

# **Sistema robótico para la identificación de minas antipersonal**

**Valentina Alejandra Cárdenas Londoño**

**Jhon Fredy Moreno Patiño**

**Proyecto de Grado**

Docente.

Lina María Chacón Rivera

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Pregrado en Ingeniería Mecatrónica

Bogotá

2023

## **Resumen**

La detección y eliminación de minas antipersonal representan un desafío crucial para la seguridad y la estabilidad de las comunidades que han sido afectadas durante décadas por el conflicto armado. Los métodos tradicionales, como el uso de caninos entrenados, detectores de metales manuales y vehículos blindados, presentan limitaciones en términos de eficiencia y seguridad. La primera etapa del presente proyecto consiste en realizar una investigación profunda sobre la problemática mencionada, con el fin de enfocar la intención del robot, por medio de la realización de un análisis de los factores necesarios para llevar a cabo su elaboración, como las limitaciones y formas en las que se debe implementar para obtener resultados óptimos y significativos.

## **Abstract**

The detection and removal of anti-personnel mines represents a crucial challenge for the security and stability of communities that have been affected for decades by armed conflict. Traditional methods, such as the use of trained canines, hand-held metal detectors and armored vehicles, have limitations in terms of efficiency and security. The first stage of this project consists of conducting an in-depth investigation of the mentioned problems, in order to focus on the intention of the robot, through an analysis of the factors necessary to carry out its development, as well as the limitations and ways in which it should be implemented to obtain optimal and significant results.

**Keywords:** Landmine Detection, Humanitarian Robotics, Human Rights and Demining Technology, Safety in Demining Robotics.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido .....	3
Índice de figuras.....	4
Índice de tablas .....	5
Introducción .....	6
Objetivos.....	8
Definición del problema .....	9
Justificación .....	13
Análisis de requerimientos.....	15
Marco de referencia .....	18
Análisis de restricciones .....	24
Definición del diseño de la solución.....	27
Desarrollo del prototipo .....	34
Impacto ambiental.....	42
Impacto social .....	44
Análisis de costos.....	45
Análisis de viabilidad.....	48
Conclusiones .....	50
Referencias.....	51
Anexos .....	54

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) .....	31
<b>Figura 2.</b> Visualización del ensamblaje en SolidWorks.....	35
<b>Figura 3.</b> Proceso de impresión 3D de los engranes de las ruedas .....	36
<b>Figura 4.</b> Ensamblaje de componentes mecánicos.....	37
<b>Figura 5.</b> Esquema electrónico del sistema robótico .....	38
<b>Figura 6.</b> Conexión y pruebas de los motores.....	39
<b>Figura 7.</b> Conexión de componentes a la tarjeta de desarrollo ESP32 .....	39
<b>Figura 8.</b> Aplicación diseñada y programada para controlar el prototipo .....	40

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Requerimientos del dispositivo .....	17
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones de la primera opción considerada para la elaboración del robot de detección de minas antipersonal .....	28
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones de la segunda opción considerada para la elaboración del robot de detección de minas antipersonal .....	29
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones del prototipo a realizar del robot de detección de minas antipersonal	32
<b>Tabla 5.</b> Impacto ambiental del robot.....	42
<b>Tabla 6.</b> Costos directos asociados al diseño y construcción del prototipo .....	45
<b>Tabla 7.</b> Costos asociados a la producción de un sistema robótico de detección de minas antipersonal .....	46
<b>Tabla 8.</b> Análisis de viabilidad .....	48

## Introducción

Colombia ha enfrentado una larga historia de conflicto armado interno y una de las consecuencias más devastadoras es la presencia generalizada de minas antipersonal en diversas regiones del país, que generan que en la actualidad Colombia sea el sexto país con mayor número de víctimas por este tipo de minas y el segundo con mayor número de víctimas pertenecientes a las fuerzas públicas (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2017). Estas minas fueron diseñadas para explotar cuando una persona o animal se aproximan o hacen contacto, por lo que representan una amenaza constante para la seguridad y el bienestar de las comunidades locales, obstaculizando el desarrollo y la recuperación de áreas afectadas. Gracias a que la construcción de estos dispositivos es de bajo costo, las minas antipersonal han sido usadas en masa con el fin de defender zonas de alta importancia para el conflicto armado.

Una de las acciones internacionales más importantes frente a esta problemática se dio a finales de 1997, cuando se realiza la Convención de Ottawa como respuesta al sufrimiento causado por las minas antipersonal prohibiendo el uso, almacenamiento, producción y transferencia de estos dispositivos. La Convención también tiene como finalidad que los países emprendan la búsqueda y destrucción de las minas antipersonal que ya se encuentran en sus territorios (Comité Internacional de la Cruz Roja [CICR], 2007).

Sin embargo:

Colombia es el único país de América en donde las guerrillas y otros grupos armados ilegales emplean estas armas a pesar de que su uso se encuentra prohibido por el Derecho Internacional Humanitario y la Convención de Ottawa. Colombia suscribió y ratificó este tratado mediante la Ley 759 de 2002. (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2017, párr.3).

Aunque los avances en la tecnología e implementación de medidas de desminado han ayudado bastante en las últimas décadas, las minas antipersonal siguen cobrando un precio humano y social incalculable en Colombia. Los métodos convencionales que se han usado para detectar estos dispositivos mortales no han sido suficientes en términos de precisión, eficiencia y seguridad. Algunos de estos métodos son los caninos entrenados, pese a que tienen unos resultados excelentes en muchas tareas, son limitados en la cobertura de áreas minadas extensas

y también pueden estar expuestos a riesgos físicos considerables. Los detectores de metales operados manualmente son útiles en ciertos contextos, pero pueden no proporcionar la garantía de detección precisa requerida en este entorno desafiante, también generan un gran riesgo para las personas que se encuentran cerca de artefactos explosivos. Además, la utilización de vehículos blindados para detonar las minas presenta un riesgo significativo para el personal involucrado y puede dañar la infraestructura y el terreno circundante.

En este proyecto se quiere abordar de manera integral estos desafíos al desarrollar un robot especializado para la detección de minas antipersonal. Se busca ofrecer una solución que no solo mejore la eficiencia y precisión de la detección de minas, sino que también contribuya a la seguridad del personal involucrado y permita recuperar regiones afectadas por el conflicto armado.

La construcción de un robot detector de minas antipersonal es una manifestación del compromiso de la sociedad por abordar un desafío que ha persistido por mucho tiempo. Con este proyecto, se quiere transformar la manera en que se aborda la búsqueda de minas antipersonal, y se espera que el resultado final impacte de manera positiva en la seguridad, eficiencia y la calidad de vida de las comunidades afectadas. Gracias a la integración de tecnologías avanzadas y enfoques interdisciplinarios, se busca forjar un camino hacia un futuro más seguro y resiliente, en el que las minas antipersonal ya no sean una amenaza constante para la población.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Desarrollar un sistema robótico versátil capaz de operar en diversos entornos y condiciones, integrando sensores para la identificación precisa de minas antipersonal, minimizando la posibilidad de falsos positivos y negativos.

### ***Objetivos específicos***

- Diseñar un robot que cuente con capacidades de movimiento multidireccional y adaptabilidad a diferentes terrenos y obstáculos
- Construir la estructura del robot, incorporando sensores de detección de metales para mejorar la identificación y localización de minas antipersonal.
- Desarrollar una interfaz de usuario intuitiva que permita a los operadores controlar y supervisar las operaciones del robot de manera efectiva
- Evaluar la eficiencia del dispositivo por medio de pruebas con elementos metálicos en distintas condiciones.

## **Definición del problema**

Uno de los primeros antecedentes que se tienen del uso de minas antipersonal se remonta a China entre el siglo XII y el siglo XIII, éstas fueron usadas con el objetivo de defender sus ciudades del ejército mongol comandado en ese momento por Gengis Khan. Estas minas fueron una especie de balas de cañón llenas de pólvora que podían hacer que detone. Otro antecedente es un tipo de mina empleada en el siglo XVI en Europa, este tipo de mina consistía en un depósito bajo tierra que contenía pólvora, tierra, piedras y arena. Esta mina detonaba cuando una persona o un animal hacía contacto con ella. No fue hasta la Guerra Civil Americana (1861-1865) que la mina antipersonal se modernizó a cómo se conoce actualmente, la cual es un contenedor con metales, pólvora, un fusible y una pieza que la detone. Esta mina se le atribuye a Gabriel Rains, un soldado del ejército confederado. Gracias a los conocimientos en las ciencias militares y química, Rains ideó una mina cubierta con una chapa metálica, la cual tenía acoplado un fusible cubierto por una tapa de latón cubierta con una solución de cera abeja. La mina de Rains explotaba ya sea por contacto directo con la cubierta del dispositivo, es decir, si un objeto la golpeaba o algunas persona o animal la pisaba. Otro método para hacer detonar esta mina era a distancia con cuerdas o cables atados al explosivo (El Comercio, 2018).

Continuando con la información presentada por El Comercio (2018) Gabriel Rains y su tropa instalaron minas a lo largo del camino que usaban para salir de alguna fortaleza, de esta forma cuando fueran seguidos por el ejército enemigo las minas explotaran de forma periódica causando una gran destrucción. Por prácticas como estas se empezaron a prohibir el uso de minas antipersonas, pero más adelante el ejército confederado volvió a emplearlas de nuevo con la diferencia de que a partir de ese momento se establecieron algunos estándares éticos para su utilización. Sin embargo, esto no detuvo los diferentes avances en las minas explosivas, una de las metodologías que se comenzaron a usar fue cubrirlas con carbón triturado para que se camuflen en los suministros de carbón del enemigo, así cuando fueran echadas a una máquina de vapor explotaran. El uso de las minas antipersonas se consolidó en la Segunda Guerra Mundial, en donde se plantaron la mayor cantidad de minas detectadas hasta el día de hoy. Durante este periodo se conocieron principalmente dos tipos de minas, las minas antitanques y las minas antipersonal. Tras terminar la guerra se empezaron a escribir tratados para eliminar estas minas a

nivel global, se tiene una cuenta aproximada de 53 millones de minas destruidas hasta el momento y aún hay muchos países con programas de búsqueda y destrucción de estos dispositivos.

