

## Guía para elaborar el informe final de investigaciones cofinanciadas por Digi 2021

### Información General

Elaborar el informe final, con tipo de letra Times New Roman 12 puntos, interlineado 1 ½. Utilice las Normas APA (*American Psychological Association*) 6ta. edición, para citas y referencias.

1. **Envío previo a entrega del informe final:** Enviar el informe final y reporte de coincidencias en electrónico al Coordinador del Programa Universitario de Investigación 8 días antes de la fecha de finalización de la investigación, según contrato o prórroga, firmado por la Unidad de Investigación Avaladora. Con el objetivo de revisar el contenido y forma e incluir las observaciones realizadas al informe a presentar.
2. **Entrega del informe final a los Coordinadores de Programas de Investigación de Digi:** debe entregarse informe corregido de forma impresa, carta de entrega y versión electrónica al coordinador del programa universitario de investigación. Estos deben entregarse en los últimos tres días hábiles previos a la fecha de finalización de la ejecución del proyecto de investigación.
3. **Documentos a entregar en físico (numeral 2):**
  - a) Nota de entrega (impresa y con firmas originales)
  - b) Informe final, según formato aprobado por Digi, impreso a color (en folder con gancho, sin engargolar y sin empastar)
  - c) Copia del manuscrito científico impreso según las instrucciones de autor de la revista indizada seleccionada.
  - d) Copia de las instrucciones de autor de la revista indizada seleccionada.
4. **Documentos a entregar en electrónico (numeral 2):**
  - a) Nota de entrega en formato PDF (con firmas).
  - b) Informe final en formato editable Word, **no se aceptarán documentos en PDF.**
  - c) Archivo Word del Manuscrito científico.
  - d) Fotografías en formato JPG: como mínimo 10 fotografías, las cuales serán utilizadas para la divulgación de la investigación realizada respetando los derechos de autor, estas deben cumplir con las características siguientes:
    - Resolución mínima de 300 dpi
    - Guardadas en carpeta electrónica separada al resto del informe
    - Cada fotografía debe ser guardada con nombre específico (**no se aceptarán solo las fotografías incrustadas al archivo Word**).

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Desarrollo de prototipos FabLab

nombre del proyecto de investigación

DES-12

código del proyecto de investigación

Laboratorio de Innovación(Fab Lab)

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

Jorge A. Balsells Orellana

Jaime Salvador Pineda Paz

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Guatemala, 15/Febrero/2022

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

## **Autoridades**

Dr. Hugo Pérez Noriega

Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Pérez

Coordinador General de Programas

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Pérez

Coordinador(a) del Programa de Investigación

## **Autores**

Jorge Augusto Balsells Orellana

Coordinador del proyecto de investigación

Jaime Salvador Pineda Paz

Auxiliar de Investigación II

Colaborador

José Pablo Valiente Montes

Estudiante de la Facultad de Ingeniería, Usac

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2021.

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través del código DES-12 en el Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

**Índice General.**

<b>Resumen</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Palabras Clave</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>8</b>
<b>Planteamiento Del Problema</b>	<b>10</b>
<b>Delimitación En Tiempo y Espacio</b>	<b>11</b>
<b>Delimitación temporal.</b>	<b>11</b>
<b>Delimitación espacial.</b>	<b>11</b>
<b>Marco Teórico</b>	<b>11</b>
<b>Robot Móvil</b>	<b>11</b>
<b>Sistema de 6 Llantas Simples sin Muelles</b>	<b>11</b>
<b>Sistema Rocker Bogie</b>	<b>12</b>
<b>Robótica</b>	<b>12</b>
<b>Sistema de Control PID Discreto</b>	<b>12</b>
<b>Reductores Armónicos</b>	<b>13</b>
<b>Arquitectura de Software</b>	<b>13</b>
<b>Arquitectura Cliente-Servidor</b>	<b>14</b>
<b>Visión por computadora</b>	<b>14</b>
<b>Cámara de Profundidad</b>	<b>15</b>
<b>Estado del arte</b>	<b>15</b>
<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>Materiales y Métodos</b>	<b>17</b>
<b>Software utilizado</b>	<b>18</b>
<b>Resultados</b>	<b>21</b>
<b>Robot Móvil</b>	<b>21</b>
<b>Chasis de Robot</b>	<b>21</b>
<b>Sistema Motriz</b>	<b>23</b>
<b>Sistema de 6 Llantas Simples sin Muelles</b>	<b>27</b>
<b>Sistema Rocker Bogie</b>	<b>28</b>
<b>Sistema de Energía</b>	<b>29</b>

<b>Electrónica</b>	<b>29</b>
<b>Brazo Robótico Para Monitoreo</b>	<b>31</b>
<b>Electrónica</b>	<b>33</b>
<b>Sistema de Control PID Discreto</b>	<b>34</b>
<b>Brazo Robótico Para Manipulación</b>	<b>38</b>
<b>Electrónica</b>	<b>40</b>
<b>Reductores Armónicos</b>	<b>42</b>
<b>Arquitectura de Software</b>	<b>49</b>
<b>Interfaz Grafica de Usuario</b>	<b>51</b>
<b>Detección de Arucos</b>	<b>53</b>
<b>Detección de Profundidades</b>	<b>56</b>
<b>Dispositivos Adicionales</b>	<b>57</b>
<b>Dispositivos de Adquisición de Datos.</b>	<b>57</b>
<b>Sistema de Riego y Sistema de Siembra</b>	<b>63</b>
<b>Sistema de posicionamiento y sistema de escáner en 2 dimensiones.</b>	<b>68</b>
<b>Discusión de Resultados:</b>	<b>73</b>
<b>Referencias</b>	<b>74</b>
<b>Apéndice</b>	<b>77</b>
<b>Contenido Digital</b>	<b>77</b>
<b>Desarrollos Mecánicos</b>	<b>77</b>
<b>Configuraciones de Impresión</b>	<b>87</b>
<b>Equipo de Trabajo</b>	<b>90</b>
<b>Aspectos éticos y legales</b>	<b>91</b>
<b>Vinculación</b>	<b>91</b>
<b>Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual</b>	<b>91</b>
<b>Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:</b>	<b>92</b>
<b>Orden de pago final</b>	<b>92</b>
<b>Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación</b>	<b>93</b>
<b>Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario</b>	<b>93</b>
<b>Visado de la Dirección General de Investigación</b>	<b>94</b>

## Resumen

En Guatemala se tiene una gran deficiencia y necesidad en desarrollo tecnológico, pero eso no significa falta de capacidades para desarrollar tecnología en el país. La presente investigación desarrolló un prototipo de robot de inicio a fin con cada una de sus fases desde la perspectiva mecánica, electrónica y de sistemas de computación.

Se ha desarrollado un prototipo que busca el apoyo agrícola a distancia, y a su vez, el desarrollo se ha hecho de tal manera que pueda ser utilizado en múltiples actividades fuera de la agricultura, como por ejemplo la educación, ya que puede ser útil para múltiples experimentos de software y hardware.. Entre las partes fundamentales del desarrollo, destacan un robot móvil completamente eléctrico, un brazo manipulador, un brazo de monitoreo con diferentes tipos de cámaras y un sistema de adquisición de datos de posición, orientación y mapeo del territorio cercano. También destacan algunas partes secundarias que pueden ser removidas, como un prototipo de sistema de riego automático, sistema de siembra y sistema de adquisición de datos ambientales.

El dispositivo fué desarrollado a nivel de prototipo en general, dejando abierto el espacio para futuras mejoras en su desarrollo, y futuras investigaciones a nivel de ciencias de la computación y la robótica.

## Abstract

In Guatemala there is a great deficiency and need in technological development, but that does not mean a lack of capacity to develop technology in the country. This research developed a robot prototype from start to finish with each of its phases from the mechanical, electronic and computer systems perspective.

A prototype has been developed that seeks remote agricultural support, and in turn, the development has been done in such a way that it can be used in multiple activities outside of agriculture, such as education, since it can be useful for multiple software and hardware experiments. Among the fundamental parts of the development, a completely electric mobile robot, a manipulator arm, a monitoring arm with different types of cameras and a data acquisition system for position, orientation and mapping of the nearby territory stand out. . They also highlight some secondary parts that can be removed, such as a prototype of an automatic irrigation system, a planting system and an environmental data acquisition system.

The device was developed at the prototype level in general, leaving open the space for future improvements in its development, and future research at the level of computer science and robotics.

## Palabras Clave

Prototipo, Robot, Controlador PID, Reductores Armónicos, Arucos, Bomba de riego

## Introducción

Desde hace más de diez mil años, el ser humano pasó de ser nómada a establecerse permanentemente en un sitio y desarrollar la agricultura tradicional según Gaston Remmers afirma que “La agricultura tradicional, son los sistemas de uso de la tierra que han sido desarrollados localmente durante largos años de experiencia empírica y experimentación campesina” (Gaston Remmers, 1993). Desde entonces se ha buscado el desarrollo agrícola y mejorarlo a través de herramientas cada vez más sofisticadas tecnológicamente, pasando así por la historia de la humanidad desde el arado hasta la robótica moderna. Dichos desafíos tecnológicos de la época han llevado a mejorar los conocimientos de las técnicas aplicadas para tener mejores productos de maneras más eficientes.

No es de sorprenderse que la mayor relación con la tecnología moderna se pueda asociar con circuitos electrónicos dado que la tendencia a intentar digitalizar todo tipo de tareas es inevitable. Según Zapata y Cárdenas (2019) en la publicación “Agricultura 4.0”, se ha logrado introducir no solo la electrónica, si no la convergencia de diferentes conocimientos como los electrónica, informática, ciencias y sistemas, modelamientos matemáticos, robótica, esto para contribuir con el desarrollo y mejorar la calidad de la vida de las personas en el entorno.

Los robots colaborativos son aptos para trabajar con personas, y son útiles para poder mejorar en todo sentido la productividad de los trabajadores, alejando a las personas de tareas monótonas, según la publicación de Robots Industriales Colaborativo: Una nueva forma de trabajo de Pareda (2018) de tareas superficiales o tareas peligrosas, permitiendo dejar el

razonamiento humano para tareas elementales. Sin embargo, hacer un robot no es tarea sencilla.

Desarrollar un robot requiere de habilidades multidisciplinarias que llevan desde el análisis del problema a resolver, desarrollar un bosquejo, elegir las piezas a utilizar, diseñarlo digitalmente, simularlo para encontrar problemas, hacer el desarrollo mecánico de las piezas y el chasis que tendrá, implementar sensores, módulos o circuitos electrónicos necesarios, desarrollar el firmware y software, hacer pruebas de estrés y experimentar. En la mayoría de casos, se requiere regresar de una tarea a una tarea anterior por problemas que se tienen en el desarrollo o en la integración de los dispositivos, por lo cual, no es de sorprenderse la cantidad de tiempo que requiere desarrollar un robot por completo.

En los meses que se han tenido para el desarrollo del prototipo de robot multifuncional en el laboratorio de innovación, se ha desarrollado un prototipo móvil el cuál está destinado principalmente a monitoreo y conducción a distancia, análisis de variables ambientales, manipulación y apoyo de aplicaciones a distancia, sin embargo, el robot está destinado a poder realizar tareas embebidas, así, en caso de necesitar el robot para alguna actividad específica en un futuro, solamente se desarrolla la interfaz de software y se le hacen los cambios mínimos que requiera en hardware para una nueva tarea.

En este informe se tiene cada detalle de la construcción del primer prototipo cofinanciado por DIGI realizado en el laboratorio de innovación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## Planteamiento Del Problema

Necesidad de tecnología móvil para aplicaciones monótonas, manipulación y monitoreo remoto, especialmente en tareas agrícolas de riego, fumigación y medición sin exigencia de instalación de sistemas de cámaras o sensores externos al mismo dispositivo, dado que en agricultura, el personal laboral está en alto riesgo de sufrir lesiones leves hasta mortales, según el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH por sus siglas en inglés).(Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos, 2017).

En muchas áreas agrícolas existen tareas monótonas de inspección visual, fumigación, riego y manipulación principalmente, ya sea directamente en el campo, en invernaderos o viveros (Solaque, Sánchez, & Riveros, 2020). Junto a las tareas monótonas existe la necesidad de poder realizarlas remotamente, tanto por necesidad de protección frente a químicos o por protecciones simples como evitar insolación al hacer la misma tarea pero desde un sitio remoto. Una de las funciones principales del robot es el apoyo a distancia con la medición de variables ambientales y riego inteligente dejando así, el trabajo en conjunto entre personal y robots colaborativos (Pereda, 2018).

Sin embargo, de una forma secundaria, el robot puede ser de utilidad para poner en práctica el conocimiento de múltiples disciplinas de la ingeniería, ya que cuenta con el hardware para implementar aprendizaje automático, técnicas multivariantes de estadística robusta, planificadores automáticos, y cualquier otra rama enfocada a desarrollo de inteligencia artificial (Solaque et al., 2020).

## Delimitación En Tiempo y Espacio

### 1. Delimitación temporal.

1. El desarrollo está considerado para un periodo de 12 meses, de febrero a octubre de 2021 (inicialmente 8 meses), considerando una ampliación de 4 meses hasta Febrero de 2022 según acuerdo de dirección DIGI 102-2021, dónde se autoriza la prórroga.

### 2. Delimitación espacial.

1. El proyecto propuesto se encontrará dentro de las instalaciones del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dado que se tiene la mayoría de recursos y herramientas necesarias para fabricar el robot dentro de las mismas instalaciones.

## Marco Teórico

### Robot Móvil

Un robot móvil es una máquina que tiene la capacidad de moverse de manera libre en un ambiente, éste no se ancla a ninguna superficie o ubicación fija, las aplicaciones de estos robots son ilimitadas, ya que su método de trabajo independiente a una estructura hace que estas máquinas tengan acceso a más sitios dentro y fuera de zonas industriales, un ejemplo claro son los campos de siembra y cultivo. Por lo regular los robots móviles cuentan con un mecanismo de desplazamiento, por lo regular son llantas con un eje de rotación que les permiten desplazarse de forma libre (Guerrero & Fiallos, 2018).

### *Sistema de 6 Llantas Simples sin Muelles*

Este sistema es puramente para movilidad interna en el laboratorio y reducir el espacio de trabajo, ya que no incorpora muelles para suspensión y es eficiente solamente en superficies planas, dado que si se somete a una superficie irregular, es altamente probable que

pierda tracción al dejar múltiples llantas girando en el aire. Consta de 3 llantas de cada lateral puestas en serie cada una de ellas. Para este sistema, se han colocado los motores directamente en el chasis y se ha desacoplado el Rocker Bogie (Mandow et al., 2007).

## ***Sistema Rocker Bogie***

A diferencia del sistema de 6 llantas simples sin muelles, un sistema rocker bogie es un sistema completo que sirve como suspensión y mantiene las 6 llantas en el suelo en todo momento, mientras se mantenga entre las inclinaciones soportadas por el sistema diseñado. La ventaja de este sistema es que al mantener las 6 llantas en el suelo, no se pierde tracción ni se sobrecarga ningún otro motor por esa misma falta (Varela, 2021).

## ***Robótica***

La robótica es una disciplina que junta diferentes áreas de la ingeniería como lo son la mecánica, la informática, electricidad y electrónica, así como ciencias exactas tales como la matemática y la física, con el objetivo de diseñar máquinas automatizadas capaces de realizar diferentes tareas que impliquen fuerza, precisión y velocidad para reducir el error humano (Guerrero & Fiallos, 2018).

## ***Sistema de Control PID Discreto***

Es un sistema de control de lazo cerrado o retroalimentado, que permite regular distintas variables de proceso por ejemplo, velocidad, presión, temperatura entre otras. El control PID calcula la diferencia entre la variable deseada y la variable medida (variable real), ajustando el crecimiento de la señal del actuador (motor de velocidad, resistencia térmica, compresor) para ajustar la variable medida y sea similar a la deseada. El nombre del algoritmo PID, viene de las iniciales de sus tres parámetros fundamentales, Parámetro Proporcional “P”, la cual mide la diferencia entre el valor configurado y el valor actual, procede a aplicar un cambio proporcional a este. Parámetro Integral “I”, está ligada al tiempo que toma llevar la corrección, y es inversamente a su valor, esto quiere decir, que entre más pequeña sea la variable integral, más rápida será su respuesta. Parámetro Derivativo “D”, este parámetro tiene una acción predictiva, creando una acción de corrección de error,

respondiendo a la velocidad del cambio en la diferencia de valor actual y valor configurado, reduciendo errores antes de que estos se vuelvan grandes y poco controlables (Mandow et al., 2007).

## ***Reductores Armónicos***

Los reductores armónicos se conocen también como accionamientos armónicos es un dispositivo de reducción más compacto que una caja reductora convencional. Es un componente necesario en el desarrollo de robots manipuladores o robots móviles, dónde la precisión y estabilidad son requeridos. Los reductores armónicos se basan principalmente en tres componentes, el primer componente es un generador de onda mecánico, también llamado oscilador. El segundo componente es conocido como engranaje flexible o estría flexible, y el tercer componente se conoce como engranaje circular o estría circular. El engranaje flexible es un engranaje de dientes externos, mientras que el engranaje circular es un engranaje de dientes internos. El modo de operación de un reductor armónico es simple. El motor que generará movimiento rotacional se acopla en el oscilador y lo hará girar. El oscilador a su vez, mantendrá tenso el engranaje flexible en forma elíptica, dónde presionará los 2 puntos de sus radios mayores, y los 2 puntos de sus radios menores con rodamientos para disminuir la fricción al máximo posible. El engranaje flexible hace contacto con el engranaje circular en los puntos del radio mayor del engranaje flexible, y al girar el oscilador, estos puntos van cambiando a lo largo de todo el engranaje circular, generando de esta manera una reducción mucho mayor a la reducción que puede otorgar una caja reductora convencional en un espacio de las mismas dimensiones. Es necesario mencionar que como mínimo, el engranaje flexible debe tener un máximo de 2 dientes inferior al engranaje circular, para asegurar el desplazamiento circular del engranaje flexible y mantener siempre equivalente el espacio entre los radios menores de la elipse del engranaje (Ueura & Slatter, 1999).

## **Arquitectura de Software**

Son lineamientos o patrones que ayudan a la construcción de un programa o aplicación, también describe los componentes básicos de un sistema de software y su

combinación interna, estos patrones permiten tener una guía de cómo los desarrolladores, analistas y todos los cargos relacionados deben hacer para cumplir con los requerimientos del programa o aplicación (Nokeri, 2022).

## *Arquitectura Cliente-Servidor*

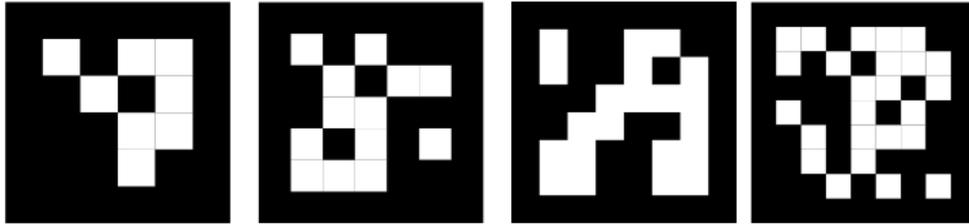
Se diseñó con una arquitectura cliente-servidor que trabaja con dos nodos lógicos el **cliente** que tiene un programa ejecutable (application client, el navegador web es el más común) y el **servidor** tiene otro programa ejecutable (application server desarrollada en python o algún otro lenguaje). La arquitectura describe dos nodos lógicos pero esto no quiere decir que la relación entre cliente y servidor sea uno a uno, una de las propiedades de esta arquitectura es que la relación entre cliente y servidor sea que muchos clientes pueden estar conectados a un servidor. Estos nodos lógicos pueden estar ubicados físicamente en la misma computadora pero igualmente pueden estar en distintas ubicaciones físicas esto quiere decir distintas computadoras, el cliente hace pedidos a través de un puerto contra el servidor y este responde (Nokeri, 2022).

## *Visión por computadora*

### *ArUcos*

Un marcador ArUco como se observa en la Figura 1, es una imagen que puede proporcionar información como una transición del espacio 2D al espacio 3D. ArUco utiliza un marcador de referencia binario cuadrado esto quiere decir que son imágenes cuadradas en blanco y negro, visualmente son muy similares pero el código QR tiene como propósito codificar información a través de una imagen mientras que un marcador de referencia pretende dar una referencia desde un punto de observación. Los marcadores parecieran ser generados de manera aleatoria pero no es así, el módulo ArUco de OpenCV tiene un total de 25 directorios de marcadores predefinidos. Los marcadores son un cuadrado con fondo negro y un patrón blanco dentro del cuadrado, el propósito del borde negro es mejorar la precisión y el rendimiento de la detección de marcas ArUco. Todos los marcadores en cada directorio contienen la misma cantidad de bloques o bits (4x4, 5x5, 6x6 o 7x7) y la cantidad de

etiquetas ArUco en cada directorio es fija (50, 100, 250, 1000) (Elangovan, Dwivedi, Gerez, Chang, & Liarokapis, 2019)



*Figura 1. Marcadores arucos predefinidos.*

### ***Cámara de Profundidad***

Las cámaras de profundidad utilizan tres escáneres ópticos que trabajan en conjunto para poder detectar la profundidad, estos tres escáneres regularmente son una cámara óptica de alta definición, una cámara infrarroja y un proyector láser infrarrojo a parte de poder determinar la profundidad de un objeto estas cámaras tienen la capacidad de detectar movimientos y escanear objetos en 3D con precisión (Trosin, Dekemati, & Szabó, 2021).

## Estado del arte

En la actualidad, existen proyectos como SureVeg, que son proyectos innovadores de robótica aplicada a la agricultura, donde se ha desarrollado un robot con diferentes sistemas sensoriales y un robot manipulador útiles para sistemas de cultivo en hileras, el cual se basa específicamente en agricultura de precisión y aplicación óptima de fertilizante (Cruz Ulloa, Barrientos et al., 2021).

Actualmente, también se han aplicado robots delta para desarrollo de cultivo en hileras, dado que su velocidad de operación es sumamente alta, y se han diseñado robots manipuladores que funcionan muy bien mientras que el robot se encuentre anclado a la parte superior del área de trabajo, manipulando así todo lo que se encuentre en la parte posterior del mismo (Orihuel Arribas, 2021).

El desarrollo de prototipos FabLab conocido como Farmbot es un robot móvil multipropósito, que tiene como objetivo principal ser un prototipo de un robot de soporte agrícola en diferentes tareas monótonas o tareas de adquisición de datos. Cuenta con un robot manipulador en la parte superior del robot, ya que en esta posición puede ser útil para agricultura en hileras, o agricultura en invernaderos. Busca tener diferentes puntos de vista del área agrícola a través de un segundo brazo manipulador con el que las cámaras se pueden mover en cualquier ángulo, o trasladarse en altura. Posibilita según el desarrollo del mismo, la adquisición de datos para futuros análisis con el fin de generar nuevo conocimiento de una manera más ajustada a través de datos locales.

Permite dar inicios al desarrollo de tecnología agrícola en Guatemala, y permite dar avances a proyectos de innovación dentro de la Universidad de San Carlos, donde no solamente se puede dar un enfoque agrícola, sino un enfoque de aprendizaje a múltiples disciplinas de la ingeniería.

Se ha desarrollado este robot multitarea a partir de materiales y dispositivos de compra local, o a través de importadores locales, lo cual reduce el costo total del robot y se

ajusta a las necesidades que sean requeridas, dado que construir el robot desde sus bases da la ventaja de manipular su código, electrónica y mecánica según las necesidades locales.

