

Universidad de Los Andes

Informe de Diseño para el Rediseño del Sistema Mecánico del GPR Portátil

Juan Pablo Reyes Fajardo

Índice

1. Introducción	2
1.1. Contexto del Proyecto	2
1.1.1. Diseño Actual	2
1.1.2. Uso previo	3
1.1.3. Problemáticas y limitaciones	3
1.2. Objetivos del Rediseño	3
1.3. Alcance del Trabajo	4
2. Revisión de literatura	4
3. Metodología	4
3.1. Requerimientos de diseño	4
3.2. Conceptualización	4
3.3. Selección del sistema de movimiento	5
3.4. Selección de motores	6
3.5. Selección de correas	7
3.6. Selección de materiales para la estructura	8
3.7. Selección de guías de movimiento	9
3.8. Selección del actuador del eje Z	10
3.9. Selección de Drivers	11
3.10. Firmware de control	11
4. Diseño Propuesto	11
5. Conclusiones y Recomendaciones	12
6. Referencias	12

1. Introducción

Este proyecto aborda el rediseño del GPR portátil para el Proyecto Desminado Humanitario de la Universidad de Los Andes. Dada la necesidad crítica de mejorar la detección de minas terrestres en Colombia, el rediseño se centra en superar las limitaciones de robustez, rigidez, precisión, velocidad y adaptabilidad a terrenos variados del sistema existente. El objetivo principal es desarrollar un sistema de movimiento XYZ que mejore significativamente el rendimiento en condiciones de campo, haciendo el dispositivo más rápido, adaptable, transportable y preciso.

1.1. Contexto del Proyecto

El proyecto de desminado humanitario de la Universidad de Los Andes se centra en abordar la problemática del minado antipersonal en Colombia mediante el desarrollo de tecnologías que posibilitan la detección de objetos enterrados en el subsuelo. En particular, se enfoca en la aplicación de barridos por radar penetrante en tierra (GPR) con el fin de identificar minas terrestres. Este proyecto está siendo liderado por el profesor de ingeniería eléctrica y electrónica, Roberto Bustamante Miller, y cuenta con la participación de varios estudiantes de doctorado, maestría y pregrado en ingeniería electrónica.

Actualmente, el grupo trabaja en dos dispositivos:

- GPR fijo: Dispositivo fijo en el laboratorio ubicado sobre una caja de tierra usado para investigación en entornos controlados.
- GPR portable: Dispositivo transportable para el despliegue en exteriores.

Ambos dispositivos, consisten en un par de antenas emisor-receptor que se movilizan sobre un plano de trabajo usando mecanismos de movimiento cartesianos. El GPR realiza mediciones de la interacción de la onda electromagnética emitida con el suelo, haciendo un barrido de puntos a través del espacio de trabajo y también rotando las antenas sobre el eje vertical. El presente proyecto de rediseño se concentrará en el sistema mecánico del GPR portable.

1.1.1. Diseño Actual

El GPR portable ha experimentado avances significativos en cuanto a sus sistemas de control y ha incorporado una primera versión de su sistema mecánico. Este sistema mecánico se trata de un sistema de posicionamiento XY que permite desplazar un efector en dos direcciones perpendiculares sobre un plano horizontal. La estructura está construida utilizando tubos de PVC, barras lisas para el movimiento lineal y acoplamientos fabricados mediante impresión 3D. La movilidad se logra mediante dos motores de paso conectados a tornillos de potencia, los cuales desplazan el efector en direcciones perpendiculares. El efector se desliza a lo largo de las barras lisas gracias a rodamientos lineales. En el efector final, dos motores de paso rotan las antenas para realizar las mediciones en diferentes orientaciones. El efector actual no permite desplazamiento en el eje Z, por lo cual su altura no es regulable. El mecanismo actual se puede ver en seguida:



Figura 1: GPR portable actual. Extraído de: [1]

1.1.2. Uso previo

El mecanismo actual ha conseguido desplazar las antenas dentro del espacio de trabajo; sin embargo, debido a las limitaciones y problemas inherentes al sistema mecánico, no se han podido llevar a cabo mediciones de manera adecuada. Esta situación ha obstaculizado la integración del dispositivo en el proyecto de investigación.

