
Diseño de un sistema de control remoto, y un sistema de soporte y acople mecánico para el brazo robótico asistencial para el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA

José Rodrigo Corona Conde



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de un sistema de control remoto, y un sistema de soporte y acople mecánico para el brazo robótico asistencial para el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA

Trabajo de graduación presentado por José Rodrigo Corona Conde para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de un sistema de control remoto, y un sistema de soporte y acople mecánico para el brazo robótico asistencial para el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA

Trabajo de graduación presentado por José Rodrigo Corona Conde para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

Vo.Bo.:



(f) _____
Ing. Pablo Mazariegos

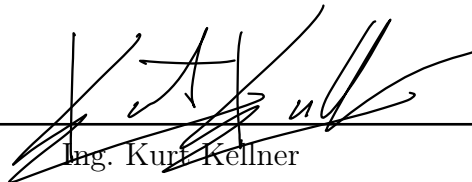
Tribunal Examinador:



(f) _____
Ing. Renato Conedera



(f) _____
MSc. Carlos Esquit



(f) _____
Ing. Kurt Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de enero de 2022.

Lista de figuras	VII
Lista de cuadros	VIII
Resumen	X
Abstract	X
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Robot ROSA ONE	2
2.2. Primer etapa	3
2.3. Segunda etapa	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Alcance	7
6. Marco teórico	8
6.1. Tarjetas de circuito impreso	8
6.2. Comunicación Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART)	9
6.3. Microcontrolador	9
6.4. Control remoto	10
6.5. Diseño Asistido por Computadora (<i>CAD</i>)	10
6.6. Interfase Humano-Máquina (HMI)	11
6.7. Sistema de guía y rastreo <i>VarioGuide</i> de BrainLab	11
6.8. Pantalla TFT LCD	12
6.9. Interfaz Periférica Serial (SPI)	12
6.10. Codificador rotativo	13

6.11. Conector BNC	13
7. Sistema de Control Remoto	14
7.1. Selección de componentes electrónicos	15
7.1.1. Selección de microcontrolador	15
7.1.2. Selección de codificador	16
7.1.3. Selección de pantalla	17
7.1.4. Selección de interruptor	17
7.2. Prototipo 1	18
7.2.1. Diseño mecánico y fabricación	18
7.2.2. Algoritmo para programación	22
7.2.3. Diseño electrónico	27
7.3. Prototipo 2	30
7.3.1. Diseño mecánico	30
7.3.2. Diseño electrónico	33
7.3.3. Programación de algoritmo	37
8. Diseño físico de la caja de soporte	43
8.1. Selección de material y componentes	44
8.2. Diseño de prototipo 1	47
8.2.1. Sistema de acople	48
8.3. Diseño de prototipo 2	50
8.3.1. Sistema de fijación para la base del brazo	54
8.3.2. Cálculos del cajón	55
8.3.3. Análisis de volteo respecto un eje que atraviesa lo ancho del cajón . . .	56
8.3.4. Análisis de volteo respecto un eje que atraviesa lo largo del cajón . . .	57
9. Conclusiones	58
10.Recomendaciones	59
11.Bibliografía	60

Lista de figuras

1.	Robot ROSA ONE	2
2.	Visualización de la máquina utilizada en las cirugías en HUMANA	3
3.	Primer prototipo del brazo robótico asistencial y su sistema de control remoto. Etapa 1.	3
4.	Diseño 3D de la segunda etapa del brazo robótico asistencial	4
5.	Segundo prototipo del sistema de control remoto	4
6.	Imagen de una tarjeta con circuito impreso	8
7.	Cable USB tipo B a utilizar	9
8.	Ejemplo de un microcontrolador PIC16F877 de la empresa Microchip	9
9.	Ejemplo de un control remoto de una consola de videojuegos	10
10.	Diseño asistido por computadora	10
11.	Ejemplo de una interfase humano-máquina	11
12.	Herramientas utilizadas dentro de la sala de operaciones.	11
13.	Ejemplo de una pantalla TFT LCD	12
14.	Ejemplo de la comunicación SPI	12
15.	Funcionamiento del codificador rotativo	13
16.	Conectores macho y hembra BNC	13
17.	Codificador de tecnología mecánica	16
18.	Pantalla TFT LCD de 3.2".	17
19.	Interruptor de retención seleccionado	17
20.	Diseño 3D de la base del control remoto.	18
21.	Impresión 3D de la base del control remoto.	19
22.	Diseño 3D de la tapadera del control remoto.	19
23.	Impresión 3D de la tapadera del control remoto.	20
24.	Probando el circuito impreso sujetado a la tapadera con los únicos 2 puntos de soporte.	20
25.	Versión diseñada del acrílico 3D y su versión fabricada	20
26.	Montaje del acrílico protector en la base	21
27.	Diseño 3D de la perilla para el codificador rotatorio.	21
28.	Impresión 3D de la perilla para movimiento del codificador rotatorio.	21
29.	Diagrama de flujo: inicio del programa.	22

30.	Diagrama de flujo: selector de modo automático o manual	23
31.	Diagrama de flujo: método que permite seleccionar uno de los múltiples motores	24
32.	Diagrama de flujo: lógica utilizada para la lectura del codificador cuando este sea girado para cualquier dirección.	25
33.	Diagrama de flujo: método que permite el funcionamiento del botón que trae integrado el codificador	26
34.	Circuito eléctrico implementado para el prototipo 1	27
35.	Vista isométrica frontal 3D del prototipo 1 de la PCB	28
36.	Vista isométrica trasera 3D del prototipo 1 de la PCB	28
37.	Vista 2D de la placa de circuitos impresa	29
38.	Colocación por fuera del acrílico para proteger la pantalla.	30
39.	Diseño de tapadera versión 2 con 2 puntos de apoyo agregado.	31
41.	Vista superior del control remoto ensamblado y funcionando con sus luces decorativas.	31
40.	Diseño de perilla en 3D junto con la prueba de iluminación que se hizo para demostración de funcionamiento	32
42.	Prototipo 2 del control remoto funcionando con su cable USB-B.	32
43.	Esquemático del circuito implementado para el prototipo 2	33
44.	PCB fabricada montada sobre la tapadera mostrando su funcionamiento con la iluminación y los datos mostrados en pantalla	34
45.	Vista del ATmega328P montado sobre la PCB debajo de la pantalla.	34
46.	Vista 2D de la placa de circuitos impresa	35
47.	Vista isométrica frontal	36
48.	Vista isométrica posterior	36
49.	Descripción inicial del programa y su configuración inicial.	37
50.	Método utilizado para distinguir entre modo manual y modo automático.	38
51.	Método que permite la función del sistema en modo automático	38
52.	Método que permite la función del sistema en modo manual.	39
53.	Método que permite la selección del motor que se desee utilizar para controlar.	39
54.	Método que permite la selección de sensibilidad para mover cada motor en mayor o menor cantidad.	40
55.	Método que envía los datos necesarios al sistema principal para que el funcionamiento de este.	41
56.	Método para el funcionamiento del codificador rotatorio.	41
57.	Demostración del código funcionando junto con el sistema principal del brazo robótico asistencial.	42
58.	Control Remoto junto al sistema principal y el brazo robótico asistencial.	42
59.	Modelo de barra de aluminio prefabricado	44
60.	Uniones y soportes angulares para la sujeción de las barras de aluminio	44
61.	Tuerca y tornillo que se utilizará para el ensamblaje de diversos componentes.	45
62.	Riel y rodamiento utilizado para el mecanismo de desplazamiento para la base y el brazo robótico	45
63.	Figura que muestra el cuadro de dimensiones y capacidades para varios rieles lineales	46
64.	Figura que muestra el cuadro de dimensiones y capacidades para varios rieles lineales	46
65.	Llanta utilizada en el ensamble del cajón 1.	47

66.	Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.	47
67.	Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.	48
68.	Sistema de sujeción de la camilla que se encuentra en la sala de operaciones en la clínica HUMANA.	49
69.	Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.	49
70.	Estructura de aluminio con las nuevas medidas que da forma al cajón y soporta el brazo robótico	51
71.	Vista isométrica del cajón completo	52
73.	Sistema de acople instalado en el cajón con su sistema de rieles y sujeción "BNC".	53
72.	Distintos niveles internos del cajón y los elementos que incluirán.	53
74.	Mecanismo basado en conectores BNC utilizado para una fácil separación y sujeción de las piezas móviles.	54
75.	Base sugerida del brazo robótico (pieza verde) y base de aluminio donde el brazo será montado.	54
76.	Llanta con sistema de freno utilizada en el prototipo 2.	55
77.	Vista del cajón unido con el brazo robótico asistencial	55
78.	Diagrama de cuerpo libre para las fuerzas del cajón y del brazo	56
79.	Ecuaciones para análisis de momento	56
80.	Diagrama de cuerpo libre para las fuerzas del cajón y del brazo	57
81.	Ecuaciones para análisis de momento	57

Lista de cuadros

1.	Características principales de los microcontroladores investigados	15
2.	<i>Trade study</i> de las características principales de los microcontroladores	15
3.	Características secundarias para los microcontroladores investigados	16
4.	<i>Trade study</i> de las características secundarias de los microcontroladores. . . .	16

La situación actual dentro de la sala de operaciones del Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA presenta problemas de tiempo cuando se realizan operaciones en el cerebro del paciente para tratar la epilepsia. Este problema se encuentra en lo complejo que es calibrar un brazo mecánico con la precisión que otra máquina de sensores solicita, pues cuando se trata del cerebro humano, un milímetro puede ser la diferencia entre el éxito y el fracaso.

El presente de esta tesis consiste en investigar, diseñar e implementar una solución para el desarrollo de un sistema de control remoto que controle un brazo robótico y un sistema de soporte y acople que permita el ensamblaje del brazo y la sujeción a la camilla de cirugía. Estos serán utilizados en el Centro HUMANA para facilitar y reducir el tiempo de las cirugías.

El propósito de diseñar un sistema de control remoto es proporcionar una herramienta cómoda y funcional que le permita al operario controlar el mecanismo del brazo robótico de manera sencilla, reduciendo el tiempo, esfuerzo y arduo proceso de calibración que este toma. La propuesta de solución a implementar es la programación de un algoritmo que ejecute comandos y realice el envío de datos para el control del brazo robótico. Acompañado del algoritmo se tiene un circuito electrónico con botones, un codificador, una pantalla y otros componentes que estarán realizando acciones para que se puedan procesar los datos y que luego sean enviados mediante un cable USB por medio de comunicación UART.

Además del sistema del control remoto, se desarrollará un sistema de soporte y acople mecánico que tiene como propósito tener una base donde se colocará al brazo robótico asistencial y que este pueda acoplarse al sistema de sujeción que tiene la camilla en donde colocan al paciente. Dentro de este sistema de soporte también se colocarán los sistemas electrónicos y eléctricos del brazo, esto para tener un sistema ordenado, centralizado y protegido.

Este proyecto se ha desarrollado a lo largo de dos años con distintas generaciones de estudiantes, dejando como antecedentes dos prototipos que han servido de ayuda y referencia para la continuación del mismo, y que, en esta tercer etapa, permitirán obtener un prototipo funcional más acercado al producto final.

The current situation in the operating room during the surgery process presents a problem in the high amount of time and effort that it takes to calibrate a guide system and the principal mechanic arm for the insertion of electrodes in the patient's brain, causing that these become more laborious, tiring and prolonged.

The present of this thesis consists of investigating, designing and proposing a solution for the development of the remote control system that aims to control the robotic arm and a support and coupling system that allows the assembly of the arm, the subjection to the surgery stretcher and that protects the control and power system. These will be used in the HUMANA Center for Epilepsy and Functional Neurosurgery to facilitate surgeries in the treatment of epilepsy in Guatemala.

The purpose of designing a remote control system is to provide a comfortable and functional tool that allows the operator to control the robotic arm mechanism simply, reducing the effort and arduous calibration process that it takes and more importantly, the operating time. The proposed solution to implement is the programming of an algorithm that executes commands and sends data to control the robotic arm. Accompanied by the algorithm (developed in C/C++ language) there is an electronic circuit with buttons, an encoder, a screen and other components that will be performing actions so that the data can be processed and then sent through a USB cable through communication. UART.

In addition to the remote control system, a mechanical support and coupling system will be developed whose purpose is to have a base where the assistance robotic arm will be placed and that it can be attached to the clamping system that the stretcher has where the patient is placed. Within this support system the electronic and electrical systems of the arm will also be placed, to have an orderly, centralized and protected system.

This project has been developed over two years with different generations of students, leaving as antecedents two prototypes that have served as help and reference for its continuation, and that, in this third stage, will allow obtaining a closer functional prototype to the final product.

El centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA ha ayudado a más de 5,000 personas por año a combatir la epilepsia en Guatemala mediante medicamentos y/o cirugías que detienen o disminuyen las convulsiones del paciente. Estas cirugías se realizan mediante una máquina que les permite introducir electrodos en el cerebro del paciente para extirpar zonas del cerebro dañadas que provocan las convulsiones. Esta máquina consta de 2 elementos importantes: un sistema de sensores de posición y guía, y un sistema de brazo mecánico que ayuda al cirujano a aumentar la estabilidad y puntería a la hora de insertar un electrodo en el cerebro del paciente.

Durante la realización de las neurocirugías en HUMANA, los doctores cirujanos enfrentan un problema: el tiempo que toma operar al paciente. Este tiempo es considerablemente prolongado ya que el brazo que utilizan para ayudarse a operar es puramente mecánico y el calibrar la herramienta guía en el extremo del brazo es bastante complicado. En una reunión que se tuvo con el doctor cirujano en HUMANA, se nos informó que el tiempo es de entre 20 y 30 minutos por inserción de electrodo y son entre 5 y 10 electrodos que se insertan en la mayoría de operaciones. Con estos datos se puede apreciar la alta cantidad de tiempo que toma únicamente el calibrar el sistema (además de lo que toma la operación como tal), por lo que se convierten en amplias horas de trabajo al día y hasta varias cirugías al mes.

La forma en que se enfrentará este problema es mediante el análisis, diseño y fabricación de un brazo robótico asistencial que reduzca el esfuerzo y tiempo de calibración. Pero para controlar este brazo robótico se requiere de un dispositivo electrónico que permita la comunicación entre el robot y el cirujano, quien será el que le envíe los comandos para su debido funcionamiento, y también un sistema que soporte el brazo y se acople al sistema de sujeción de la camilla de la sala de operaciones. De estos dos sistemas se estará tratando en este trabajo e informe, los cuales le informarán sobre el análisis, diseño y fabricación de prototipos que cumplan con el objetivo de controlar y soportar el brazo mecánico.

2.1. Robot ROSA ONE

El robot ROSA ONE, de la empresa Zimmer Biomet, es un ejemplo de lo que se tiene estimado llegar en fases finales de este proyecto. Este robot cuenta con un sistema de control automatizado que permite analizar las tomografías del paciente y, por medio de un sistema de referencias y guiado, este puede colocarse en la ubicación donde se pretende insertar el electrodo de forma muy precisa y estable. [1]



Figura 1: Robot ROSA ONE



Figura 2: Visualización de la máquina utilizada en las cirugías en HUMANA

2.2. Primer etapa

En el año 2019 se dio inicio al proyecto de este brazo robótico asistencial para cirugías, el cual se dio a conocer en una reunión con el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA. Este prototipo comenzó con diseños mecánicos sencillos y fabricado con fibra de densidad media (MDF) en las primeras etapas, y con ácido poliláctico (PLA) en las siguientes etapas. Estos diseños no fueron eficaces en cuanto la seguridad y rigidez que deben tener para garantizar la precisión y estabilidad que se requieren durante la operación, pero como todo diseño inicial, dieron las bases para la mejora progresiva del proyecto.

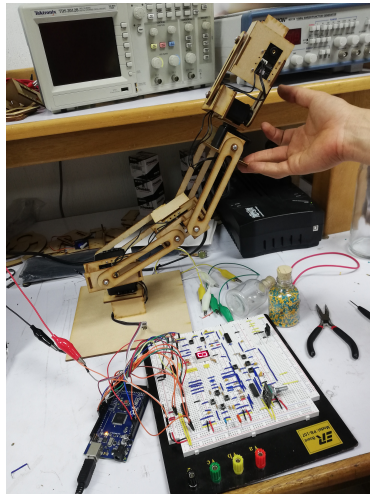


Figura 3: Primer prototipo del brazo robótico asistencial y su sistema de control remoto. Etapa 1.

2.3. Segunda etapa

Siguiendo con el desarrollo del proyecto, en 2020 se dio continuación a este en el cual se buscó desarrollar ya de una manera más profesional, con un diseño que no involucrara el uso de MDF y tuviera una apariencia más similar al robot ROSA ONE y con un sistema de control más avanzado, con motores de mayor potencia y calidad, así como un sistema electrónico más sofisticado. Lamentablemente ya no se pudieron fabricar todas las piezas necesarias para crear un prototipo funcional, debido al virus COVID-19 que ocasionó la pandemia en nuestro país y el mundo.

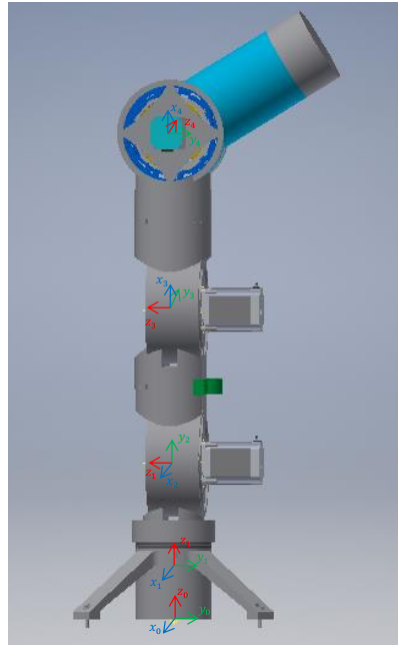


Figura 4: Diseño 3D de la segunda etapa del brazo robótico asistencial



Figura 5: Segundo prototipo del sistema de control remoto

El presente proyecto busca desarrollar un sistema de control remoto para controlar un brazo robótico que asistirá en las cirugías para el tratamiento de la epilepsia, haciendo de este un proceso más fácil, rápido y preciso. También se incluye el sistema de soporte y acople.

La situación actual de estas cirugías consiste en insertar electrodos en el cerebro del paciente en puntos específicos previamente seleccionados por el neurocirujano y la máquina con la que trabajan posee un sistema de rastreo digital muy avanzado (VarioGuide de Brain-Lab), pero un sistema mecánico de puntería bastante ineficiente, ya que toma alrededor de 20 a 30 minutos el calibrarla para poder insertar un único electrodo. Considerando que las cirugías requieren insertar bastantes electrodos, este procedimiento de calibración se vuelve muy tedioso y conlleva a que la cirugía tome hasta varias horas.

Este reporte como tal presenta el diseño del control remoto y tiene el fin de poder controlar el brazo por medio de botones y otros componentes electrónicos para mayor facilidad en el control del mismo. Esto permitirá poder ajustar el sistema guía con mayor rapidez y precisión, lo cuál ayudará a que estas operaciones mantengan y mejoren su eficacia así como su eficiencia.

Además, este brazo debe acoplarse al sistema con el que sujetan la cabeza del paciente, ya que este se considera una referencia para el sistema de rastreo VarioGuide y para ello es que se desarrollará el sistema de soporte y acople. Este también nos permitirá sostener el brazo robótico y resguardar su sistema electrónico y eléctrico.

4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control remoto para la selección y operación manual del brazo robótico asistencial y una base soporte con un mecanismo que se acople a la mesa de operaciones del Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de control remoto que incluya el control físico, tarjeta de circuito impresa, microcontrolador y protocolo de comunicación hacia el controlador principal.
- Diseñar un dispositivo de soporte sobre el cual se instale el brazo robótico asistencial.
- Diseñar un mecanismo que se acople a la mesa de operaciones del centro HUMANA.

CAPÍTULO 5

Alcance

Lo desarrollado en este proyecto otorga un prototipo funcional de control remoto que permite operar el brazo robótico asistencial de manera fácil e intuitiva, con diferentes opciones de precisión y velocidad para que el operario pueda posicionar el efector final del brazo con la guía de operación en una posición deseada. Además, presenta el diseño de un cajón en el se que puede montar el brazo robótico asistencial y un sistema de acople que permite la unión del cajón con la mesa de operaciones presente en la sala del centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA.