## Objetivos

1. Objetivo General:
  1. Desarrollo de un robot móvil de propósito general operado a distancia.
2. Objetivos Específicos
  1. Desarrollo de un sistema de adquisición de datos del ambiente y del suelo a través del robot.
  2. Desarrollo de una interfaz para comando a distancia, y evitar colisiones del mismo.
  3. Desarrollo de prototipo mecánico, con distintos actuadores capaces de cumplir las tareas de riego y fumigación de manera autónoma.

Nota: Se realizó una redefinición de objetivos aprobada según acuerdo de dirección DIGI 102-2021.

## Materiales y Métodos

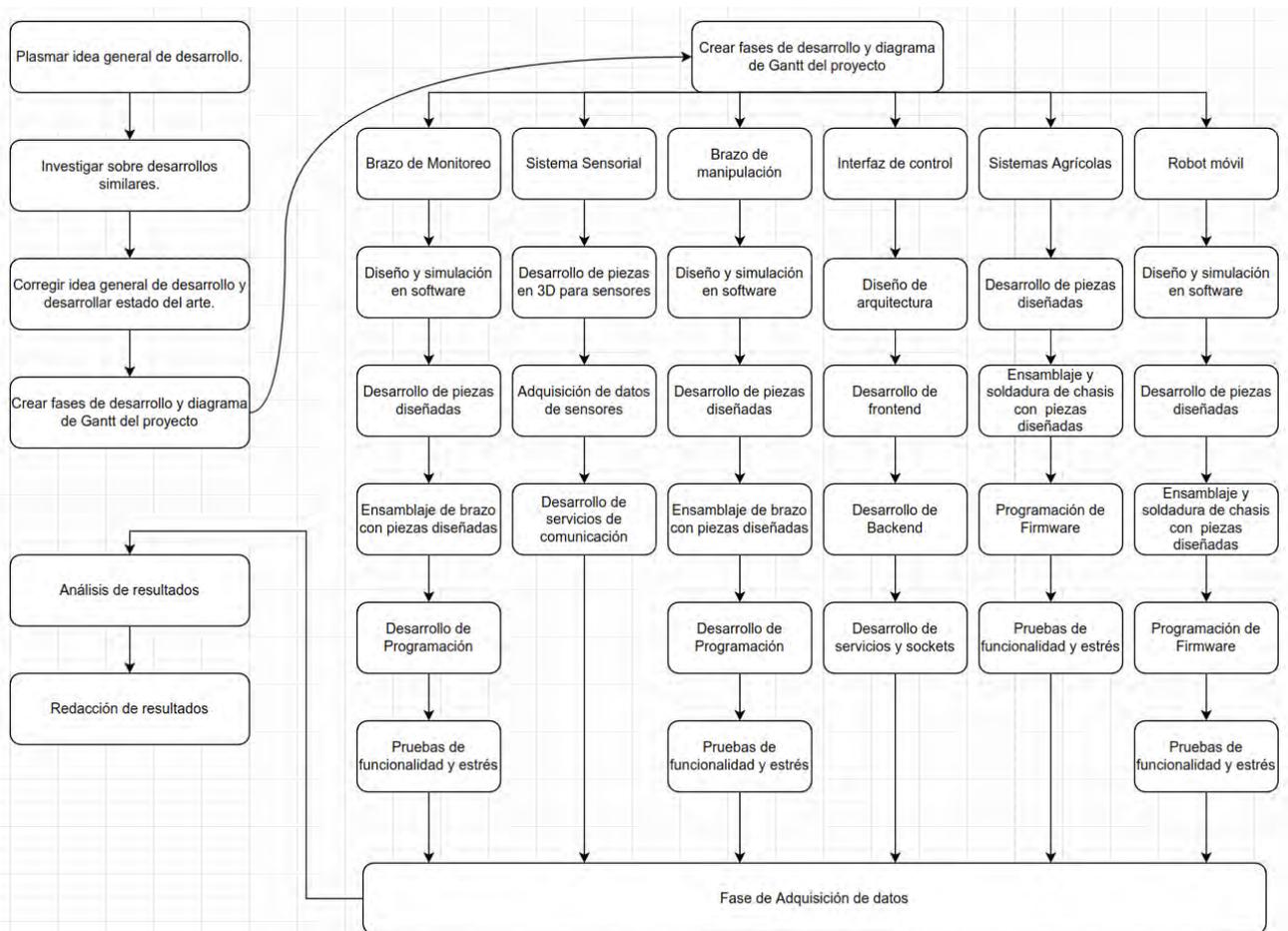
1. Enfoque de la investigación: Cuantitativa tipo descriptiva
2. Método: Cuantitativo
3. Recolección de información: Observación, pruebas, revisión de registros existentes y evaluaciones.
4. Técnicas e instrumentos: Dado que es el caso de desarrollo de un prototipo, las técnicas de observación y pruebas se han realizado con mediciones de referencia de un instrumento contra los valores devueltos por el prototipo. Luego de eso se analizan los resultados revisando los registros para analizar si los valores leídos se encuentran en un rango aceptable de medición.

## 5. Gráficos de puntos, regresiones lineales, tablas comparativas.

El proyecto realizado, denominado bajo el código “DES-12”, consta de 5 fases de desarrollo. En este caso, se tienen partes fijas, como la interfaz de conducción remota, el robot móvil y los brazos robóticos. Sin embargo, hay algunas partes adicionales que se pueden quitar o colocar según sea la necesidad, dado que el robot es multitarea.

Cada una de las fases del proyecto ha pasado por diferentes procesos, siendo principalmente procesos de diseño digital, simulación, desarrollo y pruebas físicas y/o lógicas. En cada fase se describe el proceso que se ha tenido para desarrollo.

Para mejorar un poco la comprensión de los pasos para el desarrollo completo del prototipo, se realizó un diagrama de flujo de los pasos para llevar a cabo el proyecto, aportando información a los métodos utilizados.



## Software utilizado

1. Sistema Operativo
  - a. Sistema operativo GNU/Linux x86 Ubuntu 20.04
2. Software de diseño y simulación
  - a. Autodesk Inventor 2021
  - b. Autodesk Autocad 2021
  - c. Adobe Illustrator 22.0.0 x64
  - d. Adobe Photoshop 13.0.0 x32
3. Software de desarrollo
  - a. Python 3.8.10
    - i. OpenCV-contrib-python 4.5.1.48
    - ii. Opencv-Python 4.5.1.48
    - iii. Evdev 1.4.0
    - iv. SMBus 2
    - v. imutils 0.5.4
    - vi. Matplotlib 3.5.0
    - vii. Numpy 1.20.2
    - viii. Pandas 1.3.4
    - ix. Pyrplidar 0.1.2
    - x. Pyserial 3.5
    - xi. Python-SocketIO 5.5.1
    - xii. Requests 2.22.0
    - xiii. Simplejson 3.16.0
  - b. C++ 20
  - c. Matlab 2021
  - d. Javascript ES12
    - i. Axios 0.26.0
    - ii. Bootstrap v5.1
    - iii. Toastr 2.1.4
    - iv. JQuery 3.5.1

- v. FontAwesome 5.15.4
- e. HTML 5
- f. MariaDB 10.8
- g. Flask 1.1.2
  - i. Flask-Cors 3.0.10
  - ii. Flask-SocketIO 5.1.1
- 4. Software necesario para optimizar el desarrollo
  - a. Fritzing 0.9.9
  - b. Arduino IDE 1.8.19
  - c. Visual Studio Code 1.63.2
  - d. Codepen 4.0.7
  - e. Postman v9.4
  - f. Pyrealsense2 2.49.0.3474
  - g. Git 2.35.1
- 5. Software para configuración de código G
  - a. Cura 4.13.1
  - b. StartCarve 4.3.19
  - c. Aspire 9.5

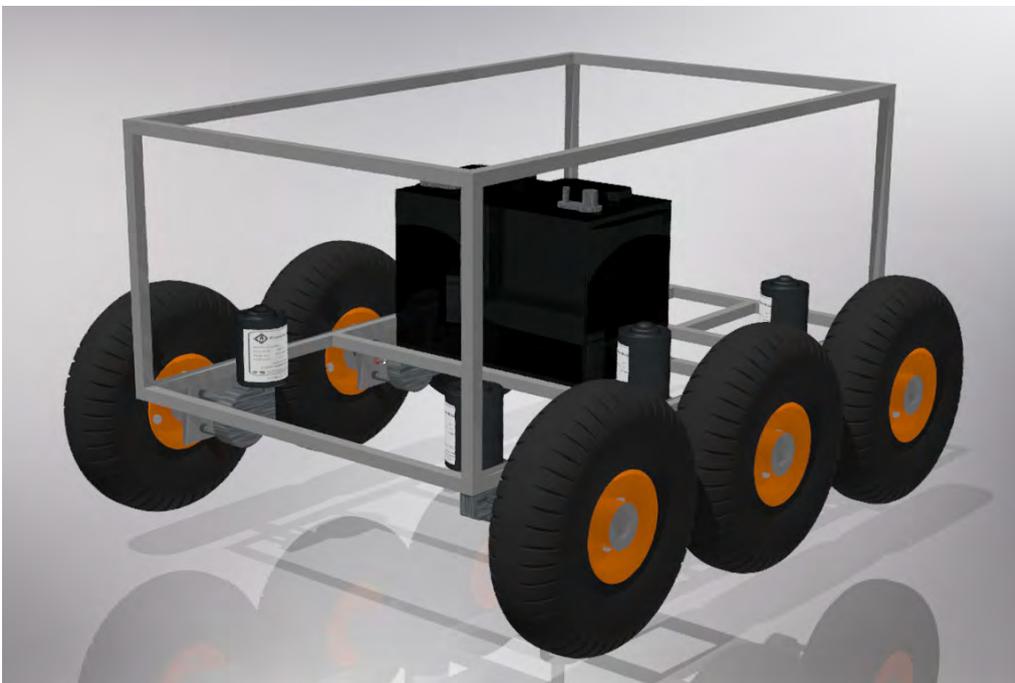
## Resultados

### Robot Móvil

El robot móvil ha tenido un sistema rocker bogie y un sistema simple de 6 llantas. En el caso del sistema Rocker Bogie se tiene un mayor volumen de espacio comprometido, motivo por el cual dejamos el chasis sobre 6 llantas simples en línea dentro del laboratorio para terminar de hacer las pruebas necesarias.

### *Chasis de Robot*

El chasis del robot móvil ha sido desarrollado como se observa en la Figura 1, en tubo estructural cuadrado de hierro negro de  $\frac{1}{4}$ " de chapa 14(1.8 mm de espesor) y chapa 16(1.5 mm de espesor) en forma de paralelepípedo rectangular con dimensiones de 315 mm de altura, 520 mm de ancho y 830 mm de profundidad . Esto con el fin de que el chasis sea mucho más resistente que el chasis de aluminio previsto inicialmente con el mismo diseño sin agregar mucho más peso en relación al aluminio.



*Figura 2. Diseño en software de chasis de robot móvil.*

Se agregaron 2 barras planas de hierro negro de 3” a los laterales del chasis para anclaje de los 6 motores al chasis a través de 3 tornillos M6 cada motor, para los cuales se desarrolló un patrón de corte en acrílico a través de una cortadora láser de alta precisión para luego desarrollar el patrón de agujeros en un taladro de banco, esto para tener alineados los motores y a su vez, el robot móvil completo. En la Figura 2, se puede observar la comparación entre el diseño realizado en software, y el prototipo desarrollado físicamente.



*Figura 3. Diseño en software de chasis de robot móvil.*

Es necesario destacar que el encapsulado completo del robot ha sido diseñado para hacerse en ruteador CNC, dado que el material utilizado es ACM (Aleación de aluminio de alta pureza en las capas externas con una cubierta de resina fluorocarbono, y en la capa interior un núcleo de polietileno de baja densidad).

## *Sistema Motriz*

El sistema motriz está desarrollado sobre 6 llantas de 10” cada una (3 a cada lado), donde cada una de las llantas tiene acoplado un motor eléctrico de 12v. Cada motor tiene características de salida de 45 rpm en promedio, con  $\pm 10\%$  rpm dependiendo la carga, par(torque) nominal de 6 N.m, corriente sin carga menor a 1.5 A, la cual al subirle la carga ha superado los 5 A, manteniendo temperaturas estables para su ciclo de trabajo. La relación entre la velocidad del motor y la salida está definida por una reducción de gusano, la cual tiene como ventajas reducir el espacio de la reducción de un motor de altas revoluciones a una salida de alto torque, reduciendo así drásticamente la velocidad.

Las llantas de 10” de diámetro fueron seleccionadas ya que en relación precio/beneficio fueron las más óptimas, buscando mantener un radio menor a 6” para evitar una pérdida de fuerza muy grande al tener un radio mayor, En la Figura 3(La relación entre distancia y fuerza es directamente proporcional al torque).



*Figura 4. Componentes de sistema motriz de robot móvil.*

El acople entre las llantas al motor se desarrolló de 4 maneras diferentes, dado que el torque generado en el acople del motor es lo suficientemente alto como para hacer que

cualquier rosca de tornillos M4 a M6 se pierda. Se buscó solución al acople las primeras 3 veces haciéndolo con tuercas largas de rosca M10 soldadas a una barra roscada de 10 mm de acero inoxidable y acopladas con un cilindro de aluminio al motor, sin embargo los mecanismos no superaron los 20 giros consecutivos sobre su eje en el mejor de ellos. La solución final ha sido la solución satisfactoria sin dar ningún problema hasta el momento, sin embargo como en el resto del proyecto, se diseñó la pieza y se simuló, solamente que en este caso se recurrió a un torno para desarrollar las piezas a la medida en acero.

Para reducir la fricción entre el chasis y el eje rotatorio hacia cada llanta se utilizaron rodamientos 6900Z. Para cada eje, se necesitan 2 rodamientos separados por un espaciador de 10 mm entre cada uno de ellos, esto para reducir significativamente las vibraciones del eje del motor y mantenerlo alineado sin exceso de carga transferida desde las llantas. En la Figura 4 se muestra una comparación de los acoples hechos a mano con tornillos de zinc, sujetadores de aluminio (a la izquierda) y con espaciadores impresos contra los acoples hechos en torno (a la derecha).



*Figura 5. Acople de llantas a motor en sistema matriz.*

Si se requiere mover el robot hacia adelante o hacia atrás, todas las llantas giran en el mismo sentido, si se requiere girar el robot hacia alguno de los laterales, ambos laterales giran en sentidos opuestos. Se hizo de esta manera para que siempre el robot gire sobre el centro ficticio creado por la intersección de todas sus llantas y reducir el espacio que requiere para poder girar, sin embargo esto requiere mucho más fuerza dado que se tiene movimiento perpendicular al giro normal de la llanta que genera mucha fricción. En la Figura 6 se muestra un ejemplo del movimiento lineal y giro del robot.

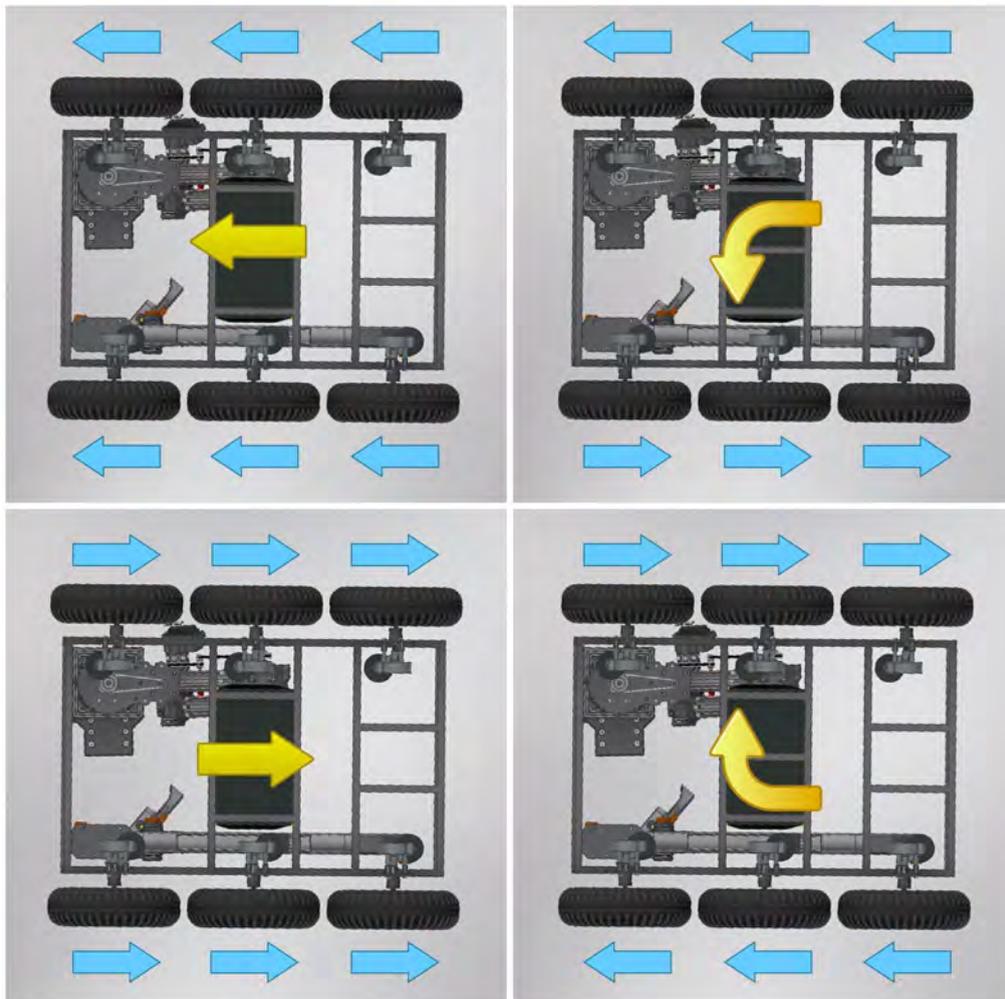


Figura 6. Descripción de movimiento respecto a dirección de giro de los motores.

El chasis con el sistema motriz acoplado tiene un peso de alrededor de 15 Kg, sobre el cuál reposarán todos los demás sistemas y componentes del proyecto. Para determinar el consumo energético y temperatura de operación de los motores como se observa en la Figura 6 , se han sometido a pruebas unitariamente agregando peso y moviéndolo en círculos en un sistema controlado.

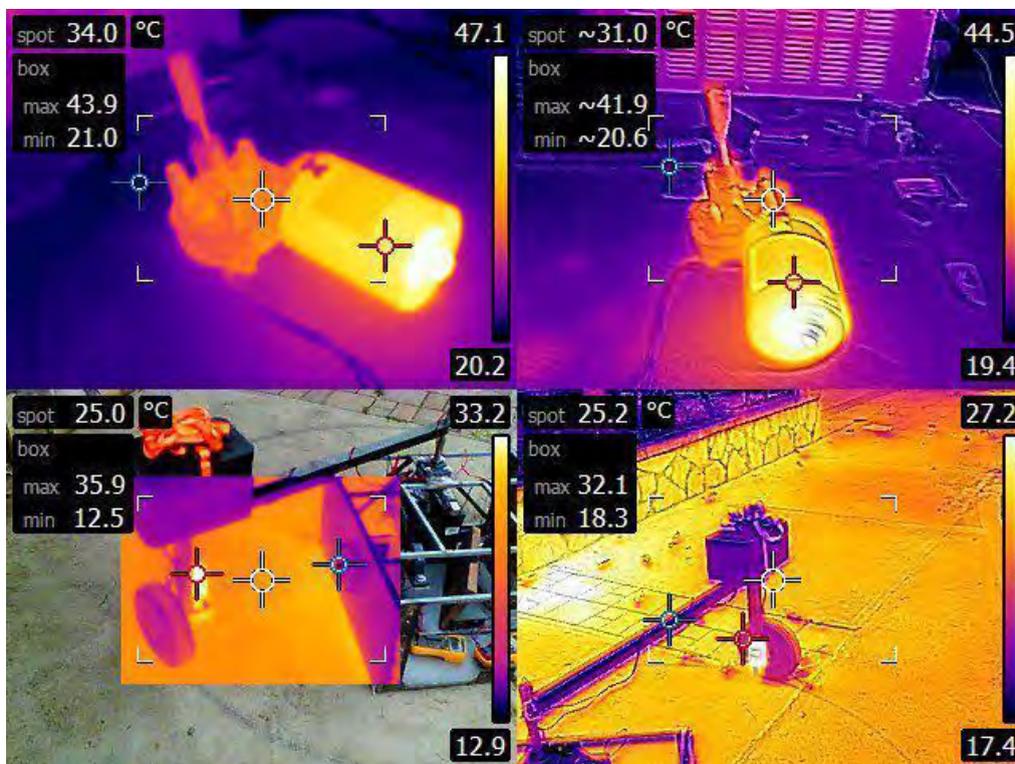


Figura 7. Análisis térmico de motores sometidos a estrés por carga física.

En la Figura 7, se visualiza la carga soportada por los motores individualmente vs corriente suministrada. Experimentalmente, si no se le agrega masa al motor, en temperatura estable el motor mide 22°C, mientras que en su masa máxima medida de 22.5 Kg, la temperatura ha sido de 38.28°C. Esto da como resultado que el motor se encuentra trabajando

en una operación estable por debajo de los 60°C, y debajo de los 10A sin indicar sobrecarga con la masa aplicada.

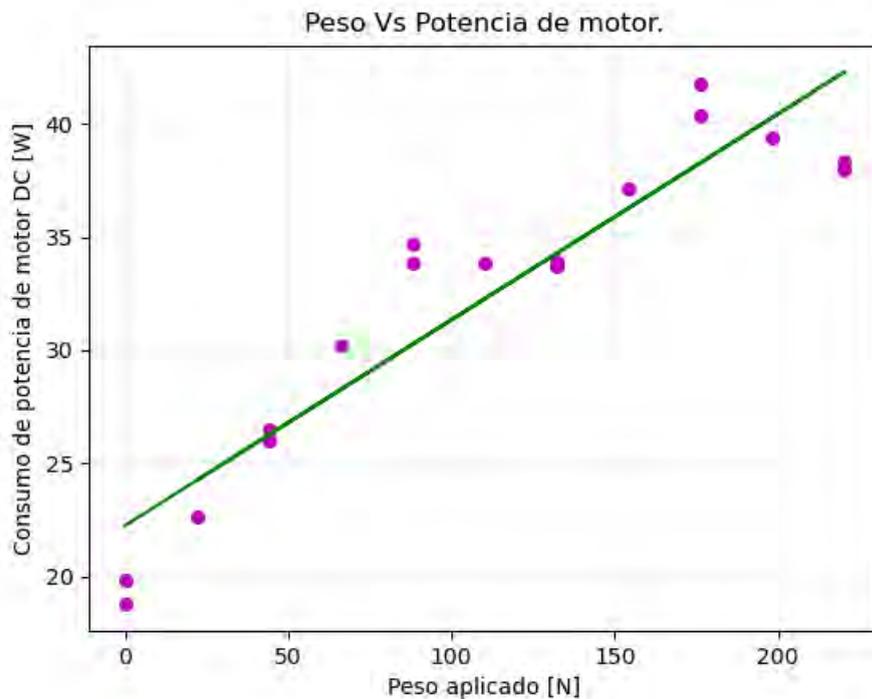


Figura 8. Representación gráfica de la relación de peso y potencia de motor.