Además de los conflictos mencionados anteriormente, las minas se han utilizado en muchos otros conflictos como: “La Guerra de Vietnam, la Guerra de Corea y la Primera Guerra del Golfo. Durante la Guerra Fría, muchos estados colocaron largas extensiones de minas terrestres a lo largo de las fronteras.” (Campaña Internacional para la Prohibición de las Minas Antipersona [ICBL], s.f, párr. 1).

Las minas antipersonal han pasado por cambios y han evolucionado con el tiempo, desde su intención hasta su tecnología. Inicialmente eran utilizadas para: “proteger las minas antitanque y evitar que fueran retiradas por soldados enemigos. Se utilizaban de forma defensiva, para proteger zonas estratégicas como fronteras, campamentos o puentes importantes y para restringir el movimiento de las fuerzas enemigas.” (ICBL, s.f, párr. 3)

Con el pasar de los años:

Las minas terrestres antipersonal comenzaron a desplegarse a mayor escala, a menudo en conflictos internos y dirigidas específicamente contra civiles. Se utilizaron para aterrorizar a las comunidades, negar el acceso a las tierras de cultivo y restringir el movimiento de la población. (ICBL, s.f, párr. 5)

Esto a su vez generó que se perdiera la importancia de conocer el posicionamiento de las minas, se dejaron de mapear las zonas minadas, además, el tiempo y las condiciones climáticas permitieron su desplazamiento, aumentando el riesgo de ingresar en una zona minada sin saberlo y afectando a más grupos de personas.

Lo anterior fue una situación que empeoró con el desarrollo tecnológico de las minas, se implementaron minas que se podían lanzar desde el aire, dejando su posicionamiento al azar, desde este momento en que las mismas fuerzas armadas se vieron afectadas por la cantidad de bajas causada por las minas los soldados decidieron apoyar su prohibición y en cuarenta y un estados han cesado la producción de minas antipersonal.

Desafortunadamente, según la ICBL (s,f):

Once estados que no son parte del tratado continúan reservándose el derecho de producir minas antipersonal: China, Cuba, India, Irán, Myanmar, Corea del Norte, Corea del Sur, Pakistán, Rusia, Singapur y Vietnam. De los cuales, es posible, que solo cuatro cuenten con una producción real: India, Myanmar, Pakistán y Corea del Sur. (párr. 11)

Al mismo tiempo, algunos grupos armados no estatales o grupos rebeldes en varios países producen minas antipersonal, en su mayoría de tipo improvisado. Un claro ejemplo de esto es Colombia, donde en 1996 el Gobierno nacional ordenó a la Industria Militar Colombiana (INDUMIL) detener la producción de minas y tres años después las instalaciones de producción de estas armas fueron desmanteladas en cumplimiento temprano con las obligaciones que establecería la Convención de Ottawa en el 2001, A pesar de esto, entre el año 2000 y 2006 se vio un crecimiento en el número de víctimas de minas antipersonal, esto debido a que se convirtieron en la táctica militar preferida de las guerrillas, en un intento de compensar la pérdida de su iniciativa militar y contener el avance paramilitar y la ofensiva del Estado (Velandia Navarro, 2019).

La ineficiencia y riesgo asociados con los métodos convencionales de detección de minas antipersonal es un tema que debe ser abordado. El uso de caninos, detectores de metales manuales y vehículos blindados, presentan limitaciones considerables, incluida la incapacidad para cubrir grandes áreas de manera efectiva, así como la posibilidad de falsos positivos y negativos que aumentan el riesgo para la población local y el personal encargado de las operaciones, dejando muchas veces con personal afectado gravemente tanto física como psicológicamente. Esto subraya la necesidad de una solución tecnológica más avanzada y precisa.

A pesar de los avances en el desminado y las operaciones de limpieza de minas, la magnitud y persistencia de la amenaza que representan estos artefactos explosivos requiere de enfoques más innovadores y confiables. Colombia registró al menos 151 víctimas de Minas Antipersonal y Municiones Sin Explosionar, todo esto de acuerdo con las estadísticas oficiales de la OACP – Descontamina Colombia (Anónimo, 2022).

Colombia es uno de los países que firmó el Tratado de Ottawa, el cual entró en vigor el 1 de marzo de 2001, por lo que desde ese momento en Colombia ha sido imprescindible realizar constantemente procesos de desminado en su territorio. Los métodos de desminado no han cambiado mucho desde que se empezaron a implementar fuertemente con el Tratado de Ottawa, y es aquí donde se debe echar un vistazo a las nuevas tecnologías como la robótica o la inteligencia artificial que busca brindar eficiencia en procesos que pueden llegar a ser mecánicos y peligrosos.

## **Justificación**

La presente propuesta de proyecto tiene como objetivo fundamental el desarrollo de un sistema robótico de vanguardia diseñado para la detección precisa de minas antipersonal en entornos diversos y condiciones desafiantes. Esta iniciativa cobra una relevancia humanitaria y técnica significativa debido a los beneficios que se derivarán de su exitosa implementación, así como a las implicaciones prácticas, utilidad metodológica y valor teórico que posee.

La implementación de este sistema robótico conlleva un claro propósito humanitario, ya que al permitir la identificación precisa de minas antipersonal se podría reducir drásticamente el riesgo de lesiones y muertes en áreas afectadas por estos dispositivos explosivos, además de ofrecer un alto nivel de seguridad tanto para las comunidades locales como para los equipos de desminado e impulsar el acceso seguro a tierras previamente inaccesibles, lo que contribuirá a la rehabilitación de áreas afectadas por conflictos y al retorno de poblaciones desplazadas.

También, la detección de minas es esencial para abordar el problema de la existencia persistente de estas en diversas regiones del país, que a su vez genera sufrimiento humano e imposibilidad de desarrollo en los territorios. La relevancia de este proyecto radica en su capacidad para mitigar los efectos negativos de las minas antipersonal y contribuir a la construcción de la paz en áreas afectadas por conflictos armados.

El sistema robótico propuesto tiene implicaciones prácticas profundas, acelerará el proceso de identificación y eliminación de minas, permitirá una mayor eficiencia y seguridad en las operaciones de desminado y en adición, facilitará la rehabilitación de tierras previamente inaccesibles, promoviendo el regreso de poblaciones desplazadas y la implementación de proyectos humanitarios y económicos. El impacto práctico de este proyecto se extenderá más allá de la detección de minas, sentando un precedente para la adopción de tecnologías robóticas en otros campos de seguridad y rescate.

En cuanto a utilidad metodológica, el desarrollo del sistema robótico requerirá la integración de diversas tecnologías, como sensores de detección. La metodología empleada para diseñar, implementar y validar este sistema servirá como un valioso marco de referencia para futuros proyectos que busquen abordar problemas similares mediante enfoques multidisciplinarios y

tecnológicos. Esta metodología podría aplicarse en diversos contextos que requieran soluciones técnicas complejas y eficientes.

Finalmente, el proyecto cuenta con un amplio valor teórico, al combinar sensores avanzados, algoritmos y técnicas de aprendizaje automático, el proyecto impulsa la intersección de tecnologías de vanguardia. Los avances en algoritmos para minimizar falsos positivos y negativos podrían tener aplicaciones en otros sistemas de detección y clasificación de objetos, ampliando el horizonte del conocimiento y la aplicación práctica en campos más allá de la detección de minas.

## **Análisis de requerimientos**

El proyecto de desarrollo de un robot detector de minas antipersona es una tarea de alta complejidad y responsabilidad que debe ser abordada con un análisis de requerimientos exhaustivo y meticuloso. En primer lugar, es esencial tener en cuenta los objetivos del proyecto, es decir, que el robot será utilizado para desminado humanitario. Este paso inicial proporciona una base sólida para todo el proceso de desarrollo.

Uno de los requerimientos con mayor importancia es el entorno de operación, el cual juega un papel crítico. Las condiciones ambientales en las que el robot operará, como el tipo de terreno (desierto, selva, terreno urbano), el clima (lluvioso, seco, caliente, frío) y la altitud, deben ser cuidadosamente consideradas para garantizar que el robot funcione de manera efectiva y segura en diversos escenarios. La propuesta para cumplir el requerimiento del terreno consiste en la implementación de ruedas oruga, las cuales deberían permitir el paso del robot por distintos terrenos, para saber su efectividad es necesario llevar a cabo fases de prueba. En cuanto al clima se tienen varias propuestas como un material a prueba de agua y polvo, incluir en el diseño cierres herméticos para prevenir el deterioro del interior y el daño de la electrónica, implementar sistemas de ventilación controlada que permitan el flujo de aire dentro del robot para evitar la acumulación de humedad, utilizar sensores y cámaras diseñados específicamente para funcionar en condiciones adversas, utilizar conectores herméticos y cables con clasificación IP (Ingress Protection), aplicar revestimientos hidrófobos y oleofóbicos en las superficies exteriores del robot para repeler el agua y el aceite, lo que ayuda a mantener las lentes de la cámara limpias y reduce la adhesión de partículas de polvo.

Además, la identificación de los tipos específicos de minas antipersona y explosivos que el robot debe ser capaz de detectar. Cada tipo de mina puede requerir tecnologías y enfoques de detección diferentes, por lo que esta información es esencial para el diseño del robot y la selección de sensores adecuados. El dispositivo mencionado en el presente proyecto busca realizar la detección de minas antipersonales de fragmentación.