6.1. Tarjetas de circuito impreso

También llamada PCB por su nombre en inglés *Printed Circuit Board* es una placa en la que se imprime un circuito eléctrico en la que se montan componentes electrónicos para su respectivo funcionamiento. Estas placas constan de dos partes esenciales: el cuerpo aislante y la capa conductora. El cuerpo es fabricado con un material dieléctrico (comúnmente fibra de vidrio FR4) que sea rígido para poder sostener los componentes y que tenga forma (también pueden ser flexibles si la aplicación lo requiere). La capa conductora se encuentra sobre la superficie del cuerpo y el material más utilizado es el cobre, por su alta conductividad eléctrica [2].

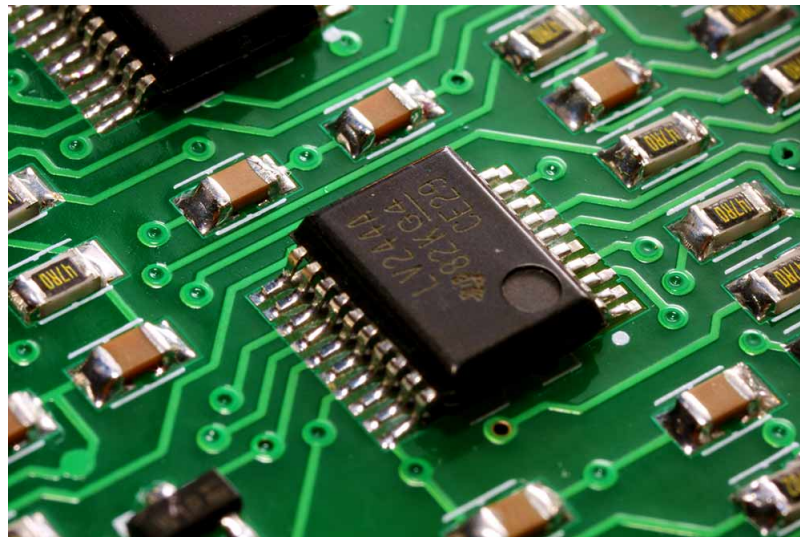


Figura 6: Imagen de una tarjeta con circuito impreso

6.2. Comunicación Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART)

La forma en que se conectará el mando con el brazo robótico es por medio de un cable USB tipo B. Este cable permitirá que se pueda utilizar la comunicación Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART) más conocida como comunicación serial, así como que sea un cable fácil de obtener y que tenga una longitud suficiente para operarlo a una distancia cómoda. [3]



Figura 7: Cable USB tipo B a utilizar

6.3. Microcontrolador

Es un circuito integrado digital que tiene amplias aplicaciones por su versatilidad de ser programable una alta cantidad de veces. Este circuito consta de una Unidad Central de Proceso (CPU), memorias (ROM y RAM) y periféricos de entrada y salida. Un microcontrolador nos permitirá poder controlar la pantalla, los diferentes botones, componentes y la comunicación serial que se requiere para el funcionamiento del brazo robótico asistencial. [4]

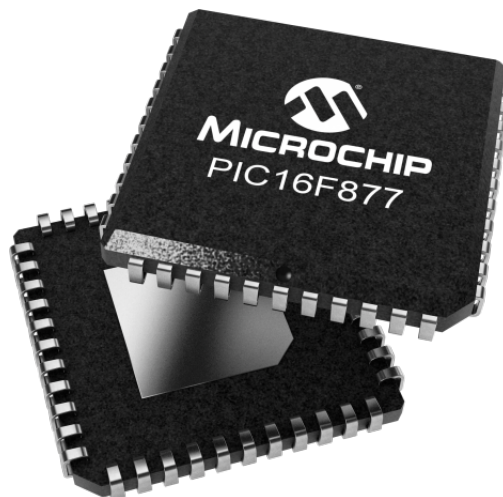


Figura 8: Ejemplo de un microcontrolador PIC16F877 de la empresa Microchip

6.4. Control remoto

Este es un dispositivo electrónico con el que se envían comandos a distancia para realizar una operación específica en una máquina, sistema o aparato. En nuestro caso, se desarrollará para controlar el brazo robótico asistencial y que le permita al usuario controlarlo de forma manual controlando los componentes de este.



Figura 9: Ejemplo de un control remoto de una consola de videojuegos

6.5. Diseño Asistido por Computadora (*CAD*)

Este diseño consiste en el uso de programas de computadora que nos permiten crear, modificar, analizar, diseñar y documentar representaciones gráficas digitales en dos o tres dimensiones de objetos físicos. Gracias a la ayuda de estos programas es que podemos realizar prototipos que podemos modificar y manipular a lo que nuestros gustos y necesidades demanden. Estos programas poseen múltiples herramientas, comandos y opciones que dan una alta versatilidad para plasmar cualquier idea que se nos ocurra. [5]



Figura 10: Diseño asistido por computadora

6.6. Interfase Humano-Máquina (HMI)

HMI por sus siglas en inglés *Human-Machine Interface* hace referencia al dispositivo o panel que le permite a un usuario poder comunicarse con la máquina, software o sistema deseado. Esta le permite interactuar con su objetivo para que esta realice una acción o que le devuelva información útil. [6]



Figura 11: Ejemplo de una interfase humano-máquina

6.7. Sistema de guía y rastreo *VarioGuide* de BrainLab

Este sistema incluye tanto software como hardware y permite a los profesionales en cirugía seguir trayectorias planificadas con anterioridad para su respectiva operación. Este está conformado por una máquina (*VectorVision*) con diversos sensores que rastrean los instrumentos utilizados durante la cirugía. Luego, el software se encarga de procesar esta información de rastreo para luego mostrarle los datos (mediante un monitor en tiempo real) al doctor y que este sepa la posición de su instrumento respecto a la cabeza del paciente en cada instante. [7]



(a) Máquina *VectorVision* utilizada en la sala de operaciones (b) Uno de los múltiples instrumentos *VarioGuide*.

Figura 12: Herramientas utilizadas dentro de la sala de operaciones.

6.8. Pantalla TFT LCD

Por sus siglas TFT LCD (*Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display*) es una variante de pantalla de cristal líquido (LCD) que usa tecnología de transistor de película delgada (TFT) para mejorar su calidad de imagen. Esta pantalla será utilizada para desplegar los datos y comandos que el operador (en este caso el doctor o enfermeras) necesitará enviar al sistema de control del brazo robótico para tener un mejor control y precisión a la hora de operar. [8]



Figura 13: Ejemplo de una pantalla TFT LCD

6.9. Interfaz Periférica Serial (SPI)

Fue desarrollada por Motorola en 1985 que permite la conexión entre múltiples dispositivos (microprocesadores, microcontroladores, sensores, etc.) a corta distancia. Este tipo de comunicación requiere de 4 cables para funcionar, estas son: dos líneas de datos (MOSI y MISO), una línea de reloj (SCK) y una línea de selección de chip (CS). En este tipo de comunicación se tiene un controlador principal y uno o varios controladores secundarios. El controlador principal se encarga de comunicarse con los controladores secundarios y, para distinguir entre estos, utiliza la línea "selección de chip" (*Chip Select, CS*) y con esto poder enviar o recibir datos del chip seleccionado. [9]

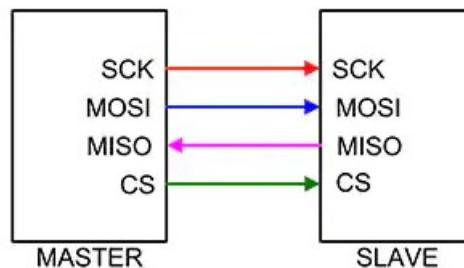


Figura 14: Ejemplo de la comunicación SPI

6.10. Codificador rotativo

Es un sensor de rotación que envía señales para conocer la dirección en la que rota y el ángulo en el que se encuentra (dependiendo del tipo de codificador). Este tiene una apariencia similar a un potenciómetro con la diferencia que este no tiene límite de rotación. Existen dos tipos fundamentales de codificadores rotativos: incrementales y absolutos. El codificador incremental lee los cambios en la dirección del desplazamiento angular, mientras que el codificador absoluto lee el ángulo absoluto del eje codificado. Se implementan utilizando tres tecnologías comunes: óptica, mecánica, o magnética.

En este caso se utilizó uno con tecnología mecánica. La forma en que este funciona es que tiene una rueda dentada conectada a referencia (comúnmente tierra) y dos pines conectados a voltaje que hacen contacto con esta rueda cuando se hace girar. Estos dos pines comúnmente se denominan A y B. Dependiendo del sentido del giro, uno de los pines entrará en contacto con los dientes de primero y el otro pin después.

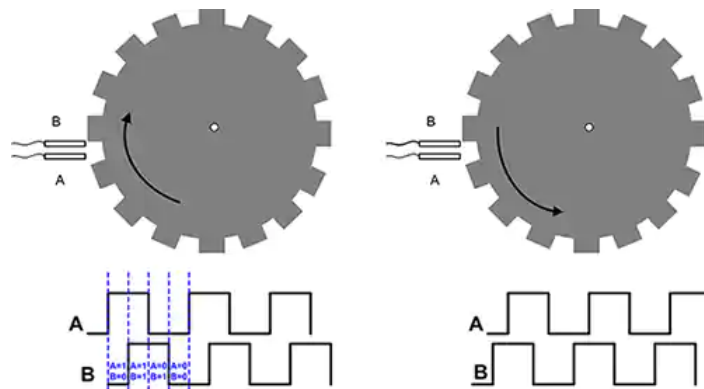


Figura 15: Funcionamiento del codificador rotativo

6.11. Conector BNC

Por sus siglas en inglés *Bayonet Neill-Concelman* es un conector de rápida conexión y desconexión utilizado para cable coaxial.



Figura 16: Conectores macho y hembra BNC

Sistema de Control Remoto

Para lograr el funcionamiento de los 8 motores presentes en el brazo robótico asistencial, se realizó un sistema de control remoto. Según las especificaciones de *VectorVision*, este sistema debía cumplir con la tarea de poder seleccionar y manipular cada parte del brazo de forma independiente a partir del control remoto con el fin de poder posicionar al efector final en las posiciones ideales para poder llevar a cabo la operación.

- Un microcontrolador el cual se encarga de procesar la información proveniente del resto de componentes.
- Una pantalla en la cual despliega información del sistema que se está utilizando, el motor seleccionado, la sensibilidad con la que este se está moviendo, entre otros datos.
- Dos botones que permiten la selección de los motores.
- Un botón que permite seleccionar el modo de funcionamiento manual o automático.
- Un codificador rotatorio con botón que permite cambiar la sensibilidad de movimiento de cada motor, además de la dirección de movimiento del mismo.
- Un puerto de conexión USB que permite la conexión vía UART con el sistema principal del brazo robótico.

La forma en que se seleccionaron los componentes fue de la siguiente forma.

7.1. Selección de componentes electrónicos

7.1.1. Selección de microcontrolador

Es el componente principal y es el encargado de la recopilación y manipulación de datos para controlar al sistema entero. Este permitió el funcionamiento de los botones, del codificador y de la pantalla.

Para seleccionar el microcontrolador adecuado para el proyecto, este debe de cumplir con los siguientes requerimientos:

- Dos entradas digitales para la selección del motor.
- Una entrada digital para la selección del modo manual o automático.
- Tres entradas digitales para la lectura del codificador rotatorio.
- Un módulo de comunicación para el envío de información hacia la pantalla.
- Un módulo de comunicación para el envío de información hacia el sistema principal del brazo robótico.

Teniendo en cuenta estos requerimientos se realizó un *trade study* entre diversos microcontroladores, los cuales fueron seleccionados por su familiaridad y su disponibilidad local. Estos microcontroladores se listan en el Cuadro [1] junto con características relevantes para este proyecto. En el Cuadro [2] se puede apreciar su *trade study*.

Microcontrolador	Pines I/O digitales	Módulo UART	Módulo SPI	Memoria Flash (KB)
PIC16F887	35	1	1	16
TM4C123G	43	8	3	256
ATmega328P	23	1	1	32
PIC18F4550	35	1	1	32

Cuadro 1: Características principales de los microcontroladores investigados

Microcontrolador	Pines I/O digitales	Módulo UART	Módulo SPI	Memoria Flash (KB)	Total
<i>Ponderación</i>	<i>1-5</i>	<i>1-10</i>	<i>1-10</i>	<i>1-5</i>	-
PIC16F887	5	10	10	3	28
TM4C123G	5	10	10	5	30
ATmega328P	5	10	10	5	30
PIC18F4550	5	10	10	5	30

Cuadro 2: *Trade study* de las características principales de los microcontroladores

Al observar el Cuadro [1] se puede apreciar que todos los microcontroladores cumplen con los requisitos necesarios. Debido a esto, se agregaron nuevos criterios al estudio (Cuadro [3]) en conjunto al *Trade study* correspondiente (Cuadro [4]).

Microcontrolador	Precio (Q)	Disponibilidad Local	Familiaridad
PIC16F887	50	Alta	Media Alta
TM4C123G	150	Baja	Media
ATmega328P	40	Alta	Medio alta
PIC18F4550	50	Alta	Medio

Cuadro 3: Características secundarias para los microcontroladores investigados

Microcontrolador	Precio (Q)	Disponibilidad Local	Familiaridad	Total
<i>Ponderación</i>	<i>1-5</i>	<i>1-10</i>	<i>1-7</i>	-
PIC16F887	3	10	6	19
TM4C123G	1	2	4	7
ATmega328	5	10	5	20
PIC18F4550	4	8	5	17

Cuadro 4: *Trade study* de las características secundarias de los microcontroladores.

Al analizar los cuadros [2] y [4], se puede apreciar que el micro controlador más adecuado para el proyecto es el ATmega328P, ya que este presenta el mayor puntaje en ambos estudios.

7.1.2. Selección de codificador

Para lograr el control de los motores de forma sencilla y práctica, se utilizaron botones. Al utilizar los botones para la manipulación de los motores nos encontramos con el problema que el motor reaccionaba a cada interacción con el botón, esto quiere decir que para lograr un movimiento del motor significativo, fue necesario presionar repetidas veces el botón, lo que lo hace impráctico. Debido a esto se buscó otra alternativa para el manejo de los motores.

Como solución al problema, se implementó un codificador rotatorio el cual proporciona la misma funcionalidad de los botones y que a su vez es más cómodo y consigue un movimiento de los motores más rápido y fluido, además de que la sensación de clic le proporciona retroalimentación al operario.



Figura 17: Codificador de tecnología mecánica

7.1.3. Selección de pantalla

Como se mencionó anteriormente, el control remoto cuenta con una pantalla en la cual se despliegan los siguientes datos: El motor seleccionado, la sensibilidad de movimiento del motor, el modo de funcionamiento (manual o automático) y un mensaje de error si el motor seleccionado no es el indicado para activar el modo automático.

La información que procesa y envía el microcontrolador hacia la pantalla se realizó por medio de comunicación *SPI*, la cual se utilizó por su rápida transmisión de datos en comparación con *I2C*. Al ser únicamente letras y números los datos mostrados en pantalla, no fue necesaria la implementación de una comunicación en paralelo, la cual es utilizada cuando se envían datos pesados como lo son las imágenes.

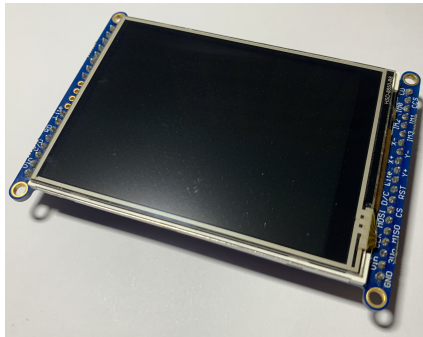
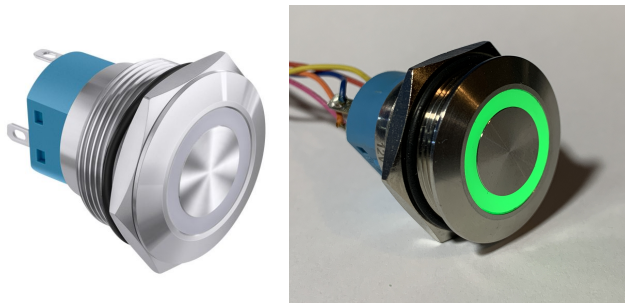


Figura 18: Pantalla TFT LCD de 3.2".

7.1.4. Selección de interruptor

Para la selección entre modo manual o automático se utilizó un interruptor de retención de dos estados Figura [19]. Se optó por utilizar este interruptor debido a que este puede ser presionado hasta 50,000 veces, lo cual nos proporciona una larga vida de utilidad. Además, este posee iluminación *LED*, que ayuda a indicar el estado en el que se encuentra el interruptor.



(a) Imagen del fabricante (b) Interruptor iluminado

Figura 19: Interruptor de retención seleccionado

7.2. Prototipo 1

7.2.1. Diseño mecánico y fabricación

El objetivo del primer prototipo fue obtener un producto físico el cual nos diera una clara percepción de las medidas a utilizar para el modelo final del control remoto. Al realizar el primer prototipo del control remoto, se pudo observar que se presentaron fallos en el diseño y el ensamblaje. Estas correcciones se tomaron en cuenta y se dejaron para corregirlas en el segundo prototipo del control remoto.

El primer prototipo del control remoto se conformó por las siguientes partes:

- Base principal
- Tapadera
- Acrílico protector de pantalla
- Perilla para el codificador

En la Figura [20] se puede observar el modelo 3D de la base diseñada. En la Figura [21] se puede observar la versión impresa de esta base.

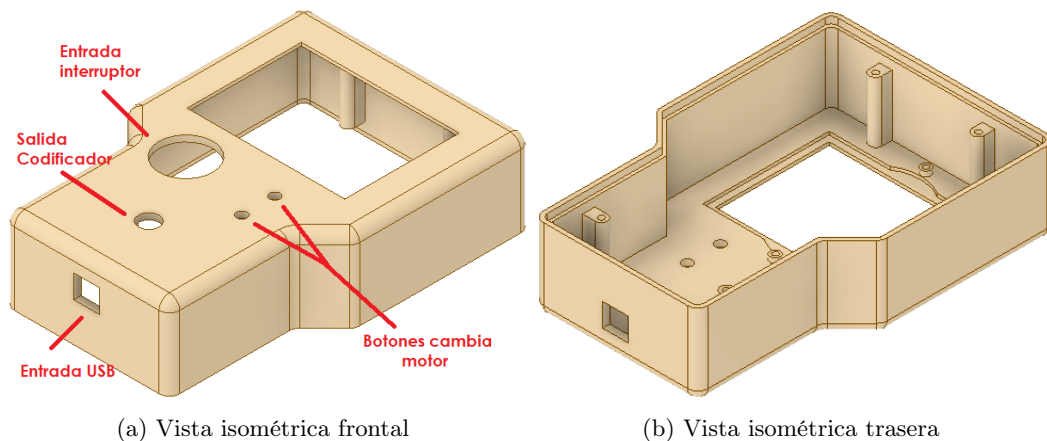
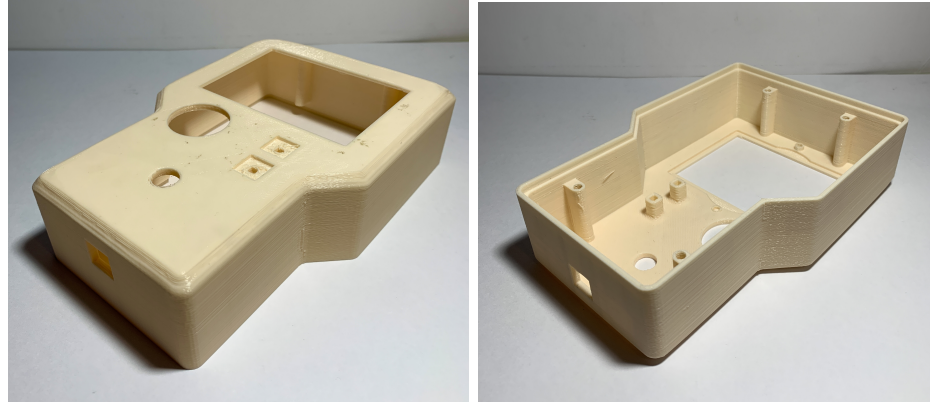


Figura 20: Diseño 3D de la base del control remoto.

Los defectos encontrados en este diseño son:

- La sujeción del acrílico protector no funcionó y presenta riesgo en que esta se desmonte fácilmente sin intención de hacerlo.
- El agujero donde se inserta el interruptor iluminado es más grande de lo requerido.
- El agujero de la entrada USB debe ser movida más abajo para que el cable encaje con el circuito impreso.
- El redondeo en el contorno superior de la base no se imprimieron adecuadamente.



