UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y prototipado de teclado para pies enfocado a personas con discapacidades de miembro superior

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Rogelio Gil Álvarez

DIRECTOR DE TESIS

M.A. Luis Yair Bautista Blanco

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO Y PROTOTIPADO DE TECLADO PARA PIES ENFOCADO A PERSONAS CON DISCAPACIDADES DE MIEMBRO SUPERIOR que presenté para obtener el titulo de INGENIERO MECATRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ROGELIO GIL ALVAREZ
Número de cuenta: 317214105

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, máxima casa de estudios, por todos los aprendizajes, oportunidades, profesores y amigos que me brindó.

Al Maestro Yair por su cátedra y tutoría a lo largo de todo este proyecto.

Al Doctor Leopoldo por sus pláticas, consejos y apoyo a lo largo de toda la carrera.

A mis sínodos, Miguel, Miguel Ángel y Serafín por su tiempo y recomendaciones para la conclusión de este trabajo.

A mis padres Reyna y Rogelio por sus enseñanzas y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Gracias por todo.

A mi querida Alexia por todo su cariño y permitirme estar a su lado, mi principal motivo de alegría y bienestar.

A mis amigos, Jesuitas, por ser esa fuente de alegría y apoyo incondicional en mi día a día.

A Mauricio por ser mi confidente y estar todos estos años siempre que lo he necesitado.

A Fausto por todas esas risas y demostrar ser alguien de mi plena confianza.

A Alonso por ser mi compañero de estudios y amigo de principio a fin.

A Fernanda por su amistad y compañerismo durante estos últimos años académicos.

Sin alguno de ellos no sería quien soy hoy en día. Gracias.

"Haz lo mejor que puedas hacer y eso es todo lo que puedes hacer"

Contenido

Resumen 1
Objetivo 1
1. Marco de referencia 2
1.1 Actividad 2
1.2 Problema 7
1.3 Soluciones comerciales 12
1.3.1 Xbox Adaptive Controller 12
1.3.2 PlayStation Access Controller 13
1.3.3 Azeron Cyro 15
1.3.4 Evil Controllers 16
1.3.5 Observaciones 17
1.4 Discapacidades de miembro superior 18
2. Diseño conceptual 20
2.1 Videojuegos de disparos 20
2.1.1 Acciones más frecuentes 22
2.2 Diagramas de caja negra 32
2.2.1 Definición de funciones y generación de conceptos 33
2.2.2 Matrices morfológicas 35
2.2.3 Matriz de decisión definitiva por cada función 44
3. Diseño de detalle 55
3.1 Necesidades y requerimientos 55
3.2 Antropometría 57
3.3 Prototipo A de una tecla 59
3.3.1 Evaluación del prototipo A de una tecla 71
3.4 Prototipo B de una tecla 76
3.4.1 Selección de materiales 87
3.4.2 Análisis de esfuerzos del prototipo B de una tecla 88
3.4.3 Evaluación del prototipo B de una tecla 96
3.4.4 Caracterización del resorte 100
3.5 Prototipo C de una tecla 104
3.5.1 Análisis de esfuerzos del prototipo C de una tecla 106
3.5.2 Evaluación del prototipo C de una tecla 112

3.6 Modelado del teclado 113
3.6.1 Piezas de bases 113
3.6.2 Piezas de teclas 121
3.6.3 Piezas de placas con logotipo 121
3.6.4 Piezas de logotipos 127
3.6.5 Piezas de retenedores 131
3.6.6 Piezas de recubrimientos 135
3.7 Manufactura 137
3.8 Electrónica 146
3.9 Programación 153
3.10 Ensamble 165
4. Fase de pruebas 172
Conclusiones 178
Referencias 181
Bibliografía 183
Referencias de tablas 184
Referencias de imágenes 185
Apéndice A. Planos de las piezas del módulo 6 189
Apéndice B. Código del teclado 194

Resumen

A lo largo del presente trabajo se aborda la gran problemática que enfrentan aquellas personas que sufren algún tipo de discapacidad de miembro superior al momento de jugar videojuegos mediante una computadora. En la actualidad, los videojuegos representan un medio de entretenimiento muy importante a lo largo de todo el mundo y en grupos de todas las edades; sin embargo, en su mayoría, los dispositivos de control existentes no están diseñados para los grupos de usuarios que poseen algún tipo de limitante física o sensorial.

Es por ello por lo que, tomando como base trabajos previos de investigación, se partió de identificar las necesidades de aquellas personas que disponen de una discapacidad de miembro superior para así poder desarrollar un periférico capaz de brindar una mayor accesibilidad e inclusión a este tipo de usuarios al proveerles la oportunidad de realizar las acciones más relevantes y dinámicas dentro de los videojuegos mediante otra parte de su cuerpo, en este caso, los pies.

Fue así como las ramas del diseño, mecánica, electrónica y programación se dispusieron de manera conjunta para el prototipado de un teclado para los pies con el objetivo de sustituir de manera parcial las funcionalidades de un teclado convencional al jugar.

Se trata del prototipado de un dispositivo de control el cual podría ser extrapolado a otras áreas para brindar una mayor accesibilidad e inclusión a personas discapacitadas para el cumplimiento de otras tareas que requieran de un control manual.

Objetivo

Diseño y prototipado de un periférico para computadora que cuente con las teclas más relevantes al momento de jugar videojuegos, con la finalidad de que jugadores con discapacidades de miembro superior unilateral puedan enfocar su mano contralateral en la manipulación del ratón y sustituir parcialmente el teclado convencional por uno que pueda ser controlado mediante los pies.

1. Marco de referencia

1.1 Actividad

Desde su invención en la década de los 50's y con el pasar de los años, los videojuegos cada vez se han vuelto una fuente de entretenimiento más importante a lo largo de todo el mundo para grupos de todas las edades, hasta la actualidad, donde se cuenta con una gran cantidad de géneros disponibles para diversos dispositivos.

Hoy en día, la popularidad de los videojuegos se ha vuelto tal que su consumo se equipara, o incluso supera, al de la televisión en vivo dependiendo del grupo de edad que se esté considerando. De acuerdo con un estudio, de manera global, semanalmente las personas dedican aproximadamente 10.4 horas al consumo de televisión mientras que 8.9 horas al de videojuegos (*YouGov*, 2023).

YouGov es una compañía de investigación de mercados y análisis de datos basada en internet, fundada en el año 2000 con sede en Reino Unido y que opera en Europa, Norteamérica, Asia-Pacífico y Medio Oriente.

La encuesta realizada para recopilar los datos de dicho estudio se llevó a cabo del 18 de julio de 2022 al 4 de agosto de 2022, donde se reunió información de un total de 19,747 participantes a lo largo de 18 países, de los cuales 1,062 corresponden a México.

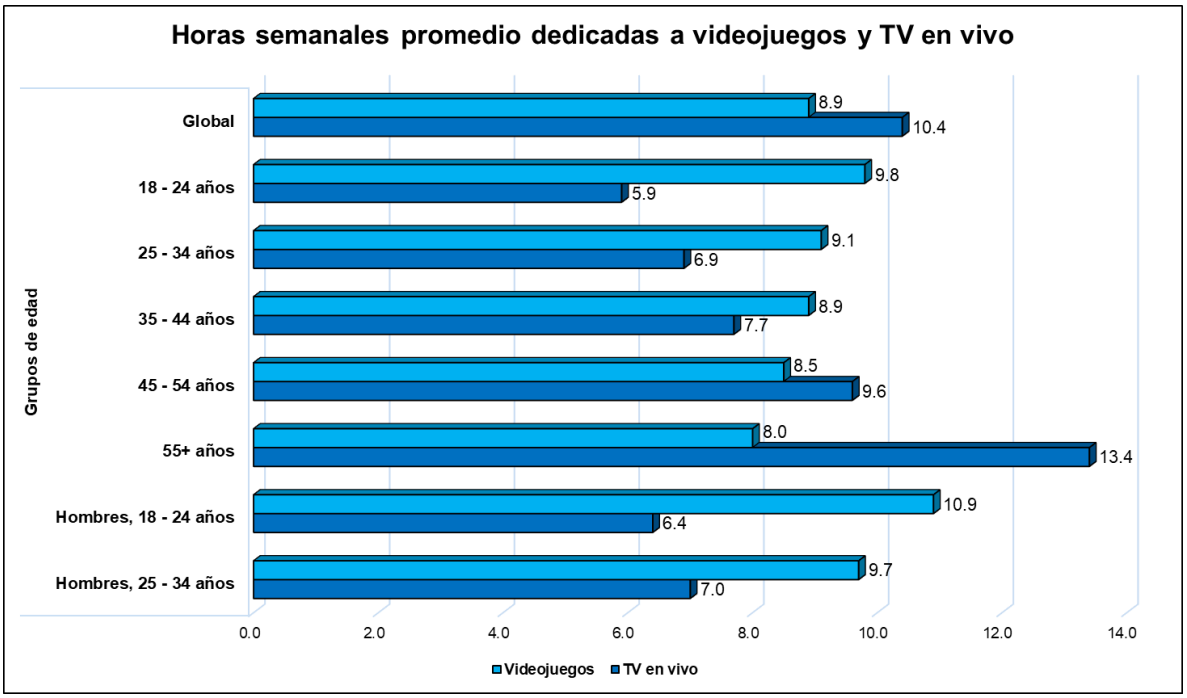


Figura 1. Horas semanales promedio dedicadas a videojuegos y TV en vivo (YouGov, 2023, p. 12).

De acuerdo con el gráfico, en el segmento de la población que va de los 18 a 44 años se puede observar que los videojuegos son incluso más populares que la televisión. Pero es en el grupo de 18 a 24 años donde la preferencia por los videojuegos es mucho más notoria. De manera general, se puede apreciar que mientras más joven el público, mayor es el consumo de videojuegos que el de televisión.

En un panorama más amplio, entre las actividades cotidianas que realizan las personas en los medios de comunicación, los videojuegos ocupan la posición número 10 a nivel global, mientras que la posición número 6 entre consumidores por debajo de los 34 años.

Actividades en medios de comunicación realizadas en una semana típica – Global por edad					
	18 - 24	**25 - 34**	**35 - 44**	**45 - 54**	**55+**
Internet en general (sitios web, correo electrónico, etc.)	54%	55%	60%	66%	74%
Usar redes sociales	60%	60%	60%	58%	53%
Ver contenido en servicios de transmisión en vivo	51%	52%	55%	49%	40%
Ver televisión en vivo	25%	30%	39%	48%	63%
Ver videos en línea	53%	47%	48%	44%	34%
Leer periódicos, libros, y revistas impresas o en línea	30%	31%	38%	44%	57%
Escuchar radio	17%	27%	37%	47%	56%
Escuchar música en línea	51%	45%	38%	35%	22%
Ver televisión pregrabada	23%	28%	32%	36%	38%
Jugar videojuegos en consola, computadora, teléfono móvil u otro dispositivo portátil	**42%**	**38%**	**35%**	**30%**	**21%**
Ver transmisiones de video en vivo	31%	30%	29%	25%	18%
Escuchar podcasts	20%	23%	20%	18%	12%

Tabla 1. Actividades semanales realizadas por porcentaje de personas y grupos de edad (YouGov, 2023, p. 9).

De los 18 países encuestados, México se encuentra situado como el 5° país en el que más personas dedican una parte de su tiempo semanal a jugar videojuegos, quedando solo por detrás de China, Hong Kong, Indonesia y Singapur. Alcanzando hasta un 17% de la población con un promedio de 8.2 horas.

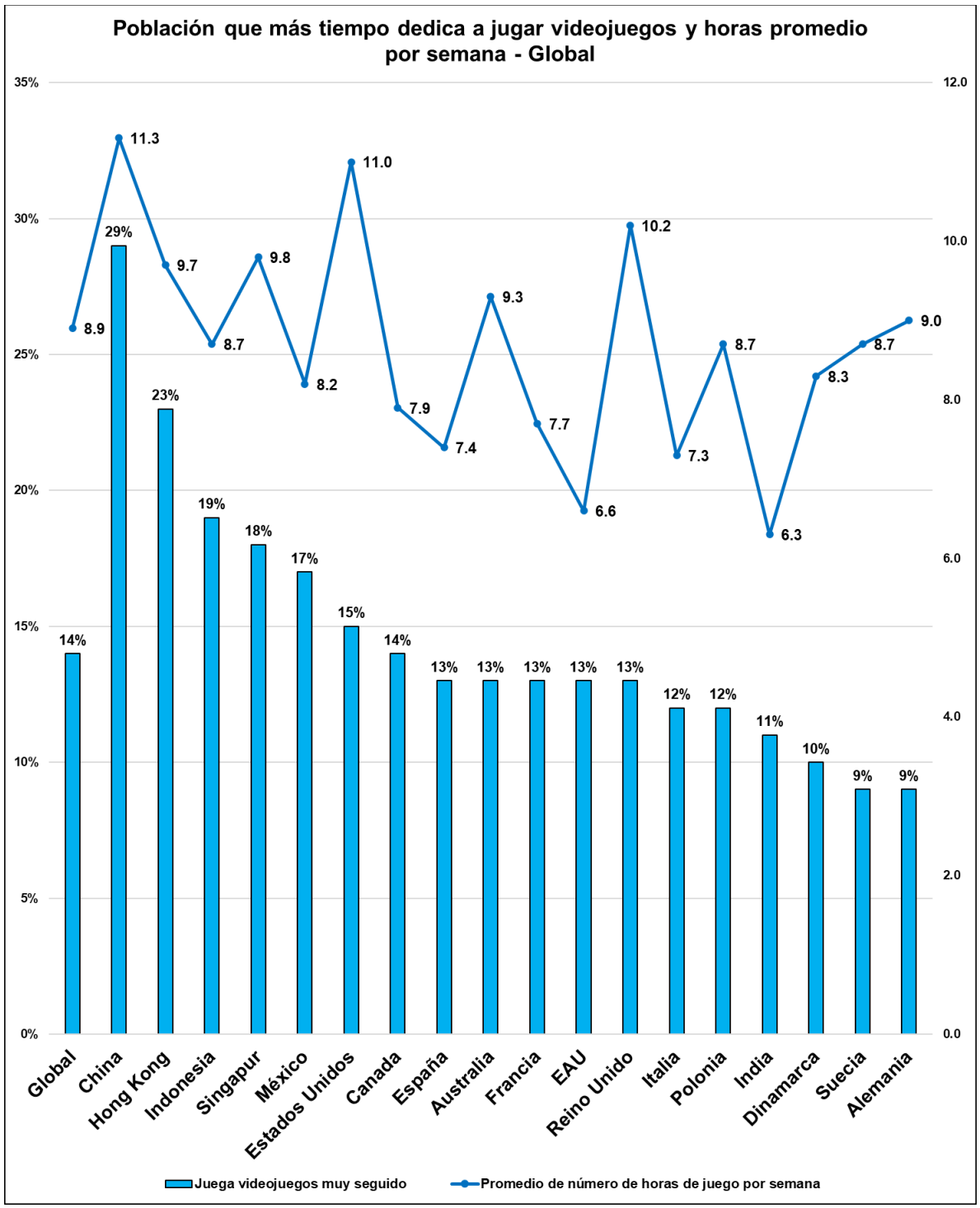


Figura 2. Porcentaje de la población que dedica tiempo a los videojuegos y promedio de horas semanales (YouGov, 2023, p. 13).

Por otra parte, los dispositivos empleados para jugar videojuegos pueden variar de acuerdo con la economía de las personas, su ubicación y el tipo de juego que deseen jugar. La combinación de estos 3 factores y gracias a su gran accesibilidad, hace que los teléfonos inteligentes sean el principal medio para jugar videojuegos, siendo utilizado por el 64% de los jugadores; sin embargo, se ven sujetos a soportar únicamente una gama limitada de juegos debido a las capacidades de los teléfonos inteligentes. En segundo lugar, se encuentran las computadoras de escritorio y portátiles con un 40% de los jugadores, seguidos de las consolas de videojuegos con un 34%.

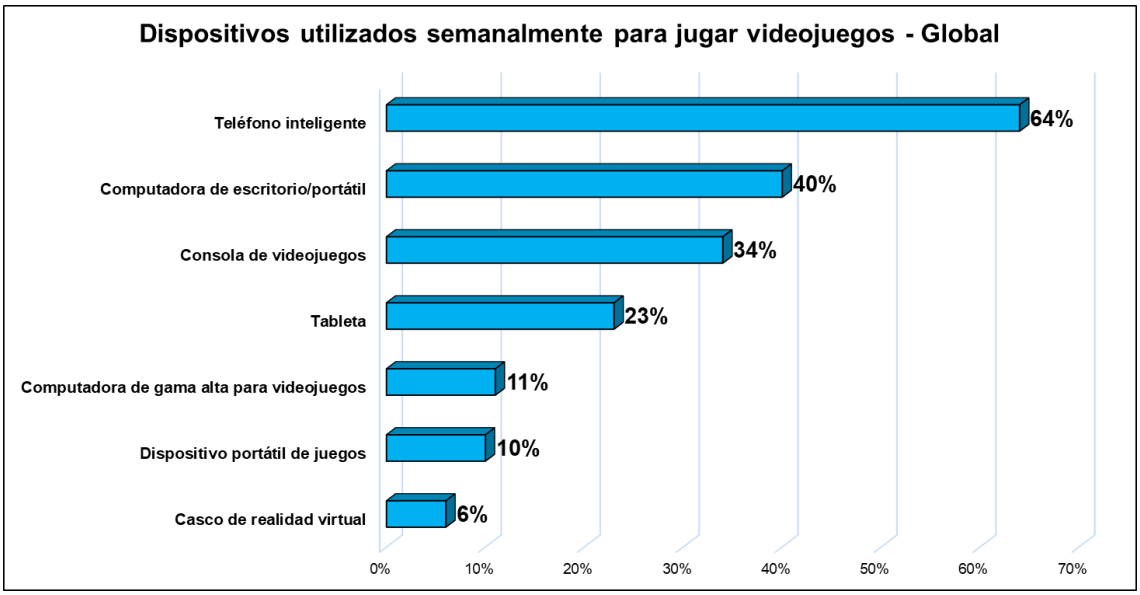


Figura 3. Dispositivos más utilizados para jugar videojuegos (YouGov, 2023, p. 15).

En cuanto a México, las consolas de videojuegos son más empleadas que las computadoras de escritorio y portátiles cuando de jugar videojuegos se trata, con un 44% y 30% respectivamente.

Figura 4. Dispositivos más utilizados para jugar videojuegos en México (YouGov, 2023, p. 20).

De igual forma, para contrastar la información correspondiente a México por parte de *YouGov*, una investigación realizada por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) señala que México se sitúa como el décimo mercado más grande a nivel mundial en la industria de los videojuegos y el mayor de América Latina y que, a su vez, a partir de una encuesta realizada a 4,847 personas mexicanas en 2021 se pudo determinar que el 70.7% dijeron jugar videojuegos, de los cuales el 56.8% se concentra en el grupo de edad que va de los 18 a los 34 años. Por último, los dispositivos más utilizados para jugar videojuegos son móviles (82.1%), consolas (54.3%) y computadora (50.9%). (Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2021)

Con todo lo anterior, es seguro decir que hoy en día los videojuegos forman una parte muy importante del entretenimiento de los seres humanos y sobre todo en un público joven que va de los 18 a 34 años, logrando igualar o incluso superar el número de consumidores con respecto a otros medios como la televisión.

Por otro lado, también se cuenta con una variedad de dispositivos para acceder a los videojuegos, siendo los teléfonos inteligentes los dispositivos de mayor uso al momento de jugar gracias a su gran accesibilidad; sin embargo, no se trata de dispositivos totalmente enfocados como lo pueden ser las computadoras y las consolas de videojuegos, donde las computadoras tienen una mayor frecuencia de uso que el de las consolas, con un 40% y 30% respectivamente, de acuerdo a *YouGov*, o un 54.3% y 50.9% según el IFT.

En cuanto a México, se puede afirmar que es un país que suele consumir videojuegos ya que, al menos por la muestra tomada en la encuesta de *YouGov*, presenta un mayor porcentaje de población que dedica una parte de su tiempo a jugar videojuegos con respecto a países europeos y Estados Unidos, quedando situado en 5° lugar únicamente por detrás de países asiáticos, además de representar el mercado más grande América Latina de la industria. Por lo que los videojuegos son un medio de entretenimiento importante a lo largo del país.

1.2 Problema

Como se puede observar, los videojuegos son un medio de entretenimiento ampliamente utilizado a lo largo del globo y sobre todo por un público joven. Sin embargo, por lo general una gran parte de los videojuegos y sus dispositivos de control tienen un diseño enfocado a personas que no cuentan con algún tipo de discapacidad.

Es por ello por lo que aquellas personas que sí cuentan con alguna de estas limitantes se ven seriamente afectadas al momento de manipular los dispositivos de control al jugar videojuegos, independientemente de la plataforma que se utilice para reproducirlos.

Una investigación realizada en 2020 buscó recabar información sobre las características y motivaciones de 543 jugadores con discapacidades, enfocándose en el tipo de discapacidad que poseen, las plataformas y juegos que prefieren, el hardware o software de asistencia que utilizan y sus principales motivaciones para jugar videojuegos (Beeston, 2020, p. 72).

- Para el uso de información se solicitó y recibió la autorización de la autora correspondiente.

De los 543 entrevistados, 364 se identificaron como hombres, 124 como mujeres, 30 no binarios y 25 prefirieron no decir, con un promedio de edad de 31 años.

Para conocer el tipo de discapacidad con la que contaban, se permitió indicar más de una opción en caso de que la persona tuviera más de una discapacidad, arrojando los siguientes resultados:

Discapacidad	Encuestados
Autismo	52
Dificultades para escuchar	44
Sordera	16
Discapacidades físicas de miembro superior	309
Discapacidades físicas de miembro inferior	269
Dificultades de salud mental	121
Discapacidades de aprendizaje (p. ej. dislexia, SLP, ADHD, lenguaje, etc.)	83
Ceguera	49
Deficiencia de visión de colores (p. ej. daltonismo de color rojo-verde)	18
Poca visión	64
Otras necesidades y preferencias	59

Tabla 2. Información sobre tipo de discapacidad (Beeston, 2020, p. 73).

De lo cual se pudo determinar que la mayoría de los encuestados contaban con discapacidades físicas de miembro superior (309 – 56.9%) y/o con discapacidades de miembro inferior (269 – 49.5%).

Entre las plataformas de juegos utilizadas se tuvieron las siguientes:

Plataforma de juego	Encuestados
PC	314
PlayStation	174
Teléfono celular	171
Xbox	106
Nintendo Switch	85
Tableta	70

Tabla 3. Información sobre plataformas de juego (Beeston, 2020, p. 74).

Es decir, la mayoría de los encuestados utilizan una computadora al momento de jugar videojuegos (314 – 57.8%).

En cuanto al tipo de juegos que suelen jugar, se proporcionó una lista con 329 títulos diferentes de los cuales tenían que seleccionar sus 3 juegos favoritos; sin embargo, para este rubro únicamente se entrevistó a 230 personas.

Lugar	Videojuego favorito	Encuestados
1	Destiny 2	17
2	World of Warcraft	15
3	Overwatch	14
4	PlayerUnknown's Battegrounds	10
5	The Elder Scrolls V: Skyrim	10
6	The Legend of Zelda: Breath of the Wild	9
7	Grand Theft Auto V	9
8	Super Mario Odyssey	9
9	Rocket League	9
10	Stardew Valley	8

Tabla 4. Información sobre videojuegos favoritos (Beeston, 2020, p. 74).

De los cuales únicamente 2 no se encuentran disponibles para computadora: *The Legend of Zelda: Breath of the Wild* y *Super Mario Odyssey*, los cuales son exclusivos del dispositivo de juegos *Nintendo Switch*.

A su vez, estos 10 videojuegos pueden ser clasificados de la siguiente manera de acuerdo con su género:

- Videojuegos de disparos: *Destiny 2, Overwatch, PlayerUnknown's Battlegrounds*.
- Videojuegos de acción - aventura: *The Elder Scrolls V: Skyrim, The Legend of Zelda: Breath of the Wild, Grand Theft Auto V*.
- Videojuegos de rol: *Stardew Valley, World of Warcraft*.
- Videojuegos de plataformas: *Super Mario Odyssey*.
- Videojuegos de deportes: *Rocket League*.

Siendo los más jugados los juegos de disparos con los títulos *Destiny 2* (17 – 7.39%)*, Overwatch* (14 – 6.08%) *y PlayerUnknown's Battlegrounds* (10 – 4.34%), ubicados en los puestos 1°, 3° y 4° respectivamente.

Por otro lado, también se preguntó acerca de qué tipo de juegos acostumbran a jugar más, en los que se propusieron 6 categorías y 3 posibles opciones: "no lo juego", "a veces lo juego" y "muy frecuentemente lo juego".

Tipo de juego	No juega	A veces	Frecuente
Un solo jugador	5	95	410
Multijugador local	163	285	63
Multijugador en línea	66	171	273
Multijugador cooperativo (equipo vs juego)	113	183	183
Multijugador cooperativo (equipo vs equipo)	139	164	164
Uno vs uno multijugador	191	219	100

Tabla 5. Información sobre los tipos de juego (Beeston, 2020, p. 77).

Para dicha pregunta, se logró determinar que la mayoría de los usuarios suelen jugar juegos de un solo jugador (410 – 75.5%) y juegos multijugador en línea (273 – 50.3%).

En cuanto a las herramientas auxiliares empleadas al momento de jugar, se preguntó tanto por asistencia tecnológica (*hardware*) como por opciones de accesibilidad (*software*). Donde de los 230 encuestados, 156 indicaron que no utilizan ningún tipo de asistencia tecnológica, 77 no utilizan ninguna opción de accesibilidad y 47 no utilizan ninguna de las 2.

Tecnología de asistencia	Encuestados	Opción de accesibilidad	Encuestados
Seguimiento de mirada	12	Texto a voz	43
Mandos customizados	65	Voz a texto	39
Mando de una sola mano	16	Subtítulos	225
Lector de pantalla	48	Opciones de daltonismo	27
Ratón alternativo de PC	22	Cambios de contraste o color	90
Casco de realidad virtual	8	Alargamiento del cursor	56
Mando alternativo	22	Agrandamiento de texto	107
		Alertas de pantalla	80
		Mapeo de teclas	244

Tabla 6. Información sobre hardware y software de accesibilidad (Beeston, 2020, p. 76).

Las opciones más votadas para hardware fueron mandos customizados (65 – 11.9%) y lectores de pantalla (48 – 8.8%), mientras que de software fueron mapeo de teclas (244 – 44.9%) y subtítulos (225 – 41.4%).

Por último, también se le preguntó a los encuestados cuáles eran las razones que los motivaban a jugar videojuegos.

Motivación	Encuestados
Tener diversión	503
Ayudar a relajarme	436
Desafiarme a mí mismo	372
Formar parte de una comunidad	341
Escapar de la realidad	338
Socializar	331
Ayudar a mi manejo de estrés	279
Ayudar a mi salud mental	202
Competir con otros	192
Ayudar a mi manejo del dolor	144
Otras razones	78

Tabla 7. Información sobre motivaciones para jugar videojuegos (Beeston, 2020, p. 79).

Entre las motivaciones más populares se encontraron para “tener diversión” (503 – 92.6%), para “ayudar a relajarme” (436 – 80.3%), para “desafiarme a mí mismo” (372 – 68.5%) y para “formar parte de una comunidad” (341 – 62.8%).

A su vez, algunos encuestados en el campo de “otras razones” mencionaron cuestiones terapéuticas como motivos para jugar videojuegos, por ejemplo:

- Para ayudar a mantener la agudeza mental y claridad.
- Terapia física para las manos.
- Combatir la depresión.
- Resolver lentamente los problemas/empatía.

En resumen, de acuerdo con la información recopilada a lo largo de la investigación realizada por Beeston se pueden determinar las respuestas con mayor frecuencia para cada pregunta:

Categoría	Respuesta predominante	Encuestados	Porcentaje de la muestra total
Tipo de discapacidad	Discapacidades físicas de miembro superior	309	56.9%
Plataforma de juego	PC	314	57.8%
Juego más jugado*	Destiny 2	17	7.39%
Genero de juego	Juegos de disparos	-	-
Tipo de juego	Un solo jugador	410	75.5%
Herramienta auxiliar de accesibilidad	Mapeo de teclas	244	44.9%
Motivación	Tener diversión	503	92.6%

Tabla 8. Información sobre respuestas más predominantes por categoría.

** Pregunta realizada a una muestra de 230 personas.*

Finalmente, un fragmento de las conclusiones incluidas en este apartado del trabajo señala lo siguiente:

- Traducción al español del fragmento original.

“Por lo tanto, los diseñadores de juegos e investigadores pueden asumir que las personas con discapacidades desean jugar juegos convencionales con todos los demás y tratarán de encontrar una manera de hacerlo. En términos de diseño de juegos, dado que muchos de estos jugadores han informado utilizar adaptaciones como alertas auditivas, reasignación de teclas, subtítulos, controladores alternativos, lectores de pantalla, y demás, esto sugiere que estas adiciones y modificaciones mínimas a los juegos pueden dar cabida a una audiencia sustancial de jugadores” (Beeston, 2020, p. 86).

1.3 Soluciones comerciales

Debido a la necesidad de poder acceder a los videojuegos de hoy en día por parte de los jugadores con discapacidades, algunas empresas relacionadas con el mundo de los videojuegos se han dado la tarea de producir sus propios dispositivos de accesibilidad para satisfacer dicho problema.

1.3.1 Xbox Adaptive Controller

El *Xbox Adaptive Controller* es un dispositivo desarrollado por *Microsoft* y puesto a la venta el 4 de septiembre de 2018. Consiste en un controlador con forma rectangular de dimensiones de 292 x 130 x 23 [mm] que incluye un D-pad y 6 botones, de los cuales 2 son personalizables. Su principal característica es que, por medio de diversas entradas jack 3.5 [mm] pueden ser conectados diversos componentes de entrada para poder asignar los botones de un mando de *Xbox* de manera totalmente personalizada de acuerdo con las necesidades de los usuarios. Algunos de estos componentes externos pueden ser botones, pedales y palancas de juego (*Xbox*, 2024).

Características:

- Dispositivos externos con entrada 3.5 [mm] (x19) y puerto USB (x2).
- Perfiles personalizados.
- Botones reconfigurables.
- Embalaje accesible.

Figura 5. Xbox Adaptive Controller.

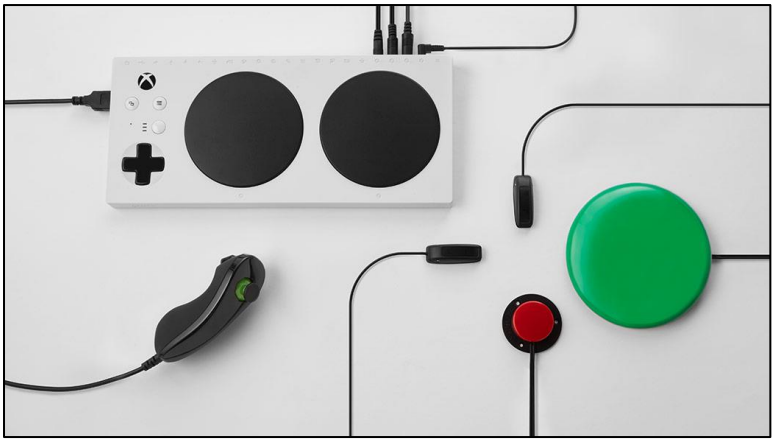


Figura 6. Xbox Adaptive Controller y componentes externos.

Figura 7. Logitech Adaptive Gaming Kit.

1.3.2 PlayStation Access Controller

El *PlayStation Access Controller* es el dispositivo propuesto por *Sony* para dar mayor accesibilidad al momento de jugar videojuegos y fue puesto a la venta el 6 de diciembre de 2023. Cuenta con una geometría circular de dimensiones de 141 x 39 x 191 [mm] con 8 botones reconfigurables dispuestos sobre el perímetro circular, un botón central y una palanca de juegos extensible a un costado. Al igual que el *Xbox Adaptive Controller*, cuenta con entradas jack 3.5 [mm] para que componentes externos puedan ser conectados y configurados de acuerdo con las necesidades de los usuarios *(PlayStation, 2024)*.

Características:

- Longitud ajustable de la palanca de juegos.
- Tapas de la palanca de juegos y botones intercambiables.
- Sincronización con otro control *Access* o un control *DualSense*.
- Dispositivos de control adicionales con entrada 3.5 [mm] (x4).
- Perfiles personalizados (3).
- Botones reconfigurables.
- Ajustes adaptables de la palanca de juegos.
- Embalaje accesible.

Figura 8. PlayStation Access Controller.

Figura 9. Logitech Adaptive Gaming Kit para Access Controller.

1.3.3 Azeron Cyro

El ratón *Azeron Cyro*, desarrollado por *Azeron*, es un dispositivo enfocado a jugar videojuegos con una sola mano que fue puesto a la venta el 18 de noviembre de 2022. Se trata de un ratón que cuenta con múltiples botones con el propósito de poder reasignar las teclas del teclado hacia el mismo ratón y que de esta manera todos los movimientos dentro del juego se encuentren al alcance de una sola mano. Además, cuenta con una palanca de juegos que permite los movimientos de desplazamiento como si se tratara del de un mando de consola. Debido a que se trata de un ratón personalizable, solo se encuentra a la venta bajo pedido desde la página web del fabricante (*Gaming Readapted*, 2024).

Características:

- Controla el cursor, accede a los botones, el joystick analógico y la rueda de desplazamiento con una sola mano.
- Sensor avanzado 3389 de 16K con 16 000 CPI.
- Palanca de juegos analógica ajustable para movimiento analógico o WASD.
- 22 teclas fácilmente asignables.
- Incluye cintas de agarre instaladas y una correa extraíble.
- Perfiles personalizados (3).

Figura 10. Azeron Cyro.

1.3.4 Evil Controllers

Evil Controllers es una empresa con orígenes en el año 2007, la cual se especializa en la modificación y venta de mandos personalizados para aquellas personas que cuentan con discapacidades físicas y musculares. Dado que los controles pueden ser personalizados en el sitio web de *Evil Controllers* de acuerdo con las necesidades del usuario, los precios pueden variar por las modificaciones solicitadas.

Figura 11. Xbox accesible controller.

Figura 12. Mando de PlayStation personalizado con una palanca de juego.

Uno de sus principales productos son los mandos de *Xbox* y *PlayStation* modificados de tal modo que puedan ser utilizados con una sola mano. De acuerdo con si la mano seleccionada es la izquierda o la derecha, los botones del control son reasignados al lado del mando que sea requerido, así como la adición de 3 botones extra; 2 correspondientes a los 2 gatillos del lado opuesto, los cuales son colocados en la parte posterior del mando; mientras que para la palanca de juegos que se encuentra en el lado opuesto, el tercer botón extra corresponde al botón incorporado a la palanca de juegos y está colocado en la parte frontal del mando, además de que este es sustituido por una palanca de juegos externa que cuenta con un cable de mínimo 1 [m], lo cual permite que pueda ser colocado en una posición conveniente que le permita al usuario manipularlo.

Figura 13. Mandos de Xbox y PlayStation para mano derecha.

1.3.5 Observaciones

De acuerdo con estos 4 dispositivos enfocados a personas que cuentan con discapacidades, podemos observar que 3 de ellos se basan en el mercado de las consolas de videojuegos, y si bien estos mandos también pueden ser conectados a una computadora, no buscan resolver la problemática al momento de jugar con el teclado y ratón, sino ofrecer una alternativa, mientras que el *Azeron Cyro* sí intenta solventar dicho problema.

En cuanto al *Xbox Adaptive Controller* y el *PlayStation Access Controller*, ambos cuentan con la posibilidad de conectar componentes externos para que cada usuario pueda realizar el arreglo que le sea más conveniente; sin embargo, al no abarcar un tipo de discapacidad en específico, hace que el intento de realizar dicho arreglo pueda resultar costoso y que en ocasiones sea muy espacioso debido a todos los componentes que se tienen que comprar para sustituir cada botón, sobre todo en el controlador de *Xbox* que tiene hasta 19 ranuras. Por otro lado, esto último puede no ser tan recurrente en el controlador de *PlayStation*, ya que solo cuenta con 4 ranuras, pero el hecho de que tenga varios de sus botones predeterminados a lo largo de su circunferencia y nuevamente al no tratarse de un dispositivo enfocado a una discapacidad predeterminada, puede que sea más útil para cierto tipo de discapacidades y menos útil para otro tipo.

Mientras que el ratón *Azeron Cyro* y los mandos modificados por *Evil Controllers* sí abordan de manera específica el jugar videojuegos con una sola mano para aquellas personas que no cuentan con ambas para manipular el controlador, no obstante, el detalle con estos dispositivos es que sobrecargan todos los botones a una sola mano sin dar cabida a que puedan ser accionados con alguna otra parte del cuerpo que el usuario podría aprovechar y así contar con mayor libertad al momento de manipular el ratón para realizar las tareas del videojuego que se esté reproduciendo.

1.4 Discapacidades de miembro superior

Con base en lo presentado en los puntos anteriores, podemos observar que los videojuegos son un medio de entretenimiento ampliamente utilizado por las personas, incluso por aquellas que cuentan con algún tipo de discapacidad, e independientemente de cuál sea la condición con la que cuenten, seguirán deseando jugar los videojuegos del momento y no se limitarán a ello, por lo que buscarán la manera de adaptarse. Por ende, es importante proporcionar a estos jugadores controladores que les permitan tener una mayor accesibilidad a los videojuegos, con un diseño enfocado a las necesidades de un cierto tipo de discapacidad y que dé cabida a la posibilidad de utilizar otras partes del cuerpo para el control de los movimientos con un dispositivo compacto.

De tal modo que fue necesario determinar qué tipo de discapacidad era la que se iba a abordar para enfocar el diseño a las necesidades de esta condición, hacia qué tipo de plataforma y para qué género de videojuegos está destinado el dispositivo, y qué tipo de movimientos eran los que se deseaban adaptar y controlar con el dispositivo.

De la tabla 8, Información sobre respuestas más predominantes por categoría, se pueden identificar algunas respuestas a estos cuestionamientos.

Para el primero de ellos se tiene que, de la muestra de los 230 jugadores con discapacidades, un 55.7% cuenta con una discapacidad física de miembro superior. Mientras que la plataforma de juego más utilizada es PC, con un 66.1% de los usuarios. En cuanto a los juegos más populares, los usuarios mencionaron con mayor frecuencia juegos del género de disparos.

Un juego de disparos puede ser descrito de la siguiente manera:

“Los videojuegos de disparos (*shooters*) son aquellos en los que el jugador asume el rol de una persona, vehículo o nave y el objetivo principal es atacar a objetivos diversos disparándoles proyectiles” (WikiJuegos, 2024).

Por otro lado, una discapacidad de miembro superior se puede definir como aquella que limita a una persona a hacer uso de manera adecuada de su brazo y/o mano dependiendo de la pérdida parcial o total de los mismos, o que, en caso de contar con ellos, han perdido en parte o por completo su movilidad. Son aquellas que van desde el hombro hasta los dedos (Instituto Provincial de Administración Pública, 2016).

Pueden tener 3 orígenes distintos:

1. Congénitas: son aquellas que se producen durante el periodo de gestación.
2. Genéticas: son producidas por una infección patológica a causa de una alteración en el genoma.
3. Adquiridas: son las provocadas mediante algún accidente o enfermedad.

En el caso de las adquiridas, en ocasiones suelen requerir de amputaciones, las cuales se definen como el procedimiento quirúrgico que se basa en la remoción total o parcial de una extremidad.

Dependiendo de la sección del miembro superior en la que se realicé, puede catalogarse como: amputación parcial de mano, amputación transradial, amputación transhumeral, amputación interescápulo-torácica, desarticulación de muñeca, desarticulación de codo o desarticulación de hombro (Romp Te Mueve, 2022).

De tal modo que se busca que el afectado pueda contar con un muñón que le sea útil para llevar actividades cotidianas de la manera más normal posible.

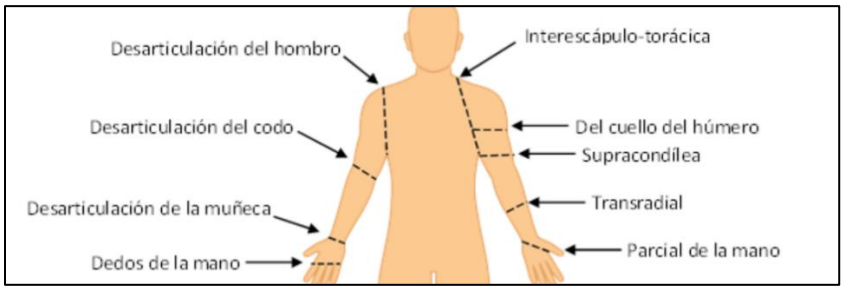


Figura 14. Amputaciones del miembro superior.

A su vez, hay pacientes que pueden contar con discapacidades de miembro superior en un solo brazo (discapacidad de miembro superior unilateral) o en ambos brazos (discapacidad de miembro superior bilateral).

En la actividad de jugar los videojuegos modernos del género de disparos en PC, como principales controladores se utilizan tanto el teclado como el ratón de manera simultánea. Por lo general, el teclado es utilizado para la movilidad del personaje virtual que se esté manipulando, así como todo tipo de interacción con su entorno, mientras que el ratón se encarga de controlar el campo de visión del personaje, y los clics para interactuar con menús y funciones más específicas como lo podrían ser seleccionar objetos, disparar o apuntar.

Para una persona que cuenta con una discapacidad de miembro superior bilateral, le es muy difícil utilizar de manera adecuada un teclado y ratón convencionales, al menos por la manera en la que están diseñados, por lo que requieren utilizar alguna herramienta auxiliar y/u otras partes de su cuerpo. Por otro lado, una persona que cuenta con una discapacidad de miembro superior unilateral suele utilizar su mano contralateral para manipular el ratón y herramientas auxiliares para solventar los movimientos que son proporcionados por un teclado.

De modo que a una persona con una discapacidad de miembro superior unilateral le es más fácil jugar videojuegos que a una persona con una discapacidad bilateral, ya que por lo regular solo tiene que adaptar las teclas del teclado que corresponden al movimiento y acciones del personaje.

Con base en esto, se decidió que el dispositivo esté destinado principalmente para jugar videojuegos de disparos en PC y para personas que cuenten con discapacidades físicas de miembro superior unilateral, esto último para enfocarse únicamente en la sustitución de los movimientos que proporciona un teclado.

Pero ello también se debió determinar qué tipo de movimientos son los que se debían adaptar para que sean accionados con el dispositivo, con base en su recurrencia en los juegos de disparos.

2. Diseño conceptual

2.1 Videojuegos de disparos

Para determinar cuáles son los juegos de disparos más jugados del momento en PC, se utilizaron las estadísticas del sitio web *ActivePlayers*. Que, si bien los números que proporcionan son únicamente estimaciones y están generados por un algoritmo, para el propósito de este trabajo sí logran proporcionar una idea de cuáles son los juegos más populares. La información recabada por *ActivePlayers* proviene de fuentes dedicadas como lo son *Statista*, *NewZoo* y *Steam*.

Steam es una plataforma de distribución digital de videojuegos ampliamente utilizada por los jugadores de PC para adquirir videojuegos; sin embargo, no es la única, por lo que las estadísticas que proporcionan solo reflejan los números de su catálogo de videojuegos y no de todos aquellos disponibles en PC.

De acuerdo con *ActivePlayers*, la lista de los 15 videojuegos más jugados en PC durante enero – febrero de 2024 es la siguiente:

Lugar	Juego	Jugadores	30 días	Ganancia 30D	%
1	Fortnite	1,534,496	30,950,114	-3,839,113	-3.59
2	Roblox	1,112,764	26,463,295	600,871	-1.55
3	Minecraft	1,128,653	20,468,160	-246,100	0.37
4	League of Legends	1,256,499	14,000,061	972,337	-0.01
5	Palworld	435,816	2,171,060	-21,098	-0.31
6	Counter Strike 2	878,627	4,315,494	862,832	3.73
7	Valorant	760,077	2,006,825	627,756	2.46
8	Overwatch 2	288,030	1,419,252	97,044	-0.55
9	Apex Legends	391,781	5,793,817	171,565	-1.68
10	Rocket League	266,196	11,741,135	-53,854	-3.44
11	Genshin Impact	581,967	9,726,320	-286,601	0.01
12	Call of Duty: Modern Warfare	97,095	1,162,017	389,106	-6.32
13	PUBG	429,977	32,204,761	1,354,314	-1.88
14	GTA V	487,233	1,842,832	265,506	1.97
15	Dota 2	431,042	1,712,911	30,910	1.78

Tabla 9. Videojuegos más jugados en PC durante enero – febrero de 2024.

Para comprobar la confiabilidad de dichos datos, se observó cuáles de los videojuegos de la lista se encuentran exclusivamente en el catálogo de *Steam* para hacer una comparativa con los números proporcionados por *ActivePlayers* y los oficiales de *Steam*.

❖ Datos tomados el 21 de febrero de 2024 a las 14:00 hrs.

Juego	Cantidad de jugadores actuales		Porcentaje de error
	ActivePlayers	Steam	
Counter Strike 2	998,643	941,322	6.09%
Dota 2	542,142	488,847	10.9%
Palword	205,274	179,719	14.2%

Tabla 10. Cantidad de jugadores de acuerdo con ActivePlayers y Steam.

Por un lado, *ActivePlayers* muestra la cantidad de jugadores en promedio de la última hora transcurrida, mientras que *Steam* en tiempo real; sin embargo, los datos proporcionados por *ActivePlayers* no resultan estar tan alejados de la realidad a pesar de no ser el distribuidor oficial como sí lo es *Steam*, mostrando porcentajes de error menores al 15%. Por ende, se determinó que era aceptable utilizar la tabla 10 para determinar los juegos de disparos más populares.

De dicha tabla, 8 de los 15 videojuegos entran en la categoría de juegos de disparos, los cuales son los siguientes:

1. Fortnite
2. Counter Strike 2
3. Valorant
4. Overwatch 2
5. Apex Legends
6. Call of Duty: Modern Warfare
7. PUBG
8. GTA V

Por lo cual, para cada uno de los títulos se procedió a analizar cuáles son las teclas de movimiento y combate asignadas por defecto. Dado que estos 2 rubros son los que se encuentran presentes de manera constante en la jugabilidad de videojuegos de disparos, a comparación de teclas que corresponden a interacciones con el menú, chat de voz, fabricación, entre otras, las cuales se presentan en casos más puntuales y no necesariamente a lo largo de toda la experiencia de juego.