1.1.3. Problemáticas y limitaciones

A continuación se identifican las problemáticas actuales del mecanismo:

- Robustez: La falta de robustez en el mecanismo provoca que, debido a la inercia del movimiento, se produzcan movimientos no deseados en el sistema, lo que a su vez afecta su precisión en relación con el área de trabajo.
- Rigidez: La utilización de materiales como el PVC y acoples impresos en 3D reduce significativamente la rigidez del mecanismo, lo que puede influir negativamente en la perpendicularidad y rectitud del sistema de movimiento, dificultando el desplazamiento de los actuadores y perjudicando la precisión en la posición del efector.
- Repetibilidad y precisión: Los problemas mencionados anteriormente causan que el sistema carezca de repetibilidad y precisión, las cuales son fundamentales para las mediciones que se quieren realizar.
- Velocidad: El uso de tornillos de potencia limita significativamente la velocidad a la cual se mueve el efector.
- Regulabilidad: La estructura actualmente cuenta con soportes de longitud fija, los cuales impiden una adaptabilidad del dispositivo a terrenos no uniformes.
- Eje Z: El mecanismo actual no permite mover las antenas en el eje Z.

1.2. Objetivos del Rediseño

El objetivo general es revitalizar el GPR portátil a través de un sistema de movimiento XYZ que permita un desempeño superior en exteriores. Los objetivos específicos son:

- Aumentar la confiabilidad del sistema bajo uso continuo.
- Mejorar la velocidad de operación del sistema en comparación con el diseño anterior.

- Adaptar la estructura para que sea resistente y adaptable a terrenos variados, manteniendo la precisión.
- Incrementar la portabilidad para facilitar el transporte y el ensamblaje rápido en terreno.
- Documentar exhaustivamente los desarrollos para facilitar su uso y mejoras futuras.

1.3. Alcance del Trabajo

El trabajo se enfoca en la mejora integral del GPR portátil. Las necesidades clave identificadas incluyen:

- Implementar un movimiento en el eje Z.
- Asegurar la compatibilidad del efector final entre el GPR fijo y portátil.
- Mantener la precisión y repetibilidad en la posición de las antenas.
- Minimizar los componentes metálicos para evitar interferencias con las señales de las antenas.
- Asegurar la robustez estructural frente a movimientos dinámicos.
- Mejorar la transportabilidad y la adaptabilidad a terrenos no uniformes.

2. Revisión de literatura

Aunque es poco común hallar soluciones comerciales diseñadas específicamente para ciertos mecanismos debido a su aplicación en contextos particulares, las máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC) representan una alternativa notable. Estas se distinguen por su robustez, rigidez y alta precisión, según se menciona en [2]. Operando mediante programas informáticos y utilizando el lenguaje G-Code, las máquinas CNC están especialmente concebidas para la manufactura sustractiva. Ofrecen un posicionamiento extremadamente preciso, incluso en áreas de trabajo extensas y con herramientas de gran inercia. Esta fusión de características técnicas las convierte en opciones ideales para diversas industrias, adaptándose con eficiencia a distintos materiales y a aplicaciones que exigen cortes y modelados de gran exactitud.