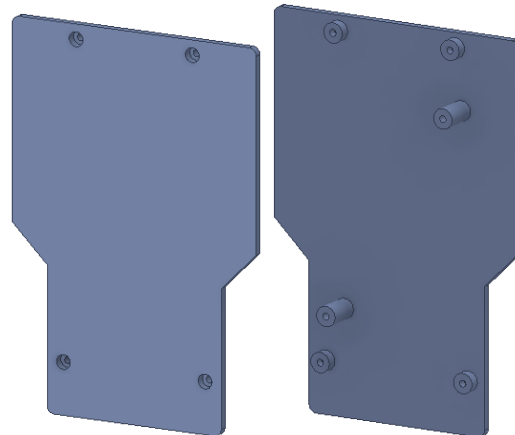
(a) Vista isométrica frontal

(b) Vista isométrica trasera

Figura 21: Impresión 3D de la base del control remoto.

- El diámetro de los agujeros donde se enroscan los tornillos tiene un tamaño justo y se requiere de mucho torque para que los tornillos se inserten apropiadamente.

En la Figura [22] se puede observar el diseño 3D de la tapadera del control remoto. En la Figura [23] se puede observar la fabricación de la tapadera del control remoto.

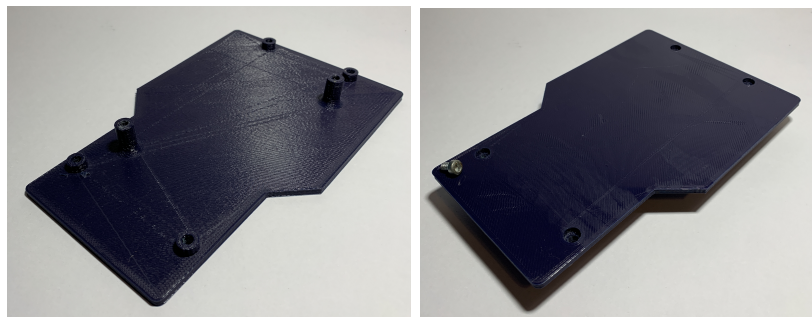


(a) Vista isométrica frontal (b) Vista isométrica trasera

Figura 22: Diseño 3D de la tapadera del control remoto.

Para la tapadera, los errores de diseño que presenta son los siguientes:

- Los agujeros que atraviesan los tornillos poseen un diámetro justo y no permite el paso libre del tornillo.
- Se colocaron únicamente dos soportes para montar la tarjeta de circuito impresa, lo cual lo hace inestable e inseguro (Figura [24])
- El diámetro en donde se inserta la cabeza del tornillo es de tamaño justo o menor, por lo que la cabeza del tornillo no puede ser insertada fácilmente.



(a) Vista isométrica frontal (b) Vista isométrica trasera

Figura 23: Impresión 3D de la tapadera del control remoto.

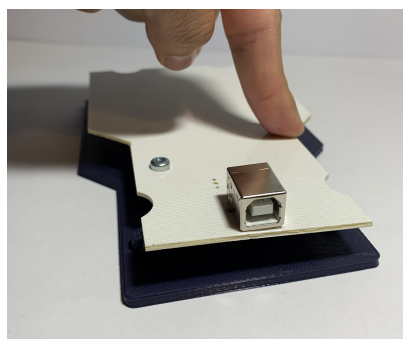
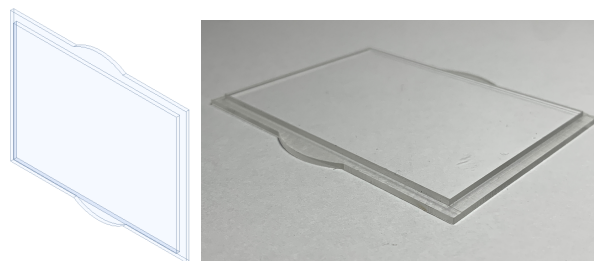


Figura 24: Probando el circuito impreso sujetado a la tapadera con los únicos 2 puntos de soporte.

El acrílico sirvió para proteger la pantalla de contacto directo. Con este se evitó que algún fluido penetrara la base generando fallos en el sistema electrónico [25]. El error de diseño que presentó este acrílico es la forma en que se ensambló (Figura [26]). Este no es totalmente rígido y si es presionado fuertemente podía llegar a desmontarse dejando a la electrónica expuesta.

Por último, en la Figura [27] se puede apreciar el diseño 3D de la perilla y en la Figura [28] la versión fabricada. Esta no presentó errores en diseño, pero si se realizaron mejoras visuales para que esta perilla tenga un aro de luz y para generar una aspecto estético más agradable.



(a) Diseño 3D del acrílico (b) Acrílico cortado y maquinado

Figura 25: Versión diseñada del acrílico 3D y su versión fabricada

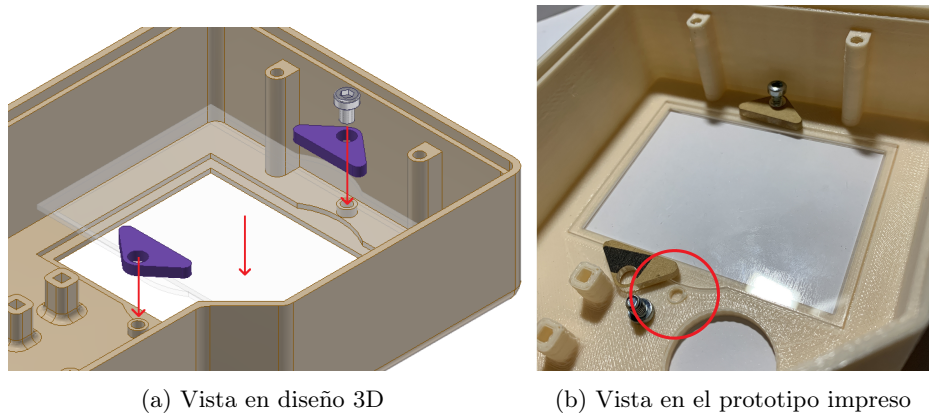


Figura 26: Montaje del acrílico protector en la base

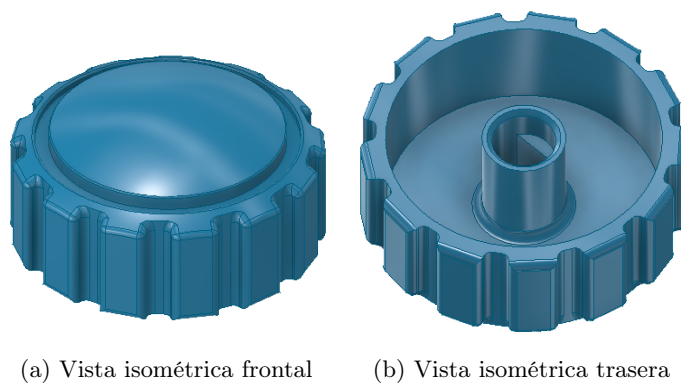


Figura 27: Diseño 3D de la perilla para el codificador rotatorio.

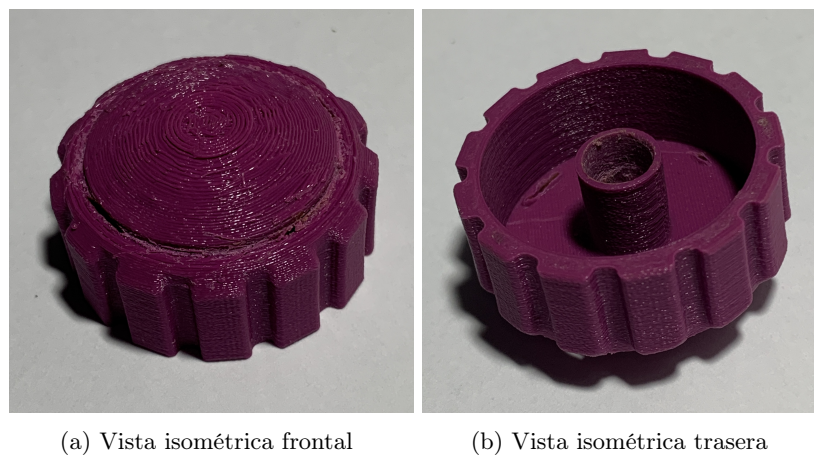


Figura 28: Impresión 3D de la perilla para movimiento del codificador rotatorio.

7.2.2. Algoritmo para programación

Las siguientes figuras muestran los diagramas de flujo de la primera versión del programa implementado en el microcontrolador.

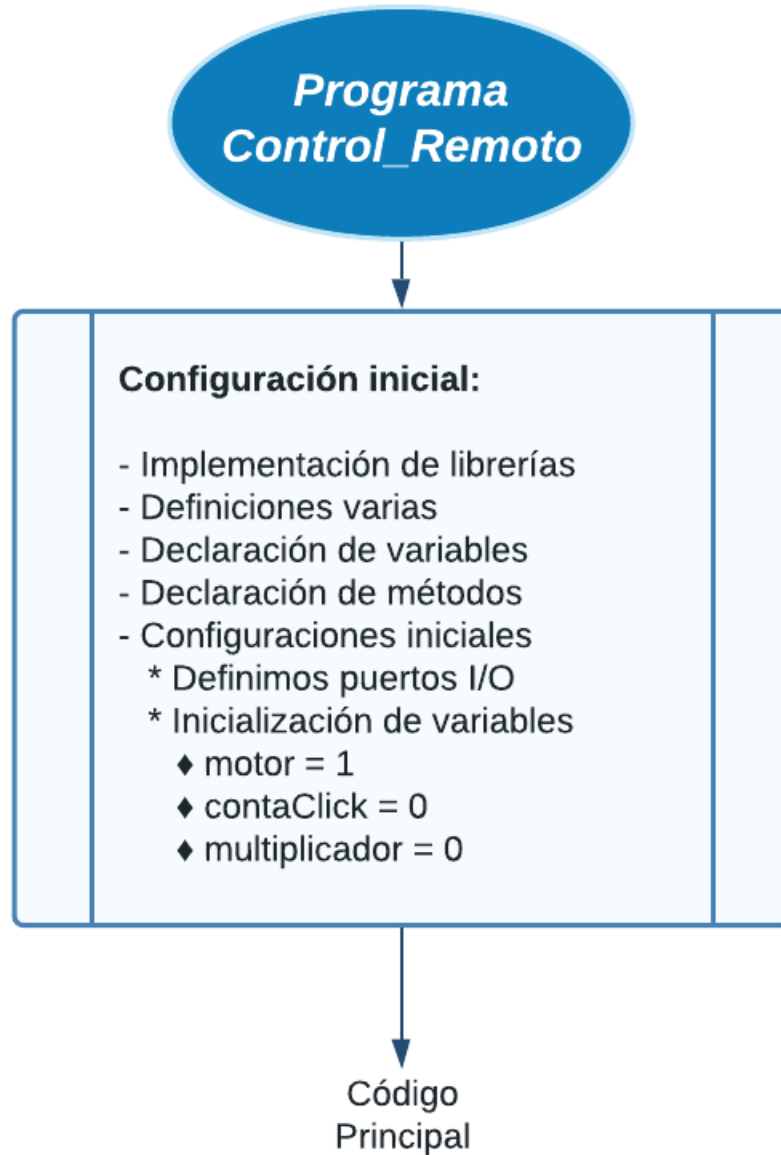


Figura 29: Diagrama de flujo: inicio del programa.

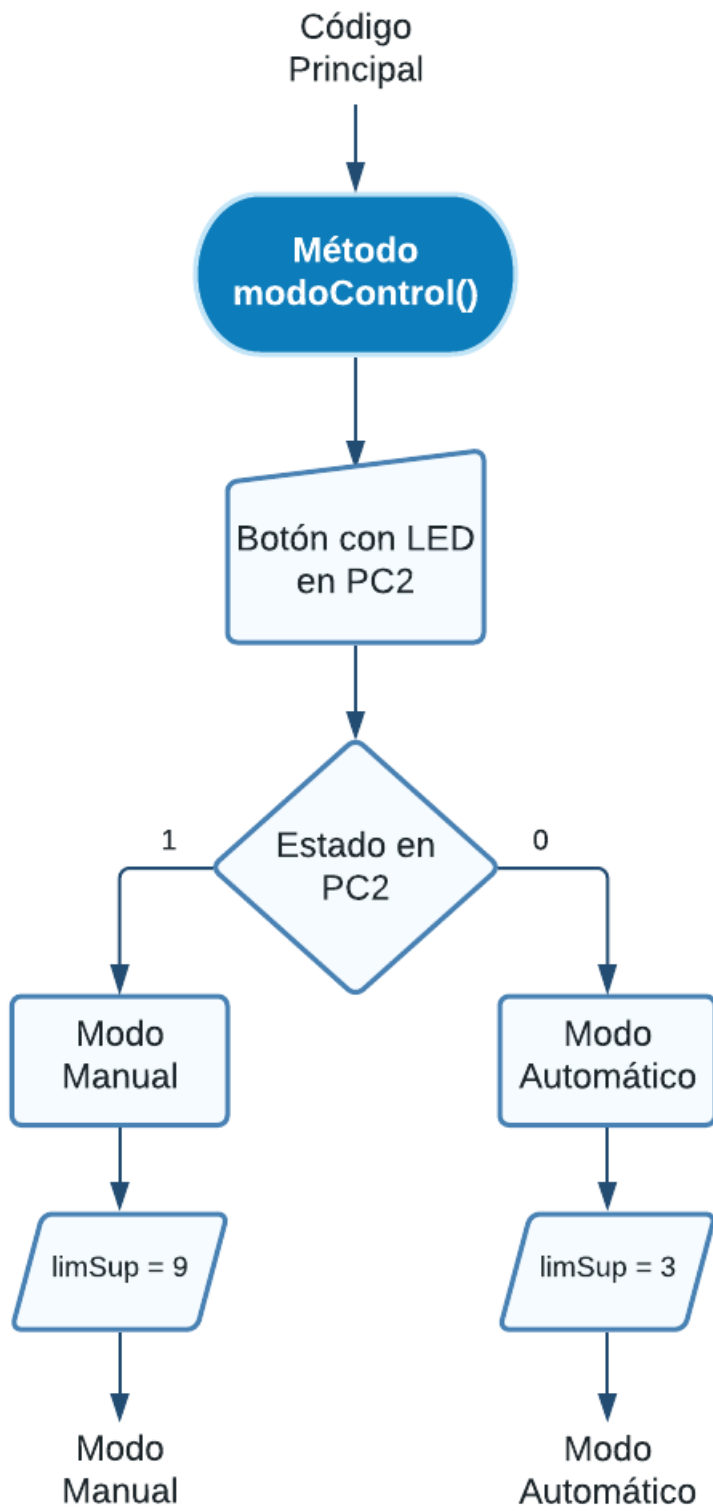


Figura 30: Diagrama de flujo: selector de modo automático o manual

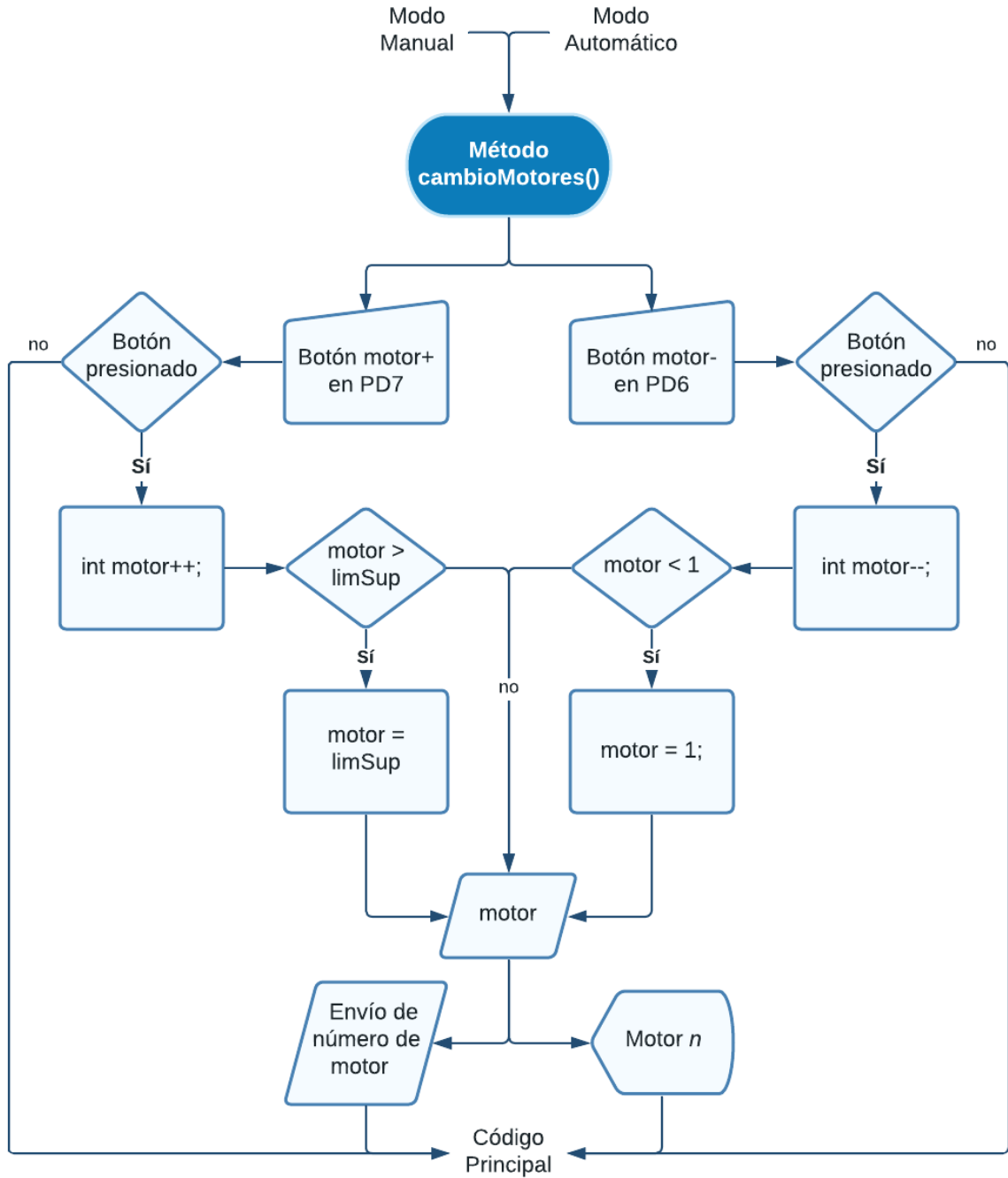


Figura 31: Diagrama de flujo: método que permite seleccionar uno de los múltiples motores

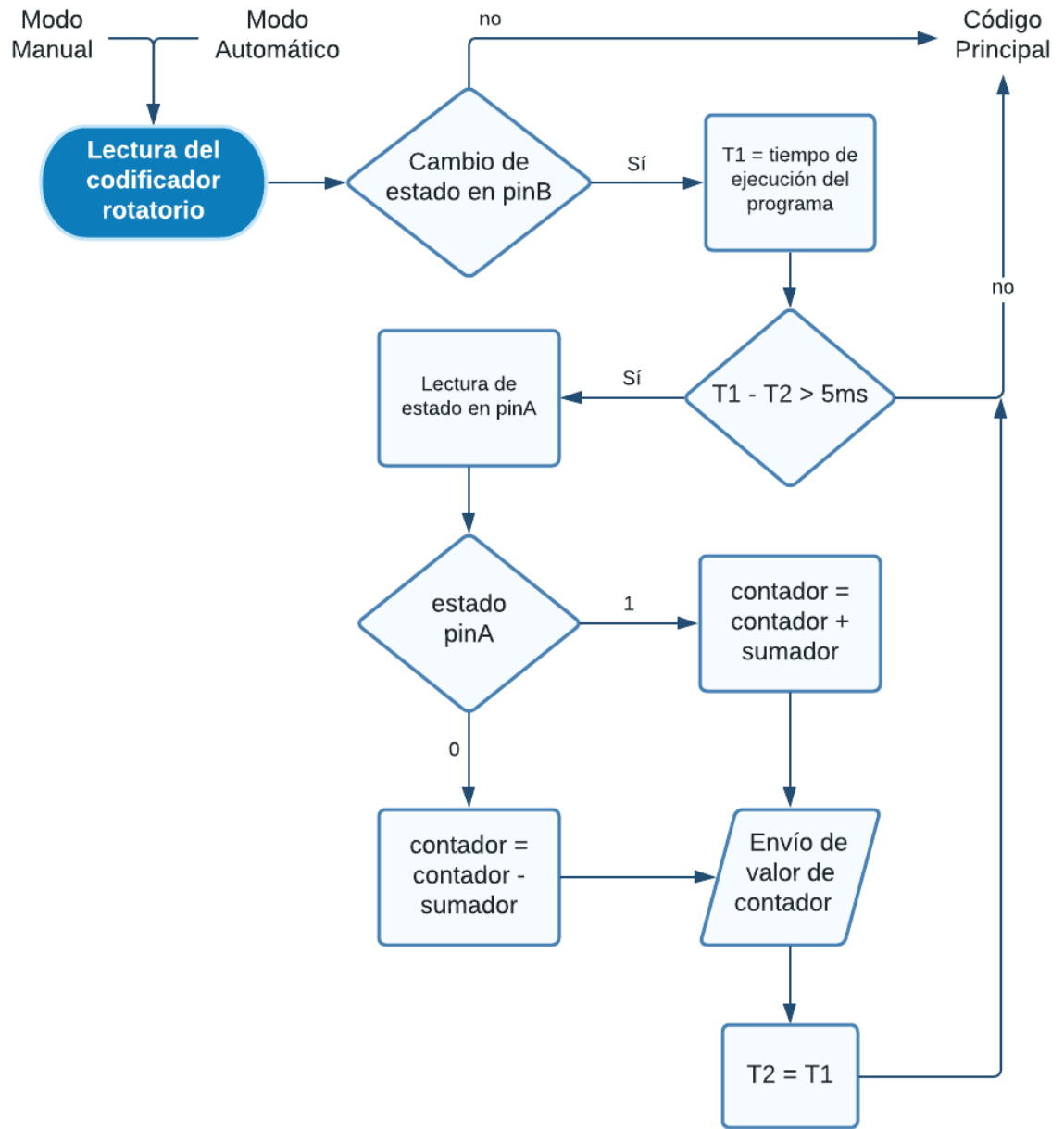


Figura 32: Diagrama de flujo: lógica utilizada para la lectura del codificador cuando este sea girado para cualquier dirección.