2.1.1 Acciones más frecuentes

➢ Fortnite

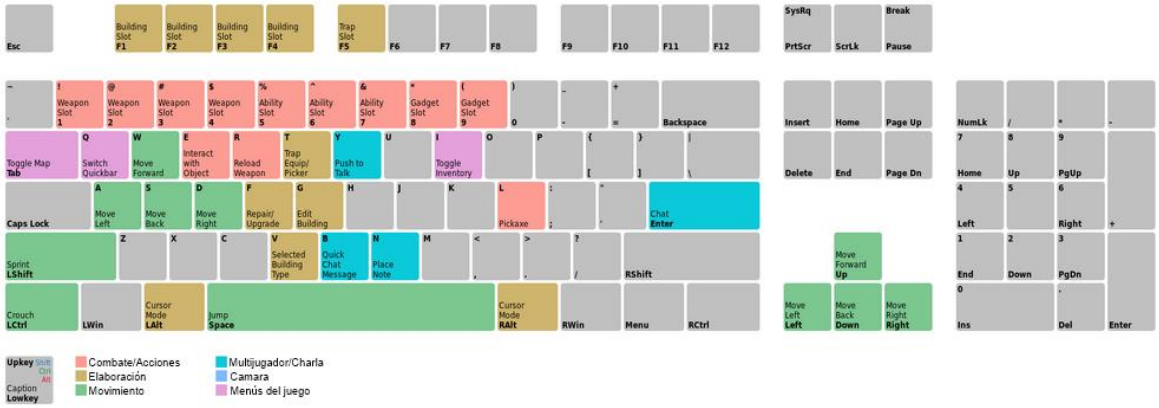


Figura 15. Teclas asignadas por defecto en Fortnite.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W / ↑
Desplazarse hacia atrás	S / ↓
Desplazarse hacia la izquierda	A / ←
Desplazarse hacia la derecha	D / →
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift
Agacharse	LCtrl
Deslizarse	LShift + LCtrl

Tabla 11. Teclas de movimiento en Fortnite.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	E

Tabla 12. Teclas de combate en Fortnite.

- Counter Strike 2

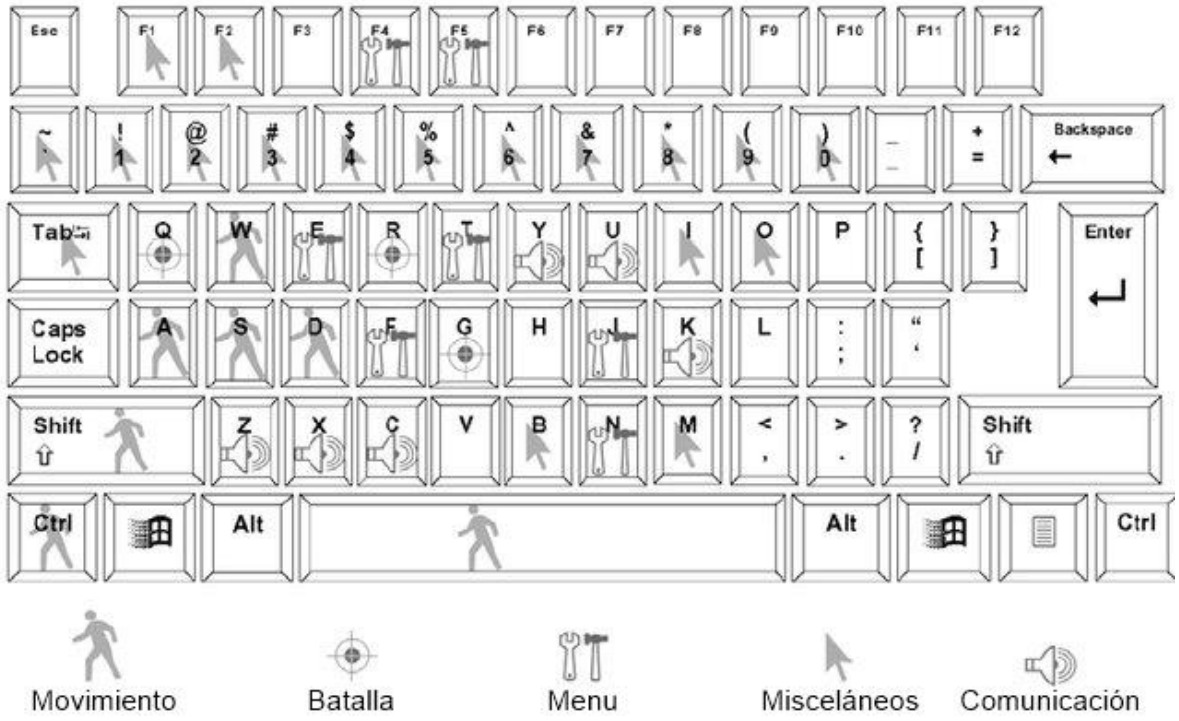


Figura 16. Teclas asignadas por defecto en Counter Strike 2.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift
Agacharse	LCtrl

Tabla 13. Teclas de movimiento en Counter Strike 2.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Soltar arma	G
Última arma usada	Q

Tabla 14. Teclas de combate en Counter Strike 2.

➢ Valorant

Figura 17. Teclas asignadas por defecto en Valorant.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Caminar	LShift
Agacharse	LCtrl

Tabla 15. Teclas de movimiento en Valorant.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	F
Soltar arma	G
Utilizar spike	4
Habilidad 1	Q
Habilidad 2	E
Habilidad 3	C
Habilidad máxima	X

Tabla 16. Teclas de combate en Valorant.

➢ Overwatch 2

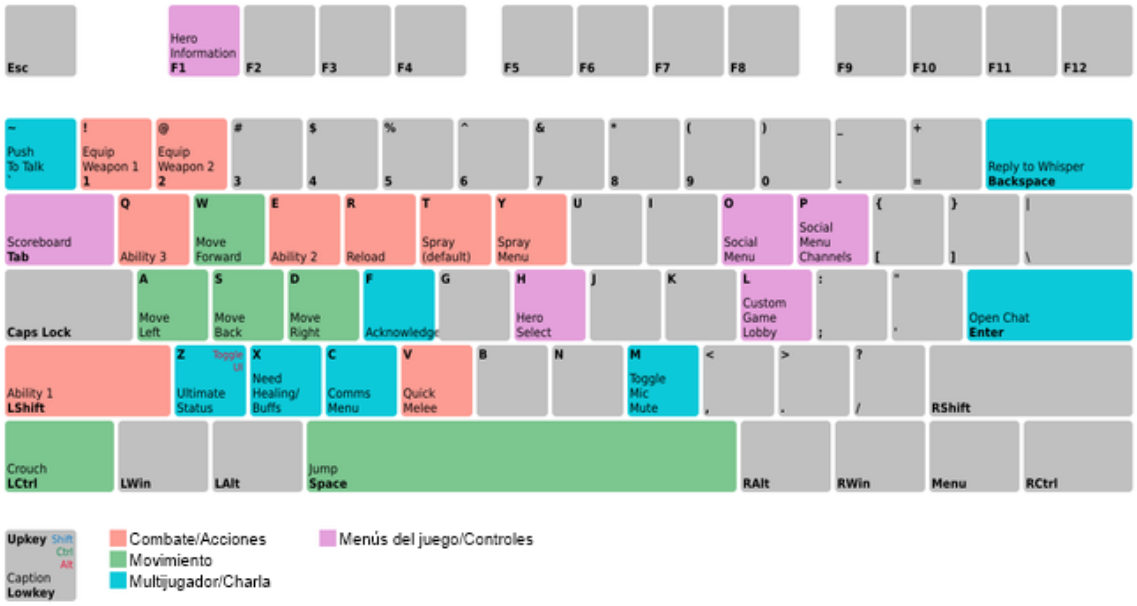


Figura 18. Teclas asignadas por defecto en Overwatch 2.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Agacharse	LCtrl

Tabla 17. Teclas de movimiento en Overwatch 2.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Ataque cuerpo a cuerpo	V
Habilidad 1	LShift
Habilidad 2	E
Habilidad 3	Q

Tabla 18. Teclas de combate en Overwatch 2.

➢ Apex Legends

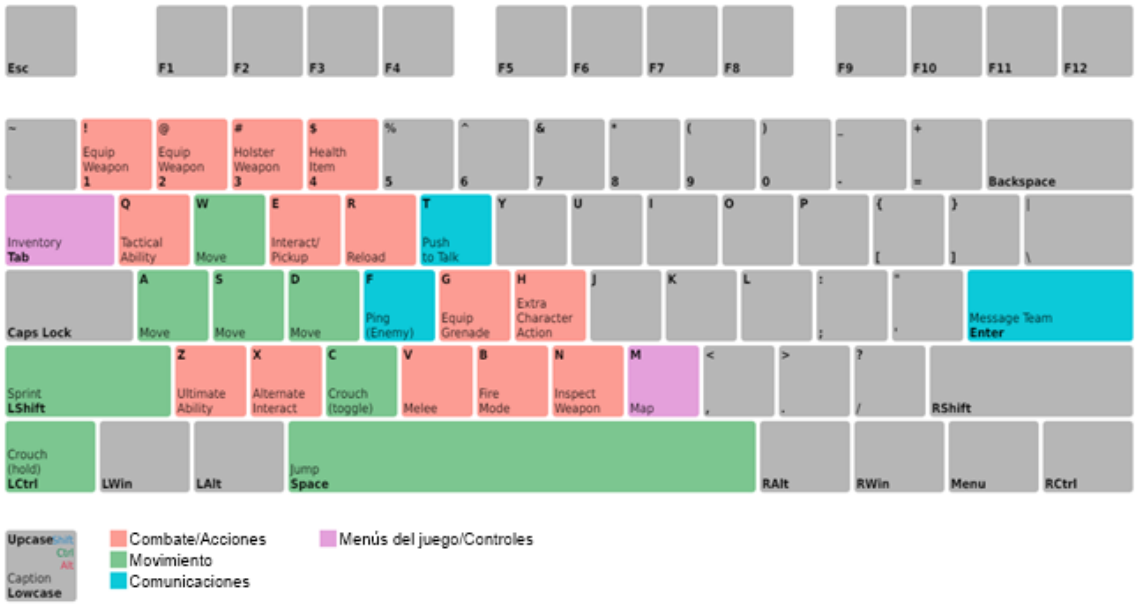


Figura 19. Teclas asignadas por defecto en Apex Legends.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift
Agacharse	LCtrl / C

Tabla 19. Teclas de movimiento en Apex Legends.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	E
Ataque cuerpo a cuerpo	V
Habilidad táctica	Q
Habilidad máxima	Z

Tabla 20. Teclas de combate en Apex Legends.

➢ Call of Duty: Modern Warfare

Figura 20. Teclas asignadas por defecto en Call of Duty: Modern Warfare.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift
Agacharse / Deslizarse	C
Cuerpo a tierra	LCtrl

Tabla 21. Teclas de movimiento en Call of Duty: Modern Warfare.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	F
Ataque cuerpo a cuerpo	V
Objetos letales	E
Objetos tácticos	Q

Tabla 22. Teclas de combate en Call of Duty: Modern Warfare.

➢ PUBG

Figura 21. Teclas asignadas por defecto en PUBG.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift / 7
Agacharse	C
Cuerpo a tierra	Z
Caminar	LCtrl
Inclinarse a la izquierda	Q
Inclinarse a la derecha	E

Tabla 23. Teclas de movimiento en PUBG.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	F
Guardar arma	X

Tabla 24. Teclas de combate en PUBG.

➢ GTA V

Figura 22. Teclas asignadas por defecto en GTA V.

Teclas de movimiento:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Correr	LShift
Agacharse	LCtrl
Cubrirse	Q
Entrar/Salir de un vehículo	F

Tabla 25. Teclas de movimiento en GTA V.

Teclas de combate principales:

Acción	Tecla asignada
Recargar	R
Interactuar con objeto	E
Ataque cuerpo a cuerpo	O
Objeto arrojadizo	G
Seleccionador de armas	Tab

Tabla 26. Teclas de combate en GTA V.

Una vez observadas las acciones realizadas en cada uno de los 8 títulos en los rubros de movimiento y combate, se realizó una tabla comparativa entre todos los videojuegos para observar cuáles acciones son las que se presentan con mayor frecuencia.

	Acción	Juego							
Movimiento	Desplazarse hacia adelante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Desplazarse hacia atrás	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Desplazarse hacia la izq.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Desplazarse hacia la der.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Saltar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Agacharse	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Correr	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	Deslizarse	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
	Caminar	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗
	Cuerpo a tierra	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗
	Inclinarse a la izquierda	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
	Inclinarse a la derecha	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
	Cubrirse	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Combate	Recargar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Interactuar con objeto	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	Ataque cuerpo a cuerpo	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓
	Habilidad 1	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗
	Habilidad 2	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗
	Habilidad 3	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗
	Habilidad 4	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	Objetos letales	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓
	Soltar arma	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	Última arma usada	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Utilizar spike	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	Objetos tácticos	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
	Guardar arma	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
	Seleccionador de armas	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓

Tabla 27. Tabla comparativa de acciones.

De la tabla 27 se puede apreciar que en los 8 videojuegos existen 6 acciones que se presentan en todos ellos, las cuales son las siguientes:

- Desplazarse hacia adelante.
- Desplazarse hacia atrás.
- Desplazarse hacia la izquierda.
- Desplazarse hacia la derecha.
- Saltar.
- Agacharse.
- Recargar

Detrás de estas acciones, hay otras 2 que se encuentran presentes en 6 de los 8 juegos:

- Correr.
- Interactuar con objeto.

Mientras que el resto de las acciones se encuentran presentes en la mitad o menos de los 8 videojuegos, por lo que su frecuencia no es tan significativa en comparación con las 9 acciones anteriores.

A su vez, estas 9 acciones están dadas por las siguientes teclas en la mayoría de los 8 títulos:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Agacharse	LCtrl
Recargar	R
Correr	LShift
Interactuar con objeto	F / E

Tabla 28. Acciones más frecuentes en los 8 videojuegos y sus teclas.

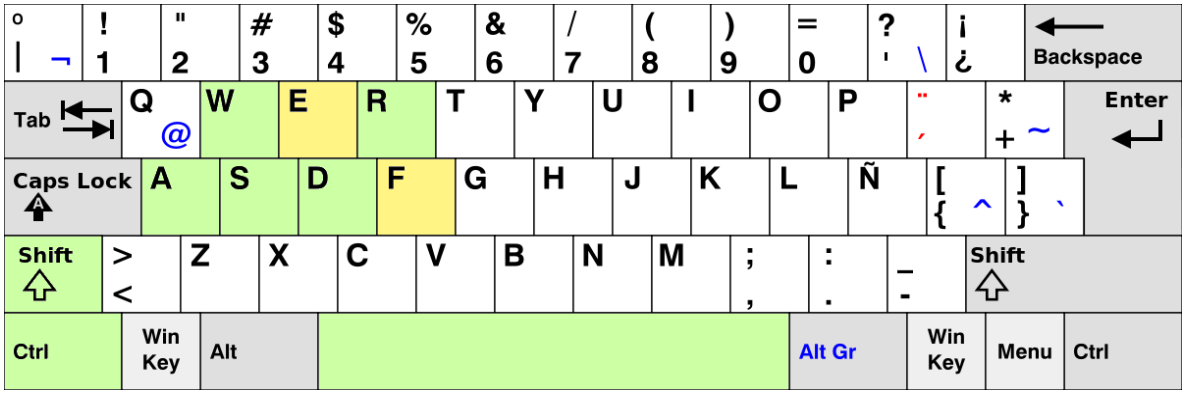


Figura 23. Distribución de las teclas correspondientes a las acciones más frecuentes en un teclado latinoamericano.

Por ende, se puede observar que se requiere de al menos 9 teclas para proporcionar de manera adecuada las acciones más recurrentes en los videojuegos de disparos, por lo cual, el dispositivo desarrollado de manera preliminar debía cumplir con la capacidad de al menos permitir accionar dicha cantidad de teclas.

Por otro lado, cabe destacar que el dispositivo no busca reemplazar en su totalidad a un teclado, sino ser un complemento que se pueda utilizar de manera simultánea con otro tipo de periféricos, como lo puede ser el propio teclado al momento de requerir acciones más puntuales, o también un ratón que cuente con una mayor cantidad de botones y así tener la posibilidad de distribuir las acciones a lo largo de ambos dispositivos, entre otros.

2.2 Diagramas de caja negra

Para la realización del prototipo del dispositivo se requirieron diversas funciones que permitieran transformar los estímulos proporcionados por una persona con una discapacidad de miembro superior unilateral hacia las acciones que se desean realizar en el videojuego que se esté jugando.

De manera inicial, se propusieron 2 diagramas de caja negra distintos: uno que involucra un arreglo totalmente físico que no tuviera una conexión directa a la computadora (*hardware*), y otro que comprende tanto una parte física como digital (*hardware – software*).

Estos 2 arreglos se muestran de manera gráfica en los siguientes diagramas de caja negra:

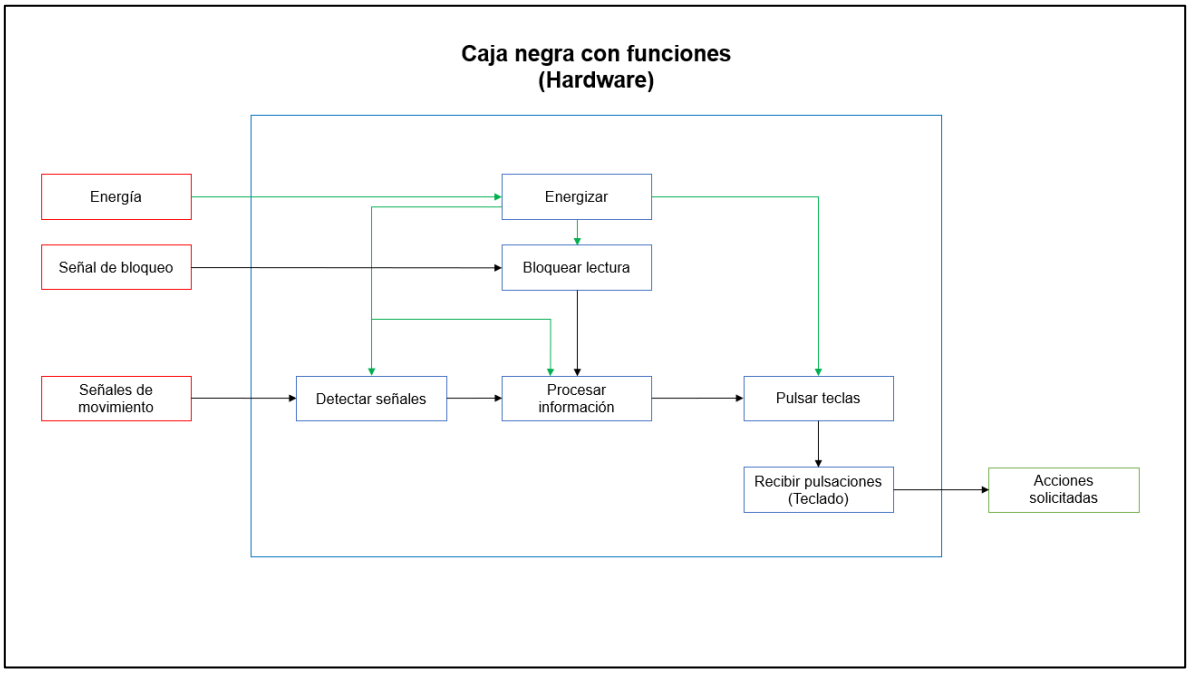


Figura 24. Diagrama de caja negra (Hardware).

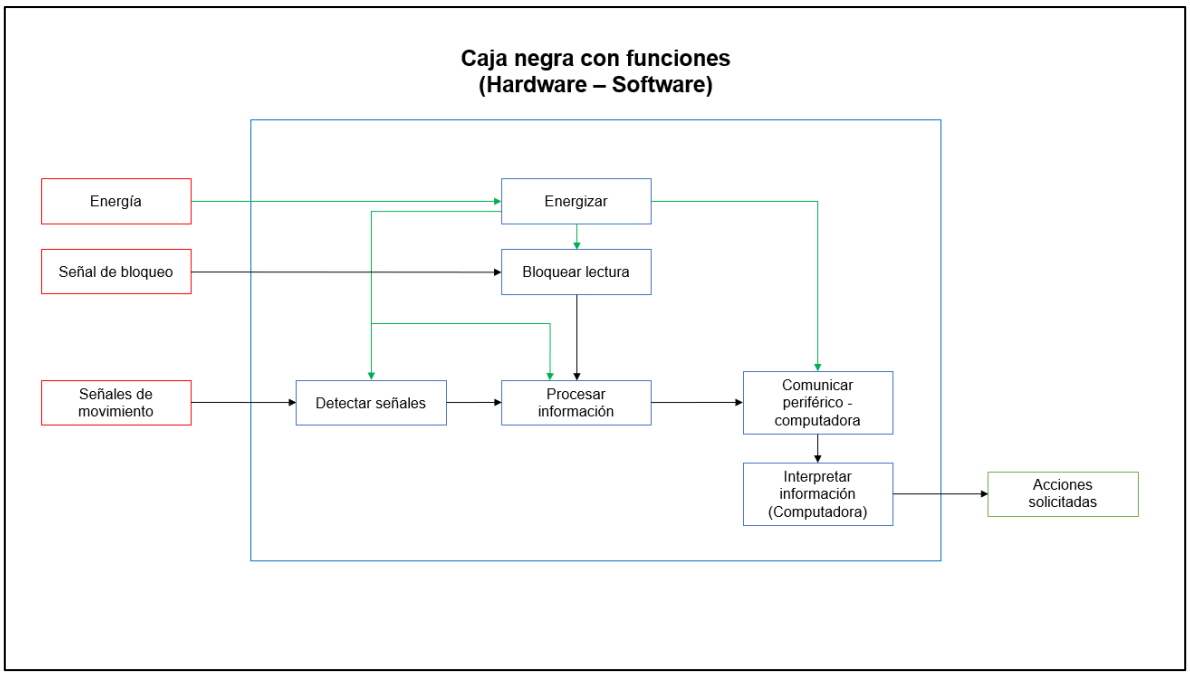


Figura 25. Diagrama de caja negra (Hardware – Software).

El primero de ellos se basó en un dispositivo que se encargue de la detección de los estímulos proporcionados por el usuario y transmita estas señales hacia diversos actuadores para que estos presionen en un teclado las teclas correspondientes a las acciones solicitadas. De modo que no es necesaria una conexión directa entre el dispositivo y la computadora, ya que la interacción se lleva a cabo entre el prototipo y el teclado. En otras palabras, se trata de un aditamento para teclado que permite manipularlo sin el estricto uso de los dedos de la mano.

Para el segundo arreglo, se propuso que el dispositivo interactúe directamente con una computadora, de manera que con la detección de los estímulos proporcionados la información sea transmitida a dicha computadora y esta pueda interpretar las señales mediante programación para realizar las acciones deseadas.

2.2.1 Definición de funciones y generación de conceptos

Cada función propuesta en el diagrama de caja negra debe cumplir con una tarea específica para que el prototipo opere de manera adecuada; por lo tanto, a continuación, se describe cuál es la acción que realiza cada función. Por otro lado, también se propusieron diferentes componentes preliminares para cada una de ellas.

- **Energizar**

Se encarga de alimentar a todos los componentes electrónicos del dispositivo. De acuerdo con los requerimientos del arreglo final seleccionado, puede requerirse de 2 fuentes de alimentación para diferentes componentes del dispositivo.

1. Baterías.
2. Fuente de poder.
3. Conexión directa a un tomacorriente.
4. Conexión directa a la computadora (cable USB).

- **Bloquear lectura**

Permite que se bloqueé la lectura de las señales de movimiento, provocando que el dispositivo se mantenga inactivo en caso de desearlo, junto con un LED que indique de manera visual su estado.

1. Interruptor ON/OFF.
2. Botón pulsador ON/OFF.
3. Dip switch.

- **Detectar señales**

Se encarga de detectar los estímulos proporcionados por el usuario, de manera que se transforman los movimientos mecánicos en señales eléctricas. Además, si se realiza un método de detección similar al de una tecla, es necesario utilizar un componente que permita su retorno a la posición original.

1. Tecla.
2. Sensor mioeléctrico.
3. Sensor piezoeléctrico.
4. Sensor FSR.
5. Sensor de flexión.

Retornar

1. Resorte.
2. Domo de goma.

- **Procesar información**

El dispositivo debe contar con un microcontrolador que reciba las señales eléctricas para procesarlas y mandar instrucciones para la pulsación de teclas, o en su defecto, comunicarlas hacia la computadora.

1. Pro Micro (ATmega32U4).
2. Arduino UNO (ATmega328P).
3. Arduino Nano (ATmega328P).
4. ESP32.

- **Pulsar teclas (*Hardware*)**

En caso de contar con arreglo totalmente físico, posterior a la función de “procesar información” se requiere que mediante actuadores las teclas del teclado sean pulsadas. Además de la elaboración de piezas que permitan transformar el movimiento rotacional de los actuadores hacia movimientos lineales para la pulsación de las teclas.

1. Servomotor.
2. Motor DC.
3. Motor a paso.
4. Motorreductor.
5. Motor brushless.

- **Recibir pulsaciones (*Hardware*)**

Por último, para el arreglo únicamente físico, se tiene que contar con un teclado convencional con el propósito de que a este le sea acoplado el dispositivo desarrollado y este último accione las teclas solicitadas.

- **Comunicar periférico – computadora (*Hardware – Software*)**

Por otro lado, en caso de contar con el arreglo físico – digital, se requiere una comunicación directa con la computadora por la cual el microcontrolador envíe la información correspondiente a las acciones solicitadas. El cable queda definido por el microcontrolador seleccionado o también se puede optar por una conexión inalámbrica mediante Bluetooth.

1. Cable USB Tipo A – micro USB.
2. Cable USB Tipo A – Tipo B.
3. Conexión Bluetooth.

- **Interpretar información (*Hardware – Software*)**

Una vez comunicada la información proveniente del microcontrolador hacia la computadora, mediante programación es necesario interpretarla para determinar las teclas que se están solicitando y de este modo se realicen las acciones deseadas.

2.2.2 Matrices morfológicas

Con el fin de proponer diferentes configuraciones que pudieran dar solución al prototipo del dispositivo, se dieron 4 configuraciones diferentes con los elementos propuestos para cada una de las funciones para brindar un mejor panorama sobre los componentes a emplear. De las 4 configuraciones, 2 corresponden a arreglos basados en el diagrama de caja negra de *hardware*, mientras que los otros 2 en el diagrama de caja negra de *hardware – software*.

Los 2 arreglos únicamente físicos son los siguientes:

Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Energizar	Baterías	Fuente de poder	Conexión directa a un tomacorriente	Conexión directa a la computadora (cable USB)	
Bloquear lectura	Interruptor ON/OFF	Botón pulsador ON/OFF	Dip Switch		
Detectar señales	Interruptor de teclas	Sensor mioeléctrico	Sensores piezoeléctricos	Sensores FSR	Sensores de flexión
Retornar	Resortes	Domos de goma			
Procesar información	Pro Micro (ATMEGA32U4)	Arduino UNO (ATMEGA328P)	Arduino Nano (ATMEGA328P)	ESP32	
Pulsar teclas	Servomotores	Motores DC	Motores a paso	Motorreductores	Motores brushless
Recibir pulsaciones	Teclado				

Tabla 29. Matriz morfológica (hardware).

➢ Concepto 1

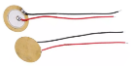
Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Energizar					
Bloquear lectura					
Detectar señales					
Retornar					
Procesar información					
Pulsar teclas					
Recibir pulsaciones					

Tabla 30. Matriz morfológica del concepto 1.

El concepto 1 consiste en un dispositivo totalmente físico que no requiere una conexión directa con la computadora, sino que este se encarga de presionar las teclas solicitadas mediante servomotores activados por señales mioeléctricas proporcionadas por el miembro superior discapacitado o por otra parte del cuerpo que le sea conveniente, por lo que se trata de un aditamento para el teclado como se mencionó anteriormente.

En este arreglo se requiere de 2 fuentes de alimentación distintas debido a que, al estar empleando señales provenientes del cuerpo, por seguridad es importante aislar el circuito del sensor mioeléctrico de la alimentación del sistema completo, por lo cual una conexión directa a un tomacorriente sería lo ideal para alimentar casi todo el dispositivo junto con un par de baterías para la sección correspondiente al sensor mioeléctrico.

Por otro lado, no es necesario utilizar un componente de retorno, ya que no se está empleando ningún tipo de tecla o botón para la detección de los movimientos.

En cuanto a la tarjeta de desarrollo empleada para captar las señales mioeléctricas, se seleccionó un Arduino UNO para permitir la lectura de las señales, así como el envío de las señales de control para los servomotores de las teclas.

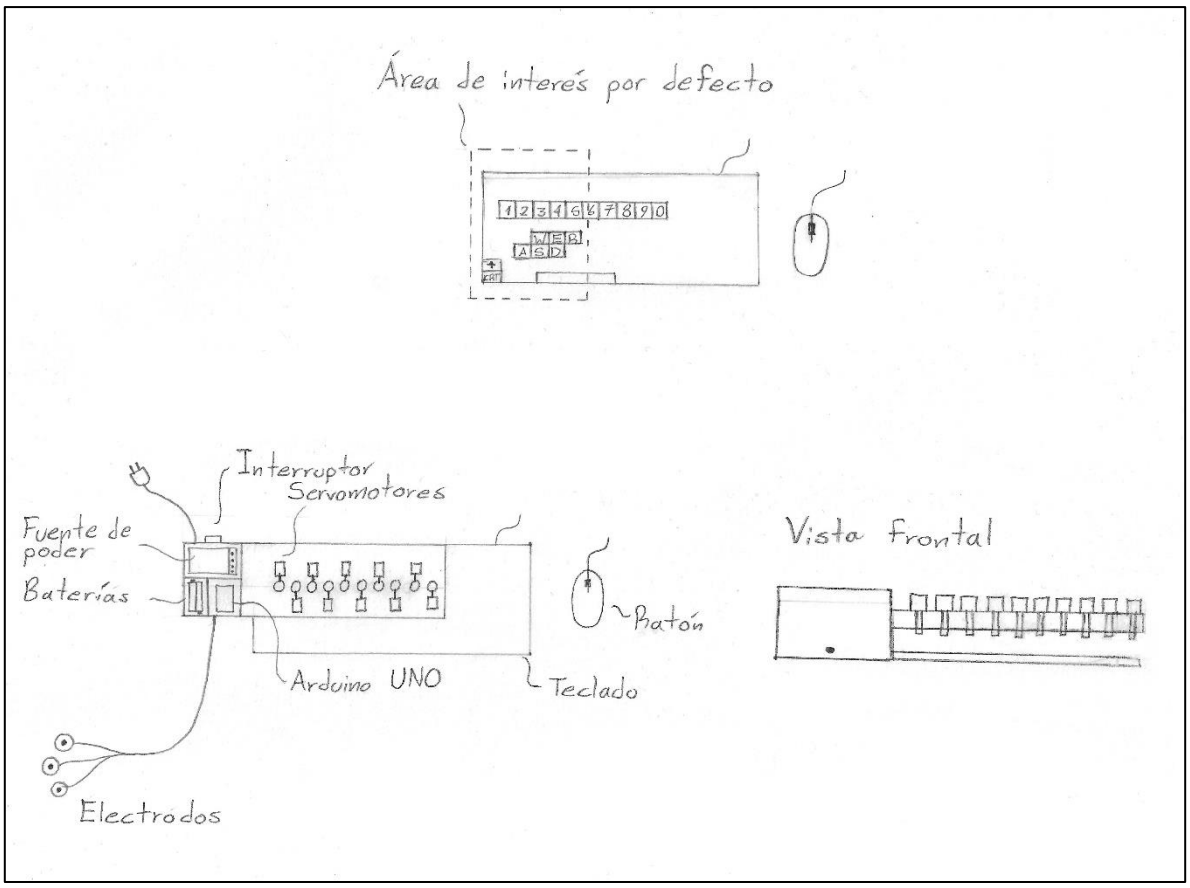


Figura 26. Boceto del concepto 1.

Como se puede apreciar en el boceto, se optó por colocar los servomotores en las posiciones correspondientes a las teclas numéricas, ya que estas cuentan con una distribución lineal, a comparación de la distribución por defecto de las teclas observadas en la figura 23, Distribución de las teclas correspondientes a las acciones más frecuentes en un teclado latinoamericano. Por ende, es más conveniente utilizar las teclas numéricas para que el arreglo de servomotores sea más uniforme y únicamente reasignar las acciones del videojuego que se esté jugando hacia estas teclas.

Por otro lado, el aditamento de teclado está pensado para que el teclado sea colocado en medio del dispositivo, entre la parte superior y la parte inferior que se puede apreciar en la vista frontal y así permitir que, independientemente del tamaño del teclado, el aditamento pueda ser colocado en la posición exacta en la que se encuentren las teclas numéricas.

➢ Concepto 2

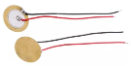
Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Energizar					
Bloquear lectura					
Detectar señales					
Retornar					
Procesar información					
Pulsar teclas					
Recibir pulsaciones					

Tabla 31. Matriz morfológica del concepto 2.

El concepto 2 también utiliza la misma idea de un arreglo solamente físico; sin embargo, el método de detección es distinto. Este se basa en el funcionamiento de un teclado convencional que está pensado para ser controlado principalmente mediante los pies y únicamente cuenta con las teclas más importantes al momento de jugar videojuegos de disparos, de tal modo que las teclas son lo suficientemente grandes para poder ser accionadas con esta parte del cuerpo.

Una vez que las teclas son presionadas, las señales son recibidas por la tarjeta de desarrollo Arduino UNO y, al igual que el concepto 1, el microcontrolador se encarga de enviar señales de control hacia los servomotores que oprimen las teclas del teclado original.

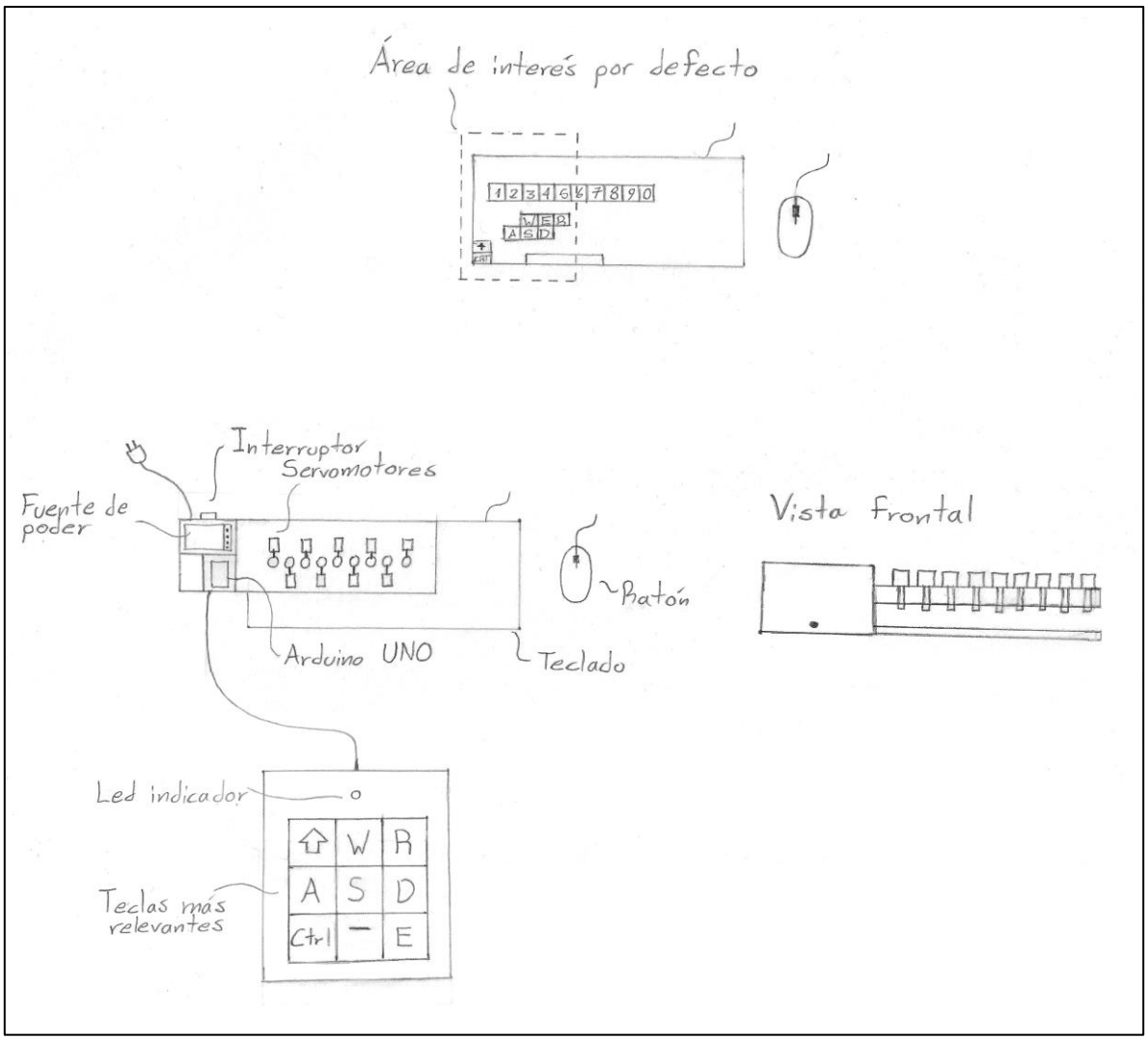


Figura 27. Boceto del concepto 2.

Se trata del mismo aditamento de teclado utilizado en el concepto 1, pero con la detección de movimientos mediante el “teclado” para los pies, el cual cuenta con 9 teclas del mismo tamaño distribuidas a lo largo del dispositivo, las cuales permiten accionar los movimientos más relevantes que fueron analizados con anterioridad.

Cabe destacar que la distribución de las teclas en el boceto es únicamente ilustrativa y no representa una configuración definitiva.

Por otro lado, los 2 arreglos físicos – digitales están dados de la siguiente manera:

Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Energizar	Baterías	Fuente de poder	Conexión directa a un tomacorriente	Conexión directa a la computadora (cable USB)	
Bloquear lectura	Interruptor ON/OFF	Botón pulsador ON/OFF	Dip Switch		
Detectar señales	Teclas	Sensor mioeléctrico	Sensores piezoeléctricos	Sensores FSR	Sensores de flexión
Retornar	Resortes	Domos de goma			
Procesar información	Pro Micro (ATMEGA32U4)	Arduino UNO (ATMEGA328P)	Arduino Nano (ATMEGA328P)	ESP32	
Comunicar periférico - computadora	Cable USB Tipo A – micro USB	Cable USB Tipo A – Tipo B	Conexión Bluetooth		
Interpretar información	Computadora				

Tabla 32. Matriz morfológica (hardware - software).

➢ Concepto 3

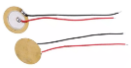
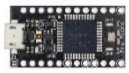
Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Energizar					
Bloquear lectura					
Detectar señales					
Retornar					
Procesar información					
Comunicar periférico - computadora					
Interpretar información					

Tabla 33. Matriz morfológica del concepto 3.

Para el concepto 3, el arreglo cambia a uno físico – digital, es decir, ya no se trata de un aditamento para el teclado, sino que consiste en un periférico que va conectado directamente hacia la computadora y que se encarga de comunicar las señales recibidas hacia esta última para que mediante programación puedan ser interpretadas las acciones deseadas, de igual manera como ocurre en los teclados convencionales.

Por otro lado, este concepto también aborda la idea de que el método de detección sea mediante señales mioeléctricas, por lo que requeriría de 2 fuentes de alimentación por lo mencionado anteriormente; sin embargo, debido a que el dispositivo ahora se encuentra conectado a la computadora, se puede aprovechar esta conexión para alimentar a casi todos los componentes, a excepción del circuito del sensor mioeléctrico, el cual es alimentado con baterías. Y de esto mismo que tampoco se requiera de algún componente que haga regresar a su posición a algún tipo de tecla o botón, ya que no se emplean.

Debido a que en este concepto tampoco se requiere de una función de “pulsar teclas”, se propone una placa de desarrollo más simple como lo es el Arduino Nano, cuya función únicamente es la de recibir las señales proporcionadas y comunicarlas hacia la computadora mediante un cable USB tipo A – micro USB. Cabe mencionar que comercialmente los microcontroladores Atmel son utilizados por algunos teclados debido a su amplia disponibilidad y facilidad de uso, entre ellos se encuentra el ATmega328P, mismo que emplea al Arduino Nano.

Por último, para poder interpretar las señales desde la computadora, se requiere la programación de los controladores para que dependiendo de la señal recibida esta corresponda a una tecla en específico, de manera análoga a cómo lo hace un teclado.

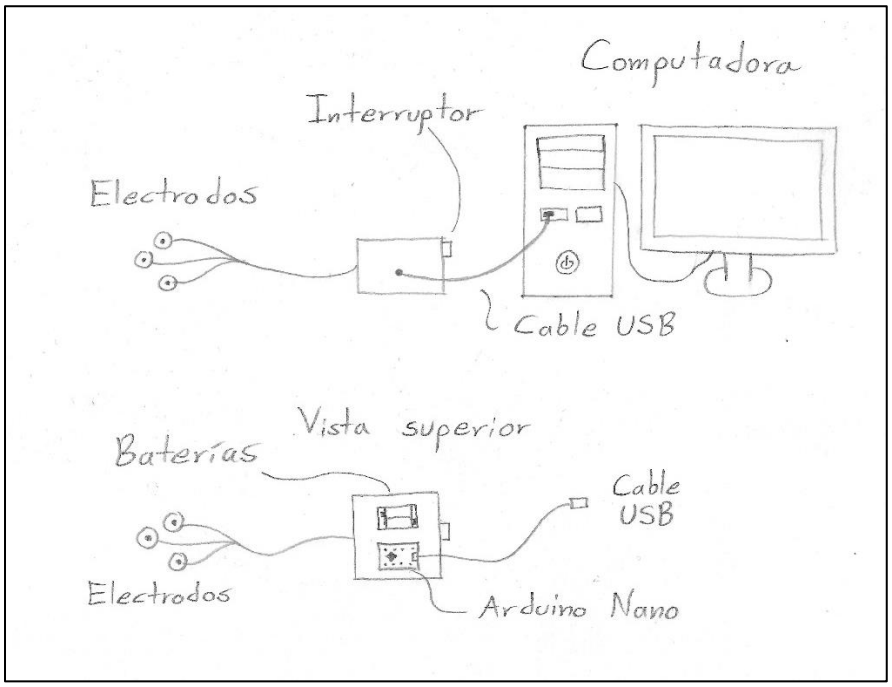


Figura 28. Boceto del concepto 3.

De acuerdo con el boceto, para este concepto se requiere de un espacio en el que estén situados todos los componentes electrónicos que se utilizan, y únicamente cuenta con los 2 cables externos: 1 que va hacia los electrodos que captan las señales mioeléctricas y otro que va conectado directamente hacia la computadora.

- **Concepto 4**

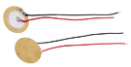
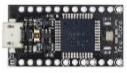
Funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Funciones					
Energizar					
Bloquear lectura					
Detectar señales					
Retornar					
Procesar información					
Comunicar periférico - computadora					

Tabla 34. Matriz morfológica del concepto 4.

Para el último concepto, se propone una configuración que hace mezcla de los conceptos 2 y 3, el cual consiste en un arreglo físico – digital pero que, en lugar de utilizar señales mioeléctricas, hace uso de teclas.

Se trata de un dispositivo que se basa en el funcionamiento de un teclado convencional que está orientado a ser controlado mediante ambos pies, por lo que cuenta con las teclas más relevantes al momento de jugar y las teclas son lo suficientemente grandes para poder ser accionadas a partir de esta parte del cuerpo, es decir, que en este caso sí se requiere de un componente de retorno, como un resorte, para que las teclas regresen a su posición inicial después de ser accionadas.

Al estar conectado directamente a la computadora, esta conexión es suficiente para poder alimentar a todos los componentes.

En cuanto alguna de las teclas es presionada, la señal es transmitida hacia el microcontrolador que posteriormente comunica la información hacia la computadora. Para este concepto se seleccionó la tarjeta Pro Micro, la cual posee el microcontrolador ATmega32U4 de Atmel, que al igual que el ATmega328P, también es utilizado en teclados comerciales.

Una vez captadas las señales, estas son trasmitidas hacia la computadora para que puedan ser interpretadas y reflejen la acción deseada.

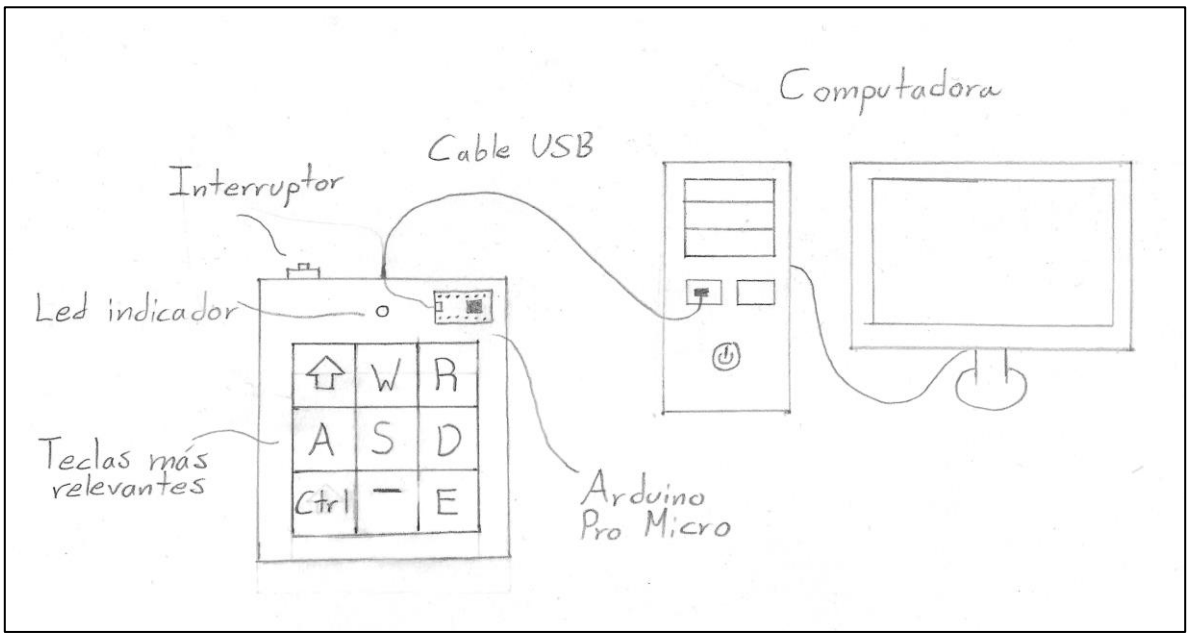


Figura 29. Boceto del concepto 4.