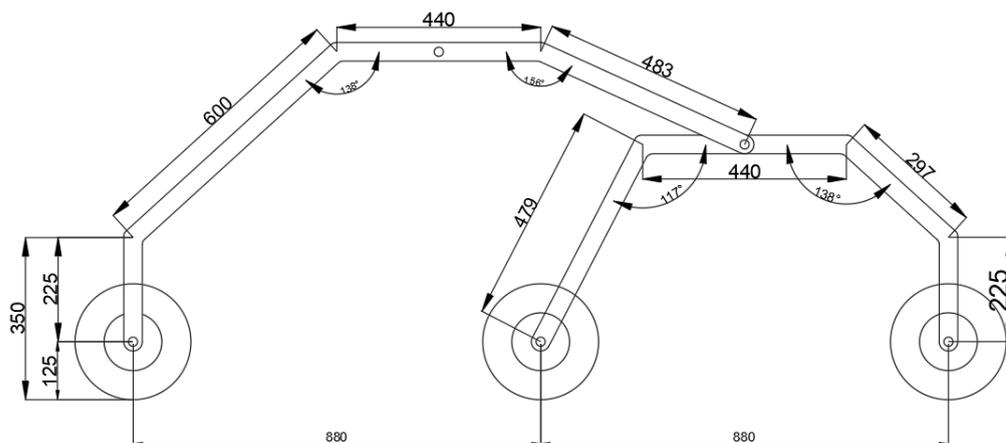
### ***Sistema de 6 Llantas Simples sin Muelles***

Este sistema es puramente para movilidad interna en el laboratorio y reducir el espacio de trabajo, ya que no incorpora muelles para suspensión y es eficiente solamente en superficies planas, dado que si se somete a una superficie irregular, es altamente probable que pierda tracción al dejar múltiples llantas girando en el aire. Consta de 3 llantas de cada lateral puestas en serie cada una de ellas. Para este sistema, se han colocado los motores directamente en el chasis y se ha desacoplado el Rocker Bogie.

## *Sistema Rocker Bogie*

A diferencia del sistema de 6 llantas simples sin muelles, un sistema rocker bogie es un sistema completo que sirve como suspensión y mantiene las 6 llantas en el suelo en todo momento, mientras se mantenga entre las inclinaciones soportadas por el sistema diseñado. La ventaja de este sistema es que al mantener las 6 llantas en el suelo, no se pierde tracción ni se sobrecarga ningún otro motor por esa misma falta (Chinchkar, Gajghate, Panchal, Shetenawar, & Mulik, 2017).

Para el desarrollo del sistema de Rocker Bogie se tomó en cuenta la altura que se necesitaba para el robot, así como el tamaño de las llantas ya que este mecanismo debe tener la movilidad para superar la altura de dos veces el diámetro de las llantas, así como los ángulos de la estructura, para evitar sobre esfuerzos y romper las uniones, para esto se procedió con cálculos trigonométricos, para encontrar la relación entre longitud y ángulo de apertura, llegando a la conclusión que dichos ángulos deben superar los 115, obteniendo esto y sabiendo las restricciones se procede al diseño del rocker bogie y se obtienen las medidas mostradas en la Figura 8.



*Figura 9. Diseño de sistema Rocker Bogie.*

Para el primer prototipo se utilizaron distintos materiales, como lo son tubo de hierro negro cuadrado de 1" de chapa 16, tubo de hierro negro 1/2" chapa 16, hembra de hierro negro

1½” , tubo redondo de hierro negro de 1 ½” tubo redondo de hierro negro de 2”, chumaceras de pared 1 ½”, chumaceras de banco 1 ½”, Rodamientos 6008z.

## ***Sistema de Energía***

El sistema de energía está dado por una batería de plomo ácido de ciclo profundo de 12v. De ciclo profundo significa que está diseñada para brindar energía hasta una descarga aproximada del 80% de su total de manera segura, sin embargo se recomienda no descargar la batería más allá del 50% para aumentar su vida útil.

Se utilizó cable calibre 20 AWG para la electrónica de control del robot móvil, y se utilizó cable calibre 16 AWG para suministrar energía a los motores ya que soporta 13 amperios en una temperatura aproximada de 60 grados centígrados, considerando que la lectura máxima que hemos tenido en laboratorio de amperaje vs carga ha sido de 11 amperios en un tiempo muy corto. La energía se transmite directamente de la batería de ciclo profundo hacia los puentes H BTS7960B y de los puentes H hacia los motores sin pasar por ninguna protección adicional, debido a que los módulos de puente H BTS7960B incorporan protecciones contra sobrevoltajes, infravoltajes, cortocircuito y exceso de temperatura.

## ***Electrónica***

El diagrama eléctrico del rover tiene distintas secciones, como lo son la sección de alimentación y distribución de voltaje como se observa en Figura 9, la cual empieza a la batería de 12 V, que es la que suministra toda la energía al robot, posterior a eso se cuenta con 3 reguladores que nos darán la distribución de distintos voltajes necesarios para el funcionamiento del resto de modulos logicos, de control, y procesamiento siendo estos voltajes 5 V en T1, 8.6V en T2 y 12 V en T3.

En la sección lógica se cuenta con un microcontrolador MC1 que es un aTmega2560, que es el encargado de la comunicación con los otros sistemas del robot y el control de giro de los motores de movimiento, esto lo hace a través de señales enviadas a los módulos T4, T5 y T6, para los motores del lado derecho, y T7, T8 y T9 para los motores del lado izquierdo

que se encuentran en la sección de control. Otra tarea que tiene es el control de la iluminación tanto del rover como del brazo de cámaras, esto se hace a través de módulo de relé T10.

En la sección de control también tenemos la placa PCA9685 T13 que es un módulo de control de servomotores, el cual se encarga de mover los servomotores mostrados en el brazo robot de las cámaras, y el brazo robótico para manipulación, este recibirá todas las configuraciones de la MB1 que es una mini computadora, la cual se encargará del procesamiento de todos los datos obtenidos a través de los distintos sistemas como de sus cámaras, las cuales son una cámara de profundidad y una cámara 4K, estas son parte del monitoreo del usuario hacia el robot.

La minicomputadora se encarga de iniciar los distintos servicios de comunicación, tanto interna del robot entre módulos, como externa, haciendo llegar la información del robot al usuario, y las configuraciones del operador a los distintos módulos y sistemas del robot, esto último a través de una red propia del robot configurada en el Router1.

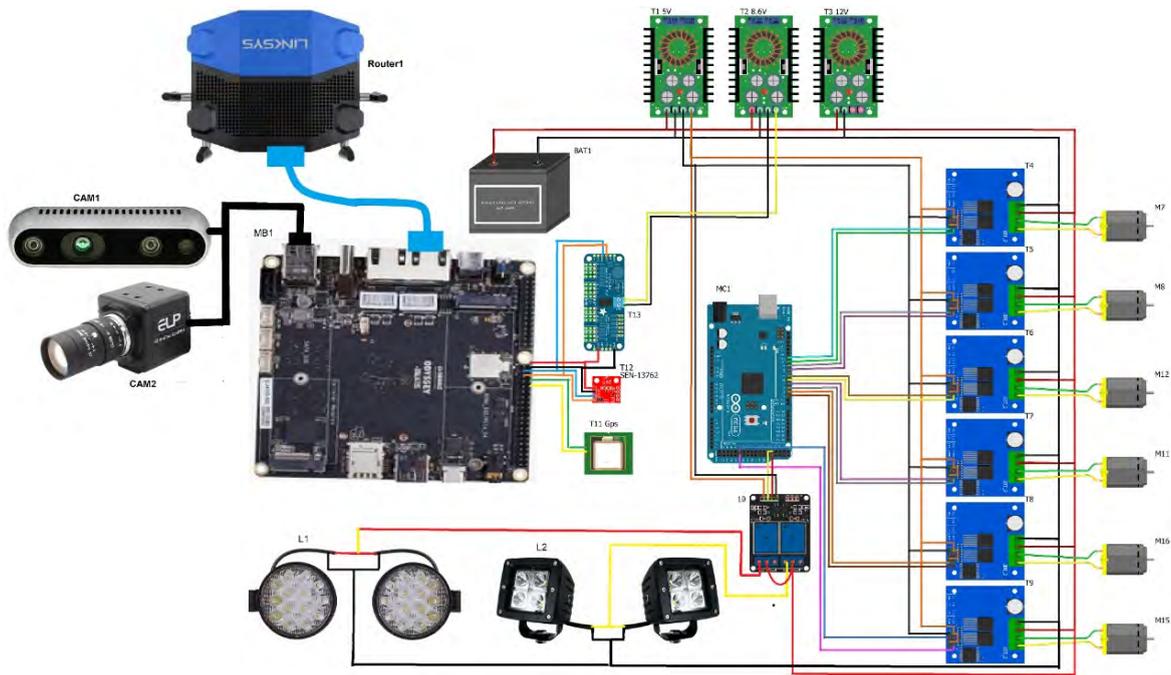


Figura 10. Diagrama de componentes electrónicos de robot móvil.

## Brazo Robótico Para Monitoreo

El brazo de monitoreo está diseñado para mover las cámaras en las inclinaciones o alturas necesarias, en los que pueda tener una mejor visibilidad según el entorno. El sistema del brazo para monitoreo consta de 2 sistemas de motor DC lineal retroalimentado con una unidad de medición inercial, y controlado por un sistema PID cada uno. En el actuador final del brazo se tienen 2 cámaras (una cámara 4K y una cámara de profundidad), y se tienen 2 reflectores LED para iluminar el área que se esté observando. En la Figura 10 se muestra el brazo de monitoreo plegado con sus componentes.

La unidad de medición inercial, al adquirir los datos de los 6 grados de libertad, se traducen a 2 ángulos que hacen referencia a las inclinaciones del plano x, y. En este caso, se obtiene una proporción de la medición de velocidades angulares y de aceleraciones (Albaghdadi & Ali, 2019).



*Figura 11. Brazo de monitoreo plegado.*

El brazo extendido por completo como se muestra en la Figura 11, tiene una altura de 1.70 m hacia arriba sin considerar la altura del robot móvil, y puede girar sus últimos 2 grados de libertad para mantener un monitoreo de 360° en total.



*Figura 12. Brazo de monitoreo extendido.*

## ***Electrónica***

El diagrama de conexión eléctrica muestra la forma de control de los distintos motores del brazo robótico para cámaras Figura 12, los motores M1 y M2, son los actuadores lineales del hombro y el codo, estos son configurados con ángulos de apertura deseados en los microcontroladores MC1 y MC2 que también tomarán la retroalimentación del ángulo al que se encuentra cada uno a través de los sensores S1 y S2 respectivamente, teniendo todo el circuito explicado, al momento de que cada microcontrolador reciba la solicitud de un ángulo, este se encargará de mover el motor del actuador lineal a través de los Puentes H BTS7960 T1 y T2, para plegar o desplegar el actuador lineal, según sea lo necesario para alcanzar el ángulo de configuración.

El brazo de las cámaras también cuenta con 3 servomotores M3 M4 y M5, los cuales le darán una relación directa a las cámaras como un ajuste de inclinación compensando el movimiento del hombro y codo del brazo, estos servomotores estarán controlados por el módulo T3, que es un módulo PCA9685 para el control de servomotores.

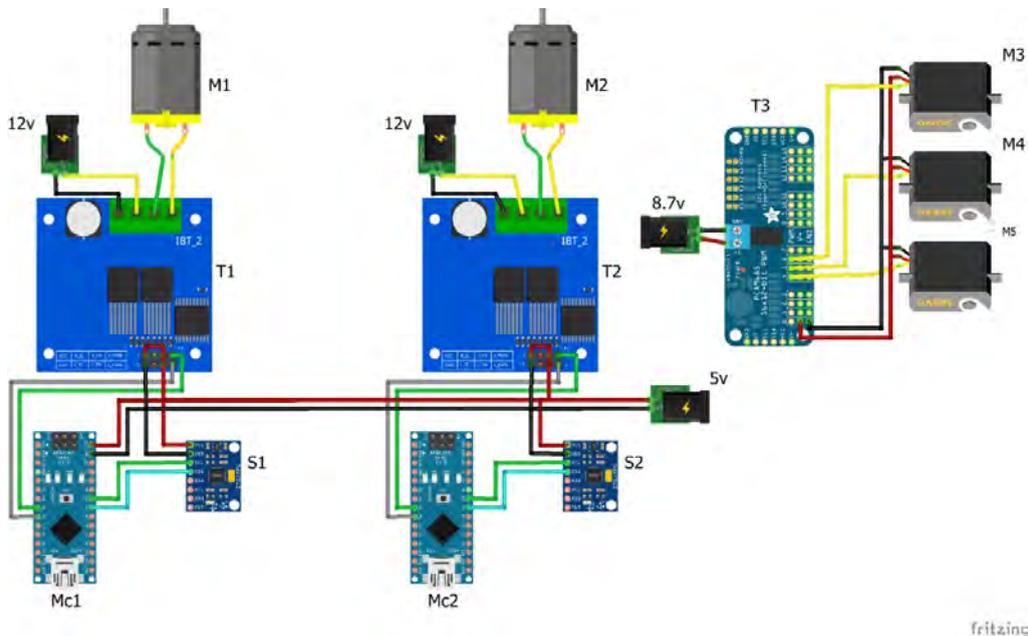


Figura 13. Diagrama de componentes electrónicos de brazo de monitoreo.

## ***Sistema de Control PID Discreto***

Se desarrolló el código para el control PID para los dos primeros grados de libertad del brazo robot para monitoreo, esto para tener un mejor control del movimiento del robot y evitar errores al momento de configurar las posiciones de trabajo deseadas, las constantes de operación del sistema PID son,  $K_p = 75$ ,  $K_i = 0.003$ ,  $K_d = 2.05$ , con estos valores el sistema trabaja de manera estable y cumple con las especificaciones requeridas para las tareas realizadas por el brazo robot de monitoreo.

$$\text{Constantes } P = 75, I = 0.003, D = 2.05$$

En la Figura 13, se muestra el comportamiento de PID a distintos ángulos, y se resalta que en todas las pruebas el PID mostró un comportamiento similar, esto se observa en la pendiente de funcionamiento, ya que en todas podemos observar el mismo crecimiento, y llegando a la conclusión que el PID cumple su función de manera satisfactoria.

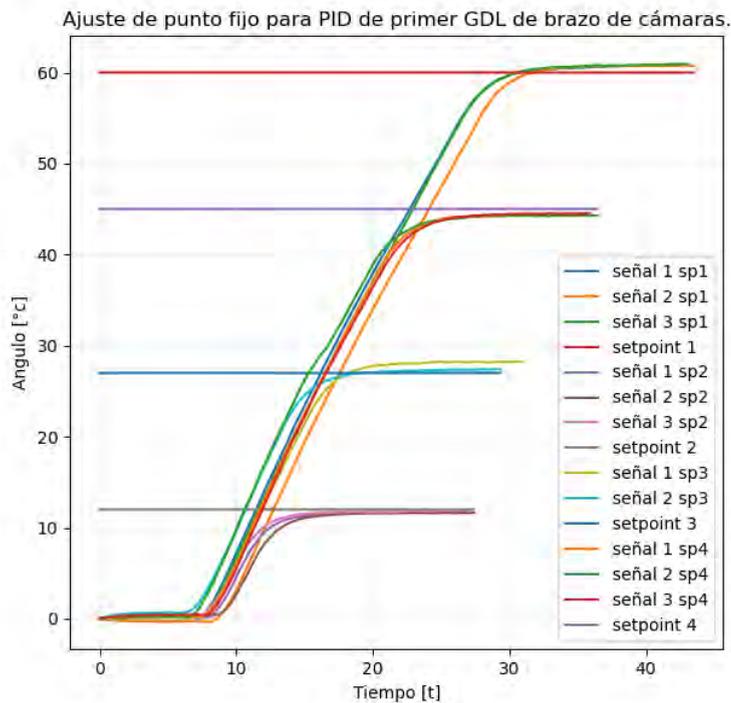


Figura 14. Representación gráfica de respuestas de PID del primer grado de libertad respecto a los valores fijados.

En la Figura 14 tenemos un segundo caso, vemos que el comportamiento del segundo grado de libertad, con una pequeña diferencia, de un desfase hacia abajo del punto de configuración, al notar que el comportamiento de la pendiente es el mismo que en el grado de libertad anterior, y al ser una variación observada en todas las mediciones, este pequeño desfase entre ángulo configurado y ángulo alcanzado se podría dar por varios motivos, entre los principales, un mal posicionamiento del sensor de Feedback del PID, o un desfase entre el Sensor de Feedback y el sensor de obtención de datos, al ser una variación mínima que no llega a afectar de manera perceptible, y el comportamiento del PID es correcto, podemos decir que supera de manera exitosa las pruebas realizadas.

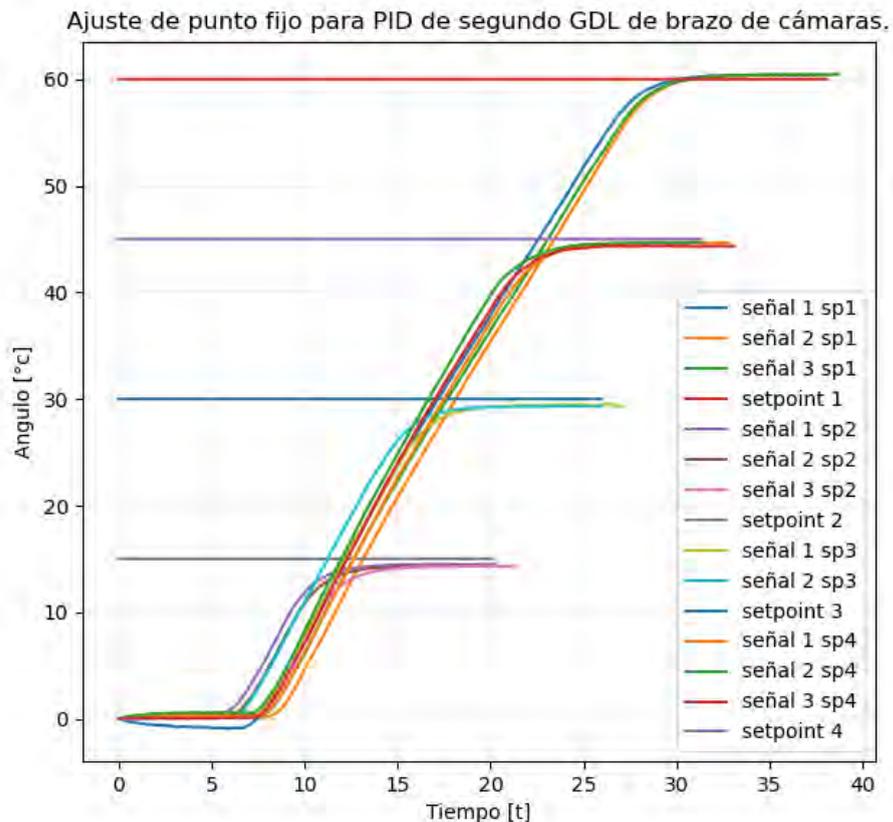


Figura 15. Representación gráfica de respuestas de PID del segundo grado de libertad respecto a los valores fijados.

En la Tabla 1 se muestran los promedios de los datos obtenidos de la prueba de velocidad realizados al primer grado de libertad del brazo para monitoreo, la cual consiste en configurar un ángulo y medir el tiempo que le toma al brazo llegar a este y estabilizarse, de igual manera se realizó la medida para el tiempo de retorno a cero grados con la finalidad de conocer los ciclos de trabajo para el brazo robot para el monitoreo.

en la corrida de datos se puede observar que el comportamiento del robot se ve afectado por los peso del mecanismo, ya que hay una diferencia de aproximadamente medio

segundo en las primeras pruebas, y esta se va aumentando a medida que el ángulo configurado es mayor, mostrando en las últimas tomas una diferencia de casi tres segundos.

Tabla 1

*Respuesta de tiempo de apertura y retorno de primer grado de libertad de brazo de monitoreo*

Primer grado de libertad de brazo para monitoreo (Hombro)					
ángulos iniciales		ángulos finales		tiempo	
robot móvil	codo	punto fijo	codo	apertura	retorno
1	-1.33	10	3.95	3.9	3.4
1	-1.28	20	16.77	5.4	4.8
1	-1.37	30	26.55	10.4	8.8
1	-1.26	40	38.25	12.4	10.9
1	-1.47	50	47.67	18.2	15.3
1	-1.35	60	58.41	22.6	19.5
1	-1.35	70	68.97	25.8	22.8

Se sometió al segundo grado de libertad del brazo robot para monitoreo a las mismas pruebas, y obteniendo resultados en la Tabla 2, muy similares al primer grado de libertad, con una diferencia mínima y siendo este más rápido por décimas de segundo, esto gracias a la diferencia de peso que debe mover respecto al peso que mueve el primer grado de libertad, denotamos que la diferencia entre ciclos de trabajo va aumentando según sea mayor el ángulo configurado, pero con los datos obtenidos de las pruebas anteriores de PID sabemos que están dentro de los rangos aceptables de operación, pasando ambos grados de libertad de manera satisfactoria las pruebas.

Tabla 2

*Respuesta de tiempo de apertura y retorno de segundo grado de libertad de brazo de monitoreo*

Segundo grado de libertad de brazo para monitoreo(Codo)					
ángulos iniciales		ángulos finales		tiempo	
robot móvil	codo	punto fijo	codo	apertura	retorno
1	1.44	10	10.51	3.3	2.8
1	1.28	20	20.44	8.3	6.4
1	1.25	30	26.32	9.5	7.8
1	1.23	40	35.91	11.7	9.9
1	1.23	50	48.83	19.5	17.4
1	1.25	60	58.76	22.2	19.6
1	1.25	70	69.5	24.7	21.8
1	1.24	80	80.01	27.7	25.3

### **Brazo Robótico Para Manipulación**

El brazo manipulador está diseñado para un espacio de configuración de una semicircunferencia de 1.2 m de radio. Tiene una configuración de cadena abierta de 6 grados de libertad, en donde el primer grado de libertad es el grado rotacional de la base, y el último grado de libertad es el cercano al manipulador. Ha sido desarrollado con componentes mecánicos encontrados en mercado local (rodamientos de diferentes dimensiones, tornillos m3, m4 y m5 de diferentes longitudes, perfiles de aluminio octogonales, perfiles de aluminio 2020, varillas de acero inoxidable, PLA+, TPU, cable calibre 16, poleas dentadas y fajas). Sirve para poder manipular objetos que se encuentren por delante del robot de manera remota. En la Figura 15 se muestra el brazo manipulador plgado con todos sus componentes.



*Figura 16. Brazo de manipulación plegado.*

El primer grado de libertad está desarrollado con un motor Nema 23 y dos tipos de reducciones. La primera es un juego de poleas dentadas que va directamente al eje de la segunda reducción que es una reducción armónica. El segundo grado de libertad tiene funciones iguales al primero, solo que gira de manera perpendicular a este, por lo tanto no tiene todo el peso del brazo girando en el eje de salida de la reducción. Esto implica que el primer grado de libertad requiere 2 rodamientos más (lazy susan) para resistir el peso, y para estabilizar el brazo. El tercer grado de libertad tiene su principal diferencia en que debe soportar menos torque que los primeros 2, ya que al estar más cerca de la carga, tendrá un

consumo menor de energía que los primeros 2 grados de libertad. En consecuencia, el reductor armónico del tercer grado de libertad es más débil en comparación, y debe soportar las pérdidas por fricción que genera el reductor armónico. Los últimos 3 grados de libertad rotacionales están desarrollados en base a servomotores digitales de 60Kg/cm de 8v, accionados por una señal de PWM. La Figura 16 muestra el brazo descrito desplegado de una manera similar a la que se despliega sobre el robot móvil.



