda expresado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -a \sin \varphi \\ \sin \varphi & a \cos \varphi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (23)$$

3.3.2 Modelo cinemático del manipulador

En el proceso de calcular la cinemática directa del manipulador de tres grados de libertad, es necesario, ubicar la orientación del manipulador en el plano X y Z. También, es de vital importancia ubicar los ángulos en cada eslabón, ya que, que son de utilidad para calcular la posición de cada sección del manipulador como se muestra en la **Figura 20**.

Figura 20. Orientación del manipulador.



Tomado de: Propia del autor.

Donde, q_1 , q_2 y q_3 hace referencia al nombre de cada uno de los ángulos que genera cada articulación; mientras que, l_1 , l_2 y l_3 hace referencia a el nombre de cada articulación y c hace referencia a la altura de la base. Una vez los parámetros estén ubicados, es necesario ubicar el hx y hz que son la sumatoria de las distintas variables.

$$hx = x_1 + x_2 + x_3 \quad (24)$$

$$hz = c + z_1 + z_2 + z_3 \quad (25)$$

De la ecuación (25) se debe relacionar que, la constante “ c ” hace referencia a la altura de la base en la que se encuentra empotrado el manipulador. El manipulador está distribuido por el plano xz y, es necesario agregar los ángulos y las longitudes de posición de cada eslabón de la siguiente manera.

$$hx = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos (q_1 + q_2) + l_3 \cos (q_1 + q_2 + q_3) \quad (26)$$

$$hz = c + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin (q_1 + q_2) + l_3 \sin (q_1 + q_2 + q_3) . \quad (27)$$

El modelo cinemático del brazo queda expresado de forma cinemática directa en la ecuación (26) y (27). La cinemática requiere relacionar las ecuaciones de posición con el tiempo, para poder acoplarlo a la parte móvil del robot. Es por esto que, para lograr este objetivo se derivan las ecuaciones (26) y (27) a partir de los ángulos q . Con esto se obtiene el modelo cinemático diferencial del manipulador y queda expresado en las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} \dot{hx} = & ((-l_1 \sin q_1 - l_2 \sin (q_1 + q_2) - l_3 \sin (q_1 + q_2 + q_3)) \dot{q}_1 \\ & + (-l_2 \sin q_2 (q_1 + q_2) - l_3 \sin (q_1 + q_2 + q_3)) \dot{q}_2 + (-l_3 \sin (q_1 \\ & + q_2 + q_3)) \dot{q}_3) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\dot{h}z = ((l_1 \cos q_1 + l_2 \cos (q_1 + q_2) + l_2 \cos (q_1 + q_2 + q_3)) \dot{q}_1 + (+l_2 \cos (q_1 + q_2) + l_2 \cos (q_1 + q_2 + q_3)) \dot{q}_2 + (+l_3 \cos (q_1 + q_2 + q_3)) \dot{q}_3) \quad (29)$$

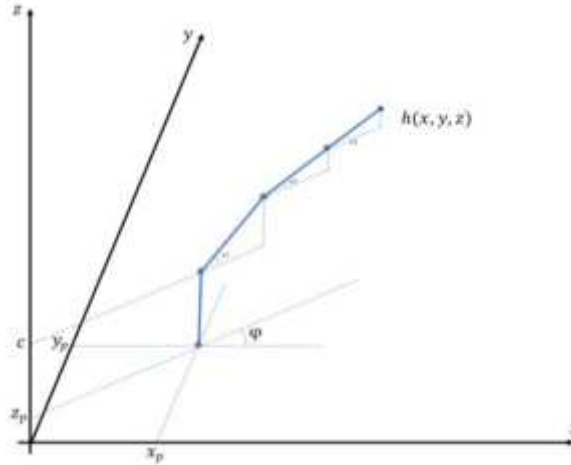
Una vez obtenido el modelo cinemático del manipulador, este puede ser expresado de forma matricial, como se observa en la ecuación (29). También, es llamada matriz Jacobiana del manipulador.

$$\begin{bmatrix} \dot{h}x \\ \dot{h}z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-l_1 \cos q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) - l_2 \sin(q_1 + q_2 + q_3)) & (-l_2 \sin(q_1 + q_2) - l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)) & (-l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)) \\ (l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_2 \cos(q_1 + q_2 + q_3)) & (+l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)) & (+l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

3.3.3 Modelo cinemático acoplado

Para que el acople del manipulador y la base móvil sea exitoso es necesario agregar otra dimensión en el estudio, de esta manera, el análisis se volverá tridimensional como se muestra en la **Figura 21**.

Figura 21. Estudio tridimensional del Manipulador.



Tomado de: Propia del autor.

Teniendo en cuenta el ángulo φ mostrado en la **Figura 19** y el complemento en el eje, se construyen las nuevas ecuaciones que hacen parte del estudio cinemático, así logrando una correcta relación entre la base móvil y el manipulador.

$$hx = x_p + l_1 \cos q_1 \cos \varphi + l_2 \cos (q_1 + q_2) \cos \varphi + l_3 \cos (q_1 + q_2 + q_3) \cos \varphi \quad (31)$$

$$hy = y_p + l_1 \cos q_1 \sin \varphi + l_2 \cos (q_1 + q_2) \sin \varphi + l_3 \cos (q_1 + q_2 + q_3) \sin \varphi \quad (32)$$

$$hz = z_p + c + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin (q_1 + q_2) + l_3 \sin (q_1 + q_2 + q_3) \quad (33)$$

Con el estudio convertido de planar a tridimensional se dispone a hacer la matriz Jacobiana involucrando el tiempo en la ecuación, esto se logra con la derivada de cada expresión para formar la matriz Jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \dot{h}x \\ \dot{h}y \\ \dot{h}z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.1 & 1.2 & 1.3 & 1.4 & 1.5 \\ 2.1 & 2.2 & 2.3 & 2.4 & 2.5 \\ 3.1 & 3.2 & 3.3 & 3.4 & 3.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ \dot{q}1 \\ \dot{q}2 \\ \dot{q}3 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Por motivos de espacio en el diseño del documento, fue necesario nombrar cada posición de la matriz; para posteriormente, mostrar de manera fácil y ordenada la ecuación asignada a cada posición.

$$1.1 = \cos\varphi \quad (35)$$

$$1.2 = -a\sin\varphi - l_1\cos q_1\sin\varphi - l_2\cos(q_1 + q_2)\sin\varphi - l_3\cos(q_1 + q_2 + q_3)\sin\varphi \quad (36)$$

$$1.3 = -l_1\sin q_1\cos\varphi - l_2\sin(q_1 + q_2)\cos\varphi - l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\cos\varphi \quad (37)$$

$$1.4 = l_2\sin(q_1 + q_2)\cos\varphi - l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\cos\varphi \quad (38)$$

$$1.5 = -l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\cos\varphi \quad (39)$$

$$2.1 = \sin\varphi \quad (40)$$

$$2.2 = a\cos\varphi + l_1\cos q_1\cos\varphi + l_2\cos(q_1 + q_2)\cos\varphi + l_3\cos(q_1 + q_2 + q_3)\cos\varphi \quad (41)$$

$$2.3 = -l_1\sin q_1\sin\varphi - l_2\sin(q_1 + q_2)\sin\varphi - l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\sin\varphi \quad (42)$$

$$2.4 = \sin(q_1 + q_2)\sin\varphi - l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\sin\varphi \quad (43)$$

$$2.5 = -l_3\sin(q_1 + q_2 + q_3)\sin\varphi \quad (44)$$

$$3.1 = 0 \quad (45)$$

$$3.2 = 0 \quad (46)$$

$$3.3 = l_1\cos q_1 + l_2\cos(q_1 + q_2) + l_3\cos(q_1 + q_2 + q_3) \quad (47)$$

$$3.4 = l_2\cos(q_1 + q_2) + l_3\cos(q_1 + q_2 + q_3) \quad (48)$$

$$3.5 = l_3\cos(q_1 + q_2 + q_3) \quad (49)$$

Obtenida la Matriz Jacobiana de la cinemática acoplada, la cual, es una matriz fundamental para el estudio de cinemática del robot, y que se utilizará para realizar las simulaciones para la validación del sistema propuesto.

4 ROBOT DESACTIVADOR DE EXPLOSIVOS

En este capítulo se aborda el robot desactivador de explosivos, en el cual, se evidencia el proceso realizado para la implementación del robot, la caracterización de los ambientes robóticos; así como, el proceso para la integración del robot en un ambiente robótico controlado. También, se estudian las condiciones necesarias para la implementación y se aborda una propuesta del sistema electrónico y de tele operación para el robot.

4.1 Caracterización de los ambientes robóticos

Una forma de realizar estudios de robótica es a través de los softwares, que permiten crear robots virtuales y ambientar con cualidades similares a las encontradas en un laboratorio de robótica; es decir, en un laboratorio virtual. Este agregado expone de forma breve y sencilla tres (3) de estas herramientas.

El primer software expuesto es Gazebo. Gazebo fue desarrollado en otoño del año 2002 por el Dr. Andrew Howard y su alumno Nate Koenig, ambos pertenecientes a la Universidad del Sur de California. En cuanto a, este software fue realizándolo mediante actualizaciones, hasta lograr el programa ofrecido hoy en día y es de código abierto.

Figura 22 Logo GAZEBO.



Tomado de: <https://www.generationrobots.com/>

La simulación de robots simplificada es una herramienta indispensable para un robotista, puesto que, Gazebo tiene la capacidad de simular de manera exacta y eficaz en entornos complicados de las poblaciones de robots, permitiendo probar y diseñar escenarios realistas. Además, tiene al alcance de su mano esta herramienta gratuita que cuenta con ocho (8) características esenciales, tales como: la *simulación dinámica*, en este modelo se puede acceder a diversos motores de la física, permitiendo analizar problemas complejos; los *gráficos 3D avanzados*, facilita la imagen de escenarios realistas donde se proyecta la calidad del entorno, a través de su iluminación, las sombras y la textura; *sensores y ruido*,

proporciona información, que es emitida opcionalmente por los sensores con ruido; los *complementos*, brindan acceso directo a la API de Gazebo. La API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) permite que dos aplicaciones se comuniquen entre sí para poder extraer datos; los *modelos de robot*, proporciona diversos robots, también admite que el robotista pueda diseñar su propio robot; el *transporte TCP/IP*, que significa Protocolo de Control de Transmisión/ Protocolo de Internet, es un modelo utilizado para interactuar e intercambiar datos de una aplicación a otra por medio del envío de mensajes; la *simulación en la nube*, ofrece la capacidad de computación a gran escala permitiendo interactuar con la simulación desde un navegador y las *herramientas de línea de comandos*, facilitan la introspección y el control de la simulación. En definitiva, Gazebo en su sitio web que ofrece pequeños tutoriales para familiarizarse con él.

El siguiente ambiente robótico se llama CoppeliaSim, anteriormente conocido como V-REP, el cual, es utilizado por lo general en industria, en educación y en investigación. CoppeliaSim fue desarrollado dentro de Toshiba R&D y, actualmente sigue siendo desarrollado y mantenido por Coppelia Robotics AG.

Figura 23. CoppeliaSim (Tomado del sitio web).