Por último, para este boceto se puede observar la misma propuesta de “teclado” del concepto 2, pero en este caso todos los componentes electrónicos están distribuidos dentro de este mismo y cuenta con un cable USB para que sea conectado a la computadora.

2.2.3 Matriz de decisión definitiva por cada función

Por último, para determinar cuáles componentes eran los más adecuados para dar solución a cada una de las funciones y así decidir cuál concepto era el más idóneo, se procedió a realizar una matriz de comparación por pares para determinar los criterios de selección más importantes a abordar para el diseño final. Posteriormente, con base en dichos criterios, realizar una matriz de comparación entre 3 posibles alternativas para cada una de las funciones.

- Criterios de selección de los componentes

A) Compacto.

Se desea un componente de un tamaño reducido para que el dispositivo final sea de dimensiones aproximadas a las de un teclado convencional y que de este modo pueda ser colocado encima de la superficie en la que se encuentre el teclado convencional o en el suelo, según sea el concepto seleccionado.

B) Portátil.

Se desea un componente de poco peso para permitir que el dispositivo final pueda ser trasladado de una computadora a otra, con una sola mano, por el propio usuario.

C) Velocidad de respuesta breve.

Se desea un componente que proporcione tiempos de respuesta cortos similares a los de un teclado convencional, en cuestión de milisegundos, para lograr la correcta lectura de las señales de movimiento del usuario.

D) Facilidad de uso.

Se desea un componente que cuente con pocas instrucciones de operación, para que el usuario pueda hacer uso del dispositivo final únicamente con estímulos provenientes de otras partes de su cuerpo.

E) Exactitud.

De acuerdo con la función que realicé el componente dentro del dispositivo, se desea que este proporcioné las magnitudes reales requeridas (voltaje, ángulo de giro, etc.).

F) Durabilidad larga.

Se desea un componente capaz de operar de manera constante, durante las sesiones de juego del usuario, sin que su rendimiento o calidad se vean afectados.

G) Facilidad de mantenimiento.

Se desea un componente que sea fácil de reemplazar para que, en caso de fallar, el usuario pueda mandar a reparar el dispositivo en lugar de desecharlo o adquirir uno nuevo.

H) Compatibilidad.

Se desea un componente que pueda funcionar con la tarjeta de control seleccionada para permitir la interacción con los demás componentes electrónicos y que a la vez pueda ser capaz de operar de manera simultánea con el software de la computadora.

I) Facilidad de calibración.

Se desea un componente que pueda ser ajustado de tal modo que a pesar de que el dispositivo sea utilizado en computadoras distintas o por usuarios distintos, este pueda seguir realizando su función principal de la misma manera.

J) Seguridad

Se desea un componente que se mantenga a una baja temperatura durante su operación, que en caso de dañarse solo se estropee a sí mismo y que no permita que ocurran descargas eléctricas hacia el usuario.

Para la matriz de comparación por pares, se compararon cada uno de los criterios en contra de otro para determinar la jerarquía de relevancia, de modo que, si al comparar un criterio de una fila con respecto al de una columna resultaba que el criterio de dicha fila se consideraba más importante que el de la columna, se le asignaba un “1”, mientras que un “0” en el caso contrario.

Finalmente, la matriz de comparación por pares resultó de la siguiente manera:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	S	F
A		1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0.04
B	0		0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.02
C	1	1		1	1	1	1	0	1	1	8	0.18
D	1	1	0		0	1	1	0	1	0	5	0.11
E	1	1	0	1		1	1	1	1	1	8	0.18
F	1	1	0	0	0		0	0	0	0	2	0.04
G	0	0	0	0	0	1		0	0	0	1	0.02
H	1	1	1	1	0	1	1		1	1	8	0.18
I	1	1	0	0	0	1	1	0		0	4	0.09
J	1	1	0	1	0	1	1	0	1		6	0.13
											45	1

Tabla 35. Matriz de comparación por pares de los criterios de diseño.

Donde “S” representa la suma total de cada una de las filas y “F” el factor obtenido mediante el cociente de cada una de las filas entre la suma total de todas las filas (45) por lo cual, de acuerdo con la relevancia del criterio, este posee un mayor o menor factor. Este factor permite evaluar a cada componente con base en una escala de 5 puntos, la cual se presenta a continuación en las matrices de comparación.

Los criterios con mayor relevancia resultaron ser “velocidad de respuesta breve”, “exactitud” y “compatibilidad”. Por otro lado, los criterios con menor relevancia fueron “portátil” y “facilidad de mantenimiento”.

- Matrices de comparación

En las matrices de comparación se empleó una escala de 5 puntos.

Escala de 5 puntos	
1	Inadecuado
2	Malo
3	Satisfactorio
4	Bueno
5	Excelente

Tabla 36. Escala de 5 puntos para evaluar cada alternativa.

Posteriormente, se procedió a comparar 3 posibles alternativas para cada función y así lograr determinar cuál de ellas era la más adecuada.

Si una alternativa cumplía de muy buena manera con algún criterio, la calificación máxima que podía recibir era “5” correspondiente a “excelente”. Por lo contrario, si no satisfacía de manera adecuada el criterio, la peor calificación se colocaba un “1” que corresponde a “inadecuado”.

Para cada uno de los criterios, se obtuvo un puntaje mediante el producto de la calificación otorgada y el factor para dicho criterio. Y finalmente, se realizó la suma de los puntos para la calificación de cada alternativa y se observó cuál de las 3 opciones tenía una mayor calificación para la función en cuestión.

➢ Funciones

Energizar		Alternativas					
		Baterías		Fuente de poder		Cable USB	
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	4	0.18	3	0.13	5	0.22
Portátil	0.02	5	0.11	3	0.07	5	0.11
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	3	0.33	5	0.56
Exactitud	0.18	4	0.71	4	0.71	5	0.89
Durabilidad larga	0.04	3	0.13	5	0.22	5	0.22
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	3	0.07	5	0.11
Compatibilidad	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de calibración	0.09	4	0.36	4	0.36	5	0.44
Seguridad	0.13	5	0.67	4	0.53	5	0.67
			4.60		4.20		5.00

Tabla 38. Matriz de comparación de la función “energizar”.

Bloquear lectura		Alternativas					
		Interruptor ON/OFF		Botón pulsador ON/OFF		Dip Switch	
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	5	0.22	5	0.22	5	0.22
Portátil	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	5	0.89	4	0.71
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	5	0.56	4	0.44
Exactitud	0.18	5	0.89	5	0.89	3	0.53
Durabilidad larga	0.04	5	0.22	5	0.22	5	0.22
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Compatibilidad	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	5	0.44	4	0.36
Seguridad	0.13	5	0.67	5	0.67	5	0.67
			5.00		5.00		4.27

Tabla 39. Matriz de comparación de la función “bloquear lectura”.

Detectar señales		Alternativas					
		Teclas		Sensor mioeléctrico		Sensores FSR	
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	5	0.22	4	0.18	5	0.22
Portátil	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	3	0.33	5	0.56
Exactitud	0.18	5	0.89	2	0.36	3	0.53
Durabilidad larga	0.04	5	0.22	4	0.18	5	0.22
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	4	0.09	5	0.11
Compatibilidad	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	2	0.18	4	0.36
Seguridad	0.13	5	0.67	4	0.53	5	0.67
			5.00		3.73		4.56

Tabla 40. Matriz de comparación de la función “detectar señales”.

Para la función de detección, el criterio más crítico de evaluar fue el de “exactitud”, resultando como mejor valuada la opción del uso de teclas, ya que, analizando las otras 2 propuestas, en la detección mediante señales mioeléctricas se pueden tener diversas complicaciones al momento de implementarlo, debido a todas las etapas acondicionamiento requeridas para el correcto aprovechamiento de las señales, además de que en cada ocasión que el usuario deseara utilizar el dispositivo, tendría que volver a colocar todos los electrodos sobre la parte del cuerpo seleccionada, por lo que muy probablemente las señales variarían de una sesión de juego a otra, o incluso a lo largo de la misma sesión.

Mientras que los sensores FSR, debido a la variación de fuerza que se podría presentar cada vez que se presione una tecla, los valores medidos serían distintos de una ocurrencia a otra. Por otro lado, al tratarse de una resistencia variable, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre el entorno, los valores proporcionados también podrían variar.

Retornar		Alternativas					
		Resortes		Domos de goma			
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	5	0.22	5	0.22		
Portátil	0.02	5	0.11	5	0.11		
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	5	0.89		
Facilidad de uso	0.11	3	0.33	4	0.44		
Exactitud	0.18	5	0.89	5	0.89		
Durabilidad larga	0.04	5	0.22	5	0.22		
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	4	0.09		
Compatibilidad	0.18	5	0.89	1	0.18		
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	4	0.36		
Seguridad	0.13	5	0.67	5	0.67		
			4.78		4.07		

Tabla 41. Matriz de comparación de la función “retornar”.

Procesar información		Alternativas					
		Pro Micro		Arduino UNO		Arduino Nano	
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	5	0.22	4	0.18	5	0.22
Portátil	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	5	0.56	5	0.56
Exactitud	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Durabilidad larga	0.04	5	0.22	5	0.22	5	0.22
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Compatibilidad	0.18	5	0.89	3	0.53	3	0.53
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	5	0.44	5	0.44
Seguridad	0.13	5	0.67	5	0.67	5	0.67
			5.00		4.60		4.64

Tabla 42. Matriz de comparación de la función "procesar información".

Para la función de "procesar información", el criterio más determinante fue el de "compatibilidad", ya que tanto el Arduino UNO como el Nano funcionan sin ningún inconveniente para los arreglos físicos, pero para los físicos – digitales, no permiten la funcionalidad de actuar como HID (*Human Interface Device*) requerida para operar como un periférico de computadora, por lo que sería necesario utilizar componentes adicionales para dicha labor. Por otro lado, la tarjeta Pro Micro es capaz de realizar las funciones requeridas por ambos tipos de arreglo.

Pulsar teclas (Hardware)		**Alternativas**					
		Servomotores		Motores a paso		Motorreductores	
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	5	0.22	5	0.22	5	0.22
Portátil	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Velocidad de respuesta breve	0.18	4	0.71	2	0.36	5	0.89
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	5	0.56	5	0.56
Exactitud	0.18	5	0.89	5	0.89	2	0.36
Durabilidad larga	0.04	5	0.22	5	0.22	5	0.22
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	5	0.11	5	0.11
Compatibilidad	0.18	5	0.89	5	0.89	5	0.89
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	4	0.36	3	0.27
Seguridad	0.13	5	0.67	5	0.67	5	0.67
			4.82		4.38		4.29

Tabla 43. Matriz de comparación de la función “pulsar teclas” (Hardware).

Entre los 3 tipos de motores propuestos para la función de “pulsar teclas”, los criterios más importantes fueron “velocidad de respuesta breve” y “exactitud”, debido a que se requiere que se cumplan ambos de manera simultánea, para que las teclas del teclado sean pulsadas de manera adecuada e inmediata de acuerdo con las instrucciones del usuario. Por un lado, un motor a paso proporciona una buena exactitud, pero su tiempo de respuesta es muy lento; los motorreductores tienen un muy buen tiempo de respuesta, pero al carecer de una retroalimentación de posición, el control de su movimiento es poco exacto, mientras que un servomotor posee ambas características.

Para la función de “comunicar periférico – computadora”, en caso de optar por una conexión alámbrica, el cable queda definido por la placa de desarrollo seleccionada. Por ende, la comparativa se realiza entre un tipo de conexión alámbrica o inalámbrica.

Comunicar periférico - computadora (Hardware - Software)		**Alternativas**					
		Cable USB		Conexión Bluetooth			
Criterios	**F**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**	**Calif.**	**Puntos**
Compacto	0.04	4	0.18	5	0.22		
Portátil	0.02	3	0.07	5	0.11		
Velocidad de respuesta breve	0.18	5	0.89	4	0.71		
Facilidad de uso	0.11	5	0.56	4	0.44		
Exactitud	0.18	5	0.89	4	0.89		
Durabilidad larga	0.04	4	0.18	5	0.22		
Facilidad de mantenimiento	0.02	5	0.11	5	0.11		
Compatibilidad	0.18	5	0.89	3	0.53		
Facilidad de calibración	0.09	5	0.44	5	0.44		
Seguridad	0.13	5	0.67	5	0.67		
			4.87		4.36		

Tabla 44. Matriz de comparación de la función “comunicar periférico – computadora” (Hardware – Software).

El criterio más significativo fue el de “compatibilidad”. Si bien una conexión Bluetooth posee la ventaja de no requerir conexiones físicas para establecer la conexión del dispositivo con la computadora, las tarjetas propuestas para el proyecto no tienen integrado un soporte para Bluetooth, a excepción de la ESP32, es por ello por lo que se requeriría de componentes adicionales para solventar dicho inconveniente. Por otro lado, también existe la posibilidad de que la computadora del usuario no cuente con Bluetooth integrado, por lo que de igual forma sería necesario de un adaptador externo.

En cuanto a la función de “recibir pulsaciones”, correspondiente a los arreglos físicos, no se cuenta con diferentes alternativas, sino que únicamente se trata de un teclado convencional.

Para los arreglos físicos – digitales, se tiene otra función: “interpretar información”, la cual no cuenta con diversas opciones ya que esta depende totalmente de la programación realizada para que las teclas sean interpretadas de acuerdo con los movimientos deseados.

Por ende, con las calificaciones obtenidas mediante las matrices de comparación de todas las funciones, se tienen las siguientes opciones mejor valoradas para cada una:

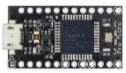
Funciones	Opciones mejor valoradas	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4
Energizar					
Bloquear lectura					
Detectar señales					
Retornar		N/A		N/A	
Procesar información					
Pulsar teclas				N/A	N/A
Recibir pulsaciones				N/A	N/A
Comunicar periférico - computadora		N/A	N/A		
Interpretar información		N/A	N/A		

Tabla 45. Tabla de comparación entre los conceptos propuestos y las alternativas mejor valoradas.

Con base en la tabla 45, se puede observar que, de acuerdo con los criterios propuestos, el concepto que incluye a todos los componentes mejor valorados, al menos para un arreglo físico – digital, es el número 4. Por lo tanto, dicho concepto fue el seleccionado para que fuera desarrollado.

3. Diseño de detalle

Para dar paso al diseño de las piezas que conformaban el concepto seleccionado para el dispositivo, fue necesario establecer las diversas necesidades que se esperaba que cubriera el teclado, para posteriormente convertirlas a especificaciones que pudieran cumplirlas de manera satisfactoria.

3.1 Necesidades y requerimientos

Con base en la investigación realizada a lo largo de los 2 capítulos anteriores y en los criterios de selección de componentes, se identificaron las siguientes necesidades:

No.	Necesidad
1	Se desea que el teclado cuente con las teclas más relevantes al momento de jugar videojuegos de disparos.
2	Se desea que el teclado tenga una distribución de teclas que permita presionarlas de manera simultánea con los pies.
3	Se desea que el teclado tenga teclas reprogramables.
4	Se desea que el teclado posea dimensiones que permitan colocar ambos pies sobre él.
5	Se desea que el teclado sea ligero para poder ser cargado con una sola mano.
6	Se desea que el teclado tenga un tiempo de respuesta similar o menor al de un teclado convencional.
7	Se desea que las teclas tengan dimensiones aproximadas a las del antepié.
8	Se desea que las teclas puedan ser pulsadas con poca fuerza.
9	Se desea que las teclas regresen a su posición original después de ser pulsadas.
10	Se desea que el teclado pueda operar de manera continua durante una sesión de juego.
11	Se desea que el teclado tenga una conexión directa a la computadora.
12	Se desea que el teclado funcione con el voltaje de alimentación suministrado por la computadora.
13	Se desea que el teclado sea compatible con diferentes computadoras.
14	Se desea que el teclado permanezca a una temperatura baja.
15	Se desea que el teclado esté manufacturado de un material resistente.

Tabla 46. Tabla de necesidades.

De acuerdo con las necesidades de la tabla 46, se realizó la siguiente tabla para establecer las especificaciones de diseño con los rangos de los parámetros para satisfacer dichas necesidades.

No.	Especificación	Métrica	Unidades	Valores
1	Cantidad de teclas	Número	-	9
2	Forma del teclado	Geometría	-	Rectangular
3	Cantidad de teclas reprogramables	Número	-	9
4	Medidas del teclado	Lago/Ancho/Espesor	[mm]	<600x400x100
5	Peso del teclado	Peso	[kg]	<4
6	Tiempo de respuesta del teclado	Tiempo	[ms]	<30
7	Medidas de las teclas	Largo/Ancho	[mm]	>100x100 <130x130
8	Pulsación de teclas	Fuerza	[N]	>10 <25
9	Resortes de retorno de teclas	D. Alam/D. Ext/Longitud	[mm]	>0.7x0.9x20 <0.9x12x35
		Fuerza	[N]	>10 <25
10	Tiempo de operación continuo del teclado	Tiempo	[h]	>8
11	Conexión a la computadora	Tipo	-	Cable USB Tipo A - micro USB
12	Voltaje de alimentación	Voltaje	[V]	5
13	Compatibilidad con diferentes computadoras	Software	-	Cumple
14	Temperatura de operación máxima del teclado	Temperatura	[°C]	<40
15	Material de las piezas	Tipo	-	PETG, PLA, TPU

Tabla 47. Tabla de especificaciones de diseño.

A partir de dichas especificaciones se procedió a dar una solución a cada una de ellas.

Para comenzar, se buscó justificar la geometría que el teclado iba a poseer para albergar todas las teclas, de tal modo que se encontraran distribuidas para que pudieran ser activadas mediante ambos pies.

Como primer acercamiento, se realizó una comparativa con la distribución cuadrada que poseen los tapetes de baile de los juegos *Dance Dance Revolution,* ya que estos son controlados mediante los pies y de igual forma están destinados a usuarios que juegan videojuegos, aunque para un sector mucho más específico.

Figura 30. Tapete de baile del videojuego Dance Dance Revolution.

Como se puede apreciar, los pulsadores se encuentran distribuidos sobre un área cuadrada en una matriz de 3 filas por 3 columnas, misma que permitiría la implementación de las 9 teclas deseadas para el teclado; sin embargo, si bien esta distribución cuadrada es oportuna para los juegos de baile los cuales presentan secuencias en las que máximo se presionan 2 botones a la vez, para un videojuego de computadora no resulta tan conveniente debido a que se puede requerir la pulsación de múltiples teclas a la vez. Por otro lado, esta distribución podría ocasionar que algunas teclas pudieran quedar alejadas del espacio de trabajo de los pies y por ende resultara complicado pulsarlas.

A partir de ello, se determinó que era necesario buscar una geometría óptima para la distribución de las teclas y determinar las dimensiones apropiadas para el teclado para lograr evitar los inconvenientes observados en este tipo de tapetes.

3.2 Antropometría

Para tener un panorama más amplio de las dimensiones que se debían de asignar a las teclas y el teclado, se tomó como referencia una investigación proveniente de la Universidad de Guadalajara en la cual se recopilaron los datos antropométricos de diferentes personas de acuerdo con su género y grupo de edad (Ávila et al, 2007). Estos datos vienen presentados mediante 3 diferentes percentiles: 5, 50 y 95, de los cuales se decidió utilizar los del percentil 50 para evitar los valores extremos que podrían alterar los valores promedio. De estos se extrajeron las dimensiones pertenecientes a los jóvenes estudiantes de 19 a 24 años, mismo rango de edad en el que se encuentra la mayor cantidad de jugadores a nivel global.

- Para el uso de información se solicitó y recibió la autorización de los autores correspondiente.

Esta muestra está conformada por 284 personas, 187 del género femenino y 97 del género masculino, a partir de estos datos se obtuvo el promedio de ambos géneros para 5 dimensiones de interés y así poder trabajar con dichos valores. Las dimensiones de interés para el proyecto se encuentran representadas de manera gráfica en la siguiente figura:

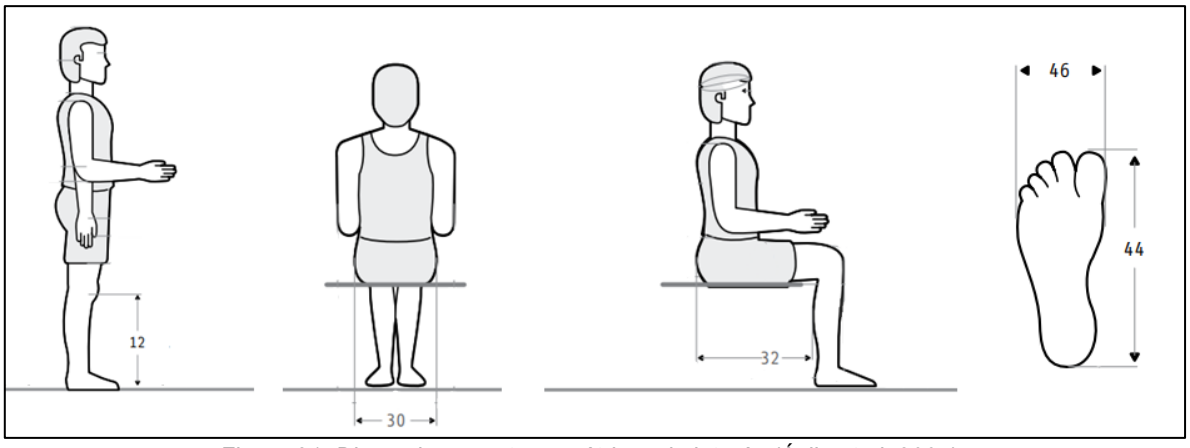


Figura 31. Dimensiones antropométricas de interés (Ávila et al, 2007).

Cuyas dimensiones son las siguientes:

No.	Dimensión	Género femenino [mm]	Género masculino [mm]	Promedio [mm]
12	Altura rodilla	441	478	459.5
30	Anchura cadera sentado	368	368	368
32	Longitud nalga – poplíteo	453	471	462
44	Longitud del pie	235	262	248.5
46	Anchura del pie	88	98	93

Tabla 48. Tabla de dimensiones antropométricas de interés y su promedio (Ávila et al, 2007).

Con base en estas dimensiones, para dar cabida al accionamiento de múltiples teclas a la vez, se tomó el valor de la longitud del pie para determinar la dimensión más apropiada para cada una de las teclas; para ello, el valor de 248.5 [mm] se redondeó a 250 [mm] para mayor simplicidad, que al dividirlo entre 2 da como resultado 125 [mm]. Esta última longitud se tomó como referencia para el tamaño con el que debía contar aproximadamente una tecla, debido a que se desea que con un solo pie sea posible accionar mínimo 2 teclas que se encuentren contiguas; a su vez, esta dimensión es mayor que la anchura de un pie, 93 [mm], por lo que sería posible colocar el pie sobre una superficie cuadrada de 125x125 [mm] sin que los laterales izquierdo y derecho del pie sobresalgan.

3.3 Prototipo A de una tecla

Fue así como se realizó el modelado de un primer prototipado de una tecla, prototipo A, para verificar de manera individual cómo iba a ser el funcionamiento de las teclas antes de determinar la geometría del teclado y comenzar el modelado de este último.

- Para el modelado de las piezas se utilizó el software *SolidWorks*.

- De manera simultánea se comenzaron a realizar pruebas en los rubros de electrónica y programación en placas de pruebas y con botones pulsadores para validar que el concepto del teclado era posible de cablear y programar, y que por lo tanto se justificara el modelado de las piezas, situación que en efecto ocurrió, pero se aborda más adelante y a detalle en los apartados de **electrónica** y **programación**.

El propósito principal del prototipo era validar la siguiente serie de preguntas:

1. ¿Es posible utilizar un interruptor comercial para el accionamiento de las teclas y de este modo solo realizar un acople a dichos interruptores?
2. ¿Es necesario desarrollar el interruptor por completo?
3. ¿Cuántos resortes se requieren para el retorno de la tecla?
4. ¿Dónde se deben posicionar los resortes de retorno?
5. ¿La rigidez de los resortes es adecuada?
6. ¿La rigidez del resorte debe ser aumentada o disminuida?
7. ¿Las dimensiones seleccionadas arbitrariamente en un primer instante son adecuadas?
8. ¿Las dimensiones arbitrarias requieren ser aumentadas o disminuidas?

De lo cual se partió por comprobar la posibilidad de utilizar un interruptor comercial para la función de “detectar señales”. Para ello se seleccionaron interruptores de teclados mecánicos comerciales, ya que el mercado para el que están destinados es propiamente el de los videojuegos; por lo tanto, se tomaron las dimensiones de uno de estos para la realización de un acople y un soporte para el interruptor.

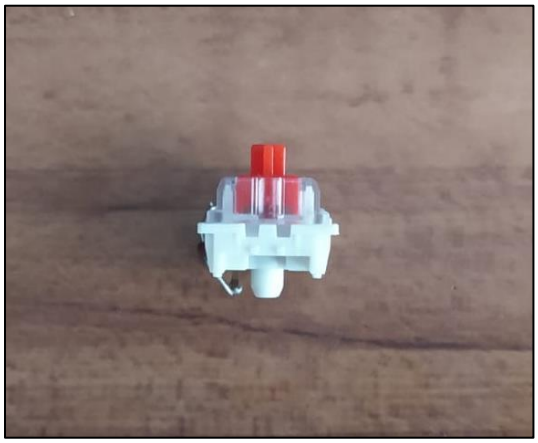


Figura 32. Interruptores mecánicos utilizados (Cherry MX red).

Para el acople se midió el desplazamiento total del interruptor, el cual correspondió a 3.8 [mm], mientras que a los 2 [mm] de desplazamiento el interruptor se encuentra activado. A su vez, se tomaron las dimensiones de la crucera roja que posee el interruptor en la parte superior para el perfil que debía poseer el acople, mientras que, para la realización del soporte, de la parte inferior del interruptor se tomó el diámetro del cilindro con el que cuenta, al igual que la cavidad rectangular que se encuentra en la parte frontal del interruptor. Por último, en el soporte también se agregaron 2 paredes que se encuentran a los costados del interruptor para estabilizar su posición.

Figura 33. Toma de medidas del interruptor.

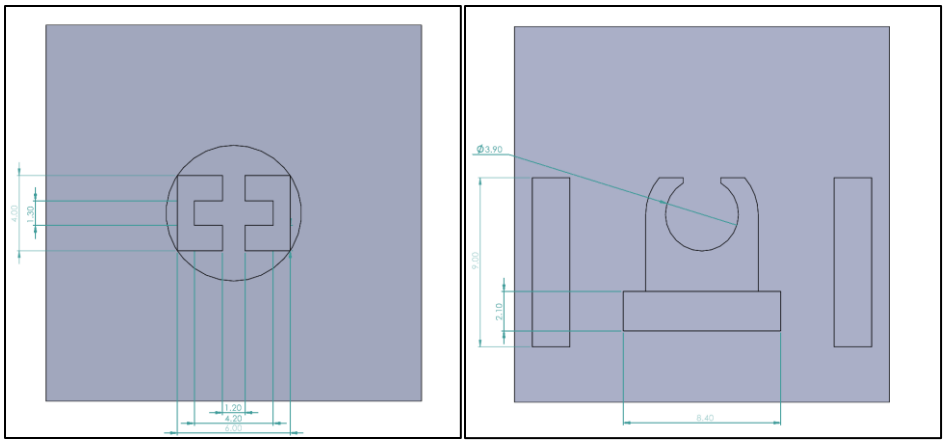


Figura 34. Perfiles del acople y soporte para el interruptor.

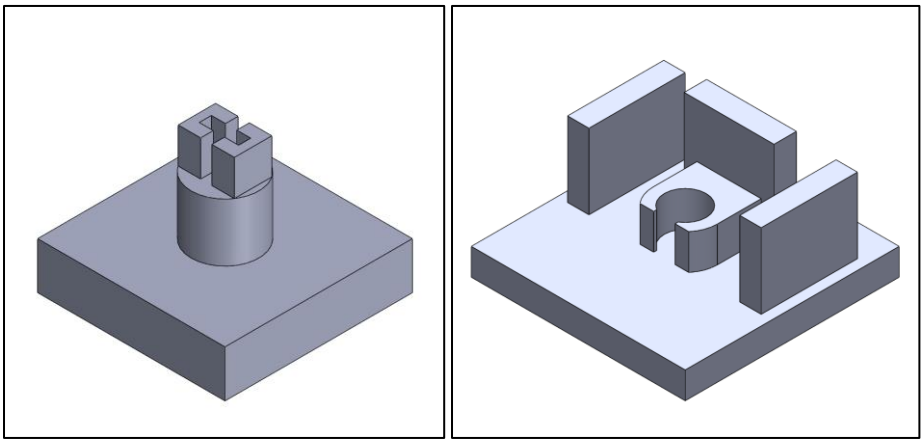


Figura 35. Modelos del acople y soporte para el interruptor.

Una vez modelados, se procedió a manufacturarlos mediante manufactura aditiva. Este método de manufactura fue seleccionado como el más adecuado debido a que permite un prototipado rápido para todas las piezas modeladas, sin necesidad de herramental o maquinaría adicional, de tal modo que era posible probarlas de manera física y realizar modificaciones en caso de que se detectara una oportunidad de mejora.

- La máquina empleada para la manufactura de las piezas fue una impresora 3D de la cual se habla más a detalle en la sección de **manufactura**, así como de los parámetros de impresión de los materiales empleados en el apartado de **selección de materiales**.

Una vez que se tenían ambas piezas manufacturadas, se procedió a acoplarlas con el interruptor para verificar su funcionamiento.

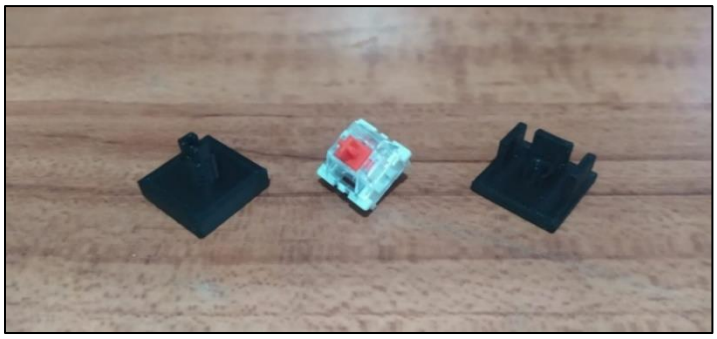


Figura 36. Acople, interruptor y soporte.

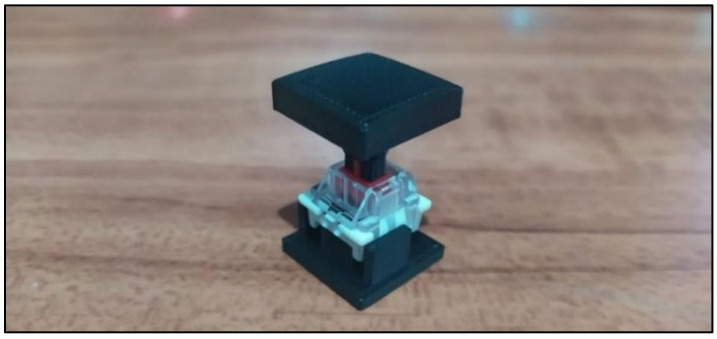


Figura 37. Acople, interruptor y soporte ensamblados.

Con base en el funcionamiento adecuado que presentó el interruptor con ambas piezas al utilizar un multímetro para validar la continuidad una vez que era pulsado, se determinó que para la función de “detectar señales” era posible utilizar el interruptor comercial en lugar de desarrollar un interruptor propio, y así únicamente reutilizar los perfiles del acople y del soporte para las teclas del teclado.

Posteriormente, se procedió con el modelado del prototipo A de una tecla, tomando como geometría arbitraria un cuadrado que tuviera como dimensiones los 125 [mm] que representan la mitad de longitud del pie, por lo que el área de contacto de la tecla fue considerada de manera preliminar como un cuadrado de 125 [mm] de lado.

De manera inicial, la tecla debía estar compuesta mínimo de 3 piezas, una base, una tecla y un retenedor que evitara que la tecla fuera expulsada por los resortes. La base debía contar con el soporte del interruptor, mientras que la pieza de la tecla debía tener el acople al interruptor.

La primera pieza por modelar fue la base; las dimensiones que se le asignaron fueron de 150 [mm] x 150 [mm], para que tuviera un área mayor a la de contacto de la tecla, con una altura de 31.3 [mm], la cual fue determinada posteriormente de manera conjunta con el resto de las piezas, ya que se propuso que la altura total del teclado fuera aproximadamente de 50 [mm]. La parte interna de la tecla se encuentra vacía con un espesor de pared de 10 [mm] y una capa inferior de 5 [mm], y a su vez cuenta con soportes laterales de 10 [mm] de espesor cuya función es soportar a la tecla una vez que esta haya realizado el recorrido completo del interruptor de 3.8 [mm].

Los soportes laterales también poseen 4 orificios de 6.5 [mm], 1 en cada esquina, que actúan como guías para la pieza de la tecla; debido a que una propuesta inicial era que se tuvieran 4 resortes para el retorno de la tecla, 1 para cada guía de tecla; a la base se le hicieron otros 4 orificios de 11.5 [mm], los cuales son coincidentes con los orificios guía, para que en estos fueran colocados los resortes. Estas guías fueron implementadas a la par que se modelaba la pieza de la tecla de acuerdo con las observaciones que se iban realizando.

En la parte superior de la base, con el propósito de fijar el retenedor de tecla hacia la base, se colocaron 4 orificios roscados con una profundidad de 12 [mm], 1 en cada esquina, para tornillos de 2 [mm]; esta dimensión de tornillo fue seleccionada dado que se cuenta con un espesor de pared reducido de 10 [mm]. Por lo tanto, se buscó que el diámetro del tornillo fuera lo menor posible, además de que era posible que en el modelado del teclado final incluso se contara con espesores de pared menores.

Por último, en la parte central se tiene el soporte realizado previamente para el interruptor mecánico.

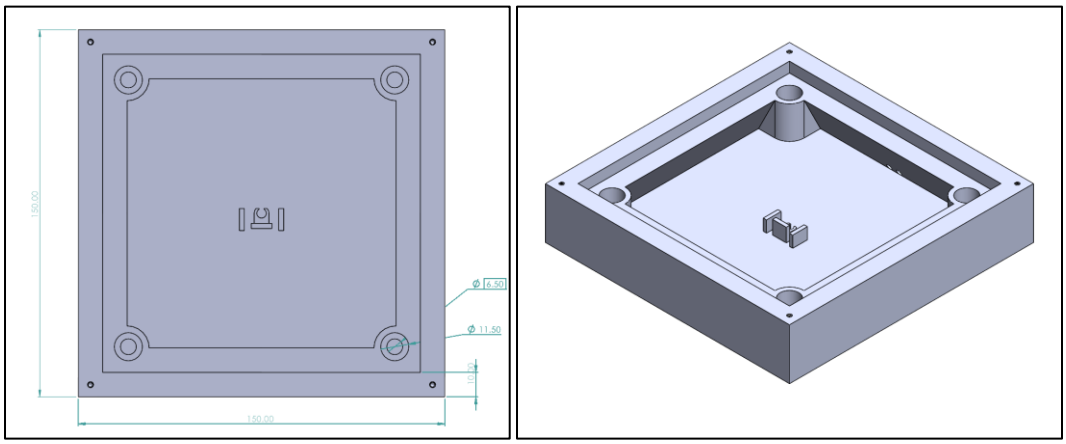


Figura 38. Base del prototipo A.

Para la pieza de la tecla, esta se modeló partiendo de la base para que fuera coincidente con los orificios guía y los soportes laterales. De inicio se realizó un contorno cuadrado de 8 [mm] de espesor que se alineara con los soportes laterales, el cual contaba con una separación de 3.8 [mm] de estos para permitir el desplazamiento total del interruptor, y 2 [mm] de separación con respecto a las paredes laterales para evitar que colisionaran durante la pulsación de la tecla. Cada lateral del contorno cuenta con 126 [mm] de longitud.

Sobre este contorno se colocó en la parte superior un saliente con forma cuadrada de 118 [mm] x 118 [mm], con una altura de 5 [mm], y sobre este se colocó otro saliente guiado por 2 perfiles cuadrados, el perfil del primer saliente y el correspondiente al área de contacto de la tecla, cuyas dimensiones finales fueron de 113.83 [mm], esto último para que los laterales de la tecla contaran con el mismo ángulo de inclinación de 80° que tienen las teclas de los teclados comerciales y que a su vez la altura total del teclado, desde la base hasta el área de contacto de la tecla, fuera de aproximadamente 50 [mm], resultando finalmente de 48.8 [mm].

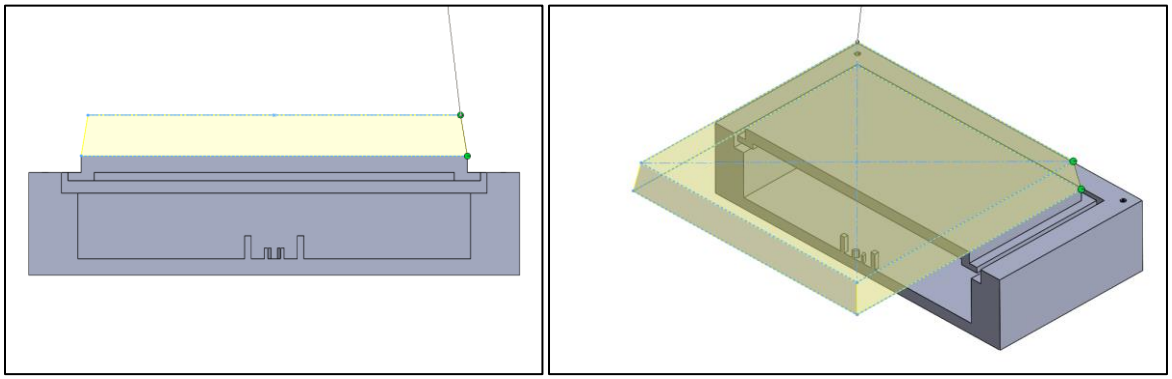


Figura 39. Vista de sección de los salientes de la tecla.

Posteriormente, dado que una de las características deseadas en el teclado es que las teclas puedan ser reprogramadas para que cada usuario pueda tener una configuración personalizada, esta característica implica que no solo deba ser configurada desde el apartado digital, sino que también de manera física y dar la posibilidad de intercambiar el símbolo con el que cuente la tecla. Por ejemplo, si una tecla de manera inicial está programada con un movimiento hacia la derecha representado de manera física con un símbolo de una flecha que apunte hacia la derecha y esta es reprogramada con un movimiento hacia la izquierda, también debe ser posible intercambiar el símbolo por el de una flecha que señale hacia la izquierda.

Para ello se realizó una cavidad cuadrada de 100 [mm] de lado y 4 [mm] de profundidad en la parte superior de la tecla con el objetivo de que en esta se pueda colocar una pieza adicional que cuente con el símbolo y que pueda ser removida en caso de ser necesario. A esta se le dio el nombre de placa con logotipo. Además, a esta cavidad se le agregaron otros 5 orificios con 4 [mm] de profundidad, uno en la parte central con forma de círculo para que en ella se introdujera la placa y otros 4 situados en los laterales en la parte central de cada lado, cuyo propósito es facilitar que la placa pueda ser retirada y a su vez permiten la fijación de una pieza adicional que funge como recubrimiento de la placa con el logotipo.

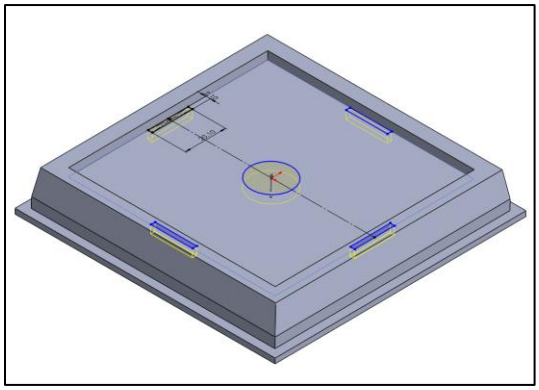


Figura 40. Tecla con cavidad.

Para la placa se replicaron los mismos perfiles de los 5 orificios con una reducción de 0.5 [mm] en todos los lados. Esta reducción es considerando que, en manufactura aditiva para piezas amplias, al depositarse la primera capa del material sobre la superficie de impresión esta tiende a expandirse aproximadamente 1 [mm] sobre las dimensiones originales.

- Dicha reducción de 0.5 [mm] en los lados fue considerada para todas las piezas que requerían ser introducidas sobre una cavidad.

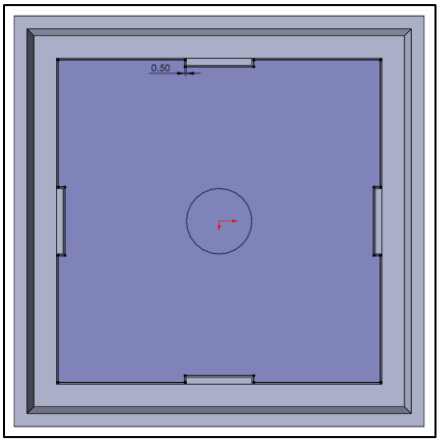


Figura 41. Reducción de 0.5 [mm].

A la placa se le dio un espesor de 3 [mm] y se le añadió la sección circular en la parte central con un espesor de 4 [mm].

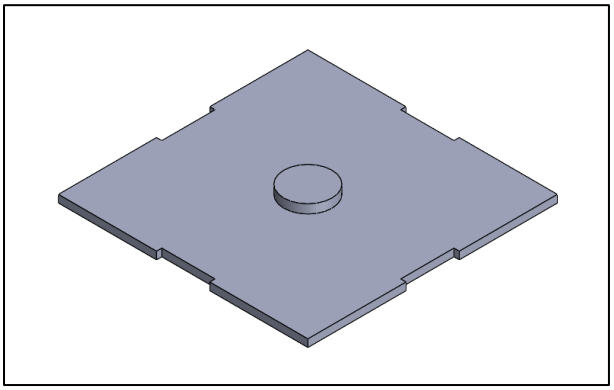


Figura 42. Vista isométrica inferior de la placa.

Para la parte superior de la placa, únicamente se trazó una flecha de manera demostrativa; sin embargo, para el teclado, cada una de las teclas contaría con una placa distinta de acuerdo con el logotipo que le corresponda. La profundidad del bajo relieve del logotipo es de 1.5 [mm], correspondiente a la mitad del espesor de la placa. Mientras que la pieza del logotipo cuenta con la misma geometría, pero una reducción de 0.5 [mm] en cada lado.

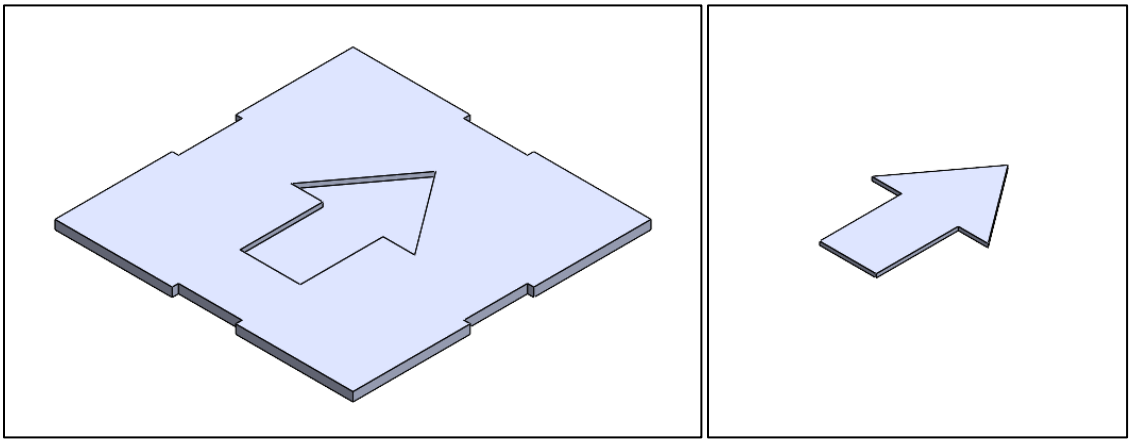


Figura 43. Placa con logotipo y logotipo de flecha del prototipo A.

Por otro lado, se incorporó una pieza de recubrimiento para la sujeción de las placas, esta tenía que cumplir con 2 características principales, que fuera transparente para poder ver a través de ella a la placa con el logotipo, y que fuera fácil de retirar al momento de intercambiar la placa. De igual forma, esta es la pieza de las teclas que se encuentra en contacto con el usuario.

Es por esto por lo que se consideraron materiales que pudieran ser empleados en manufactura aditiva y que permitieran cumplir con estas características, teniendo como opciones principales por su amplia disponibilidad al PLA (Ácido Poliláctico), PETG (Glicol de Tereftalato de Polietileno), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y TPU (Poliuretano Termoplástico), los 4 en color transparente.

Sin embargo, el PLA, PETG y ABS contaban con una gran desventaja en comparación con el TPU, y es que estos 3 se tratan de materiales rígidos, mientras que para la característica “fácil de retirar” deseada para el recubrimiento, es más conveniente utilizar TPU debido a que es un material altamente flexible y elástico, por lo cual es mucho más fácil de manipular y, a su vez, el hecho de que sea flexible permite que el recubrimiento pueda ser retirado en múltiples ocasiones sin riesgo de que la pieza se fracture.