El rendimiento de detección es otro aspecto crucial para tener en cuenta. Es necesario establecer metas claras en cuanto a la tasa de detección deseada y los niveles aceptables de falsos positivos. Esto asegura que el robot pueda cumplir con eficacia su tarea de detectar minas

mientras se minimiza la probabilidad de alertas erróneas que puedan causar confusión o pánico en el campo. Este requerimiento será definido en la fase de programación del robot, pero se espera que sea de entre el 80 y el 90%.

En términos de seguridad, se deben establecer medidas que prevengan daños tanto al robot como a los operadores y al entorno circundante en caso de que una mina sea detectada o activada accidentalmente. Este aspecto es fundamental para garantizar la integridad de las personas y el equipo involucrado en la operación del robot detector de minas antipersona. Teniendo en cuenta los dispositivos considerados para la tele operación la distancia mínima entre el dispositivo y el operador debe ser de 200m.

El diseño de un robot detector de minas antipersona implica una cuidadosa consideración de los parámetros definidos como requerimientos y especificaciones. En primer lugar, las dimensiones físicas y el peso del robot deben definirse teniendo en cuenta las limitaciones de transporte y la capacidad de maniobra en terrenos variados. Estos factores determinarán en gran medida la facilidad de desplazamiento y la accesibilidad del robot en áreas donde se sospecha que hay minas. Inicialmente las dimensiones establecidas serán de 50x50x50 con posibilidad de desfases por diseño.

El robot detector de minas antipersonal debe ser un dispositivo altamente especializado que cumpla con una serie de especificaciones cruciales. Equipado con una variedad de sensores de detección, desde detectores de metales hasta sensores de imagen y calor, se debe lograr una alta tasa de detección de minas manteniendo un bajo índice de falsos positivos. Su movilidad es crucial, debe ser capaz de desplazarse de manera segura en diferentes tipos de terreno, así como sortear obstáculos y operar en condiciones ambientales variadas. Un sistema de control remoto permite a los operadores supervisar y dirigir sus acciones de forma precisa desde una ubicación segura. También se deben incorporar medidas de seguridad robustas para proteger al robot y a los operadores en caso de que se detecte una mina. La autonomía es crítica para operaciones prolongadas y se debe garantizar un mantenimiento eficiente (revisión de los sistemas mecánicos y electrónicos, revisión de la calibración del o los sensores, estado de la batería, lubricación de piezas móviles que lo necesiten, cambio de piezas dañadas). Además, el cumplimiento normativo, programas de capacitación, soporte técnico y una cultura ética y de responsabilidad son elementos esenciales en la operación de este dispositivo. Los recursos financieros y humanos

adecuados son fundamentales para llevar a cabo con éxito el diseño, desarrollo, producción y operación del robot detector de minas antipersona.

La resistencia al entorno, que abarca desde la resistencia al agua hasta la tolerancia a temperaturas extremas (38°C es la temperatura máxima que se puede alcanzar en algunas zonas de Colombia), es vital para garantizar el rendimiento del robot en una variedad de condiciones ambientales.

El diseño también debe incluir sistemas de comunicación eficaces para transmitir datos desde el robot a los operadores y viceversa, así como mecanismos de seguridad sólidos, como defensores de explosiones, para minimizar riesgos en caso de detección de minas. En conjunto, estos parámetros conforman la base para el desarrollo de un robot detector de minas antipersona eficiente y seguro.

**Tabla 1.** *Requerimientos del dispositivo*

<b>Requerimiento</b>	<b>Especificación</b>
Terreno	Ruedas de oruga
Clima	Diseño a prueba de agua y polvo Protección hacia altas temperaturas (entre 24 y 28°C)
Tipo de minas a detectar	Minas antipersonales de fragmentación
Fuente de energía	Baterías recargables
Tipo de control	Tele operada a distancia mínima de 200m
Sensores	Detector de metales FBS (full-band spectrum)
Tamaño	Menor a 50 x 50 x 50 cm
Peso	Menor a 25 Kg
Velocidad Máxima	10 km/h
Autonomía	Mínimo 2 horas

*Nota.* En esta tabla se definen los requerimientos considerados para la fabricación del robot y la especificación de cada uno.

## **Marco de referencia**

### **Tipos de mecanismos de acción**

Siguiendo el trabajo de Collazos Rozo (2017), los tipos de mecanismos de accionamiento de minas antipersonal más comunes son los siguientes:

- **Alivio de presión:** Se activan cuando la persona u objeto que ejerce un peso se retira. Algunos métodos utilizados para que se activen estas minas es poner objetos llamativos sobre ellas para que las personas que los vean los levanten haciendo detonar el explosivo.
- **Presión:** Se activa cuando se ejerce una fuerza sobre un elemento que da paso a la corriente para lograr explotar la carga. Se suele usar mucho este método de activación en minas de onda de choque.
- **Iniciación por fotocelda:** Se usa en minas cubiertas de la luz con un objeto el cual al ser levantado deja obstruir el paso de luz y hace que se active el mecanismo dejando circular corriente por el circuito de la mina y detonando la carga explosiva.
- **Mecanismos con sensores de proximidad:** Estos mecanismos cuentan con uno o más sensores de proximidad, ya sea infrarrojos o ultrasónicos que al detectar una presencia hacen detonar la carga.
- **Cable trampa:** Consiste en instalar un cable al mecanismo que hace explotar la mina, de forma que cuando alguien toque el cable, que puede ir extendido a lo largo de un camino o entre tierra y plantas, la mina explotará.

### ***Tipos de minas***

Según el CICR (1997) se puede hacer una clasificación de minas antipersonal en tres categorías:

- Minas antipersonal simples que producen una onda de choque
- Minas antipersonal de fragmentación de tipo estático o “saltadora”
- Minas antipersonal direccionales de fragmentación

Las minas antipersonal simples que producen una onda de choque son construidas con una carga almacenada dentro de una caja, un detonador y un dispositivo disparador. Se puede accionar por presión, que suele ser ejercida por un peso entre 2kg y 6 kg, o también se puede

activar mediante un alambre camuflado. Los efectos letales de esta mina pueden alcanzar un radio de hasta 2 metros como máximo y tienen la potencia suficiente para causar heridas muy graves, como amputar extremidades (CICR, 1997).

Se tiene un tipo de mina antipersonal de fragmentación que al igual que la mayoría de las minas de fragmentación se producen con granadas con un mango metálico de fragmentación o cemento con piezas metálicas pequeñas, pero se clasifica como estática porque se suelen fijar a palos de madera o barras metálicas en el suelo para activarse con alambres u otros sistemas. También se pueden poner bajo tierra para activarse con presión (CICR, 1997).

Las minas antipersonal de fragmentación tipo “saltadora” funciona de forma similar a las minas antipersonal simples, la diferencia es que explotan tras alcanzar una altura de 0.8 a 1.50 metros. Su funcionamiento se basa en la activación de un primer explosivo, el cual se puede activar por tracción pisando o empujando un alambre escondido, la primera explosión se encarga de disparar una carga explosiva en el aire para que esta explote tras conseguir una altura entre el rango especificado (CICR, 1997).

Las minas antipersonal direccionales de fragmentación o efecto horizontal, estas minas tienen como objetivo lanzar fragmentos en una dirección específica y suelen instalarse a ras del suelo, sobre un trípode o fijarse al tronco de un árbol. Su accionamiento se puede hacer mediante métodos tradicionales como en los tipos de mina anteriores. Los fragmentos que suelen ser lanzados por la activación de estas minas suelen ser trozos metálicos filosos o esferas metálicas, sus dimensiones tienen un rango de 4 a 6 mm y su peso va entre 0.5 y 6 gramos. Este tipo de mina puede llegar a tener un rango letal entre 50 y 100 metros (CICR, 1997).

### ***Tecnologías de Detección y Desminado***

En Colombia, según la Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal (s.f), actualmente se utilizan distintas técnicas de detección y desminado, estas son:

**Manual.** Realizado por desminadores entrenados que son desplegados para la inspección manual del terreno mediante el uso de herramientas técnicas que les permiten la localización y posterior disposición de los artefactos explosivos (AE).

**Mecánico.** Se hace uso de una o más máquinas barreminas, con las que se espera generar la destrucción de estas. Las máquinas usadas en las operaciones de desminado pueden cumplir la función de generar la detonación, preparar el suelo, detectar amenazas o todas las anteriores. Además, se hace uso de vehículos protegidos contra las minas antipersonal, para proteger a los ocupantes y los equipos de los efectos de una detonación. Un aspecto para tener en cuenta es que este tipo de detección y desminado requiere del uso posterior de alguna de las otras dos técnicas mencionadas. (Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal, 2017)

**Canino.** Se refiere al proceso de realizar operaciones de desminado mediante el despliegue de Caninos Detectores de Minas (CDM) (párr. 10).

### ***Detectores de metales***

Los detectores de metales funcionan gracias a las propiedades del electromagnetismo, cuando se hace circular una corriente por un conductor se genera un campo magnético alrededor de este. Un detector de metales tiene un bobinado (alambre de cobre enrollado de forma circular) el cual será la bobina transmisora. Por el principio ya mencionado, al electrificar la bobina transmisora se crea un campo electromagnético alrededor de esta, a medida que se mueve el detector de metales se va moviendo el campo magnético. Cuando la bobina transmisora se mueve sobre un metal, el campo magnético afecta directamente los átomos del metal. Internamente en el metal que es sometido al campo magnético sucede los electrones cambian su movimiento, lo cual induce una corriente eléctrica. Siguiendo más propiedades electromagnéticas, si se tiene electricidad circulando por un metal, se crea un campo magnético también. Así que al final el campo magnético creado por el detector de metales induce otro campo magnético en los metales por los que pase el detector. Los detectores de metales tienen un segundo bobinado, el cual es la bobina receptora y su función es detectar el campo magnético inducido en el o los metales más cercanos. La bobina receptora se encuentra conectada a un amplificador que puede ir conectado a un altavoz o bocina, también puede ir a una pantalla o enviar la señal donde se requiera (Woodford, 2023).