Tomado de: <https://www.coppeliarobotics.com>

CoppeliaSim cuenta con tres (3) versiones diferentes: la versión player, la versión edu y la versión pro. La *versión player*, es gratis y de libre distribución; la *versión edu*, orientada a estudiantes, profesores y centros académicos y la *versión pro*, es la versión con mejores complementos y tiene uso con fines comercial. Por lo tanto, las tres versiones cuentan con la funcionalidad de simulación completa. La funcionalidad de simulación dispone de diversas características que permiten el diseño, desarrollo y control de robots, así como, del ambiente dentro de las características que se pueden resaltar, entre estas tenemos: *cinemática inversa /directa*, permite cálculos de cinemática para cualquier tipo de mecanismos (ramificado, cerrado, redundante, etc.). *Dinámica /física*, permite el cálculo personalizable de dinámica para simular la física del mundo real y las interacciones de objetos. *Partículas dinámicas*, admite partículas personalizables que se pueden utilizar para simular chorros de aire o agua, motores a reacción y hélices; también, cuenta con simulaciones de diversos sensores como las herramientas de *simulación de sensor de visión* y *sensor de proximidad*. Así mismo, tiene *modos de edición integrados*, admitiendo modos especiales de edición de malla. *Importación /exportación de datos sencilla*, permite la integración con formatos de archivo como STL, e interfaces de *usuario personalizadas*, maneja un número ilimitado de elementos de interfaz de usuario totalmente personalizables.

El último ambiente de simulación es Webots, siendo este una aplicación de escritorio de código abierto y multiplataforma, la cual, proporciona un entorno de desarrollo completo para modelar, programar y simular robots. Este ambiente de simulación ha sido diseñado para un uso profesional y se utiliza ampliamente en la industria, en la educación y en la investigación. Por otra parte, Cyberbotics Ltd. mantiene a Webots como su principal producto desde 1998.

Figura 24. Logo Webots



Tomada de <https://cyberbotics.com>

Webots cuenta con una amplia documentación, puesto que, permite aprender rápidamente los fundamentos, a través de, tutoriales que ofrece en su sitio web; también, se encuentran ejemplos sencillos que funcionan desde el primer momento. Por otro lado, las características que tiene este programa, tales como: integración con ROS, Matlab, posibilitando programar en C, C++; Python, Java, contiene una fácil importación de CAD de robots desde Blender o desde URDF, fácil creación de prototipos, contiene una gran biblioteca de activos en la que posee robots, sensores, actuadores, objetos y materiales. De esta manera, permite crear una amplia variedad de simulaciones que van desde espacios abiertos a espacios cerrados y en otros planes, ya que, se puede modificar las condiciones físicas del ambiente de simulación.

4.2 Diseño e implementación en Webots

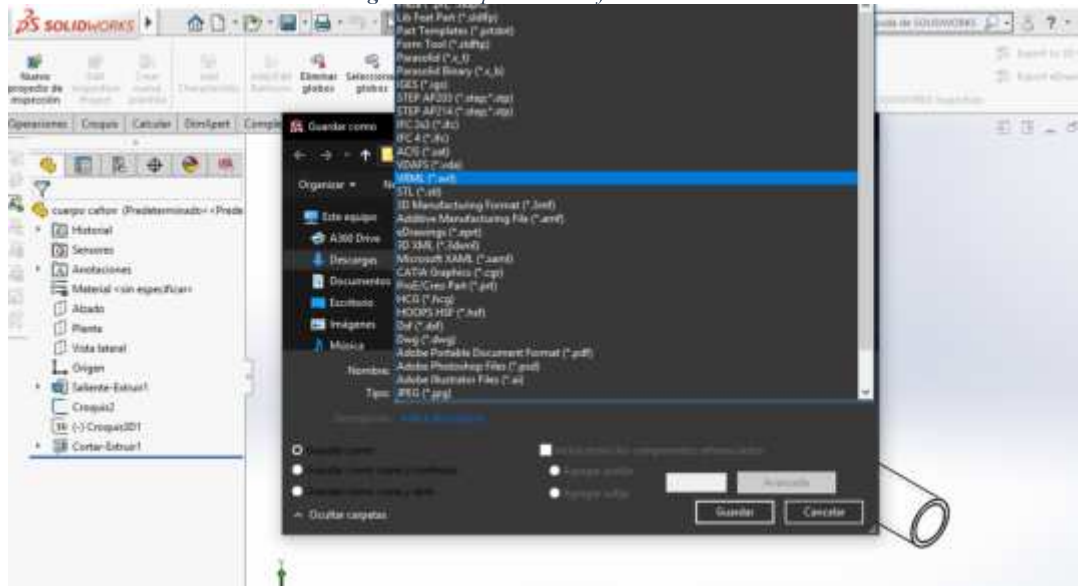
La implementación del robot en Webots, permite una validación correcta de los sistemas del robot, para ello, se debe realizar pruebas del comportamiento del modelo cinemático. Inicialmente, se realizó el proceso de establecer las condiciones necesarias de los archivos CAD, que son ajustes necesarios que realizar, entre estos ajustes, se encuentra establecer sus puntos de origen para un fácil ensamble del Robot en Webots. Luego, la creación del mundo, la cual, se diseña e implementa en el entorno en que se ejecutará la simulación y, posterior a esto, se implementa en el robot propuesto en el ambiente.

4.2.1 Condiciones necesarias

El objetivo de realizar el modelamiento CAD del robot es para obtener un modelo digital y poderlo exportar a los distintos programas de simulación usados, con el fin de, realizar las simulaciones y el respectivo estudio de la cinemática del robot. Por otra parte, aprovechando los formatos a los cuales tiene acceso SolidWorks, se exporta a los distintos formatos usados

empezando por el programa Webots, Este simulador requiere que los archivos CAD sean exportados en formato VRML, ya que, es un formato compatible con ambos; este proceso se muestra en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Con esto quiero decir, que este proceso se debe hacer con cada una de las piezas del robot.

Figura 25. Exportación a formato VRML.

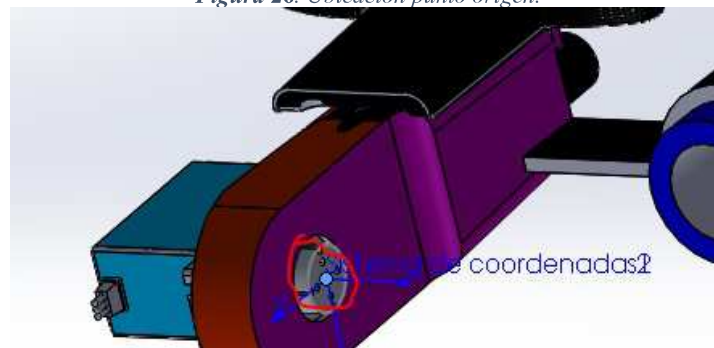


Tomado de: Propia del autor.

Se accede a la opción que muestra la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., con la opción “guardar como” y en el espacio “Tipo” de archivo seleccionar “VRML”; puesto que, es necesario configurar algunos parámetros antes de guardar, para no tener inconvenientes con las escalas y los gráficos en el entorno de Webots.

Al exportar por primera vez algunos archivos, se tuvo el inconveniente del ensamble en el entorno de simulador, ya que, a diferencia del programa de diseños CAD, Webots no cuenta con la opción de hacer ensambles relacionando caras y vértices de alguna pieza; por lo general, se unían con el punto de origen de la pieza requiriendo el reacomodo de cada diseño de las piezas, como se observa en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 26. Ubicación punto origen.

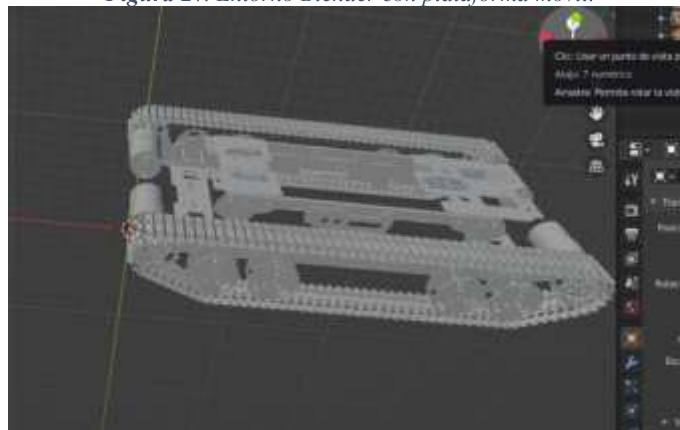


Tomado de: Propia del autor.

En el caso de la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, se observa el último eslabón del manipulador con la ubicación del punto de origen. Este punto de origen se encuentra en el centro de la cara del eje del motor, de manera que, será el punto de acople al extremo del segundo eslabón. Además, es necesario colocar los puntos de origen de todas las piezas, junto a la parte de donde se deban acoplar para formar el robot.

Para la comprobación del modelo cinemático se utilizó Matlab, que es un software matemático muy útil por su funcionamiento y herramientas. En este caso, se necesita transformar los archivos a formato STL para modificarlos en SolidWorks. Además, tiene la capacidad de exportar a STL, realizando el mismo proceso que con las piezas para Webots. Para el proceso de pruebas, se utilizó el programa Blender, que es de licencia libre.

Figura 27. Entorno Blender con plataforma móvil.



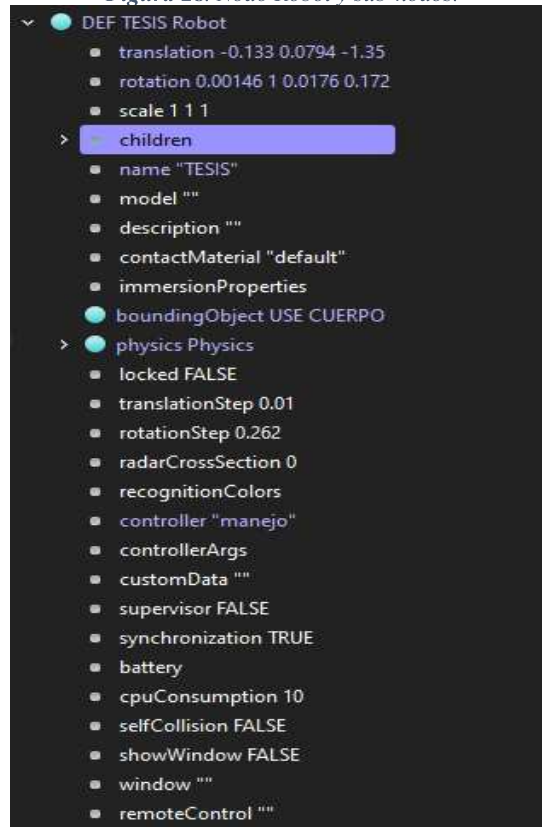
Tomado de: Propia del autor.

Por otro lado, se utilizó el entorno Blender para verificar el estado en que va a salir el ensamble, como se aprecia en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*. Este proceso se realiza hasta donde se requiera para armar todo el robot EOD, posteriormente, se guardan los archivos y quedan listos para abrir en el archivo Matlab; el cual, es el encargado de ejecutar las simulaciones.