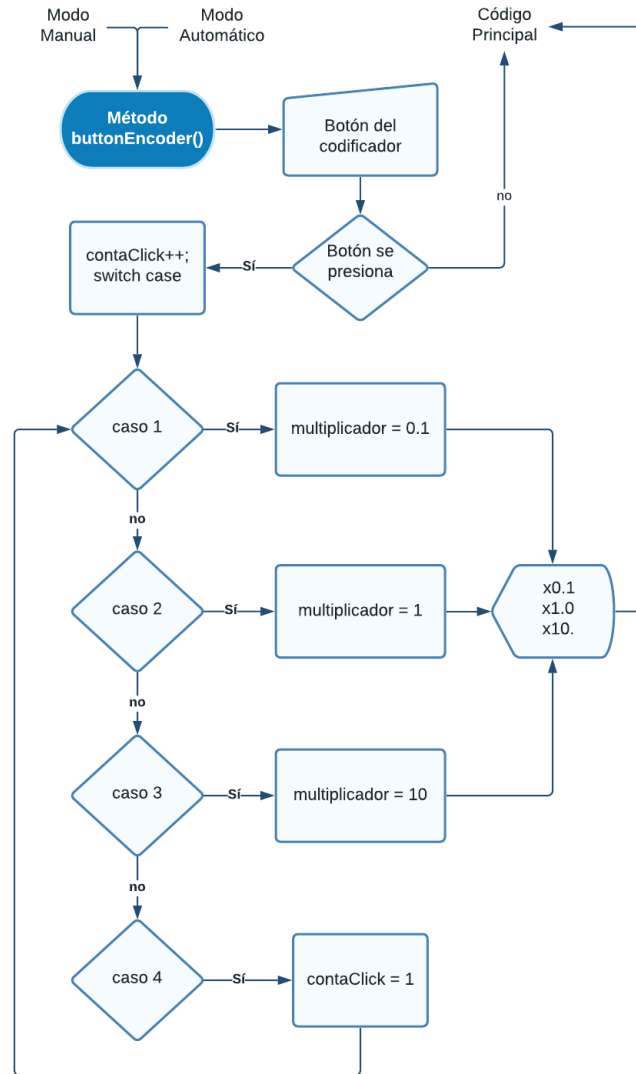


Figura 33: Diagrama de flujo: método que permite el funcionamiento del botón que trae integrado el codificador

Al realizar las pruebas del código se detectaron aspectos a mejorar o cambiar. Estos aspectos son:

- Los métodos utilizados en el modo manual deben estar activados únicamente cuando este modo sea seleccionado. De igual forma cuando se seleccione el modo automático.
- Condicionar a que el modo automático pueda ser activado únicamente si el motor seleccionado es del 5to al 8vo, fuera de estos, mostrar un mensaje de error en pantalla indicando que no se encuentra en los motores correctos y desactivar todos los métodos hasta que se reactive el modo manual.
- La cantidad de motores a utilizar son 8, no 9.
- Agregar una sensibilidad mayor.

7.2.3. Diseño electrónico

Haciendo uso de los componentes electrónicos seleccionados, se realizó el diseño de un circuito eléctrico y junto con este, el diseño de una placa de circuito impresa. El esquemático realizado se presenta en la Figura [34] y seguido de este, se presentan vistas en 2D y 3D sobre el diseño del circuito impreso (Figuras [35], [36] y [37]).

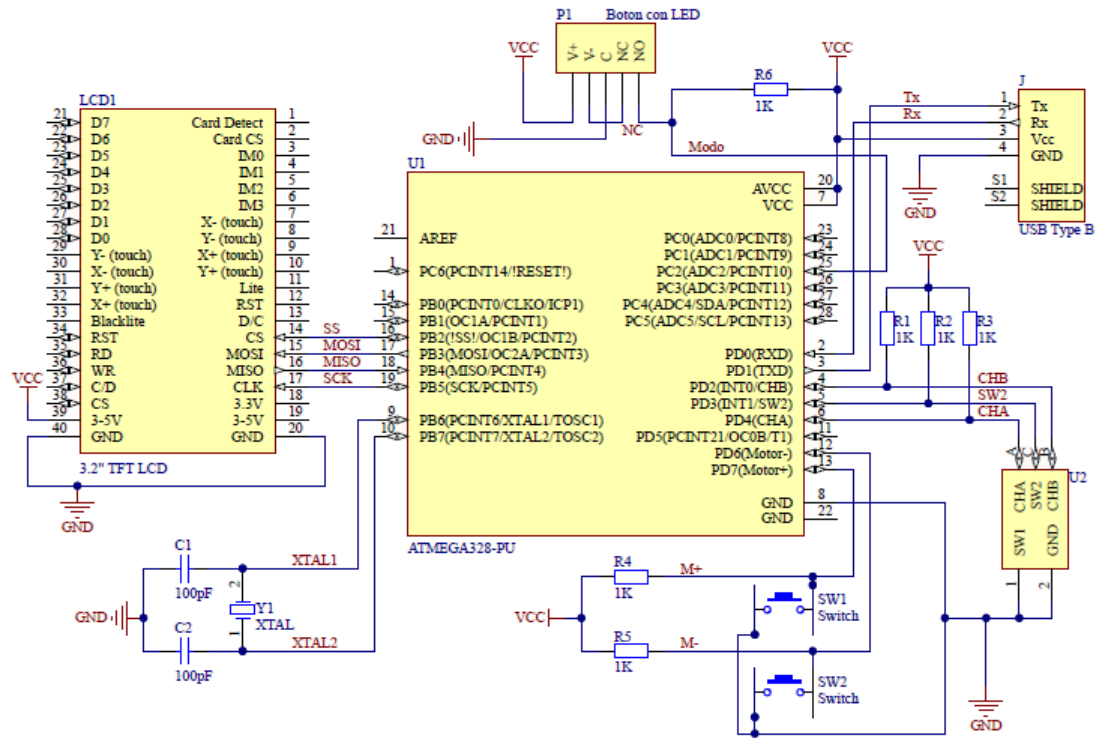


Figura 34: Circuito eléctrico implementado para el prototipo 1

Los errores de diseño presentes y cambios a realizar en el esquemático y en diseño del circuito impreso son:

- La librería que incluye esquemático y *footprint* de la pantalla no tiene los pines en la posición que presenta en la vida real, lo que ocasiona que al colocar la pantalla sobre la tarjeta de circuito impresa no se conecten los pines correctos y esta no funciona.
- Los pines del microcontrolador serán configurados internamente como *pull-up*, por lo que las resistencias R1 a R6 (las cuales funcionan como *pull-up* externas) deben de ser removidas para simplificación en el diseño y mejorar la distribución de componentes en la tarjeta de circuito impresa.
- La librería que incluye esquemático y *footprint* del codificador rotativo no tiene los pines en la posición que presenta en la vida real, ocasionando que el codificador no funcione apropiadamente al montar este sobre la tarjeta de circuito impresa.
- Se deben de agregar más agujeros para los puntos de apoyo de la tapadera en el diseño mecánico.

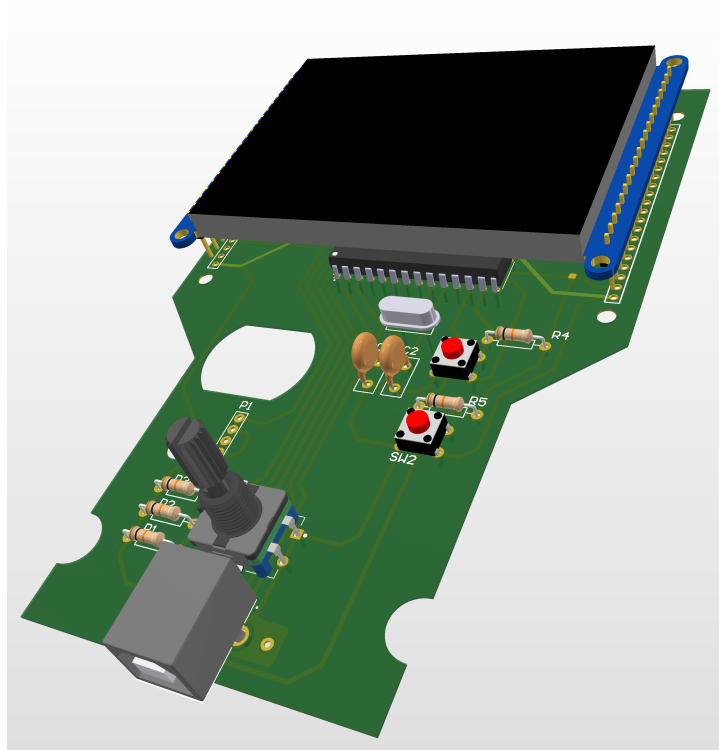


Figura 35: Vista isométrica frontal 3D del prototipo 1 de la PCB

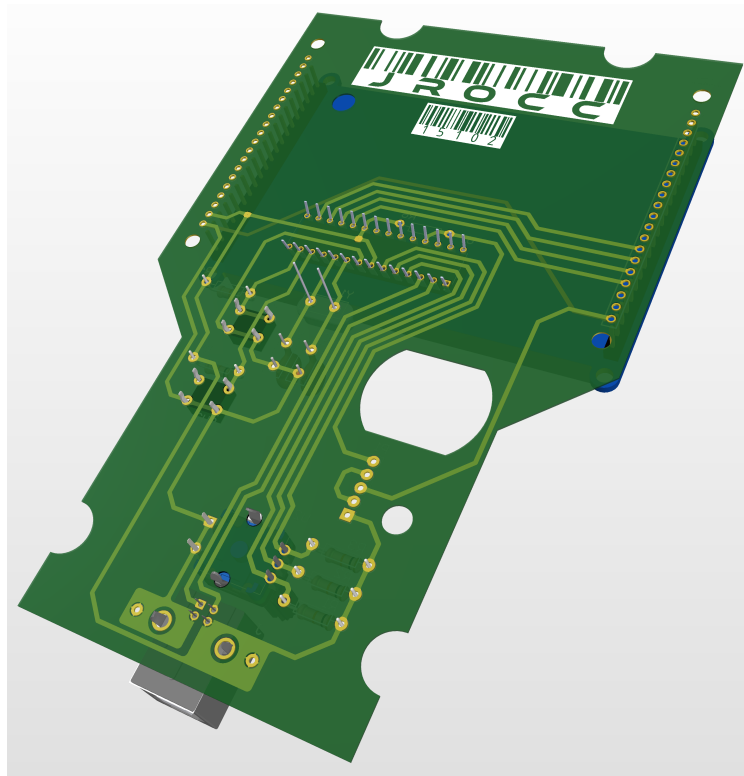


Figura 36: Vista isométrica trasera 3D del prototipo 1 de la PCB

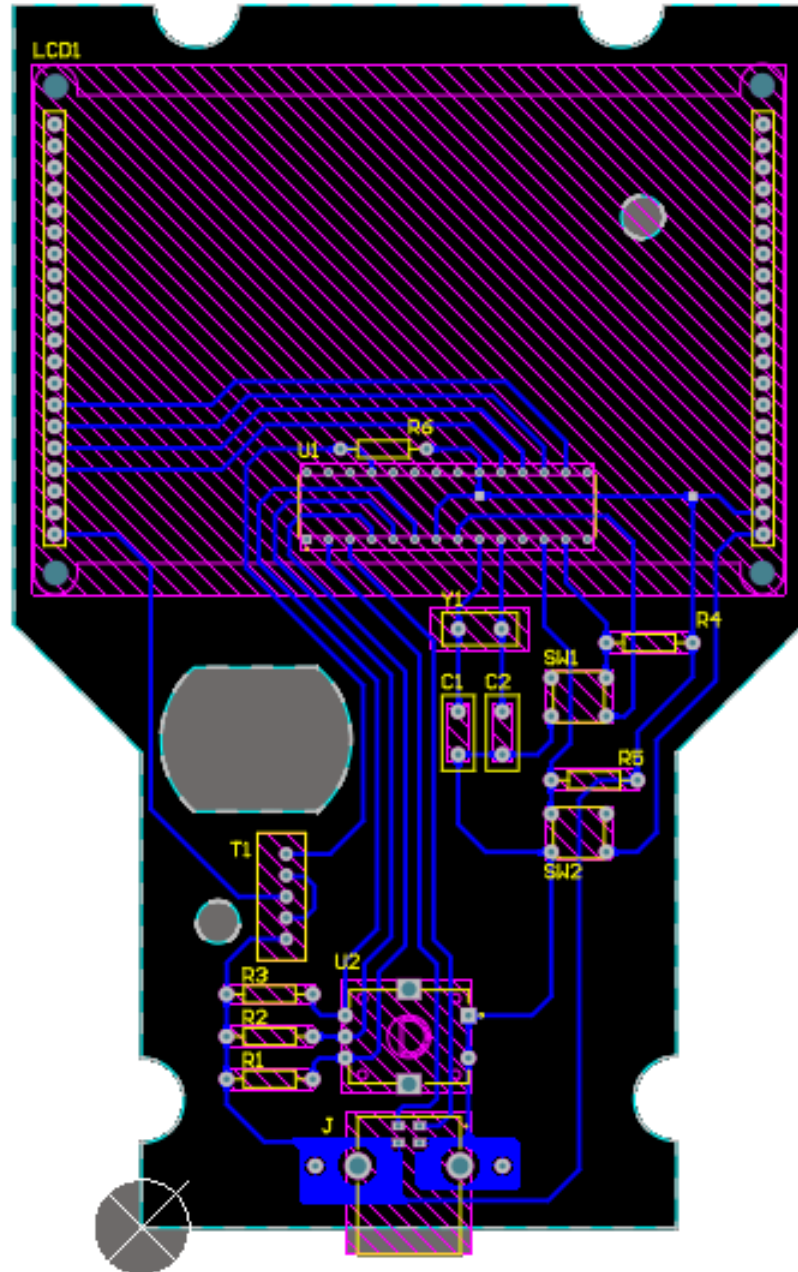


Figura 37: Vista 2D de la placa de circuitos impresa

7.3. Prototipo 2

7.3.1. Diseño mecánico

Basados en los resultados del prototipo 1, se realizaron los siguientes cambios en la **base**:

- El espacio en el que se colocó el acrílico pasó de estar instalado internamente a estar instalado externamente. Esto permitió que el acrílico se ensamblara desde afuera y que este tenga un mejor soporte para que pueda ser presionado sin que se desmonte de la base dejando expuesta la electrónica interna del control (Figura [38]).
- Se cambió el tamaño del agujero donde se coloca el interruptor iluminado.
- Se movió el agujero que atraviesa la punta del cable USB-B a una posición que permitió el encaje adecuado con la entrada USB del circuito impreso.
- Se cambió el redondeo del contorno superior por un chafán de 45 grados.
- Se cambió el diámetro de los agujeros donde se insertan los tornillos y ahora se enroscan con menor presión y se redujo el riesgo de que el plástico se dañe.

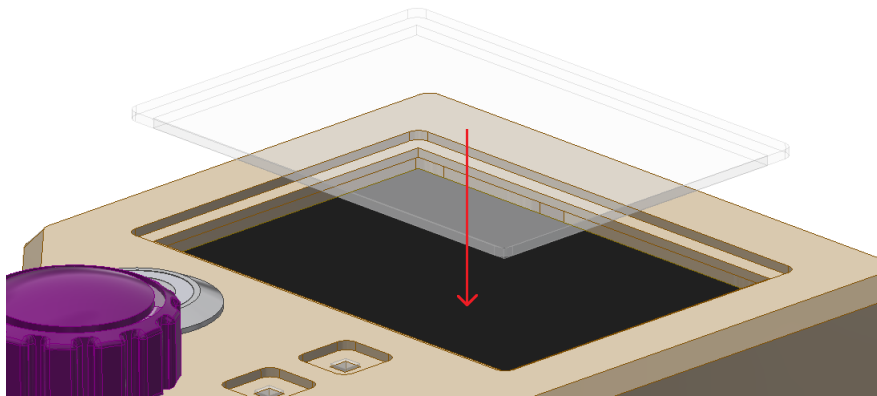


Figura 38: Colocación por fuera del acrílico para proteger la pantalla.

Para los resultados de la **tapadera** en el prototipo 1, se realizaron los siguientes cambios:

- Se aumentaron los diámetros de los agujeros para que el cuerpo del tornillo atraviese libremente la tapadera.
- Se agregaron dos soportes más para sujetar la tarjeta de circuito impreso y ahora este presenta mayor estabilidad en su sujeción (Figura [39]).
- Se aumentaron los diámetros en donde la cabeza del tornillo se ajustaba y ahora tiene espacio suficiente para encajar correctamente.

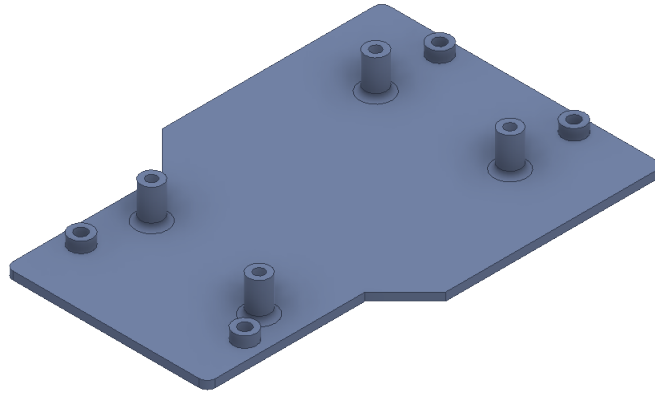


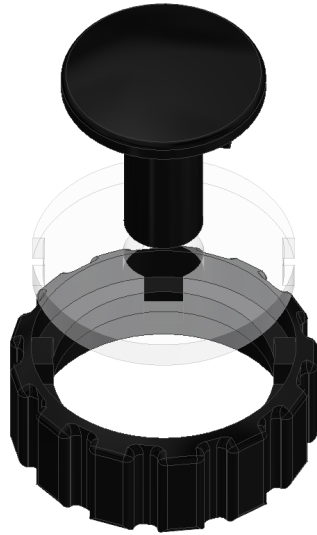
Figura 39: Diseño de tapadera versión 2 con 2 puntos de apoyo agregado.

Por último, se realizaron los cambios en la perilla del codificador y ahora se puede apreciar un aro de luz en este que le proporciona un aspecto estético agradable (Figura [40]).