3. Metodología

3.1. Requerimientos de diseño

Tabla 1: Requerimientos de diseño

Requerimientos		Objetivo	Unidad
Rendimiento	Rango de movimiento del eje Z	~150	mm
	Repetibilidad	0.1	mm
	Precisión	~1	mm
	Deflexión máxima	1	mm
	Carga de trabajo (Peso antenas)	2.86	kg
Restricciones Dimensionales	Peso	30	kg
	Tamaño	<110*110*1	m
Presupuesto	Costo	<4,000,000	COP

3.2. Conceptualización

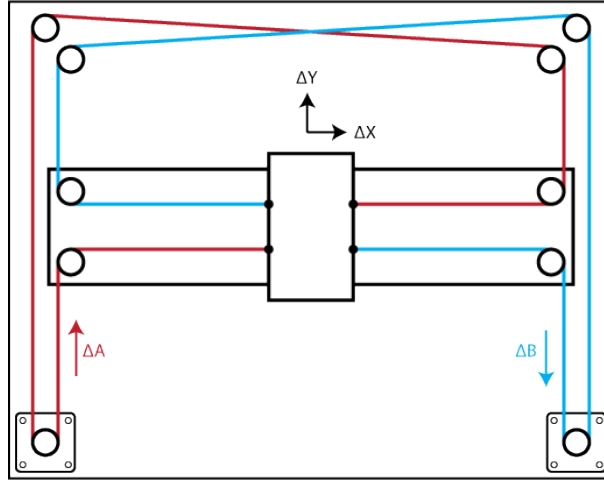
A continuación se presentan algunos sistemas de posicionamiento XYZ con sus ventajas y desventajas.

Tabla 2: Ventajas y Desventajas de Mecanismos de posicionamiento XYZ [3]

Sistema	Ventajas	Desventajas
Cartesian	<ul style="list-style-type: none"> ■ Simplicidad mecánica. ■ Fáciles de entender y reparar. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estructura grande y pesada. ■ Lentas.
CoreXY / H-BOT	<ul style="list-style-type: none"> ■ Área de trabajo grande. ■ Estables. ■ Pocas vibraciones. ■ Baja inercia en el cabezal de la herramienta 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Costosas. ■ Complejas mecánicamente
Delta	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rápidas. ■ Alta calidad de impresión. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difíciles de reparar y actualizar. ■ Menos compatibles con extrusión directa. ■ Área de construcción relativamente pequeña.
SCARA	<ul style="list-style-type: none"> ■ Uso en robots industriales. ■ Relativamente rápidas. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Relativamente imprecisas. ■ Requieren motores de alta precisión ■ Alta inercia de movimiento.
Polar	<ul style="list-style-type: none"> ■ Económicas. ■ Uso de el mínimo de actuadores necesarios. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lentitud. ■ Alta inercia de movimiento. ■ Dimensiones grandes relativas al espacio de trabajo.

3.3. Selección del sistema de movimiento

Teniendo en cuenta las restricciones de tamaño y peso, se ha seleccionado un mecanismo de tipo CoreXY para maximizar la eficiencia en el uso del espacio y aumentar la capacidad de carga del dispositivo. Es importante señalar que en la industria existen mecanismos CNC portátiles tipo cantilever. Sin embargo, a pesar de su facilidad de transporte, no son adecuados para este proyecto. La razón principal es que las piezas utilizadas en estos mecanismos son altamente especializadas, lo que incrementaría significativamente los costos, así como las dificultades en mantenimiento y en la capacidad de realizar mejoras al mecanismo que estamos desarrollando.



Equations of Motion:

$$\Delta X = \frac{1}{2} (\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2} (\Delta A - \Delta B)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Figura 2: Sistema de movimiento CoreXY. Extraído de [4]

3.4. Selección de motores

Considerando el objetivo de disminuir los costos del nuevo mecanismo, se decidió reutilizar componentes del modelo anterior, entre ellos los motores de paso NEMA 23 de alto torque. Estos motores, utilizados previamente para el posicionamiento en el mecanismo anterior, destacan por su alta precisión, con 200 pasos por revolución, y un torque máximo de 1.9 Nm [5]. Esta estrategia no solo optimiza los recursos sino que también aprovecha la eficiencia y fiabilidad de los motores existentes.