4.2.2 Diseño e implementación del robot móvil en el entorno

Para crear el Robot en el entorno de simulación, se debe crear un nodo *Robot*; aquí se hará un ensamble con todas las piezas del robot y asignaran cualidades similares al mundo real. Este nodo principal, contiene unos sub-nodos, como se muestra en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*.

Figura 28. Nodo Robot y sub-nodos.

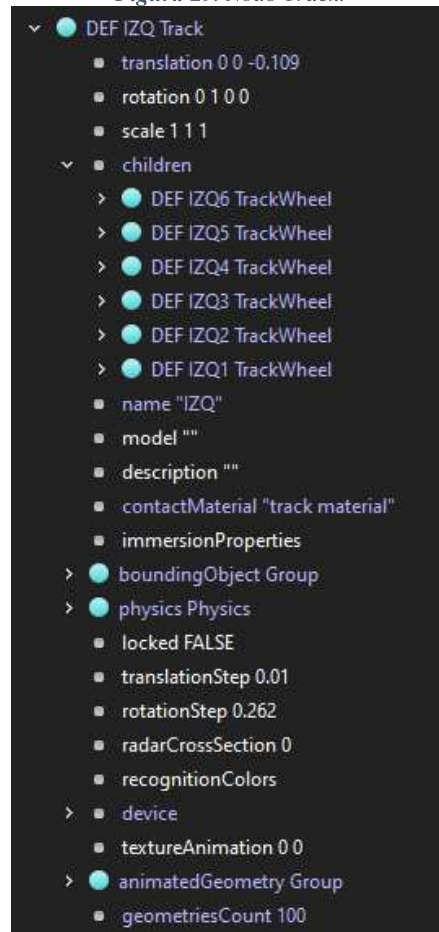


Tomado de: Propia del autor.

El subnodo *children* contendrá nodos, dado que, es aquí donde se almacena la mayoría de información del robot (las piezas, su tipo de locomoción y se hace el ensamble del manipulador).

Para implementar la locomoción de la oruga se crea un nodo *Track*, este nodo se usa para modelar en Webots bandas transportadoras y vehículos con tracción tipo oruga. Para cada una de las orugas del robot, estos nodos se crean dentro del nodo *children* principal del robot. En cada nodo *Track* se deben crear 6 nodos *TrackWheel*, uno por cada rueda que posee la plataforma móvil del Robot y estarán dentro del *children* del nodo *track* como se muestra en la **Figura 29**. Al nodo *track*, también, se le asigna su nombre en subnodo *name*, el cual, servirá para ser llamado en las funciones del controlador.

Figura 29. Nodo Track.



Tomado de: Propia del autor.

Ubicado el nodo *TrackWheel*, cabe aclarar que, cada uno contiene la posición de la rueda dentro de las coordenadas globales del robot, así como, su radio y el archivo CAD de cada rueda importado previamente. De esta manera, el nodo *TrackWheel* se encarga de asignar la función de cada una de las ruedas que conforman la oruga. A su vez, el nodo *Track*, también, debe ajustar la propiedad *ContactMaterial* y asignar *track material*, ya que, esto permitirá que la oruga traccione sobre cualquier material en *boundingObject*.

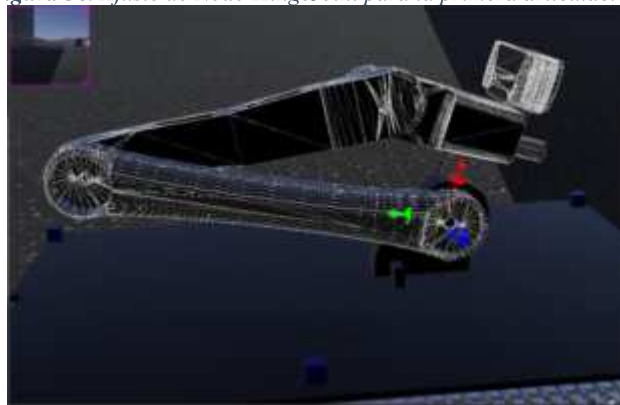
Con respecto lo anterior, se declara la ruta que debe seguir la oruga usando figuras geométricas que demarcan las restricciones de contacto, puesto que, si el *boundingObject* es nulo se podrá atravesar otros objetos y una vez realizado esto, se procede a realizar el montaje de la pista de deslizamiento de la oruga. Esto se realiza en *animatedGeometry* dentro del nodo *Track*, dado que, aquí se debe ingresar el archivo CAD de una pieza de la pista de deslizamiento de la oruga y en *geometriesCount* se ajusta la cantidad de las piezas para completar la pista completa de la oruga. En *device* se debe seleccionar *LinearMotor* y se debe nombrar, debido a, que así se llamará este elemento de animación mecánico en el código del controlador. *LinearMotor*, es un actuador mecánico tipo lineal y es el encargado del

movimiento de las orugas o bandas transportadoras en Webots. Una vez realizado esto, queda declarar las físicas en “physics” como se muestra en la **Figura 29**. Este proceso, también se realiza para la oruga faltante.

Para implementar el brazo del robot, se efectúa tres (3) uniones tipo *HingeJoint*, donde cada una comienza donde termina la anterior, empezando por la base que va sujeta al cuerpo del robot y cada nodo *HingeJoint* contiene variables que se deben ajustar; ya que, en estas está el punto donde rotará el grosor del eje de rotación como se muestra en la **Figura 30**. Esto se repite hasta quedar conformado el brazo.

En cuanto a la opción *device*, se agrega un nodo *RotationalMotor*, que hace referencia a un motor de tipo rotacional y se nombra para poder ser llamado en el controlador. Este motor es el actuador usado para dar movimiento a cada una de las articulaciones de manera independiente. También, se agrega *PositionSensor*, que hace referencia a un sensor de posición, el cual, se debe nombrar para ser llamado en el controlador. Así mismo, se agrega el nodo *cámara* que emulará una cámara y nos permitirá ver lo que el robot ve y está ubicado en el último eslabón del brazo.

Figura 30. Ajuste de Nodo HingeJoint para la primera articulación.

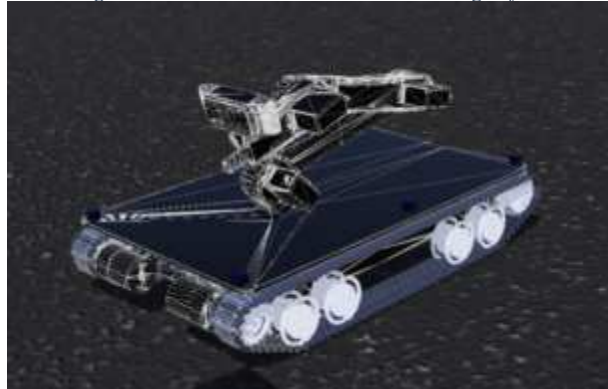


Tomado de: Propia del autor.

Para detectar la distancia entre el robot y los objetos cercanos que puedan terminar en choques, se implementó un sensor de distancia con el nodo *DistanceSensor* que está ubicado en el nodo *Children* del nodo principal del *Robot*; en el cual, se implementaron seis (6) de estos sensores, cada uno nombrado respectivamente, para posteriormente ser llamados en las funciones del controlador.

Una vez realizado todo lo mencionado anteriormente, se procede a realizar un nodo tipo *Group*, donde irá almacenada todas las formas y geometrías del robot. Por ende, este nodo está ubicado en el *children* principal, es decir, está en el nodo *Robot*. De tal manera que al realizar esto, solo queda definir el *boundingObject* global del robot, que permitirá tener una forma rígida y a su vez, no pasar por los demás objetos rígidos como se muestra en la **Figura 31**. El *boundingObject*, tiene la misma función que en el usado para el nodo *Track*, la diferencia es que este es el global y se usa para todo el robot.

Figura 31. Vista de Robot desde BoundingObject.



Tomado de: Propia del autor.

Cuando ya está definido el robot, se procede a desarrollar el controlador para este y se debe tener en cuenta, como se etiqueta cada uno de los sensores, motores y demás componentes que se ven afectados. Inicialmente, comenzamos añadiendo las librerías necesarias para la integración de cada uno de los componentes que hacen parte del sistema. Como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Librerías (Fuente autores).

Librería	Descripción
Robot.h	Base del programa
Motor.h	Librería para el uso de motores
Camera.h	Librería para el uso de la cámara
Joystick.h	Librería para el uso de un control/mando
Keyboard.h	Librería para usar el teclado
Distance_sensor.h	Librería para el uso de sensores de distancia
Stdio.h	Archivo cabecero del lenguaje C
String.h	Librería de manipulación de memoria
Math.h	Librería de funciones matemáticas

Tomado de: Propia del autor.

Luego, llamamos las etiquetas de las piezas que deseamos manipular que son motores, sensores y cámara. Por último, declaramos las variables y constantes que se van a utilizar. Este proceso se observa en la **Figura 32**.

Figura 32. Librerías y etiquetas

```
1 #include <robot.h>
2 #include <motor.h>
3 #include <camera.h>
4 #include <joystick.h>
5 #include <keyboard.h>
6 #include <distance_sensor.h>
7 #include <stdio.h>
8 #include <string.h>
9 #include <math.h>
10 //Define los tags para poder usarlos fuera del main
11 #define leftMotor, rightMotor, PriMot, SegMot, TerMot, cam, SFD, SFI, SPD, SPI, STD, STI;
12 //Variables
13 int time_step = -1;
14 int Eje, Eje1, EjeYC, EjeXC;
15 int Value;
16 double Mot1 = 0.0; //0.775;
17 double Mot2 = 0.0; //0.8653;
18 double Mot3 = 0.0;
19 double Vel1, Vel2;
20 double r, b, c, q1, q2, NewX = -0.05085, NewY = 0.0615, a, Arc, Arc1, Ecam, CalC, CalC2, CalS, CalS2, NewX1, NewY1;
21 double l1 = 0.22;
22 double l2 = 0.18;
23 double PI = 3.14159265;
```

Tomado de: Propia del autor.

En nuestra función principal, inicializamos la librería base de Webots, asignamos el intervalo de tiempo y relacionamos las etiquetas que creamos anteriormente con sus respectivas representaciones en el nodo Robot. También, inicializamos los motores y sensores, asignándoles velocidades y posiciones para los motores y tiempo de muestreo para los sensores. Por último, creamos el bucle que nos permitirá mover el robot, allí llamaremos las funciones que se utilizarán para dirigir el robot, mover el brazo, mover la cámara y utilizar los sensores de distancia. Lo anterior se ve reflejado en la **Figura 33**.