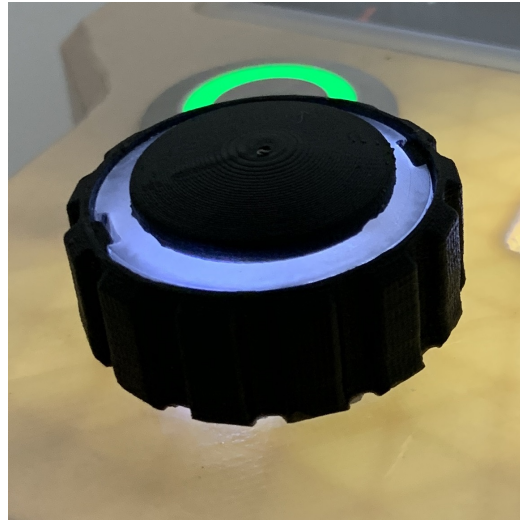
Como resultado final, en las siguientes figuras se puede apreciar el ensamblaje completo del control remoto.



Figura 41: Vista superior del control remoto ensamblado y funcionando con sus luces decorativas.



(a) Diseño de perilla 3D



(b) Perilla impresa iluminada

Figura 40: Diseño de perilla en 3D junto con la prueba de iluminación que se hizo para demostración de funcionamiento

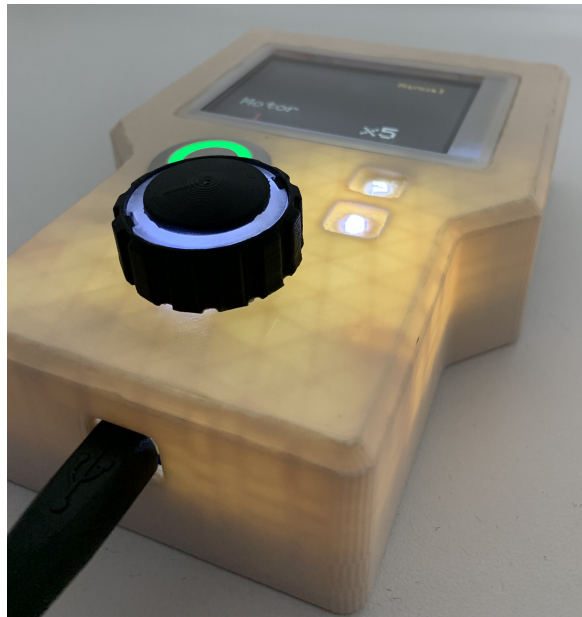


Figura 42: Prototipo 2 del control remoto funcionando con su cable USB-B.



Figura 44: PCB fabricada montada sobre la tapadera mostrando su funcionamiento con la iluminación y los datos mostrados en pantalla

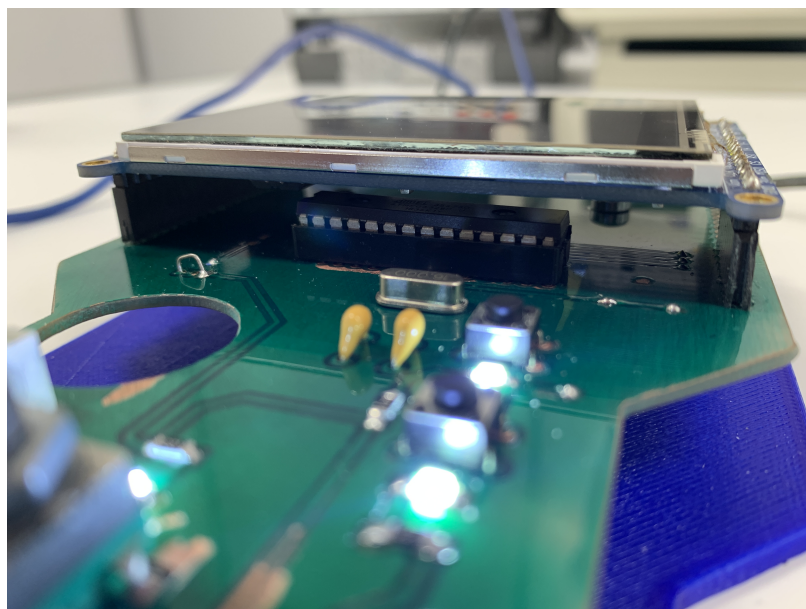


Figura 45: Vista del ATmega328P montado sobre la PCB debajo de la pantalla.

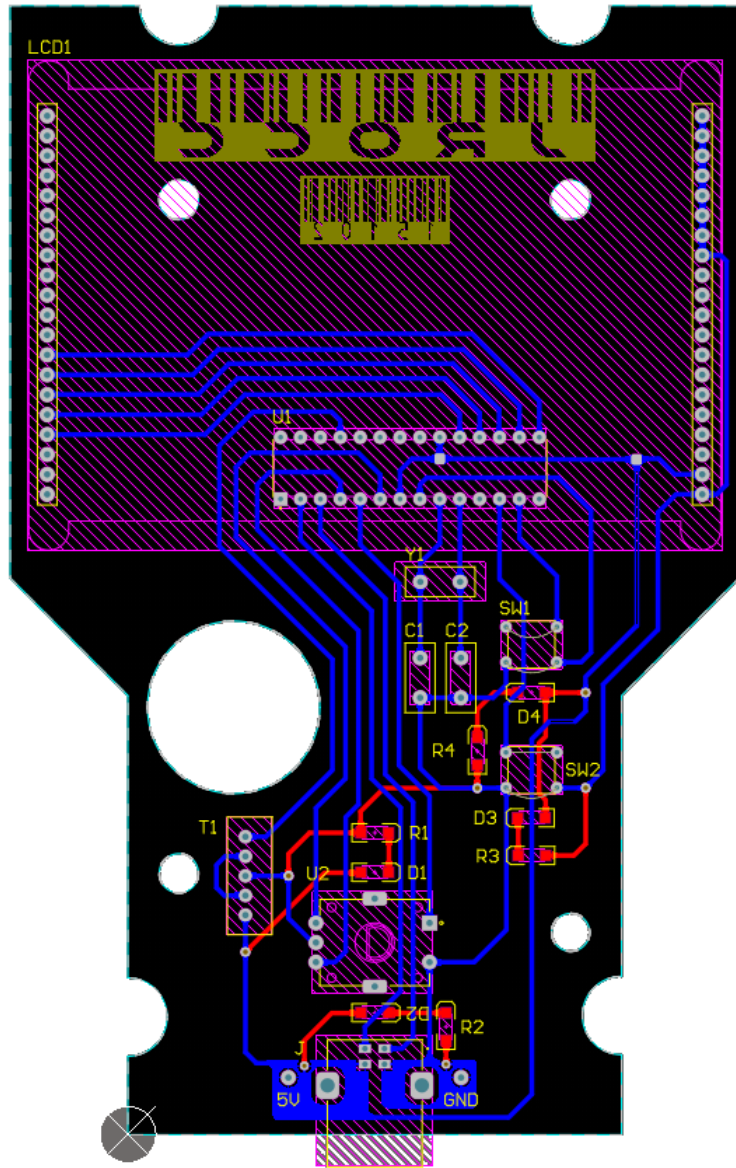


Figura 46: Vista 2D de la placa de circuitos impresa

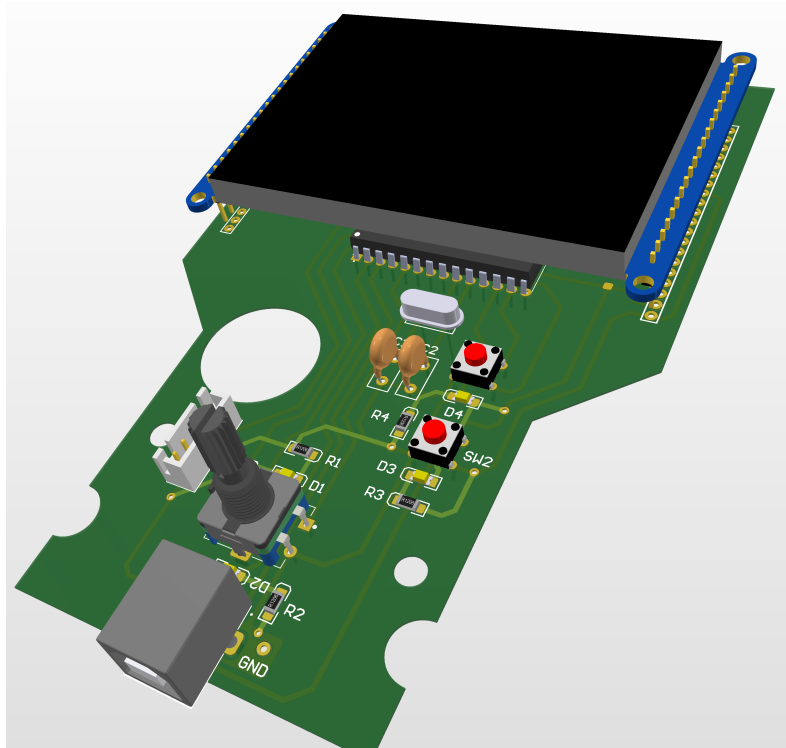


Figura 47: Vista isométrica frontal

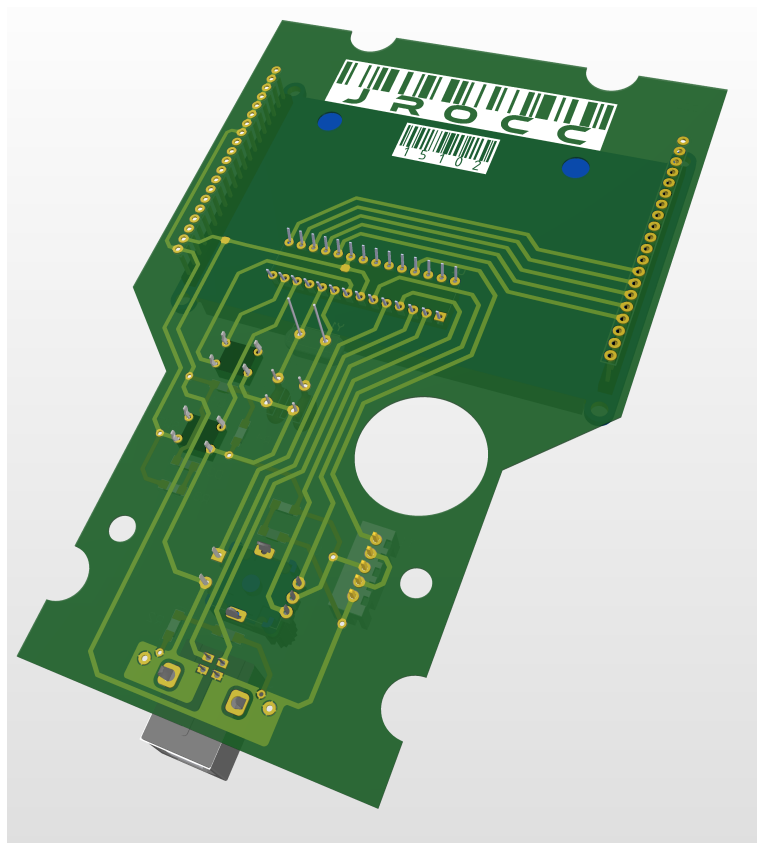


Figura 48: Vista isométrica posterior

7.3.3. Programación de algoritmo

Según los aspectos a cambiar o mejorar en el prototipo 1, se realizaron las siguientes mejoras y cambios:

- Al seleccionar el modo de operación (manual o automático) se habilitan y deshabilitan métodos para no interferir con el otro modo (Figura [50]).
- El modo automático únicamente puede ser activado si el motor seleccionado se encuentra entre el 5to y el 8vo, de lo contrario muestra un mensaje de error en pantalla y deshabilita todos los métodos excepto el poder regresar a modo manual (Figura [50]).
- Se modificaron la cantidad de motores de 9 a 8 (Figura [53]).
- Se agregó la sensibilidad “x200” para que el brazo pueda desplazarse más rápido con cada clic del codificador (Figura [54]).

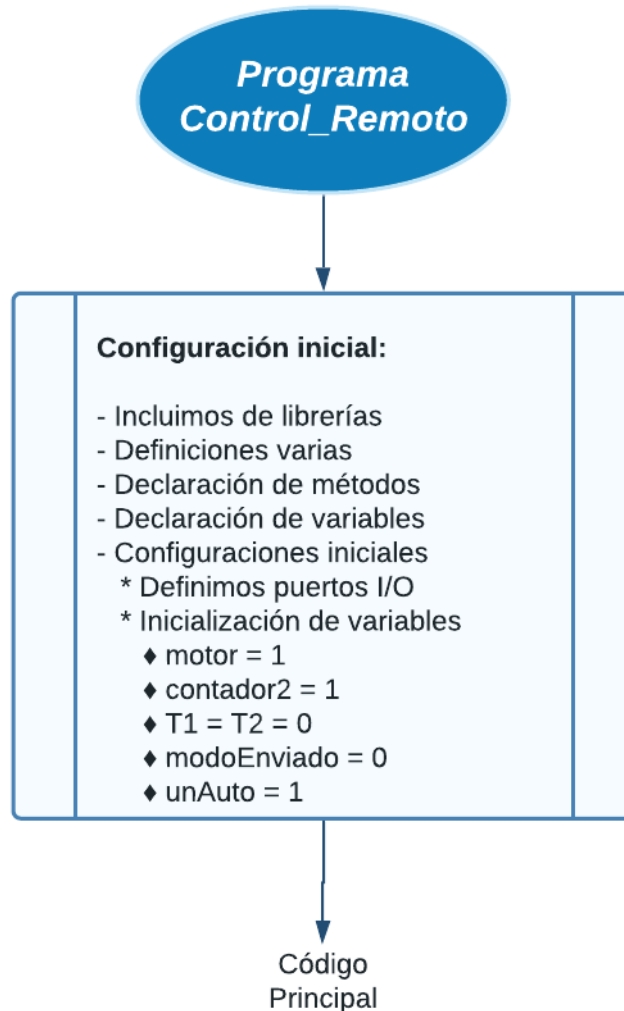


Figura 49: Descripción inicial del programa y su configuración inicial.

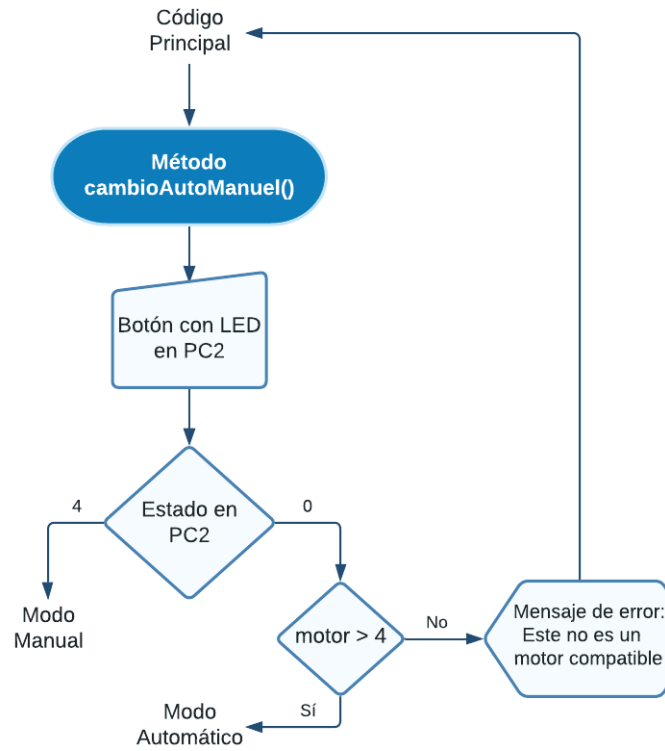


Figura 50: Método utilizado para distinguir entre modo manual y modo automático.

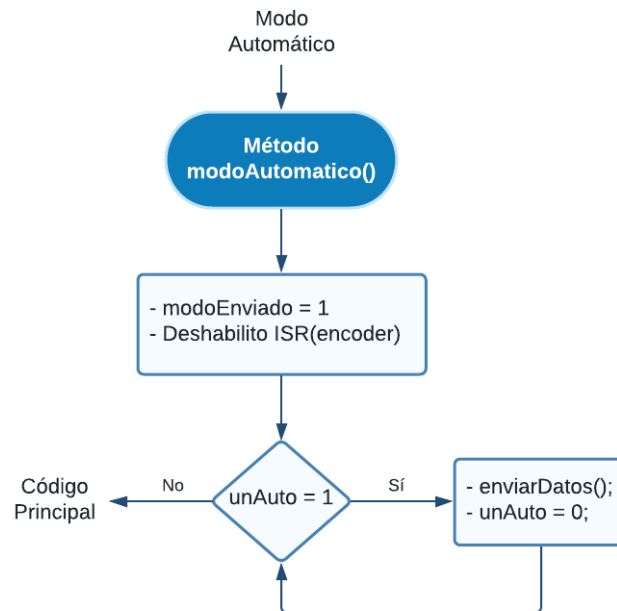


Figura 51: Método que permite la función del sistema en modo automático

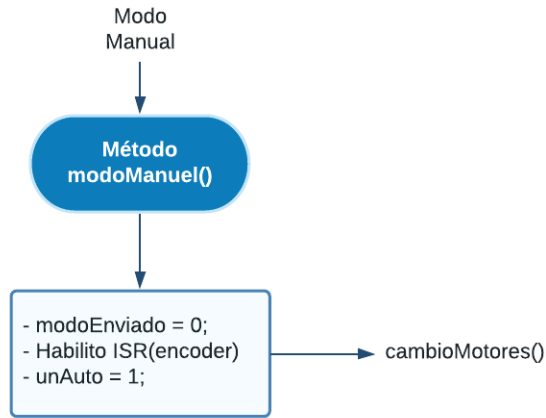


Figura 52: Método que permite la función del sistema en modo manual.

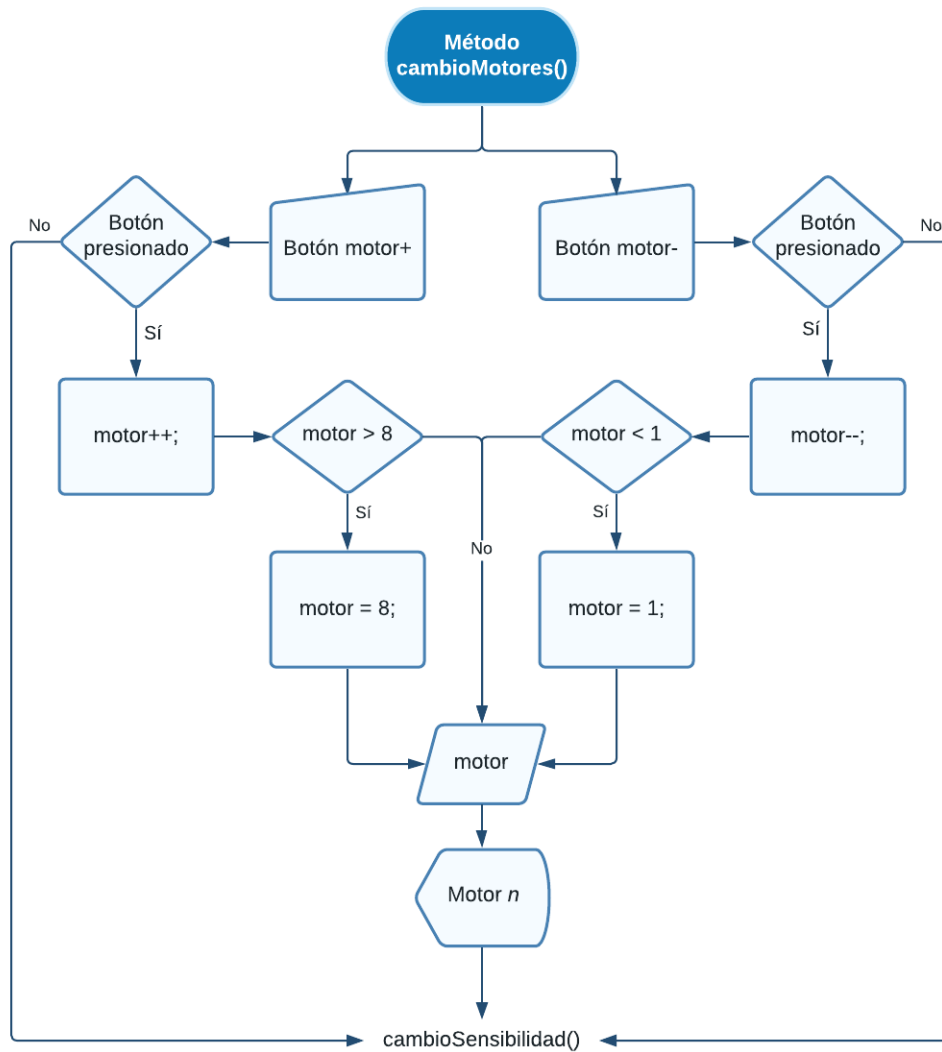


Figura 53: Método que permite la selección del motor que se desee utilizar para controlar.