*Figura 17 Brazo de manipulación extendido.*

## ***Electrónica***

La electrónica necesaria para el brazo manipulador incluye solamente un microcontrolador(MC1) para desarrollar el código de control, 3 puertos de un módulo PCA9685(T4) para control de canales PWM, 3 controladores de motores paso a paso Nema

23 y Nema 17, 3 sensores de medición inercial, 2 motores paso a paso Nema 23, un motor paso a paso Nema 17, y 3 servomotores de 60Kg/cm. En la Figura 17 se visualizan los componentes descritos

Los 2 motores Nema 23(M1 y M2) con sus respectivos controladores(T5 y T6), sirven para el movimiento rotacional de los primeros 2 grados de libertad. El motor Nema 17(M3) junto a su respectivo driver(T7), sirve para la rotación del tercer grado de libertad. En estos 3 primeros grados de libertad se necesita un dispositivo para retroalimentar la posición para cada uno(T1, T2 y T3), ya que existe pérdida de precisión al cambiar de sentido de giro en los reductores armónicos. Para esto se utilizan los sensores de medición inercial con un controlador PID.

En los últimos 3 grados de libertad del brazo manipulador, se tienen 3 servomotores de alto torque(M6, M7 y M8), motivo por el cuál no se requieren dispositivos adicionales de retroalimentación, dado que el servomotor los incluye dentro de su sistema.

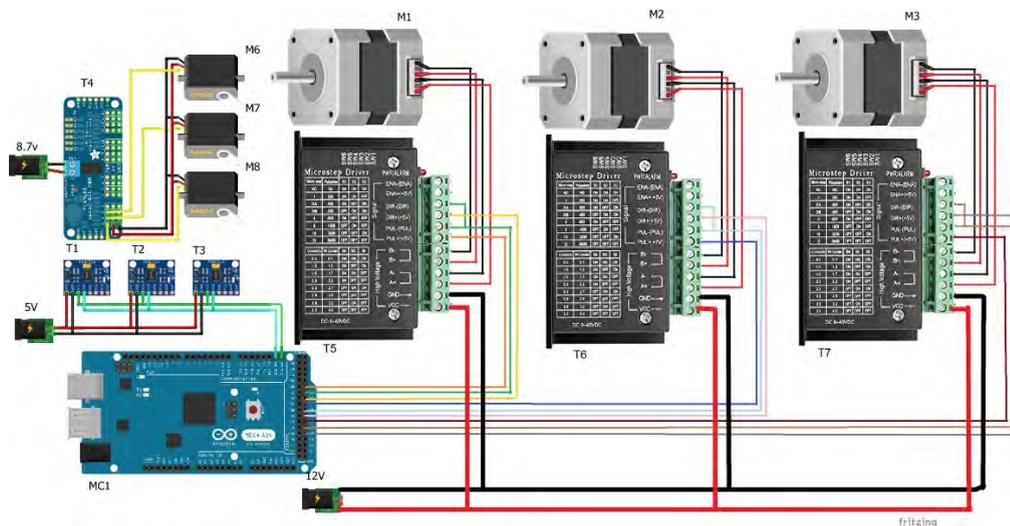


Figura 18. Diagrama de componentes electrónicos de brazo de manipulación.

## Reductores Armónicos

Los reductores armónicos se conocen también como accionamientos armónicos es un dispositivo de reducción más compacto que una caja reductora convencional. Es un

componente necesario en el desarrollo de robots manipuladores o robots móviles, dónde la precisión y estabilidad son requeridos. Los reductores armónicos desarrollados tienen una reducción de -39:1, el número negativo significa que si el motor gira en un sentido, la salida del reductor gira en sentido opuesto.

Los reductores armónicos se basan principalmente en 3 componentes, el primer componente es un generador de onda mecánico, también llamado oscilador. El segundo componente es conocido como engranaje flexible o estría flexible, y el tercer componente se conoce como engranaje circular o estría circular.

El engranaje flexible es un engranaje de dientes externos, mientras que el engranaje circular es un engranaje de dientes internos. Luego de realizar los cálculos para el diseño de los engranajes, se han obtenido los valores de la tabla 3 para su desarrollo.

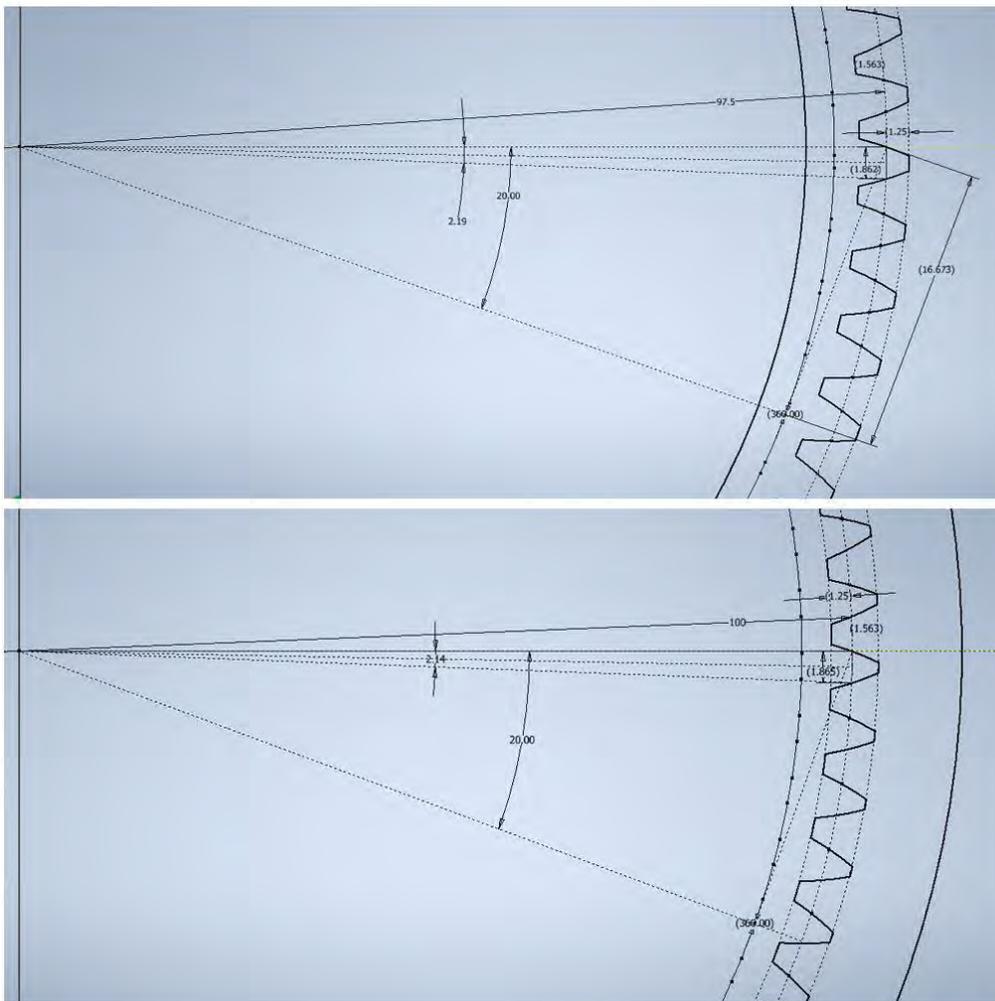
Tabla 3

*Valores calculados para desarrollo de engranajes.*

Cálculo para desarrollo de engranajes para reductores armónicos				
Motor	Nema23	Nema23	Nema17	Nema17
Engranaje	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible
Tipo de engranaje	Helicoidal	Helicoidal	Recto	Recto
Tipo de dientes	Interiores	Exteriores	Interiores	Exteriores
Número de dientes [Z]	80	78	80	78
Módulo [M]	1.5mm	1.5mm	1.25mm	1.25mm
Diámetro primitivo [dp]	120mm	117mm	100mm	97.5mm
Paso circular [pc]	4.7124mm	4.7124mm	3.92mm	3.92mm
Cabeza de diente [A]	1.5mm	1.5mm	1.25mm	1.25mm
Espesor de diente	2.2384mm	2.2384mm	1.8620mm	1.8620mm

[S]				
Pie de diente [pd]	1.8750mm	1.8750mm	1.5625mm	1.5625mm
Radio de entalle [R]	0.39mm	0.39mm	0.33mm	0.33mm
Ángulo de espesor [As]	2.1375°	2.1923°	2.1371°	2.1884°

De acuerdo a los valores de la tabla anterior, donde el par de engranajes se obtiene a partir del mismo módulo, se desarrollan en software de diseño y simulación los engranajes, como se muestra en la Figura 18.



*Figura 19. Desarrollo de engranajes del reductor armónico en software.*

El modo de operación de un reductor armónico es simple. El motor que generará movimiento rotacional se acopla en el oscilador y lo hará girar. El oscilador a su vez, mantendrá tenso el engranaje flexible en forma elíptica, donde presionará los 2 puntos de sus radios mayores, y los 2 puntos de sus radios menores con rodamientos para disminuir la fricción al máximo posible.

El engranaje flexible hace contacto con el engranaje circular en los puntos del radio mayor del engranaje flexible, y al girar el oscilador, estos puntos van cambiando a lo largo de todo el engranaje circular, generando de esta manera una reducción mucho mayor a la reducción que puede otorgar una caja reductora convencional en un espacio de las mismas dimensiones.

Es necesario mencionar que como mínimo, el engranaje flexible debe tener un máximo de 2 dientes inferior al engranaje circular, para asegurar el desplazamiento circular del engranaje flexible y mantener siempre equivalente el espacio entre los radios menores de la elipse del engranaje. La Figura 19 muestra un ejemplo de cómo se acopla un reductor armónico con sus 3 piezas principales (Yang, Liu, & Jin, 2020).

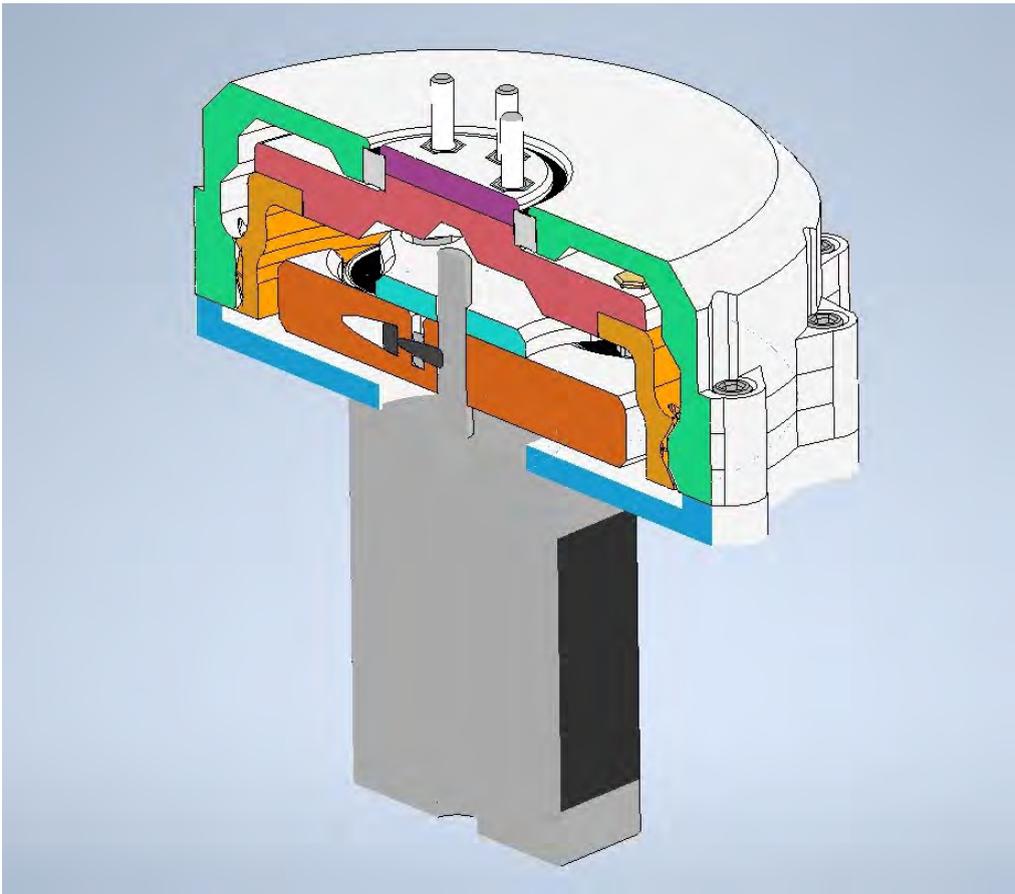


*Figura 20. Desarrollo de engranajes helicoidales para reductor armónico en impresión 3D sólida y flexible.*

Dado que el dispositivo debe tener soportes para poder tener una sola salida sin vibraciones, y soportes para que se muevan adecuadamente las piezas internas, el dispositivo consta de varias piezas internas, pero principalmente de 7 piezas que tienen como separación entre ellas algunos rodamientos o tornillos, depende cuál sea su forma de ajustarse.

La pieza principal es la que acopla todo el sistema motriz. Tiene acoplado un motor paso a paso directo hacia un juego de poleas dentadas que se unen por medio de una faja dentada, haciendo una relación de 3:1 para aumentar 3 veces el par del motor y perder revoluciones. El eje de salida del sistema motriz se acopla directamente al oscilador, sin embargo el oscilador tiene en su parte interna 4 rodamientos que se deben sujetar para evitar que pierdan su eje al someterse a giros, motivo por el cual el oscilador cuenta de una parte inferior y una parte superior sujeta por tornillos M4, y dentro de ellas reposan los rodamientos.

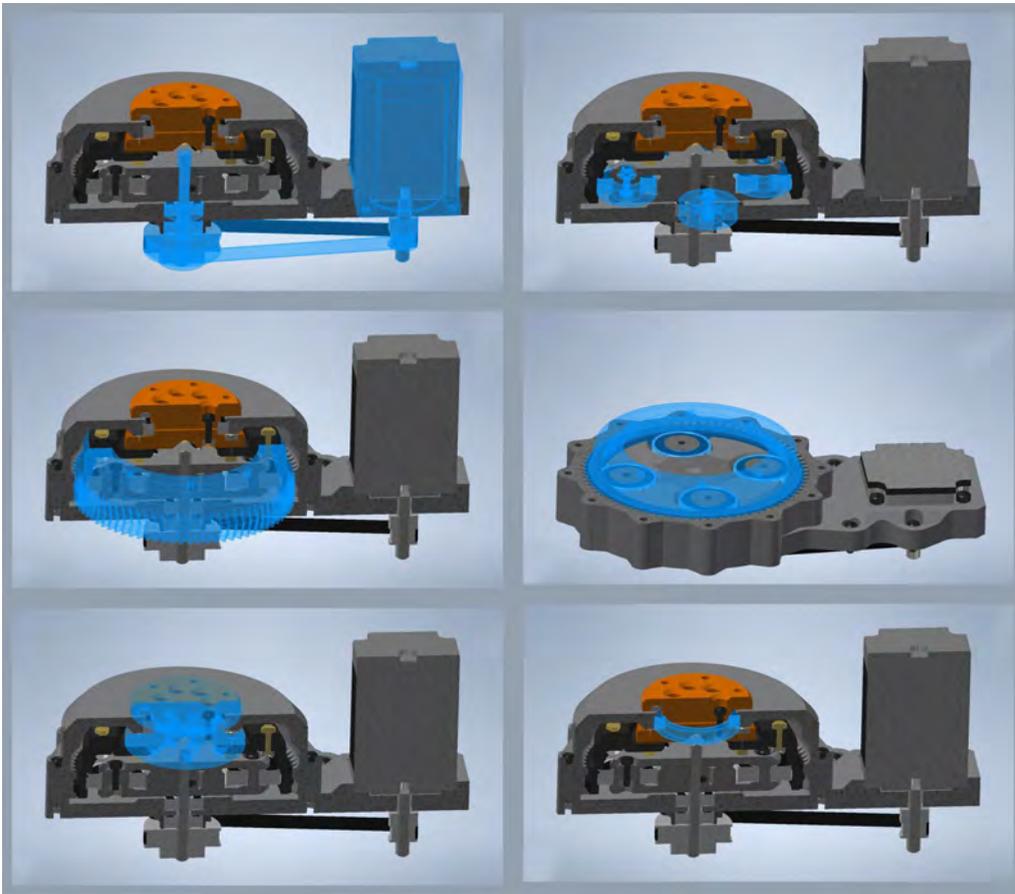
En contacto con los rodamientos del oscilador, se tiene el engranaje flexible, que es quien denotará la salida del sistema al entrar en contacto con el engranaje circular. El engranaje flexible por otro lado, también tiene contacto directo con el engranaje circular, en donde a su vez, el engranaje circular, sirve de protección a todo el dispositivo al encapsular el mecanismo y dejar solamente libre la salida del sistema. Al tener como salida del sistema un engranaje flexible, se deben tener otras 2 piezas unidas a él para evitar que la salida del sistema también sea flexible. Las 2 piezas acopladas al engranaje flexible son adaptadas entre ellas con tornillos M4 y sujetadas al encapsulado a través de un rodamiento, dejando como pieza final un dispositivo de gran reducción y sumamente preciso, como se puede observar en la Figura 20.



*Figura 21. Corte transversal de diseño de reductor armónico para visualización interna.*

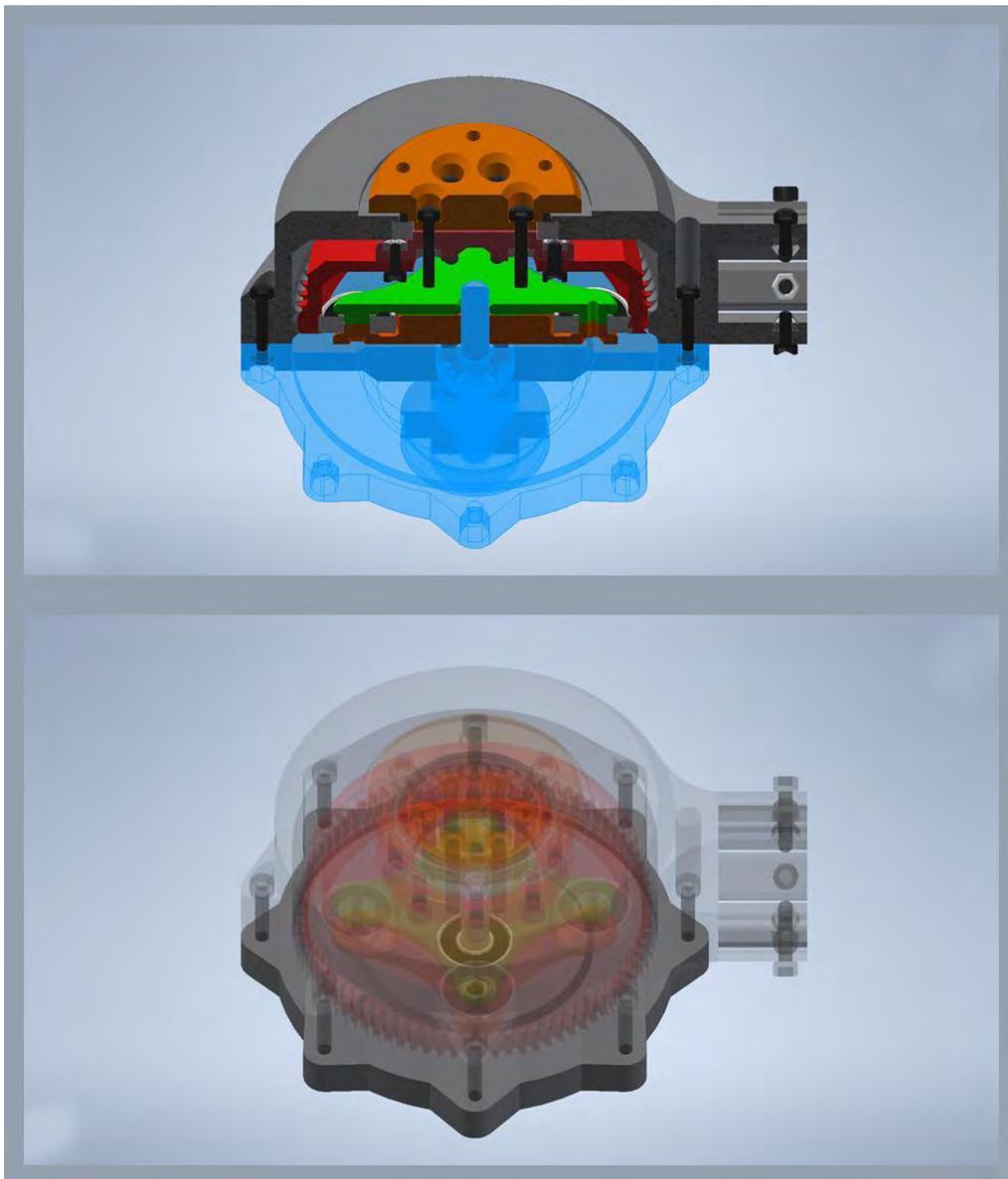
Principalmente, como reductores armónicos se desarrollaron 5 modelos diferentes, entre los cuales 4 de ellos tenían solamente modificaciones en estructura sin cambiar su configuración interna (se colocaron adaptaciones para un movimiento circular horizontal o vertical, se desarrollaron las piezas con adaptaciones para perfiles de aluminio octogonales y se desarrollaron sistemas de reducciones con poleas dentadas acopladas al mismo dispositivo antes de entrar a la reducción armónica).

El primer modelo simplificado desarrollado es el que se muestra en la Figura 21, donde se muestran principalmente los contactos que tiene una pieza con otra. A pesar que el principio del dispositivo es simple, al desarrollar el sistema de reducción se complica al desarrollarlo en un espacio limitado.



*Figura 22. Visualización interna de reductor armónico para motor Nema 23.*

La Figura 22 muestra el último dispositivo desarrollado, en el cual si cambian las configuraciones al dispositivo anterior. Básicamente solo son 2 conjuntos de cálculos diferentes para desarrollar todos los reductores armónicos del proyecto. El dispositivo mostrado hace referencia al reductor armónico del tercer grado de libertad, y es diferente en desarrollo dado que el motor que genera el movimiento circular es un motor de menor potencia, ya que se requiere que el motor tenga un peso mucho menor a los pesos de los primeros 2 grados de libertad.



*Figura 23. Visualización interna de reductor armónico para motor Nema 17.*

## **Arquitectura de Software**

Se utilizó una arquitectura cliente-servidor para el desarrollo del proyecto, el flujo de mensajes de esta arquitectura siempre comienza con el cliente quien pide un servicio(request) y el servidor responde(response) (Skogan, Grønmo, & Solheim, 2004), el servidor del desarrollo está compuesto por:

- Api Rest: Conjunto de definiciones y protocolos que se utilizan para diseñar e integrar el software de aplicaciones.
- CDN: Es una red de servidores que distribuye contenido de un servidor de "origen" a todo el mundo.

El flujo de los nodos lógicos está descrito en la Figura 23.

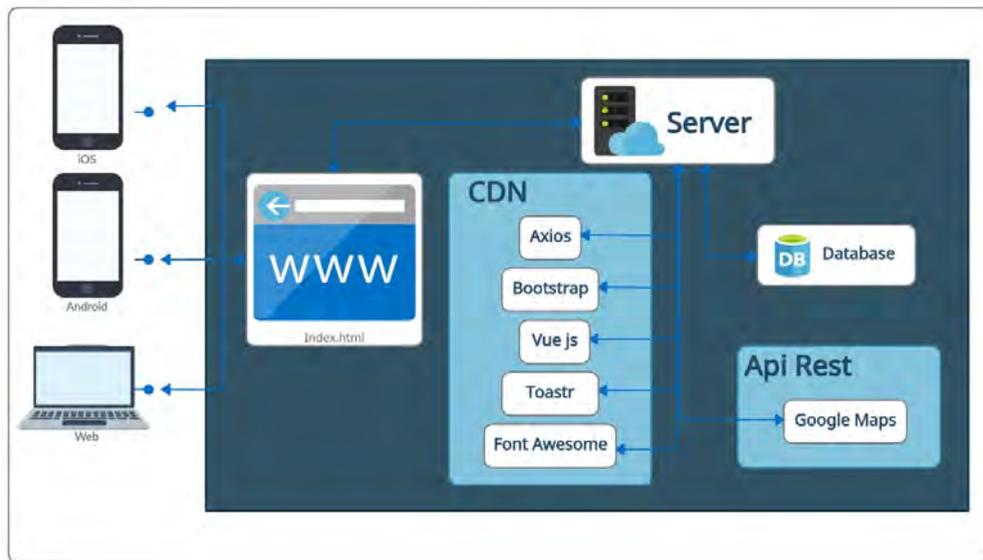


Figura 24. Diagrama de arquitectura de software.