Hay diferentes formas de hacer el bobinado para detectar metales. Los más pequeños suelen ser más sensibles a objetos pequeños que estén cercanos a la superficie, por otro lado, los bobinados más grandes pueden detectar metales a mayor profundidad. Las bobinas concéntricas

coplanares funcionan muy bien en terrenos con menor contenido mineral. Las bobinas DD, que se trata de dos bobinas que tienen una forma parecida a la letra D posicionadas de forma superpuesta una sobre otra, son óptimas para terrenos con altos niveles de minerales (Friedrich, 2023).

De acuerdo con Woodford (2023), diferentes frecuencias en el campo magnético de la bobina transmisora pueden generar mejores resultados dependiendo del tipo de metal que se busque, la profundidad a la que se encuentre y el tipo de suelo. Se pueden clasificar en tres principales tipos de detectores de metales dependiendo de su frecuencia:

- Aquellos con muy bajas frecuencias o VLF (very low frequency) que usan una sola y muy baja frecuencia que oscila normalmente entre 6 y 20 kHz.
- Detectores PI o de inducción de pulsos que utilizan frecuencias más altas y señales pulsadas. Suelen detectar objetos a mayor profundidad que los detectores VLF, pero no es tan discriminatorio, es decir, que no puede identificar si un metal es diferente a otro.
- El detector de espectro de banda completa o FBS (full-band spectrum) usa varias frecuencias de forma simultánea que es como usar varios detectores al mismo tiempo, este puede ser útil para discriminar los metales encontrados.

Siguiendo el trabajo de Espinosa Carreño (2006), algunas características importantes de los detectores de metales son las siguientes:

- Profundidad de la detección y sensibilidad: Se debe tener un circuito electrónico de alta precisión para detectar los pequeños cambios producidos en la bobina receptora. La sensibilidad se suele relacionar con la profundidad de la detección, la cual se espera sea alta.
- Robustez y fiabilidad: Es de gran ayuda a la fiabilidad que el dispositivo tenga un sistema en lazo cerrado que permita la auto calibración. Las partes más sensibles deben ser cubiertas de forma que no sufran daños cuando el dispositivo se ponga en marcha sobre diferentes terrenos.
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas: El dispositivo no debe ser muy afectado por los campos magnéticos generados alrededor, pueden ser de otros detectores, radios, etc.

- Efecto de tierra: Algunos suelos contienen algunos minerales como el hierro que puede afectar la señal generada por los metales, actualmente la mayoría de los detectores tienen un sistema para compensar este efecto.
- Localización de los blancos: El operador debe poder localizar un metal de forma precisa.
- Discriminación de un blanco: Es bueno que se pueda distinguir diferentes tipos de metales, diferentes profundidades o su tamaño.

### ***Robótica en Operaciones de Desminado***

En distintos países en la actualidad se utiliza robótica para realizar operaciones de desminado. Un ejemplo es Afganistán donde se utiliza el robot Digger D-3 que es un robot de limpieza de minas impulsado por ruedas de oruga, con control remoto, capaz de activar minas hasta una profundidad de 25 centímetros, chapado en acero, con un tren de aterrizaje en forma de V, diseñado para desviar la fuerza de las explosiones hacia ambos lados. Tiene la posibilidad de limpiar todas las minas de un área a un ritmo de 1.000 metros cuadrados por hora y puede ser controlado desde una distancia máxima de 500 metros (Coxworth, 2011).

### ***Materiales***

Para la construcción de un vehículo detector de minas se debería usar materiales blindados para que en caso de que una mina explote el vehículo no sufra grandes daños. Hay dos grandes grupos de materiales blindados, los materiales transparentes muy usados para blindar vidrios de autos y los materiales opacos que se usan bastante para blindar chasis de vehículos. En el caso de materiales blindados opacos es muy usado el acero balístico, el cual combina una alta dureza y fuerza, pero es sencillo de manipular en las plantas de blindaje; también mantiene sus propiedades a pesar de que haya cambios de temperatura, pero su precio se considera alto y puede variar entre 150 y 600 dólares por pie cuadrado; otro detalle importante es el peso de este material, el cual puede estar alrededor de 50 kg por metro cuadrado. (Blindajes Nacionales, s.f; GGT Comercializadora, s.f).

Otro material de alta resistencia es el polímero reforzado con carbono (CFRP, CRP o CFRTP) es un plástico semiacabado que se obtiene de diferentes formas como laminación manual,

inyección de fibras o inyección de resina. Estos plásticos son materiales con un coeficiente de expansión térmica bastante lo cual hace que apenas sufran distorsión por altas o bajas temperaturas; tienen unos costos bajos para fabricación de pequeños lotes. Estos materiales son menos pesados que el acero, una lámina de grosor 3 mm y 1 metro cuadrado de área puede pesar alrededor de 5 kg. En el apartado de costos un pie cuadrado de este material puede variar entre 10 y 50 dólares (ph technology, s.f).

En el caso del vidrio blindado que está hecho con varias capas de vidrio, entre las cuales hay capas intermedias con polímeros o termoplásticos las cuales tienen varias funciones como absorber la energía del impacto y mantener las capas de vidrio unidas. Algunos vidrios tienen velocidades de rotura de hasta 10000 km/h el cual es bastante alto teniendo en cuenta que una bala al ser disparada suele tener velocidades alrededor de 3000 km/h. El precio de un vidrio blindado de buena calidad puede oscilar de 100 a 400 dólares el pie cuadrado pesando alrededor de 10 kg (SILATEC, s.f).

### ***Marco de Regulaciones y Estándares***

Algunas normas que rigen el diseño y uso de materiales blindados y seguridad son:

- **ISO 16935:2007 – Glass in building – Bullet resistant security glazing – Test and classification:** Esta norma establece procedimientos para evaluar la resistencia de los materiales y acristalamiento de seguridad a impactos balísticos (International Organization for Standardization [ISO], 2007).
- **ASTM F1233-08: Standard Test Method for Security Glazing Materials and Systems:** Esta norma proporciona una base para evaluar la resistencia balística de vidrios y sistemas de seguridad en campo. Se establecen tres factores importantes que son las herramientas empleadas, las técnicas y métodos utilizados y finalmente el tiempo total para efectuar el ataque de prueba al vidrio.
- **ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestión de Calidad:** Esta norma establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad que puede ser aplicado en diversas organizaciones. Es fundamental para garantizar la calidad en el diseño y desarrollo del robot y sus componentes. (International Organization for Standardization [ISO], 2007).

- **ISO 10218-1:2011 - Robots Industriales:** Esta norma define los requisitos de seguridad para robots industriales y sistemas robóticos. Ya que el proyecto incluye componentes de robótica industrial, se debe cumplir con esta norma para garantizar la seguridad en la operación del robot. (International Organization for Standardization [ISO], 2007).

## **Análisis de restricciones**

### ***Restricciones económicas***

Una de las principales restricciones está asociada al costo y la disponibilidad de los materiales para la realización del prototipo, al ser materiales de alta resistencia (blindaje) tendrá un valor de 200 USD el pie cuadrado. Dado lo anterior la disponibilidad del recurso y la facilidad o dificultad para conseguirlo genera una restricción. Sumando otros costos como motores, ruedas oruga, sensores y microcontrolador el precio se podría aproximar a 15.000 USD sin tener en cuenta costos de importación. Es preferible manejar los costos en dólares debido a que la mayoría de las compras se harán en esta moneda ya que en Colombia no hay una gran industria

de materiales blindados y sensores necesarios para el proyecto. También hay que resaltar que si se tiene una alianza con el gobierno colombiano se podrían reducir costos en la obtención de materiales blindados.

### ***Restricciones Legales***

En términos legales la Resolución No.20224440029777 emitida por la Superintendencia de vigilancia y seguridad privada el 13 de mayo del 2022 tiene las normas técnicas para diferentes tipos de blindaje, por tanto, es fundamental apearse a lo que esta dicta.

Otra restricción legal que se puede tener es el acceso a ciertas áreas en donde se planea llevar a cabo las operaciones, puede que en algunos casos sea necesario coordinar con los propietarios de tierras o con las autoridades locales. También es importante tener los permisos para operar dispositivos blindados como el que se trabaja en este proyecto, así como respetar la propiedad intelectual de los demás autores que han trabajado en este campo con objetivos iguales o similares al de este proyecto.

A causa de que es parte de este proyecto implementar diferentes componentes eléctricos es importante realizar todas las prácticas tanto en laboratorio como en el campo de acuerdo con el Código Eléctrico Colombiano o la NTC 2050 (ICONTEC, 1998).

### ***Restricciones en Salud y seguridad***

El dispositivo sólo debe ser manejado por personal capacitado de lo contrario se podría producir un accidente fatal. También se debe tener en cuenta todas las medidas de seguridad a la hora de operar el dispositivo, entre las cuales se encuentran conservar la distancia especificada que es mínimo 200 metros, también se debe tener un kit completo de primeros auxilios que debe garantizar el cuidado de la vida de las personas, un kit completo de piezas para reparar el dispositivo en caso de una avería y previamente diseñar un procedimiento en caso de emergencias.

### ***Restricciones Socioculturales***

Un aspecto clave para poder llevar a cabo operaciones de desminado es respetar a las comunidades locales, de esta forma se podrá tener acceso a más territorios y tener mayor certeza a la hora encaminarse en los diferentes terrenos. Antes de llevar a cabo una operación de desminado se debe evaluar el impacto de la operación en las comunidades locales y en caso de que se pueda afectar a dichas comunidades es primordial buscar soluciones que minimicen los problemas que se puedan originar.