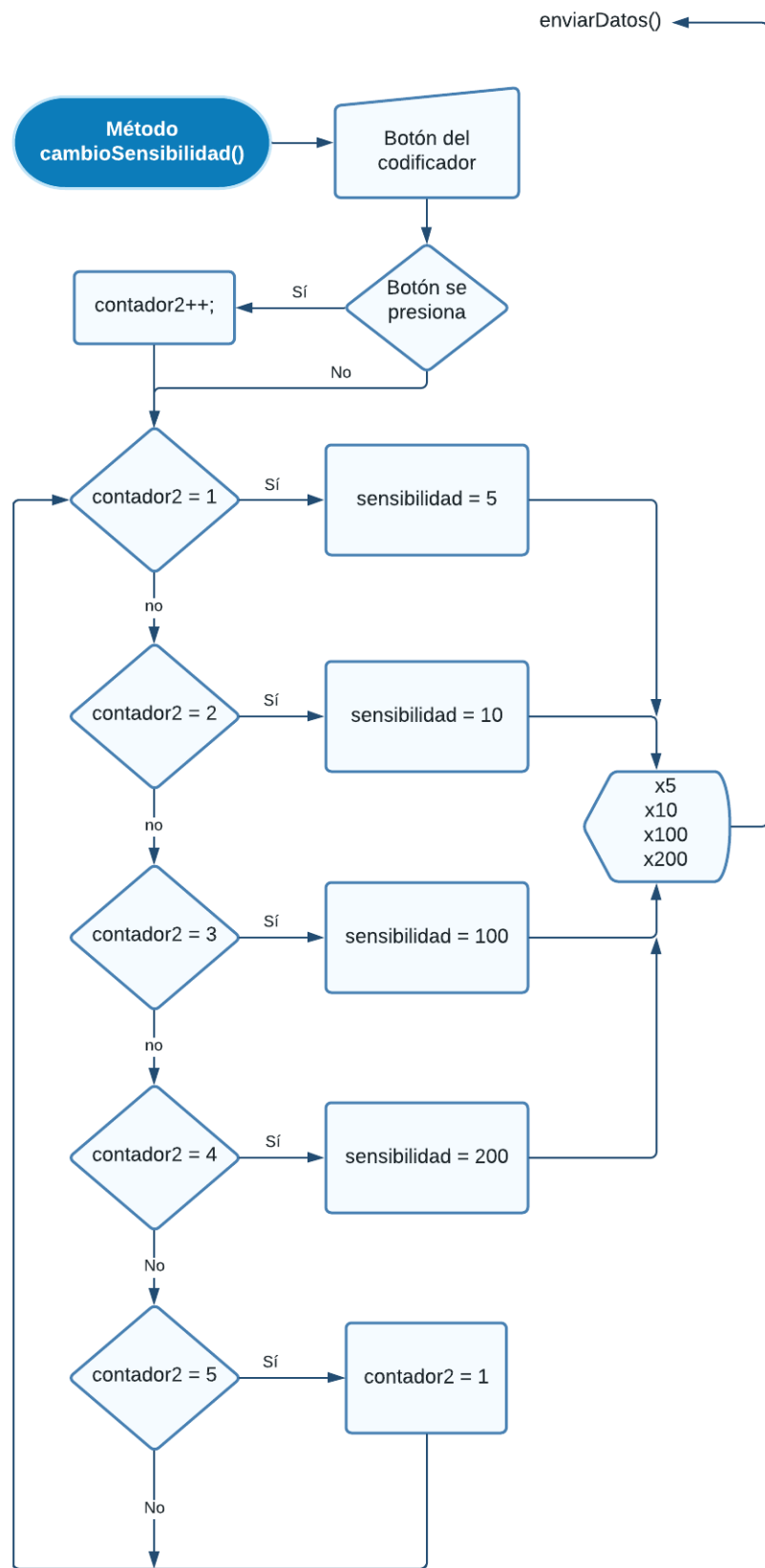


Figura 54: Método que permite la selección de sensibilidad para mover cada motor en mayor o menor cantidad.

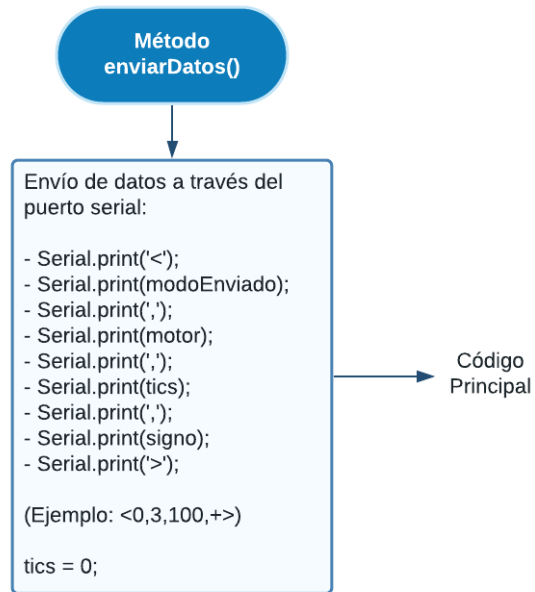


Figura 55: Método que envía los datos necesarios al sistema principal para que el funcionamiento de este.

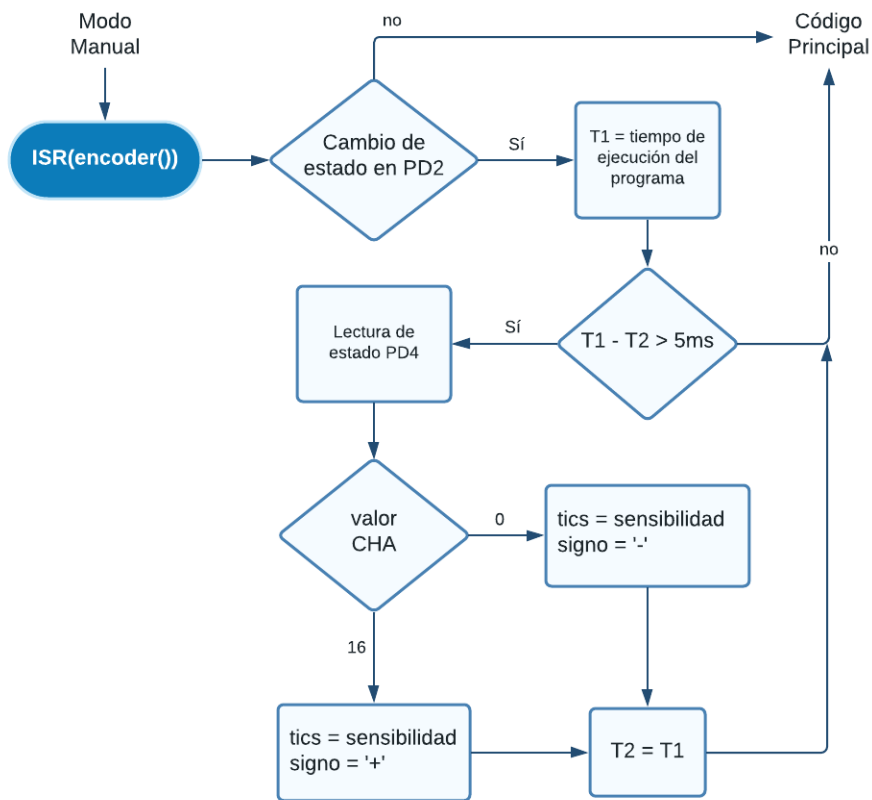


Figura 56: Método para el funcionamiento del codificador rotatorio.

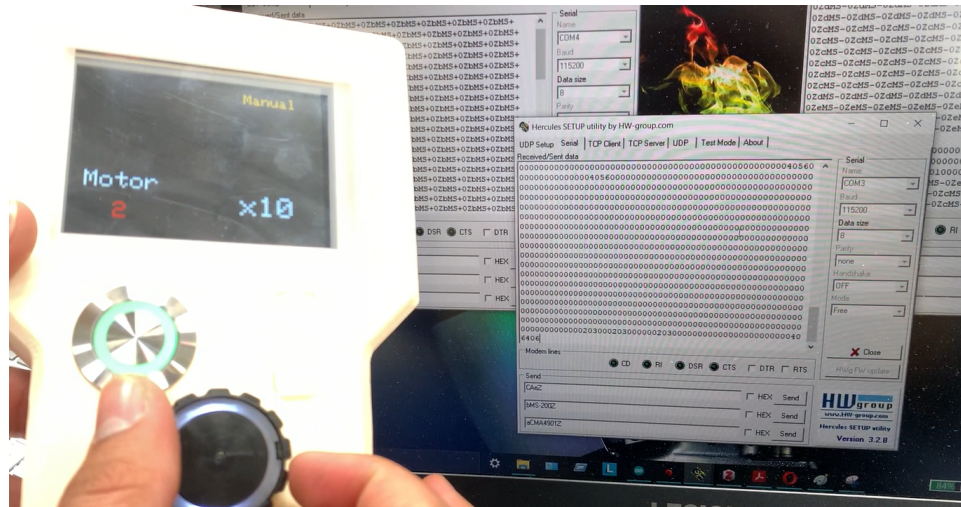


Figura 57: Demostración del código funcionando junto con el sistema principal del brazo robótico asistencial.

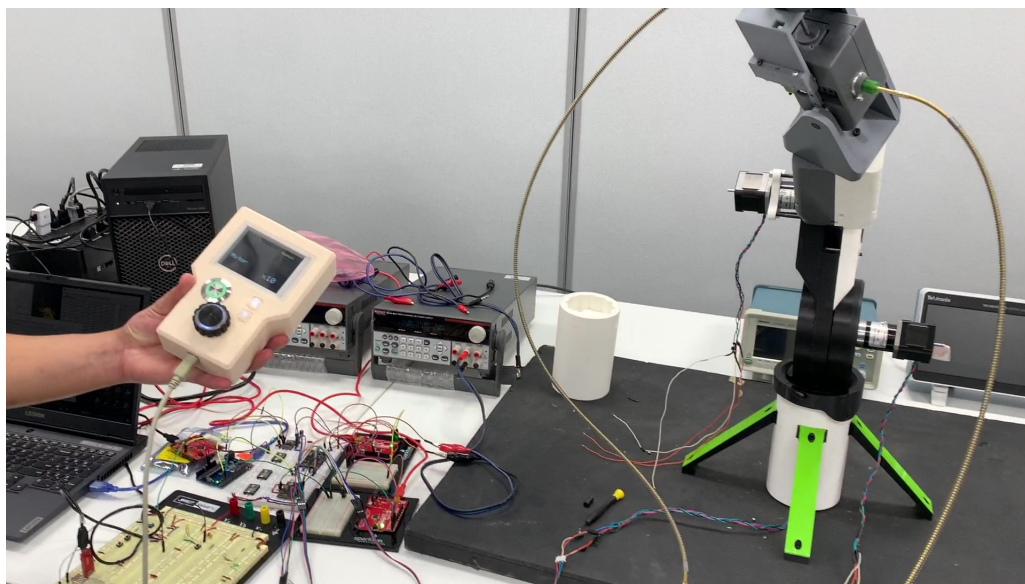


Figura 58: Control Remoto junto al sistema principal y el brazo robótico asistencial.

Diseño físico de la caja de soporte

El objetivo de este cajón es sostener y soportar el brazo robótico asistencial, debido que este será más grande y pesado que el utilizado en la sala de operaciones y no podrá colocarse en la posición en la que se encuentra el brazo mecánico actual de la clínica (Figura [2]). Por tal motivo, remover el brazo mecánico permite tener un espacio libre en el sistema de sujeción de la camilla (Figura [68]) el cuál se aprovechará para acoplarse a él y así mantener firme y estable el cajón y el brazo. Durante una visita al Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA, se tomaron mediciones para tener una idea sobre el tamaño que el cajón deberá tener. Las mediciones y condiciones vistas serán nombradas a continuación:

- Espacio entre camilla y un mueble: aproximadamente 2 metros.
- Rango de altura del espacio de acople libre: de 60 a 120 cm desde el suelo.
- El cajón debe poder transportarse en la sala con facilidad.
- El cajón debe poder almacenar piezas y repuestos.
- Soportar químicos de limpieza y desinfección

Teniendo estas condiciones y medidas en cuenta, se dio inicio a realizar el diseño de este cajón, comenzando por la selección de componentes.

8.1. Selección de material y componentes

Se utilizaron barras de aluminio prefabricadas (Figura [59]) de 30x30mm para tener ventajas como: versatilidad en la configuración del ensamble, alta rigidez y momento de inercia, bajo peso y tamaño compacto, así como su resistencia a los químicos y solventes que podrían ser utilizados en la clínica para su limpieza y desinfección. Al ser barras prefabricadas, son fáciles de obtener y sus accesorios también, lo que permite que el diseño pueda ser iterativo y modificarse cuando sea necesario.

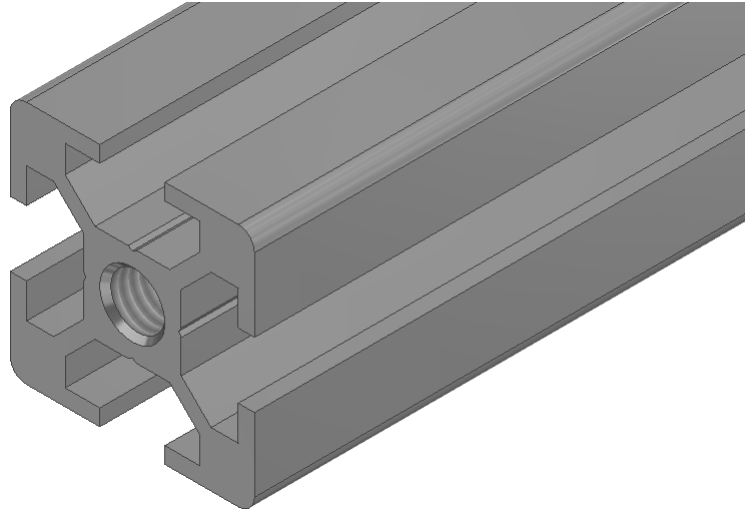


Figura 59: Modelo de barra de aluminio prefabricado

En la Figura [60] se puede apreciar accesorios angulares que sirvieron para unir las barras y darles rigidez al ensamble.

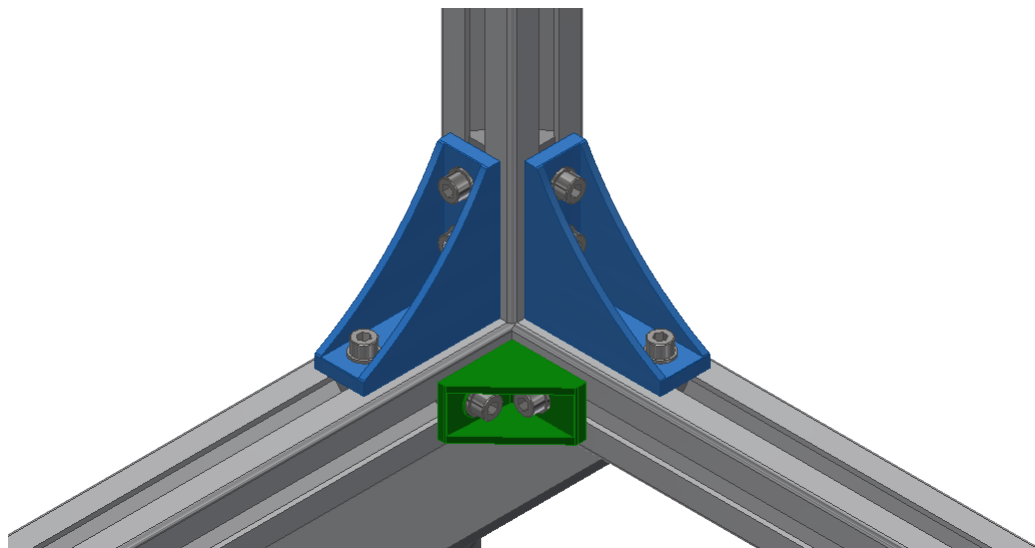


Figura 60: Uniones y soportes angulares para la sujeción de las barras de aluminio

La tuerca que se muestra en la Figura [61] fue seleccionada por ser uno de los componentes estándar que el fabricante diseñó para usarse con sus productos. Su forma se adapta al espacio de las barras y la esfera que tienen debajo (Figura [61b]) genera presión en la barra para evitar que este se deslice fácilmente, dándole más rigidez al ensamblaje. En cuanto a los tornillos, se utilizaron tornillos tipo *Allen* de cabeza cilíndrica y se utilizaron de varios diámetros y longitudes.

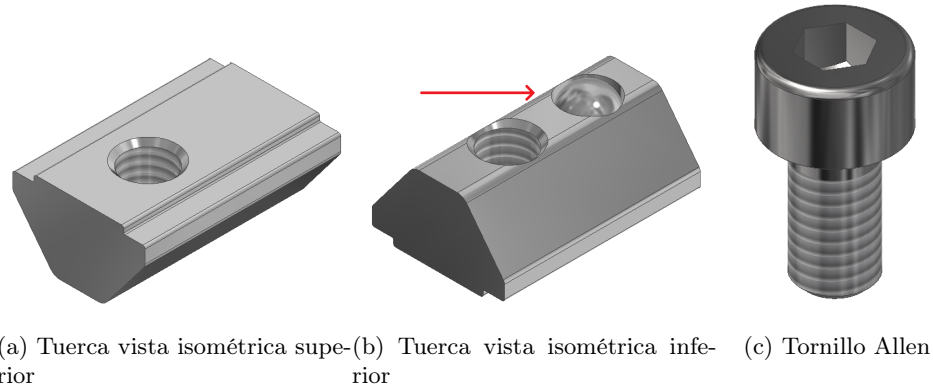


Figura 61: Tuerca y tornillo que se utilizará para el ensamblaje de diversos componentes.

El propósito de los rieles lineales es proporcionar una forma fácil de mover el brazo robótico para ser colocado en diferentes posiciones. El deslizamiento del brazo será a lo ancho del cajón. Con cada paciente se requieren distintos puntos en los que debe ser operado, por lo que permite que nuestro robot tenga mayor rango de movilidad y de alcance en el efector final.

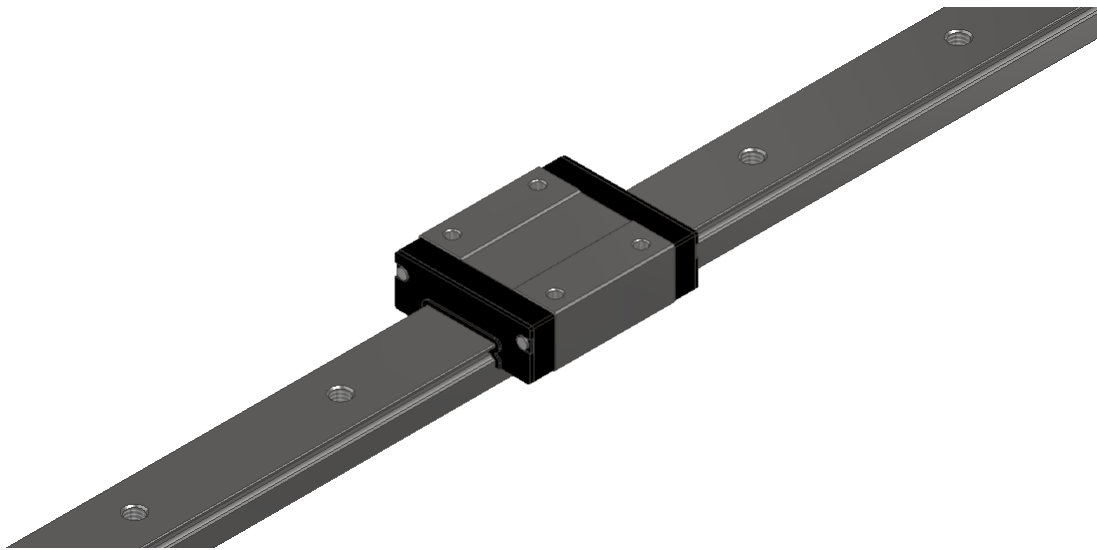


Figura 62: Riel y rodamiento utilizado para el mecanismo de desplazamiento para la base y el brazo robótico

Este riel y carro es fabricado por MISUMI y el modelo seleccionado es el SSEB20. Las dimensiones y especificaciones del riel y del carro se encuentran en la Figura [63] y en el Cuadro [64].