Por lo tanto, el material seleccionado para la cubierta fue TPU. Para la pieza se utilizó la misma geometría cuadrada de 100 [mm] de lado con la que cuenta la cavidad y se le proporcionó un espesor de 1 [mm], el cual correspondía al espacio sobrante de la profundidad de 4 [mm] de la cavidad, ya que la placa posee 3 [mm] de espesor.

En la parte central de cada lateral se colocó una pestaña de 7 [mm] de altura con la misma geometría rectangular correspondiente a los orificios laterales de la cavidad. Estas pestañas permiten que el recubrimiento sea fijado en estos mismos orificios y así permitir que la placa con el logotipo se encuentre fija.

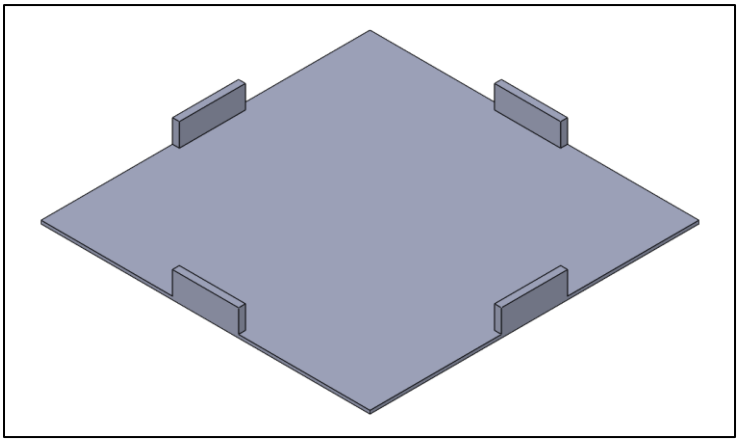


Figura 44. Recubrimiento de tecla del prototipo A.

Es así como del modelado de la tecla se originaron otras 3 piezas, la placa con logotipo, el logotipo y el recubrimiento.

Retomando el diseño principal de la tecla, una vez realizadas todas las cavidades necesarias en ella, se procedió a reducir el material sobrante de la tecla, buscando que las paredes de la tecla contaran con al menos 3 [mm] de espesor, ya que, en caso de contar con un menor espesor, podría ocurrir una fractura en la pieza, mientras que uno mayor aportaría mayor material a la pieza y por ende un mayor peso.

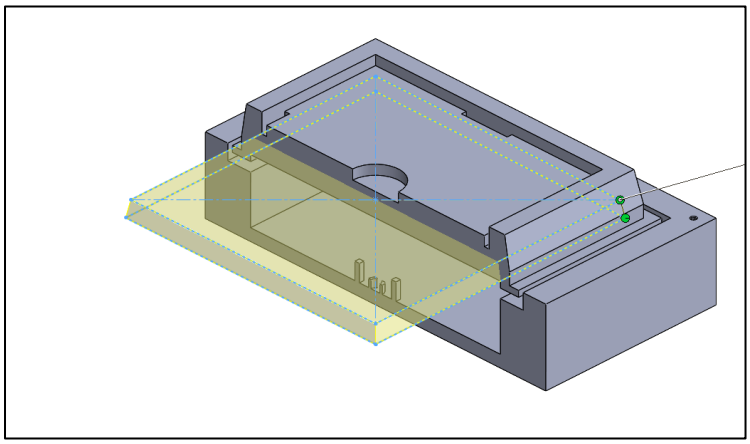


Figura 45. Vista de sección de la remoción de material.

Posteriormente, se añadió el acople del interruptor en la parte central de la tecla y para determinar la longitud que este debía tener desde la tecla hacia el interruptor para lograr el desplazamiento de 3.8 [mm] que requiere este último, se tomó la medición de la altura del interruptor una vez que está completamente pulsado, dando como resultado 13.8 [mm].

Figura 46. Medición de la altura del interruptor.

Dado que se trataba del primer acercamiento del acople de la tecla y era posible tener que realizar un ajuste en su longitud total, para este primer prototipo se decidió realizar el acople en una pieza por separado a la de la tecla, en caso de que fuera necesario modificar dicha longitud. Por lo tanto, se realizó un corte por extrusión en la parte inferior y central de la tecla con un diámetro de 8.2 [mm] y una profundidad de 1.5 [mm], con el propósito de que en esta sección se colocara la pieza del acople.

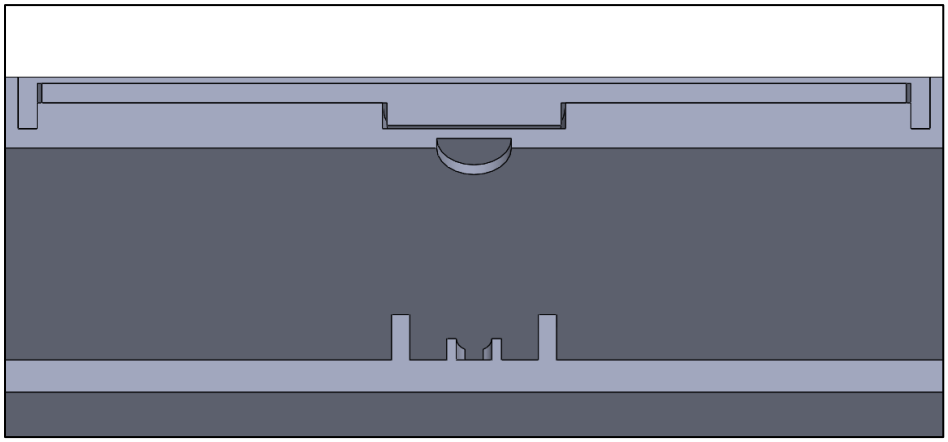


Figura 47. Vista de sección del corte por extrusión para el acople.

Tomando como referencia los 13.8 [mm] de altura que posee el interruptor, para el acople se realizó una extrusión circular con 8 [mm] de diámetro que iba desde la tecla hasta 13.8 [mm] de separación de la base de la tecla, dando como resultado que midiera una longitud de 20.5 [mm], y en la cara inferior se realizó el perfil correspondiente al acople realizado anteriormente.

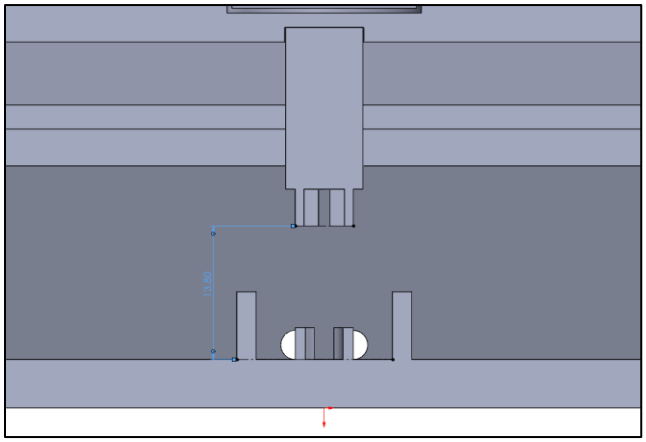


Figura 48. Vista de sección del acople del interruptor.

Por último, en cuanto a la pieza de la tecla, en cada una de las esquinas de las teclas se colocó una extrusión con el mismo perfil circular que se encuentra en los soportes de las bases y se agregaron los 4 postes guía, de 5 [mm] de diámetro, de tal modo que estos tuvieran una longitud que permitiera que de manera inicial tuvieran una separación de 3.8 [mm] con la base de la tecla, y así cuando esta fuera oprimida en su totalidad, los 4 postes se encuentren en contacto con la base.

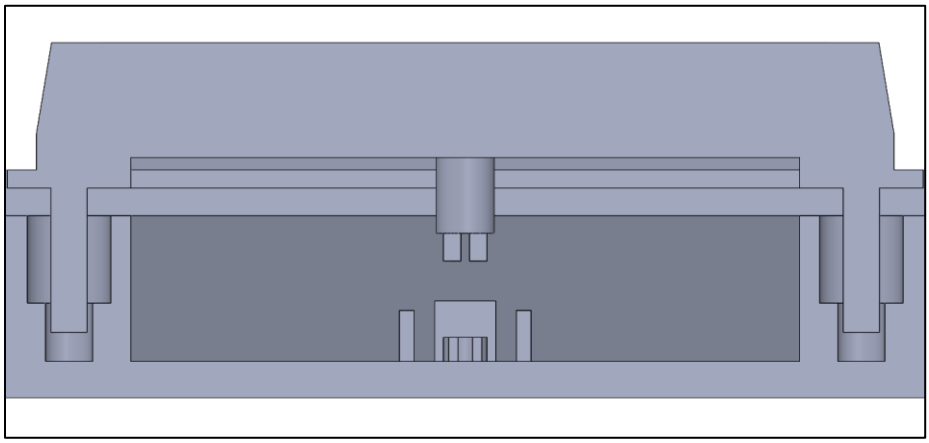


Figura 49. Vista de sección de los postes guía de la tecla.

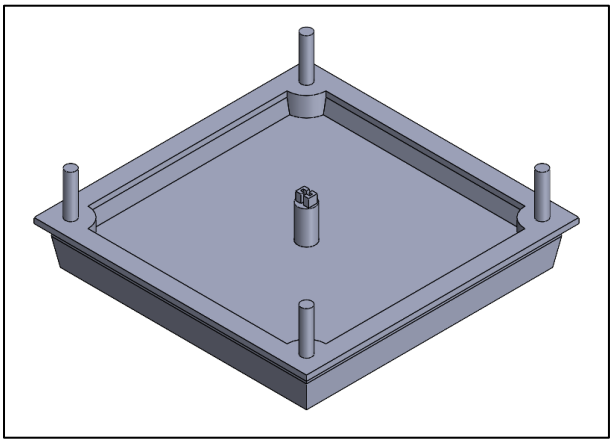


Figura 50. Vista isométrica inferior de la tecla del prototipo A.

Por otro lado, para la última pieza, el retenedor de tecla, se realizó un marco con una geometría cuadrada exterior de 150 [mm] de lado y un cuadrado interno de 122 [mm] con un espesor de 5 [mm], por lo que entre la tecla y las paredes internas del retenedor hay una distancia de 2 [mm]. De igual forma, el espesor del área de contacto entre el retenedor y la tecla es de 2 [mm].

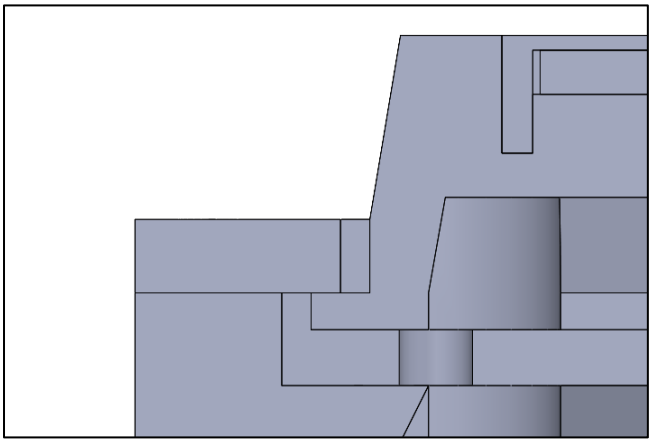


Figura 51. Vista de sección del contacto entre el retenedor y la tecla.

A su vez, para el paso de los tornillos que fijan el retenedor hacia la base, se colocaron 4 orificios de 2.45 [mm] de diámetro con 5 [mm] de profundidad, uno en cada esquina, y otros 4 orificios de 4 [mm] de diámetro que son coincidentes con los de 2.45 [mm] pero que solo tienen 3 [mm] de profundidad, esto último con la finalidad de que la cabeza del tornillo pueda ser introducida a lo largo de la sección resultante entre ambos orificios.

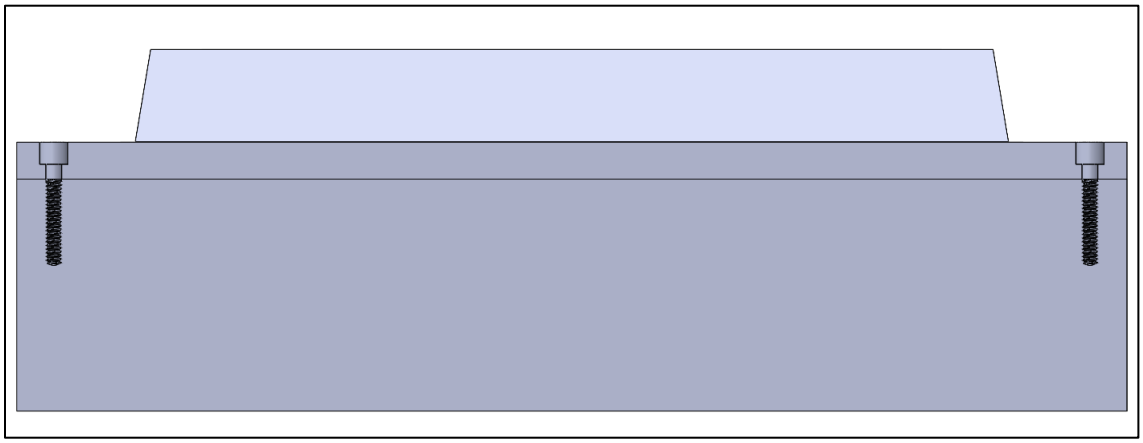


Figura 52. Vista de sección de los orificios de los tornillos M2.

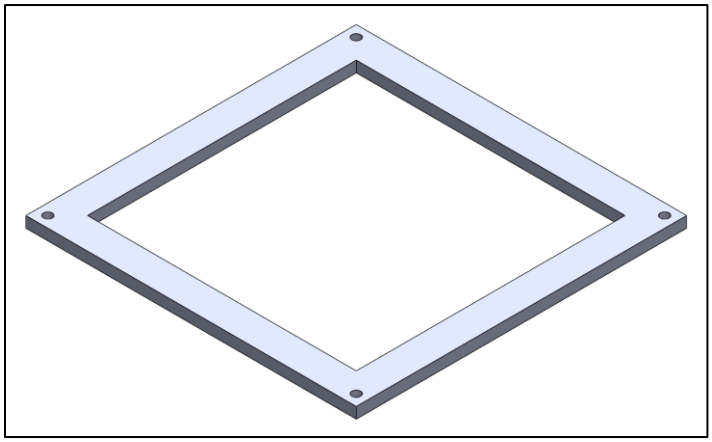


Figura 53. Retenedor de tecla del prototipo A.

Por último, con la finalidad de poder probar la tecla una vez que esta fuera manufacturada y ensamblada, se colocaron 2 canales de 3 [mm] de diámetros en la parte anterior de la base para dar la posibilidad de soldar 2 cables al interruptor y llevarlos del interior de la base hacia el exterior a través de dichos canales.

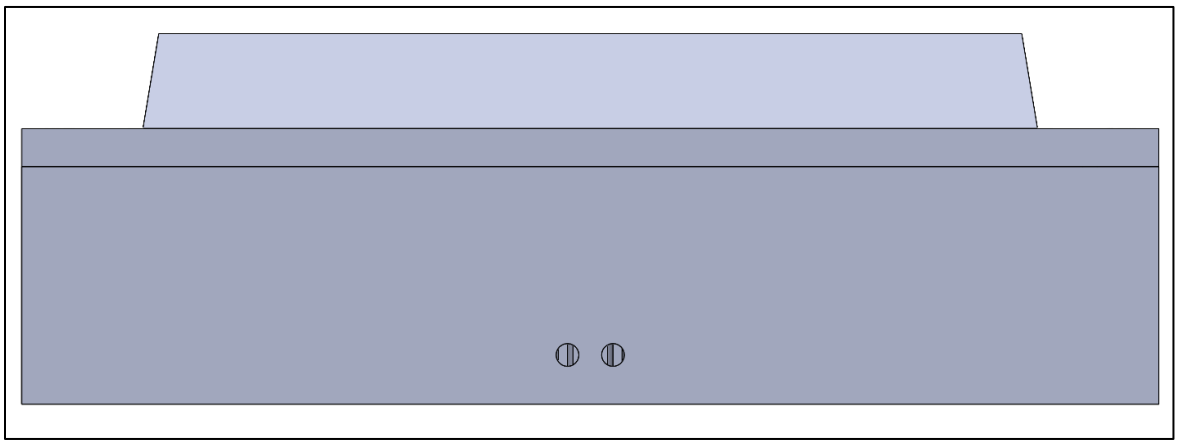


Figura 54. Canales situados en la base de la tecla.

Por lo tanto, el prototipo A quedó compuesto por 6 piezas: base, tecla, placa con logotipo, logotipo, recubrimiento y retenedor; sin embargo, la pieza de la tecla se encuentra seccionada en 2 partes, el acople y la tecla, ya que como se mencionó anteriormente, la longitud del acople podía recibir modificaciones.

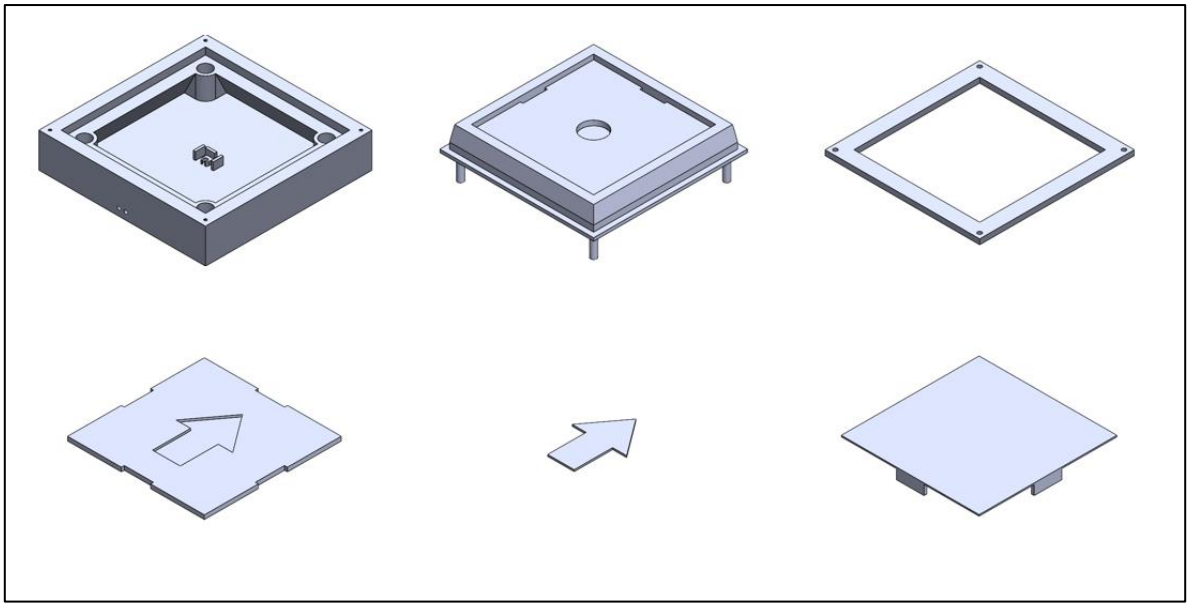


Figura 55. Piezas del prototipo A de una tecla.

3.3.1 Evaluación del prototipo A de una tecla

Fue así como se procedió a manufacturar las piezas de la base, tecla, retenedor y placa con PLA de color negro, el logotipo con PLA de color blanco y el recubrimiento con TPU. El PLA fue el material seleccionado para todas las piezas, a excepción del recubrimiento, debido a que al tratarse de un prototipo rápido se buscó el material que fuera más sencillo y con menor tiempo de manufactura, ya que el PETG y el ABS implican más factores a considerar y mayor tiempo de manufactura.

- Los factores considerados para la selección de los materiales se abordan más adelante en la sección de **selección de materiales**.

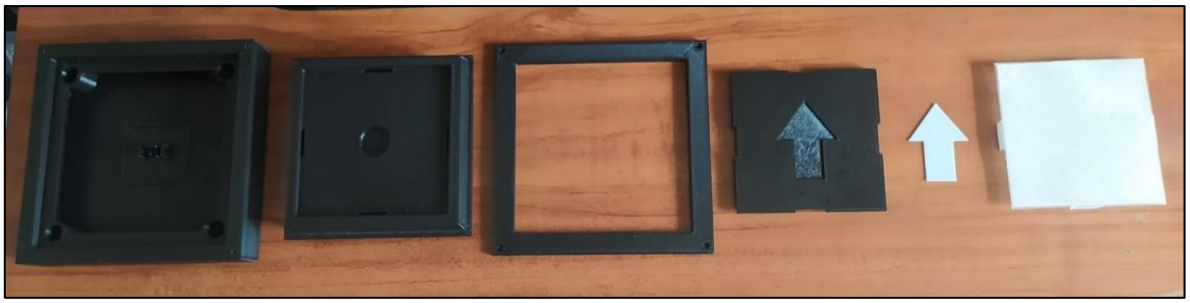


Figura 56. Piezas manufacturadas del prototipo A.

Una vez obtenidas las piezas del primer prototipo, fueron ensambladas del siguiente modo:

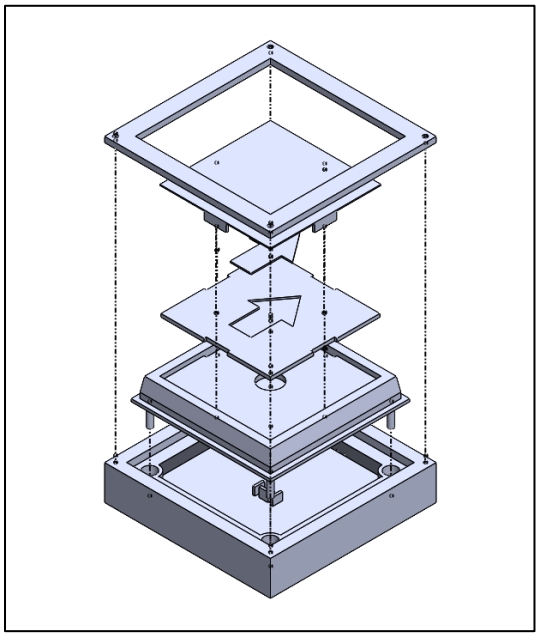


Figura 57. Ensamble de las piezas del prototipo A de una tecla.

A su vez se soldaron los 2 cables al interruptor y se probaron 2 distribuciones distintas para los resortes de retorno de la tecla, la primera con 1 resorte en cada esquina de la tecla y la segunda únicamente con 1 resorte en la parte central.

De manera preliminar, para la función de “retornar” se utilizaron resortes de compresión de acero inoxidable con un diámetro de alambre de 0.8 [mm], 10 [mm] de diámetro exterior y de longitudes variables para comprobar cual presentaba un mejor comportamiento, con valores de 15 [mm], 20 [mm], 25 [mm] y 30 [mm].

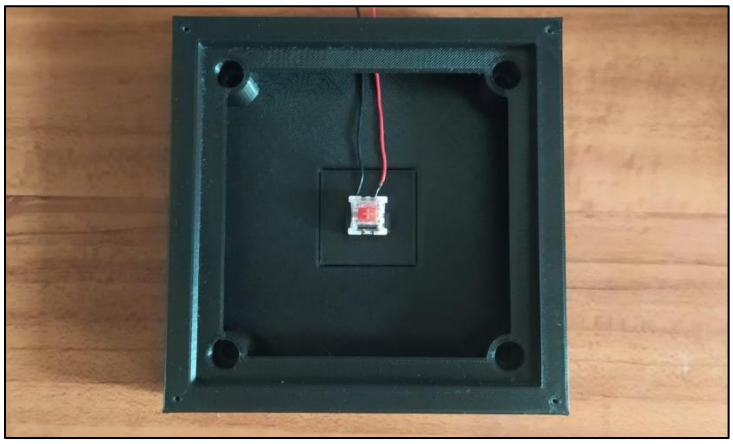


Figura 58. Base del prototipo A con interruptor.

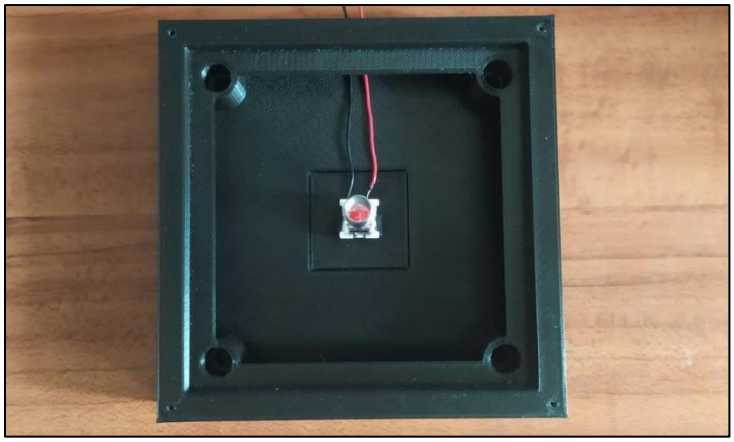


Figura 59. Base del prototipo A con 1 resorte.

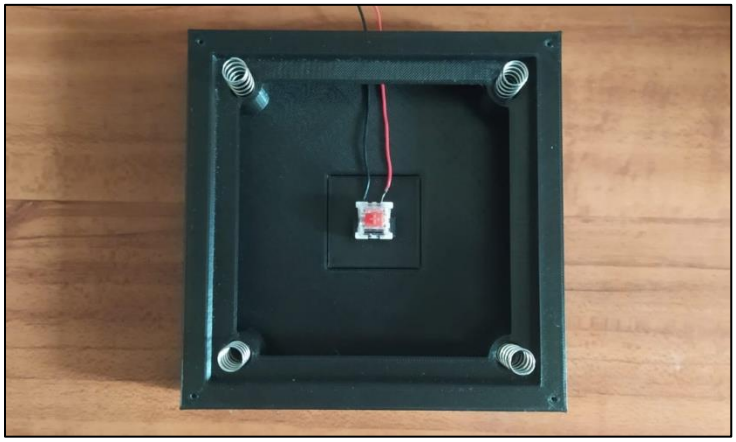


Figura 60. Base del prototipo A con 4 resortes.

Para la fijación del retenedor, se probaron 2 tipos distintos de tornillos M2 para verificar su comportamiento: tornillos autorroscantes de acero al carbono niquelado y tornillos de máquina de acero inoxidable 316, ambos con una longitud de 16 [mm].

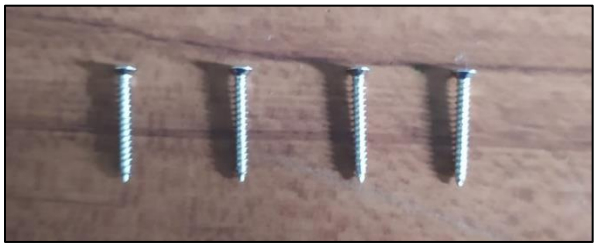


Figura 61. Tornillos autorroscantes M2x16.

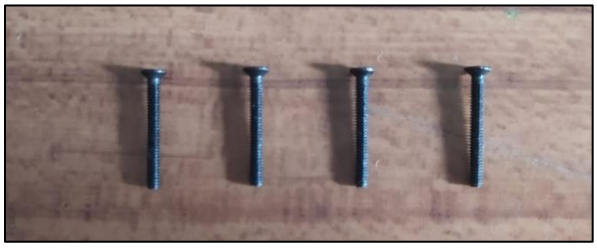


Figura 62. Tornillos de máquina M2x16.

Por lo tanto, la tecla fue ensamblada y desensamblada en múltiples ocasiones para probar su funcionamiento.

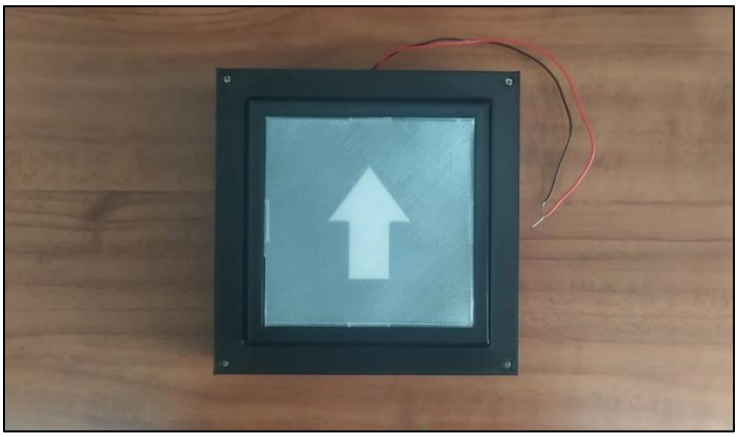


Figura 63. Prototipo A de una tecla.

Para verificar que el interruptor estuviera siendo accionado de manera correcta, se utilizó un circuito compuesto por 2 baterías en serie de 3.7 [V] cada una, una resistencia de 3.3 [kΩ] y un LED de color verde, esto para observar si el LED se iluminaba cada que la tecla era pulsada.

- Cabe destacar que el teclado está diseñado para que sea accionado mediante los pies mientras se utiliza una prenda de vestir en ellos; sin embargo, también podría ser accionado mientras se utiliza algún tipo de calzado o ningún tipo de prenda o calzado. Con fines ilustrativos, las imágenes de las pruebas serán mostradas con el usuario portando calzado.

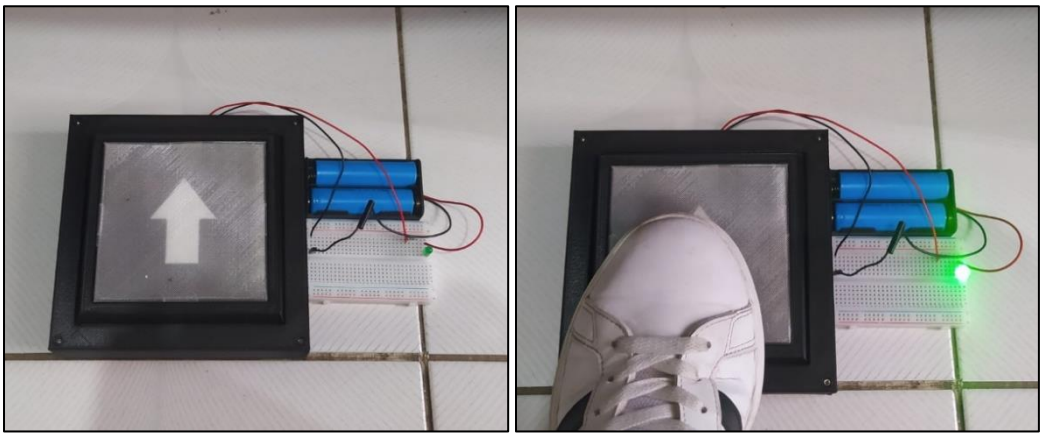


Figura 64. Prueba de pulsación del prototipo A.

Con base en las pruebas realizadas, se pudo concluir lo siguiente:

1. Entre los tornillos M2 autorroscantes y los de máquina es preferible utilizar los autorroscantes, debido a que se acoplan de mejor manera a la cuerda resultante de la manufactura aditiva, ya que con los tornillos de máquina llega un punto en el que se presenta una oposición provocada por el material que impide que el tornillo sea ajustado de manera correcta.

2. Para fijar los logotipos de la tecla sobre la placa, aparte de utilizar un ajuste geométrico, es preferible también emplear un elemento adicional de fijación. En este caso se optó por un pegamento a base de cianocrilato (Kola Loka) debido a su facilidad de uso, disponibilidad y capacidad para adherir plásticos.

3. En las piezas de la tecla y el acople del interruptor, se observó que no era posible fijar el acople en la cavidad realizada en la parte inferior central de la tecla debido a la poca profundidad de 1.5 [mm]. Por lo que se realizó una pieza adicional en forma de disco que permitiera una mejor sujeción del acople, está pieza tiene un diámetro exterior de 25 [mm], un diámetro interior de 8.2 [mm] y un espesor de 5 [mm]. Este fue adherido a la pieza de la tecla mediante el pegamento de cianocrilato.

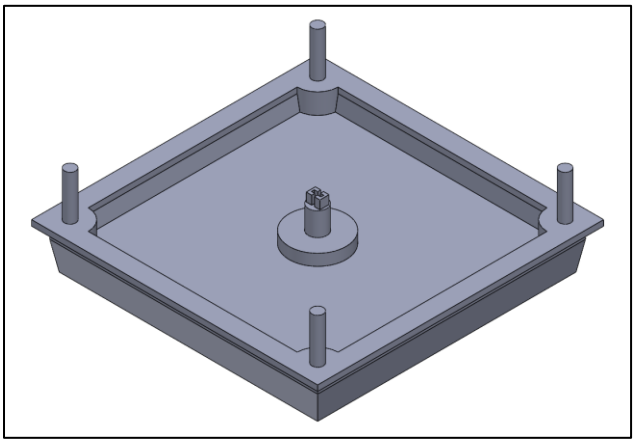


Figura 65. Pieza de sujeción entre la tecla y el acople.

4. La pieza del acople tenía una longitud más larga de lo necesario que provocaba que el interruptor se accionara antes del recorrido de 2 [mm], por lo que se redujo su longitud 1 [mm], pasando de 20.5 [mm] a 19.5 [mm], es decir, de 13.5 [mm] de separación con respecto a la pieza de la base a 14.5 [mm].

5. La cantidad más idónea de resortes para la función de “retornar” resultó ser 1 colocado en la parte central de la tecla, ya que de acuerdo con las pruebas de pulsación realizadas se observó que con un solo resorte era suficiente para obtener el efecto deseado de la tecla sin importar el área de contacto del recubrimiento en el que se realizara la pulsación de la tecla, ya fuera en el centro, los bordes o las esquinas del recubrimiento, el LED siempre se iluminaba. Además de que el hecho de utilizar una mayor cantidad de resortes supondría un aumento de componentes y requeriría un aumento de fuerza de pulsación para activar la tecla, mismo efecto que se podría obtener al utilizar 1 resorte central más rígido.

6. El resorte que presentó mejores resultados de acuerdo con las pruebas de pulsación fue el de 30 [mm] de longitud, ya que este permitía una buena sensación de pulsación, a diferencia del resto de longitudes que proporcionaban una menor resistencia para que la tecla fuera pulsada.

7. Las dimensiones arbitrarias seleccionadas resultaron ser apropiadas, ya que una tecla cubría aproximadamente la zona del antepié deseada; sin embargo, también se determinó que una reducción en los espesores de pared y retenedor sería conveniente, debido a que al momento de contar con teclas continuas a lo largo del teclado se podría tener una distancia de separación considerable entre las teclas tal que provocara complicaciones al momento de desear accionar varias teclas de manera simultánea.

Con base en lo anterior y las consideraciones propuestas de manera arbitraria para observar el comportamiento de la tecla, de manera general, el funcionamiento del prototipo resultó ser satisfactorio; por lo tanto, se comenzó con el desarrollo de un segundo prototipo B de una tecla que permitiera realizar modificaciones con base en las observaciones del primer prototipo y que fuera un primer acercamiento a las teclas del teclado.

3.4 Prototipo B de una tecla

Para el segundo prototipo, se buscó inicialmente justificar cuál sería la geometría final del teclado y de esta manera distribuir las teclas a lo largo de la misma. Es por ello por lo que lo primero que se procedió a realizar fue un análisis del espacio de trabajo de ambos pies de una persona; para esto se consideró la postura de una persona al momento de sentarse y nuevamente las dimensiones antropométricas de la tabla 48.

La postura ideal que debe adoptar una persona al momento de sentarse está dada principalmente por las siguientes características (Grupo Fisioderm):

1. Las plantas de los pies deben estar completamente apoyadas en el suelo, con los pies paralelos y al mismo nivel.

2. Las rodillas deben estar flexionadas a 90°, es decir, formando un ángulo recto con los fémures.

3. La espalda debe estar apoyada en el respaldo, completamente erguida.

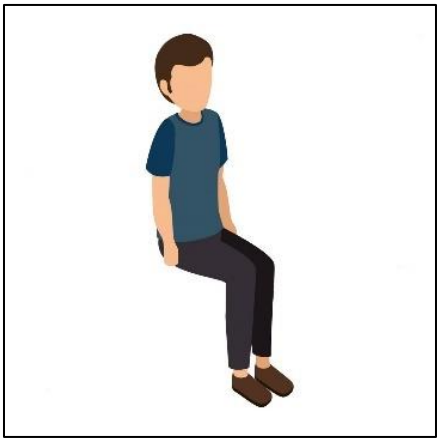


Figura 66. Postura de una persona sentada.

Tomando como referencia dicha postura, para el trazo del espacio de trabajo de los pies se tomó en cuenta el rango de apertura que permite la articulación coxofemoral ubicada en la cadera, la cual permite los movimientos de abducción y aducción de la pierna; este rango va de los 0° a 45°. Y a su vez se consideró que la articulación del tobillo se mantuviera completamente estática.

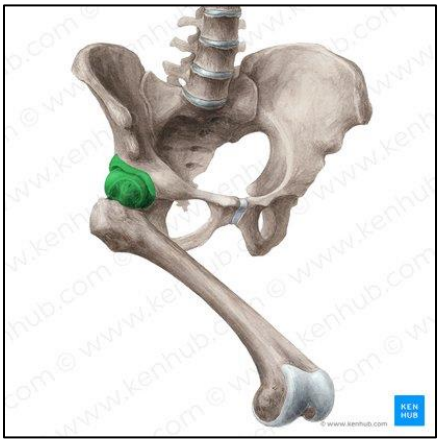


Figura 67. Articulación coxofemoral.

De tal forma que se trazaron 2 circunferencias distintas utilizando la longitud promedio nalga – poplíteo de 462 [mm] y longitud redondeada del pie de 250 [mm], por lo que el primer segmento de circunferencia fue trazado con un radio de 462 [mm] que iba desde los 0° a 45° para cada uno de los pies, y de este modo obtener la trayectoria que siguen los tobillos una vez que se producen los movimientos de abducción. Para el siguiente segmento de circunferencia se realizó el mismo procedimiento; sin embargo, con una radio de 712 [mm], resultante de la suma de la longitud nalga – poplíteo y la longitud del pie, para de este modo proyectar la trayectoria de la punta del pie.

A su vez, se requería considerar la distancia que existe entre cada una de las articulaciones coxofemorales para poder obtener los centros de cada una de las circunferencias. Tomando la dimensión promedio de la anchura de cadera sentado de 368 [mm], se optó por redondearla a 400 [mm]; suponiendo que ambas piernas tendrían la misma anchura, es decir, cada una tendría un espesor 200 [mm], juntas darían como resultado los 400 [mm]; de igual manera, considerando que el fémur se encontraría aproximadamente en la parte central de la pierna, por lo tanto, estaría situado a 100 [mm] de distancia de cada extremo de la pierna, se sumó ambas distancias de 100 [mm] que tendría cada fémur con respecto al extremo interno de cada pierna, dando como resultado 200 [mm] de distancia de separación entre las articulaciones coxofemorales.

Por último, también se consideró que, al presentarse los movimientos de aducción de la pierna, los movimientos de los pies siguieran una trayectoria lineal, es decir, a lo largo de los 200 [mm] que existe de separación entre ambos segmentos de circunferencia, únicamente se encontraran líneas rectas que los unieran.

Por lo tanto, se obtuvo el siguiente espacio de trabajo:

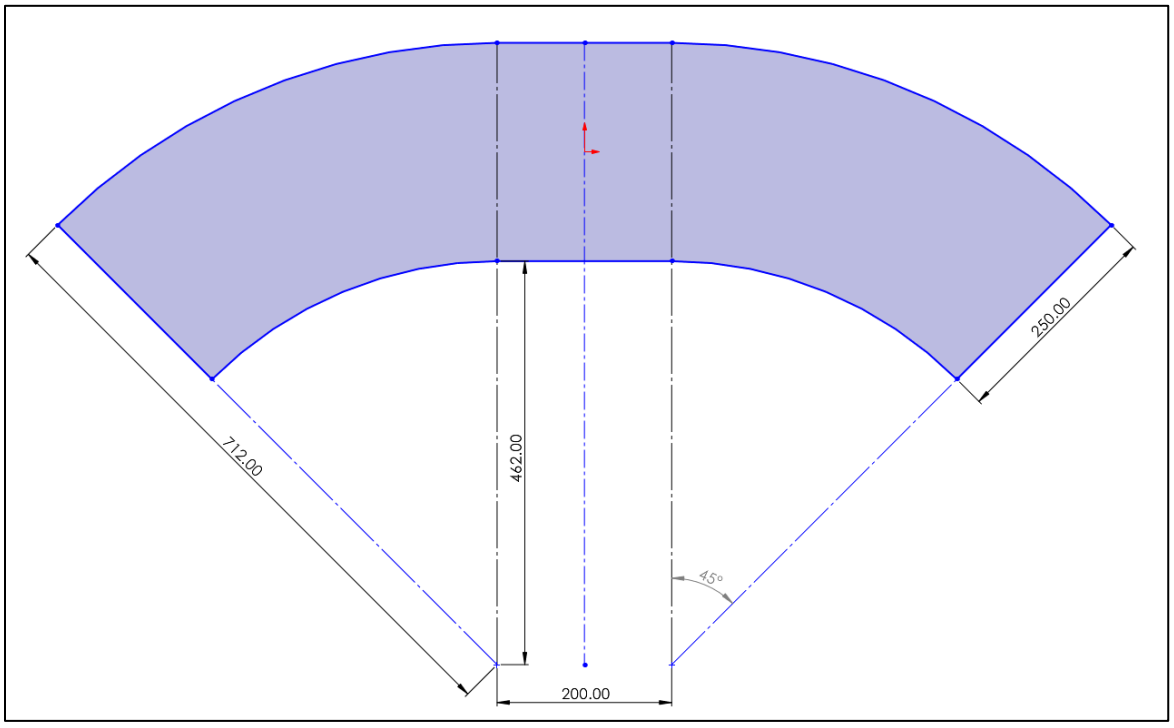


Figura 68. Espacio de trabajo de ambos pies.

Con base en este espacio de trabajo, se buscó proponer una geometría para el teclado que se encontrara inscrita en su totalidad, o al menos en su mayoría dentro del área conformada por el segmento rectangular y ambas circunferencias.

Una primera propuesta fue utilizar tal cual el espacio de trabajo de ambos pies como geometría para el teclado; sin embargo, se observaron 2 detalles principales. El primero de ellos es que el hecho de intentar implementar un número impar de teclas como lo son las 9 que se deseaba que tuviera el teclado, iba a suponer que el teclado difícilmente pudiera ser simétrico, por lo cual se optó por reducir el número de teclas a un número par, en este caso, a solo 8 teclas; por lo tanto, la acción de “interactuar con objeto” quedaría descartada al ser de las 9 la que menos recurrencia presenta en los videojuegos.

El segundo aspecto fue que el hecho de tratarse de una geometría irregular complicaría el modelado de las piezas del teclado, ya que de una tecla a otra se tendrían dimensiones y geometrías diferentes, y como resultado también presentarían un funcionamiento diferente entre ellas.

La segunda propuesta consistió en un teclado rectangular cuya área de las 8 teclas se encontrara inscrita en el espacio de trabajo de ambos pies. Las ventajas de esta geometría serían que las teclas se encontrarían distribuidas de manera simétrica, las teclas podrían tener las mismas dimensiones y así funcionar de manera idéntica y, además, con un tamaño adecuado de tecla y distancia de separación entre ellas, incluso sería posible accionar 4 teclas con un solo pie, dando la posibilidad de poder pulsar hasta las 8 teclas en un mismo instante con ambos pies. Por lo anterior, se realizó un bosquejo preliminar de las dimensiones del área rectangular que ocuparía el teclado, así como la ubicación que correspondería a cada una de las 8 teclas.

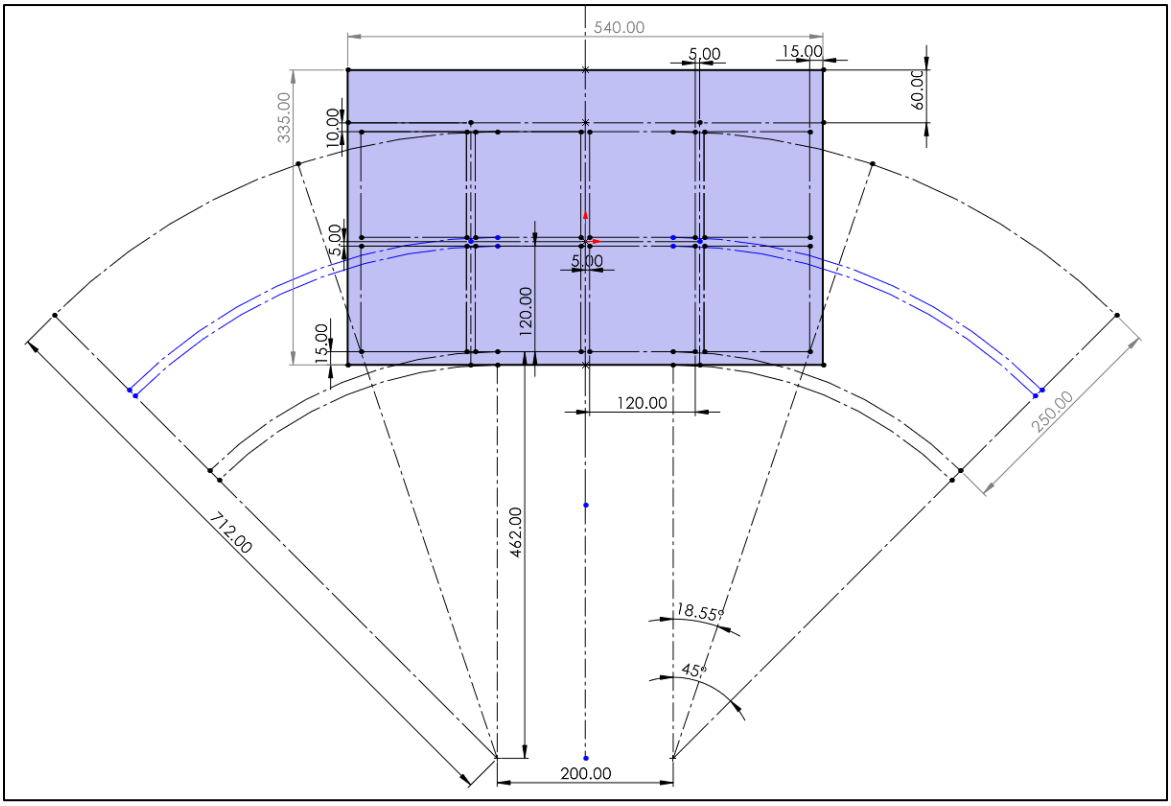


Figura 69. Área del teclado y espacio de trabajo de ambos pies.