Figura 33. Función principal.

```
212 // (principal)
213 int main(int argc, char **argv) {
214     wb_robot_init();
215
216     time_step = (int)wb_robot_get_basic_time_step();
217     //asigna las entidades a las etiquetas
218     leftMotor = wb_robot_get_device("I2Q");
219     rightMotor = wb_robot_get_device("DER");
220     PriMot = wb_robot_get_device("Arm1");
221     SegMot = wb_robot_get_device("Arm2");
222     TerMot = wb_robot_get_device("Arm3");
223     cam = wb_robot_get_device("camera");
224     SFD = wb_robot_get_device("D0");
225     SFI = wb_robot_get_device("D1");
226     SMD = wb_robot_get_device("LD");
227     SME = wb_robot_get_device("LI");
228     STD = wb_robot_get_device("TD");
229     STI = wb_robot_get_device("TI");
230     //inicia los motores del brazo
231     wb_motor_set_position(PriMot, Mot1);
232     wb_motor_set_position(SegMot, Mot2);
233     wb_motor_set_position(TerMot, Mot3);
234     //inicia los motores de la oruga y permite el control de velocidad
235     wb_motor_set_position(leftMotor, INFINITY);
236     wb_motor_set_position(rightMotor, INFINITY);
237     wb_motor_set_velocity(leftMotor, 0.0);
238     wb_motor_set_velocity(rightMotor, 0.0);
239     //inicia el reconocimiento del joystick / teclado
240     wb_joystick_enable(time_step);
241     wb_keyboard_enable(time_step);
242     wb_camera_enable(cam, time_step);
243     wb_distance_sensor_enable(SFD, time_step);
244     wb_distance_sensor_enable(SFI, time_step);
245     wb_distance_sensor_enable(SMD, time_step);
246     wb_distance_sensor_enable(SME, time_step);
247     wb_distance_sensor_enable(STD, time_step);
248     wb_distance_sensor_enable(STI, time_step);
249     // loop principal
250     while (wb_robot_step(time_step) != -1) {
251         Movimiento();
252         MovBraz();
253         MovCam();
254         Dist();
255     }
256
257     wb_robot_cleanup();
258     return 0;
259 }
260 }
```

Tomado de: Propia del autor.

En la función de movimiento a las variables predefinidas, les asignamos los valores recibidos del mando. En el joystick sé que se define como la que dirigirá el movimiento de la oruga, a partir de los valores recibidos de los ejes de dicha palanca, definiendo las velocidades de las orugas y las modificamos de acuerdo con el movimiento que se desea. Por ejemplo, para girar sobre la posición actual, se asignan velocidades iguales con signo diferente y para avanzar mientras se gira se reduce la velocidad de la oruga ubicada en la dirección que deseamos girar. Este proceso se puede observar en la **Figura 34**.

Figura 34. Función de Movimiento.

```
127 void Movimiento(){
128     Eje = wb_joystick_get_axis_value(0);
129     if (Eje<-18000){
130         Vel1 = 1.2;
131         Vel2 = 1.2;
132         Eje1 = wb_joystick_get_axis_value(1);
133         if (Eje1>18000){
134             Vel2 = Vel2*0.5;
135         }else if (Eje1 <-18000){
136             Vel1 = Vel1*0.5;
137         }
138         Mot (Vel1,Vel2);
139     }else if (Eje>18000){
140         Vel1 = -1.2;
141         Vel2 = -1.2;
142         Eje1 = wb_joystick_get_axis_value(1);
143         if (Eje1>18000){
144             Vel2 = Vel2*0.5;
145         }else if (Eje1 <-18000){
146             Vel1 = Vel1*0.5;
147         }
148         Mot (Vel1,Vel2);
149     }else if (Eje>0 && Eje<= 18000){
150         Eje1 = wb_joystick_get_axis_value(1);
151         if (Eje1>18000){
152             Vel1 = 0.15;
153             Vel2 = -0.15;
154         }else if (Eje1 <-18000){
155             Vel1 = -0.15;
156             Vel2 = 0.15;
157         }else {
158             Vel1 = 0.0;
159             Vel2 = 0.0;
160         }
161         Mot(Vel1,Vel2);
162     }
163 }
```

Tomado de: Propia del autor.

Al tener las velocidades definidas, utilizamos la función *Mot* para asignar dichas velocidades a los motores. Esto se observa en la **Figura 35**.

Figura 35. Función Motor.

```
24 void Mot(double Vel1, double Vel2){
25     wb_motor_set_velocity(leftMotor, Vel1);
26     wb_motor_set_velocity(rightMotor, Vel2);
27 }
```

Tomado de: Propia del autor.

Para el movimiento del brazo se utilizó la función *MovBraz*, con la cual, se calculó los ángulos y las posiciones de las articulaciones. De acuerdo con lo planteado anteriormente en el modelo, se tienen las posiciones que se envían a los motores, por tanto, los ángulos se calculan para verificar la posición del modelo y este se implementa en dos grados de libertad; debido a, las funcionalidades del robot, para permitirnos mover el eslabón final con la cámara y el cañón de forma independiente como se muestra en la **Figura 36**.

Figura 36. Función de movimiento de brazo

```

28 void MovBrazo(){
29     printf("the newx is %f \n", NewX);
30     printf("the newy is %f \n", NewY);
31     r = sqrt (pow(NewX,2.0)+pow(NewY,2.0));
32     a = atan((fabs(NewY))/(fabs(NewX)));
33     a = (a*180)/PI;
34     Arc = (pow(r,2.0) + pow(11,2.0) - pow(12,2.0))/(2*11*r);
35     if (Arc > 1){
36         Arc = 1;
37     }else if (Arc < -1){
38         Arc = -1;
39     }
40     b = acos(Arc);
41     b = (b*180)/PI;
42     Arc1 = (pow(11,2.0) + pow(12,2.0) - pow(r,2.0))/(2*11*12);
43     if (Arc1 > 1){
44         Arc1 = 1;
45     }else if (Arc1 < -1){
46         Arc1 = -1;
47     }
48     c = acos(Arc1);
49     c = (c*180)/PI;
50     if (NewX > 0.0){
51         q1 = a + b;
52     }else {
53         q1 = 90.0 + (90.0 - a) + b;
54     }
55     q2 = (-1)*(180-c);
56     if (q1 > 180){
57         q1 = 180;
58     }else if (q1 < 30){
59         q1 = 30;
60     }
61     if (q2 > -50){
62         q2 = -50;
63     }else if (q2 < -160){
64         q2 = -160;
65     }
66     Mot1 = -3.070 + 0.01*q1;
67     Mot2 = 3.890 + 0.018*q2;
68     wb_motor_set_position(Mot1, Mot1);
69     wb_motor_set_position(Mot2, Mot2);
70     CalcC = (q1*PI)/180;
71     CalcC = cos(CalcC);
72     Calc1 = ((q1*PI)/180)+((q2*PI)/180);
73     CalcC2 = cos(CalcC2);
74     NewX1 = 0.22*CalcC + 0.18*CalcC2;
75     Calc5 = (q1*PI)/180;
76     Calc5 = sin(Calc5);
77     Calc52 = ((q1*PI)/180)+((q2*PI)/180);
78     Calc52 = sin(Calc52);
79     NewY1 = 0.22*Calc5 + 0.18*Calc52;
80     printf("the newx1 is %f \n", q1);
81     printf("the newy1 is %f \n", q2);
82 }
83 }

```

Tomado de: Propia del autor.

Luego de tener las posiciones, pasamos a el movimiento de la cámara con la función *MovCam*, la cual, funciona leyendo el valor de los botones análogos del control llamados gatillos, con el fin de, poder mover la cámara hacia arriba o hacia abajo de forma constante. En la **Figura 37**, se muestra cómo se implementó el movimiento de la articulación donde está instalada la cámara.

Figura 37. Función movimiento de cámara

```

117 void MovCam(){
118     if (wb_joystick_get_axis_value(4) > 0){
119         Mot3 = Mot3 + 0.01;
120     }
121     else if (wb_joystick_get_axis_value(5) > 0){
122         Mot3 = Mot3 - 0.01;
123     }
124     wb_motor_set_position(TerMot, Mot3);
125 }

```

Tomado de: Propia del autor.

Por último, está la función *Dist* que sirve para verificar las lecturas de los sensores y para enviar el valor del sensor y su identificación a otra función llamada peligro; que es la encargada con base al identificador enviar el mensaje de la posición y distancia del objeto detectado como se muestra en la **Figura 38**.

Figura 38. Función distancia y Función Peligro.

```

189 void Dist(){
190     int i;
191     double Sensor;
192     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(SFD);
193     i = 0;
194     Peligro(Sensor,i);
195     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(SFI);
196     i = 1;
197     Peligro(Sensor,i);
198     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(SMD);
199     i = 2;
200     Peligro(Sensor,i);
201     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(SMI);
202     i = 3;
203     Peligro(Sensor,i);
204     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(STD);
205     i = 4;
206     Peligro(Sensor,i);
207     Sensor = wb_distance_sensor_get_value(STI);
208     i = 5;
209     Peligro(Sensor,i);
210 }

164 void Peligro (double Valor, int Pos){
165     if (Valor <= 500.0){
166         switch (Pos){
167             case (0):
168                 printf("Objeto en la parte frontal derecha  %f\n", Valor/10);
169                 break;
170             case (1):
171                 printf("Objeto en la parte frontal Izquierda %f\n", Valor/10);
172                 break;
173             case (2):
174                 printf("Objeto en el lateral derecho          %f\n", Valor/10);
175                 break;
176             case (3):
177                 printf("Objeto en lateral izquierdo          %f\n", Valor/10);
178                 break;
179             case (4):
180                 printf("Objeto en la parte trasera derecha  %f\n", Valor/10);
181                 break;
182             case (5):
183                 printf("Objeto en la parte trasera izquierda %f\n", Valor/10);
184                 break;
185         }
186     }
187 }
188 }

```

Tomado de: Propia del autor.

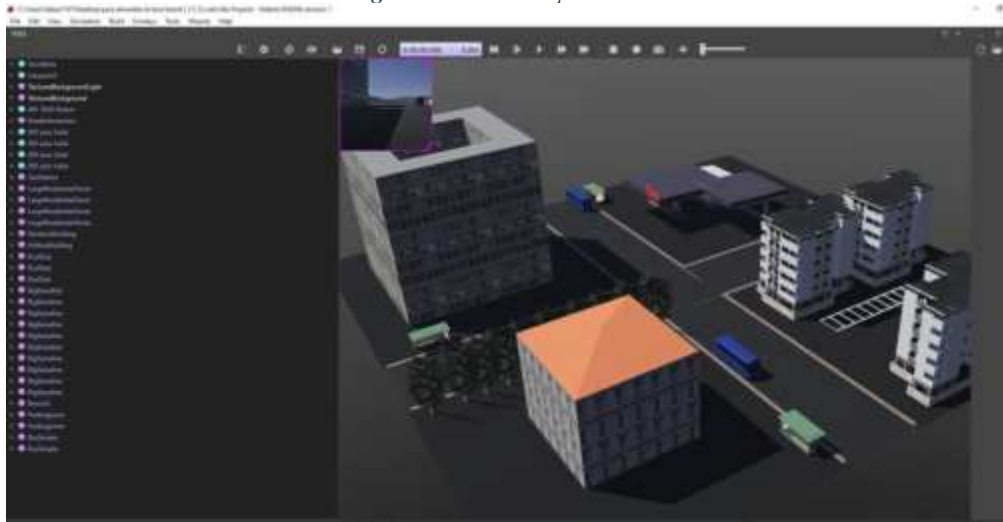
Cuando ya se desarrolla el controlador, este debe ser llamado en el nodo del robot para poder ser ejecutado en la simulación. Por ende, se tiene en cuenta como está nombrado el archivo que contiene el controlador y una vez hecho esto, se puede ejecutar la simulación en Webots.