Parte de esta arquitectura es una red local ya que cuando el cliente pida un servicio al servidor es totalmente necesario abrir un puerto en dicha red como se puede observar en la Figura 24.

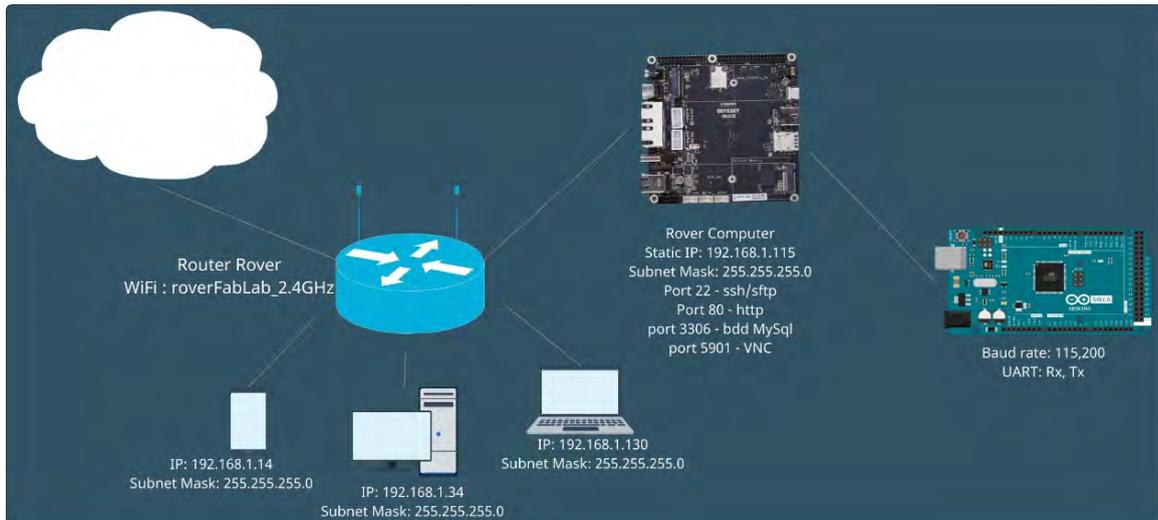


Figura 25. Diagrama de redes y comunicaciones.

## ***Interfaz Grafica de Usuario***

La interfaz de usuario es espacio donde se producen las interacciones entre el usuario (Operador del robot móvil) y el servidor (Computadora del robot móvil), el objetivo de esta interacción es permitir el funcionamiento y control más efectivo del robot móvil desde la interacción humana (Trianti, & Kristianto, 2021). Las interacciones están descritas en la Figura 25.

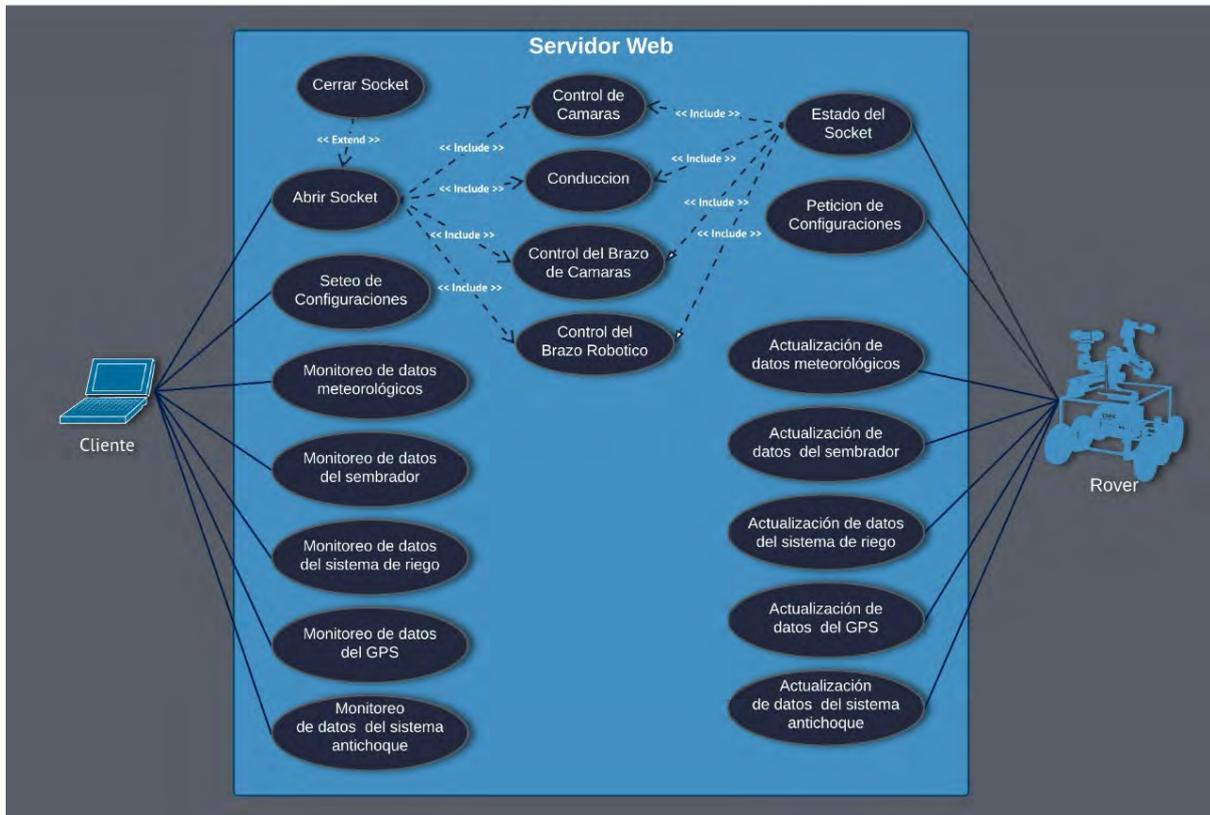


Figura 26. Diagrama de casos de uso de software.

La interfaz de usuario consta de 6 apartados como se muestra en la Figura 26.

- Cámaras: A través de este apartado se puede monitorear e interactuar con las distintas visualizaciones (Prathaban, Thean, & Sazali, 2019)
  - Camara 4k, 1280x720p a 60fps
  - Camara RealSense RGB , 640x480 a 30fps
  - Camara RealSense color por profundidad , 640x480 a 15fps
  - Camara RealSense IR, 640x480 a 30fps
- Estación Meteorológica/Datos GPS: Este apartado es solo para monitorear en tiempo real los datos adquiridos por la estación meteorológica y el GPS del robot, los datos del GPS se pueden visualizar a través de la API de google maps en la interfaz.
- Datos del Sembrador y sistema de riego: A través de este apartado se monitorea las acciones del sembrador y el sistema de riego del robot móvil.

- Animación de movimiento y acciones de robot: Este apartado permite visualizar que parte del robot se está moviendo físicamente mediante una representación del robot en 3D.
- Consola de Comandos: En este apartado el usuario interactúa con la interfaz para activar y desactivar servicios para control del robot móvil, servicios como el movimiento de las 6 llantas, control de los ángulos del brazo de monitoreo y control del brazo manipulador
- Control del brazo de monitoreo: En este apartado el usuario interactúa con la interfaz para poder setear los ángulos al brazo de monitoreo siempre y cuando el servicio sea habilitado.

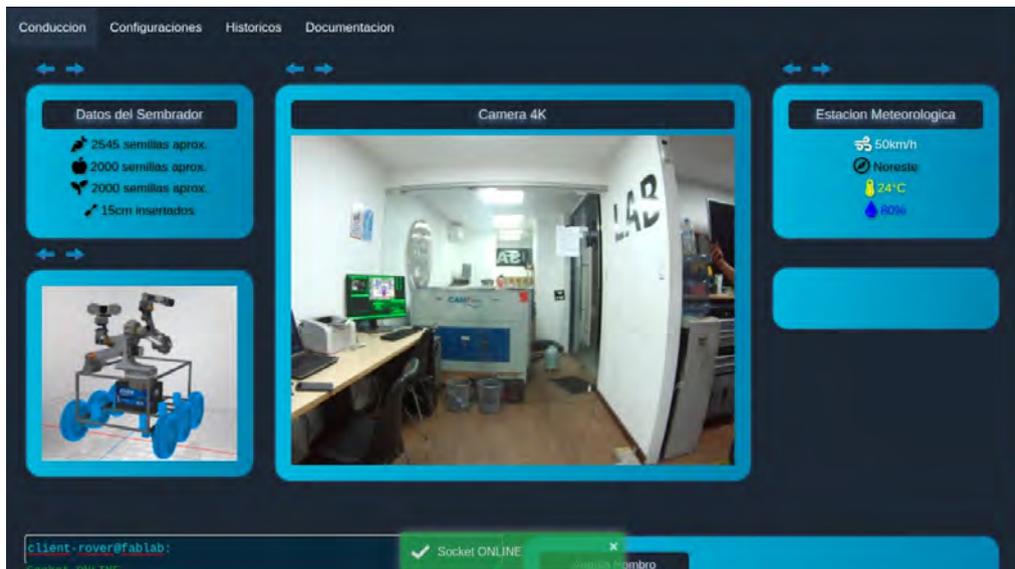


Figura 27. Interfaz gráfica de usuario con cámara 4K activa.

## *Detección de Arucos*

Para implementar la detección de marcadores ArUco en la interfaz gráfica se hizo en tres etapas distintas(OpenCV: Detection of ArUco Markers, 2013)

- **Determinación de los candidatos a marcadores:** Dado que sabemos que el marcador es un cuadrado necesitamos encontrar los posibles candidatos que puedan

tener esa forma, ese es el primer paso para determinar los candidatos, una vez que tenemos los posibles candidatos se realiza un triaje y descartar los falsos positivos.

- **Aplicación de un umbral a la imagen:** Se aplica un umbral a la imagen donde se encuentra el candidato, el umbral utilizado se llama umbralización adaptativa esto quiere decir que se encuentra un valor de nivel de gris óptimo para cada ventana navegando por la imagen de nivel de gris con un tamaño de ventana determinando, los que están debajo de este nivel se determinan como negro y los que están por encima de este nivel como blancos. (Kalaitzakis et al., 2021)
- **Detección de bordes:** Esta última etapa se realiza a partir de una imagen binaria (imagen en blanco y negro) los bordes encontrados se ignoran si no son convexos o tienen una forma cuadrada, también hay disponibles filtros adicionales. Por cada detección exitosa los cuatro puntos de las esquinas del marcador se detectaron en el orden de arriba a la izquierda, arriba a la derecha, abajo a la derecha y abajo a la izquierda los 4 puntos detectados se almacenarán como vectores de puntos y varios marcadores de la imagen se almacenarán juntos en el contenedor de vectores de puntos, en Python se almacenarán como matrices Numpy (Poroykov, Kalugin, Shitov, & Lapitskaya, 2020), para que luego puedan ser dibujados bounding boxes en cada marcador detectado como lo muestra la Figura 28.

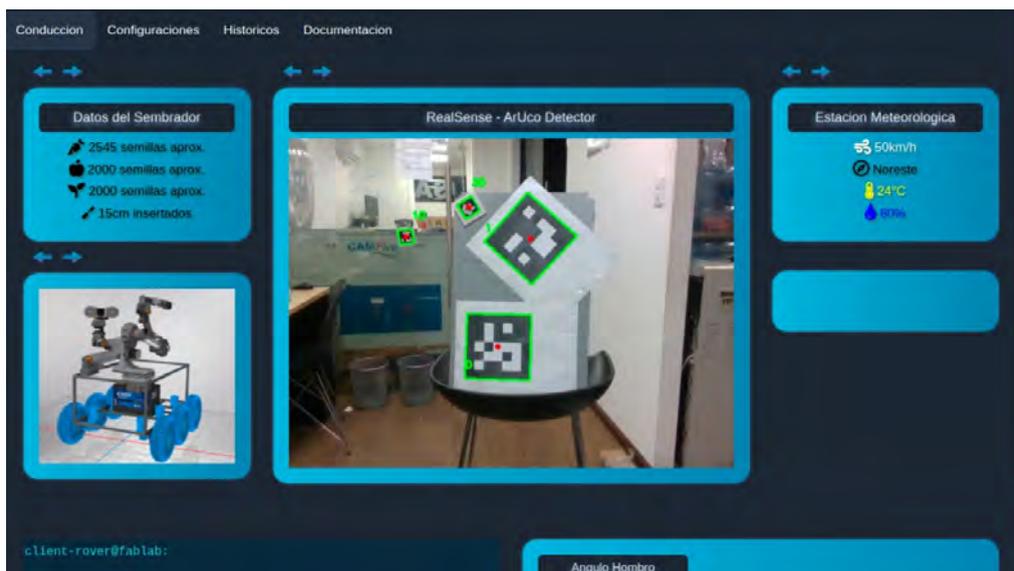


Figura 28. Interfaz gráfica de usuario con detección de arucos activa.

En la Figura 29 se puede visualizar la distancia de detección de los marcadores vs el ángulo de inclinación a la que se encuentra el marcador, experimentalmente se obtuvo detección de los marcadores hasta los 3.5 metros de distancia sin embargo una detección precisa hasta los 2 metros después de eso la detección deja de ser precisa y empieza a presentar un error muy grande (Sreekanta, Sarode, & George, 2020), si se compara la distancia de detección con una medición de referencia (metro láser) podemos determinar que el área segura de detección es la intersección de las áreas de estas dos gráficas.

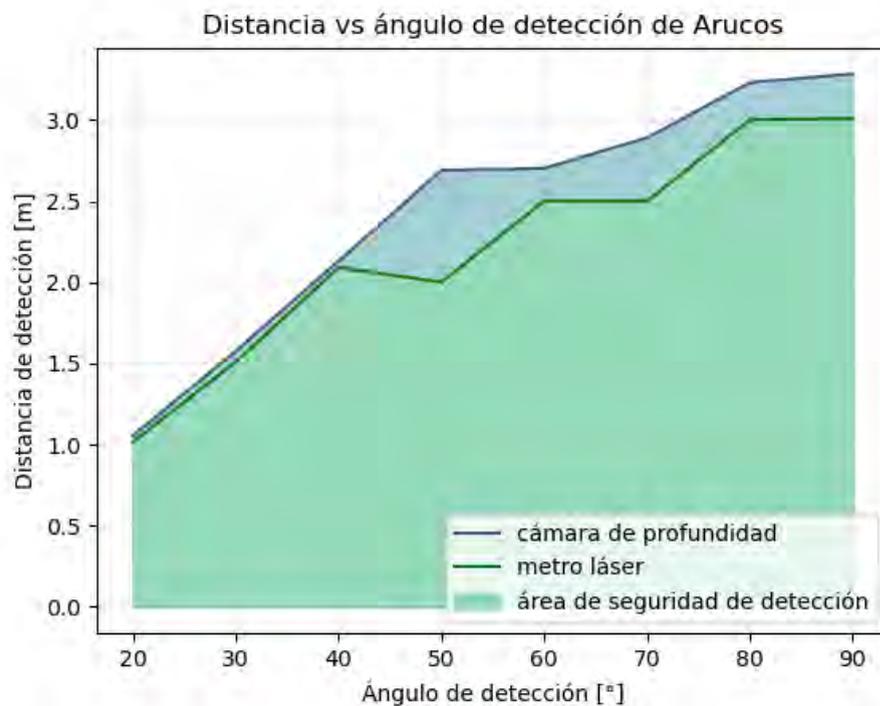


Figura 29. Área de seguridad de detección de ArUcos de 11cm x 11cm.

El error mencionado en la detección se puede ver en la Figura 30 en donde se puede ver la relación entre el valor absoluto de la diferencia entre la detección de la cámara de profundidad y el metro láser versus la distancia medida en metros. como se puede observar el incremento del error es exponencial respecto a la distancia de la detección.

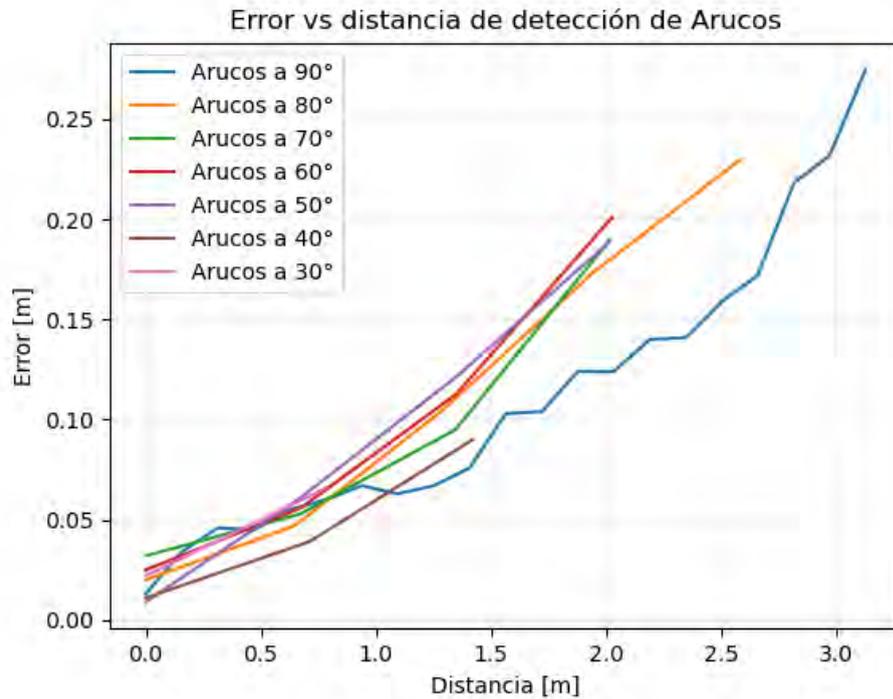


Figura 30. Gráficos de magnitud de error medido respecto a la distancia de detección con cámara de profundidad.

### **Detección de Profundidades**

Se implementó dentro de la interfaz gráfica la visualización de la cámara de profundidad a través de un mapa de color para denotar la profundidad (Ehambram, Hemme, & Wagner, 2019), en la Figura 31 se puede ver como los objetos (personas en este caso) están en distintas tonalidades azules, si la tonalidad azul es más fuerte indica que el objeto está más cerca pero también se puede ver una variación de colores desde azul, verde, amarillo y rojo. denotando en ese mismo orden la proximidades del objeto mientras más lejanos se encuentre el color tendrá una tonalidad de rojo más intensa.

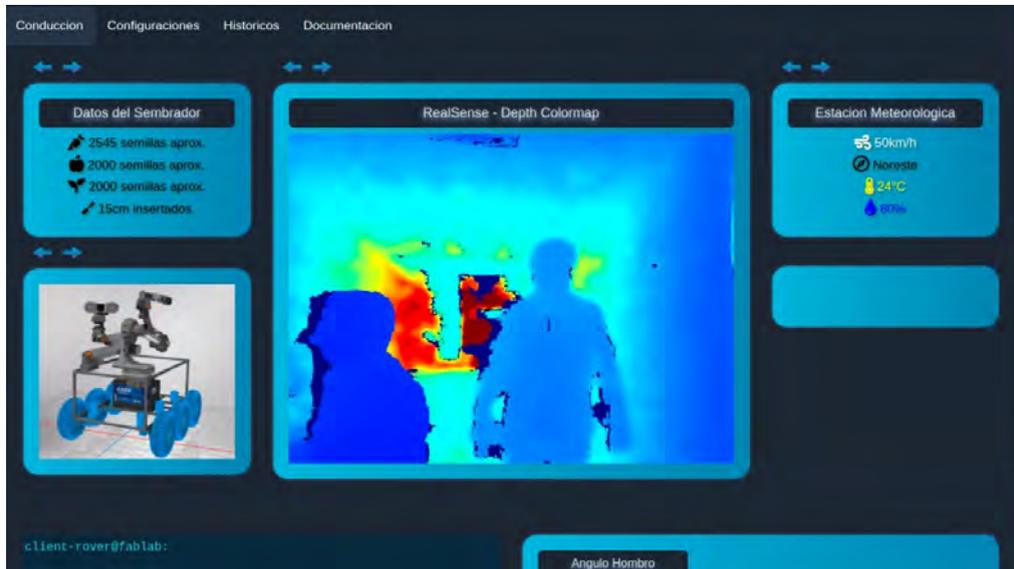


Figura 31. Interfaz gráfica de usuario con detección de profundidad activa.

## Dispositivos Adicionales

Los dispositivos adicionales son dispositivos del robot que no son esenciales para la conducción y manipulación, o que son dispositivos que se pueden acoplar y desacoplar para diferentes tareas. Entre los dispositivos adicionales se tienen sistemas de adquisición de datos ambientales, sistemas de riego y sistema de siembra para funciones agrícolas, y se tienen sistemas de posicionamiento, azimut y detección de obstáculos para la conducción remota.

### *Dispositivos de Adquisición de Datos.*

En el sistema de adquisición, uno de los valores a considerar es la velocidad del viento aproximado, en este caso no es necesario que el sensor sea sumamente preciso, ya que solo se necesita un estimado de las condiciones climáticas. Se ha hecho una regresión entre la velocidad del viento medido con un anemómetro, y el tiempo entre cada interrupción del microcontrolador que tiene un encoder acoplado a un juego de paletas impresas en 3D.

Se puede observar en la Figura 32, que la media de un arreglo de 200 datos tiene un comportamiento que se puede estimar con una regresión en las velocidades desde 2.5 m/s

hasta 6 m/s, siendo altamente inestable el encoder en una velocidad muy baja. Esto explica que a velocidades muy bajas de viento, la estabilidad en la velocidad angular del encoder también es muy baja.