Como se puede apreciar en la figura anterior, se propuso un rectángulo de 540 [mm] de largo y de 335 [mm] de ancho sobre el cual se distribuyen las 8 teclas totales. Como se puede apreciar, 6 de las 8 teclas se encuentran totalmente inscritas en el espacio de trabajo de ambos pies, a excepción de las 2 teclas situadas en las equinas superiores de la figura; en estas una pequeña porción de una esquina superior de cada tecla se encuentra fuera de dicho espacio; sin embargo, al tratarse de un porcentaje muy pequeño del área total, no se consideró significativo; por lo tanto, se decidió utilizar estas dimensiones y distribución de teclas para el modelado del teclado.

Lo primero que se realizó para llegar a esta geometría fue tomar en cuenta los 250 [mm] de longitud que tiene un pie, ya que, como se ha mencionado anteriormente, se deseaba que una tecla tuviera dimensiones aproximadas a las de un antepié; por ende, se distribuyeron estos 250 [mm] a lo largo de 2 teclas continúas considerando a la vez la distancia entre ellas.

Un factor demasiado importante a considerar durante la distribución de las teclas fue las limitaciones con las que cuenta la manufactura aditiva, ya que de manera ideal la pieza de la base del teclado debería estar manufacturada únicamente en una pieza; sin embargo, por las dimensiones con las que cuenta el área del teclado, esto no sería posible, ya que la impresora 3D con la que se contaba poseía un área de manufactura de 220 [mm] x 220 [mm] con 250 [mm] de altura. Por tal razón, fue necesario seccionar el teclado de modo que mediante ensambles se pudiera tener la base de 540 [mm] x 335 [mm] completa.

La manera en la que se decidió segmentar el teclado fue mediante “módulos”, donde cada módulo estuviera conformado por todas las piezas que conforman a una sola tecla, es decir, el teclado tendría un total de 8 módulos, cada uno correspondiente a una tecla.

Debido a esto, se tuvo que considerar esta segmentación para determinar la distancia que habría entre una tecla a otra, ya que se buscaba que fuera la más reducida posible, pero que a su vez tuviera un espesor de pared lo suficientemente grande para permitir los orificios roscados de los tornillos M2 de los retenedores.

La dimensión propuesta del espesor de las paredes que se encuentran entre las teclas fue de 10 [mm], que al ser seccionada en los módulos resulta en un espesor de pared de 5 [mm]. Este espesor fue seleccionado ya que permite realizar las rocas de 2 [mm] de diámetro sobre cada una de las 4 esquinas de cada módulo, ya que, en caso de tener un espesor menor, las paredes adyacentes al orificio roscado serían muy delgadas, lo cual podría provocar que se fracturaran al momento de introducir el tornillo.

Fue así como los 250 [mm] de longitud para 2 teclas fueron distribuidos de la siguiente manera: 120 [mm] para cada lado de una tecla y 10 [mm] de espesor de pared, es decir, cada tecla tiene un área cuadrada de 120 [mm] de lado con una separación entre ellas de 10 [mm] de pared. A su vez, para las paredes externas que representan el perímetro del teclado se decidió agregar 5 [mm] adicionales de espesor solo de manera estética.

Por otro lado, en la parte superior del teclado era necesario designar un área destinada al alojamiento de los componentes electrónicos. Dado que se deseaba que el cable de la función de “energizar” y “comunicar periférico – computadora”, el cable USB Tipo A – micro USB, se encontrara en la parte superior central del teclado, la tarjeta Pro Micro de la función de “procesar información” debía estar alineada y colocada de forma vertical, por lo que se tomó la medida del largo de la tarjeta.

Figura 70. Medida del largo de la tarjeta Pro Micro.

Con el objetivo de tener de igual manera un espesor de pared exterior de 15 [mm], la parte superior del teclado debía contar con al menos 49 [mm], resultado de la suma del espesor de pared y el largo de la tarjeta; debido a esto se decidió asignar 60 [mm] adicionales en la parte superior del teclado.

Una vez determinada la geometría del teclado, se procedió con el prototipado de una sola tecla de este para de igual forma asignar todas las dimensiones correspondientes a las piezas de la tecla y verificar su funcionamiento una vez ensambladas, y con base en lo que se observara poder realizar las correcciones pertinentes y así modelar el teclado completo.

La manera en la que se numeraron las teclas y los módulos fue la siguiente:

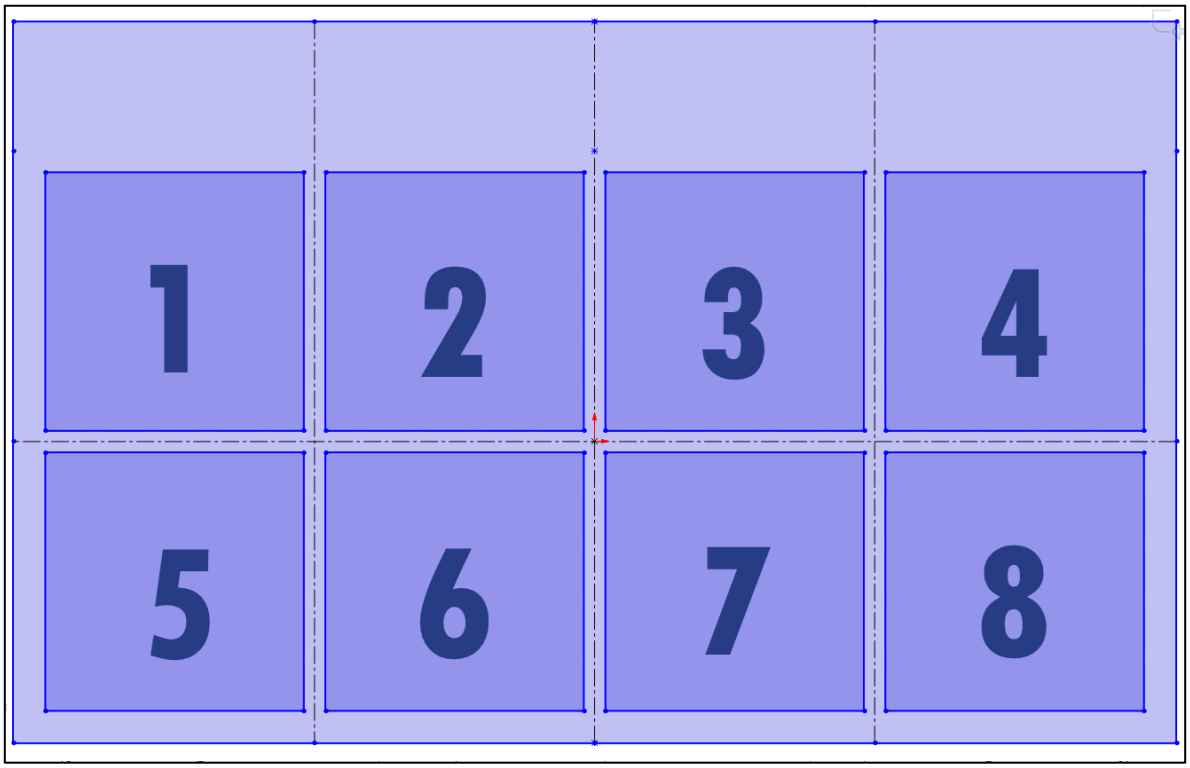


Figura 71. Módulos del teclado.

Como se puede apreciar, los módulos están delimitados por líneas punteadas, y los que van del 1 al 4 son más grandes con respecto a los del 5 al 8, ya que estos incluyen el compartimiento de electrónica. Para fines del prototipado, se deseaba modelar y manufacturar el módulo más pequeño de los 8 con el propósito de tener que esperar el menor tiempo de manufactura posible; por lo tanto, esto corresponde a los módulos 6 y 7, los cuales son idénticos. Fue así como a partir del módulo 6 que se comenzaron a modelar las piezas de la tecla.

Tomando como referencia lo realizado en el prototipo A, la primera pieza por la que se partió fue la base, utilizando las medidas propuestas con anterioridad; sin embargo, considerando los nuevos espesores de pared. De igual forma, se le dio a la pieza una altura de 31.3 [mm] y se colocó el soporte del interruptor en la parte central del cuadrado, mientras que en los soportes laterales internos se realizaron un par de modificaciones; con el propósito de ahorrar material en lugar de tener soportes continuos a lo largo del perímetro interior de la tecla, solo se colocó en las partes centrales de cada borde un soporte rectangular de 25 [mm] de longitud y 10 [mm] de espesor, mientras que en las esquinas se siguieron manteniendo los mismos soportes semicirculares que incluyen los orificios guía para las teclas, pero ahora sin incluir los orificios coincidentes que se habían añadido para la propuesta que implicaba utilizar 4 resortes.

Para las cuerdas de los tornillos M2, ya que se tenía un espesor de pared menor al del prototipo A, con el propósito de contar con un mayor espesor, en las 4 esquinas internas de la base se realizaron redondeos de 10 [mm] de radio, además de que proporcionaban una mejor estética a las zonas esquinadas.

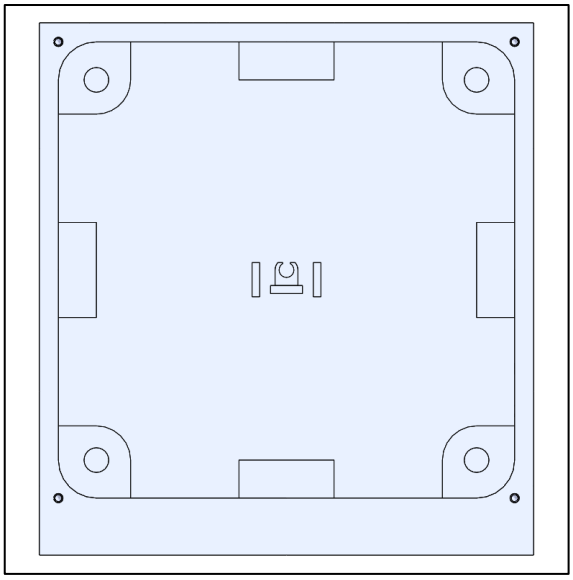


Figura 72. Vista superior de la base del prototipo B.

En cuanto a las paredes, a aquellas que se encuentran adyacentes a otras teclas se le añadió a cada una de ellas semicírculos de 8 [mm] con el propósito de que a través de ellos pudieran pasar los cables de los interruptores de un módulo a otro según fuera necesario.

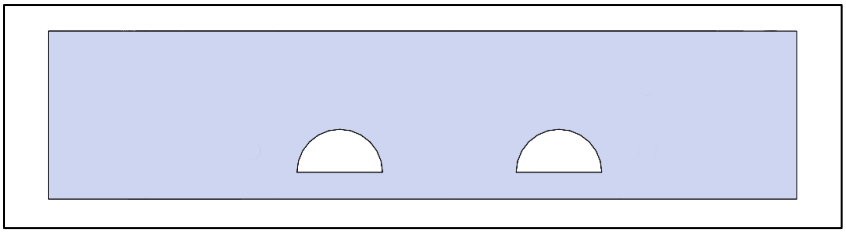


Figura 73. Vista lateral derecha de los semicírculos del prototipo B.

Debido a que los módulos deben estar ensamblados entre sí, se tuvo 2 propuestas de ensamble.

La primera de ellas, tomando como referencia 2 teclas continuas, consistía en colocar sobre la pared de una tecla un saliente adicional que pudiera ser introducido en una cavidad que se encontrara situada en la pared de la otra tecla; sin embargo, este método podría provocar que en algún momento se produjera una fractura en el saliente de la tecla y, por otro lado, al ser el espesor de pared tan reducido, de 5 [mm], la cavidad de la tecla adyacente también habría sido muy reducida, ya que solo podría haber sido colocada sobre este espesor.

La segunda propuesta fue mediante tornillos y tuercas que permitieran unir ambas piezas, primero introduciendo un tornillo por la pared interior de una base y que atravesara los 10 [mm] de espesor de ambas teclas y posteriormente colocando una tuerca por la pared interior de la otra base, tal y como se representa en la siguiente figura.

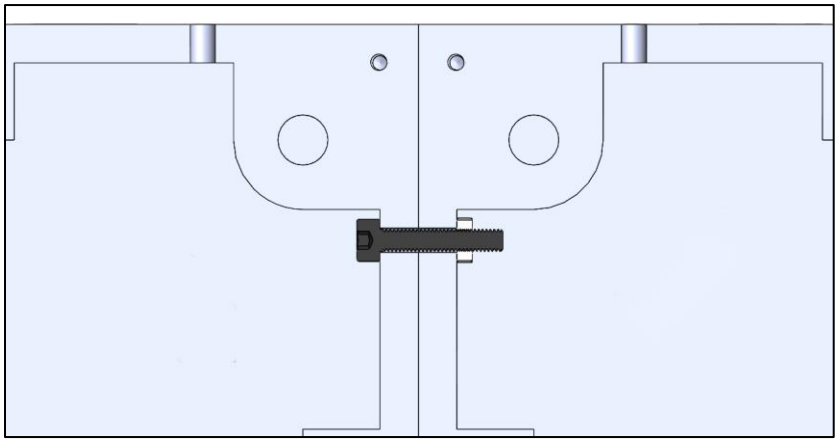


Figura 74. Vista de sección del método de ensamble de los módulos.

Los tornillos seleccionados fueron de máquina de acero inoxidable 316 con 3 [mm] de diámetro y una longitud de 16 [mm], ya que al igual que con los tornillos M2, se deseaba emplear los tornillos con el menor diámetro posible, pero mayor a los M2; fue por ello por lo que se utilizaron M3 con sus respectivas tuercas. Más adelante en la sección de **análisis de esfuerzos del prototipo B** se justifica el uso de estos tornillos.

Se decidió agregar 4 de estos orificios de 3.3 [mm] en cada pared con el objetivo de distribuir las cargas a lo largo de la misma y evitar que se produjeran separaciones entre los módulos.

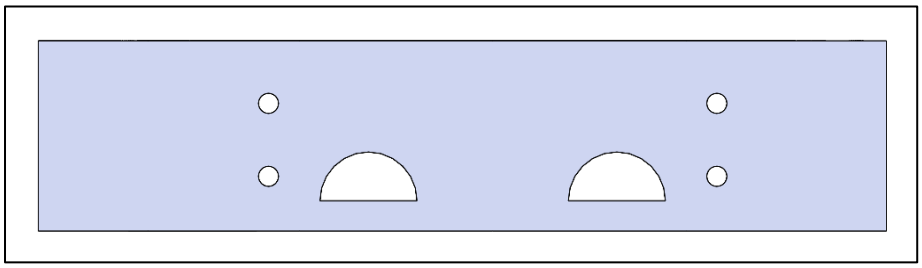


Figura 75. Vista lateral derecha de los orificios del prototipo B.

De tal modo que la base del prototipo B resultó de la siguiente manera:

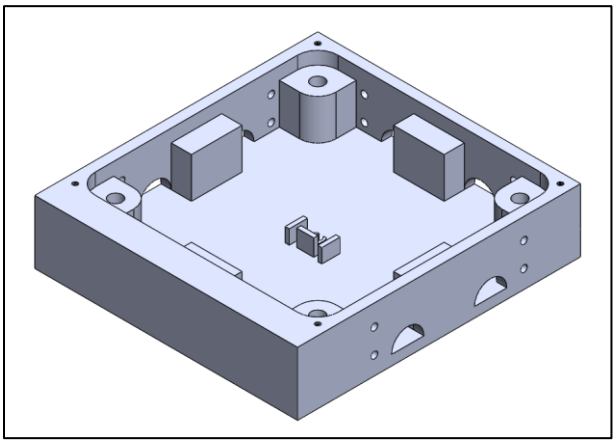


Figura 76. Base del prototipo B.

Para el modelado de la tecla se siguió el mismo procedimiento del prototipo A, solo ajustando las dimensiones a las requeridas por el prototipo B. La primera modificación que se presentó en la parte superior de la tecla es que se optó que el recubrimiento no contara con un contorno de material perteneciente a la pieza de la tecla al momento de ser colocado, sino que el recubrimiento cubriera en su totalidad a la tecla. A su vez, en las esquinas de la tecla y en las esquinas interiores de la cavidad de la placa con el logotipo se realizaron redondeos de 10 [mm] para que coincidiera con los de la base y se tuviera una mejor apariencia.

Con las nuevas dimensiones, en la parte superior de la tecla se tuvo finalmente un área de contacto cuadrada de 104 [mm] de longitud, la cual sigue siendo superior a los 93 [mm] de ancho con los que cuenta un pie.

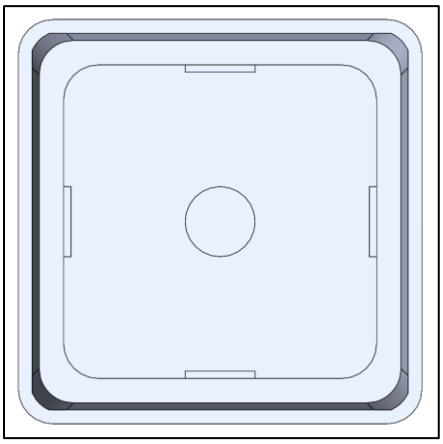


Figura 77. Vista superior de la tecla del prototipo B.

En la parte inferior, para el acople se le añadió una base similar a la que se tuvo que utilizar en el prototipo A para dar mayor sujeción hacia la tecla, solo que a esta se le dio una forma cónica, y de igual forma se tomó en cuenta el milímetro de distancia de separación adicional que se requería para la pulsación correcta del interruptor, por lo que el acople cuenta con 14.5 [mm] de separación con respecto a la base de la tecla. Por último, también se añadió una pared guía concéntrica con el acople que tiene un espesor de 1.5 [mm] con un diámetro interno de 13.5 [mm], cuya función es actuar como guía del resorte de retorno.

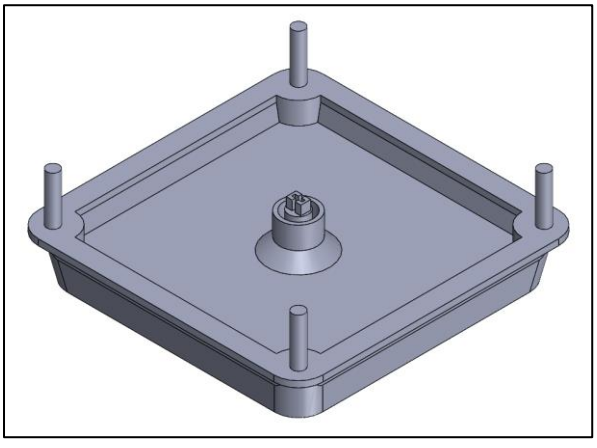


Figura 78. Vista isométrica inferior de la tecla del prototipo B.

Obteniendo el siguiente resultado para la tecla del prototipo B:

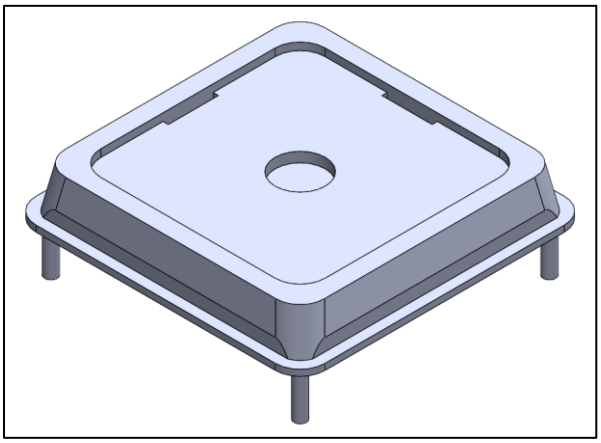


Figura 79. Tecla del prototipo B.

La placa con el logotipo y el recubrimiento únicamente se ajustaron a las dimensiones requeridas; la placa resultó en un cuadrado de 89 [mm] por lado y el recubrimiento, como se mencionó anteriormente, en un cuadrado de 104 [mm], y a ambas piezas se les aplicó el redondeo de 10 [mm] en las esquinas. Mientras que el logotipo se mantuvo exactamente igual.

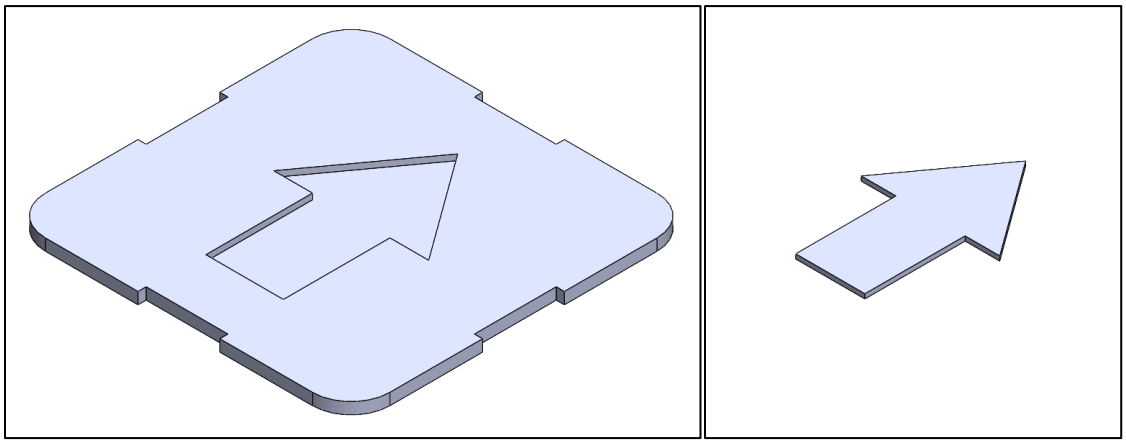


Figura 80. Placa con logotipo y logotipo de flecha del prototipo B

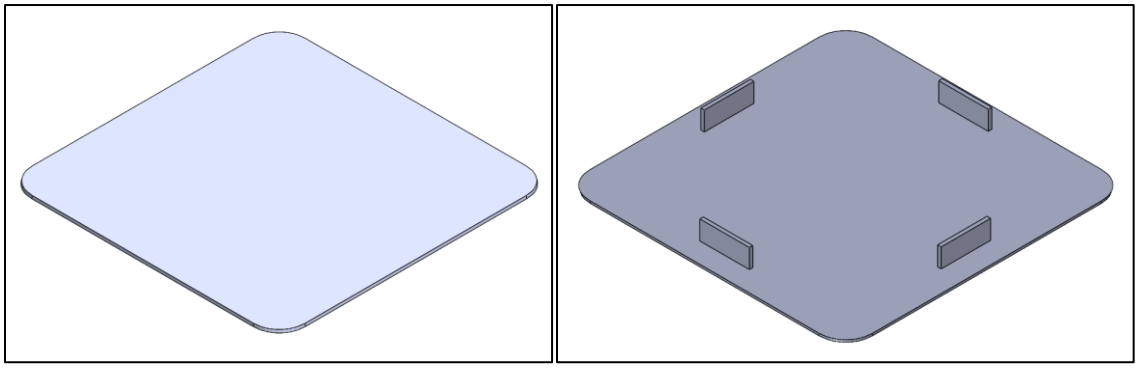


Figura 81. Recubrimiento del prototipo B.

Por último, el retenedor solamente fue ajustado a las dimensiones requeridas por la base, en un rectángulo de 130 [mm] por 140 [mm], con espesores de 5 [mm] a excepción del borde inferior, el cual cuenta con 15 [mm] por tratarse de un extremo del teclado, y en las esquinas internas se agregaron redondeos de 10 [mm] de radio.

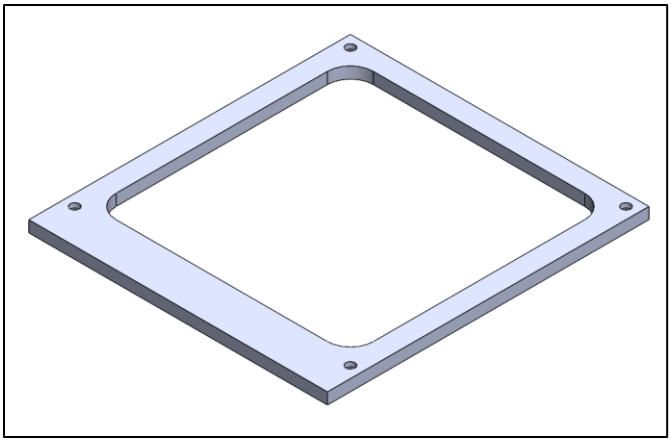


Figura 82. Retenedor del prototipo B.

Al igual que el prototipo A, el prototipo B quedó compuesto por 6 piezas: base, tecla, placa con logotipo, logotipo, retenedor y recubrimiento.

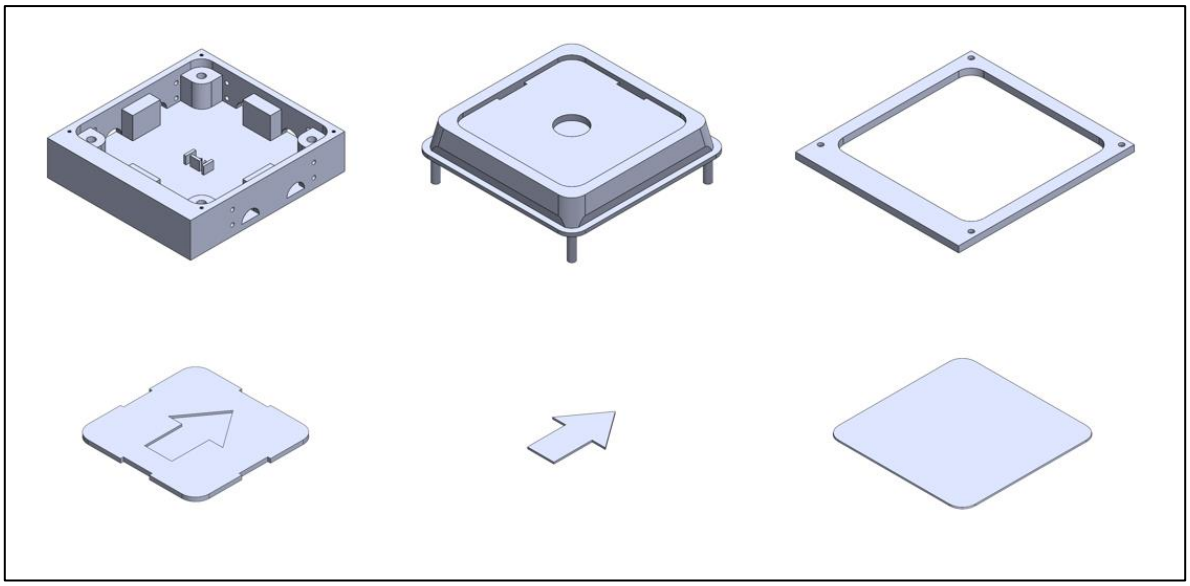


Figura 83. Piezas del prototipo B de una tecla.

3.4.1 Selección de materiales

Para verificar que la composición de la tecla soportaría las cargas a las que estaría sometida, era necesario realizar diferentes análisis de esfuerzos en las piezas de la base y la tecla del módulo.

Si bien el teclado no está pensado para que una persona se pare sobre él, es importante tomar en consideración que esto podría ocurrir, además de que las teclas se encontrarían constantemente bajo fuerzas de impacto. Es por ello por lo que para las simulaciones se consideró una carga de 100 [kg], esto suponiendo que una persona de este peso se parara sobre una sola tecla.

Para ello, era importante determinar primero el material con el cual serían manufacturadas las piezas, para que con base en sus propiedades mecánicas se realizaran las simulaciones.

Como se mencionó anteriormente, los recubrimientos se manufacturarían de TPU por tratarse de un material flexible y poder ser empleado en manufactura aditiva. Mientras que el resto de las piezas debían ser de un material rígido, teniendo como opciones principales PLA, PETG y ABS por su alta disponibilidad y capacidad de ser manufacturados mediante manufactura aditiva; por ende, se realizó una comparativa de las propiedades mecánicas de los 3 materiales para poder realizar una selección.

Propiedad	**Material**		
	PLA	**PETG**	**ABS**
Módulo de Young [GPa]	2.35	1.94	1.68
Coeficiente de Poisson	0.36	0.38	0.37
Módulo de corte [GPa]	1.2	0.9	0.8
Densidad [g/cm^3]	1.24	1.27	1.1
Resistencia a la fluencia [MPa]	49.5	46.2	39
Resistencia a la tracción [MPa]	45.6	38.5	33.9

Tabla 49. Tabla de propiedades mecánicas de los materiales (Ultimaker).

Con base en la anterior tabla, se podría decir que el PLA posee mejores propiedades mecánicas a comparación del PETG y ABS, ya que los valores del módulo de Young, módulo de corte, resistencia a la fluencia y a la tracción son mayores; sin embargo, el hecho de que el PLA presente una cifra mayor en estos parámetros provoca que el material sea más frágil y sea menos resistente ante impactos, lo cual lo hace más propenso a fracturas y menos adecuado para piezas mecánicas, como es el caso del teclado.

Por otro lado, el PETG y ABS por sus propiedades son materiales más dúctiles que permiten una mayor absorción de energía y resistencia al impacto, convirtiéndolos en materiales más aptos para piezas mecánicas. Por lo tanto, ambos materiales son preferibles sobre el PLA para la manufactura de las piezas.

Si bien ambos materiales serían adecuados para las piezas del teclado, al momento de ser empleados en manufactura aditiva, el PETG posee ciertas ventajas sobre el ABS:

1. Menor tiempo de manufactura.
2. Menor temperatura del extrusor.
3. Menor temperatura de la plataforma de impresión.
4. Mayor adhesión a la plataforma.
5. Menor deformación durante el enfriamiento de la pieza.
6. No emite gases tóxicos durante la manufactura.

Por lo tanto, el PETG posee mayores ventajas mecánicas sobre el PLA para las piezas del teclado y a su vez es más sencillo de manufacturar que el ABS; es así como se decidió emplear este material para la simulación y la manufactura de la mayoría de las piezas del teclado, a excepción de los logotipos y recubrimientos.

Para los logotipos se optó por utilizar PLA, debido a que son piezas decorativas las cuales no estarán sometidas bajo algún tipo de esfuerzo.

3.4.2 Análisis de esfuerzos del prototipo B de una tecla

Una vez determinado el material con el que serían manufacturadas las piezas, se procedió a realizar los análisis de esfuerzos correspondientes a la carga de 100 [kg] propuesta para una sola tecla.

- Para los análisis de esfuerzos de las piezas se utilizó el software *Autodesk Inventor*.

En *Autodesk Inventor* los análisis de esfuerzos se realizan mediante análisis estáticos que toman como base la teoría de falla de Von Mises, la cual es utilizada para materiales dúctiles. Dado que el material seleccionado fue PETG, un material dúctil, fue posible realizar estos análisis mediante este software.

La primera pieza que se analizó fue la correspondiente a la base del módulo en estudio, con la fuerza de 100 [kg] distribuida de la siguiente manera:

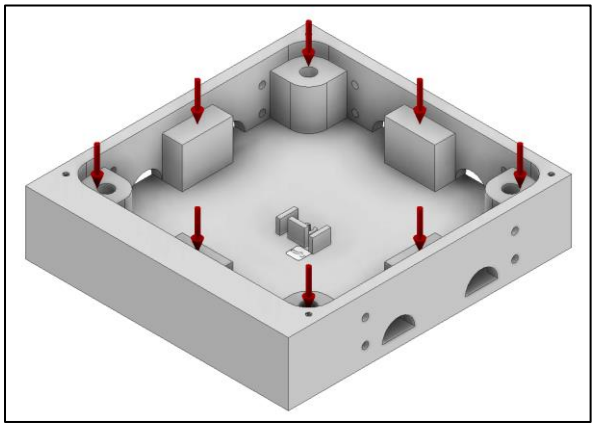


Figura 84. Distribución de la carga sobre la base del prototipo B.

Como se puede apreciar en la figura, se distribuyó la fuerza a lo largo de los 8 soportes que posee la base de la tecla, ya que una vez que esta sea pulsada, será en estas zonas donde el margen inferior de la tecla se apoyará. Por lo tanto, del análisis estático se extrajo información de 2 gráficas: esfuerzos de Von Mises y desplazamientos.

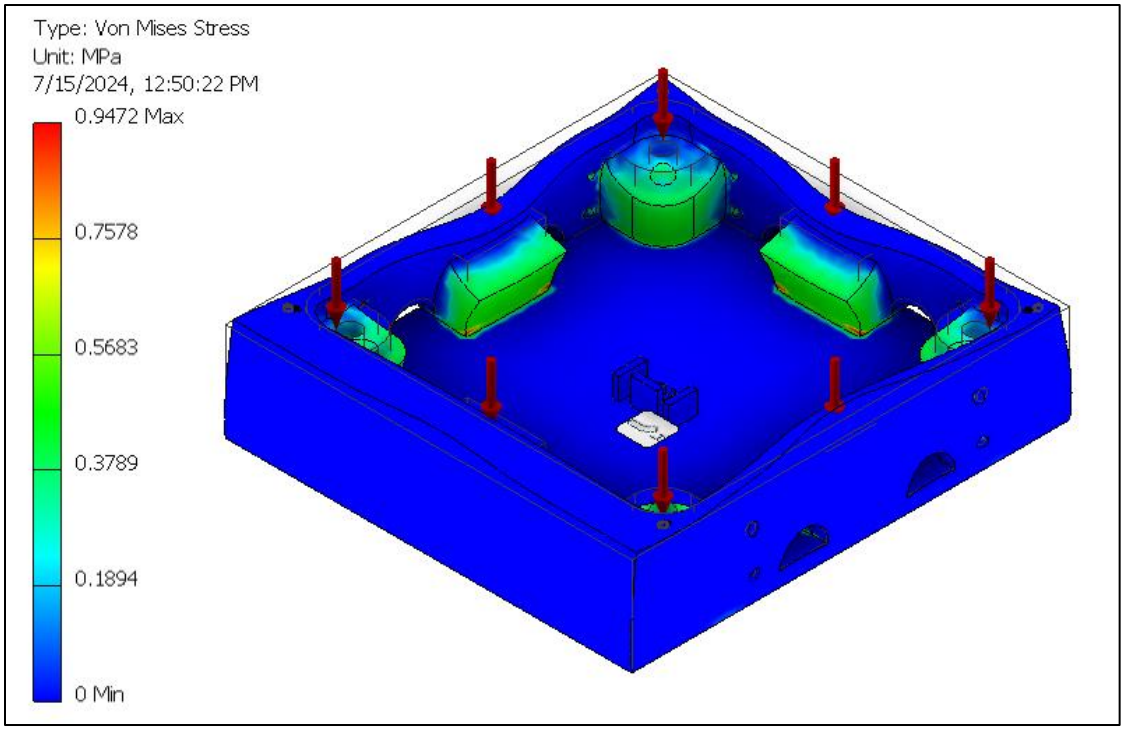


Figura 85. Esfuerzos de Von Mises sobre la base del prototipo B.

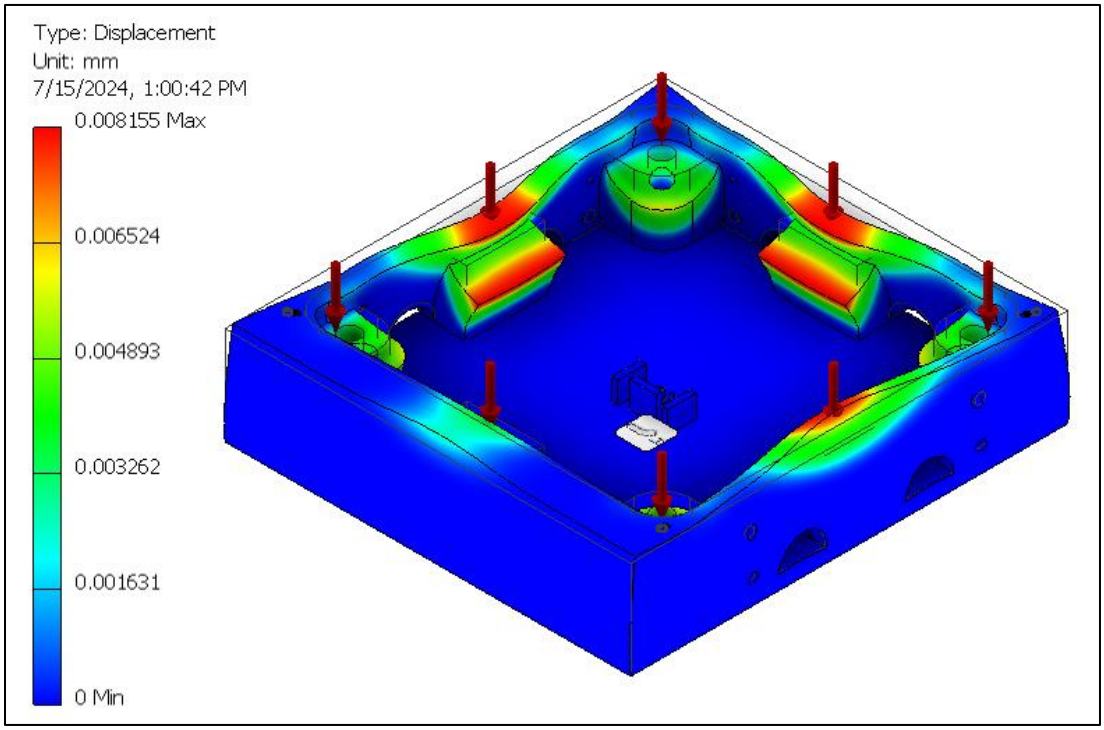


Figura 86. Desplazamientos sobre la base del prototipo B.

De acuerdo con la gráfica de esfuerzos de Von Mises, bajo la carga de 100 [kg] la base sufre un esfuerzo máximo de 0.9472 [MPa], dato con el cual es posible obtener el factor de seguridad de la pieza y así asegurar que la pieza no sufrirá una fractura bajo estas condiciones. Por lo tanto, se tomó en cuenta la resistencia a la tracción de 38.5 [MPa] que posee el PETG, de tal modo que el cálculo está dado de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{base} = \frac{38.5\ [MPa]}{0.9472\ [MPa]} = 40.65$$

Para cuestiones de diseño, siempre se debe tener un factor de seguridad que sea mayor a 1, ya que de caso contrario se tendría una pieza que se rompería bajo todos los posibles escenarios a los que estaría sometida. En cuanto al diseño de piezas mecánicas, como lo son los componentes de aeronaves, se suelen utilizar factores de seguridad que vayan de 1.5 a 2.5 (SafetyCulture, 2024).

Con base al cálculo obtenido del factor de seguridad para la base de la tecla, se tiene un factor de seguridad demasiado alto de 40.65, lo cual indica que la base de la tecla podría soportar la carga de 100 [kg] sin presentar ningún riesgo de fractura.

- Sin embargo, un área de oportunidad que no fue considerada a lo largo del desarrollo del trabajo fue que, al poseer factores de seguridad tan grandes en ciertas piezas, se debió de buscar reducir este factor mediante el rediseño de las piezas con el fin de optimizar las dimensiones y, por ende, reducir la cantidad de material requerido para su manufactura.

Por otro lado, la gráfica de desplazamientos señala que la pieza al estar sometida bajo los 100 [kg] tiene un desplazamiento máximo de 0.008 [mm], lo cual es insignificante e imperceptible para las condiciones de uso del teclado.

- No obstante, se debe tener en cuenta que estos resultados se tienen al considerar una pieza totalmente sólida y uniforme con propiedades isotrópicas, es decir, que posee propiedades mecánicas y físicas iguales en todas las direcciones, mientras que una pieza resultante de manufactura aditiva puede ser una pieza parcialmente hueca e irregular con propiedades anisotrópicas, esto es, que posee propiedades mecánicas y físicas que varían según la dirección en la que se midan.

  Por lo tanto, los resultados presentados por la simulación muestran un acercamiento al comportamiento real de la pieza, pero deben ser verificados de manera experimental una vez manufacturado el prototipo para garantizar su funcionamiento.

Otro análisis realizado sobre la base de la tecla fue a partir de los esfuerzos que se presentan por los tornillos de acero inoxidable M3 para el ensamble que se encuentran en las paredes de los módulos. De tal modo que se consideró una carga de 10 [kg] que fuera distribuida de la siguiente manera sobre los 4 tornillos de cada pared.

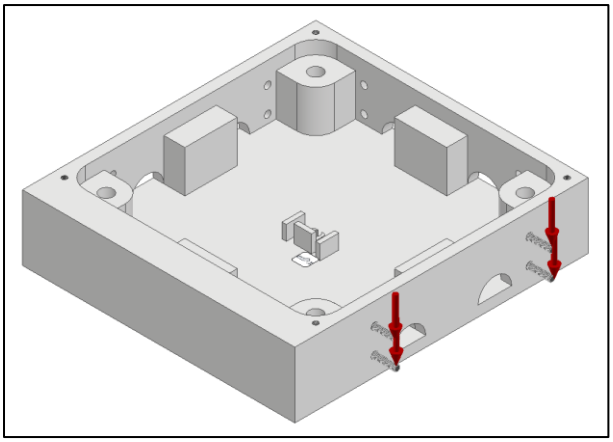


Figura 87. Distribución de la carga sobre los tornillos de ensamble de la base del prototipo B.

Si bien los módulos continuos tendrán un peso menor a 10 [kg], se consideró esta carga para observar los resultados con un peso mayor al de las condiciones reales. Por lo que, de igual manera, se consideraron las gráficas de esfuerzos de Von Mises y de desplazamientos.

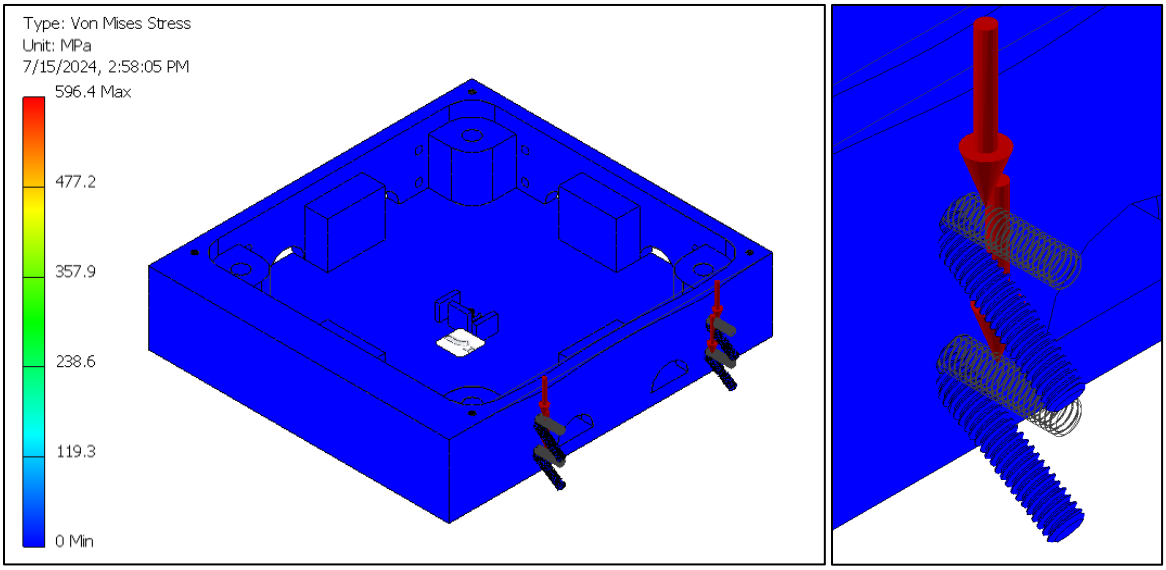


Figura 88. Esfuerzos de Von Mises sobre los tornillos de ensamble de la base del prototipo B.

A pesar de que en la barra lateral de la gráfica se indica que el esfuerzo máximo presente en el ensamble es de 596.4 [MPa], no se identificó la zona en la cual se hallaba, y en dado caso, se debió situar en una zona muy reducida de los tornillos, la cual no es lo suficientemente representativa, ya que como se puede apreciar, tanto la pieza de la base como los tornillos se encuentran de un tono azul que indica que el esfuerzo al que se someten es mínimo.

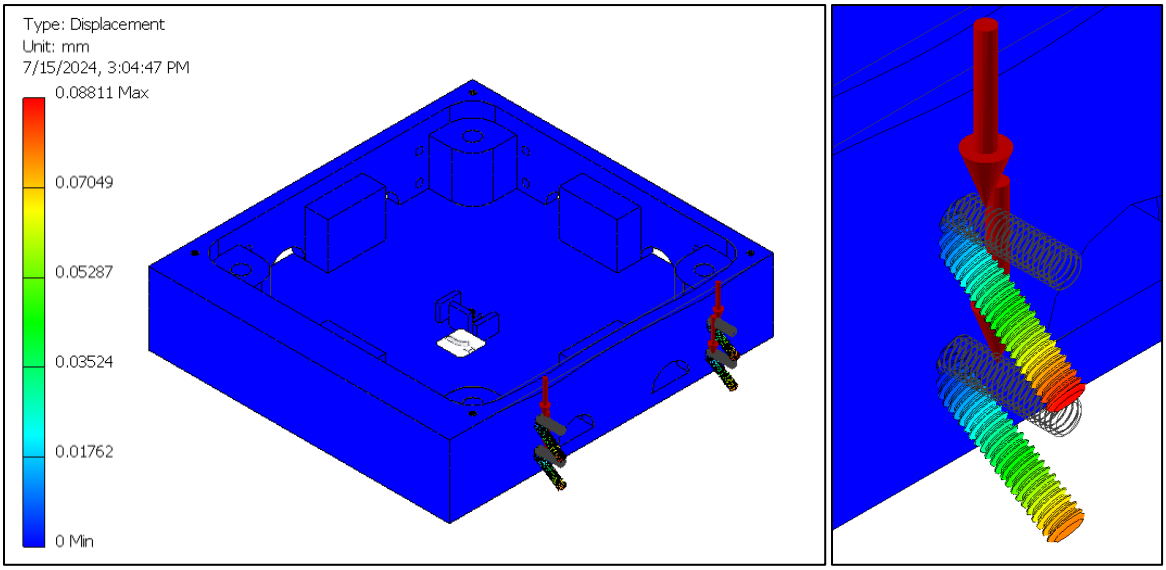


Figura 89. Desplazamientos sobre los tornillos de ensamble de la base del prototipo B.