4.2.3 Diseño e implementación del ambiente virtual de simulación del entorno

WorldInfo es el primer nodo en crearse en Webots, en el cual, se contendrá todas las propiedades relevantes para poder ejecutar la simulación, entre estas se encuentra *contactProperties*, que es la encargada de seleccionar las propiedades de contacto entre dos (2) materiales. Para esta opción, se debe seleccionar *track material*, para que las orugas puedan interactuar con la superficie y se efectúe un movimiento natural sobre el terreno, también contiene propiedades físicas, como la gravedad que en nuestro caso no varía, debido a, que nuestra aplicación se llevará a cabo en la tierra. Así mismo, contiene los fotogramas por segundo a los que se desea ejecutar la simulación. Cabe aclarar, que hay más propiedades, pero se nombraron las que requieren ajustes para poder ejecutar la simulación.

Una vez creado el mundo, este aparecerá sin ningún objeto, será un espacio vacío, donde se debe de ingresar iluminación, por eso se agrega el nodo *TexturedBackgroundLight*. Posterior a esto, se ingresa una imagen de fondo para dar un fondo texturizado al mundo, que haga más ameno el paisaje y esto se realiza con el nodo *TexturedBackground*. Luego, tendremos un borrador del mundo de ahora en adelante, en el cual, se agregarán objetos de interés para la simulación y para este proyecto, como la superficie *UnevenTerrain*. Esta superficie se basa en un terreno irregular y *floor*, ya que, ambos son objetos sólidos que permiten el desplazamiento del robot; los demás objetos son árboles, edificios, vehículos, carretera, buses; cada uno con un nodo específico, como se refleja en la **Figura 39**; de manera que, permite apreciar todos los nodos que componen el entorno de simulación

Figura 39. Mundo implementado



Tomado de: Propia del autor.

En la **Tabla 7**, se muestran todos los nodos usados para crear el ambiente de simulación.

Tabla 7. Elementos usados en el ambiente.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
BigSassafras	Árbol	10
BusStop	Para de bus	3
HollowBuilding	Edificio grande	1
GasStation	Estación de combustible	1
RoadIntersection	Intersección de carretera	1
LargeResidentialTower	Edificio residencial	4
BmwX5	Automóvil Rojo	1
Parkinglines	Líneas de parqueadero	2
BusSimple	Bus	2

Tomado de: Propia del autor.

La distribución y configuración de los elementos usados en el ambiente, se hace de forma que emule gráficamente un entorno urbano con lugares normalmente afectados por ataques con artefactos explosivos.

4.3 Propuesta del sistema electrónico y teleoperación del robot

Se propone elaborar un sistema electrónico dirigido al control, adquisición y envío de datos en el menor tiempo posible. Este sistema permite ejecutar las acciones necesarias para el movimiento del robot por los lugares de interés, envío de lectura de sensores y de video. El sistema cuenta con actuadores mecánicos, sensores de distancia, cámara Web, módulos transmisores de datos, dispositivos de potencia electrónica y, como fuente de alimentación se propone usar baterías, que es un sistema embebido; el cual, sirve para ejecutar el algoritmo principal y el procesamiento de datos.

El robot es controlado y manipulado en su parte de locomoción, a través de, los actuadores mecánicos; que son cuatro (4) motores de referencia *MOT_0676* de la marca *Pololu*. Además, son los encargados de mover la plataforma móvil en la orientación deseada por el operador. Estos motores vienen dispuestos en el diseño usado para la plataforma móvil. Las principales características de este motor se pueden observar en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Características de motor "MOT 0676"

MOT_0676	Velocidad [rpm]	Corriente [mA]	Corriente Max [mA]	Torque Max [Kg-cm]
6V	256	250	2500	2.5
12V	500	300	5000	5

Tomado de: Propia del autor.

Para la parte del manipulador, se propone mover a través de tres (3) servomotores de referencia *MG996R* de la marca *WAVGAT*, que son los encargados de disponer el manipulador en la posición deseada por el operador. Este motor viene dispuesto en el diseño del manipulador usado y sus características se pueden observar en la **Tabla 4**. Características servomotor *MG996R*.

Tabla 9. Características servomotor "MG996R"

MG996R	Velocidad [seg/60 grados]	Ancho de pulso [uS]	Torque Max [Kg-cm]
4.8V	0.2	600	9.4
7.2V	0.16	2400	11

Tomado de: Propia del autor.

Los sensores de distancia son infrarrojos de referencia *E3Z-D62* de la Marca *OMRON*, de tipo digital y longitud de censado ajustable hasta 1 metro y un voltaje de operación de entre 12V a 24V DC. La configuración de salida es de tipo NPN, estos sensores son utilizados como herramienta de medición de profundidad en el entorno de operación del robot y permiten evaluar y esquivar posibles obstáculos. Este sensor se muestra en la **Figura 40**.

Figura 40. Sensor OMRON infrarrojo



Tomado de: <https://www.dempro.co>.

Como fuente de alimentación, se propone usar 2 baterías de referencia *Lipo Pack W/XT-90* de la marca *Turnigy*, cada una de 5000 mA y de 3 celdas como se muestra en la **Figura 41**. La Batería *Turnigy*, es la primera batería que se usará para el sistema embebido encargado de ejecutar el algoritmo y la segunda batería se usará en la alimentación de actuadores, sensores y drivers motores.

Figura 41. Batería Turnigy



Tomado de: <https://avelectronics.cc/>

En la parte de potencia encargada de alimentar los motores, se deberá usar 2 Driver Puente H L298N. Este módulo permite la conexión en paralelo de 2 motores, con una alimentación a 12 V manejado por las baterías ya antes mencionadas. Este módulo se puede observar en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*

Figura 42. Modulo L298N



Tomado de: <https://www.vistronica.com>

El sistema embebido que se optó por utilizar es una placa Raspberry pi 3B, por su frecuencia de 1.2Ghz en conjunto con 1Gb RAM y por poseer 40 pines GPIO, de los cuales 24 son funcionales, es decir, con entradas y salidas digitales. Este dispositivo se puede observar en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*

Figura 43. Raspberry Pi3 B.



Tomado de: <https://www.vistronica.com>

El módulo encargado de transferir datos y video es la *Xbee PRO S3B*, el cual, se usarán 2 uno como maestro y otro como esclavo. Esto se debe a, las características de alcance y el envío de video, ya que, cada una cuenta con su respectiva antena para mejorar la señal, este dispositivo se muestra en la **Figura 44**. La Xbee PRO S3B sin su antena. Este componente es de vital importancia para la vinculación entre el robot y la estación de Tele operación.

Figura 44. Xbee PRO S3B



Tomado de: <https://www.vistronica.com>

También, se propone el uso de un mando de Xbox o PlayStation para realizar las operaciones con el robot. Se proponen estos elementos, debido a, la disposición que se tiene por los integrantes y porque se puede usar mejores versiones de cada uno de estos.

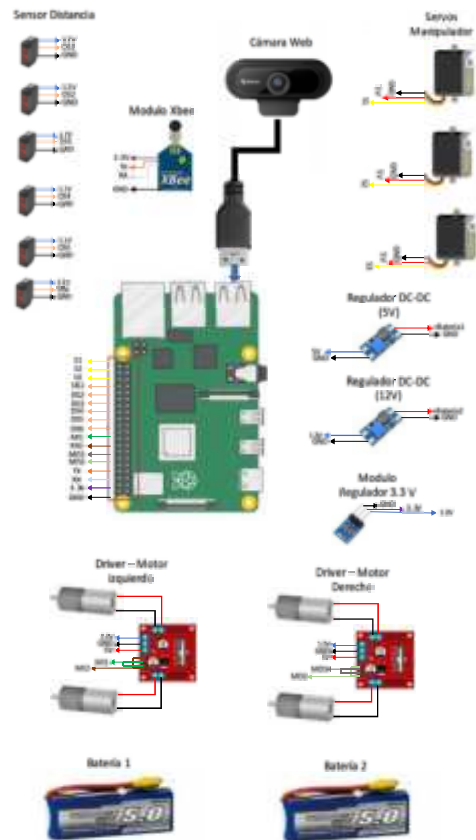
4.3.1 Diagrama de conexión

Con el fin de establecer un correcto funcionamiento del sistema se desarrolla un diagrama de conexión con los componentes propuestos anterior mente, en la **Figura 45**, se detalla la conexión de alimentación y señales de control de los motores de la plataforma móvil, en estos se evidencia la conexión en paralelo de los motores izquierdos y derechos, para minimizar conexiones, en las conexiones del manipulador se usó un servo por cada articulación, de esta manera se usa una señal de control por cada articulación.

La parte de alimentación se reparte entre las dos baterías propuestas, la Batería 1 está alimentando un regulador DC-DC, con 5 voltios de salida; Este voltaje estará destinado para alimentar a la Raspberry Pi y servos, con el fin de mantener una alimentación estable y compensada. La Batería 2 está alimentando un regulador DC – DC en modo elevador, con 12 voltios de salida; Este voltaje estará encargado de alimentar los drivers de motores y sensores de distancia.

la cámara no presenta mayor complejidad, va conectada a un puerto USB de la Raspberry, la Xbee por su parte va alimentada por un regulador de voltaje a 3.3 y usa puertos RX y TX de la Raspberry

Figura 45. Diagrama de conexión



Tomado de: Propia del autor

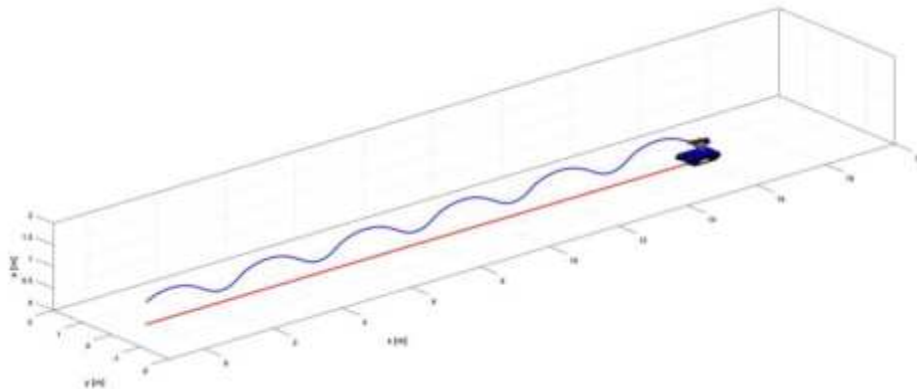
5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

El objeto principal de este capítulo es la validación del sistema propuesto en dos diferentes softwares de ingeniería, el primer software es Matlab, que hace la comprobación de los modelos cinemáticos necesarios para el estudio de movimiento del robot. El segundo software es Webots, que hace la integración de un ambiente controlado de simulación y permite emular el comportamiento del robot en el mundo real.

5.1 Validación del modelo matemático propuesto

El objeto de estudio es establecer el correcto funcionamiento de las tareas de locomoción de la oruga, así como también del manipulador. Para la comprobación del modelo cinemático, se implementó en Matlab diferentes trayectorias que el robot debería realizar con facilidad; esto con el fin de, simular el comportamiento del robot en entornos controlados. La primera trayectoria lograda es línea recta, como se observa en la **Figura 46**, es la más sencilla y se logra en la igualdad de las velocidades de la oruga. Además, esta trayectoria está resaltada en color rojo y para la trayectoria lograda por el efector final en esta misma figura, se implementó una señal sinodal y se encuentra resaltada en color azul.