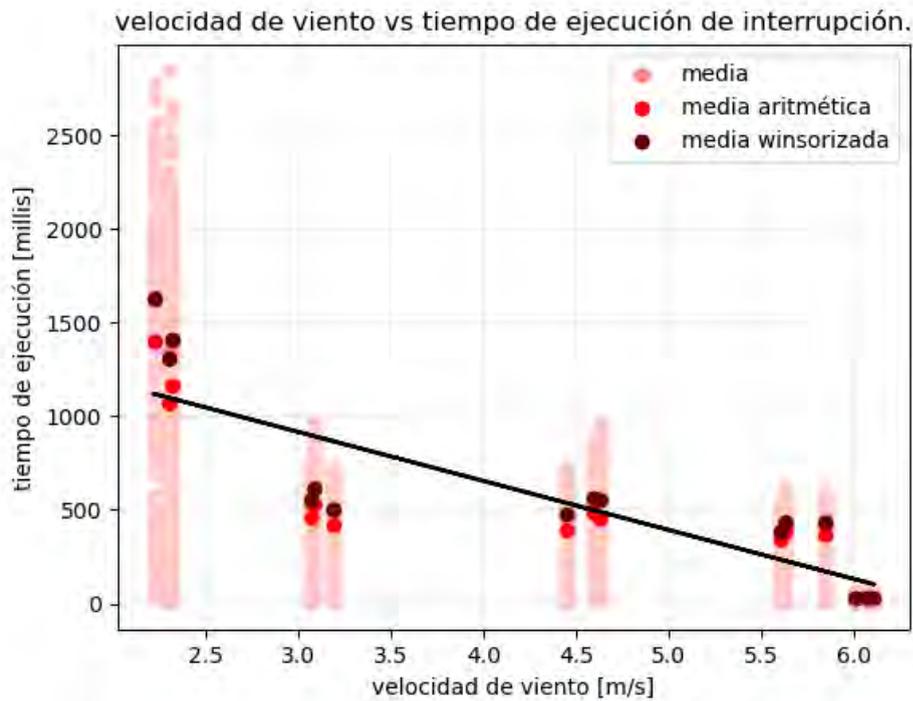
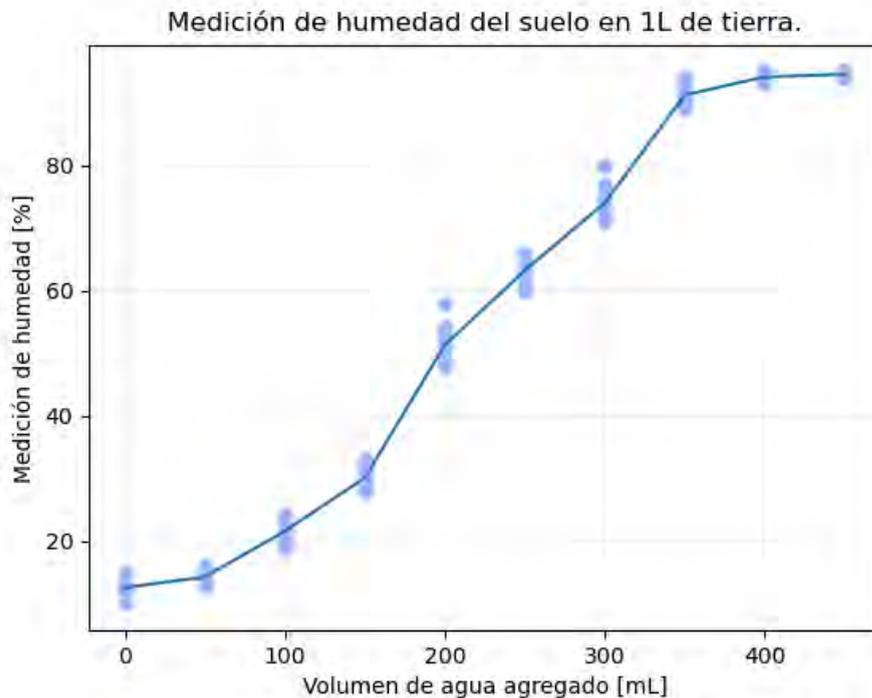


Figura 32. Representación gráfica de datos obtenidos de un anemómetro fabricado en impresión 3D.

Otro de los datos adquiridos es la humedad del suelo. En el gráfico 33 se puede visualizar el porcentaje de humedad medido en respuesta al volumen de agua en proporción a un volumen de tierra determinado, dando como resultado que, una lectura de 100% del sensor, equivale a  $\frac{2}{3}$  de tierra y  $\frac{1}{3}$  de agua.



*Figura 33. Representación gráfica. de datos obtenidos del sensor de humedad del suelo capacitivo.*

La temperatura y humedad ambientales son sumamente necesarias para mantener un control de variables ambientales. Para ello se ha utilizado un sensor HDC1080 con precisión de humedad relativa de 2% por debajo o encima del valor real, y precisión de temperatura de 0.2°C por encima o debajo del valor real. El sensor es configurable en su resolución para lecturas de 8, 11 y 14 bits desde -40° hasta 125°C.

Se han realizado pruebas del sensor obteniendo variaciones climáticas durante 3 períodos de tiempo diferentes en 3 días consecutivos para determinar el correcto funcionamiento del sensor a través del código realizado para el dispositivo de medición. En la Figura 34 se observa una representación gráfica de los datos obtenidos.

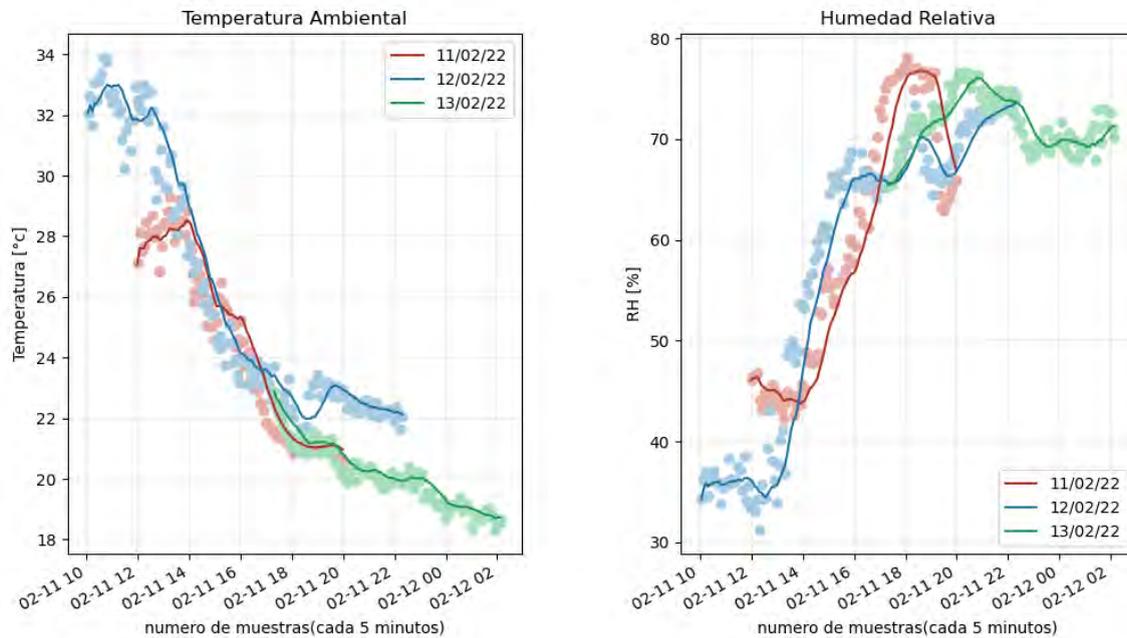
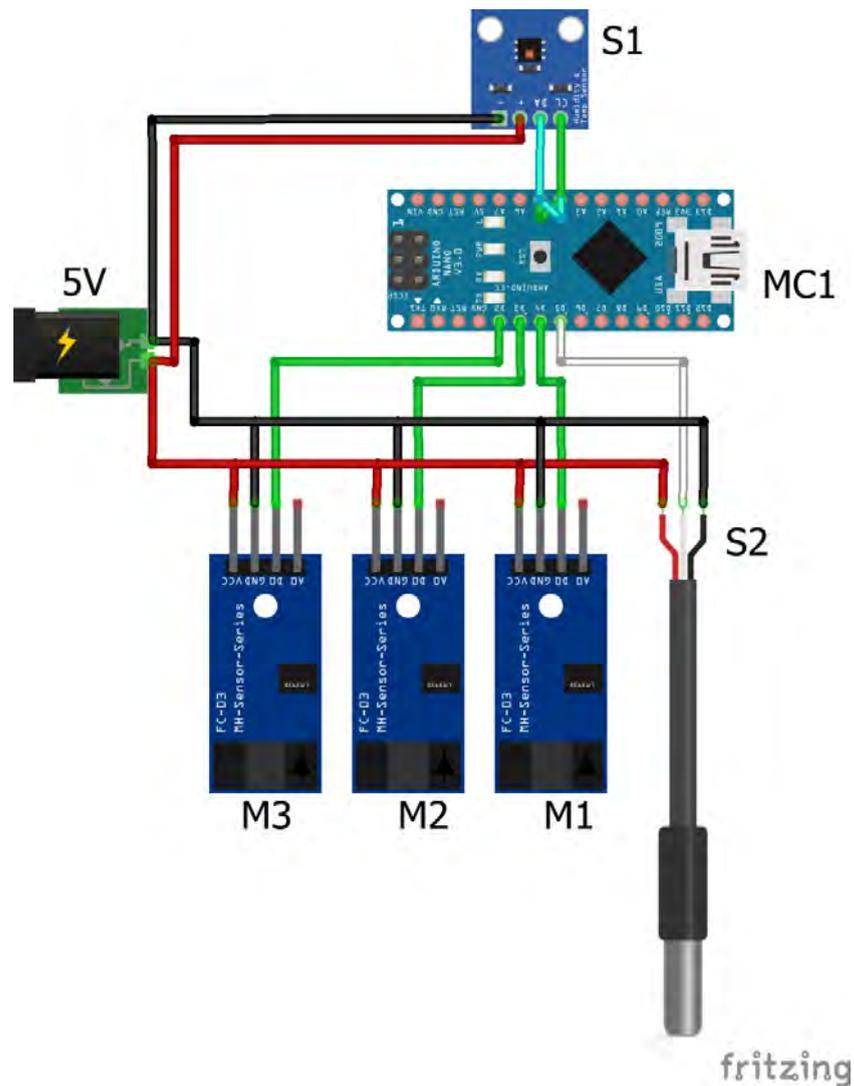


Figura 34. Representación gráfica de datos obtenidos del sensor HDC1080.

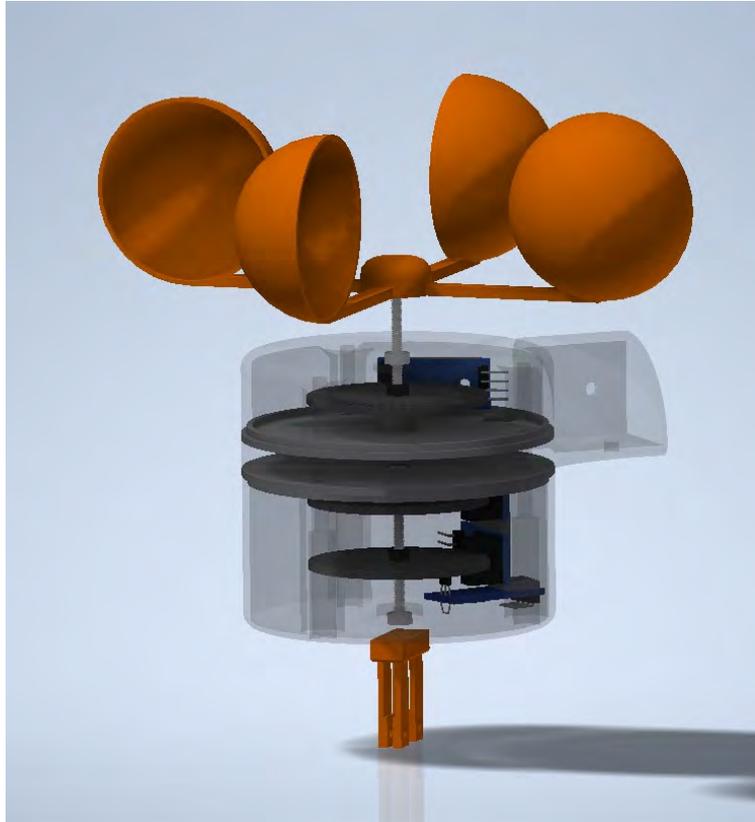
En el diagrama de la Figura 35 podemos observar, los componentes que se utilizarán en el dispositivo de adquisición de datos, los cuales constan de un sensor de humedad relativa S1 modelo HDC 1080 con comunicación sincronizada I2C, así como una sonda de temperatura S2 que es un sensor modelo DS18B20 para la medición de temperatura, este envía datos a través de comunicación one wire optimizando su comunicación y conexión, así como 3 encoders ópticos los cuales dos M1 y M2 trabajan en conjunto con un pequeño desfase entre sí, para determinar la dirección de giro de una veleta que indicará la dirección del viento, y el tercero M3 que servirá para medir la velocidad de giro del anemómetro que llevará el robot, y poder obtener los datos necesarios del área de trabajo.



*Figura 35. Diagrama de componentes electrónicos de sistema de adquisición de datos ambientales.*

El dispositivo de medición de variables climáticas se encapsula en un solo prototipo de medición como se muestra en la Figura 36, en el cual se acopla un anemómetro en la parte superior, sensor de humedad relativa, temperatura y barómetro al medio, y una veleta en la parte posterior. Los sensores mecánicos en el dispositivo son la veleta y el anemómetro, los cuales funcionan a través de encoders. Para determinar la velocidad del viento se necesita un solo encoder con un disco ranurado (el disco ranurado desarrollado tiene 45 ranuras y un radio de 70 mm). Para determinar la dirección del viento, se necesitan 2 encoders midiendo la

misma señal desfasada, y la diferencia entre las 2 señales al procesarla puede dar una señal diferente al girar en un sentido, o al girar en el otro sentido.



*Figura 36. Diseño en software de sistema de adquisición de datos ambientales.*

## ***Sistema de Riego y Sistema de Siembra***

El sistema de riego fue diseñado a partir de una bomba para fumigación de compresión mecánica, se modificó y se adaptó el tanque para luego poder conectar de manera rápida un sistema de compresores automático de presión configurable (Silalahi, Alaydrus, Rochendi, & Muhtar, 2019).

El sistema de compresores automático consta de dos compresores electromecánicos , de pistón simple , colocados en paralelo Figura 37 para obtener mejores tiempos de llenado, y alcanzar presiones más altas dentro de la referencia de trabajo. así como de una parte de control conformada por un microcontrolador aTmega328p el cual cumple con las tareas de realizar lecturas periódicas del sensor de presión MPX5500 y determinar la presión a la que

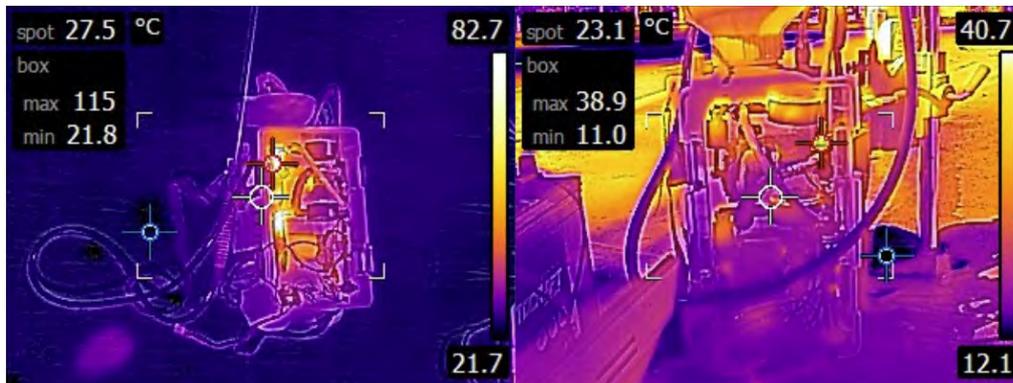
se encuentra el tanque de fumigación, para posteriormente activar o desactivar los compresores según sea requerido en ese momento, esto para obtener la presión deseada dentro del tanque la cual está configurada con un valor mínimo y un valor máximo de operación.



*Figura 37. Desarrollo de sistema de riego con ajuste de presión automática.*

El sistema de riego completo se sometió a distintas pruebas de funcionamiento, estas se realizaron durante un tiempo prolongado para simular el uso del mismo en el campo de trabajo, al terminar estas pruebas se procedió a la captura de fotografías térmicas, como se observa en la Figura 38, para evaluar las temperaturas de trabajo alcanzadas y descartar

deformaciones en las piezas plásticas de impresión 3D que sostienen los distintos componentes del sistema de riego.



*Figura 38. Análisis térmico de dispositivos de sistema de riego.*

Una de las pruebas a las que fue sometido el sistema de riego tenía como objetivo determinar la distancia que podría alcanzar el agua, medida desde la salida de la boquilla, en la tabla de datos podemos observar que la distancia tiene un crecimiento cercano al lineal respecto a las presiones, teniendo como presión mínima de trabajo 20 psi y 38 psi, y una distancia máxima de 3.8 m, como dato adicional el área en color verde en la Figura 39 bajo la curva de datos obtenidos, nos permite determinar la distancia mínima y máxima de riego según sea la presión configurada, y de igual forma una referencia de las presiones a utilizar para cumplir con el trabajo de riego de manera óptima.

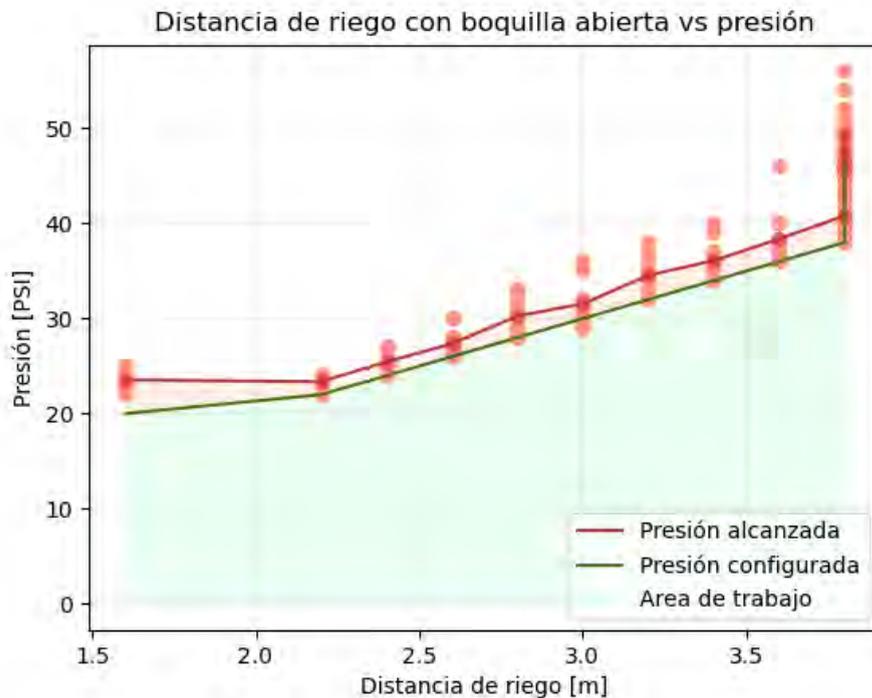


Figura 39. Representación gráfica de distancia de riego útil y presión configurada.

El sistema de siembra tiene distintos componentes, entre los que se encuentra un dispensador de semillas de color anaranjado, como se observa en la Figura 40, este funciona a través de una compuerta rotatoria, la cual controla su apertura, según sea el tamaño de la semilla, el diseño de este permite trabajar hasta con semillas de 20 mm. El mecanismo encargado de realizar la inserción de la semilla en la tierra está compuesto por tubo de aluminio cubierto por otro tubo de hierro galvanizado, se eligió esta combinación de materiales dado que el aluminio es ligero y al tener una forma cilíndrica brinda la resistencia suficiente para lograr entrar en la tierra, y el hierro galvanizado se utiliza como protección contra la intemperie y posibles golpes que el sistema reciba al momento de ser operado, el movimiento para realizar la tarea de siembra está dado por un actuador lineal, el cual se encuentra unido con el tubo de aluminio a través de una ranura en el tubo de hierro galvanizado.

Hay que mencionar que el sistema de siembra trabaja en conjunto con el sistema de riego, ya que el sistema de siembra tiene una función de riego, ya que se diseñó una boquilla especial la cual tiene ductos que permiten el flujo de agua, esto con el objetivo de evitar que

la boquilla se quede atascada con tierra, y también un riego inmediato en la posición de siembra, es un prototipo que está en desarrollo y se deben realizar las pruebas de trabajo para determinar su rango de operación, así como distintas modificaciones para un funcionamiento óptimo.



*Figura 40. Prototipo para siembra automática.*

El diagrama eléctrico muestra todas las conexiones realizadas para el funcionamiento de ambos sistemas, como se mencionaba estos trabajan en conjunto, al lado izquierdo de la Figura 41 se tiene la representación gráfica de las conexiones para el sistema de riego, donde se muestran los dos compresores M1 y M2, los cuales son controlados por el Microcontrolador 2 a través del Módulo 3 que es un módulo de Relé, y como etapa de control de alimentación el Módulo 2 que es un step down, esto para prevenir picos de tensión dañen el microcontrolador.

Del lado derecho del diagrama se encuentra la representación de conexiones del sistema de siembra, donde observamos un servomotor M4 este utilizado para el control de apertura de la compuerta del dispensador de semillas. El actuador lineal M3, controlado por el Microcontrolador 1, a través del puente H Módulo 3, indicando el sentido del movimiento, para el plegado o desplegado del sembrador, la distancia de despliegue será configurada y enviada al Microcontrolador 2, y este a través de un sensor ultrasónico Sensor 2 si la distancia de plegado es la requerida y determinar la acción, también cuenta con un sensor de humedad capacitiva Sensor 1 el cual será utilizado para la medición de humedad en el terreno donde se realiza la siembra (Schugurensky & Capraro, 2018).

Se debe mencionar que el diagrama muestra dos microcontroladores, ya que estos son parte de las herramientas y equipamiento modular en el Rover, y estos pueden funcionar en conjunto, pero el Sistema de Riego puede trabajar de manera independiente al Sistema de Siembra

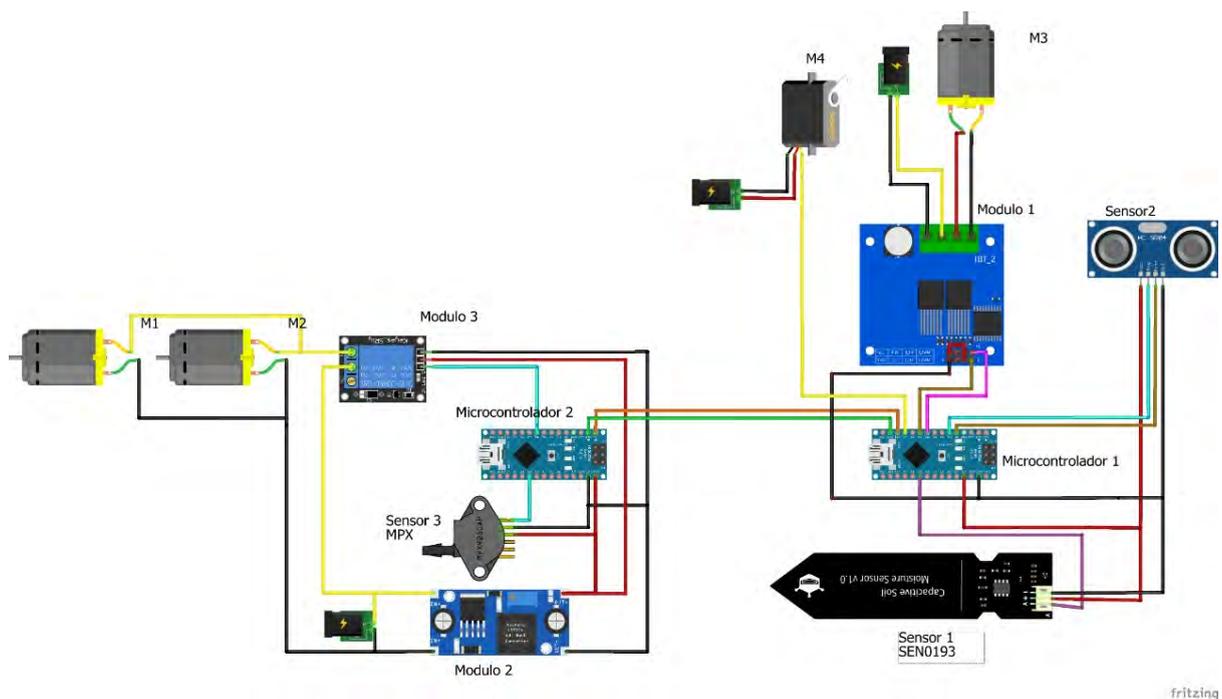


Figura 41. Diagrama de componentes electrónicos de sistemas de riego y siembra.