En cuanto a los desplazamientos máximos que se presentan en los tornillos, se tienen 0.09 [mm], que para los fines del ensamble son insignificantes.

Por otro lado, la última pieza que se analizó de manera individual fue la de la tecla. Al igual que para el análisis de la base, se tomó en cuenta una carga de 100 [kg] y además era necesario considerar la fuerza contraria aplicada por el resorte de retorno; sin embargo, se requería caracterizar el resorte para obtener de manera experimental su constante de rigidez, ya que no se contaba con el dato. Por lo tanto, de manera inicial se realizó el análisis sin considerar la fuerza opositora del resorte, para que posteriormente, una vez que fuera manufacturado el prototipo B, se pudiera obtener la constante de rigidez del resorte.

La manera en la que se distribuyó la fuerza fue la siguiente:

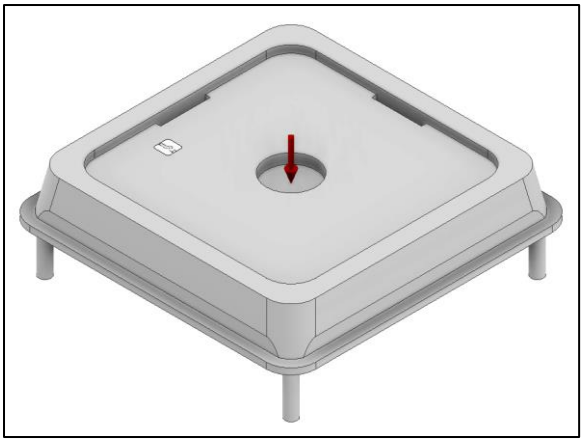


Figura 90. Distribución de la carga sobre la tecla del prototipo B.

Y se obtuvieron las siguientes gráficas de esfuerzos de Von Mises y de desplazamientos:

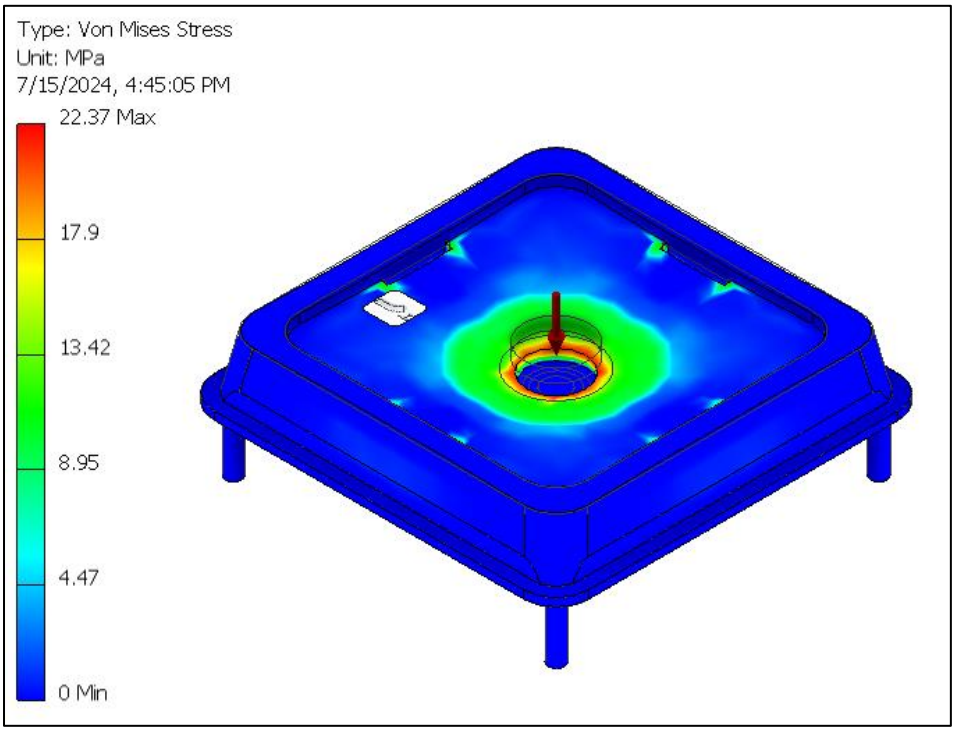


Figura 91. Esfuerzos de Von Mises sobre la tecla del prototipo B.

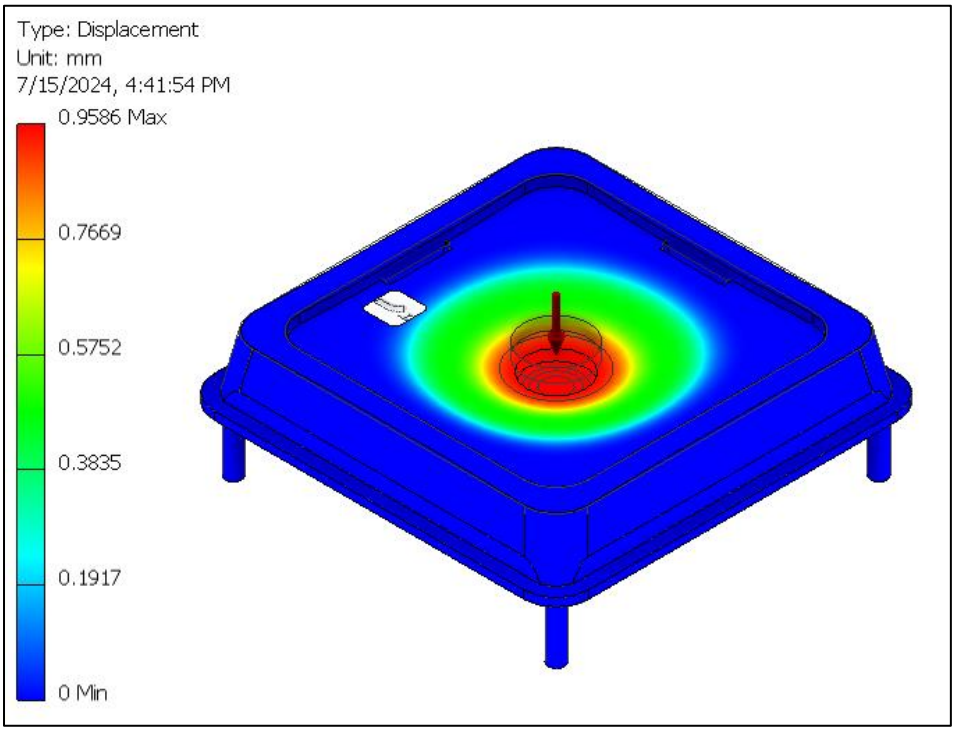


Figura 92. Desplazamientos sobre la tecla del prototipo B.

De la primera gráfica se puede apreciar que la región que sufre mayores esfuerzos es la parte central de la tecla, alcanzando un valor máximo de 22.37 [MPa], con lo cual es posible calcular el factor de seguridad de la tecla.

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{tecla} = \frac{38.5\ [MPa]}{22.37\ [MPa]} = 1.72$$

A diferencia de la pieza de la base, la tecla no posee un factor de seguridad tan alto, pero se sigue encontrando dentro del rango de 1.5 a 2.5 deseado.

Mientras que en la segunda gráfica se tiene un desplazamiento máximo de 0.96 [mm], valor el cual se considera permisible, ya que es menor a 1 [mm] y se encuentra en la zona de pulsación del interruptor mecánico. En caso de haber resultado mayor, debería de haberse considerado, ya que podría haber provocado que el interruptor sufriera alguna fractura.

Sin embargo, cabe destacar que estos comportamientos se presentan de manera individual en cada una de las piezas, por lo cual se realizó un último análisis del ensamble de las piezas de la base y la tecla con la carga de 100 [kg] y considerando que la tecla se encuentra totalmente pulsada.

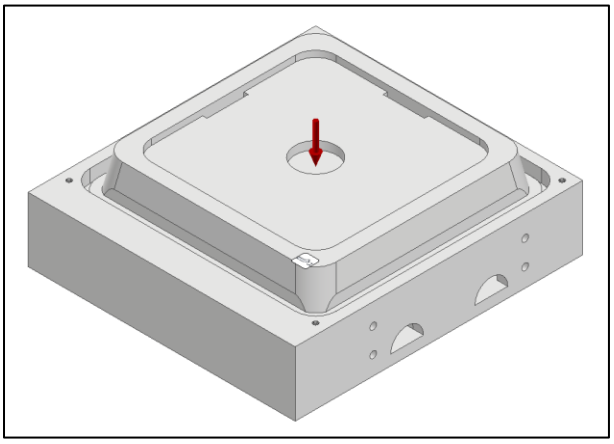


Figura 93. Distribución de la carga sobre la tecla y base del prototipo B.

De dicho análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

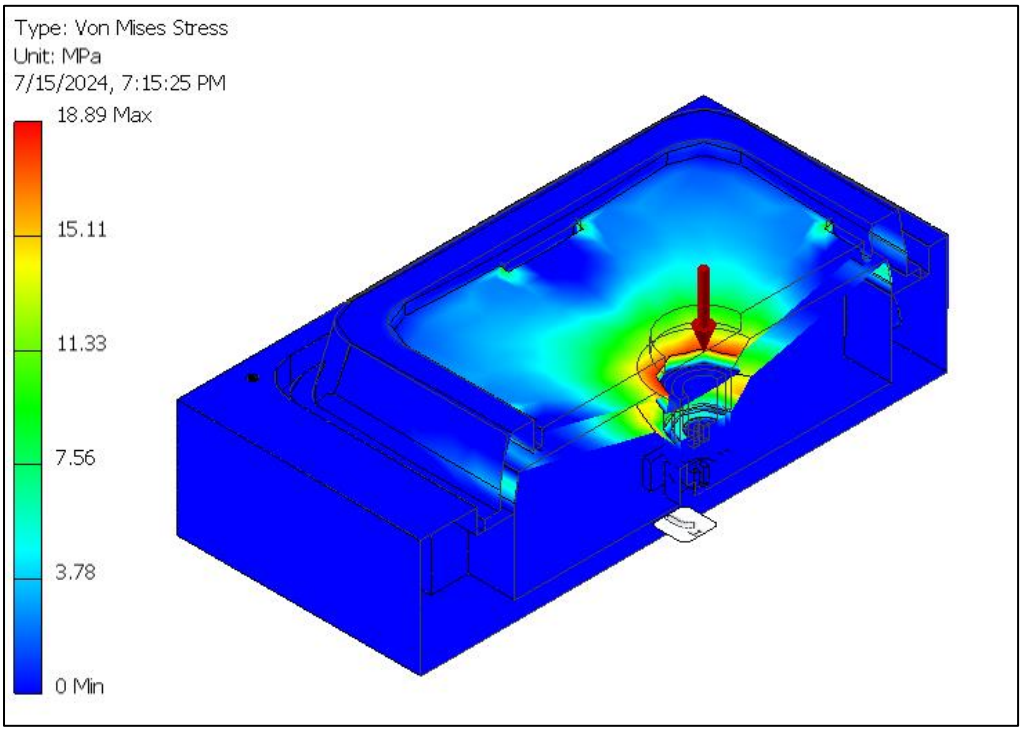


Figura 94. Esfuerzos de Von Mises sobre la tecla y base del prototipo B.

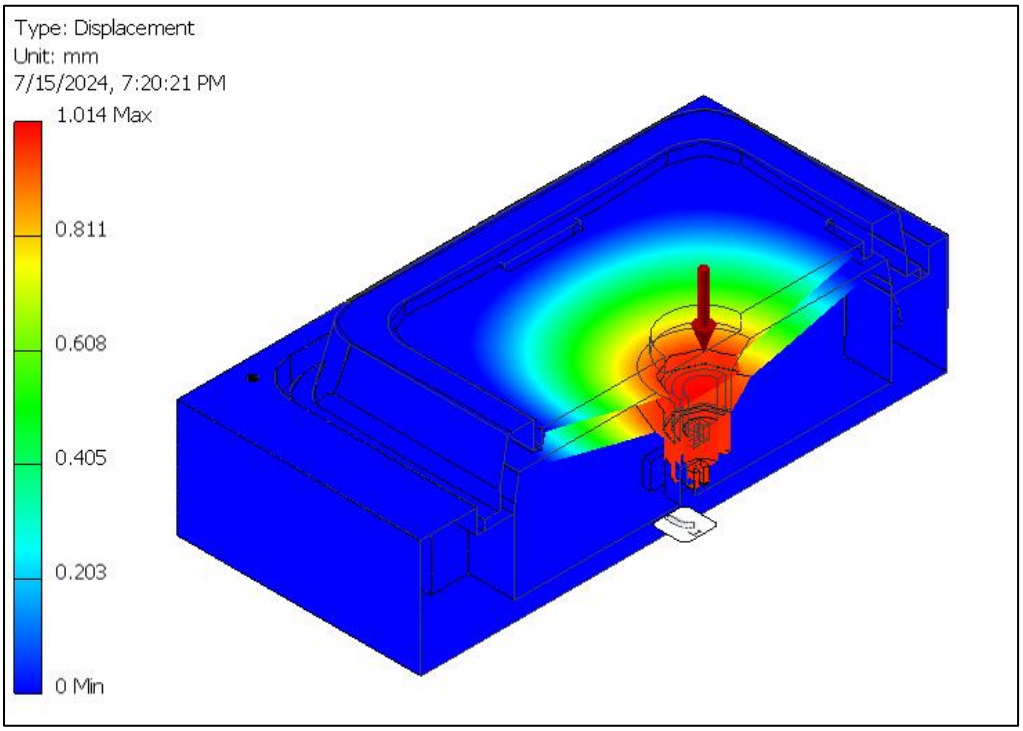


Figura 95. Desplazamiento sobre la tecla y base del prototipo B.

De manera conjunta, se tiene que el esfuerzo máximo sobre el cual está sometido el ensamble es de 18.89 [MPa]. Por lo tanto, el factor de seguridad que posee la tecla es el siguiente:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{ensamble} = \frac{38.5\ [MPa]}{18.89\ [MPa]} = 2.04$$

Dicho factor de seguridad es incluso mayor a comparación del obtenido en la pieza de la tecla y se encuentra dentro del rango deseado de 1.5 a 2.5.

Por último, el desplazamiento máximo se tiene en la zona central de la tecla con un valor de 1.01 [mm], ligeramente mayor al presentado de 0.96 [mm] en el análisis individual de la pieza, pero que de igual forma sigue siendo aceptable.

Con todo lo anterior, se comprobó de manera inicial que la tecla sería capaz de soportar una carga de hasta 100 [kg] con un factor de seguridad de 2.04 y un desplazamiento máximo de 1.01 [mm] en la parte central de la tecla, por lo cual funcionaría de manera adecuada; sin embargo, por lo mencionado anteriormente, debido al método de manufactura aditiva empleado, era necesario verificar que bajo condiciones reales el funcionamiento seguiría siendo el deseado.

3.4.3 Evaluación del prototipo B de una tecla

A pesar de que el PETG fue el material seleccionado para el teclado, se optó por manufacturar el prototipo B con PLA al igual que el prototipo A, con el propósito de poder manufacturar todas las piezas en un periodo de tiempo más corto y así observar posibles modificaciones para un modelo final de la tecla.

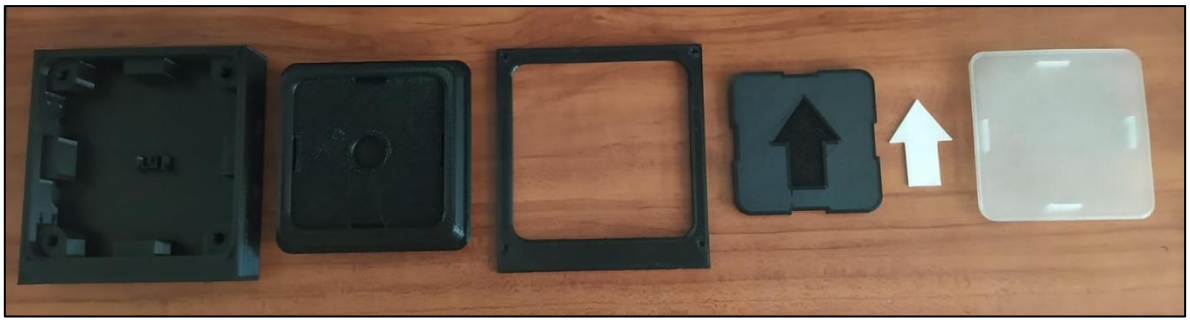


Figura 96. Piezas manufacturadas del prototipo B.

Una vez manufacturadas todas las piezas, se procedió con el ensamble del módulo al igual que en el prototipo A, con los tornillos autorroscantes M2, el resorte colocado en la parte central de la tecla y el interruptor con ambos cables soldados, los cuales podrían salir por los semicírculos ubicados en la pared posterior del módulo.

Lo primero que se pudo observar durante el ensamble fue que era más sencillo colocar el resorte de retorno en la parte central de la tecla gracias a la pared guía colocada alrededor del acople del interruptor, y, por ende, realizar el acoplo de manera más fácil.

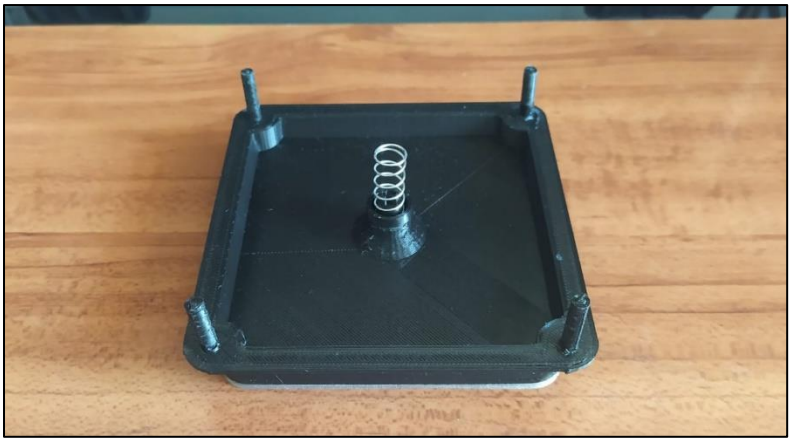


Figura 97. Resorte de retorno colocado sobre la tecla del prototipo B.

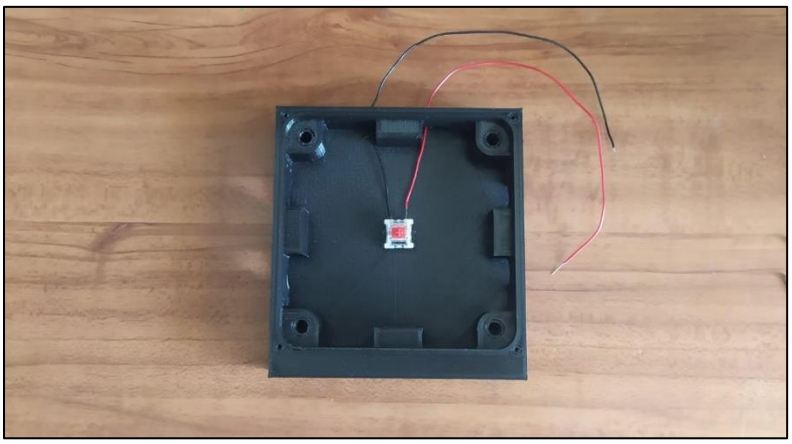


Figura 98. Interruptor colocado sobre la base del prototipo B.

Una vez ensambladas todas las piezas, el módulo resultó del siguiente modo:

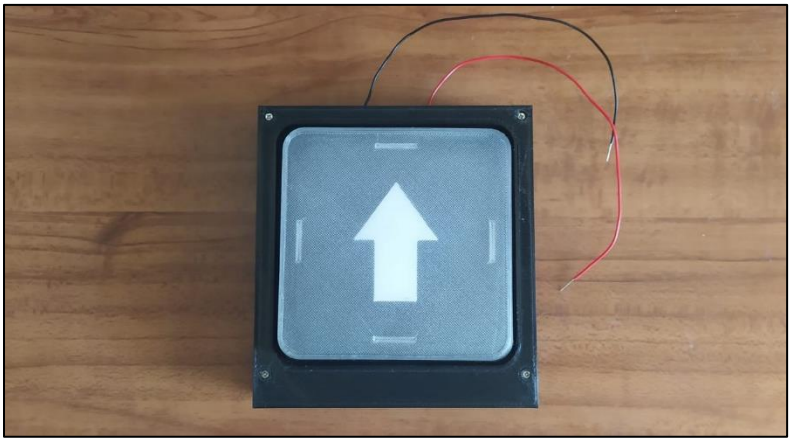


Figura 99. Prototipo B de una tecla (módulo 6).

A pesar de la reducción del espesor de pared que se tenía en el módulo, se pudo observar que la fijación del retenedor se podría realizar sin ningún tipo de problema, y que a su vez era más fácil retirar el recubrimiento al no contar con paredes laterales alrededor de este.

Al igual que el prototipo A, se utilizó el mismo circuito con un LED para verificar que el funcionamiento fuera el deseado a lo largo de toda el área cuadrada de la tecla, es decir, que independientemente de que se pulse por el centro o por los extremos, esta pueda ser activada.

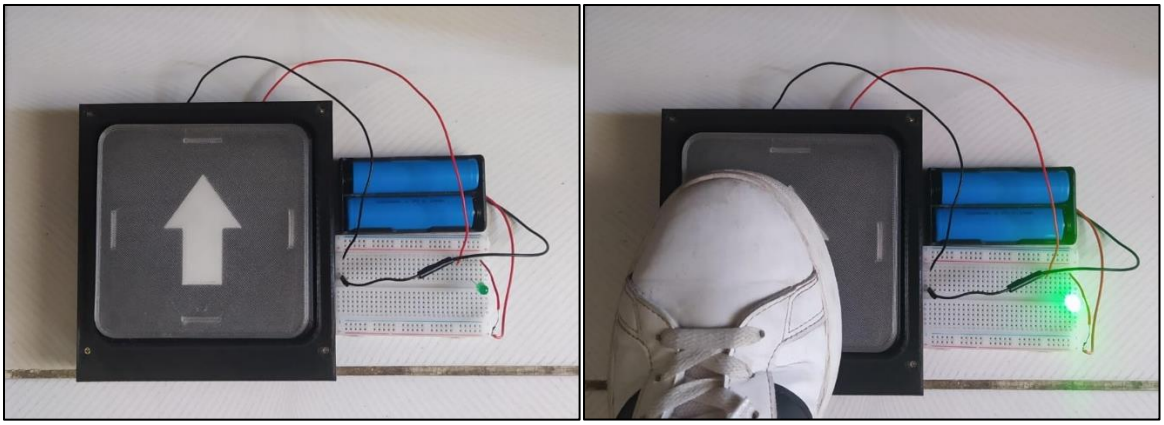


Figura 100. Prueba de pulsación del prototipo B.

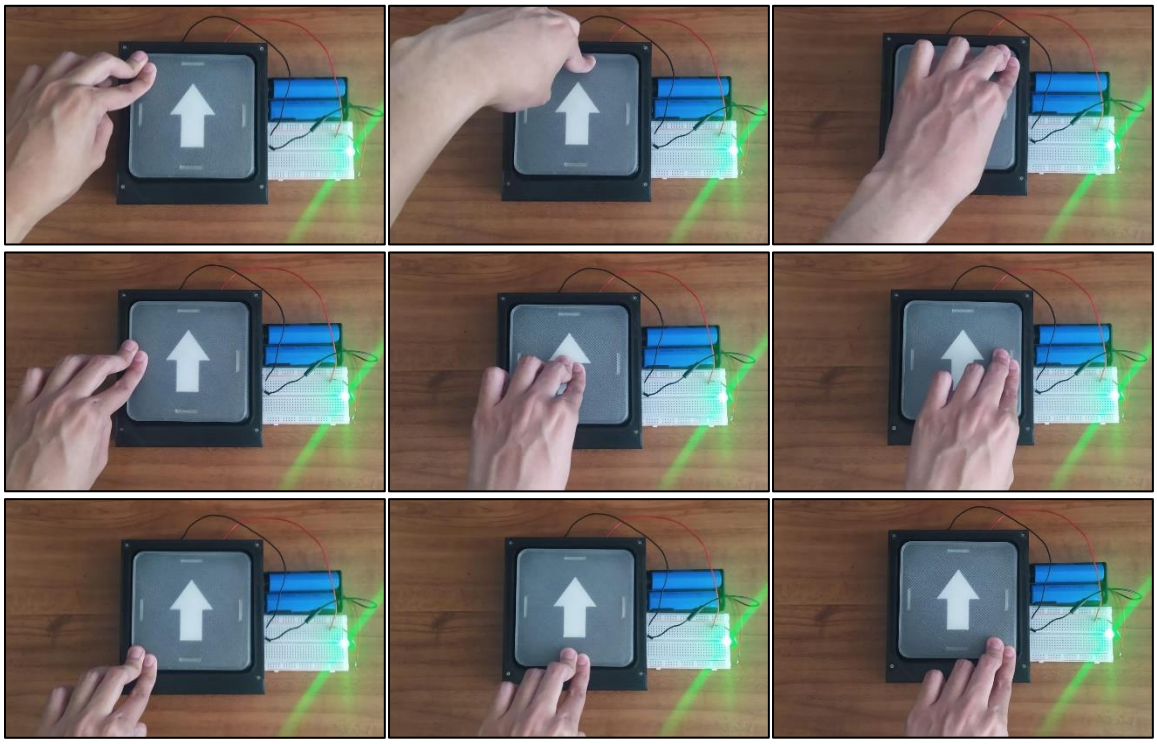


Figura 101. Prueba de pulsación en diferentes zonas del prototipo B.

Como se puede apreciar, es posible pulsar la tecla en cualquier zona del recubrimiento y esta será activada sin ningún tipo de problema, y una vez que sea soltada, volverá a su posición original. Por lo tanto, esta prueba se cumplió de manera satisfactoria.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, otra característica deseada para la tecla es que fuera capaz de soportar una carga de 100 [kg] sobre ella, y a pesar de que los análisis realizados previamente señalaban que esto era posible, una vez manufacturado el prototipo se detectó un área de mejora para la pieza de la base.

Dado que los soportes de la tecla se encontraban situados únicamente en los extremos y las piezas fueron manufacturadas mediante manufactura aditiva, se tomó la decisión de añadir soportes adicionales que se situaran en una zona más céntrica de la base de la tecla; de este modo se garantizaría que la tecla soportaría una mayor carga y que a su vez el desplazamiento del acoplo sería menor y, por lo tanto, el interruptor sufriría de una menor carga y desplazamiento.

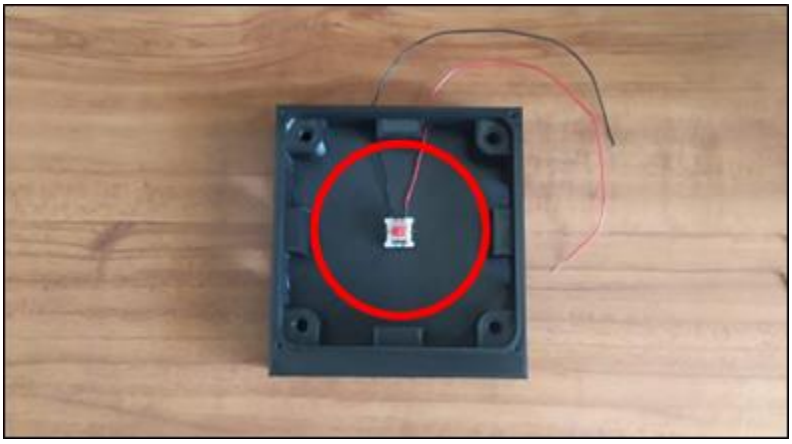


Figura 102. Área considerada para la adición de soportes.

Otro aspecto que se observó al momento de pulsar la tecla sobre el suelo con un pie es que el módulo solía resbalarse, por lo que se decidió implementar almohadillas antideslizantes al igual que los teclados convencionales.

Para esto se colocaron 4 almohadillas antideslizantes cuadradas de 20 [mm] de lado y 2.5 [mm] de espesor en cada una de las esquinas del prototipo A y se comparó con el deslizamiento del prototipo B.

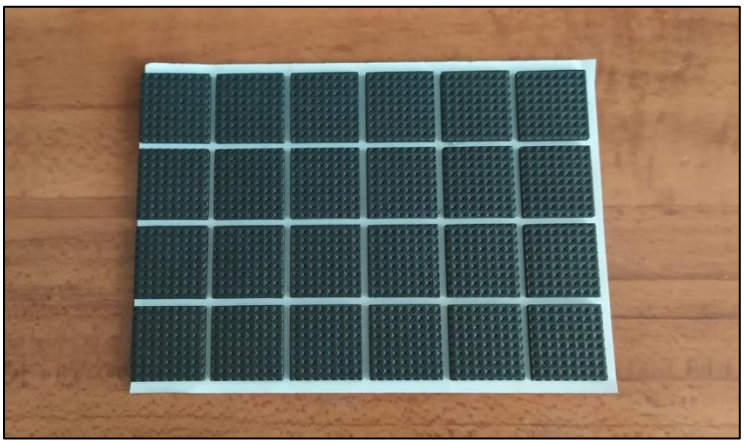


Figura 103. Almohadillas antideslizantes.

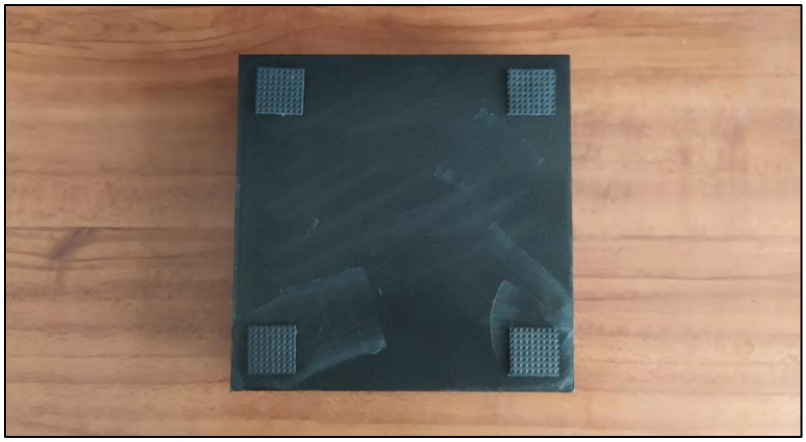


Figura 104. Vista inferior del prototipo A con almohadillas antideslizantes.

De lo cual se pudo observar que al pulsar el prototipo A con el pie no se presentaba ningún tipo de desplazamiento lateral, a comparación del prototipo B, el cual no oponía ningún tipo de resistencia y se desplazaba de manera lateral dependiendo de la zona en la que se pulsara la tecla.

Debido a esto, se determinó que el teclado debía contar con almohadillas deslizantes a lo largo de la parte inferior de los módulos.

3.4.4 Caracterización del resorte

Otro aspecto que a su vez se indicó previamente en el análisis de esfuerzos de la tecla fue que no se contaba con la constante de rigidez del resorte de compresión empleado en la tecla; por ende, era necesario obtenerla de manera experimental.

Las características ya conocidas del resorte seleccionado eran las siguientes:

- Material: acero inoxidable.
- Diámetro de alambre: 0.8 [mm].
- Diámetro exterior: 10 [mm].
- Longitud libre: 30 [mm].

La prueba que se realizó para obtener la constante de rigidez partió de la ley de Hooke, la cual es aplicada para describir el comportamiento elástico de los materiales y establece que la fuerza necesaria para elongar o comprimir un resorte es directamente proporcional a su variación de longitud, siempre y cuando no se supere el límite elástico del material (Profe Recursos, 2024). Está dada por la siguiente ecuación:

$$F = -k\Delta x$$

Donde:

F – Fuerza aplicada
k – Constante de rigidez del resorte
Δx – Variación de longitud del resorte

Para la prueba se utilizó el módulo ensamblado de la tecla y el circuito del LED, y dado que se conoce que el interruptor es activado una vez que es desplazado 2 [mm], la prueba consistió en ir aumentando de manera controlada una masa colocada en la parte central de la tecla, y una vez que el LED se encontrara encendido, esto indicaría que la tecla ha sido desplazada 2 milímetros. Por lo tanto, con este desplazamiento y al obtener el peso de la masa en una báscula, sería posible sustituir los valores en la ecuación y así determinar la constante del resorte.

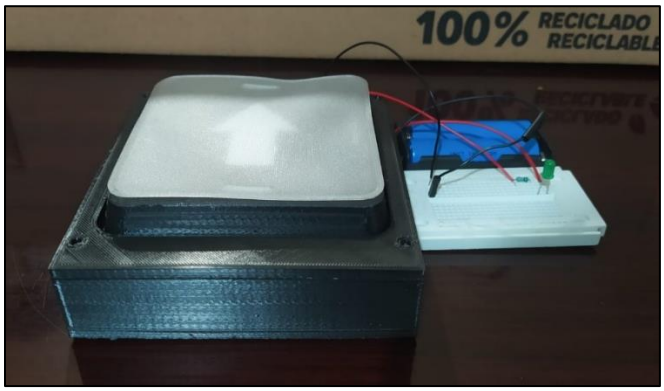


Figura 105. Prototipo B y circuito de prueba.

Figura 106. Báscula y recipiente de cristal con sal.

La masa seleccionada para realizar esta prueba fue sal, la cual fue depositada sobre un recipiente de cristal hasta que el LED se encontrara encendido.

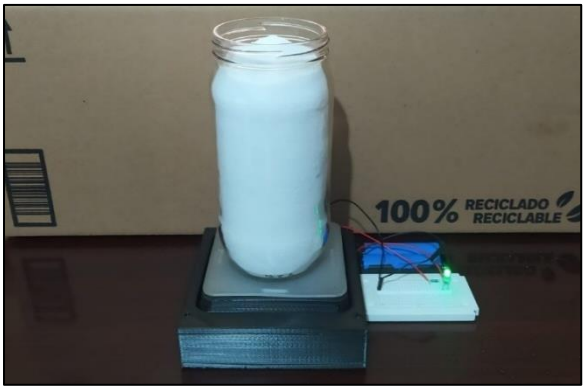


Figura 107. Prueba de caracterización del resorte

Una vez encendido el LED, se dejó de depositar sal sobre el recipiente y se tomó en la báscula el peso total del recipiente junto con la sal.

Figura 108. Toma del peso del recipiente de cristal con sal.

De la prueba se pudo determinar que se requiere una carga de 1202 [g] para activar la tecla, es decir, para que el interruptor mecánico tenga un desplazamiento de 2 [mm].

Con base en esta información, la conversión de la fuerza de kilogramos a newtons y la ley de Hooke, fue posible obtener la constante de rigidez del resorte.

$$F = -k\Delta x \;\; \rightarrow \;\; k = -\frac{F}{\Delta x}$$

$$F = (1.202[kg])\left(\frac{9.81[N]}{1[kg]}\right) = 11.7916[N]$$

$$k = -\frac{11.7916[N]}{(-2[mm])} = 5.8958\left[\frac{N}{mm}\right]$$

La variación de longitud del resorte considerada posee signo negativo ya que se trata de una compresión del resorte, y se optó por mantener las unidades de longitud en milímetros ya que la longitud total del resorte corresponde a 30 [mm].

Por lo tanto, para que la tecla se encuentre totalmente pulsada y se recorran los 3.8 [mm] de desplazamiento totales, la fuerza de pulsación requerida es la siguiente:

$$F = -k\Delta x$$

$$F = -\left(5.8958\left[\frac{N}{mm}\right]\right)(-3.8[mm]) = 22.404\ [N]$$

Esta fuerza ejercida por el resorte de 22.404 [N] es la que también se debe considerar en el análisis de esfuerzos de la pieza de la tecla.

Finalmente, consultando un catálogo de resortes de compresión comerciales en el sitio web *Lee Spring*, empresa fabricante de resortes, se procedió a buscar la opción que más se aproximara a las características del resorte empleado en la prueba, tomando como principales factores la constante de rigidez, la longitud libre y el diámetro exterior.

Número de Parte	Diámetro exterior (mm)	Diámetro del orificio (mm)	Diámetro de poste (mm)	Longitud libre (mm)	Constante (N/mm)	Altura sólida (mm)	Diámetro del alambre (mm)	Material	Comparar
LC 051F 05 M	10.67	11.13	7.77	25.4	5.604	11.02	1.3	MW	
LC 055F 05 S	10.67	11.13	7.57	25.4	6.427	11.91	1.4	SS	
LC 055F 05 S316	10.67	11.13	7.57	25.4	6.427	11.91	1.4	SS316	
LC 055F 06 M	10.67	11.13	7.57	31.75	6.13	14	1.4	MW	
LC 055F 06 S	10.67	11.13	7.57	31.75	5.114	14	1.4	SS	
LC 055F 06 S316	10.67	11.13	7.57	31.75	5.114	14	1.4	SS316	
LCM130F 08 M	10.8	11.3	7.7	25	5.727	10.44	1.3	MW	
LCM130F 09 M	10.8	11.3	7.7	27.5	5.149	11.3	1.3	MW	

Tabla 50. Resorte comercial Lee Spring con las características deseadas más cercanas.

Por lo tanto, el resorte comercial más cercano posee las siguientes características:

Resorte de compresión *Lee Spring* LC 055F 06 M

- Material: alambre de piano.
- Diámetro de alambre: 1.4 [mm].
- Diámetro exterior: 10.67 [mm].
- Longitud libre: 31.75 [mm].
- Constante de rigidez: 6.13 [N/mm]

En el caso de que se deseara aumentar la fuerza requerida para la pulsación de la tecla, sería necesario sustituir el resorte por uno que contara con una constante de rigidez mayor; sin embargo, con base en las pruebas de pulsación se consideró que la sensación de pulsación era adecuada, debido a que es posible activar la tecla sin realizar mucho esfuerzo, únicamente con una carga de 1.2 [kg], lo cual es una característica deseada para el teclado.

3.5 Prototipo C de una tecla

Por último, antes de dar paso al modelado del teclado completo, se realizó un último prototipo C de una tecla.

De igual manera, se contempló el módulo 6 del teclado para este prototipado y dado que el prototipo B mostró el funcionamiento deseado para las teclas, se reutilizaron todas las piezas modeladas anteriormente y solo se añadieron 4 soportes en la zona central de la base de la tecla.

Para la implementación de estos 4 soportes se propuso inicialmente una geometría cuadrada de 20 [mm] donde cada una de ellas se encontrara cercana a una esquina de la pieza de la base. Para ello se tomaron como referencia los soportes laterales centrales que ya se tenían y se trazaron líneas diagonales que fueran de las esquinas internas de un soporte lateral a otro. Igualmente se trazaron otro par de líneas diagonales que tomaran como referencia el área cuadrada de la base y que fueran de una esquina a otra, obteniendo como resultado el siguiente trazo:

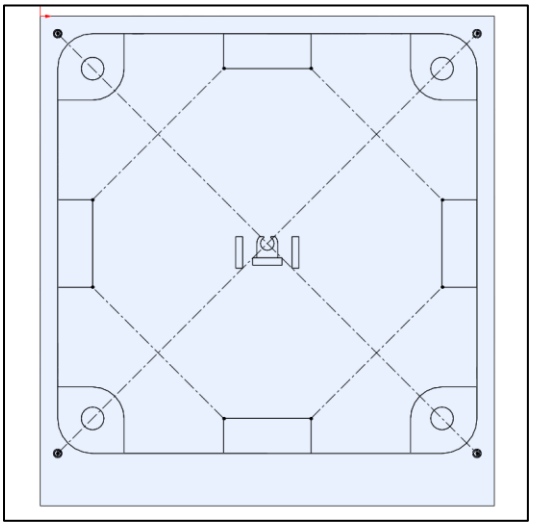


Figura 109. Líneas diagonales auxiliares.

Con base en dichas líneas, se utilizaron los 4 puntos de intersección resultantes de las líneas como el centro para los 4 soportes cuadrados; sin embargo, se deseaba que estos soportes fueran más reducidos para disminuir la cantidad de material que se debía emplear, por lo tanto, tomando como base las líneas de los soportes laterales, se le asignó un espesor de 5 [mm] de cada lado, resultando en una geometría hexagonal:

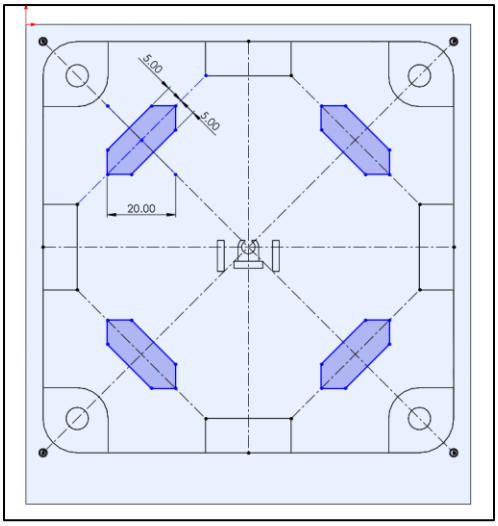


Figura 110. Geometría de los soportes adicionales.

Por último, se realizó una extrusión de 29 [mm] para los soportes, la cual permite que se encuentren a una distancia de 3.8 [mm] de la pieza de la tecla, y así cuando se realice el desplazamiento total al pulsar la tecla, se tenga contacto con los 8 soportes laterales y los 4 centrales.

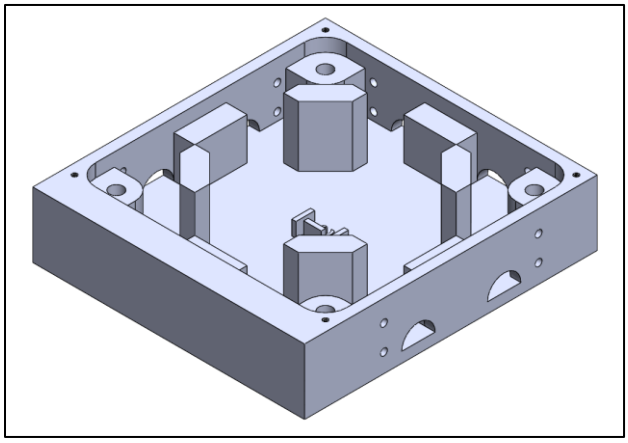


Figura 111. Base del prototipo C.

Por ende, nuevamente se volvieron a realizar los análisis de esfuerzos para la pieza de la base y el ensamble con la pieza de la tecla para poder realizar una comparativa entre ambos prototipos. Además del análisis de la tecla, incluyendo la carga proporcionada por el resorte una vez que la tecla se encuentra totalmente pulsada.

3.5.1 Análisis de esfuerzos del prototipo C de una tecla

Para el análisis de la pieza de la base se distribuyó la carga de 100 [kg] sobre los 12 soportes de la siguiente manera:

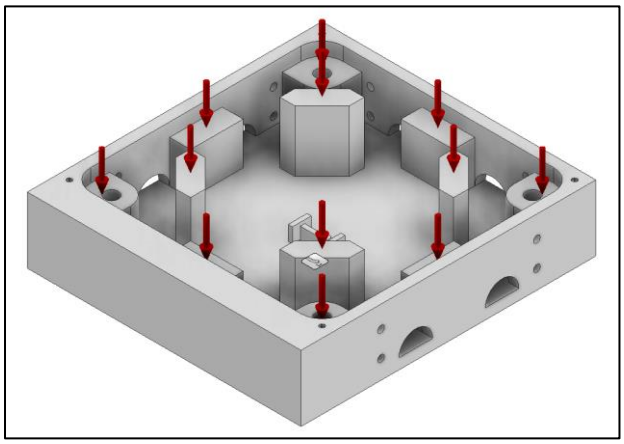


Figura 112. Distribución de la carga sobre la base del prototipo C.

Y al igual que en los prototipos anteriores, se obtuvieron las gráficas de esfuerzos de Von Mises y de desplazamientos.

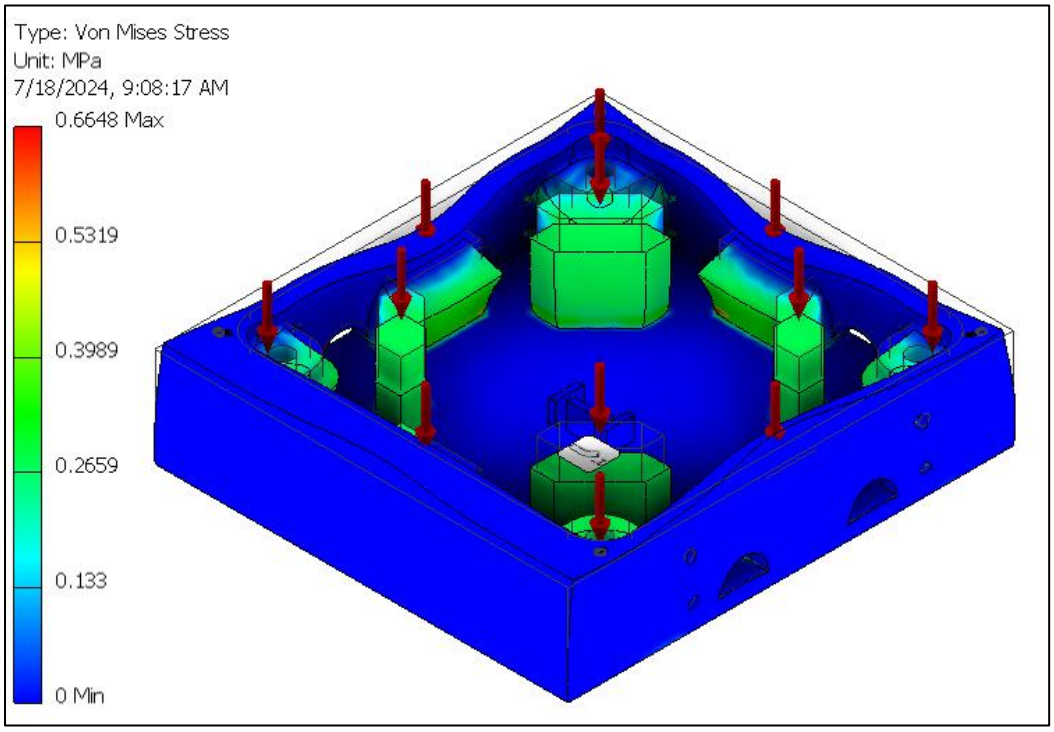


Figura 113. Esfuerzos de Von Mises sobre la base del prototipo C.