Tabla 3: Especificaciones operacionales NEMA23

Especificaciones operacionales NEMA23				
Voltaje (V)	Corriente (A)	Torque de parada (Nm)	Ángulo de paso (°)	Pasos por revolución
3.2	2.8	1.9	1.8	200



Figura 3: Motor Nema23. Extraído de [5]

Estos motores se usan comúnmente con poleas de 20 dientes para correas GT2 (correas de 2mm de paso). Con esto se tiene que:

$$\phi_{paso} = (paso * dientes_{polea})/\pi = (2mm * 20)/\pi = 12,73mm$$

Lo anterior confirma que los motores NEMA 23 son perfectamente adecuados para la aplicación, ya que ofrecen una precisión que cumple con los requisitos establecidos.

Tomando en cuenta el diámetro del paso del motor, es posible calcular la precisión alcanzable en una configuración de paso completo. Es relevante mencionar que ciertos controladores permiten operar los motores en micropasos, lo cual incrementa la precisión pero reduce el torque disponible. En el caso del paso completo, es decir, cuando el motor realiza 200 pasos por revolución, podemos determinar la precisión exacta del sistema:

$$precision_{motor} = r_{paso} \theta_{motor} = \frac{12,73mm}{2} 1,8 \frac{\pi}{180} = 0,2mm$$

Para un sistema de movimiento CoreXY las ecuaciones de movimiento son:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B)$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B)$$

Con estas ecuaciones se puede hallar la precisión del mecanismo en el plano XY:

$$E_X = \sqrt{\left[\frac{\partial \Delta X}{\partial \Delta A} \Delta precision_{motor} \right]^2 + \left[\frac{\partial \Delta X}{\partial \Delta B} \Delta precision_{motor} \right]^2} = 0,1414mm$$

$$E_Y = \sqrt{\left[\frac{\partial \Delta Y}{\partial \Delta A} \Delta precision_{motor} \right]^2 + \left[\frac{\partial \Delta Y}{\partial \Delta B} \Delta precision_{motor} \right]^2} = 0,1414mm$$

3.5. Selección de correas

La velocidad máxima recomendada para motores es de 1000rpm [6]. Asumiendo el peor caso, en el que la potencia del motor está dada por la velocidad máxima de operación y el torque de parada la potencia sería:

$$P = \tau \omega = 1,9Nm * 1000rpm * \frac{2\pi rad}{60s} = 198,97 \frac{Nm}{s} = 0,26HP$$

Con esta información se puede referir al manual de transmisión de correas:

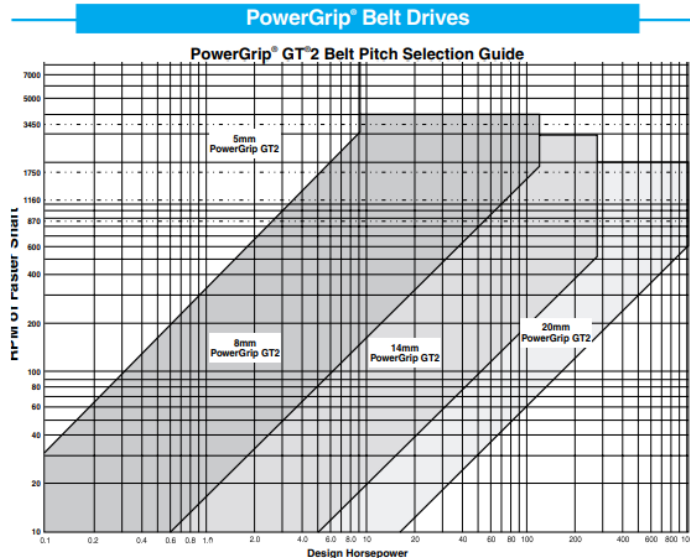


Figura 4: Manual para la selección de correas GT-2

Con esta información es posible determinar que las correas ideales para las condiciones de operación son las Gates GT2 de 5mm de ancho. Considerando la adaptabilidad a motores de potencias más altas y la posible variabilidad de condiciones de operación se opta por las correas de 10mm de espesor.