Es importante mencionar a los grupos al margen de la ley ya que estos tienen un gran control en varias zonas que aun tienen minas antipersonal, por lo tanto, esta es una restricción muy importante ya que de no manejarla con cuidado se puede poner en riesgo el bienestar o incluso la vida de los involucrados en las operaciones de desminado.

### ***Restricciones Técnicas***

Para operar el dispositivo se debe contar con al menos 200 metros de distancia, por ello es necesario un dispositivo que permita la comunicación a mínimo esta distancia. El sensor para detectar metales debe tenerla capacidad de detectar la mayoría de los metales de forma precisa, así como ser calibrable para aumentar el rango y precisión de detección en algunos metales específicos. También es crucial un buen tiempo de autonomía que no debe ser menor a dos horas, así que se debe realizar un análisis previo del gasto energético del dispositivo completo y en diferentes terrenos, es probable que de aquí se cree un problema ya que puede que se tenga que hacer un arreglo de baterías para obtener el voltaje y amperaje necesario. En blindaje se ve directamente afectado por la capacidad económica de conseguir blindajes de alta calidad que acarrear precios más altos o blindaje de menor calidad con un menor precio aparte de que en este apartado se debe tener en cuenta diferentes normas internacionales y nacionales.

Finalmente, si el dispositivo no cumple con los requerimientos especificados no se puede poner en marcha en operaciones de desminado, debido a que esto generaría una pérdida de control en las variables que podrían afectar a la operación y el riesgo es muy grande debido al tipo de operación que se llevaría a cabo.

### **Definición del diseño de la solución**

Como se mencionó a lo largo del presente documento, la problemática se enfoca en la presencia de minas antipersonal en Colombia, las cuales representan una amenaza continua para la seguridad de la población civil y obstaculizan el desarrollo de vastas áreas del país. Estas minas se encuentran dispersas en terrenos diversos y representan un riesgo significativo para la vida y la movilidad de las comunidades locales. El desminado manual es costoso, peligroso y lento, lo que dificulta la eliminación eficaz de las minas. Se necesita una solución tecnológica avanzada que permita la detección precisa y segura de minas antipersonal, minimizando los riesgos para la población y acelerando el proceso de desminado en el país.

La solución a esta problemática busca beneficiar a las partes interesadas identificadas, cumpliendo con diversos intereses de cada una como: el gobierno colombiano que busca proteger la seguridad y el bienestar de la población civil y cumplir con sus compromisos internacionales sobre la eliminación de minas antipersonal, las fuerzas armadas colombianas que tienen un interés en la seguridad nacional y están involucradas en la desactivación de minas en áreas afectadas por conflictos armados, las comunidades locales de zonas afectadas por minas antipersonal tienen un interés directo en la eliminación de estas amenazas, ya que afectan su seguridad y la capacidad de utilizar sus tierras de manera segura.

Para poder desarrollar el robot de detección de minas antipersonal e implementarlo es necesario tener en cuenta ciertas especificaciones básicas que permitirán que este sea acogido por las partes interesadas, tales como: precisión de detección, autonomía, resistencia y adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, como lluvia, calor extremo y humedad, facilidad de uso, seguridad, costo, portabilidad, velocidad de detección.

**Tabla 2.** *Especificaciones de la primera opción considerada para la elaboración del robot de detección de minas antipersonal*

<b>Especificación</b>	<b>Material o componente</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Costos (USD)</b>
Resistencia	Acero AR500	Resistente a explosiones y balas.	No se encontró un costo estimado
Precisión de detección	Detector de metales VMH3CS	Desarrollado específicamente para desminado	\$3.700,00
Autonomía	Baterías de iones de litio de 48V a 20Ah/25Ah	12 horas de carga	\$355,00
Facilidad de uso	Radio control de dron DJI RC	Cuenta con dos joysticks, botones y pantalla que permiten una	\$315,00

		utilización sencilla e intuitiva	
Seguridad	Módulo XBee	Permite que la persona que maneje el vehículo se encuentre a máximo 24 kilómetros de distancia (varía dependiendo de los obstáculos presentes)	\$48,51
Portabilidad	Tamaño de 50x50x50	Debido a su tamaño es de fácil portabilidad, pero debido al material esto podría limitarla	N/A
Velocidad de detección	0,2 – 1,5 m/s	Al unificar el vehículo con un detector hecho y utilizado con fines de desminado es veloz al detectar	N/A

*Nota.* En la tabla se muestra específicamente el componente o material que busca cumplir con lo definido en el apartado de requerimientos para la primera opción de prototipo del sistema robótico de detección de minas antipersonal, incluyendo costos.

**Tabla 3.** *Especificaciones de la segunda opción considerada para la elaboración del robot de detección de minas antipersonal*

<b>Especificación</b>	<b>Material o componente</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Costos (USD)</b>
-----------------------	------------------------------	----------------	---------------------

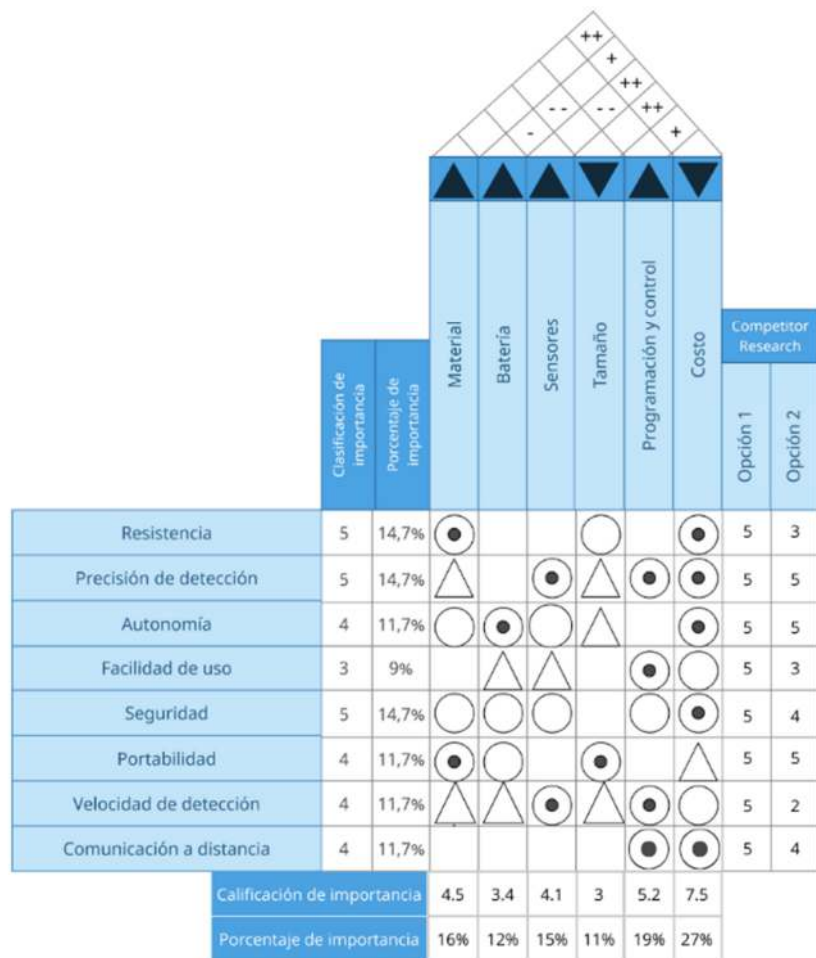
Resistencia	Aluminio 7075	Ligero y resistente a explosiones y balas.	\$523,25
Precisión de detección	Detector de metales Anfibio Multi	Adaptabilidad a diferentes ambientes	\$1.181,61
Autonomía	Baterías de iones de litio de 48V a 20Ah/25Ah	12 horas de carga	\$355,00
Facilidad de uso	Radio control de dron Flysky Paladin	Cuenta con dos joysticks, botones y pantalla, pero su utilización requiere de capacitación	\$52,93
Seguridad	Módulo LoRa	Permite que la persona que maneje el vehículo se encuentre a máximo 10 kilómetros de distancia (varía dependiendo obstáculos)	\$10,87
Portabilidad	Tamaño de 50x50x50 cm	Debido a su tamaño es de fácil portabilidad, pero debido al material esto podría limitarla	N/A
Velocidad de detección		El detector escogido no especifica velocidad de detección	N/A

Nota. En la tabla se muestra específicamente el componente o material que busca cumplir con lo definido en el apartado de requerimientos para la segunda opción de prototipo del sistema robótico de detección de minas antipersonal, incluyendo costos.

**Figura 1.** Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés)

Matriz de correlación	
++	Fuertemente positivo
+	Positivo
-	Negativo
--	Fuertemente negativo
	No correlacionado

Matriz de relación		
●	Fuerte	9
○	Medio	6
△	Débil	3
	Sin asignación	0



*Nota.* En la casa de calidad se ven descritas y relacionadas las necesidades de las partes interesadas y los requerimientos de diseño, dando un puntaje a cada uno y a cada relación, se infiere que el requerimiento más importante es el costo, con un 27% de importancia y entre las necesidades se encuentran con mayor importancia la resistencia, precisión de detección y seguridad. Basado en esto se hizo una comparación entre las dos opciones presentadas para el sistema robótico de detección de minas antipersonal y se visualizó que la opción 1 cuenta con el puntaje más alto en cada uno de sus ítems, mientras que la opción 2 cuenta con menos puntaje en algunos ítems, incluyendo dos de los requerimientos más importantes.

Como se observa en la casa de calidad, el costo es un requerimiento importante y de preferencia debe ser bajo, por esta razón la opción 1 no es viable para realizar en este proyecto, ya que como se muestra en la tabla 2 su costo aproximado es bastante alto. Con un mayor presupuesto sería un sistema aceptable para su implementación, caso contrario de la opción 2 que no cumple con las necesidades más importantes y también cuenta con un costo aproximado alto.