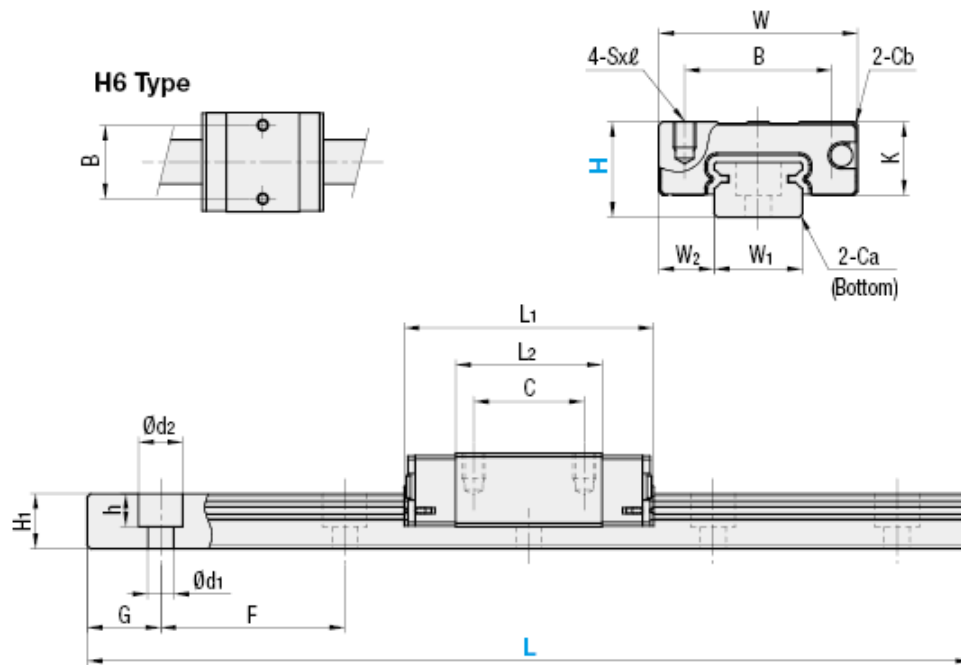


Figura 63: Figura que muestra el cuadro de dimensiones y capacidades para varios rieles lineales

Part Number			Block Dimension									Guide Rail Dimension							
Type	MX	H	L	W	L ₁	B	C	Sxℓ	L ₂	K	Cb	W ₁	W ₂	H ₁	Ca	Counterbored Hole d ₁ x d ₂ x h		F	G
SSEB SSEBV SSEBZ SSE2B SSE2BV SSE2BZ SSEBL SSEBLV SSEBLZ SSE2BL SSE2BLV SSE2BLZ	-	6	25~100 (70)	12	17.4	8	-	M2x1.5	9.7	4.5	0.3	5	3.5	4	0.3	2.4x3.5x1		15	5
		8	40~130 (70)	17	23.6	12	8	M2x2.5	13.6	6.5	0.3	7	5	4.7	0.3	2.4x4.2x2.3		15	5
	Blank: None -MX: Provided	10	35~275 (75)	20	30	15	10	M3x3	19	7.8	0.3	9	5.5	5.5	0.3	3.5x6x3.5		20	7.5
		13	45~470 (95)	27	33.9	20	15	M3x3.5	19.9	10	0.5	12	7.5	7.5	0.5	3.5x6x4.5		25	10
		16	70~670 (110)	32	42.4	25	20	M3x4	27.4	12	0.5	15	8.5	9.5	0.5	3.5x6x4.5		40	15
		20	100~700 (160)	40	50	30	25	M4x6	34.6	15	0.5	20	10	11	0.5	6x9.5x5.5		60	20

Figura 64: Figura que muestra el cuadro de dimensiones y capacidades para varios rieles lineales

Se utilizaron llantas para darle movilidad al cajón y que este pueda ser desplazado por la sala de manera sencilla. Esta llanta también es una pieza estándar del fabricante y posee las medidas necesarias para ensamblarse con las barras.

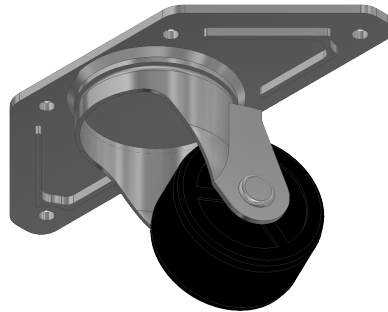


Figura 65: Llanta utilizada en el ensamble del cajón 1.

8.2. Diseño de prototipo 1

Utilizando las piezas mencionadas anteriormente, se diseñó el primer prototipo iniciando por el esqueleto de la estructura (Figura [66]). Se utilizaron barras de 30x30mm con longitudes de 40 y 60 cm, dando un largo y ancho de 63x43cm, y una altura aproximada de 70cm. Este esqueleto estará encargado de darle forma y rigidez al sistema para que todos los componentes puedan ser montados sobre él.

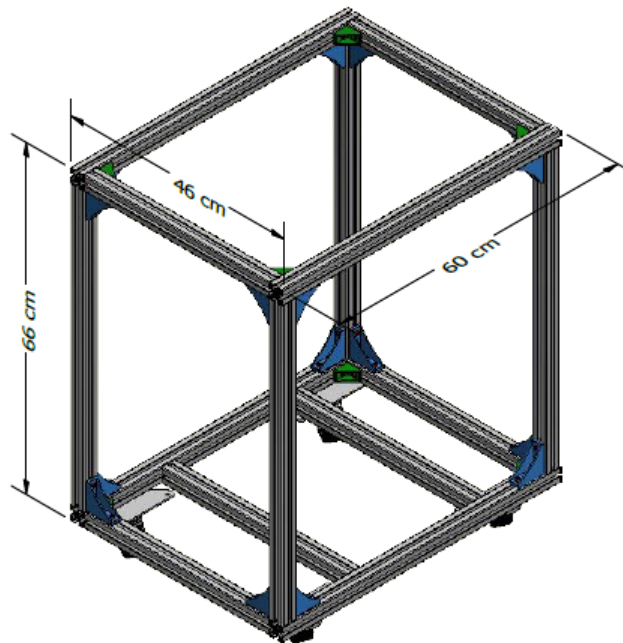


Figura 66: Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.

Una vez diseñada y ensamblada la estructura, se diseñaron las tapaderas, las puertas, las esquineras y el sistema de acople para obtener un cajón más completo como se puede apreciar en la Figura [67].

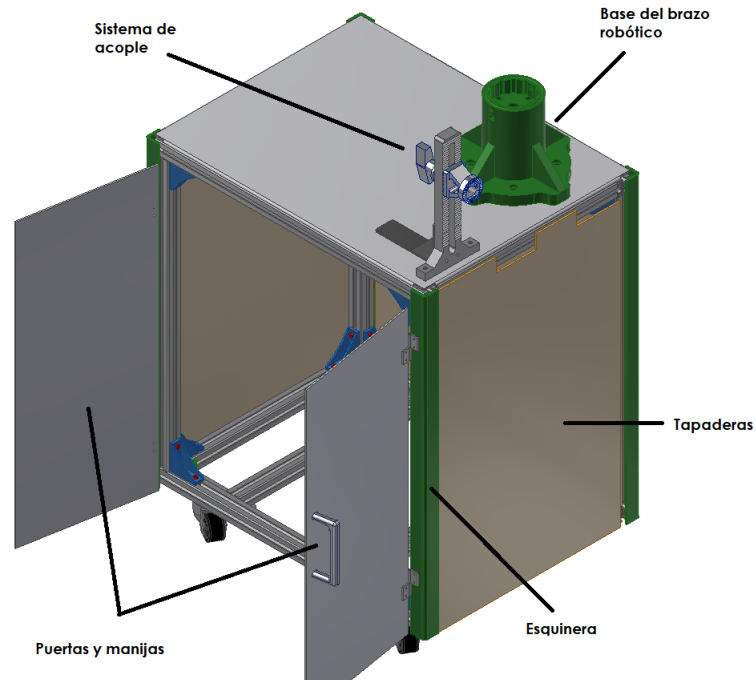


Figura 67: Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.

8.2.1. Sistema de acople

Este sistema de acoplarse al sistema de sujeción de la camilla que se encuentra en la sala de operaciones (Figura [68]). Esta camilla posee un mecanismo para modificar su altura, lo que obliga a que el sistema de acople posea un mecanismo para modificar su altura. Este sistema está diseñado para ser fabricado con dos materiales: aluminio y acero inoxidable (Figura [69]). Las partes que conforman este sistema son las siguientes:

1. Rueda dentada
2. Soporte de rueda
3. Barra dentada
4. Tornillo fijador
5. Base de fijación

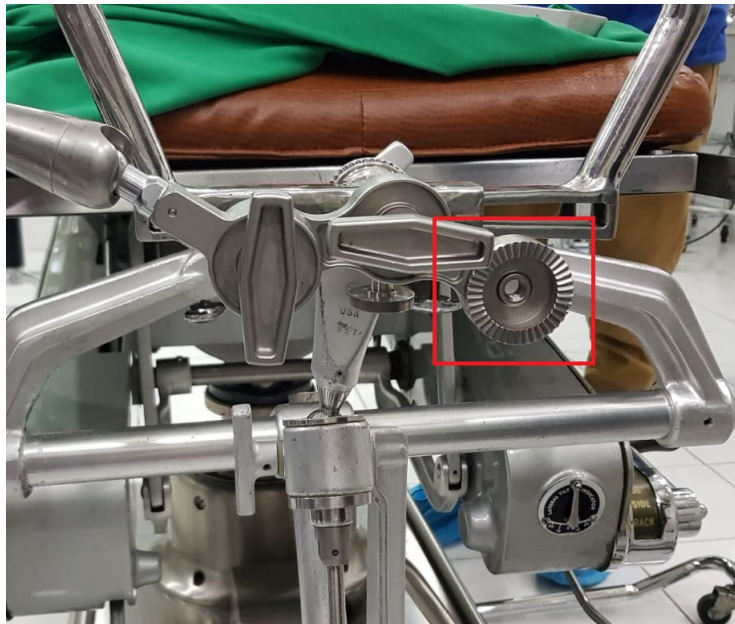


Figura 68: Sistema de sujeción de la camilla que se encuentra en la sala de operaciones en la clínica HUMANA.

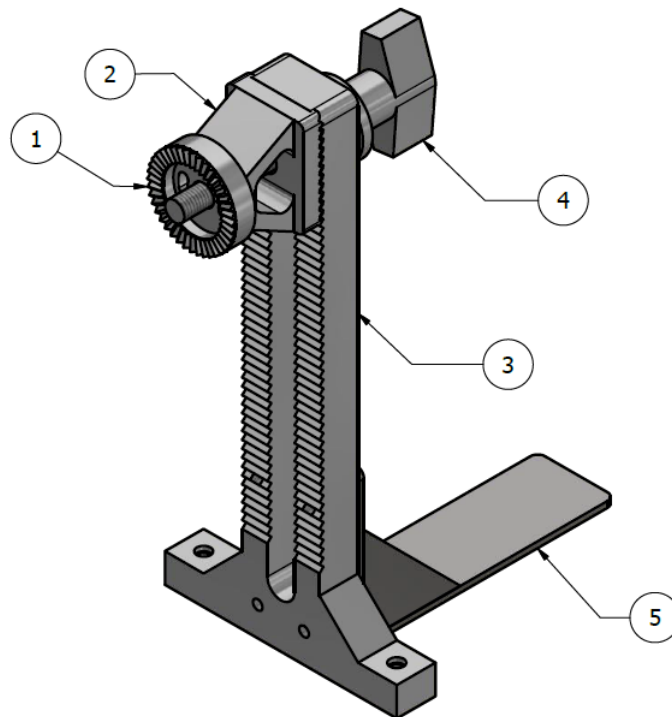


Figura 69: Diseño del prototipo 1 del sistema de cajón y soporte.

De estos elementos, solo la base de fijación será fabricada de acero inoxidable y el resto de piezas serán de aluminio.

Durante el proceso de diseño del prototipo 1 se percibieron aspectos que se podrían mejorar, así como otras que se pueden agregar. Estos aspectos son:

- Se aumentará el largo de las barras a 60 y 80cm para obtener un cajón más grande y un rango de altura mayor para el sistema de acople.
- Se agregarán rieles lineales a la base del brazo para poder desplazarlo a lo ancho del cajón y obtener distintas posiciones de manera sencilla sin tener que desacoplar el cajón ni tener que moverlo.
- Se agregará otro nivel dentro del cajón para obtener un compartimiento en el cual colocar la computadora del sistema automático y la electrónica del sistema principal del brazo.
- El sistema de acople será ubicado al frente del cajón para no impedir el desplazamiento del brazo.
- Se aumentará el tamaño del sistema de acople para obtener un mayor rango de altura.
- Se diseñará un sistema de fijación de montaje/desmontaje rápido para el brazo robótico y para el sistema de acople.
- Cambiar las llantas por unas de mayor tamaño y que posean frenos integrados para mayor estabilidad en el cajón.

8.3. Diseño de prototipo 2

Teniendo en cuenta los aspectos percibidos del prototipo 1, se realizaron los siguientes cambios:

- La longitud de las barras fue aumentado a 60 y 80 cm. Por consecuencia, el tamaño del cajón aumentó (Figura [70]). Esto proporciona mayor estabilidad y reduce el riesgo de que el cajón se voltee.
- Se agregaron rieles a la base del robot y ahora este pudo desplazarse a lo ancho del cajón sin que este deba ser movido o desacoplado de la camilla (Figura [71]). Esto facilita el trabajo del cirujano y asistentes para colocar el brazo en distintas posiciones que ellos crean convenientes.
- Se agregó otro nivel en el cajón para colocar la computadora que utiliza el sistema automático y para la electrónica del sistema principal. (Figura [72]).
- El sistema de acople fue cambiado de ubicación y se colocó en el frente del cajón (Figura [73]).
- El sistema de acople fue modificado para otorgar un mayor rango de altura a la cual se puede acoplar el cajón con la camilla (Figura [73]).

- Se diseñó un sistema de montaje/desmontaje rápido basado en los conectores BNC (Figura [74]) que permite sujetar el brazo y mantenerlo en su posición sin necesidad de utilizar herramientas.
- Se cambiaron las llantas anteriores por unas de mayor tamaño que incluyen frenos integrados (Figura [76]).

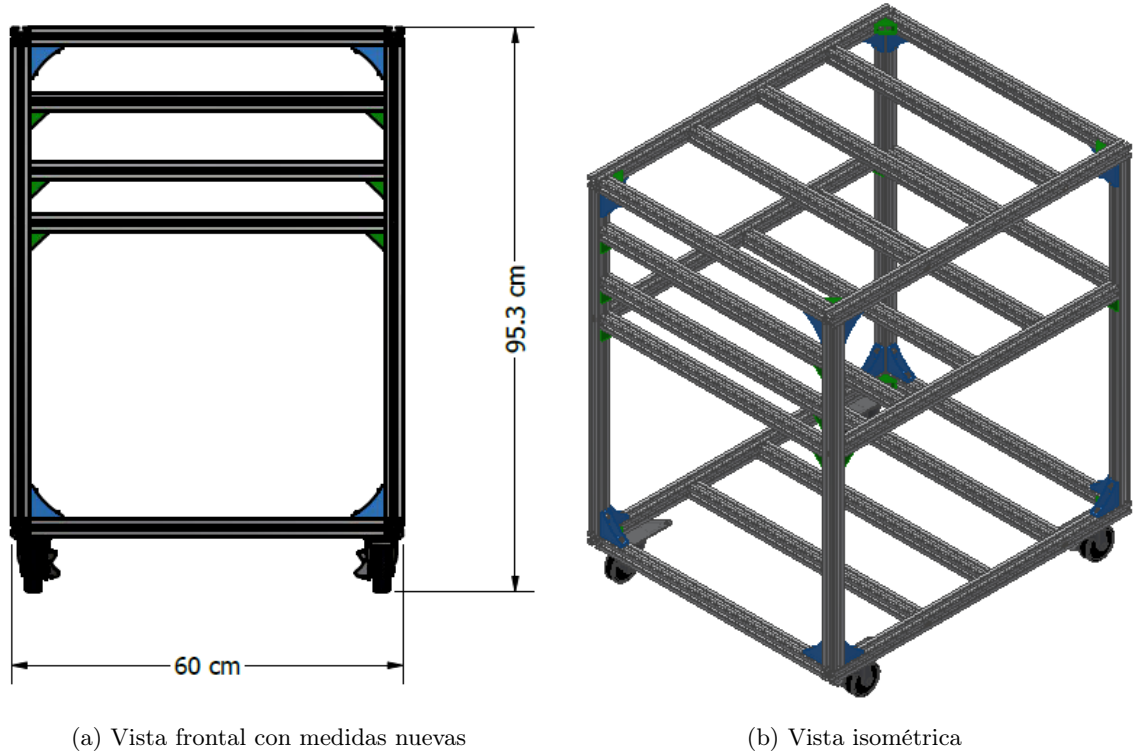


Figura 70: Estructura de aluminio con las nuevas medidas que da forma al cajón y soporta el brazo robótico

Como se puede apreciar en la Figura (71), se muestra el cajón completo con la base para el robot, el mecanismo de desplazamiento, el sistema de acople con su propio sistema de desplazamiento y el resto de tapaderas y niveles para poder resguardar y colocar el resto de componentes internos. Se agregó un *UPS* (*Uninterruptible Power Supply*, por sus siglas en inglés) que se sugiere en el diseño para que el brazo robótico posea un banco de energía de respuesta inmediata que permita mantener el sistema energizado. Esto en caso de que se presente una falla en la red eléctrica de la clínica durante la operación y que represente un riesgo para el paciente. El nivel inferior servirá como compartimiento para guardar herramientas y repuestos que pueden ser necesarios para cuando se requiera mantenimiento o un cambio de piezas.