3.6. Selección de materiales para la estructura

Considerando la necesidades de precisión y rigidez del mecanismo agregado a la disponibilidad comercial de partes localmente, se opta por un diseño con extrusiones de aluminio tipo V-Slot. Estas extrusiones son populares en el desarrollo de mecanismos CNC y de impresión 3D dada su alta precisión de manufactura y configurabilidad.



Figura 5: Ejemplo de aplicación de extrusiones tipo V-Slot: Máquina CNC [7]

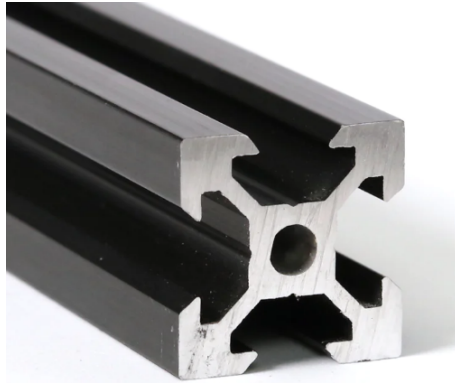


Figura 6: Perfil de extrusión tipo V-Slot [8]

3.7. Selección de guías de movimiento

Para la selección de sistemas de movimiento resultan dos opciones a la hora de diseñar un mecanismo con extrusiones tipo V-Slot. La primera es usar guías lineales con carros especializados para el movimiento a lo largo de estas guías y el segundo es aprovechar la geometría de las extrusiones y usar un carro con ruedas para moverse a lo largo de las extrusiones. Estas opciones se ven en seguida:



Figura 7: Guía de movimiento con ruedas y extrusión



Figura 8: Guía de movimiento con riel lineal

Teniendo en cuenta la mayor precisión, resistencia a cargas y resistencia al desgaste de los rieles lineales en comparación con el método de las ruedas en las extrusiones [9], se opta por usar guías lineales. Para su selección se halló las guías lineales disponibles comercialmente localmente y se seleccionaron aquellas que cumplieran con los requerimientos de carga. Es importante anotar que el caso crítico de operación de estos componentes se da al estar sometidos a momentos en cualquiera de sus ejes. La resistencia de este tipo de componentes a las cargas axiales es significativamente mayor a su resistencia a momentos. En el mecanismo en cuestión, el momento máximo se da en la herramienta (antenas, actuador lineal del eje z y componentes de conexión). Un estimativo se

realizó para calcular este momento. Considerando un peso aproximado en la herramienta de 5kg y un desplazamiento permisible máximo de 10cm, el momento máximo aproximado resultaría ser de 0.5Nm. La opción comercial que satisfizo los requerimientos fue el riel lineal HGH15:

Tabla 4: Especificaciones de carga para la guía lineal HGH15 [10]

Resistencia a cargas - Riel Lineal HGH15				
Carga Dinámica (kN)	Carga Estática (kN)	Momento R (kNm)	Momento P (kNm)	Momento Y (kNm)
14.7	23.47	0.12	0.1	0.1

Con esto se tiene que las guías presentadas cumplen con los requerimientos de carga del mecanismo con un alto factor de seguridad dada la incertidumbre a las cargas reales en el diseño final. Estos componentes se pueden ver en la siguiente figura:



Figura 9: Guía lineal y carro HGH15 y HGH15CA

3.8. Selección del actuador del eje Z

Para el diseño del actuador eje Z, se opta por un actuador lineal disponible comercialmente que garantice las condiciones operacionales del mecanismo. Esto permite simplificar el proceso de manufactura y ensamble con un producto que ya cumple especificaciones. Para este actuador se opta por un diseño de OpenBuilds:

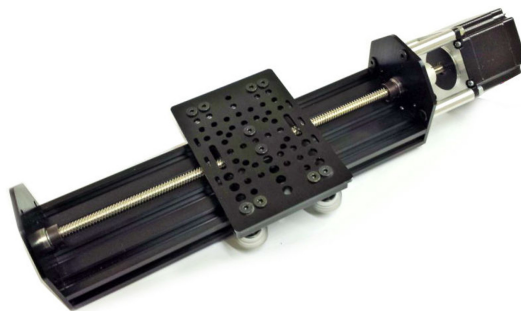


Figura 10: Actuador Lineal Nema23

Tabla 5: Actuador Lineal V-Slot Nema23 con Tornillo de potencia [11]

Especificaciones Actuador				
Transmisión	Precisión (mm)	Fuerza Máxima (N)	Distancia de actuación (mm)	Velocidad Máxima (mm/min)
Tornillo	0.091	1.9	150	8000

Este actuador propuesto cumple con las especificaciones de fuerza y precisión, considerando los requerimientos. Adicionalmente, su construcción de extrusiones de aluminio permite gran modularidad y configurabilidad.

3.9. Selección de Drivers

Considerando el uso de los motores NEMA23, cuya corriente está especificada en 3 y las opciones disponibles en el mercado, se decide utilizar un driver TB6600 ya que satisface los requerimientos de los motores. Las especificaciones del driver son las siguientes:

Tabla 6: Especificaciones Driver TB6600

Características Driver TB6600		
Alimentación (V)	Corriente de salida (A)	Corriente Pico (A)
9-40	0.5-3.5	4

3.10. Firmware de control

Para el control de los motores se opta por el firmware Marlin. Marlin es un firmware de código abierto ampliamente utilizado en muchas impresoras 3D y máquinas CNC. El usuario ha solicitado una explicación breve sobre cómo funciona Marlin y el G-code. Marlin es un firmware de código abierto que se utiliza en impresoras 3D y máquinas CNC. Este firmware actúa como el "cerebro" de la máquina, interpretando instrucciones de movimiento y control enviadas en forma de G-code. Marlin es responsable de controlar los motores paso a paso y otros actuadores de la máquina, ejecutando las instrucciones recibidas.

Por otro lado, el G-code es un lenguaje de programación utilizado en la manufactura asistida por computadora. Es el medio a través del cual se le indican a las impresoras 3D y máquinas CNC cómo realizar movimientos específicos, tales como dónde moverse, a qué velocidad, y cuándo realizar acciones como calentar o enfriar.

4. Diseño Propuesto

Con todo lo anterior el diseño propuesto es el siguiente:

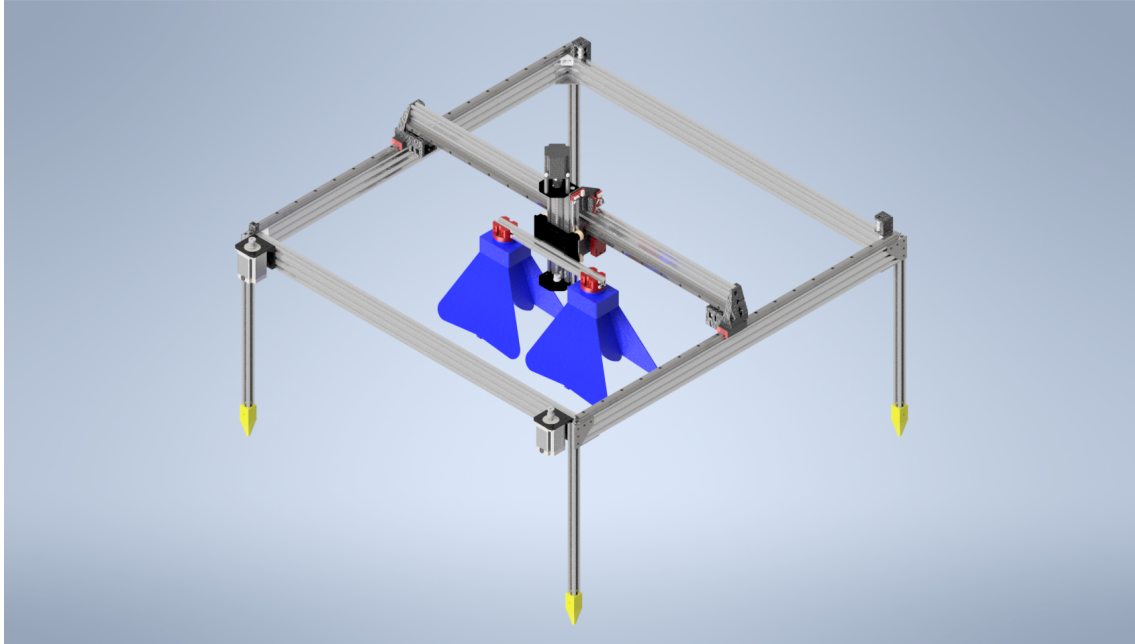


Figura 11: Diseño Final

5. Conclusiones y Recomendaciones

El rediseño del GPR portátil de la Universidad de Los Andes ha mejorado significativamente en robustez, precisión, velocidad y adaptabilidad a terrenos variados, gracias a la implementación exitosa del sistema de movimiento XYZ, el uso de componentes como los motores NEMA 23 y el mecanismo CoreXY. La integración del firmware Marlin y el uso del G-code han permitido un control preciso y eficaz del dispositivo, demostrando ser una solución efectiva en aplicaciones de control de movimiento. Aunque se han logrado avances considerables, se recomienda continuar con pruebas en diversas condiciones, explorar mejoras continuas y proporcionar una documentación detallada para facilitar el uso y mantenimiento futuro del dispositivo en el campo del desminado humanitario.

6. Referencias

Referencias

- [1] G. Uniandes, “GPR-Uniandes,” <https://github.com/gdh-uniandes/GPR-Uniandes>, Year of access, 2023.
- [2] E. Group, “Cnc machines: What they are and how they work,” 2023. [Online]. Available: <https://elemetgroup.com/cnc-machines-what-they-are-and-how-they-work/>
- [3] J. O’Connell, “Cartesian 3d printer vs delta vs scara vs belt vs corexy vs polar,” <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>, 2023, consultado el 29 de enero de 2024.
- [4] I. E. Moyer, “CoreXY — Cartesian Motion Platform - Theory,” <https://corexy.com/theory.html>, 2012.

- [5] Components101, “NEMA 23 Stepper Motor Datasheet, Specs & Applications,” <https://components101.com/motors/nema-23-stepper-motor-datasheet-specs>, 2019.
- [6] “¿Cuál es la velocidad máxima (frecuencia más alta) del motor paso a paso?” <https://www.omc-stepperonline.com/es/support/cual-es-la-velocidad-maxima-frecuencia-mas-alta-del-motor-paso-a-paso>.
- [7] V-Slot Poland, “Lead cnc 1000x1000 high z openbuilds,” <https://vslot-poland.com/lead-cnc-1000x1000>, 2024.
- [8] “2020 v-slot extrusion 20mm x 20mm x 2.5m,” 3D Printing Canada, 2024. [Online]. Available: <https://3dprintingcanada.com/products/2020-v-slot-extrusion-20mm-x-20mm-x-2-5m>
- [9] A. Desconocido, “V-slot wheels vs linear rails,” Kywoo3D Blog, 2024, accedido el 30 de enero de 2024. [Online]. Available: <https://www.kywoo3d.com/blogs/3d-printer-news/v-slot-wheels-vs-linear-rails>
- [10] “Hiwin hgh15cazac square block linear guides,” Motion Constrained Store, 2024. [Online]. Available: <https://motionconstrained.com/store/hiwin-linear-guides/hiwin-hg-series-linear-guides/hiwin-hgh15cazac-square-block-linear-guides/>
- [11] OpenBuilds Part Store, “V-slot® nema 23 linear actuator bundle (lead screw),” <https://openbuildspartstore.com/v-slot-nema-23-linear-actuator-bundle-lead-screw/>, 2024.