### ***Sistema de posicionamiento y sistema de escáner en 2 dimensiones.***

El escáner en 2 dimensiones como se observa en la Figura 42 también se conoce como RPLIDAR, y funciona girando un diodo láser infrarrojo de baja potencia y generando pulsos modulados y obteniendo lecturas de la luz reflejada. Emite luz en tiempos tan cortos que no genera ninguna fuente de peligro la exposición a este dispositivo. (Madhavan & Adharsh, 2019)

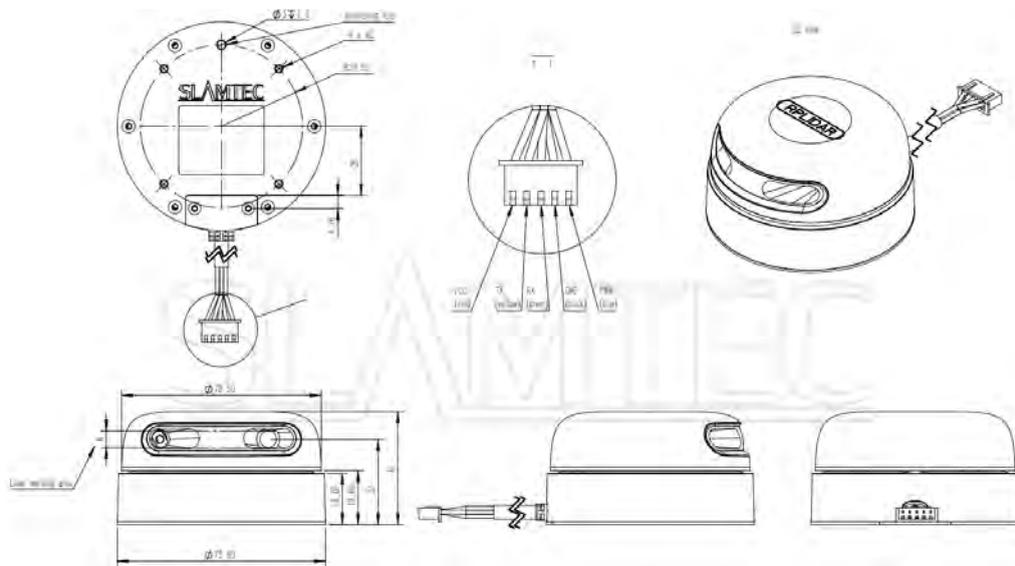


Figura 42. Escáner de 2 dimensiones RPLidar, fuente: <https://www.slamtec.com/en/Lidar/A3>

Al ser un canal serial asíncrono su sistema de comunicación, se requiere ajustar una referencia a la misma frecuencia tanto en el dispositivo transmisor de datos como en el receptor, y este ajuste se conoce como “baudios”, el cual se ajusta a 256000 baudios. Por cada revolución, la cantidad de lecturas oscila entre 50 a 1200 lecturas, dependiendo la distancia máxima de muestreo y las revoluciones a las cuales se configure mediante una señal PWM.

El código desarrollado representa un mapa de puntos de 2 dimensiones que representa los límites sobre el entorno en el que se encuentra el robot como se muestra en la Figura 43, este dispositivo es sumamente necesario para conducción remota para evitar colisiones del robot con algún obstáculo que se encuentre a la altura del escáner.

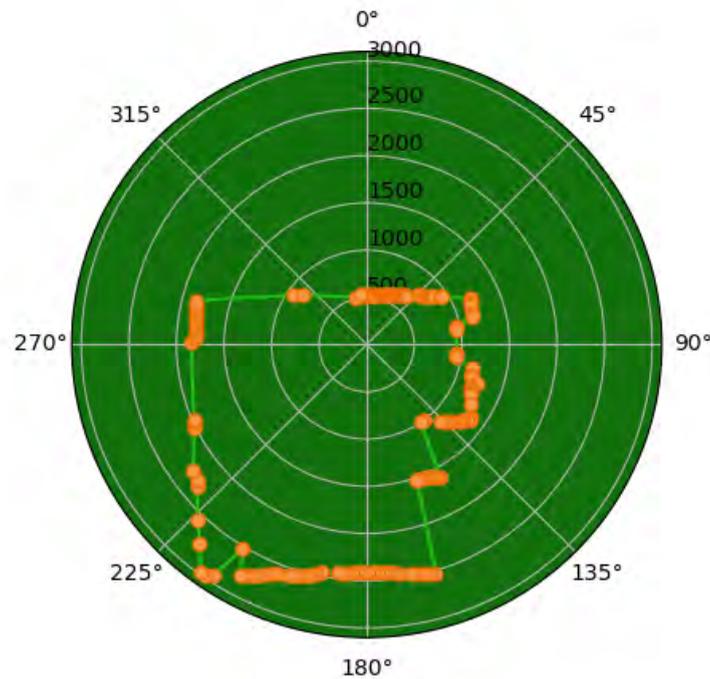


Figura 43. Mapa en coordenadas polares de datos obtenidos con el dispositivo RPLidar.

Para detectar la ubicación en la tierra, el robot utiliza un dispositivo GPS MTK3339 con interfaz de comunicación UART a 9600 baudios, 66 canales, 10 Hz de muestreo de datos y sensibilidad de -165 dBm, el cual, puede obtener una alta precisión al ser rastreado simultáneamente por 22 satélites como máximo. El formato utilizado de coordenadas es un formato NMEA. Los datos necesarios de la trama de datos son latitud, longitud y altitud.

Se muestra en la Figura 44 la trama devuelta por el GPS, tiene varias sentencias, entre las cuales sobresalen GPGGA (*Global Positioning System Fix Data*), GPVTG (*Course and Speed Information Relative to the Ground*), GPGSA (*GPS Receiver Operating Mode*) y GPRMC (*Time, Date, Position, Course and Speed Data*). El dato que será de utilidad en el proyecto es el de la sentencia GPRMC, ya que dentro de esta cadena se describen las coordenadas en formato (d) ddm.mmmm, donde “d” son grados, y “m” son minutos.

```
[GPVTG, '194.28', 'T', 'M', '0.63', 'N', '1.16', 'K', 'A*38']  
[GPGGA, '064303.000', '1435.5381', 'N', '09030.5003', 'W', '1', '4', '3.34', '1525.6', 'M', '-2.8', 'M', '0.99', '6E']  
[GPGSA, 'A', '3', '18', '20', '27', '31', '3.48', '3.34', '0.99', '05']  
[GPRMC, '064303.000', 'A', '1435.5381', 'N', '09030.5003', 'W', '0.69', '192.41', '020521', 'A*7A']  
[GPVTG, '192.41', 'T', 'M', '0.69', 'N', '1.27', 'K', 'A*39']
```

Figura 44. Trama de datos obtenidos de GPS.

El sensor MPU9250 es un sensor de 9 grados de libertad, 3 grados de libertad describen las velocidades angulares de los 3 ángulos de rotación Roll, Pitch y Yaw, otros 3 grados de libertad describen la dirección y valor de la aceleración medida en un espacio (X,Y,Z), y los últimos 3 grados de libertad describen la densidad de flujo magnético en (X,Y,Z). Es necesario destacar que, al medir densidad de flujo, cualquier alteración de campo magnético interfiere en la medición. Es por esto que, para tener buenas lecturas, debe estar situado a una distancia prudente de cualquier material ferromagnético. Al ser este sensor tan inestable, se debe contemplar el uso de un filtro de media móvil para estabilizar la señal, teniendo en cuenta que al aplicar un filtro de media móvil, la velocidad de respuesta será inversamente proporcional al tamaño de la ventana de la media aplicada. En la Figura 45 se muestra una representación gráfica del cambio de azimut medido por el sensor.

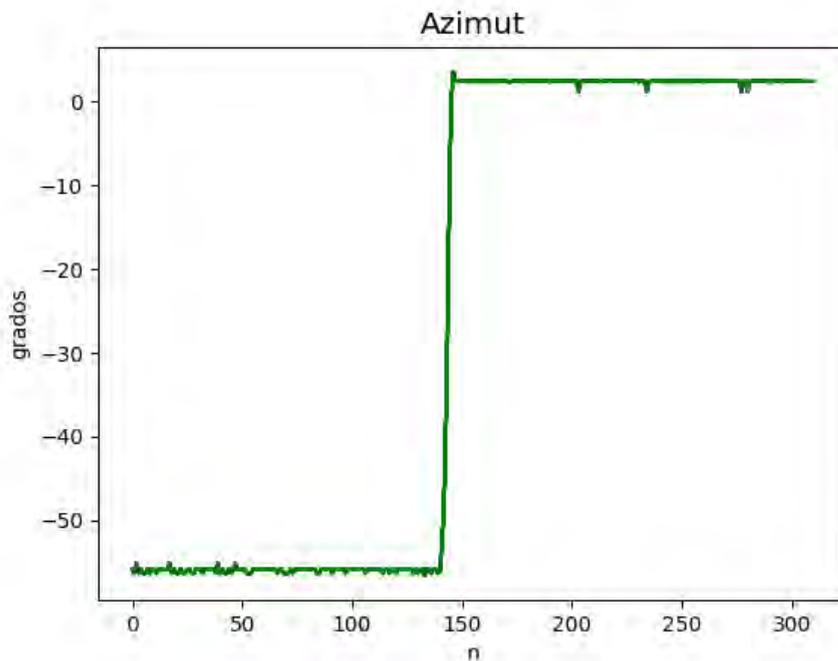


Figura 45. Representación gráfica de azimut medido con sensor MPU9250.

1. Se diseñó y desarrolló un robot móvil funcional controlado a distancia, que se moviliza a través de 6 motores y utiliza como fuente de energía una batería de ciclo profundo para tener un mayor tiempo de autonomía.
2. Se desarrolló una interfaz gráfica adaptada a diferentes vistas para streaming de video, visualización de datos y consola. También se desarrolló el software para comando del robot a distancia a través de sockets siempre que se mantenga en la misma red el robot y la computadora de operación.
3. Se desarrolló el código para desarrollar una interfaz de diferentes cámaras de video, siendo posibles las visualizaciones de video con luz infrarroja, video de profundidad, video de alta resolución, video de cámara de baja resolución y video para detección de arcos.
4. Se desarrollaron desde sus bases 2 brazos robot en diferentes configuraciones, útiles para manipulación y para movimiento de cámaras a distancia, uno de 4 grados de libertad, y uno de 6 grados de libertad.

5. Se desarrolló una interfaz de código para control a través de un escáner láser de 2 dimensiones para adquisición de datos de obstáculos del entorno del robot, complementado con la adquisición de datos de GPS de 10 Hz de frecuencia de actualización de posición, y de una unidad de medición inercial de 9 grados de libertad para lectura de aceleración, velocidad angular y campo magnético(inclinaciones y azimut).
6. Se desarrolló un sistema de riego capaz de mantenerse presurizado automáticamente(según el ajuste) en un tiempo estable que depende de la cantidad de agua que posea el tanque, y capaz de regar a una distancia máxima de 3.8 m de distancia.

## **Discusión de Resultados:**

La mecánica del robot móvil ha funcionado de la manera esperada, sin embargo, luego de algún tiempo de pruebas de 4 meses, hemos visto desgaste en las llantas y los motores con reducción de gusano, que son los que soportan el peso de todo el robot, y son los que sufren más estrés al momento de girar el robot, ya que para girar el robot, los motores de un lado giran en un sentido, y los del otro lado giran en otro sentido, aumentando la potencia necesaria para girar. Dado que estamos en la función de desarrollo de prototipos, este sería uno de los puntos a mejorar para evitar problemas futuros con el sistema motriz, junto con la batería, ya que al seleccionar una batería será de seleccionar una batería con las mismas características eléctricas, pero con un peso mucho menor.

Los objetivos del proyecto fueron realizar un prototipo que pueda ser de utilidad en la agricultura, sin embargo, el prototipo se ha desarrollado de tal manera en que pueda ser útil fuera del área agrícola. Los accesorios para agricultura puedan ser removidos de una manera fácil sin dañar el robot y que el prototipo pueda ser utilizado para otras actividades. Es necesario destacar que se ha dejado el robot listo con brazo manipulador, sistema de monitoreo móvil, sistema de luces y sistemas de adquisición de datos para desarrollar el código de software de las tareas que sean necesarias.

**Referencias**

- Albaghdadi, A. F., & Ali, A. A. (2019). An Optimized Complementary Filter For An Inertial Measurement Unit Contain MPU6050 Sensor. *Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering*, 15(2), 71-77.
- Barrientos, A., Cerro, J., Cruz Ulloa, C., Krus, A., Valero, C., Roldán, J. J., ... & Kristensen, H. L. (2021). Robótica agrícola: proyecto Sureveg sobre agricultura ecológica en cultivos en franjas.
- Chand, A. A., Prasad, K. A., Mar, E., Dakai, S., Mamun, K. A., Islam, F. R., ... & Kumar, N. M. (2021). Design and analysis of photovoltaic powered battery-operated computer vision-based multi-purpose smart farming robot. *Agronomy*, 11(3), 530.
- Chinchkar, D., Gajghate, S. S., Panchal, R. N., Shetenawar, R., & Mulik, P. (2017). Design of rocker bogie mechanism. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(1), 46-50.
- Ehambram, A., Hemme, P., & Wagner, B. (2019). An Approach to Marker Detection in IR-and RGB-images for an Augmented Reality Marker. In ICINCO (2) (pp. 190-197).
- Elangovan, N., Dwivedi, A., Gerez, L., Chang, C. M., & Liarokapis, M. (2019, October). Employing imu and aruco marker based tracking to decode the contact forces exerted by adaptive hands. In 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (pp. 525-530). IEEE.
- Kalaitzakis, M., Cain, B., Carroll, S., Ambrosi, A., Whitehead, C., & Vitzilaios, N. (2021). Fiducial markers for pose estimation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 101(4), 1-26.

- Madhavan, T. R., & Adharsh, M. (2019, January). Obstacle detection and obstacle avoidance algorithm based on 2-D RPLiDAR. In *2019 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)* (pp. 1-4). IEEE.
- Mandow, A., Martinez, J. L., Morales, J., Blanco, J. L., Garcia-Cerezo, A., & Gonzalez, J. (2007, October). Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots. In *2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems* (pp. 1222-1227). IEEE.
- Martín Varela, H. (2021). *Estudio de un rover con suspensión rocker-bogie para misiones en Marte* (Tesis de Licenciatura). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mayorga, P., Valenzuela-Coloma, H. R., Lau-Cortes, Y. S., & Mendoza-Garcia, R. F. (2015). ProGim: Parallel Robot Gimbal. Escuela Universitaria de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá.
- Nokeri, T. C. (2022). Python Web Frameworks and Apps. In *Web App Development and Real-Time Web Analytics with Python* (pp. 79-85). Apress, Berkeley, CA.
- OpenCV: Detection of ArUco Markers. (2013). Open CV. Recuperado 13 de febrero de 2022, de [https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html)
- Orihuel Arribas, V. (2021). *Robot Delta para cultivo en hileras*.
- Pico Guerrero, R. J., & Prado Fiallos, G. J. (2018). *Diseño y simulación de controladores robustos aplicados a un robot móvil y un robot manipulador* (Bachelor's thesis, Quito, 2018.).
- Poroykov, A., Kalugin, P., Shitov, S., & Lapitskaya, I. (2020). Modeling ArUco markers images for accuracy analysis of their 3D pose estimation. In *30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (GraphiCon 2020)*. Part (Vol. 2).

- Prathaban, T., Thean, W., & Sazali, M. I. S. M. (2019). A vision-based home security system using OpenCV on Raspberry Pi 3. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2173, No. 1, p. 020013). AIP Publishing LLC.
- Pereda, J. S. (2018). Robots industriales colaborativos: Una nueva forma de trabajo. *Seguridad y Salud en el trabajo*, (95), 6-10.
- Remmers, G. A. (1993). Agricultura tradicional y agricultura ecológica: vecinos distantes. *Agricultura y sociedad*, 66, 201-220.
- Schugurensky, C., & Capraro, F. (2008, December). Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. In *Actas de XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA)*. Santiago, Chile.
- Silalahi, L. M., Alaydrus, M., Rochendi, A. D., & Muhtar, M. (2019). Design of tire pressure monitoring system using a pressure sensor base. *Sinergi*, 23(1), 70-78.
- Skogan, D., Grønmo, R., & Solheim, I. (2004). Web service composition in UML. In *Proceedings. Eighth IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference, 2004. EDOC 2004.* (pp. 47-57). IEEE.
- Solaque, L. E., Sánchez, G., & Riveros, A. (2020). Diseño y pruebas con hardware en el lazo de controladores dinámicos para un robot agrícola. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 89-98.
- Sreekanta, M. H., Sarode, A., & George, K. (2020). Error detection using augmented reality in the subtractive manufacturing process. In *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (pp. 0592-0597). IEEE.
- Trianti, C. A., & Kristianto, B. (2021). Integration of Flask and Python on The Face Recognition Based Attendance System. In *2021 2nd International Conference on Innovative and Creative Information Technology (ICITech)* (pp. 164-168). IEEE.

Ueura, K., & Slatter, R. (1999). Development of the harmonic drive gear for space applications. *European Space Agency-Publications-ESA SP*, 438, 259-264.

Yang, G., Liu, Y., & Jin, M. (2020). A new control method of flexible-joint manipulator with harmonic drive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(9), 1868-1883.

Trosin, M., Dekemati, I., & Szabó, I. (2021). Measuring Soil Surface Roughness with the RealSense D435i. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(6), 141-155.

Zapata, K. P. T., & Cárdenas, J. D. J. (2019). Agricultura 4.0. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.

## Apéndice

El desarrollo del proyecto DES12 ha requerido un total de 50 semanas desde que se inició, de las cuales 28 semanas se utilizaron solamente en papelería, trámites y requerimientos para la ejecución del presupuesto del mismo. Cuando se pudo ejecutar el presupuesto, ya no existían algunas piezas en venta local, por lo cual se recurrió a comprar algunas piezas parecidas a las seleccionadas originalmente pero de capacidades diferentes. Esto llevó a rediseñar el proyecto original y a cambiar objetivos. Hemos tenido 20 semanas para desarrollar el proyecto por completo y 2 semanas para redactar el informe final. Por esta razón los resultados obtenidos son por completo resultados de laboratorio y no de campo. Sin embargo, el proyecto ha tenido resultados satisfactorios en los objetivos simplificados que se han redefinido.

### Contenido Digital

Todo el contenido digital se encuentra en un repositorio de Github. No se ha colocado directamente en el documento porque es mucho contenido, y para tener acceso siempre a la versión más actualizada.

<https://github.com/FabLabUSAC-FarmBot-Project>

En el enlace, se encuentran códigos de software, códigos de firmware, cálculos, diseños, simulaciones, fotografías, configuraciones de impresión 3D, datos y códigos de gráficos desarrollados.

## Desarrollos Mecánicos

Para la parte mecánica del robot móvil se realizaron 2 versiones diferentes que se muestran en la Figura 46, El primer robot móvil resultó ser muy ineficiente para la capacidad de los motores y el peso de la batería que obtuvimos, ya que cuando las compras fueron efectuadas, ya no se disponía de las piezas que inicialmente se solicitaron. Esto fué motivo suficiente para desarrollar la segunda versión más pequeña y menos pesada al requerir una menor cantidad de piezas, pero a su vez es una versión menos resistente a terrenos sofisticados.



*Figura 46. Desarrollo de mecanismos para robot móvil.*

El robot consta de 2 brazos con diferentes configuraciones observados en la Figura 47, uno de ellos, el brazo manipulador, puede rotar sobre su eje principal y tener un espacio de trabajo que cubre casi una esfera por completo sin considerar el obstáculo que representa el robot móvil. Tal y como su nombre lo dice, es un brazo diseñado para manipular objetos. El segundo brazo, el brazo de monitoreo, tiene opción de girar su actuador final hacia todos los ángulos, sin embargo, el único sentido de desplazamiento que tiene ese brazo es en

dirección del eje z. Esto es dado que está diseñado para mantener activo un streaming de video o para visión computarizada y no es necesario que se desplace de su lugar.

Para actividades específicas, el brazo de monitoreo tiene 2 posiciones de desplazamiento únicas, una para poder supervisar los dispositivos posteriores del robot, y otra para la manipulación frontal del brazo manipulador, desde la parte superior del mismo.



*Figura 47. Simulación de brazos sobre robot móvil.*

En el caso del brazo de monitoreo observado a la izquierda en la Figura 48, en su mayoría fué desarrollado con piezas mecánicas de comercio local (rodamientos, tornillos, etc.), perfiles de aluminio octogonales y diseños en impresión 3D. Para el desarrollo del segundo grado de libertad del brazo de monitoreo, se hizo una pieza en hierro negro a la

medida aplicando técnicas de corte y soldadura, ya que de realizarlo en impresión 3D, se hubiera consumido más de un rollo de filamento de PLA+ sin garantía a que funcionara bien.

Uno de los puntos débiles del brazo manipulador es el tercer grado de libertad del mismo, ya que para disminuir el peso (el cual genera torque en el segundo y primer grados de libertad, y eso a su vez disminuye la capacidad de carga del brazo) se utilizó un motor Nema17. Los Nema17 tienen torque muy inferior a los motores Nema 23 de los primeros 2 grados de libertad, sin embargo, con un reductor armónico este grado de libertad se mantiene funcional. Para hacer este grado de libertad más eficiente, se puede optar a desarrollarlo con un actuador lineal, con un motor Nema 17 con caja reductora de engranajes planetarios de reducción 5:1 acoplada directamente al reductor armónico, lo que puede mejorar la capacidad de carga del robot pero reducir la velocidad de trabajo.

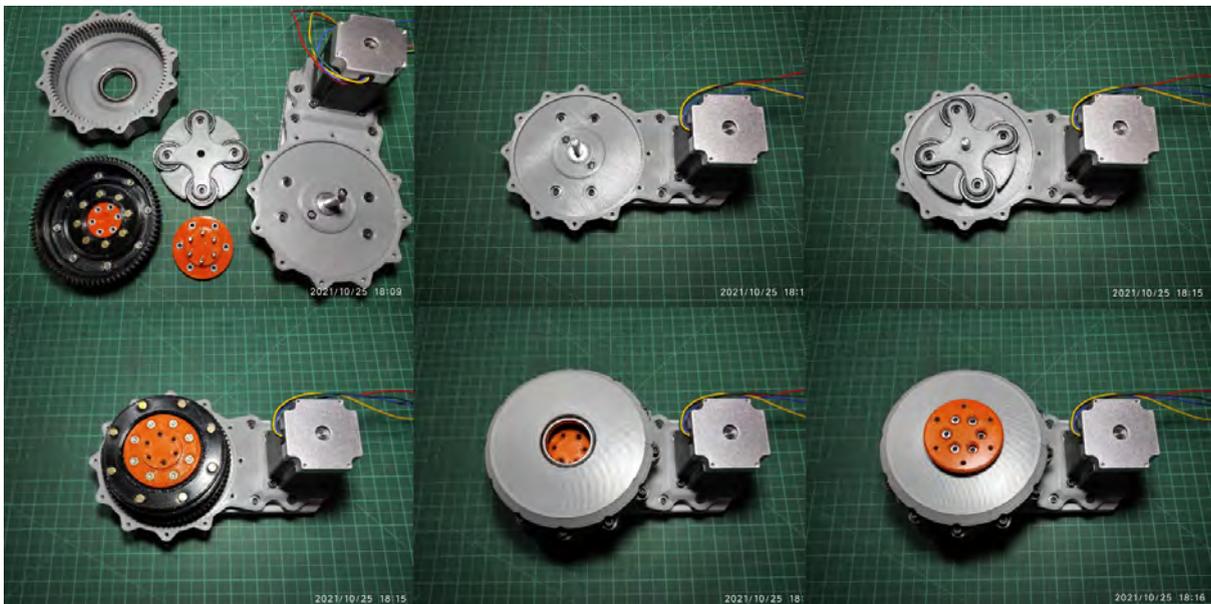


*Figura 48. Simulación de brazos sobre robot móvil.*

Los reductores armónicos desarrollados para el brazo manipulador, en su mayor parte han sido impresos en 3D. Las partes que no han sido impresas son fáciles de encontrar en el

mercado local. Parte fundamental de su impresión ha sido el engranaje flexible en TPU. Se ha determinado que para este reductor armónico en específico, a pesar de su reducción tan alta que tiene, tiene mucha pérdida por fricción, la cuál se ha disminuido en diferentes pruebas de impresión. Se determinó una medida de 4 mm de grosor para el cilindro principal del engranaje flexible, ya que con menos grosor, el engranaje flexible puede perder pasos dentro del reductor armónico, y con más de 4 mm, la fricción sube a tal punto que es muy difícil mover el engranaje flexible para un motor paso a paso Nema 23.