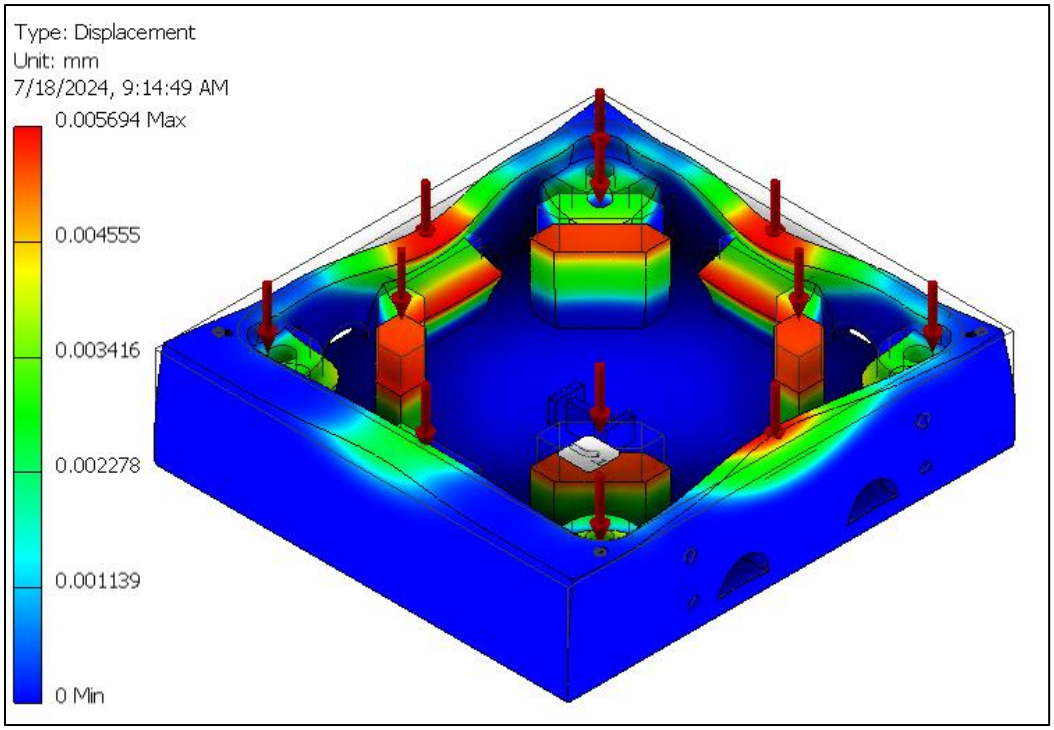


Figura 114. Desplazamientos sobre la base del prototipo C.

De acuerdo con la gráfica de esfuerzos de Von Mises el esfuerzo máximo que se encuentra en la base es de 0.6648 [MPa], de lo cual se tiene el siguiente factor de seguridad para la pieza:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{base} = \frac{38.5\ [MPa]}{0.6648\ [MPa]} = 57.91$$

Un factor de seguridad mayor al que posee la base del prototipo B de 40.65.

Y como desplazamiento máximo se tiene un valor de 0.005 [mm], menor a los 0.008 [mm] del prototipo B.

Por lo tanto, en ambos parámetros se tuvo una mejora al implementar los 4 soportes centrales en la pieza de la base, con un factor de seguridad aún mayor al que ya se tenía en el prototipo B, así como un desplazamiento menor que de igual forma sigue siendo insignificante.

Para la pieza de la tecla, se incluyó la fuerza de 22.404 [N] que ejerce el resorte sobre la tecla y se distribuyeron ambas fuerzas tal como se puede observar en la siguiente figura:

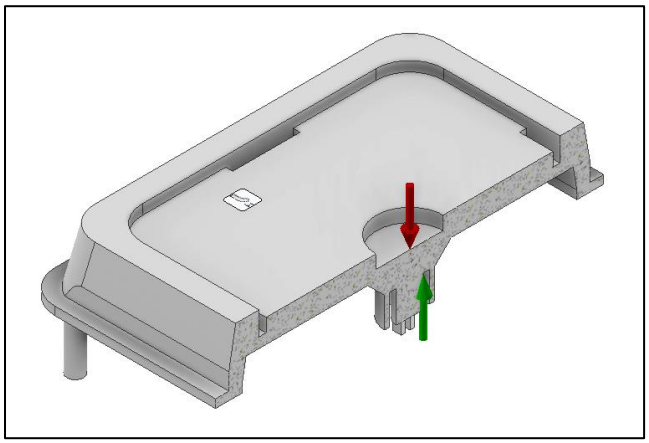


Figura 115. Distribución de las cargas sobre la tecla del prototipo C.

Nuevamente se obtuvieron las gráficas de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos.

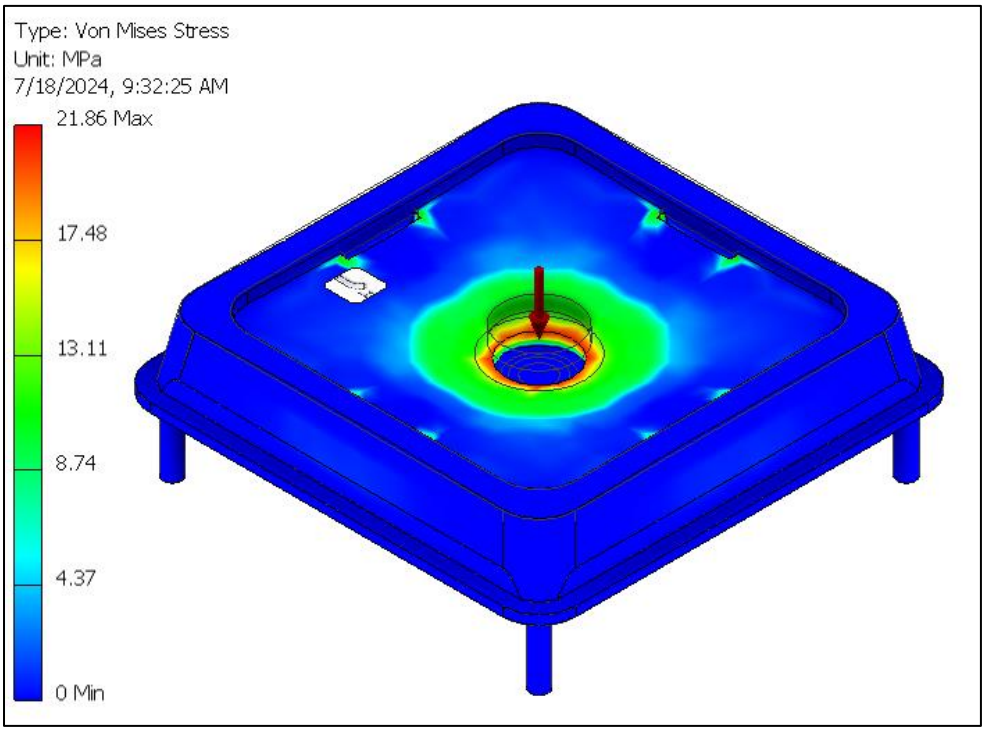


Figura 116. Esfuerzos de Von Mises sobre la tecla del prototipo C.

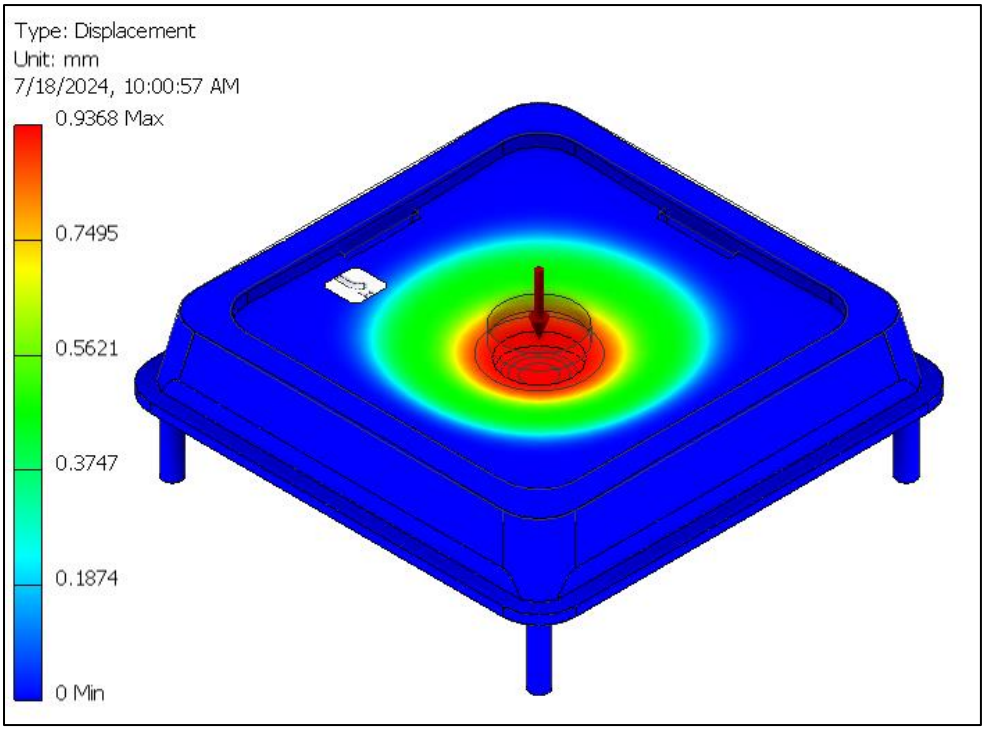


Figura 117. Desplazamientos sobre la tecla del prototipo C.

De la primera gráfica de esfuerzos se tiene como valor máximo 21.86 [MPa] y por ende el siguiente factor de seguridad para la pieza de la tecla:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{tecla} = \frac{38.5\ [MPa]}{21.86\ [MPa]} = 1.76$$

Un valor ligeramente mayor al factor de seguridad de 1.72 obtenido en el análisis del prototipo B, ya que ahora sí fue considerada la fuerza ejercida por el resorte.

Mientras que en el desplazamiento se tuvo una reducción de 0.95 [mm] a 0.93 [mm], una diferencia prácticamente nula para el funcionamiento de la tecla.

Por último, para el ensamble de la tecla y la base se distribuyó la carga de 100 [kg] sobre la tecla, así como la fuerza ejercida por el resorte y se obtuvieron ambas gráficas de esfuerzos y desplazamientos.

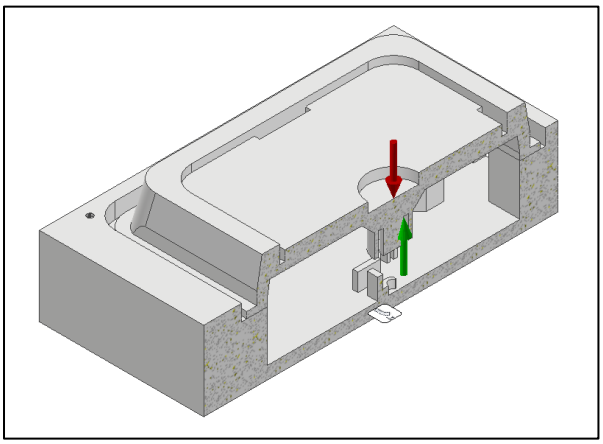


Figura 118. Distribución de las cargas sobre la tecla y base del prototipo C.

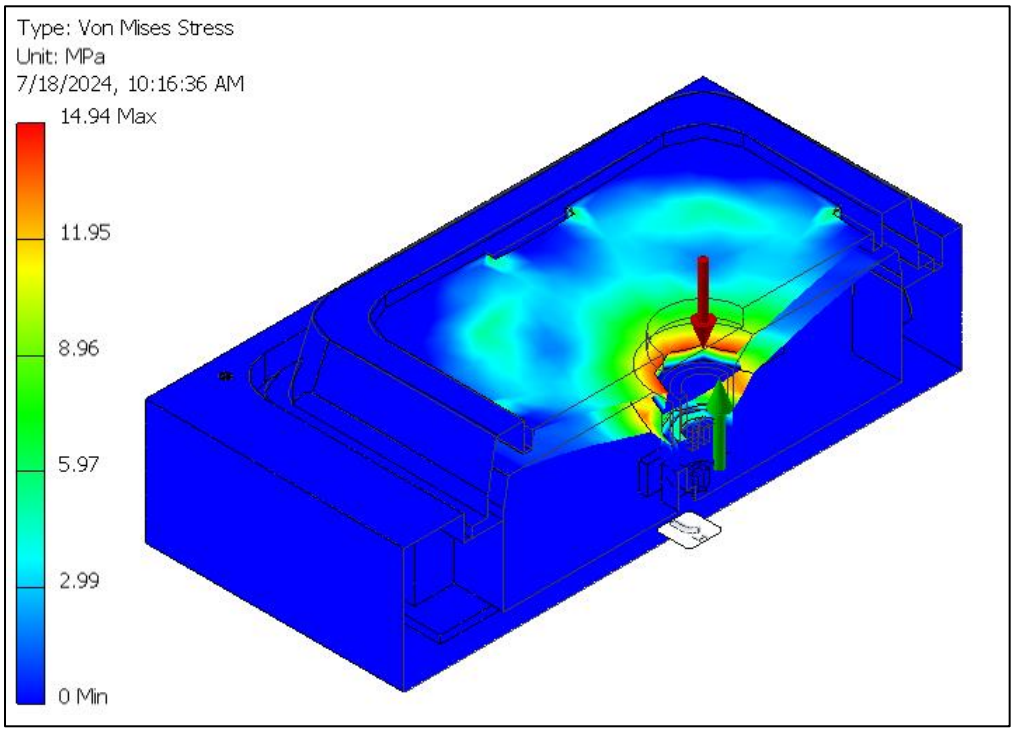


Figura 119. Esfuerzos de Von Mises sobre la tecla y base del prototipo C.

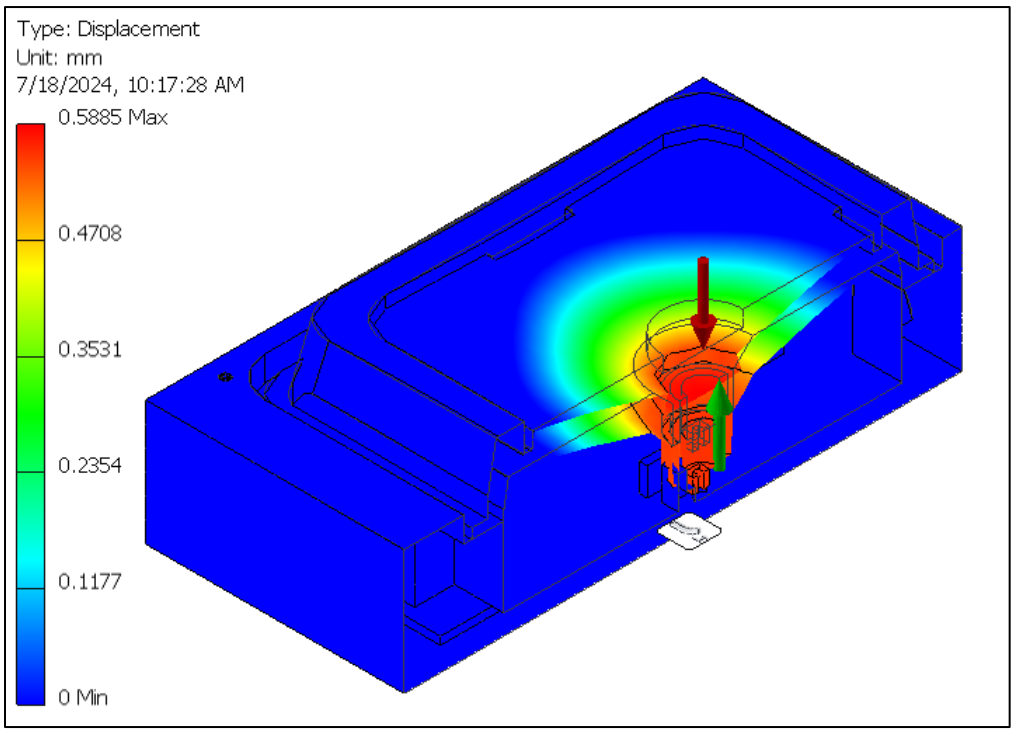


Figura 120. Desplazamientos sobre la tecla y base del prototipo B.

Finalmente, para el ensamble de ambas piezas se tiene un esfuerzo máximo de 14.94 [MPa] con el siguiente factor de seguridad:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{ensamble} = \frac{38.5\ [MPa]}{14.94\ [MPa]} = 2.58$$

Cuyo valor es superior al factor de seguridad de 2.04 del prototipo B y que incluso es superior al rango de entre 1.5 a 2.5 propuesto inicialmente.

Mientras que el desplazamiento máximo presenta una reducción considerable de 1.01 [mm] a 0.59 [mm].

Por ende, se pudo observar que la implementación de los 4 soportes centrales permite una reducción de esfuerzos y desplazamientos sobre las piezas y aumenta notoriamente el factor de seguridad del módulo.

Es así como se justificó la implementación de los 4 soportes sobre la pieza de la base y, por lo tanto, la composición de las 6 piezas del módulo 6.

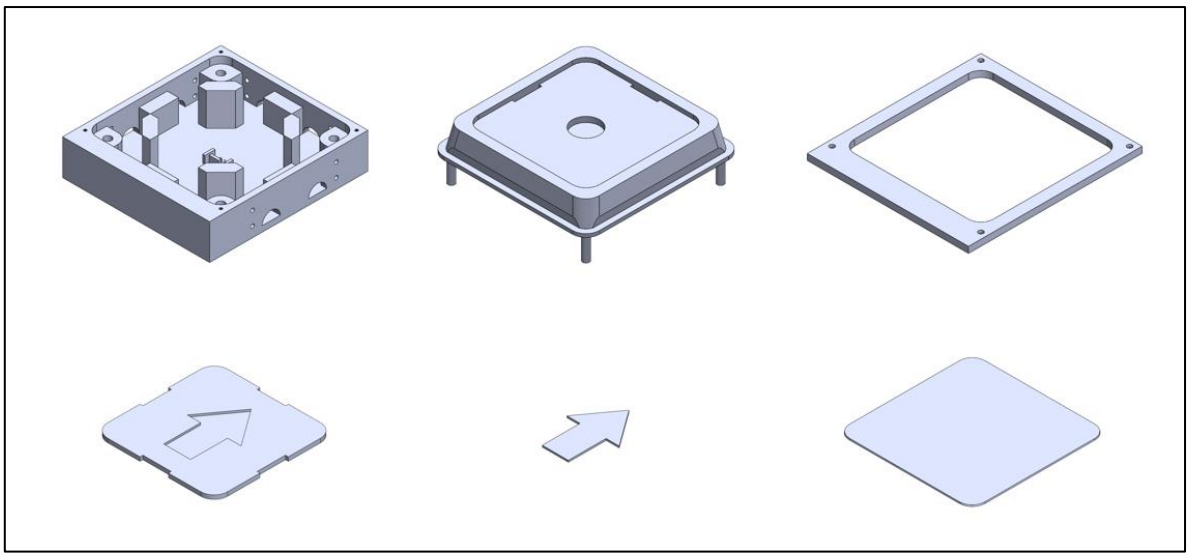


Figura 121. Piezas del prototipo C de una tecla.

3.5.2 Evaluación del prototipo C de una tecla

Para la manufactura de las piezas del prototipo C, se optó por utilizar los materiales que se iban a emplear finalmente para el teclado y así poder comprobar el funcionamiento de la tecla bajo todas las condiciones reales; por lo tanto, las piezas de la base, tecla, placa con logotipo y retenedor fueron manufacturadas con PETG color negro, el logotipo con PLA color blanco y el retenedor con TPU color transparente.

Se realizaron las mismas pruebas a las que se sometió el prototipo B, cumpliendo todas de manera satisfactoria y además se verificó que de manera real pudiera soportar la carga de 100 [kg] propuesta en los análisis de esfuerzos.

Para esta prueba una persona de 70 [kg] de peso se paró con un solo pie sobre el módulo mientras cargaba un garrafón de 20 [L] (20 [kg]), es decir, 90 [kg] de peso en total, muy aproximado a los 100 [kg] de las simulaciones.

Figura 122. Prueba experimental sobre el prototipo C (módulo 6).

Durante y posterior a la prueba se pudo observar que el módulo soportaba sin alguna complicación la carga de 90 [kg] y se podía repetir en diversas ocasiones sin modificar los resultados. Por ende, el módulo cumplió con la prueba y el funcionamiento de la tecla se justificó totalmente en cuanto a la composición de las piezas, área de pulsación, carga soportada y materiales, dando paso a la posibilidad de modelar el resto de los módulos del teclado tomando como base el prototipo C.

3.6 Modelado del teclado

Una vez verificado el funcionamiento del módulo 6, se procedió a modelar de manera simultánea el resto de los 7 módulos.

Dado que cada módulo está conformado por 6 partes: base, tecla, placa con logotipo, logotipo, retenedor y recubrimiento, se asignó un número a cada una de estas partes y un subíndice para distinguir a que parte y módulo correspondía cada una de las piezas del teclado. De tal modo que se asignaron los siguientes números a las partes de cada módulo:

1. Base.
2. Tecla.
3. Placa con logotipo.
4. Logotipo.
5. Retenedor.
6. Recubrimiento.

Y se asignó el siguiente formato para nombrar a cada pieza: *Pieza NúmParte.NúmMódulo*

Es decir, a la pieza de la base del módulo 6 le corresponde el nombre de “Pieza 1.6”.

3.6.1 Piezas de bases

De manera inicial, se realizaron todas las piezas correspondientes a las bases de los módulos, replicando el interior del módulo 6 para todas las piezas y teniendo modificaciones de espesor de pared para aquellas paredes que se encuentran en algún lateral del teclado y así contar con los 15 [mm] de espesor deseados.

Para los módulos 1-4 se tuvo que incluir el espacio destinado a la electrónica del teclado y se agregaron soportes con el mismo espesor de 10 [mm] que poseen las paredes que se encuentran entre los módulos; 3 de estos soportes se situaron entre las 3 divisiones que se tienen en los 4 módulos para tener la misma continuidad de las paredes, además de 2 soportes adicionales en los módulos 1 y 4, alineados de manera vertical con los soportes de los interruptores, ya que se deseaba implementar en el apartado de electrónica un LED indicador del estado del teclado, de modo que pudiera colocarse en alguno de estos 2 soportes.

Una funcionalidad que se deseó dar al teclado fue la de “bloquear lectura” para asemejar la manera en la que los teclados convencionales bloquean la pulsación de teclas, mediante un botón con enclavamiento que al estar activado impidiera que las señales de pulsación de las teclas pudieran ser leídas y, por ende, no fueran reflejadas en la computadora, así que el LED indicador sería el encargado de mostrar de manera visual si el teclado se encuentra bloqueado.

En la parte inferior de los soportes del espacio de electrónica, también se colocaron orificios que permitieran el paso de los tornillos M3 de ensamble de los módulos y se realizaron cortes similares a los semicírculos de las paredes de los módulos para permitir el paso del cableado de los interruptores, tal como se muestra a continuación en la figura 124.

De igual forma, se agregaron los orificios roscados de los tornillos para los retenedores en cada uno de los módulos; para los módulos 5-8 solo se tienen 4 orificios como las propuestas desde el prototipo B, mientras que para los módulos 1-4 se optó por 6 orificios, debido a que las piezas de los retenedores son más amplias y deben lograr cubrir el espacio de electrónica; sin embargo, dado que se deseaba que el cable USB Tipo A – micro USB de la función de “energizar” y “comunicar periférico – computadora” se encontrara en la parte superior central del teclado, los 2 orificios que se encontraban en esta zona fueron desplazados lateralmente para permitir que el cable pudiera ser colocado sin algún inconveniente.

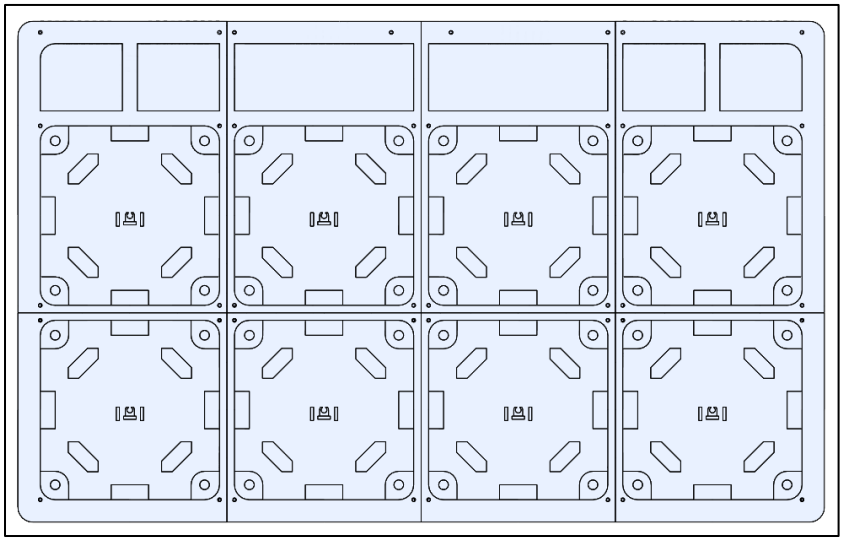


Figura 123. Vista superior de las piezas preliminares de las bases de los módulos.

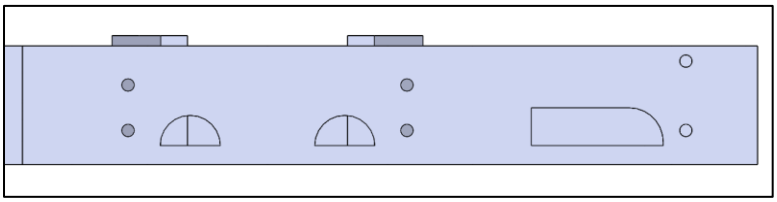


Figura 124. Orificios adicionales de ensamble y corte para el paso de cables de los módulos 1-4.

Además, ya que se trata de un teclado con una geometría rectangular de 540 [mm] de largo y 335 [mm] de ancho, es posible transportarlo al utilizar ambas manos; sin embargo, para una persona con una discapacidad unilateral de miembro superior esta labor podría ser problemática, por lo que se optó por incluir una agarradera en la parte superior del teclado para que pudiera ser transportado utilizando únicamente una mano.

Para la agarradera se tomaron como referencia las que poseen los portafolios de oficina, de los cuales se pudo apreciar que tienen geometrías semicirculares con ángulos cercanos a 90° en las esquinas y que son fijadas al portafolio mediante piezas metálicas que disponen de orificios circulares en los cuales se introduce algún elemento de sujeción.

Figura 125. Agarraderas de portafolio.

Con base en ello, para la agarradera del teclado se propuso que esta tuviera una sección transversal uniforme con una geometría circular de 20 [mm] de diámetro a lo largo de toda la pieza, con ángulos rectos en las esquinas y que ambas zonas de fijación se encontraran alineadas con los soportes de los interruptores de los módulos 2 y 3.

La distancia de separación entre el teclado y el eje de la agarradera es de 60 [mm] y se optó de igual manera por utilizar tornillos para la fijación hacia los módulos del teclado, por lo que en los extremos inferiores de la agarradera se colocaron 2 segmentos en forma de "T" que permitieran el paso de 2 tornillos en cada uno de los segmentos, de tal modo que los segmentos en forma de "T" se encontraran en el interior de los módulos 2 y 3 en el espacio de electrónica, por lo que fue necesario realizar 2 cortes rectangulares en dichos módulos de la siguiente manera:

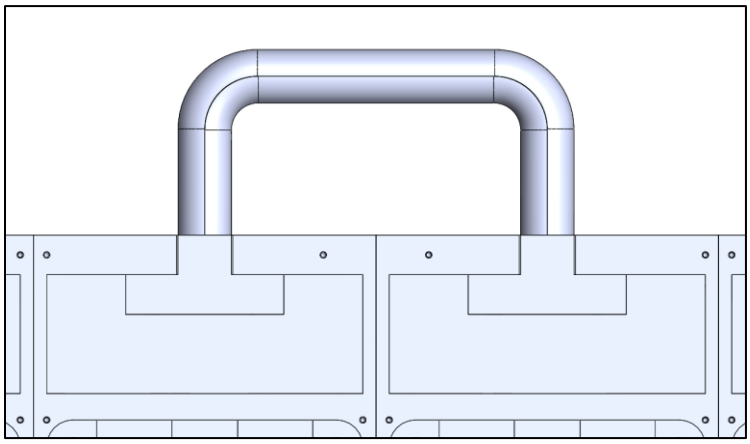


Figura 126. Agarradera colocada sobre los módulos 2 y 3.

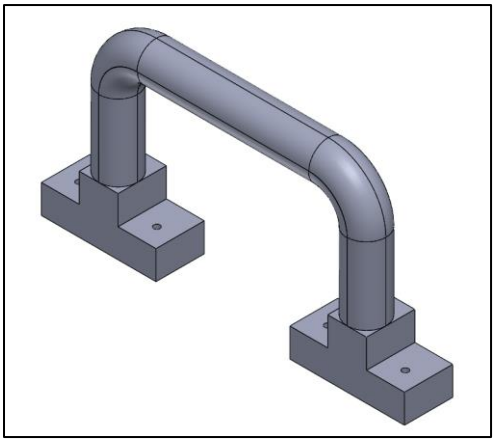


Figura 127. Agarradera del teclado.

Los tornillos utilizados fueron de acero inoxidable de 3 [mm] de diámetro, al igual que los utilizados en las piezas de las bases, pero de 40 [mm] de longitud y sus respectivas tuercas.

Figura 128. Tornillos M3x40 y tuercas M3.

Por lo tanto, para la pieza de la agarradera también fue necesario realizar un análisis de esfuerzos para garantizar que sería capaz de soportar el peso del teclado. Para ello se realizó el ensamble de la agarradera con los módulos 2 y 3 y se aplicó una fuerza de 10 [kg] distribuida sobre los 2 módulos para simular una fuerza mayor al peso del teclado. De igual forma, el material de manufactura para la agarradera fue PETG.

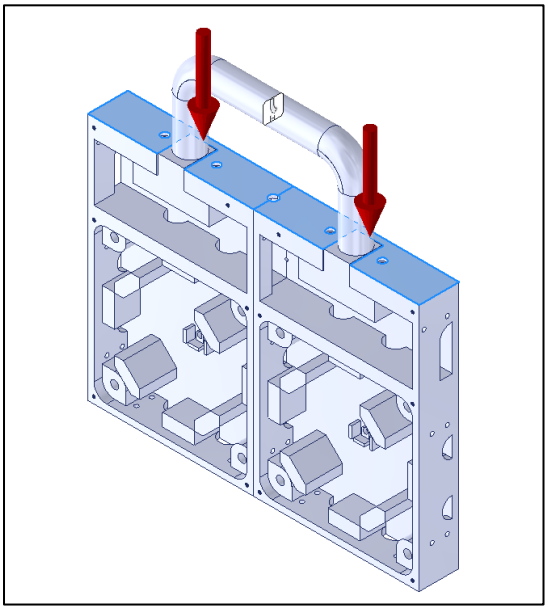


Figura 129. Distribución de la carga sobre la agarradera y los módulos 2 y 3.

De donde se obtuvieron las gráficas de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos.

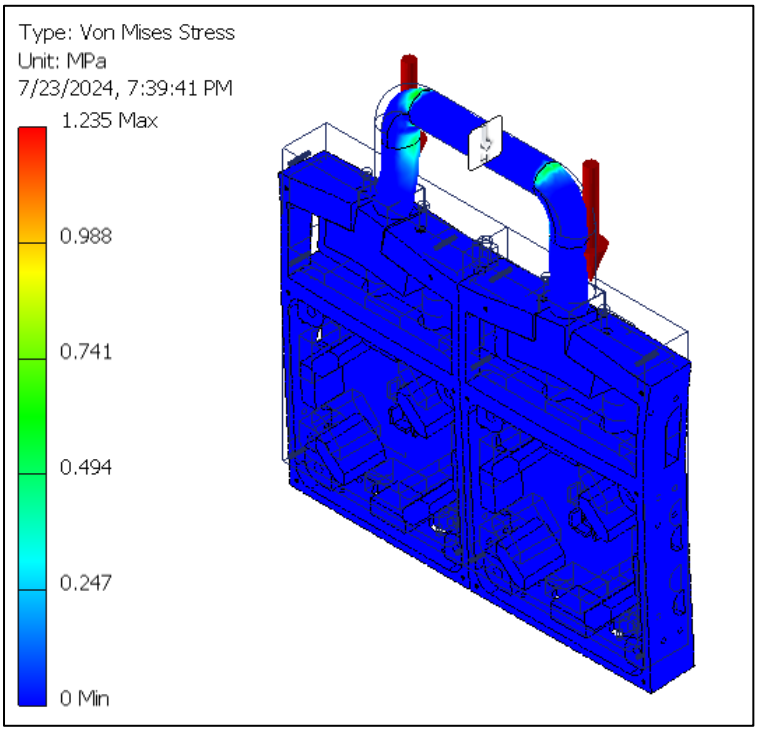


Figura 130. Esfuerzos de Von Mises sobre la agarradera y los módulos 2 y 3.

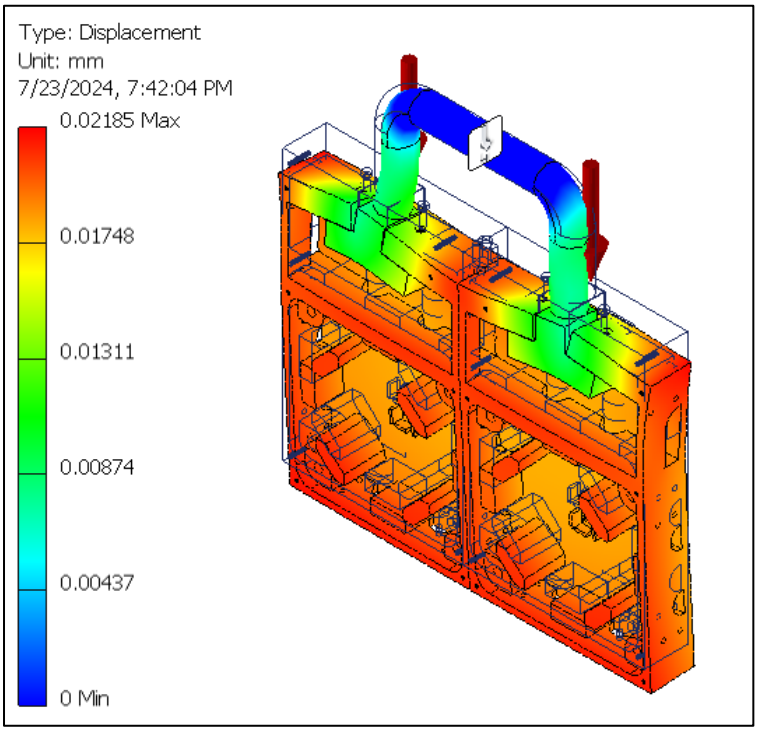


Figura 131. Desplazamientos sobre la agarradera y los módulos 2 y 3.

Tomando los valores de la primera gráfica, el esfuerzo máximo presentado es de 1.235 [MPa], por lo tanto, el factor de seguridad es el siguiente:

$$FS = \frac{\sigma_{PETG}}{\sigma_{max}}$$

$$FS_{ensamble} = \frac{38.5\ [MPa]}{1.235\ [MPa]} = 31.17$$

Es decir que supera con creces el rango deseado de entre 1.5 y 2.5.

A su vez, se tiene un desplazamiento máximo de 0.022 [mm], valor que es insignificante al momento de cargar el teclado. Con base en ambos resultados, se determinó que la agarradera era apropiada para soportar incluso un peso mayor al que tendría el teclado finalmente.

Por otro lado, en la parte posterior de los módulos 1-4 se realizaron diversos cortes; los primeros de ellos se realizaron en los módulos 2 y 3, siendo estos los correspondientes a los 2 realizados por las agarraderas como se mencionó anteriormente, 4 orificios de 3.3 [mm] para los tornillos M3 de fijación de la agarradera y uno más de 7 [mm] de diámetro que se encuentra situado entre ambos módulos para permitir el paso del cable USB que va conectado hacia el microcontrolador. Mientras que a lo largo de los módulos 1 y 4 se agregaron rejillas cuya función es permitir el paso del aire hacia el interior del teclado y así lograr mantenerlo a una temperatura ambiente, para ello se alternaron paredes y cortes con espesores de 2.5 [mm] y una inclinación de 45° a lo largo de dichos módulos.

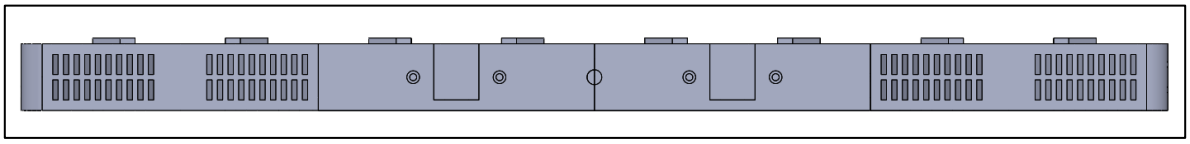


Figura 132. Vista posterior de los módulos 1-4 del teclado.

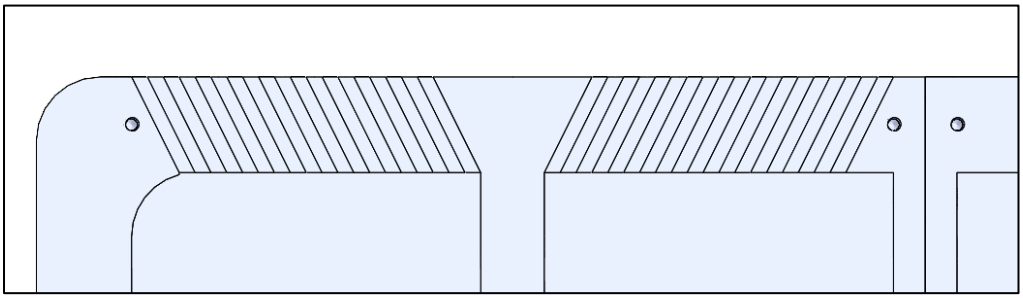


Figura 133. Vista de sección de la rejilla del módulo 1.

Dado que la tarjeta Pro Micro sería colocada de tal modo que el cable USB se encontrara a una altura centrada, se realizó una pieza que actuara como soporte de la tarjeta, la cual posee una geometría de prisma rectangular con un largo de 45 [mm], igual a la longitud del espacio de electrónica, 13 [mm] de ancho, correspondiente a la distancia de separación de los cabezales de la tarjeta, y 7.5 [mm] de altura para que la tarjeta se encuentre alineada con el orificio del cable.

El soporte cuenta con un orificio de 3.3 [mm] que permite el paso de los cables de un lado a otro de la tarjeta.

Para la fijación del soporte a las bases se realizaron 2 orificios roscados en la parte inferior del soporte para tornillos M2 como los de los retenedores y a su vez se realizaron los orificios correspondientes en los módulos 2 y 3 para el paso de los tornillos.

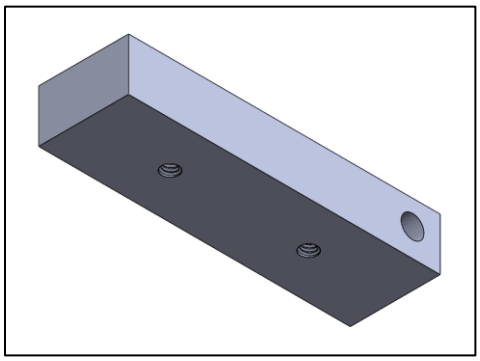


Figura 134. Vista isométrica inferior del soporte para la tarjeta Pro Micro.

Para las almohadillas deslizantes del teclado, en la parte inferior de las piezas de las bases se colocaron 12 cavidades cuadradas de 21 [mm] de lado y 2 [mm] de profundidad para que 0.5 [mm] del espesor de las almohadillas sobresalieran del teclado. Estas 12 cavidades fueron distribuidas de manera uniforme a lo largo de una cuadrilla de 510 [mm] de largo y 305 [mm] de ancho, por lo que los módulos 1-4 contaban con 2 cavidades y los módulos 5-8 únicamente con 1.

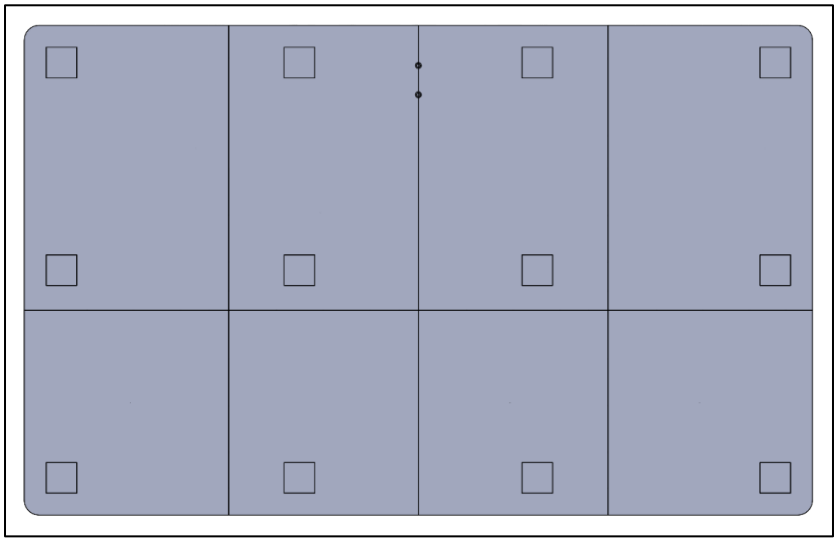


Figura 135. Vista inferior de las piezas de las bases de los módulos.

Por último, para las piezas de las bases, a los módulos laterales 1, 4, 5 y 8 se les realizó un par de cortes rectangulares a cada uno de ellos con un propósito decorativo, el cual consistía en incluir tiras blancas a los costados del teclado. Estos cortes tienen un espesor de 2.5 [mm] y una profundidad de 1.5 [mm], mientras que las tiras cuentan con la reducción en los laterales de 0.5 [mm] que poseen todas las piezas que requieren ser introducidas sobre una cavidad, por lo que su espesor es de 1.5 [mm] y su altura de 1.25 [mm] para que la tira estuviera introducida totalmente en la cavidad con un espacio sobrante de 0.25 [mm].

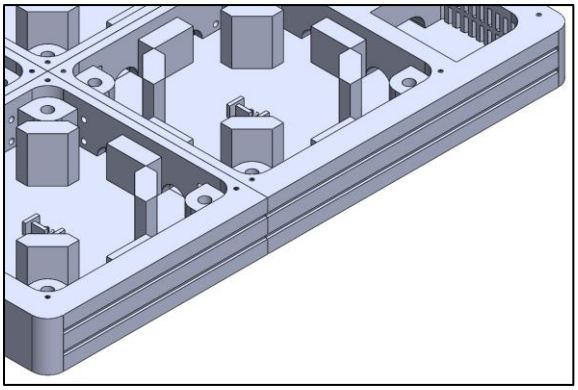


Figura 136. Cavidades laterales de los módulos.

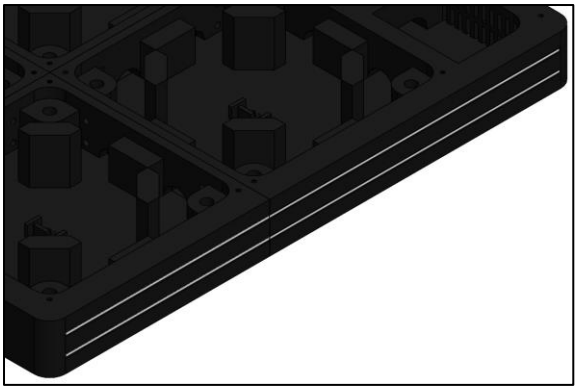


Figura 137. Líneas decorativas laterales.

Finalmente, las piezas de las bases de los módulos resultaron del siguiente modo:

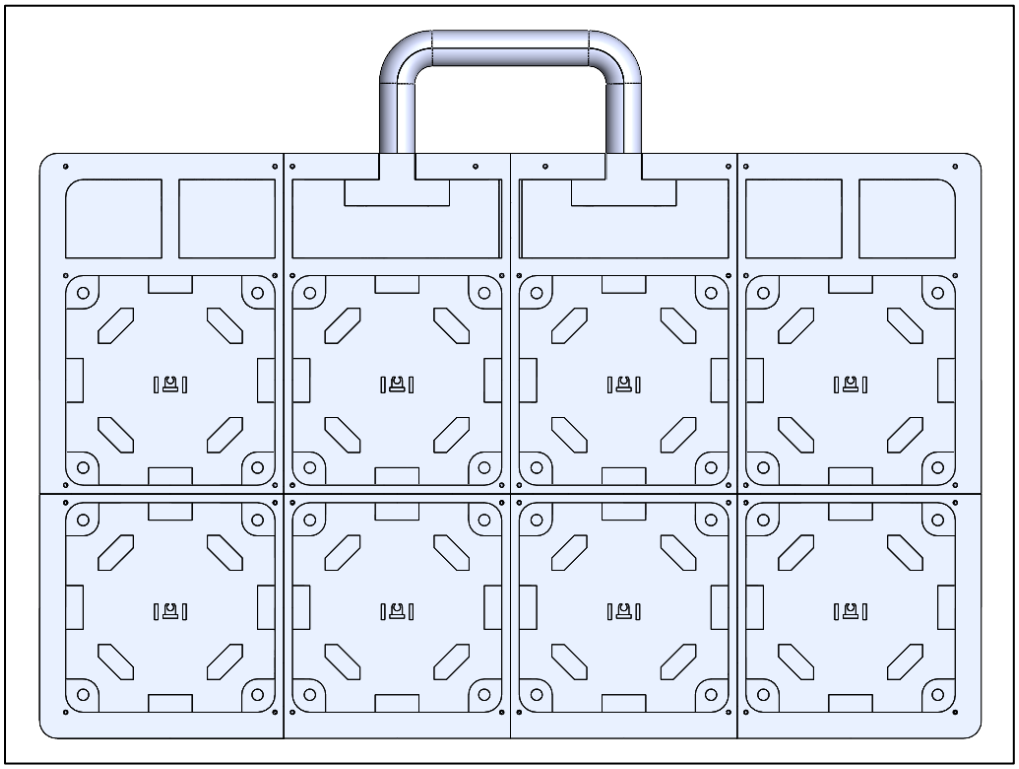


Figura 138. Piezas ensambladas de las bases de los módulos.