Por lo anterior, el prototipo a realizar en este proyecto se muestra en la tabla 4, este no cumplirá ciertos requerimientos y se enfocará en el análisis de la viabilidad del detector de minas y de la accesibilidad del robot a distintos terrenos.

**Tabla 4.** *Especificaciones del prototipo a realizar del robot de detección de minas antipersonal*

<b>Especificación</b>	<b>Material o componente</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Costos (USD)</b>
Resistencia	PLA (Polylactic Acid)	Ligero y de bajo costo	\$ 15
Precisión de detección	Sensor inductivo para detección de metales	Implementación sencilla y bajo costo	\$ 4
Autonomía	Baterías portables de 27200 mAh	Gran capacidad	\$119

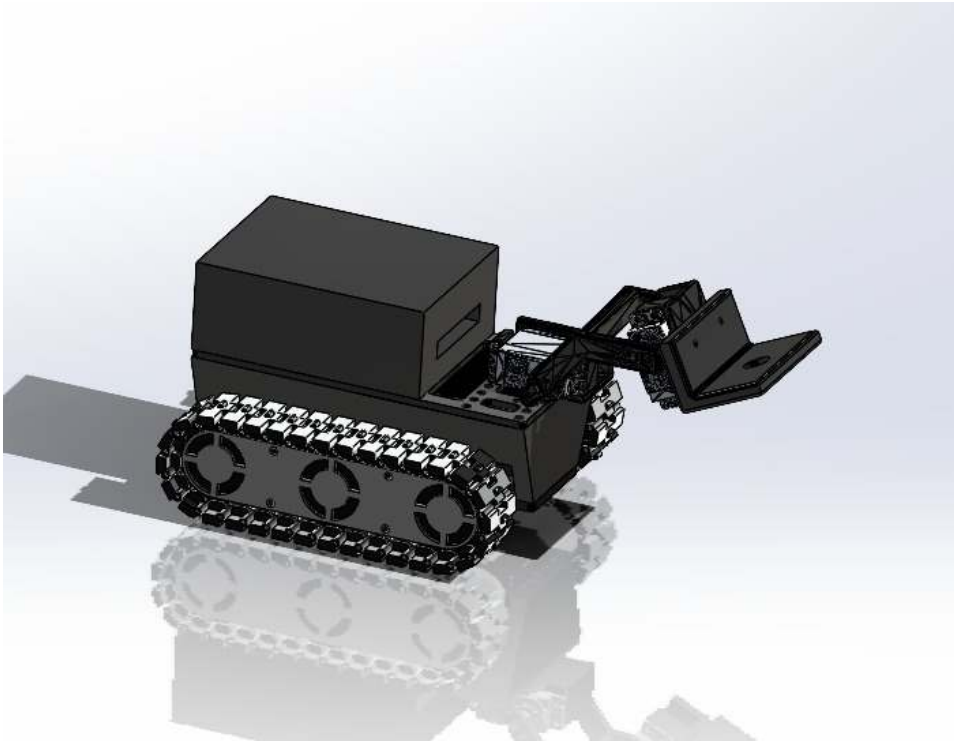
Facilidad de uso	Celular con sistema operativo Android	App descargable para cualquier celular con android	\$200,00
Seguridad	Modulo WiFi implementado en placa ESP32	Permite que la persona que maneje el vehículo se encuentre a varios metros de distancia	\$8,00
Portabilidad	Tamaño de 25x20x20 cm	Buena portabilidad	N/A
Frecuencia de detección	100 Hz	Rapidez en respuesta	N/A

*Nota.* Por cuestiones de presupuesto en la tabla 3 se presentan los componentes que se utilizarán en el prototipo que se realizará, en el cual se enfatiza en el funcionamiento del detector de metales y en la accesibilidad a distintos terrenos.

### **Desarrollo del prototipo**

La etapa inicial de desarrollo del prototipo consistió en la elaboración del diseño y modelado en 3D en SolidWorks, con el fin de tener certeza del diseño y del funcionamiento mecánico. Esta se presenta a continuación en la figura 2 y para su visualización en el software utilizado se debe ingresar al repositorio contenido en anexos donde entre otras cosas se encuentran los archivos .STL de cada pieza y del ensamblaje.

**Figura 2.** Visualización del ensamblaje en SolidWorks



*Nota.* Ensamblaje desarrollado en SolidWorks de las partes mecánicas como ruedas oruga, engranajes, chasis, sistema de control de sensor y soporte de sensor que componen al prototipo del sistema robótico de minas antipersona.

Al tener certeza del diseño y el funcionamiento mecánico del prototipo del sistema robótico por medio del modelado, se inició la impresión en 3D con filamento PLA de las piezas de este. En la figura 3 podemos evidenciar la impresión de los engranajes que transmiten el movimiento de los motores a las ruedas de oruga.

**Figura 3.** *Proceso de impresión 3D de los engranes de las ruedas*



*Nota.* Proceso de impresión 3D de engranajes de las ruedas en filamento PLA

Posteriormente, se realizó el ensamblaje de componentes mecánicos como podemos ver en la figura 4, donde se evidencia el ensamblaje de la pieza presente en la figura 3.

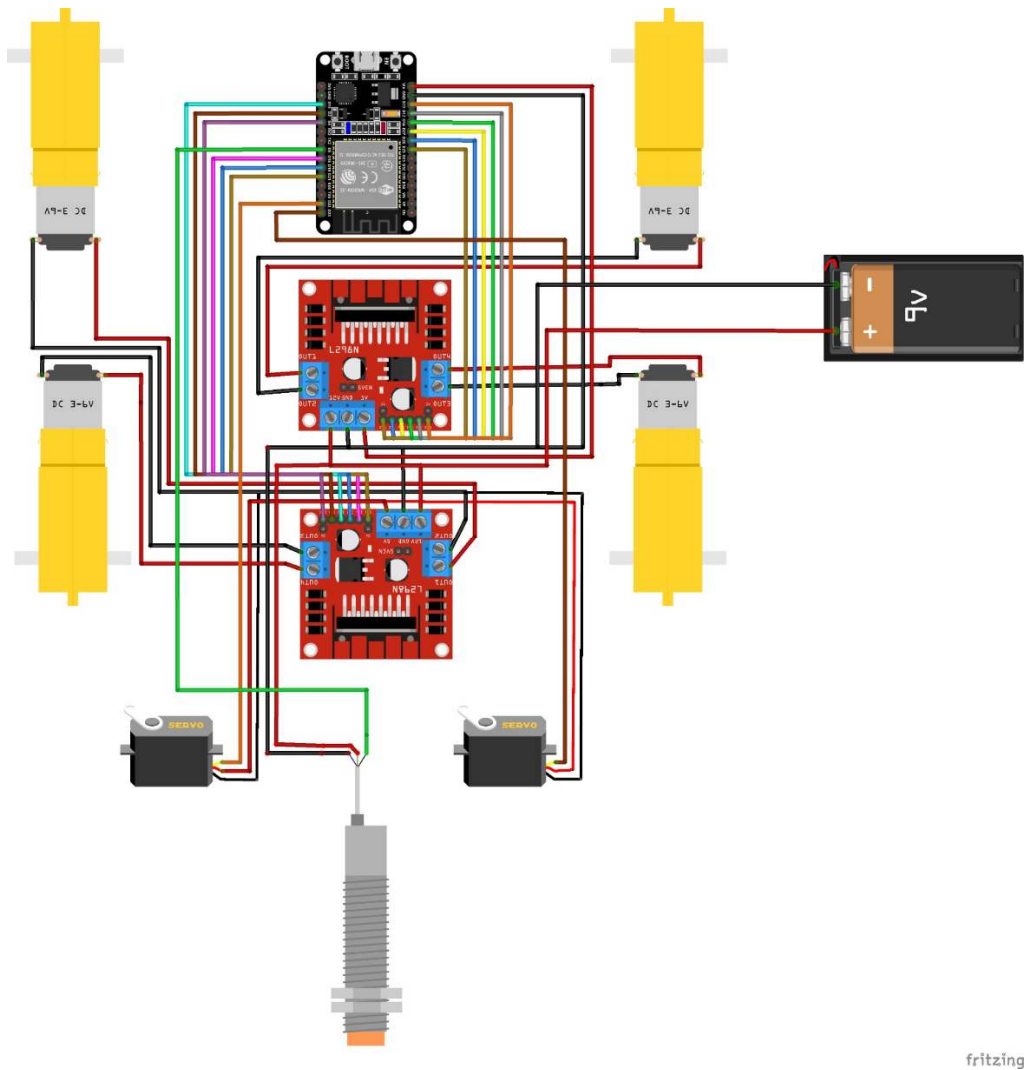
**Figura 4.** *Ensamblaje de componentes mecánicos*



*Nota.* Muestra de las piezas que componen las ruedas oruga impresas en 3D con filamento PLA

Al tener el vehículo ensamblado se continuó con la parte electrónica, donde al igual que con la parte mecánica, se realizó una simulación para establecer la compatibilidad de los componentes, el voltaje necesario para la alimentación y las respectivas conexiones. Esta fue realizada en el software Fritzing y se puede observar en la figura 5.

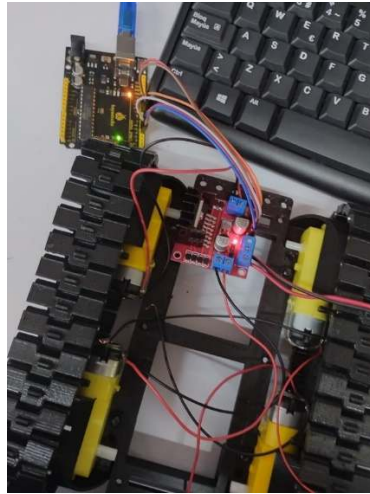
**Figura 5.** Esquema electrónico del sistema robótico



*Nota.* Circuito electrónico modelado en el software Fritzing compuesto por 4 motorreductores de 3 - 9V, 2 módulos controladores de motor L298n Puente H, ESP32, 2 servomotores, sensor inductivo y batería.