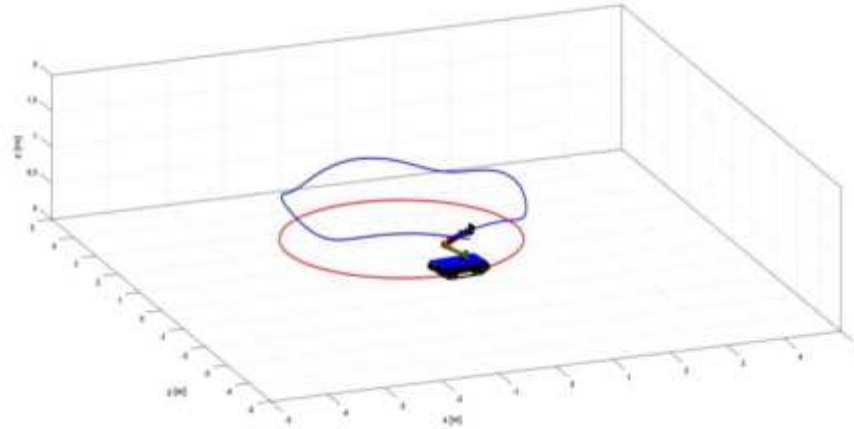
Figura 46 Trayectoria en línea recta.



Tomado de: Propia del autor.

La segunda comprobación del modelo cinemático se logró al implementar una desigualdad en las velocidades de la oruga, de tal manera que, sea la velocidad de la oruga izquierda menor que la velocidad de la oruga derecha y al realizar esta condición se logró observar una trayectoria circular, observar en la **Figura 47**. En esta figura, también, se puede observar la trayectoria efectuada por el efector final en color azul que sigue una trayectoria senoidal.

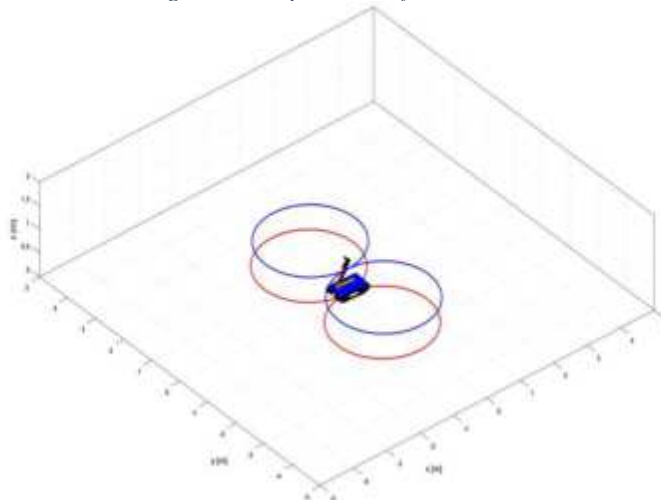
Figura 47. Trayectoria circular.



Tomado de: Propia del autor.

La tercera comprobación del modelo cinemático se logró al implementar una trayectoria con forma de ocho, que consta de dos ciclos: el primero, se realiza con una desigualdad en las velocidades de la oruga, logrando así una trayectoria circular similar a la mostrada en la **Figura 47**; pero, a diferencia de la circular, al llegar al punto de partida no se detiene si no que intercambia las velocidades entre las orugas para realizar otra trayectoria circular en sentido contrario, terminando aquí el segundo ciclo y dando como resultado la trayectoria en forma de ocho como se observa en la **Figura 48**. Para esta trayectoria la disposición del manipulador está estático, ya que, así genera una trayectoria plana en forma del 8 similar a la seguida por la oruga.

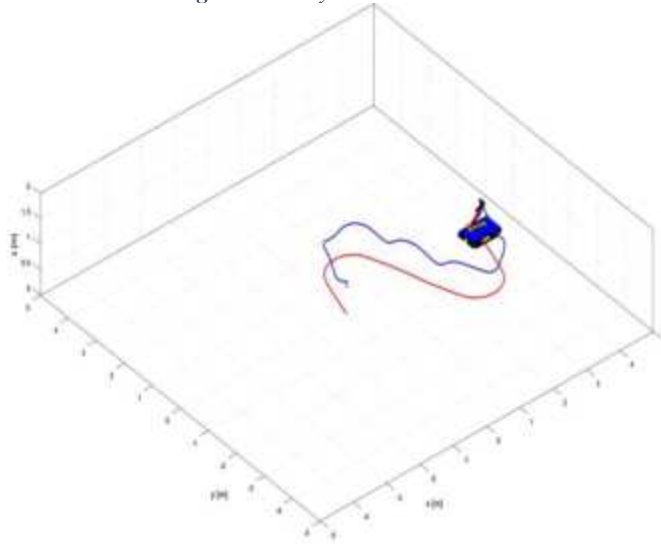
Figura 48. Trayectoria en forma de 8.



Tomado de: Propia del autor.

La cuarta comprobación es una trayectoria senoidal, esta se logra alternando las velocidades de las orugas a distintos intervalos y permitiendo realizar trayectorias semicurvas. El primer intervalo realiza una semicurva hacia la derecha, posterior a esto, el robot efectúa un corto trazado en línea recta; para finalmente, realizar un intervalo final con una semicurva a la izquierda y así cumplir la trayectoria senoidal que se observa en la **Figura 49**.

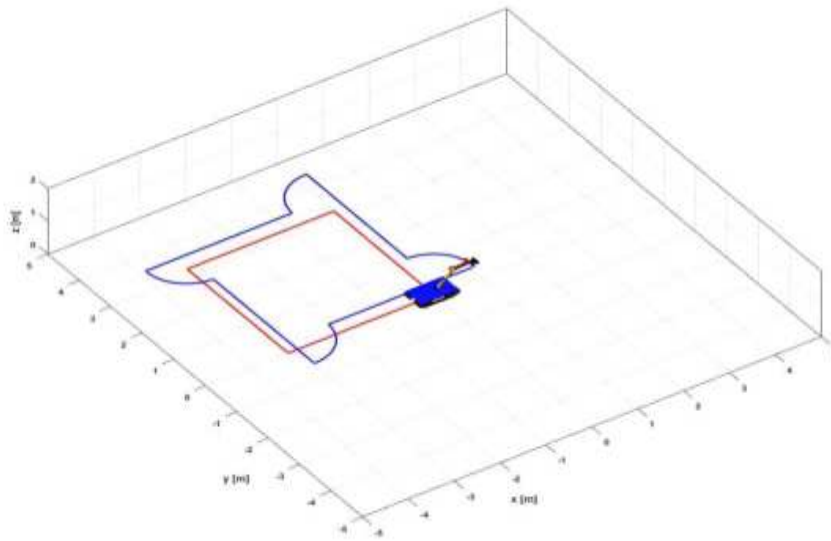
Figura 49. Trayectoria senoidal



Tomado de: Propia del autor.

La quinta y última comprobación es una trayectoria rectangular, esta se logra con velocidades iguales en las aristas y velocidades iguales, pero, opuestas en los vértices para girar sobre el eje z, dando como resultado la trayectoria observada en la **Figura 50**.

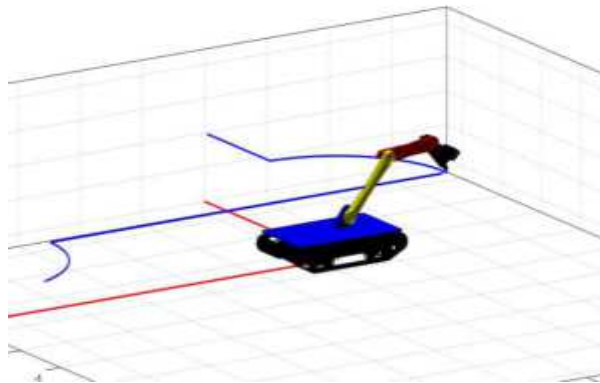
Figura 50. Trayectoria rectangular



Tomado de: Propia del autor.

También, se efectuó una postura diferente para esta comprobación, en la que se dispuso el manipulador para quedar en una posición de mayor alcance del efector final. Por consiguiente, su trayectoria no forma un cuadrado perfecto y está resaltada en color azul. La posición del manipulador se puede observar en la **Figura 51**.

Figura 51 Disposición del manipulador en trayectoria rectangular



Tomado de: Propia del autor.

5.2 Validación del sistema robótico en ambiente controlado de simulación

La validación del sistema robótico, se efectuó con la ejecución de la simulación en Webots, esta simulación nos ofrece un ambiente controlado, de tal manera que, permite la comprobación del funcionamiento de los sistemas del robot. Además, en esta se integra todas las funcionalidades del robot para la aplicación deseada, a excepción del cañón, ya que, el

Webots no permite simular explosiones o detonaciones para desarrollar el cañón en este ambiente. En la **Figura 52**, se observa la simulación en ejecución.

Figura 52. Sistema robótico en simulación.



Tomado de: Propia del autor.

Una descripción más detallada de la **Figura 52** permite ver que el robot se encuentra de forma estática y con una postura del manipulador, en la que permite, un breve reconocimiento de la parte frontal de un vehículo. Por otro lado, la vista de la cámara en la parte superior permite observar el recuadro que contiene la visualización que se tiene desde la cámara, esta vista general, permite ver el controlador implementado al costado derecho y en la parte izquierda de la misma, donde se observa todos los nodos usados en el ambiente.

Figura 53. vista desde cámara.



Tomado de: Propia del autor.

La **Figura 53** es un zoom de la **Figura 52**, donde se muestra lo observado por la cámara, por lo tanto, esto sería lo que el operador del robot vería desde su puesto de mando y en el que se permite ver el frontal de un vehiculó. Esta vista complementada con mando de Xbox One usado, hace referencia al sistema de tele operación, dado que, el mando es el encargado de

recibir las acciones que desea realizar el operador y enviarlas, donde la vista desde la cámara y la lectura son sensores de retroalimentación para el operador. En la **Figura 54**, se puede observar el mando usado con la demarcación de cada Joystick usado.

Figura 54. Mando Xbox One



Tomado de: Propia del autor.

Para ejecutar los movimientos de desplazamiento del robot, se utiliza el Joystick L, que consiste en avanzar hacia adelante, hacia atrás, rotar sobre su centro de gravedad, tanto a izquierda como a derecha y girar en movimiento usando una pequeña variación de velocidades. Para efectuar movimientos del manipulador, se utiliza el Joystick R; donde si se mueve de forma vertical, se estará movimiento en altura el brazo y si se mueve de forma horizontal, se estará moviendo de forma longitudinal. Por otra parte, si se desea enfocar la cámara y el cañón, se utilizan los gatillos RT y LT; para este caso, LT se usa para bajar la vista de la cámara y RT para subir.