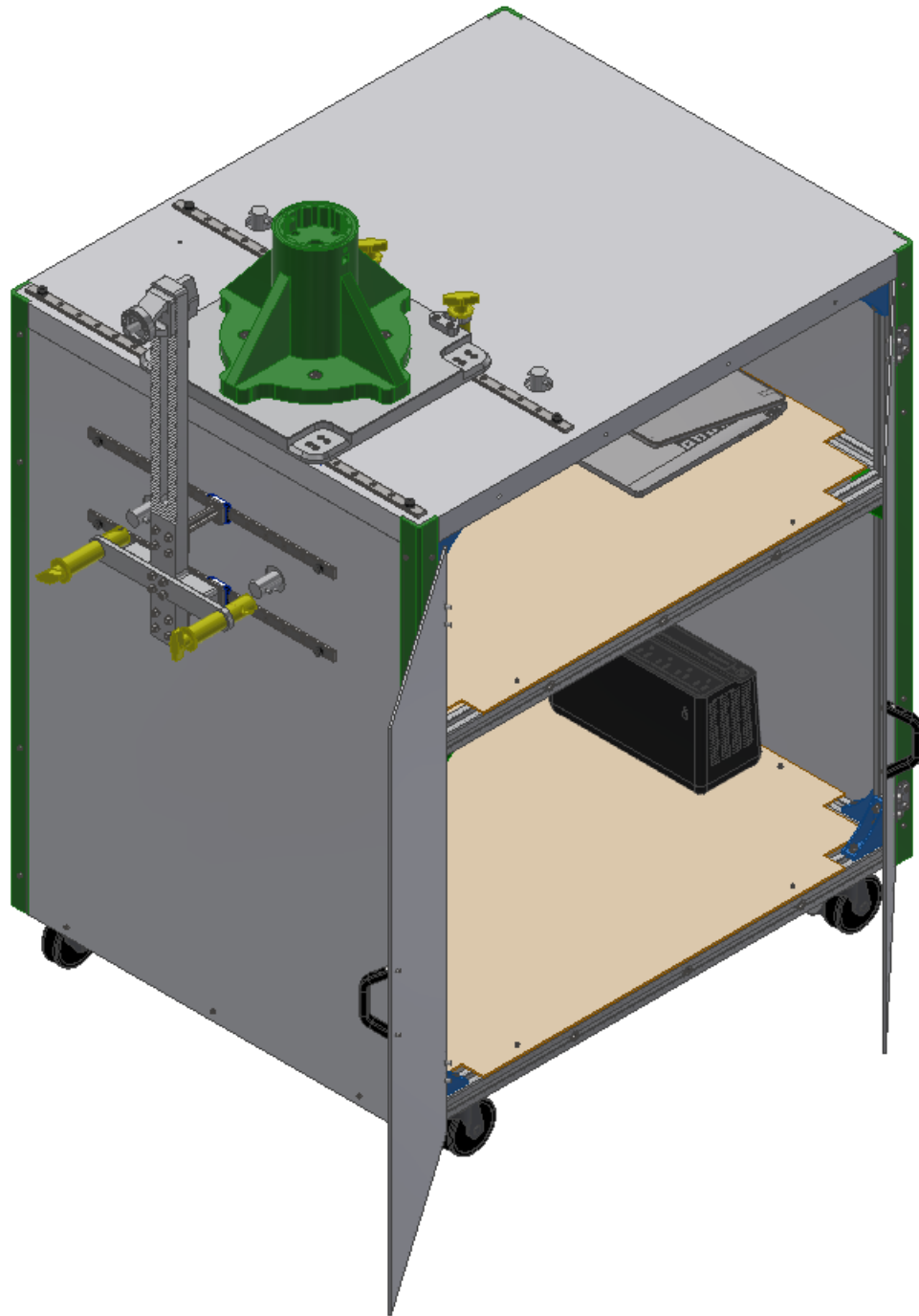


Figura 71: Vista isométrica del cajón completo

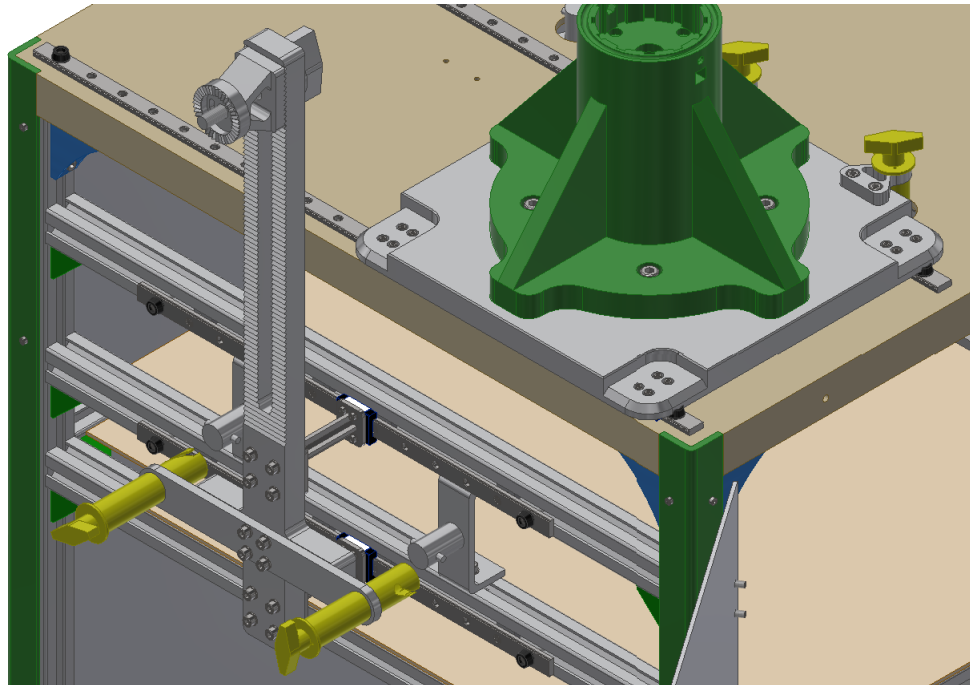


Figura 73: Sistema de acople instalado en el cajón con su sistema de rieles y sujeción "BNC".

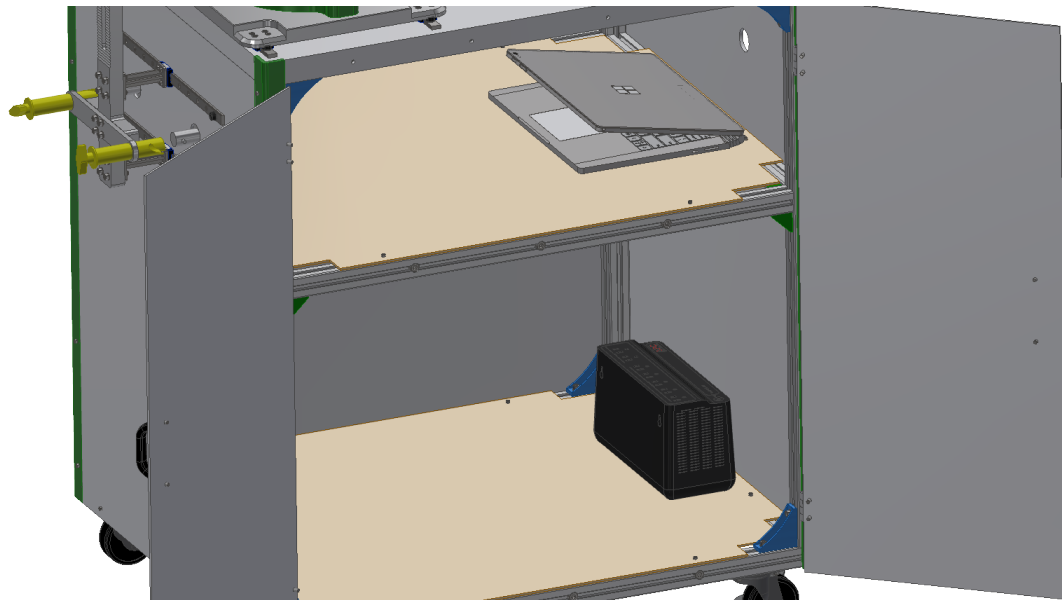
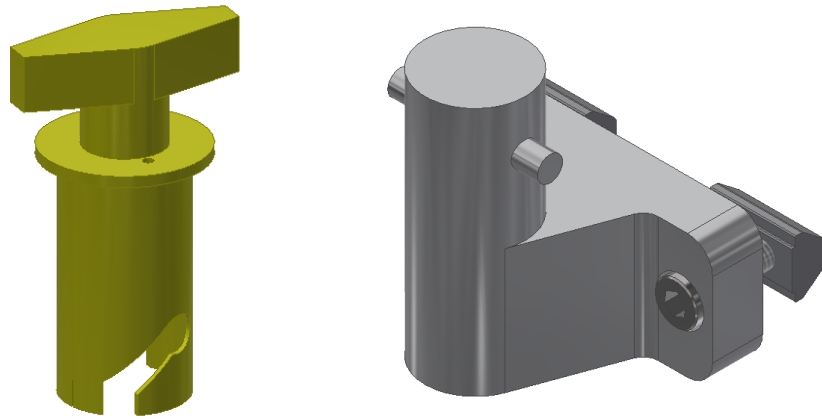


Figura 72: Distintos niveles internos del cajón y los elementos que incluirán.

Se agregaron dos rieles lineales al sistema de acople que le permitió desplazarse a lo ancho del cajón y proporcionó un aumento en el rango de movimiento al cajón. (Figura [73]).



(a) Conector "BNC" hembra

(b) Conector "BNC" macho

Figura 74: Mecanismo basado en conectores BNC utilizado para una fácil separación y sujeción de las piezas móviles.

8.3.1. Sistema de fijación para la base del brazo

Esta pieza se diseñó con el fin de conectar el sistema de rieles con la base del brazo robótico. Esto permite que la base del brazo se pueda montar con mayor facilidad al cajón ya que únicamente requiere de 4 tornillos para ser fijado. También permite que el peso del brazo se distribuya uniformemente sobre los rieles.

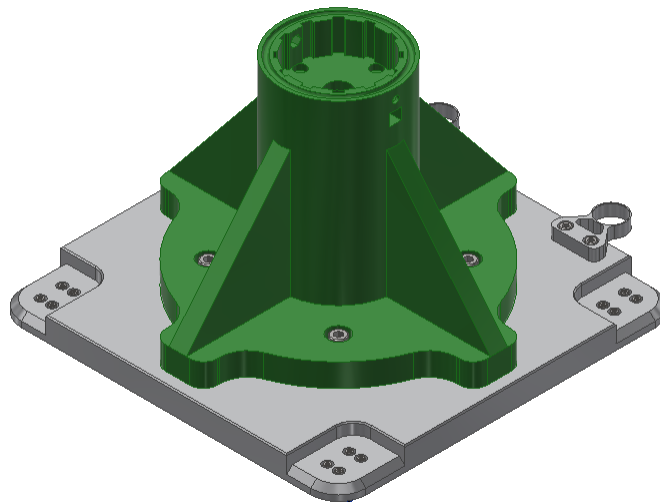


Figura 75: Base sugerida del brazo robótico (pieza verde) y base de aluminio donde el brazo será montado.

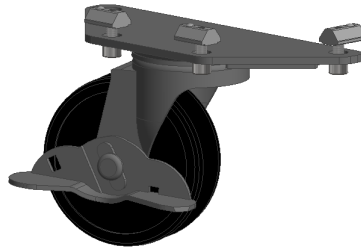


Figura 76: Llanta con sistema de freno utilizada en el prototipo 2.

8.3.2. Cálculos del cajón

Como parte del diseño del cajón, se realizaron diversos cálculos para determinar que el cajón soporte el momento generado por el brazo robótico asistencial cuando este se encuentre en su máxima elongación para dos direcciones distintas.

Se tomó en consideración dos aspectos importantes: peso del elemento y el centro de gravedad en donde se asumió que se aplicó el peso, y se utilizó el concepto de torque para el análisis. Con esto indicado, se comparó el torque (o momento de fuerza) producido por el brazo robótico asistencial contra el torque provocado por el cajón.

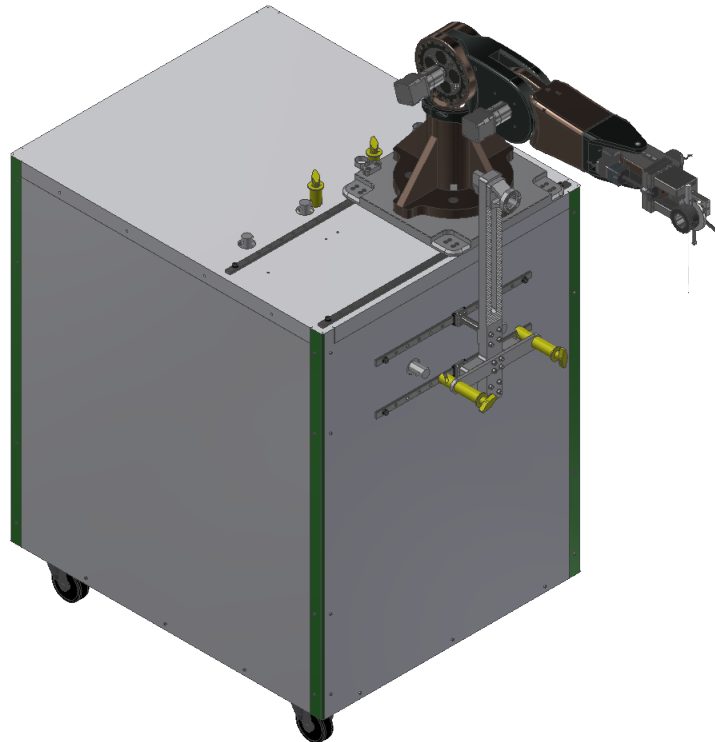


Figura 77: Vista del cajón unido con el brazo robótico asistencial

8.3.3. Análisis de volteo respecto un eje que atraviesa lo ancho del cajón

En este caso se analizó el momento provocado por brazo robótico contra el momento provocado por el cajón, tomando como pivote el eje que atraviesa las llantas frontales del cajón.

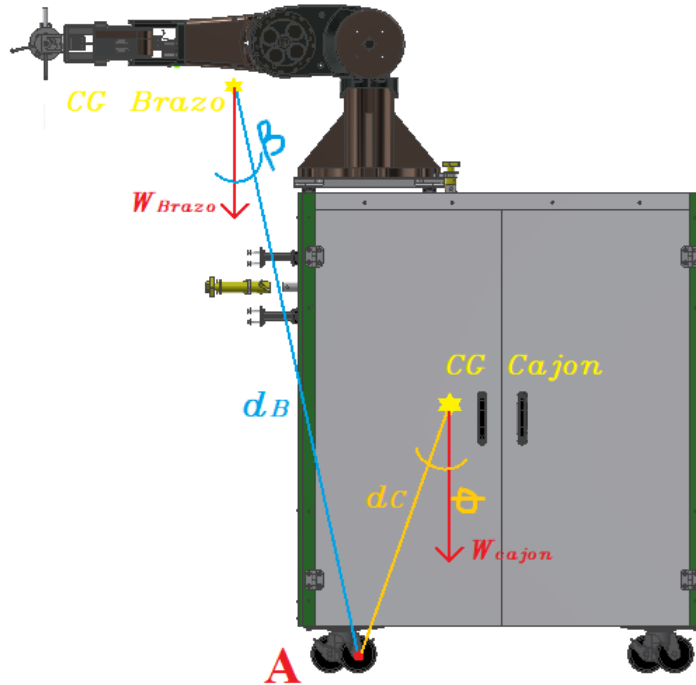


Figura 78: Diagrama de cuerpo libre para las fuerzas del cajón y del brazo

$$\sum M_A = 0 \quad \text{o} \quad M_{CG_{cajon}} > M_{CG_{Brazo}}$$

$$W_{cajon} * d_C \sin \theta - W_{brazo} * d_B \sin \beta > 0$$

$$W_{cajon} * d_C \sin \theta > W_{brazo} * d_B \sin \beta$$

Figura 79: Ecuaciones para análisis de momento

En donde: W_{cajon} es el peso del cajón, d_C es la distancia del punto A al centro de gravedad del cajón, θ es el ángulo equivalente a una componente de fuerza (peso del cajón) aplicada a 90° sobre la línea de acción, W_{brazo} es el peso del brazo, d_B es la distancia desde el punto A al centro de gravedad del brazo y β es el ángulo equivalente a una componente de fuerza (peso del brazo) aplicada a 90° sobre la línea de acción.

8.3.4. Análisis de volteo respecto un eje que atraviesa lo largo del cajón

En este caso se analizó el momento provocado por brazo robótico contra el momento provocado por el cajón, tomando como pivote el eje que atraviesa las llantas laterales del cajón.

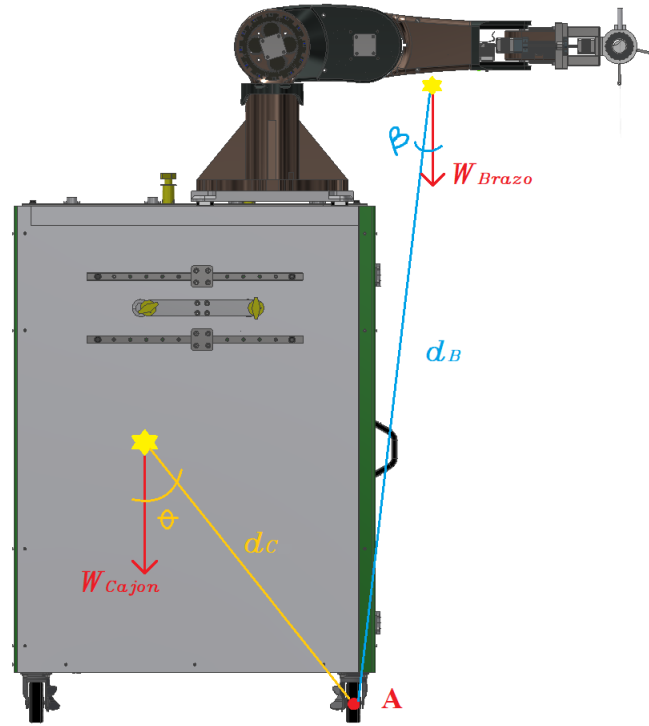


Figura 80: Diagrama de cuerpo libre para las fuerzas del cajón y del brazo

$$\sum M_A = 0 \quad \text{o} \quad M_{CG_{cajon}} > M_{CG_{Brazo}}$$

$$W_{cajon} * d_C \sin \theta - W_{brazo} * d_B \sin \beta > 0$$

$$W_{cajon} * d_C \sin \theta > W_{brazo} * d_B \sin \beta$$

Figura 81: Ecuaciones para análisis de momento

En donde: W_{cajon} es el peso del cajón, d_C es la distancia del punto A al centro de gravedad del cajón, θ es el ángulo equivalente a una componente de fuerza (peso del cajón) aplicada a 90° sobre la línea de acción, W_{brazo} es el peso del brazo, d_B es la distancia desde el punto A al centro de gravedad del brazo y β es el ángulo equivalente a una componente de fuerza (peso del brazo) aplicada a 90° sobre la línea de acción.

- Se diseñó e implementó un control remoto para manejo manual y automático del brazo robótico asistencial.
- Se diseñó un sistema de soporte para montar el brazo robótico y resguardar la electrónica del sistema de control y potencia.
- Se diseñó un sistema de acople que permite la sujeción del cajón con la mesa de trabajo de la sala de operaciones en el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA.
- Se diseñó un mecanismo de sujeción de conexión y desconexión rápida para la base que soporta el brazo y para el mecanismo de acople.

- Si se desea implementar imágenes en la pantalla en vez de caracteres, se recomienda utilizar otro microcontrolador que opere a más de 20MHz de frecuencia y utilizar un protocolo de comunicación en paralelo con la pantalla para que la transmisión de datos sea mayor y que las imágenes carguen más rápido.
- Una de las partes del sistema de acople llamada “rueda dentada” (Figura [69]) no está diseñada con suficiente precisión en los dientes. Esto se debe a lo complejo que es medir la pieza de BrainLab y las herramientas de medición utilizadas no fueron las adecuadas. Recomiendo encontrar las herramientas y la forma adecuada para poder generar el mismo patrón de dientes para obtener una pieza con formas precisas y que se encaje mejor.
- Modificar el algoritmo para que este muestre en pantalla el valor (en milímetros o en grados) que el operario desee mover respecto a lo que indica BrainLab. También se debe agregar un botón que permita el envío de estos datos. Además, indicarle al encargado de programar los motores del sistema de control principal que modifique el código para recibir los datos de esta manera.
- El brazo tiene un espacio de trabajo determinado (robótica 1) por la estructura y forma en que está fabricado. Este espacio de trabajo debe ser estudiado y dimensionado para considerar que el efector final se pueda posicionar en cualquier parte de la cabeza y que este pueda operar. Esto servirá para diseñar las dimensiones y forma del cajón y que el espacio de trabajo del brazo robótico pueda cumplir todas las tareas.

-
- [1] Z. Biomet. (2021). “*ROSA ONE Brain*,” dirección: <https://www.zimmerbiomet.com/medical-professionals/cm/rosa-brain.html#>.
 - [2] R. Doñate. (2018). “*Lección 1: Tarjeta de Circuito Impreso – Definiciones y Terminología Utilizada parte I*,” dirección: <https://pcbcentral.com/tarjeta-de-circuito-impreso-definiciones-y-terminologa-utilizada-parte-i>.
 - [3] BEEP. (2018). “*Conexiones USB: Todo lo que necesitas saber*,” dirección: <https://www.beep.es/blog/conexiones-usb-todo-lo-que-necesitas-saber/>.
 - [4] S. Hernández. (2013). “*¿Qué es un microcontrolador?*” Dirección: <http://sherlin.xbot.es/microcontroladores/introduccion-a-los-microcontroladores/que-es-un-microcontrolador>.
 - [5] Siemens. (2021). “*Diseño asistido por ordenador (CAD)*,” dirección: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>.
 - [6] COPA-DATA. (2021). “*¿Qué es una HMI?*” Dirección: <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data/>.
 - [7] BrianLab. (2021). “*Aplicación Craneal Navigation*,” dirección: <https://www.brainlab.com/es/productos-de-cirugia/relacion-de-productos-de-neurocirugia/navegacion-craneal/#/>.
 - [8] Samsung. (2021). “*¿Qué significado tienen las siglas TFT LCD?*” Dirección: <https://www.samsung.com/latin/support/computing/what-means-tft-lcd/>.
 - [9] A. Pini. (2019). “*Por qué y cómo usar la interfaz periférica serial para simplificar las conexiones entre distintos dispositivos*,” dirección: <https://www.digikey.com/es/articles/why-how-to-use-serial-peripheral-interface-simplify-connections-between-multiple-devices>.