Contando con la simulación se inició la realización de las conexiones electrónicas como se evidencia en la figura 6 y en la figura 7. Simultáneamente a las conexiones se realizaron pruebas tales como las pruebas de motores.

**Figura 6.** *Conexión y pruebas de los motores*



*Nota.* Muestra de la conexión de los 4 motorreductores y los 2 módulos L298n, componentes necesarios para realizar pruebas de movilidad iniciales.

**Figura 7.** *Conexión de componentes a la tarjeta de desarrollo ESP32*



*Nota.* Muestra de la conexión del sensor inductivo, los servomotores y la tarjeta de desarrollo ESP32

Cuando se finalizaron conexiones y se hicieron pruebas de movilidad, inicialmente con bucles enviados a la ESP32 desde el software Arduino, que dieron certeza del funcionamiento, se llevó

a cabo el desarrollo de la interfaz de la aplicación en el software MIT App Inventor. La interfaz se muestra en la figura 8.

**Figura 8.** *Aplicación diseñada y programada para controlar el prototipo*



*Nota.* Interfaz de la aplicación desarrollada en MIT App Inventor que cuenta con 3 controles: movilidad del vehículo en cuatro direcciones (adelante, atrás, izquierda, derecha) y movilidad del sensor inductivo por medio del servomotor superior e inferior.

Teniendo estos componentes básicos se inició la programación final en el software Arduino, donde se realizó la conexión con la aplicación para que los comandos recibidos por la misma fueran enviados por Wifi, por medio de una IP y ejecutados por ESP32, como el movimiento del vehículo y de los servomotores. También se ejecutó que la detección del sensor enviará datos a la ESP32 y por Wifi estos fueran enviados a la aplicación para ser visualizados en la pantalla. Para visualizar la programación dirigirse a la sección [anexos](#).

**Figura 9.** *Resultado final*



*Nota.* Muestra del resultado final del prototipo del sistema robótico de detección de minas antipersonal.

## Impacto ambiental

**Tabla 5.** *Impacto ambiental del robot*

<b>Actividad/Producto/Servicio</b>	<b>Aspectos</b>	<b>Impactos</b>	<b>Estrategias de prevención</b>
Explosión de mina por error o accidente del sistema robótico	Expulsión de gases, líquidos y sólidos	Contaminación del aire, suelo, agua y auditiva	Mejorar iterativamente el sistema de detección
Fabricación del robot	Consumo de recursos naturales y emisión de gases contaminantes	Contaminación del aire, auditiva y reducción de recursos naturales	Buscar empresas con tecnologías y técnicas de producción
Finalización de vida útil del dispositivo o componentes del mismo	Gestión de residuos	Contaminación del suelo, aire y agua	Idear estrategias para el manejo de residuos y disminución de huella de carbono
Operación del robot	Consumo energético y objetos o mecanismos consumibles	Reducción de recursos naturales	Diseñar estrategias para minimizar el consumo de energía
Transporte del robot	Consumo energético	Reducción de recursos naturales y contaminación del aire	Evitar el uso de vehículos altamente contaminantes y en su lugar optar

			por vehículos eléctricos
--	--	--	--------------------------

*Nota.* Impacto ambiental generado por la construcción y operación del robot.

## **Impacto social**

### **Impactos positivos**

- Reducción de riesgos: El robot puede contribuir significativamente a la seguridad al identificar y neutralizar minas antipersonal, reduciendo los riesgos de falsos positivos.
- Bienestar comunitario y recuperación de territorio: La eliminación de minas antipersonal puede mejorar la salud y bienestar de muchas comunidades, también permitiendo acceder a los territorios en los que se instalaron explosivos.
- Desarrollo socioeconómico: Al habilitar territorios se podrá acceder a los recursos naturales que se encuentran en dichos territorios, fomentando el desarrollo económico local.

### **Desafíos y consideraciones**

- Adaptación y aceptación: La aceptación de nuevas tecnologías en comunidades tradicionales puede requerir esfuerzos significativos de adaptación y construcción de confianza.
- Normativas y ética: Es importante establecer normativas éticas y legales para garantizar la seguridad y protección de los derechos humanos.

## Análisis de costos

El análisis de costos presentado a continuación incluye los costos asociados a la construcción del prototipo desarrollado durante el presente proyecto, sin embargo, con el fin de conocer la viabilidad del proyecto posterior a este se encuentra el análisis asociado al sistema robótico descrito en la investigación.

**Tabla 6.** *Costos directos asociados al diseño y construcción del prototipo*

<b>Costos directos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total</b>
Materias primas	Filamento PLA negro	\$80.000	1kg	\$80.000
	Motorreductores 3-9v	\$8.800	4	\$35.200
	Modulo L298n Control De Motor Puente H	\$12.500	2	\$25.000
	Tarjeta de desarrollo ESP32 Wifi bluetooth	\$28.000	1	\$28.000
	Sensor inductivo de proximidad LJ12A3-4-Z/BX NPN	\$16.000	1	\$16.000
	Servomotor MG995	\$36.000	2	\$72.000
	Radios Bicicleta	\$695	5	\$3.475
	Tornillos	\$800	40	\$32.000
	Cables Jumpers	\$490	34	\$16.660
	Imuto Cargador portátil MacBook Pro/Air, cargador de batería de 100 W con cargador USB-C de 90 W, cargador portátil de 99 wh (26800 mAh)	\$808.087	1	\$808.037
	2 unidades USB-C PD QC DC5V 9V 12V 15V 20V	\$72.694	1	\$72.694

	Módulo de disparo de potencia de voltaje ajustable 5A Tipo-C Entrada macho			
	Teléfono celular	\$700.000	<b>1</b>	<b>\$700.000</b>
Equipos	Alquiler de impresora 3D Anycubic			
	Computadores			

*Nota.* Costos directos del diseño y la construcción del prototipo, en el apartado de equipos no se encuentra ningún precio debido a que estos servicios fueron otorgados por los laboratorios de la universidad.

**Tabla 7.** *Costos asociados a la producción de un sistema robótico de detección de minas antipersonal*

	<b>Tipo de costo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total</b>
<b>Costos directos</b>	Mano de obra	2 ingenieros mecatrónicos	\$5.076.000	<b>3 meses</b>	<b>\$7.614.159</b>
	Materias primas	Aluminio 7075 3x200x200mm	\$251.897	<b>3</b>	<b>\$755.691</b>
		Motor eléctrico de imán permanente 24 V DC 350W	\$161.250	<b>4</b>	<b>\$645.000</b>
		Controlador De Cepillo De Motor Yk31c 24v 350w Par	\$95.077	<b>1</b>	<b>\$95.077</b>

		Microcontrolador STM32U5A9NJH6Q	\$70.500	1	<b>\$70.500</b>
		Detector de metales Anfibio Multi	\$4.771.240	1	<b>\$4.771.240</b>
		Servo De Dirección Impermeable Ip67 60 Kg	\$137.137	2	<b>\$274.274</b>
		Ruedas de oruga 66/53/42cm	\$92.900	1	<b>\$92.900</b>
		Kit de tornillos, tuercas, pernos	\$40.238	1	<b>\$40.238</b>
		Cable calibre 10 x5mts	\$35.525	1	<b>\$35.525</b>
		Batería 12V / 7.2Ah	\$80.750	2	<b>\$161.500</b>
		Amortiguadores hidráulicos	\$ 189.358	2	<b>\$ 378.716</b>
		Radio control de dron DJI RC	\$1.272.500	1	<b>\$1.272.500</b>
		Cargador de batería	\$ 363.375	1	<b>\$ 363.375</b>
	Equipos	Computadores	\$3.500.000	1	<b>\$3.500.000</b>
<b>Costos indirectos</b>	Licencia SolidWorks	Programa para modelamiento y simulación	\$4.614.206	1	<b>\$4.614.206</b>
	Licencia Proteus	Programa para diseño de circuitos electrónicos	\$ 403.750	1	<b>\$ 403.750</b>
<b>Costos fijos</b>	Alquiler de taller electrónico y metalúrgico	Espacio con el espacio y equipo apropiado para construir el robot	\$1.500.000	3	<b>\$4.500.000</b>

*Nota.* Costos de producción del sistema robótico real.

### Análisis de viabilidad

La realización del análisis de costos permitió establecer un valor de inversión y un costo de producción inicial, partiendo de esto se obtuvo como resultado la tabla 8.