El sistema sensórico acoplado en la plataforma móvil, permite complementar la retroalimentación de imagen lograda por la cámara. En la **Figura 55**, se muestra la lectura del sensor frontal derecho, de modo que, la distancia está mostrada en centímetros. Por otro lado, el sistema sensórico cuenta con 6 de estos sensores, dos ubicados en la parte frontal, dos en la parte trasera y uno para cada costado del robot. La lectura de estos sensores es impresa por consola en el mismo Webots.

Figura 55. Lectura de Sensores.

Console - All		
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709
Objeto en la parte frontal derecha	:	48.732709

Tomado de: Propia del autor.

Para la validación del sistema de locomoción en Webots, se procede a realizar verificaciones de movilidad con pequeños desplazamientos hacia adelante y hacia atrás, así como giros en ambos sentidos. En la **Figura 56**, se evidencia la primera validación del sistema de locomoción, efectuándose un corto desplazamiento hacia adelante, luego, hacia atrás.

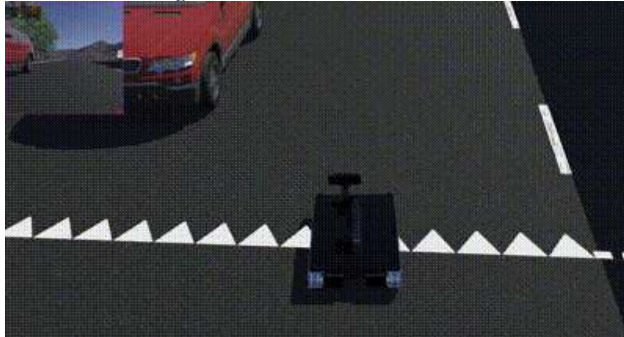
Figura 56. Validación de locomoción



Tomado de: Propia del autor.

En la **Figura 56**, se puede observar el movimiento de un giro, validando así el correcto funcionamiento del sistema de locomoción del robot. Cabe destacar que, en las **Figura 56** y **Figura 57**, se puede observar de manera detallada la vista obtenida por el robot mediante la cámara, esta vista se observa en la parte superior izquierda de un recuadro color lila.

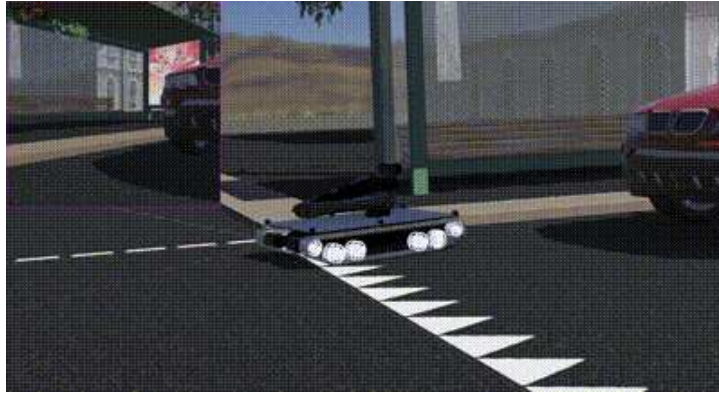
Figura 57. Giro hacia la derecha.



Tomado de: Propia del autor.

Para la validación del sistema de actuación, se procede a efectuar movimientos con el manipulador. El primer movimiento logrado es subiendo el efector final, para posteriormente bajarlo; este movimiento se puede observar en la **Figura 58**. También, se puede observar un pequeño balanceo en la vista de la cámara, esto debido, al movimiento de la cámara para intentar una vista estática de un solo punto mientras se mueve el manipulador, por este motivo, se efectuaron pequeñas correcciones por parte del operador desde el mando de distancia.

Figura 58. Primera validación de movimiento del manipulador.



Tomado de: Propia del autor.

El movimiento del manipulador se realiza siempre con el robot móvil estacionado en el punto de interés, debido a, que al efectuarse movimientos del manipulador cuando el robot se encuentra en desplazamiento incurre en inestabilidad, pudiendo así ocasionar volcamientos. Por tal motivo, en las validaciones del sistema de locomoción los desplazamientos siempre se realizaron con el manipulador en su punto mínimo, logrando así, un centro de masa más bajo posible. El operador puede ajustar la configuración del manipulador según lo desee y le permita cumplir el desarrollo de las tareas asignadas.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Partiendo de la bibliografía consultada en base al modelamiento cinemático (Manipuladores y robots móviles) fue posible desarrollar un el modelo cinemático para cada una de las partes del robot, para la parte móvil o plataforma móvil, así como también para el manipulador, una vez realizado esto fue necesario consultar a diferentes autores (Modelado y control de un manipulador móvil para seguimiento de trayectoria) para poder comprender la integración de las partes en una sola, logrando así el acoplamiento exitoso entre los dos modelos obtenidos y logrando obtener un solo modelo cinemático acoplado del robot.

Seguido a lo mencionado anteriormente se validó el modelo cinemático en Matlab y su correcto funcionamiento, en este medio de simulación se implementaron diferentes trayectorias para el robot, resaltando las efectuadas en los puntos de interés ubicados en el efector final del manipulador y en el punto P de la plataforma móvil, justo donde esta empotrado el manipulador. En este proceso se logró dar validación al modelo cinemático ya que su comportamiento era el esperado en las diferentes validaciones. Es decir, el robot logro ir en línea recta cuando la velocidad entre la oruga derecha e izquierda eran igual, también se logró generar la trayectoria circular cuando una de las velocidades entre las orugas era superior a la otra. Paralelo a esto el manipulador estaba siguiendo una trayectoria según la postura definida.

Posteriormente de haber reunido información sobre los sistemas disruptivos y la evolución en el tiempo, se realizó un análisis para determinar y organizar las prioridades para cumplir el objetivo, se evidencio que los cañones más efectivos y prácticos en tamaño y en potencia

son los de carga activa ya que no necesitan una fuente de energía muy grande para realizar la detonación de la carga, ideales para su transporte sin la necesidad de tener dispositivos de gran tamaño para generar presión, Se realizó la búsqueda de cañones comerciales de empresas que se especializan en tecnologías disruptivas como resultado se encontraron 6 alternativas de cañón, para el proceso de selección se utilizó el método de dar puntuación a los cañones según las necesidades del robot disruptor de esta investigación, los criterios de selección fueron; poco tamaño de la estructura general de cañón ya que se busca el más liviano y práctico para que no hiciera tanta resistencia al manipulador

dificultando los movimientos con el peso, debe tener compensador ya que es la manera más efectiva de reducir la fuerza de retroceso, y el que genere la menor fuerza de rebote, para poder incluir este parámetro fue necesario realizar un análisis de fuerzas de cada cañón, después de haber revisado todos los cañones con sus respectivas calificaciones como se observa en la tabla de "Resumen Cañones EOD", el cañón más conveniente para este proyecto según las puntuaciones fue el RE50-28 Midi Disruptor que cumple con la mayor parte de los requerimientos según los parámetros que se estaban calificando.

Debido a la situación que se vive en el país debido a la pandemia covid-19, solo se puede proponer los dispositivos electrónicos necesarios que permitirían establecer el diagrama de conexiones funcional del robot, ya que es difícil hacer pruebas debido a las restricciones como lo fue el confinamiento y aislamiento social. Es por lo que se hizo una propuesta electrónica con componentes adquiridos antes de la pandemia por los autores para el desarrollo del proyecto.

Finalmente, en Webots se logra la interacción entre la mayoría de los sistemas diseñados para el robot, resaltando que Webots no permite simular la desactivación o manejo de explosivos, el sistema disruptor seleccionado no fue simulado en este software. Una vez aclarado esto la simulación efectuada en Webots nos permite validar la teleoperación, movilidad de robot y la integridad del modelo desarrollado. Para esto se realizaron pruebas de manejo en donde se efectuaba movimientos de la plataforma móvil, pequeños movimientos hacia adelante y atrás, giros en ambos sentidos, permitieron detectar una pequeña inestabilidad al momento de romper la inercia. Respecto a la posición del manipulador se logra variar su posición siempre y cuando este en una posición estable, ya que al efectuar movimientos del manipulador cuando la plataforma móvil se encuentra realizando un desplazamiento puede incurrir en inestabilidad que logran causar volcamientos. La teleoperación fue lograda por la vinculación de una cámara en el robot y por el uso externo de un mando de Xbox, donde el operador logra observar en primera persona de lo que el robot estaría viendo, y haciendo uso del mando logra los desplazamientos deseados y orientación del efector final del manipulador.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. (2012). Diseño, impresión, montaje y control de un manipulador robótico. *Universidad Carlos III de Madrid*, 78. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16922/TFG_Alejandro_Aguilar_Romero.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Aguilera, S., Torres-Torriti, M., & Auat, F. (2014). Modeling of skid-steer mobile manipulators using spatial vector algebra and experimental validation with a compact loader. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Iros*, 1649–1655. <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942776>
- Andaluz, V. H., Sásig, E. R., Chicaiza, W. D., & Velasco, P. M. (2017). Linear algebra applied to kinematic control of mobile manipulators. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 449, 297–306. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6451-7_35
- Andaluz, V. H., Varela-aldás, J., Chicaiza, F. A., & Quevedo, W. X. (2019). *Teleoperación de un manipulador móvil con retroalimentación de fuerzas para evasión de obstáculos*. 291–305.
- Andrews, C. (2010). *How to... Defuse a Bomb*. 52–54.
- Andy, T., & Andrew, J. (2020). *Control Based on Linear Algebra for Mobile Manipulators*. 1–8.
- Angulo, C., Ponsa, P., & Raya, C. (2006). Construcción modular de robots móviles. Proyecto basado en portafolio para estudiantes de grado. *Revista Iberoamericana de Tecnologías Del Aprendizaje*, 1(1), 19–26.
- Arencibia, G., Hernandez, F., Menéndez, J., Rodríguez, J., & Pérez, A. (2020). *ESTIMACIÓN DE ORIENTACIÓN, BASADA EN FILTRO DE KALMAN, USANDO UNIDAD DE MEDICIÓN MEDICIÓN INERCIAL SIN MAGNETÓMETRO*. 41(3), 369–378.
- Chantrasmi, T., Tansuwanarat, S., & Vallikul, P. (2015). Compact counter-recoil design of water cannon using a single nozzle with backward spray. *ACDT 2015 - Proceedings: The 1st Asian Conference on Defence Technology*. <https://doi.org/10.1109/ACDT.2015.7111576>
- Clavijo, J. P. B., Morales, S. C., & Cárdenas, H. A. P. (2016). Análisis comparativo de las pruebas físicas del personal naval, región costa y sierra. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 45(4), 1–16.
- COLOMBIA, D. D. (2017). *Estándares Nacionales de Desminado Humanitario Antipersonal en Colombia*. *Está permitido reproducir , guardar o transmitir el*

documento o partes del mismo , por fuente . Este documento y su contenido no pueden ser comercializados . Estándares Nacionales d. 1–33.