Una ventaja del diseño de los reductores armónicos es que con su diseño original, son muy fáciles de acoplar y desacoplar, dado que se quitan 12 tornillos de la unión entre la impresión 3D que tiene el sistema de motor y poleas, y la impresión 3D que contiene el engranaje sólido. Al extraer los tornillos quedan por separado el sistema motriz del reductor, el sistema de salida y engranaje sólido, el sistema de engranaje flexible con el acople a la salida, y el oscilador mecánico interno. En la Figura 49, se muestra el dispositivo descrito anteriormente desde sus partes separadas, hasta el acople por completo.



*Figura 49. Partes impresas en 3D de reductor armónico para motor Nema 23.*

En uno de los casos de diseño de reductores armónicos (primer grado de libertad) observado en la Figura 50, se ha complicado el diseño al punto en el que es necesario retirar 42 tornillos en orden para separar las mismas 3 piezas, ya que la pieza debe sujetar múltiples estructuras y ser desarrollada en una sola pieza. Esto nos llevó a que el desarrollo fuera más complicado que las anteriores, pero el principio de funcionamiento es exactamente el mismo al reductor del segundo grado de libertad.

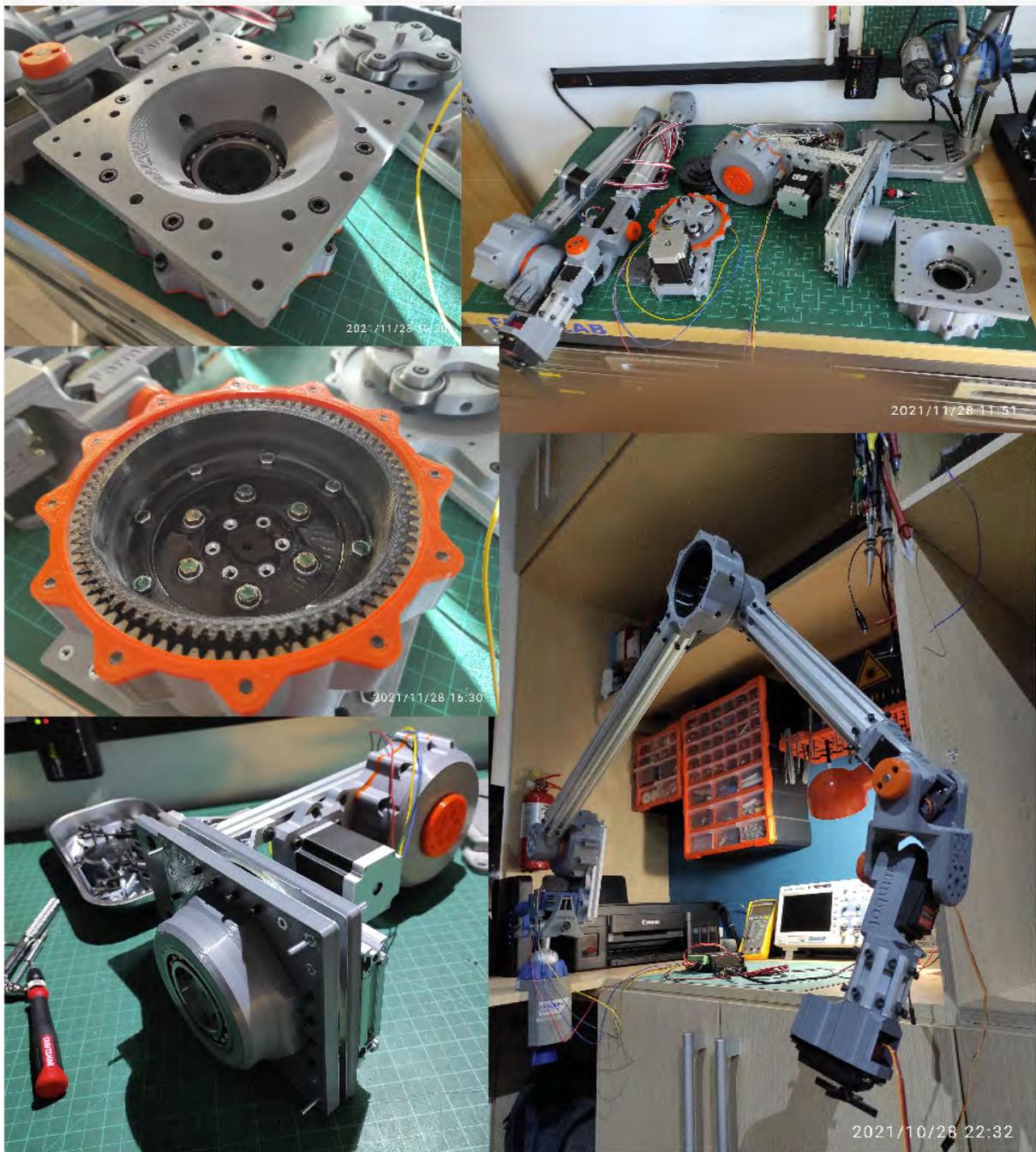
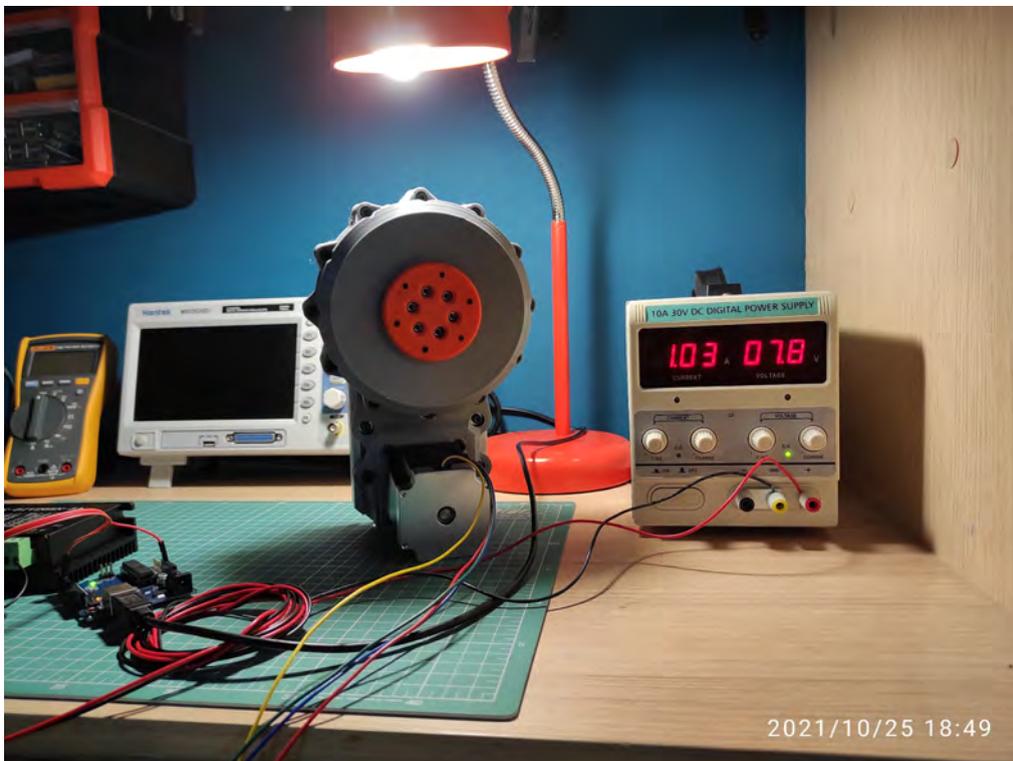


Figura 50. Partes impresas en 3D y ensamblajes de brazo manipulador.

Un dato en cuestión que no ha sido posible medir es que la eficiencia de un reductor armónico mejora después de un tiempo de 2 minutos de uso continuo. Al pasar de un tiempo indefinido de uso a un primer arranque, necesita 12v como mínimo para funcionar, sin embargo, luego de 2 minutos de uso continuo sin interrupción a una velocidad de 2 revoluciones por minuto, mantiene el mismo torque de salida funcionando con aproximadamente el 65% del voltaje inicial como se muestra en la Figura 51.



*Figura 51. Reductor armónico para motor Nema 23 funcionando con 7.8v.*

Para un reductor armónico, depende el diseño que se analice, se requieren 6 piezas impresas en 3D, entre 5 y 8 rodamientos de diferentes medidas, una varilla de acero inoxidable de 10 cm, una chumacera, 2 poleas dentadas, 60 cm de perfil de aluminio 2020, 4 escuadras para perfil de aluminio 2020, una faja, un motor paso a paso, ½ Kg de PLA+, ¼ Kg de TPU y alrededor de 60 a 90 pernos. En la Figura 52 se muestra el desacople mecánico de las piezas internas de un reductor armónico para motor Nema 23.



*Figura 52. Desacople mecánico de reductor armónico.*

Para disminuir la probabilidad de problemas físicamente, se han desarrollado las partes más necesarias del proyecto en software de diseño y simulación digital, esto se observa en la Figura 53. No optamos por diseñar y simular absolutamente todo el robot dado al corto tiempo en el que se ha realizado el proyecto. El tiempo de desarrollo de un proyecto de este tipo, siguiendo por completo los pasos en orden, requiere más tiempo del que en realidad puede otorgar la Dirección General de Investigación.



*Figura 53. Simulación mecánica de robot móvil con brazos ensamblados.*

El desarrollo electromecánico del robot por completo es superior a 75 Kg a nivel de prototipo. Por este motivo, solamente se utiliza una sola batería de ciclo profundo, dejando por completo el robot funcionando a un voltaje máximo de 12 V. Al agregar la segunda batería con el peso de ambos brazos y demás componentes, el robot estaría muy cerca del límite soportado de corriente, reduciendo drásticamente el tiempo de utilidad de los motores. En la Figura 54 se muestran todas las configuraciones de componentes para realizar las pruebas de estrés y rendimiento de trabajo.

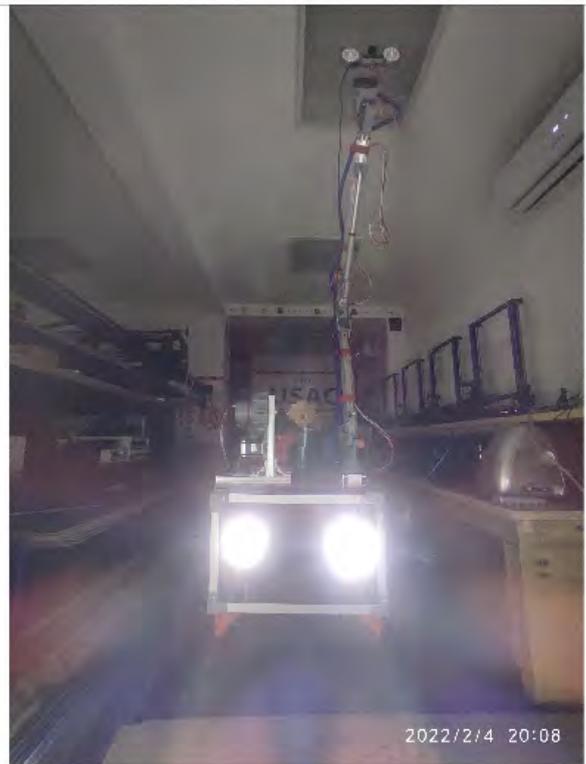


Figura 54. Fotografías reales de robot desarrollado desde diferentes perspectivas.

## Configuraciones de Impresión

Para el proyecto completo, respecto a impresión 3D solamente se utilizaron 2 materiales, PLA+ y TPU. Ambos materiales sobre todo para el desarrollo de los 2 brazos, ya que el robot móvil en su totalidad esta hecho de hierro negro, ACM y protecciones de aluminio. Para los 2 materiales utilizados en impresión 3D, ha sido necesario parametrizar las impresiones de tal modo en que el tiempo de impresión sea un poco más reducido, y ahorrando material sin sacrificar demasiada resistencia, ya que en imprimir las piezas para un solo reductor armónico, son aproximadamente 3 días de impresión con 2 impresoras funcionando en paralelo. La Figura 55 muestra el software de configuración de parámetros de impresión 3D, dónde se han desarrollado 4 perfiles de impresión para el proyecto, según la pieza que se imprima.



Figura 55. Configuración de parámetros para impresión 3D en PLA.

La impresión en TPU es más lenta que la impresión en PLA, ya que se debe bajar la velocidad de impresión, y se debe tener precaución de que no se obstruya la boquilla de la impresora 3D al generar retracciones. Esto no significa eliminar por completo las retracciones, ya que también son útiles para evitar hilos no deseados de TPU en la impresión. La Figura 56 muestra el software de configuración de parámetros de impresión 3D para TPU.

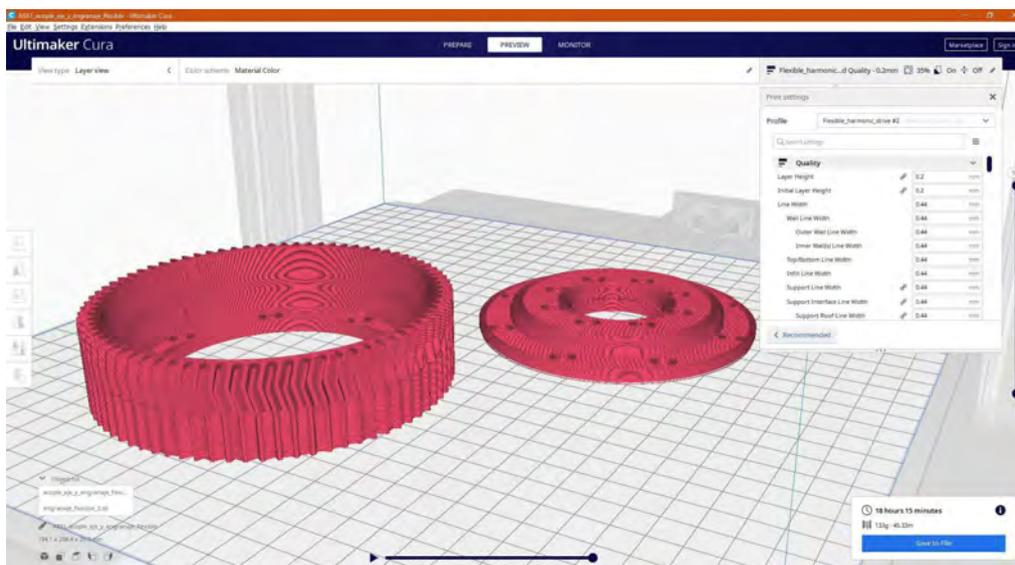
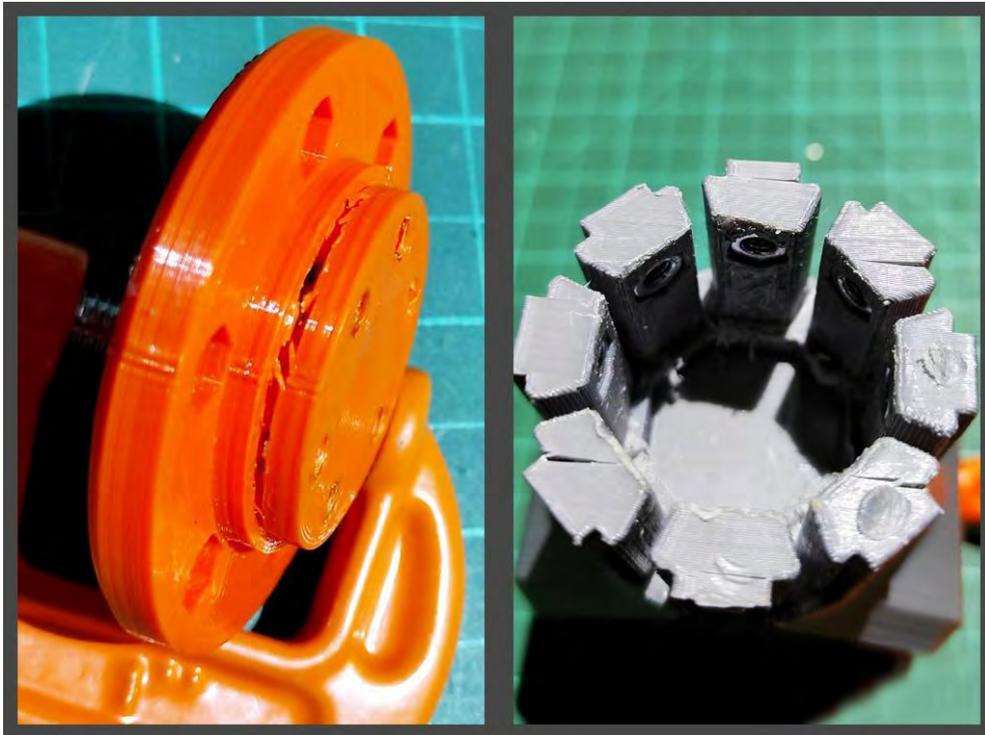


Figura 56. Configuración de parámetros para impresión 3D en TPU.

Luego de experimentar con el reductor armónico impreso en 3D, se observó que existen algunos puntos de estrés mecánico muy alto que requieren atención porque son muy fáciles de fracturarse al imprimirse con los parámetros de impresión configurados para el resto de piezas, tal y como se observa en la Figura 57. En estos casos específicos, las piezas se deben imprimir con una configuración más robusta (presente en el repositorio de github). Se da en los casos de uniones rotacionales, o piezas que resisten mucha torsión.

voltaje



*Figura 57. Pruebas de resistencia de piezas de brazo manipulador en áreas de mayor torque.*

En el caso de las piezas con configuraciones especiales, para no desperdiciar material, se configura solamente la parte deseada, en la Figura 58 se muestra de manera gráfica esta configuración. El resto de la pieza se puede dejar en la misma configuración genérica para el resto de piezas.

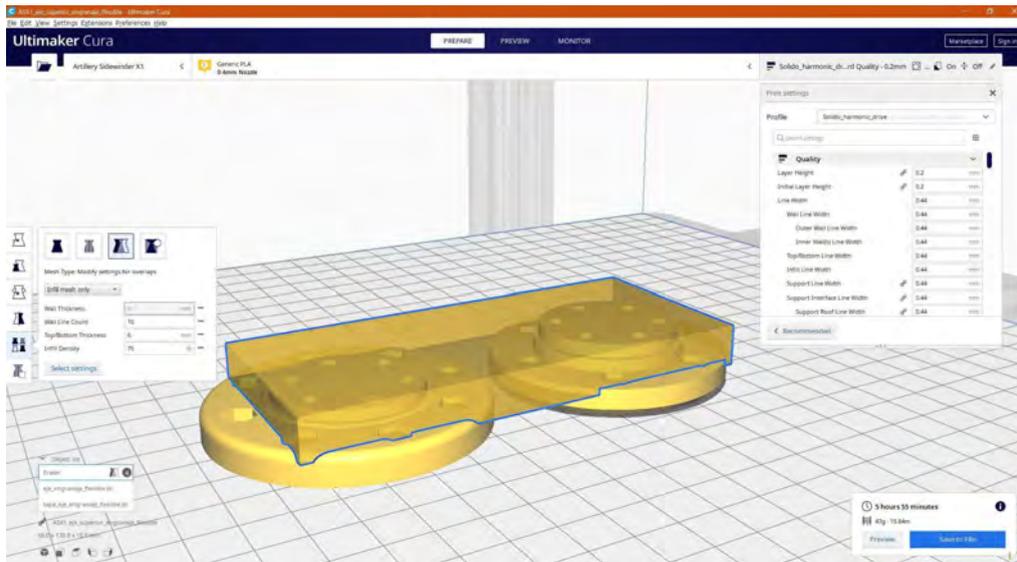


Figura 58. Configuración de impresión para alta resistencia al torque.

## Equipo de Trabajo

Por último, el equipo de trabajo con el prototipo aún en desarrollo se muestra en la Figura 59. El desarrollo del robot ha dejado en el laboratorio de innovación el primer proyecto de lo que se busca tener en un futuro dentro de la universidad como el “Instituto de Innovación”, haciendo cumplir su función de desarrollo de prototipos. El proyecto en cada paso ha dado múltiples problemas, sin embargo, el buen trabajo en equipo nos ha llevado a tener muchas más soluciones y a la vez, mucho aprendizaje de ellos.



*Figura 59. Equipo de trabajo del proyecto DES-12. Referencia: ref <https://soy.usac.edu.gt/?p=16338>*

## Aspectos éticos y legales

No Aplica.

## Vinculación

No Aplica.

## Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

Actualmente se busca la divulgación a través de la revista de ciencia, tecnología y salud de la Universidad de San Carlos. De igual manera, se nos ha realizado una entrevista con el personal de Soy USAC y del periódico universitario para documentar el desarrollo del robot a través de ellos en una nota, dejando claro que el proyecto es cofinanciado por el fondo de investigación de la Dirección General de Investigación. Se ha realizado el mismo proceso a través de la Dirección General de Investigación, a través de una nota de “Investigación para todos”.

## Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

Los resultados de este proyecto ha sido un prototipo de robot, desarrollado con el fin de volverlo multitarea pero con 3 propósitos principales relacionados a desarrollo tecnológico dentro de la agricultura. El objetivo principal de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas al que aporta el proyecto es en el ámbito de Industria, Innovación e Infraestructuras(Objetivo 9), en dónde siendo aún más específicos, se enfoca en el área de innovación.

Otro punto importante es que el prototipo puede ser útil para una mejor educación de calidad(Objetivo 4), dado que a través del dispositivo, se pueden generar múltiples aprendizajes de software o hardware en diferentes áreas de la ingeniería dentro de la misma universidad.

**Orden de pago final**

<b>Nombres y apellidos</b>	<b>Categoría (investigador /auxiliar)</b>	<b>Registro de personal</b>	<b>Procede pago de mes (Sí / No)</b>	<b>Firma</b>
Jaime Salvador Pineda Paz	Auxiliar de cátedra II	20210520	SI	

**Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación**

El coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

<b>Ing Jorge A. Balsells Orellana</b>	
<b>Nombre del coordinador del proyecto de investigación</b>	<b>Firma</b>
Fecha: 28/02/2022	

**Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o  
Coordinador de investigación del centro regional universitario**

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: Director del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<b>Vo.Bo. Ing. Julio Rufino Salazar.</b>	<b>Firma</b>
Fecha: 28/02/2022	

**Visado de la Dirección General de Investigación**

<b>Vo.Bo. Ing. Julio Rufino Salazar, Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación</b>	<b>Firma</b>
Fecha: 28/02/2022	

# Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

<p><b>Vo.Bo. Ing. Julio Rufino Salazar, Coordinador General de Programas Universitarios de Investigación.</b></p>	<p><b>Firma</b></p>
<p>Fecha: 28/02/2022</p>	