**Tabla 8.** *Análisis de viabilidad*

<b>Inversión</b>	\$ 29.561.624,00
------------------	------------------

<b>Costo venta año 0</b>	\$35.000.000,00
<b>año 1</b>	\$38.500.000,00
<b>año 2</b>	\$42.350.000,00
<b>año 3</b>	\$46.585.000,00
<b>año 4</b>	\$51.243.500,00
<b>año 5</b>	\$56.367.850,00
<b>año 6</b>	\$62.004.635,00

<b>Costo producción año 0</b>	\$ 25.000.000,00
<b>Costo producción año 1</b>	\$ 27.500.000,00
<b>Costo producción año 2</b>	\$ 30.250.000,00
<b>Costo producción año 3</b>	\$ 33.275.000,00
<b>Costo producción año 4</b>	\$ 36.602.500,00
<b>Costo producción año 5</b>	\$ 40.262.750,00
<b>Costo producción año 6</b>	\$ 44.289.025,00

<b>Año</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Egresos</b>	<b>Flujo de efectivo</b>
<b>0</b>	\$ -	\$ 29.561.624,00	\$ -29.561.624,00
<b>1</b>	\$ 192.500.000,00	\$ 137.500.000,00	\$ 55.000.000,00
<b>2</b>	\$ 338.800.000,00	\$ 242.000.000,00	\$ 96.800.000,00
<b>3</b>	\$ 465.850.000,00	\$ 332.750.000,00	\$ 133.100.000,00
<b>4</b>	\$ 614.922.000,00	\$ 439.230.000,00	\$ 175.692.000,00
<b>5</b>	\$ 789.149.900,00	\$ 563.678.500,00	\$ 225.471.400,00

<b>Suma de ingresos</b>	\$ 2.204.161.622,75
<b>Suma de egresos</b>	\$ 1.566.178.511,94
<b>Costo inversión</b>	\$ 1.595.740.135,94
<b>B/C</b>	1,381278551

*Nota.* El análisis de viabilidad se realizó con el fin de entender si el proyecto como negocio sería viable. En este se establecieron valores como el costo de producción por año que inicia en \$25.000.000 y mantiene un crecimiento del 10% anual, caso que se repite en el costo de venta que se estableció en \$35.000.000. Teniendo estos valores se realizó una estimación de los ingresos, egresos y flujo de caja durante 6 años, la cual permitió hallar el costo beneficio

del que se concluyó que el proyecto como negocio es viable debido a que el resultado de este es mayor que 1.

## Conclusiones

- El prototipo logró ser un sistema robótico versátil capaz de operar en diversos entornos, detectar metales ferrosos a corta distancia y a pesar de tener varias limitaciones permitió avanzar en la investigación de que componentes y características se integraran en el sistema robótico.
- Las ruedas oruga brindan la posibilidad de operar en diversos entornos con limitaciones debido a la potencia de los motores, por lo que en la construcción del sistema robótico se implementaran motores con mayor torque para lograr movilidad en pendientes.
- El prototipo permitió la realización de diversas pruebas de detección de metales, debido a que el sensor utilizado en el prototipo es un sensor inductivo permite la identificación de metales ferrosos a corta distancia, sin embargo, en el robot real se utilizará un detector de metales con un rango mayor de detección, así logrando identificar metales no ferrosos.
- La aplicación desarrollada para controlar el robot funciona, aunque hay algunos problemas para recibir los datos emitidos por el sensor, esto puede ser causado por el protocolo usado para la transferencia de información entre el microcontrolador y la aplicación.

## Referencias

- Anónimo. (2018). Una breve historia sobre las minas antipersonas. *El Comercio*.  
[https://elcomercio.pe/tecnologia/breve-historia-minas-antipersonas-noticia-572365-noticia/?ref=ecr#google\\_vignette](https://elcomercio.pe/tecnologia/breve-historia-minas-antipersonas-noticia-572365-noticia/?ref=ecr#google_vignette)
- ASTM International. (2008). ASTM F1233-08: Standard Test Method for Security Glazing Materials and Systems. Recuperado de: <https://www.astm.org/f1233-08.html>
- Blindajes Nacionales. (s.f). Tipos y características de blindajes. Recuperado de:  
<http://www.blindajesnacionales.com/educacion-blindaje/educacion-blindaje-arquitectonico/tipos-y-caracteristicas-de-blindajes/>
- Botero Gómez, S. (2013). *Obot Hexápodo para detección de minas antipersona artesanales tipo jeringa*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Buenaventura, Medellín, Antioquia.  
Recuperado de: <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/3086e2d0-9f70-40bf-994a-b13730e9b304/content>
- Campaña Internacional para la Prohibición de las Minas Antipersona. (s.f). Una historia de minas terrestres. Recuperado de: <http://www.icbl.org/en-gb/problem/a-history-of-landmines.aspx>
- Centro Nacional de Memoria Histórica. (2017). La guerra escondida Minas antipersonal y remanentes explosivos en Colombia. Recuperado de:  
<https://centrodememoriahistorica.gov.co/la-guerra-escondida-minas-antipersonal-y-remanentes-explosivos-en-colombia/>
- Collazos Roza, J. (2017). *Caracterización y funcionamiento de armas trampa tipo mina terrestre presentes en el territorio colombiano*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda. Recuperado de:  
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/f554a84e-3a2c-4582-b4ff-b8f210e78b04/content>
- Comité Internacional de la Cruz Roja. (1997). Las minas antipersonales. Recuperado de:  
<https://www.icrc.org/es/doc/resources/documents/misc/5tdm6d.htm>

Comité Internacional de la Cruz Roja. (2007). Reseña sobre la Convención sobre la prohibición de las minas antipersonal, conocida también como la Convención de Ottawa. Recuperado de: <https://www.icrc.org/es/doc/resources/documents/legal-fact-sheet/landmines-factsheet-150807.htm>

Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal. (s.f). Desminado Humanitario en Colombia. Recuperado de: <https://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/desminado/desminadohumanitario>

Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal. (2017). Estándares Nacionales de Desminado Humanitario. Recuperado de: [https://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/Documents/Estandares\\_Nacionales/2017\\_1128-EN-Oper\\_Tecnica\\_Mecanica.pdf](https://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/Documents/Estandares_Nacionales/2017_1128-EN-Oper_Tecnica_Mecanica.pdf)

Espinosa Carreño, P. (2006). *Detector de minas antipersonales*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Santander. Recuperado de: [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1522/2006\\_Tesis\\_Espinosa\\_Carre%C3%B1o\\_Paula\\_Andrea.pdf?sequence=1](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1522/2006_Tesis_Espinosa_Carre%C3%B1o_Paula_Andrea.pdf?sequence=1)

Friedrich, K. (2023). The science behind how metal detectors work. Popular Mechanics. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.popularmechanics.com/technology/a44107528/how-do-metal-detectors-work/>

GGT Comercializadora. (s.f). Acero Balístico. Recuperado de: <https://ggt.com.co/acero-balistico/>

International Organization for Standardization. (2007). Glass in building – Bullet-resistant security glazing – Test and classification (ISO 16935:2007). Recuperado de: <https://www.iso.org/standard/38168.html>

Peña González, C. (2020). *Diseño y construcción de un robot móvil para un equipo detector de metales capaz de realizar búsqueda de minas antipersonal*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Santander. Recuperado de: [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/13711/2020\\_Tesis\\_Carlos\\_Mauricio\\_Pe%c3%bla.pdf?sequence=1](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/13711/2020_Tesis_Carlos_Mauricio_Pe%c3%bla.pdf?sequence=1)

Ph Technology. (s.f). Plásticos reforzados con fibra de carbono. Recuperado de: <https://ph-technology.net/plasticos-reforzados-con-fibra-de-carbono/#:~:text=El%20pol%C3%ADmero%20reforzado%20con%20carbono%20%28C FRP%2C%20CRP%20o,manual%2C%20inyecci%C3%B3n%20de%20fibras%20o%20inyecci%C3%B3n%20de%20resina.>

Sandoval, M. (2022). *El impacto de las minas antipersonal en Colombia durante 2021*. Boletín de Noticias. [https://www.unmas.org/sites/default/files/unmas\\_boletin\\_febrero\\_2022.pdf](https://www.unmas.org/sites/default/files/unmas_boletin_febrero_2022.pdf)

SILATEC. (s.f). Cristal Antibalas. Recuperado de: <https://www.silatecglass.com/es/cristal-antibalas/#vidrio-antibalas-para-todas-las-necesidades>

Velandia Navarro, F. (2019). La Problemática de las Minas Antipersonal en Colombia: Hacia el Cumplimiento Efectivo del Estado Colombiano con el Artículo V de la Convención de Ottawa. [Tesis de Maestría, Instituto de altos estudios para el desarrollo – IAED].

Recuperado de:

[https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/FOTOS2020/2019\\_f\\_velandia\\_tesis\\_maestria\\_iaed\\_0.pdf](https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/FOTOS2020/2019_f_velandia_tesis_maestria_iaed_0.pdf)

Woodford, C. (2023). Metal detectors. Explain that stuff. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.explainthatstuff.com/metaldetectors.html>

Superintendencia de vigilancia y seguridad privada. (2022). Resolución No. 20224440029777. Por medio de la cual se adoptan las Normas Técnicas Colombianas de los diferentes tipos de Blindaje. Recuperado de: <https://www.supervigilancia.gov.co/publicaciones/9614/resolucion-no20224440029777-por-medio-de-la-cual-se-adoptan-las-normas-tecnicas-colombianas-de-los-diferentes-tipos-de-blindaje/#:~:text=La%20Supervigilancia%20expide%20la%20Resoluci%C3%B3n%20No.20224440029777%20%22Por%20medio,Buenas%20Pr%C3%A1cticas%20para%20la%20Actividad%20Blindadora%20en%20Veh%C3%ADculos%22>

ICONTEC. (1998). Código eléctrico colombiano (Norma Técnica Colombiana [NTC] 2050). Recuperado de: <https://osaic.com.co/wp-content/uploads/NTC-2050.pdf>

## Anexos

### Anexo A. Repositorio del proyecto en GitHub

Enlace del repositorio en donde se encuentran los archivos STL, el código utilizado y la aplicación <https://github.com/jhon954/Metal-Detector-Arduino>

### Anexo B. Cronograma del proyecto

ACTIVIDAD											
	Sep		Oct				Nov				
	18 - 22	25 - 29	2 - 6	9 - 13	16 - 20	23 - 27	30 - 03	06 - 10	13 - 17	20 - 24	27-30
Diseño Estructural y Mecánico del Robot.	X										
Impresión de estructura en 3D	X	X									
Compra de insumos			X								
Implementación del circuito electrónico			X	X							
Desarrollo de Software para el Control y la Navegación del Robot.				X	X	X	X				
Pruebas de componentes y circuitos.								X	X		
Pruebas de movilidad y navegación del robot.									X	X	