- Corke, P. (2020). Robotics Toolbox. *Robotics Toolbox for Matlab*, 10, 437.
http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html
- Correa, M. (2010). *EVALUACIÓN DE LA SALUD MENTAL EN MILITARES HERIDOS EN COMBATE DEL EJÉRCITO NACIONAL DE COLOMBIA. -INTERVENCIÓN COGNITIVO CONDUCTUAL-*. 9(1), 76–99. <https://doi.org/10.1558/jsrnc.v4il.24>
- Darío, G., & Olga, R. (2016). *Sistema Teledirigido De Un Brazo Robótico De 4 Grados De Libertad Aplicando Visión De Máquina*. 571, 121–129.
- De Fazio, R., Cafagna, D., Marcuccio, G., Minerba, A., & Visconti, P. (2020). A multi-source harvesting system applied to sensor-based smart garments for monitoring workers' bio-physical parameters in harsh environments. *Energies*, 13(9).
<https://doi.org/10.3390/en13092161>
- Díaz, H., & Isabel, G. (2003). Minas antipersonales (M.A) en Colombia costo físico y emocional. *Umbral Científico*, 2, 0.
- Díaz-cacho, M., Ing, E., Informatica, S., Ing, E., Informatica, S., & Barreiro, A. (2012). *Plataforma de telerrobótica para laboratorios docentes*.
- Dueñas, J. (2009). VEHICULO EXPLORADOR PARA EL RECONOCIMIENTO DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS. *Society*, 3, 464.
- Enke, T. (2015). *Manual De Seguridad Sobre Explosivos De Guerra Y*. 3, 126.
- Fong, T., & Thorpe, C. (2001). Vehicle teleoperation interfaces. *Autonomous Robots*, 11(1), 9–18. <https://doi.org/10.1023/A:1011295826834>
- Fong, T., Thorpe, C., & Baur, C. (2001). Advanced interfaces for vehicle teleoperation: Collaborative control, sensor fusion displays, and remote driving tools. *Autonomous Robots*, 11(1), 77–85. <https://doi.org/10.1023/A:1011212313630>
- Goldenerg, A., Kircanski, N., Dickie, S., Scott, G., & Grynieswski, L. (2000). *EXPLOSIVES DISPOSAL ROBOT -Patent Number:6,113,343*.
- González, R., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2015). Robots móviles con orugas. Historia, modelado, localización y control. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 12(1), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.11.001>
- Graham, I., Alexander, H., & Labine, J. P. (2003). *US6644166*. 2(12).

- Habib, M. (2008). Humanitarian Demining: the Problem, Difficulties, Priorities, Demining Technology and the Challenge for Robotics. In *Humanitarian Demining* (Issue February). <https://doi.org/10.5772/5407>
- Hern, N., Alfredo, E., & Flores, P. (2015). *Sistema de control de movimiento para un manipulador móvil*.
- Jor, A., Das, S., Bappy, A. S., & Rahman, A. (2019). Foot Plantar Pressure Measurement Using Low Cost Force Sensitive Resistor (FSR): Feasibility Study. *Journal of Scientific Research*, 11(3), 311–319. <https://doi.org/10.3329/jsr.v11i3.40581>
- Juruš, O., Sukop, M., Špak, M., & Štofa, M. (2016). *Manipulator Arm for Robot SCORPIO*. 4(7), 349–352. <https://doi.org/10.12691/ajme-4-7-20>
- Justa, J., Šmídl, V., & Hamáček, A. (2020). Fast AHRS filter for accelerometer, magnetometer, and gyroscope combination with separated sensor corrections. *Sensors (Switzerland)*, 20(14), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s20143824>
- Katsuhisa Kitano, Satoshi Hamaguchi, H. A. (2010). *REMOTELY CONTROLLED ROBOTS HAVING IMPROVED TOOL DEPLOYMENT SYSTEMS* - Pub. No.: US 2010/0068024 A1. <https://patentimages.storage.googleapis.com/3b/c9/82/c283c7b24afe69/US20100019677A1.pdf>
- Kemp, I. (2005). *Robot Wars*.
- Kraemer, W. J., Volek RD, J. S., Nindl, B. C., Newton, R. U., Patton, J. F., Dziados MPH, J. E., & Hakkinen, K. (2004). Effects of Concurrent Resistance and Aerobic Training on Load-Bearing Performance and the Army Physical Fitness Test. *Military Medicine*, 169(September 2003), 12. <http://content.ebscohost.com/ContentServer.asp?EbscoContent=dGJyMNxb4kSeprU4zOX0OLCmr1CeqK9Ssa%2B4S7eWxWXS&ContentCustomer=dGJyMPGqs1Czr7ZLuePfgeyx43zx1%2B6B&T=P&P=AN&S=R&D=aph&K=15378130>
- Li, L., Asano, F., & Tokuda, I. (2018). Nonlinear Analysis of an Indirectly Controlled Sliding Locomotion Robot. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 8221–8226. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593401>
- Li, Y., Peng, Y., Luo, J., Cheng, Y., & Veglianti, E. (2019). Spatial-temporal variation characteristics and evolution of the global industrial robot trade: A complex network analysis. *PLoS ONE*, 14(9), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222785>
- Long, L. O., Gomer, J. A., Wong, J. T., & Pagano, C. C. (2011). Visual spatial abilities in uninhabited ground vehicle task performance during teleoperation and direct line of sight. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 20(5), 466–479. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00066

- Luiso, I. J., Manuel, I., Muñoz, L., & Cema, U. (2018). *ENSAYO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL DE BAJO COSTO*.
- Ma, B., Fang, Y., & Zhang, X. (2007). Inverse kinematics analysis for a mobile manipulator with redundant DOFs. *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, CCC 2007*, 118–122. <https://doi.org/10.1109/CHICC.2006.4346874>
- Ma, C., Li, W., Gravina, R., & Fortino, G. (2017). Posture detection based on smart cushion for wheelchair users. *Sensors (Switzerland)*, 17(4), 6–18. <https://doi.org/10.3390/s17040719>
- Ma, M., Song, Q., Gu, Y., Li, Y., & Zhou, Z. (2018). An adaptive zero velocity detection algorithm based on multi-sensor fusion for a pedestrian navigation system. *Sensors (Switzerland)*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/s18103261>
- Mahoney, J. M., & Rhudy, M. B. (2019). Methodology and validation for identifying gait type using machine learning on IMU data. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 43(1), 25–32. <https://doi.org/10.1080/03091902.2019.1599073>
- Mañas, F. M., & Paper, A. (2007). *Los artefactos explosivos improvisados (IEDs)*. 2(4), 110–122.
- McClarren-Curry, C., & Shaughnessy, K. (1999). Acute thoracic aortic dissection: How to defuse a time bomb. In *Dimensions of Critical Care Nursing* (Vol. 18, Issue 4, pp. 26–29). <https://doi.org/10.1097/00003465-199907000-00007>
- Mohammadpour, E., Naraghi, M., & Gudarzi, M. (2010). Posture stabilization of skid steer wheeled mobile robots. *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM 2010*, 163–169. <https://doi.org/10.1109/RAMECH.2010.5513194>
- Morales, J., Martínez, J. L., Mandow, A., García-Cerezo, A. J., & Pedraza, S. (2009). Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5), 1098–1108. <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2026499>
- Morales, J., Martínez, J. L., Mandow, A., Pequeño-Boer, A., & García-Cerezo, A. (2010). Simplified power consumption modeling and identification for wheeled skid-steer robotic vehicles on hard horizontal ground. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 4769–4774. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649292>
- Oliver, J. M., Stone, J. D., Holt, C., Jenke, S. C., Jagim, A. R., & Jones, M. T. (2017). The effect of physical readiness training on reserve officers' training corps freshmen cadets. *Military Medicine*, 182(11), e1981–e1986. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-17-00079>

- Ollero, A. Bb. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*.
- Pascual, J. R. de G. (2010). Robótica: Estado del arte. *Universidad de Deusto*.
- Prada-Jiménez, V., Niño-Suárez, P. A., Mauledoux-Monroy, M. F., & Aponte-Rodríguez, J. A. (2019). Coupled dynamic model for a mobile manipulator. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(11), 2622–2629. <http://www.ripublication.com>
- Predica, A., Mituletu, I., & Ardeljan, D. (2019). *Design of an electronic device for two-axis balance level measurement. 1*, 191–197.
- Ramirez, H. F., & Aviles, O. (2019). *VALI: Desarrollo y Evolución de un Robot Para Neutralizar Explosivos VALI: Desarrollo y Evolución de un Robot Para Neutralizar Explosivos. June*.
- Ray, L. P. (1996). Robot disassembles explosive devices. *Industrial Robot*, 23(3), 20–24. <https://doi.org/10.1108/01439919610115929>
- Restrepo, J. E., Yara, E. A., Cano Betancur, J., & Tavera, L. N. (2014). Perfil emocional de un grupo de militares colombianos víctimas de minas antipersona o artefactos explosivos improvisados. *Revista Colombiana de Psiquiatria*, 43(2), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rcp.2014.02.004>
- Rock, T., & Smith, A. (2014). PRECISION WATER JET DISRUPTOR DELIVERY SYSTEM - United States Patent : 5861366. In *New York*.
- Sanchez-Choachi, J. S. (2019). Control basado en pasividad con estrategia adaptativa de un sistema de almacenamiento energético para una nano-red DC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 185–203. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a11>
- Satizábal, C., Calderón, O., & Garcia, A. (2006). AVANCES EN EL MANEJO DE HERIDOS EN COMBATE EN EL HOSPITAL MILITAR CENTRAL DE BOGOTÁ, COLOMBIA. *Trauma*, 14, 116–121.
- Scholtz, J., Theofanos, M., & Antonishek, B. (2006). Development of a test bed for evaluating human-robot performance for explosive ordnance disposal robots. *HRI 2006: Proceedings of the 2006 ACM Conference on Human-Robot Interaction, 2006*, 10–17. <https://doi.org/10.1145/1121241.1121246>
- Serway, R. A., & Kirkpatrick, L. D. (1988). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. In *The Physics Teacher* (Vol. 26, Issue 4). <https://doi.org/10.1119/1.2342517>
- Sharma, B. S. M., Vidhya, S., & Kumar, N. (2017). System for measurement of joint range of motion using inertial sensors. *Biomedical Research (India)*, 28(8), 3699–3704.

- Siliciano, B., & Oussama, K. (2008). *Springer Handbook of Robotics*.
- Stanciñ, S., & Tomazic, S. (2020). *Computationally Efficient 3D Orientation Tracking Using Gyroscope Measurements*.
- Urendes, E., Asín-Prieto, G., Ceres, R., García-Carmona, R., Raya, R., & Pons, J. L. (2019). HYBRID: Ambulatory robotic gait trainer with movement induction and partial weight support. *Sensors (Switzerland)*, 19(21), 1–22.
<https://doi.org/10.3390/s19214773>
- Valade, A., Acco, P., Grabolosa, P., & Fourniols, J. Y. (2017). A study about kalman filters applied to embedded sensors. *Sensors (Switzerland)*, 17(12), 1–19.
<https://doi.org/10.3390/s17122810>
- Yanez, D., & Jiménez, J. (2019). *REPARACIÓN DE LAS NUEVAS VÍCTIMAS DEL CONFLICTO ARMADO EN COLOMBIA : DESAFÍOS PARA THE NEW VICTIMS OF THE ARMED CONFLICT IN COLOMBIA : 46*, 129–154.
- Yeison, T., & Nicolás, T. (2018). *Reconstrucción histórica de las principales acciones de policías víctimas del conflicto armado en Colombia. Periodo 1985 - 2016*. 41.