3.6.2 Piezas de teclas

Debido a que todos los módulos cuentan con el interior de las piezas de bases idénticas para tener el mismo funcionamiento en cada uno de ellos, en los 8 módulos se tienen piezas idénticas de las teclas modeladas previamente.

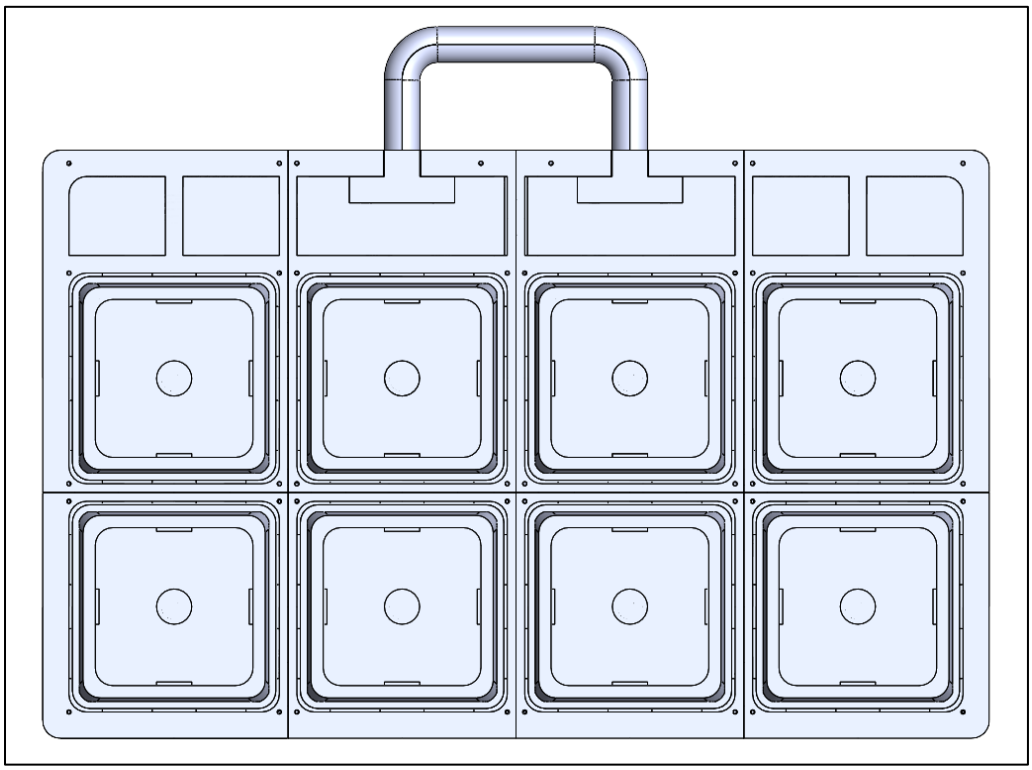


Figura 139. Piezas ensambladas de las teclas de los módulos.

3.6.3 Piezas de placas con logotipo

Para las placas se tomó como base la pieza que no contaba con la cavidad correspondiente a algún logotipo y se realizaron bocetos sobre ella para realizar dichas cavidades.

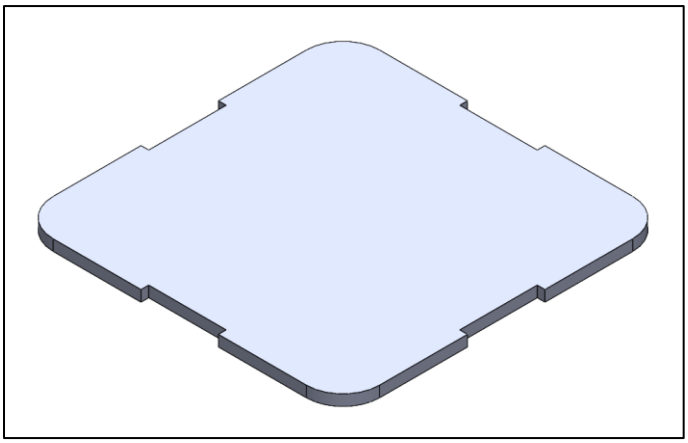


Figura 140. Placa sin logotipo.

En los prototipos A, B y C se había utilizado inicialmente el logotipo de una flecha para representar algún tipo de movimiento de desplazamiento sobre el videojuego; sin embargo, esto solo fue a manera de ejemplo, ya que al momento de jugar con un teclado convencional los movimientos siempre son asignados a alguna tecla con un símbolo de letra, número o carácter especial.

Recapitulando las acciones más frecuentes presentadas dentro de los videojuegos de disparos de la tabla 28, y considerando que el teclado finalmente cuenta con 8 teclas en lugar de 9, estas son las acciones y sus respectivas teclas con las cuales vienen asignadas de manera predeterminada en un teclado convencional:

Acción	Tecla asignada
Desplazarse hacia adelante	W
Desplazarse hacia atrás	S
Desplazarse hacia la izquierda	A
Desplazarse hacia la derecha	D
Saltar	Barra espaciadora
Agacharse	LCtrl
Recargar	R
Correr	LShift

Tabla 51. Teclas finales con las que cuenta el teclado.

Para ello se propusieron 2 arreglos distintos de placas para representar estas teclas; el primero de ellos consistía en realizar 8 placas que tuvieran un logotipo representativo de la acción, es decir, para representar las acciones de desplazamiento, se utilizaron flechas como las empleadas en los prototipos anteriores, para la acción de “recargar” una flecha circular, mientras que para las acciones de “agacharse”, “saltar” y “correr” fue mediante muñecos de palos que representaran la acción, haciendo de este modo más visual y llamativa la acción que se busca realizar al pulsar cada tecla.

Por otro lado, la segunda propuesta se basaba en realizar sobre las placas los logotipos de las mismas teclas que tienen estas acciones asignadas de manera predeterminada en un teclado convencional. Una ventaja que esto supone es que, en caso de desear emplear el teclado para asignar una acción más específica dentro de algún videojuego de otro género, la tecla no tendría un logotipo predeterminado para representar de manera visual otra acción y únicamente correspondería a una letra o un carácter que puede ser asignada de manera indistinta a cualquier otro tipo de acción.

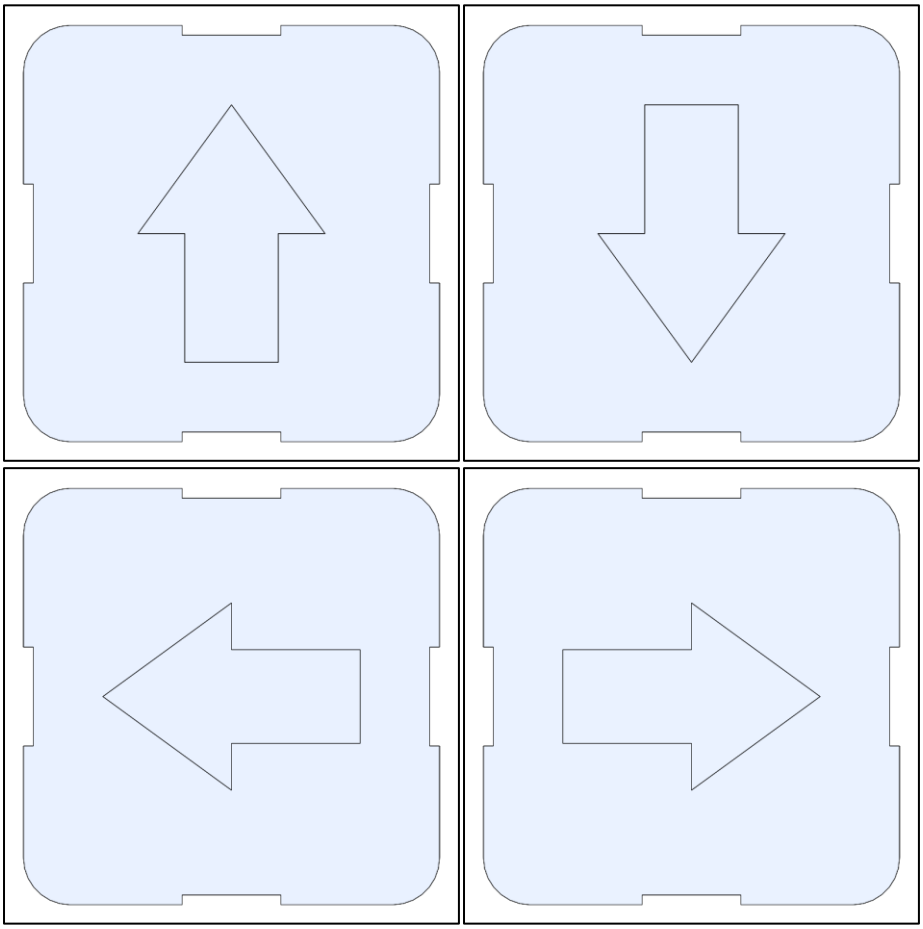
Ya que las teclas tienen la funcionalidad de poder intercambiar la placa con el logotipo del modo que se prefiera, se decidió realizar ambos arreglos de placas para que pudieran ser empleados de acuerdo con cómo se deseara. Dando como resultado un total de 16 placas.

Para todas las 16 placas, se realizaron cavidades con la forma del logotipo correspondiente y una profundidad de 1.5 [mm] en la que sería introducido el logotipo.

Primero se realizaron las placas de logotipos representativos de las acciones. Para las acciones de desplazamiento se utilizaron las mismas flechas modeladas para los prototipos y se realizaron 4 placas idénticas para estas; la acción de “recargar” se representó mediante una flecha circular de ¾ de vuelta que apunta hacia la izquierda en sentido antihorario, mientras que para las acciones de “agacharse”, “saltar” y “correr” se tomaron como referencia las siguientes imágenes:

Figura 141. Logotipos de referencia para las acciones de “agacharse”, “saltar” y “correr”.

Resultando en las siguientes 8 placas con logotipos:



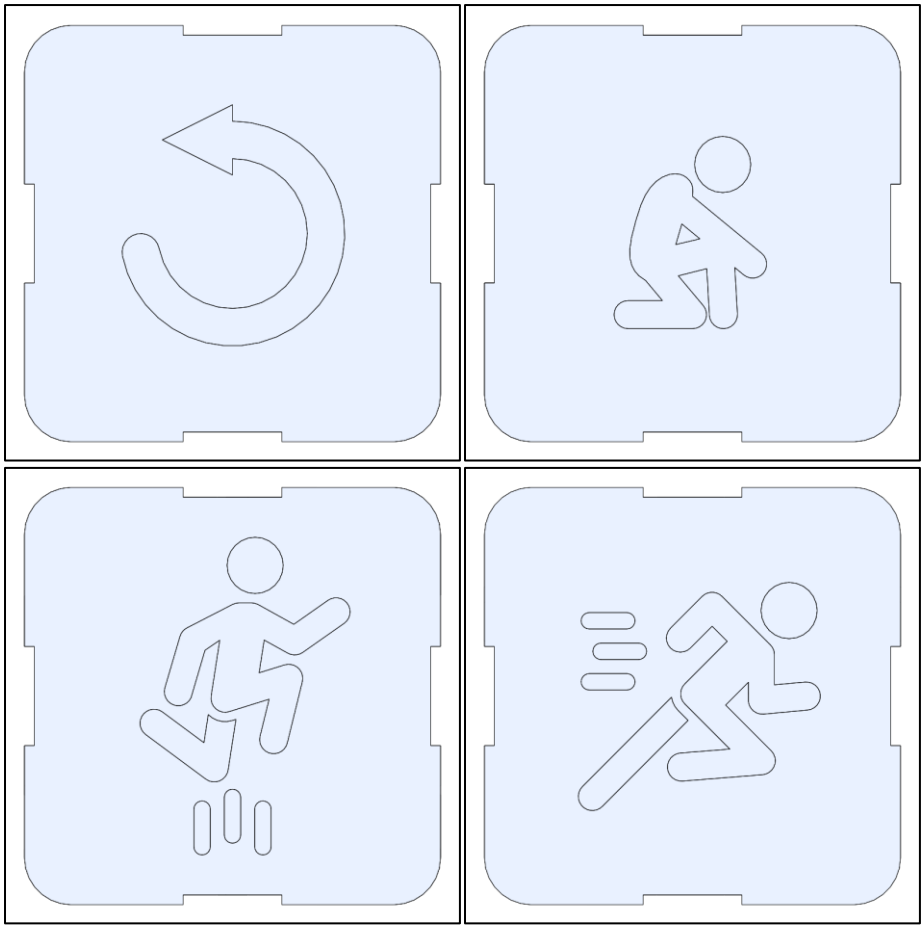
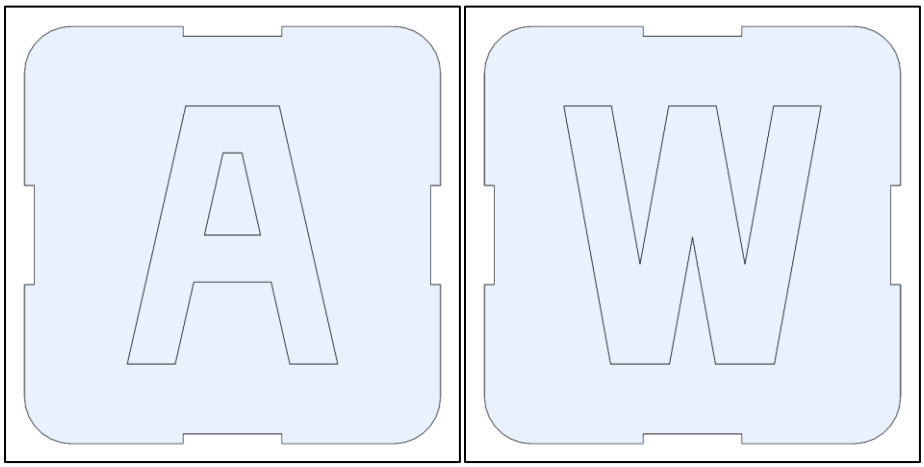


Figura 142. Piezas de las placas con logotipos del arreglo de acciones.

Por último, para el arreglo de letras y símbolos del teclado convencional, se realizaron sobre las placas las letras correspondientes a las acciones de la tabla 51, es decir, “A”, “W”, “S”, “D” y “R”, y a su vez los símbolos de la tecla “Shift” representada mediante una flecha corta hacia arriba, la barra espaciadora por una barra horizontal que cuenta con 2 sobresalientes en la parte superior y la tecla “Ctrl” empleando estas mismas letras, dando como resultado las siguientes 8 placas:



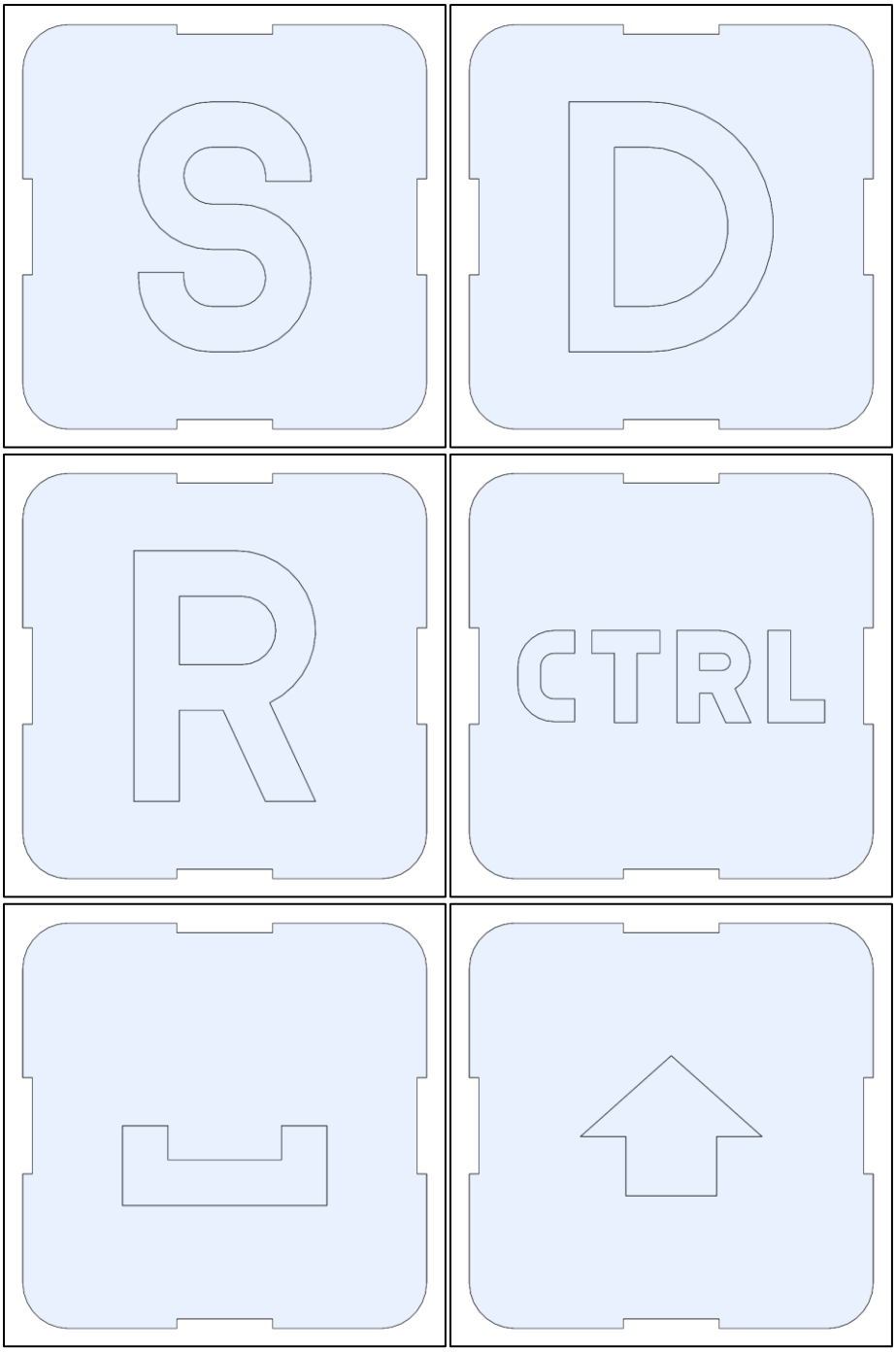


Figura 143. Piezas de las placas con logotipos del arreglo de letras y símbolos.

Finalmente, se propuso una configuración preliminar para las teclas únicamente para establecer un número de pieza a cada una de las placas y poder realizar pruebas del funcionamiento del teclado a partir de ella.

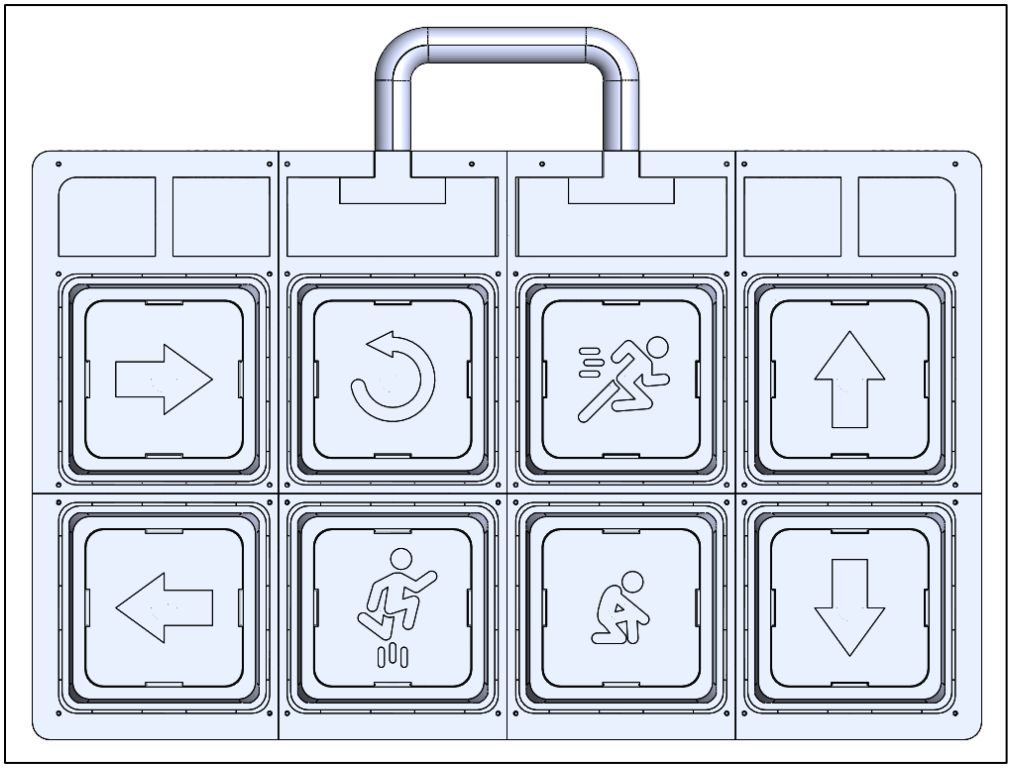


Figura 144. Piezas ensambladas de las placas con logotipo del arreglo de acciones.

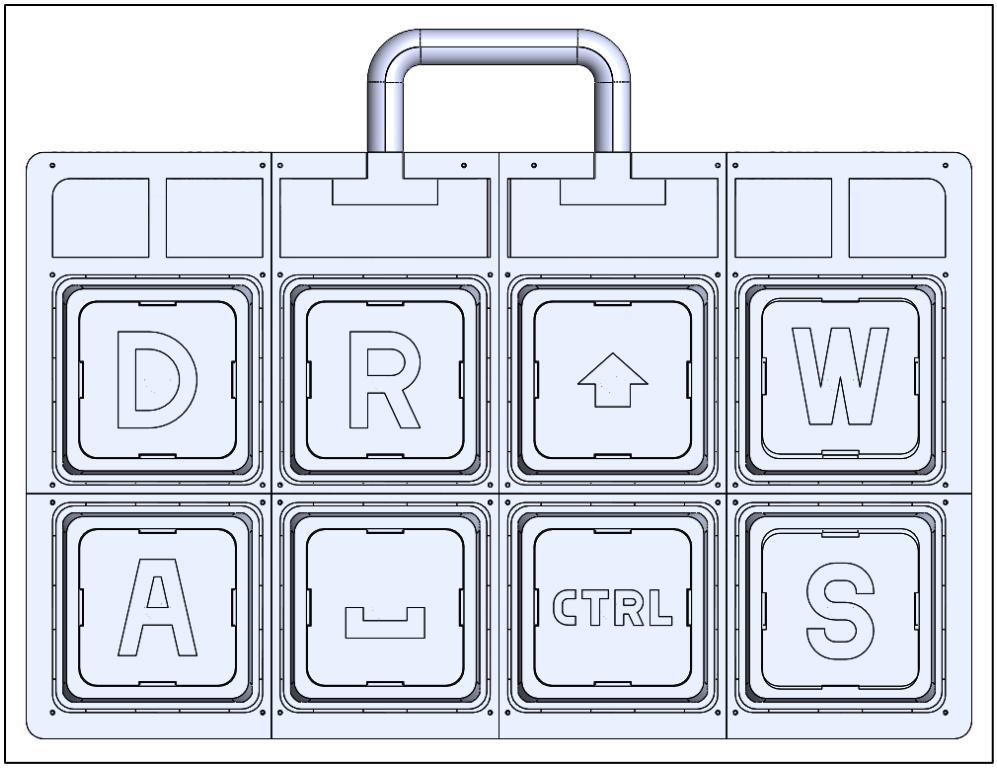
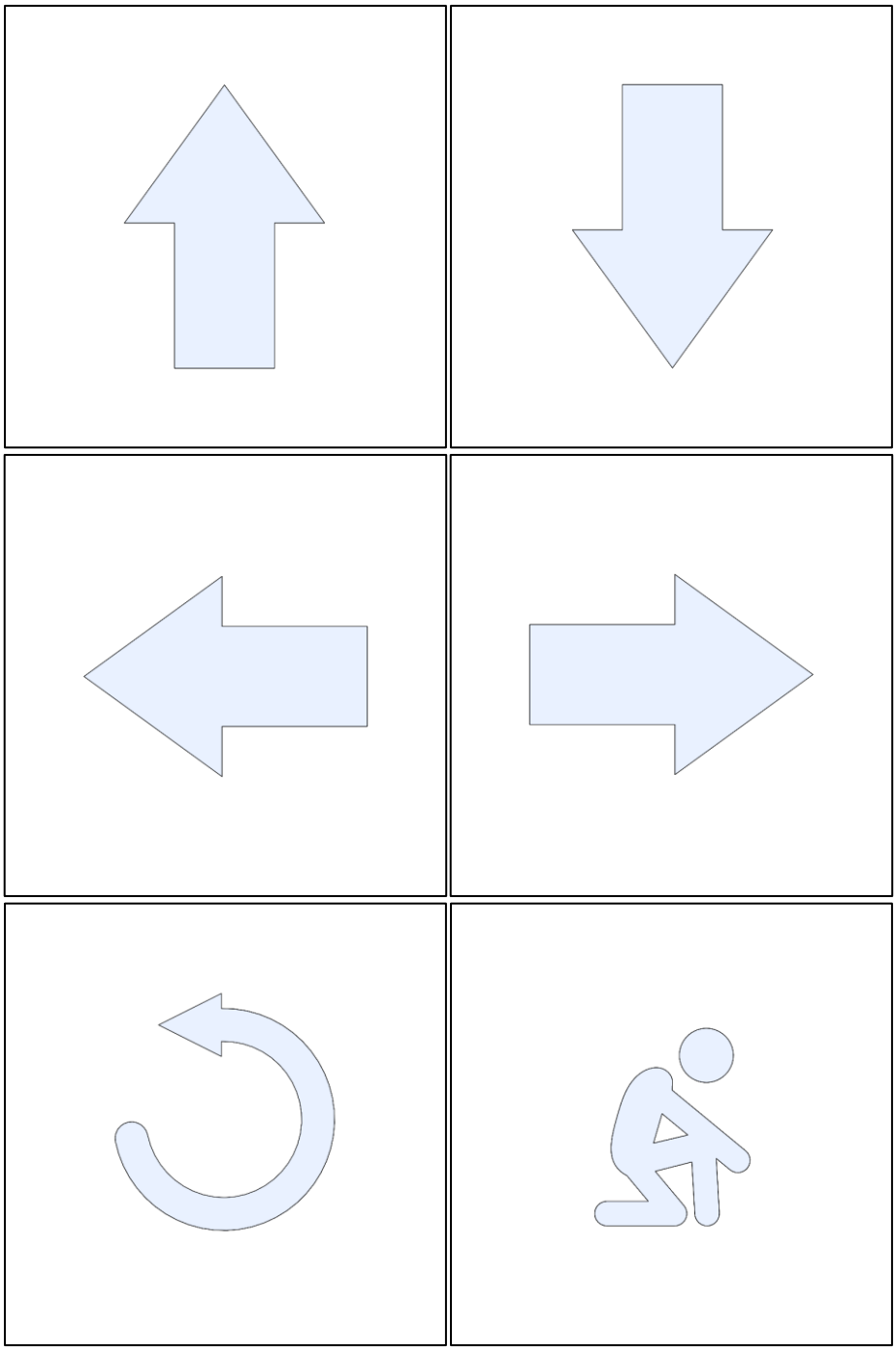


Figura 145. Piezas ensambladas de las placas con logotipo del arreglo de letras y símbolos.

3.6.4 Piezas de logotipos

En cuanto a los logotipos, se modelaron tomando como base las cavidades de las placas y se realizaron ambos arreglos. Para ello se tomó en cuenta la reducción de 0.5 [mm] en cada uno de los lados de la cavidad y se replicó cada una de las geometrías para obtener las piezas y se les asignó 1.25 [mm] de espesor al igual que las líneas decorativas de las bases.

Primero se realizaron los logotipos correspondientes al arreglo de acciones:



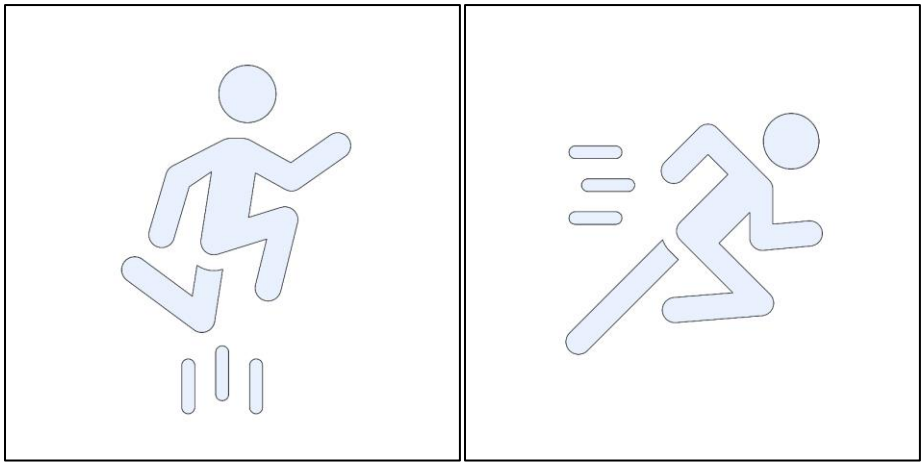
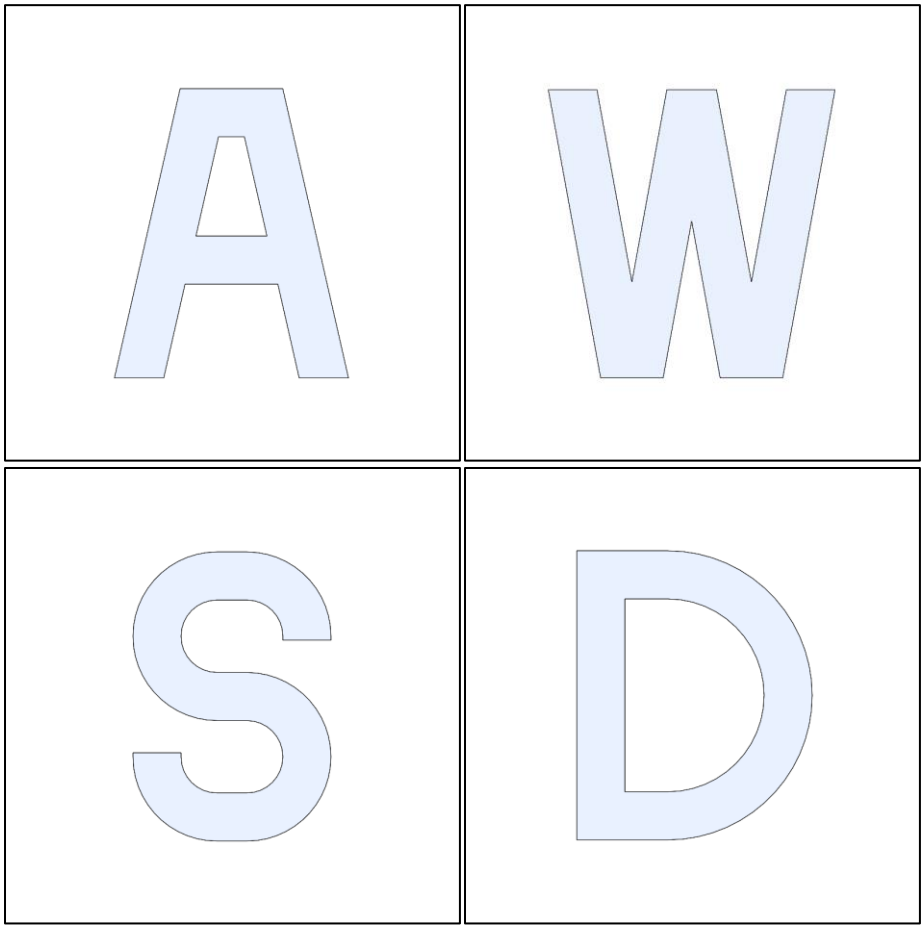


Figura 146. Piezas de los logotipos del arreglo de acciones.

Posteriormente, se realizaron los logotipos del arreglo de letras y símbolos de un teclado convencional:



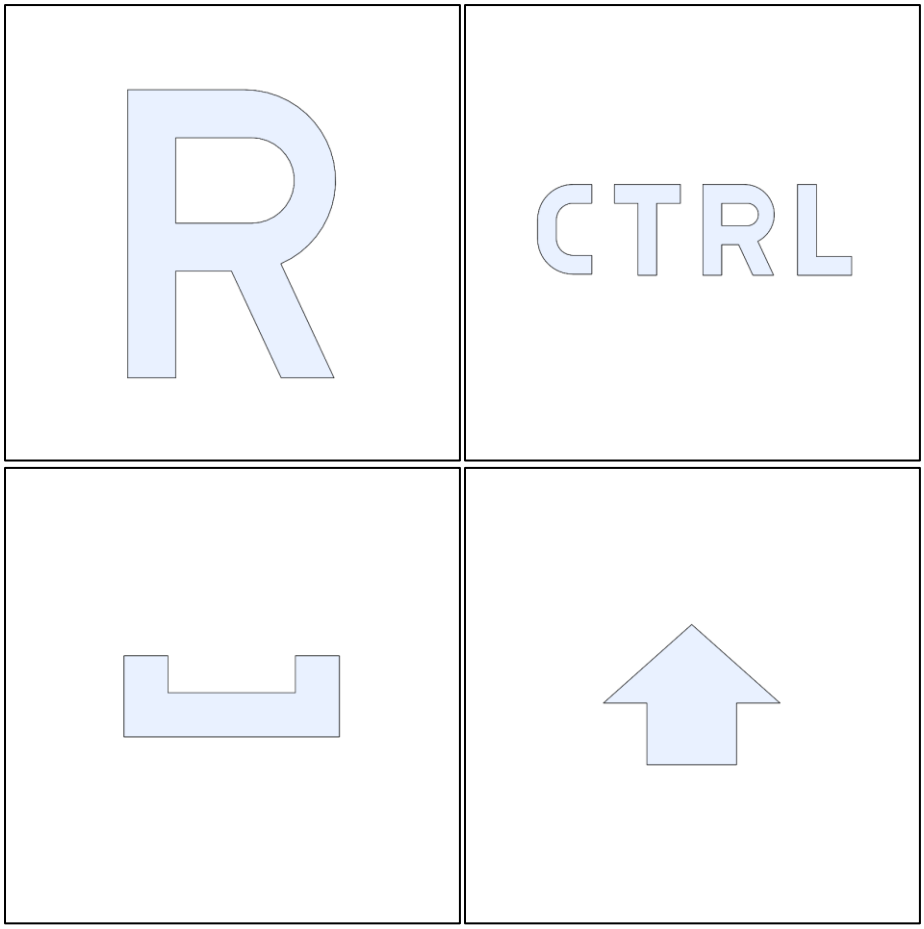


Figura 147. Piezas de los logotipos del arreglo de letras y símbolos.

Al igual que las piezas de las tiras decorativas, los logotipos también fueron pensados para ser manufacturados con PLA color blanco para tener un contraste con el resto de las piezas de color negro del teclado. Por lo tanto, al incluir los logotipos sobre el ensamble del teclado, el resultado fue el siguiente:

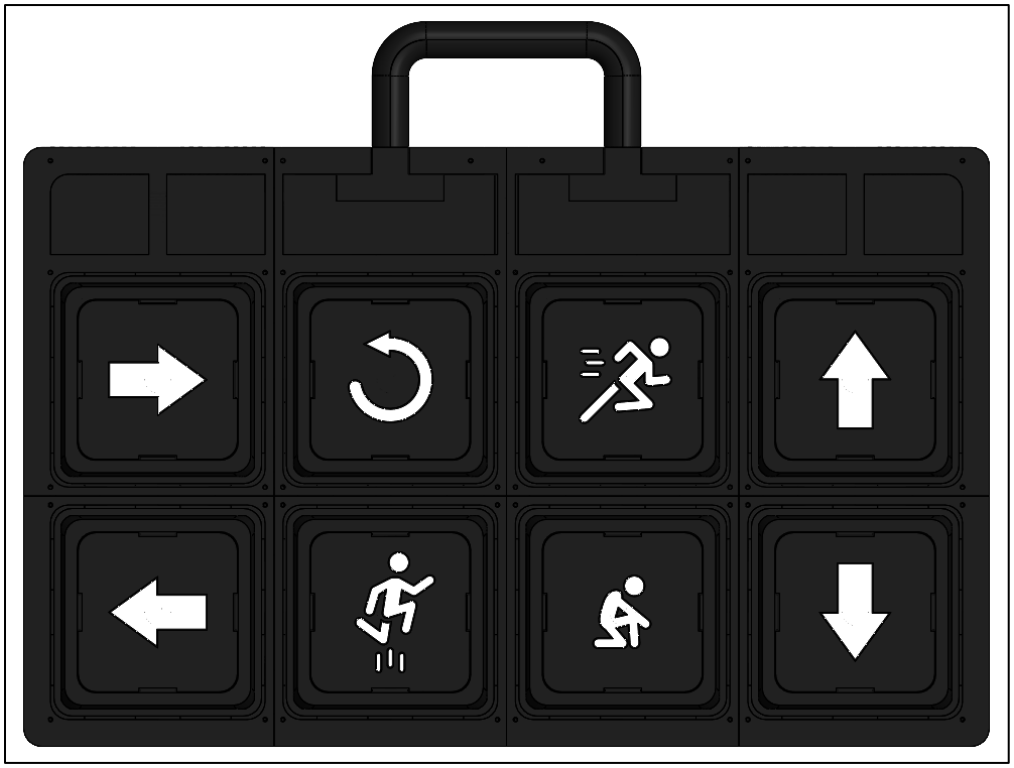


Figura 148. Piezas ensambladas de los logotipos del arreglo de acciones.

Figura 149. Piezas ensambladas de los logotipos del arreglo de letras y símbolos.

3.6.5 Piezas de retenedores

Para los retenedores, se replicó la geometría que posee cada una de las piezas de las bases de tal modo que cada retenedor se encontrara hueco en la zona por la cual sobresale la pieza de la tecla correspondiente a su módulo.

Los retenedores cuentan con un espesor de 5 [mm] y en sus esquinas se realizaron los huecos necesarios para permitir los tornillos M2 que los fijan hacia las bases. Los módulos 1-4 cuentan con 6 orificios debido a los 6 tornillos de fijación que se utilizan, tal como se mencionó en el apartado de las piezas de las bases, mientras que para los módulos 5-8 solo se agregaron 4 orificios, 1 en cada esquina.

En el módulo 1, se decidió colocar el interruptor pulsador que permitiera “bloquear” y “desbloquear” el teclado junto con un LED indicador de color blanco para visualizar el estado del botón y teclado, ya que en caso de que el botón esté pulsado, el LED estará encendido y el teclado bloqueado, y viceversa.

Figura 150. Interruptor pulsador ON OFF y LED blanco.

Para ello, en la pieza del retenedor del módulo 1 se realizaron los orificios requeridos por el interruptor y LED para que fueran fijados sobre el retenedor. Ambos componentes se encuentran por encima del espacio de electrónica y alineados verticalmente con el soporte de interruptor del módulo 1, y para el LED indicador únicamente se tuvieron que realizar 2 orificios de 1 [mm] de diámetro para permitir el paso de los alambres del ánodo y cátodo hacia el interior del espacio de electrónica, mientras que para el interruptor se tuvieron que tomar medidas para replicar su geometría sobre la cara inferior del retenedor. A su vez, se realizó una cavidad de 1.5 [mm] de profundidad con la forma de un candado para colocar un logotipo decorativo representativo de la función de “bloquear lectura”.

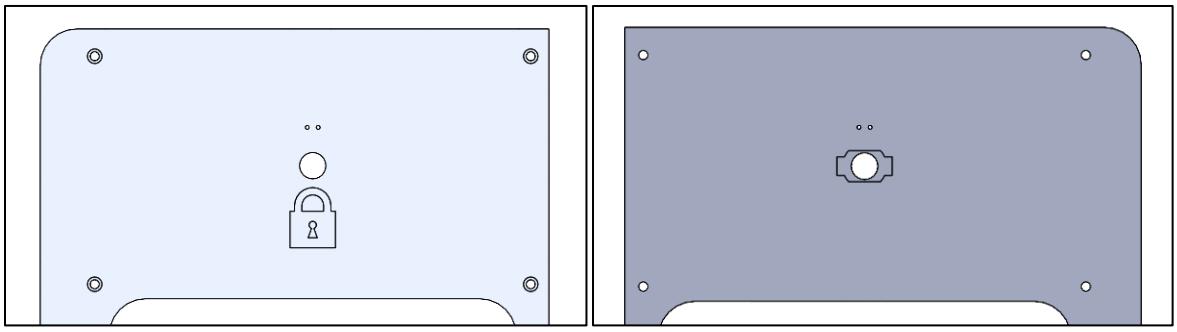


Figura 151. Vista superior e inferior de los orificios del interruptor y LED en el retenedor del módulo 1.

Por lo tanto, se realizó la pieza del logotipo del candado con la reducción lateral de 0.5 [mm] y 1.25 [mm] de espesor.

Figura 152. Logotipo de candado.

A su vez, esto implicó realizar un par de cortes sobre el soporte central del módulo 1, para permitir el paso de los alambres del LED y que el interruptor fuera introducido. Ambos cortes fueron 1 [mm] de profundidad, el del LED con forma semicircular, mientras que el del interruptor con su misma geometría.

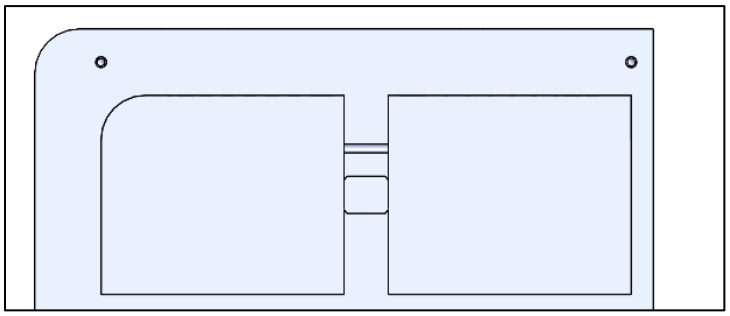


Figura 153. Cortes sobre el soporte central de la base del módulo 1.

Por otro lado, en el módulo 4 se incluyó a manera de decoración otro logotipo con forma de un pie derecho que se encontrara alineado verticalmente con el interruptor de tecla del módulo, tomando como referencia la siguiente figura:

Figura 154. Logotipos referencia de pie derecho.

Por lo tanto, sobre el retenedor se realizó la cavidad con 1.5 [mm] de profundidad y también la pieza del logotipo.

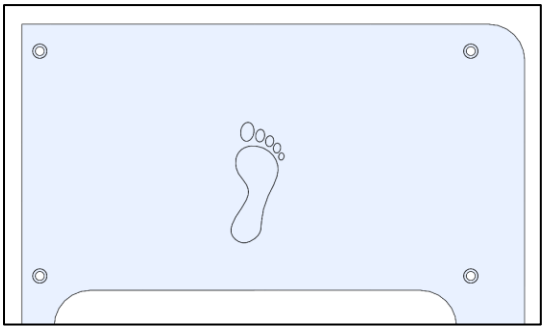


Figura 155. Cavidad para el logotipo de pie en el retenedor del módulo 4.

Figura 156. Logotipo de pie.

Por último, de manera decorativa y para evitar que las piezas de los retenedores de los módulos 1-4 no se encontraran tan vacías sobre su cara superior, se añadieron 3 tiras de diferentes longitudes a lo largo de los 4 módulos; estas tiras, al igual que las que se encuentran en las piezas de las bases, tienen un espesor de 1.5 [mm] y una altura de 1.25 [mm], por lo tanto, en los módulos 1-4 se realizaron cavidades con 2.5 [mm] de espesor, 1.5 [mm] de profundidades y diferentes longitudes. Las longitudes totales de las 3 tiras fueron 510 [mm], 340 [mm] y 170 [mm].

Sin embargo, las tiras están seccionadas de acuerdo con el módulo en el que se sitúan, debido a las limitaciones de las dimensiones del espacio de manufactura de la impresora, así como permitir que los módulos puedan ser desensamblados sin que las tiras deban ser despegadas en caso de encontrarse en más de un módulo. Por lo tanto, la primera tira de 510 [mm] está seccionada en 4 partes, al igual que la segunda de 340 [mm] y la tercera de 170 [mm] en 2 partes.

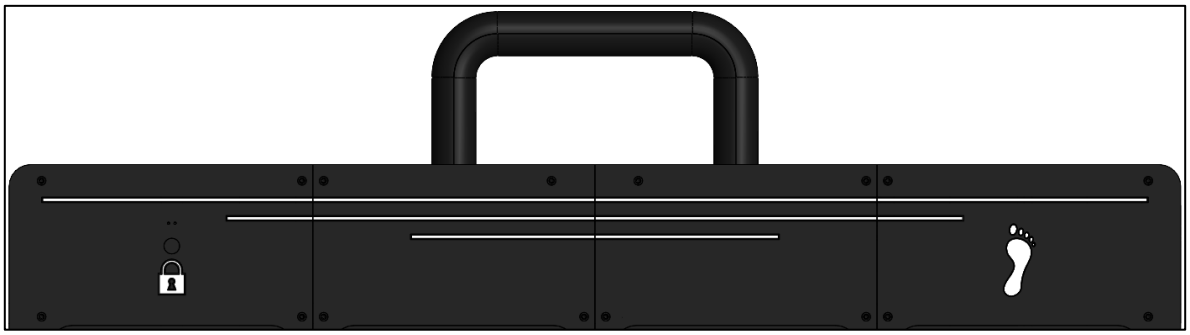


Figura 157. Tiras decorativas y logotipos sobre los retenedores de los módulos 1-4.

El ensamble del teclado, incluyendo las piezas de los retenedores y los elementos decorativos, luce de la siguiente manera:

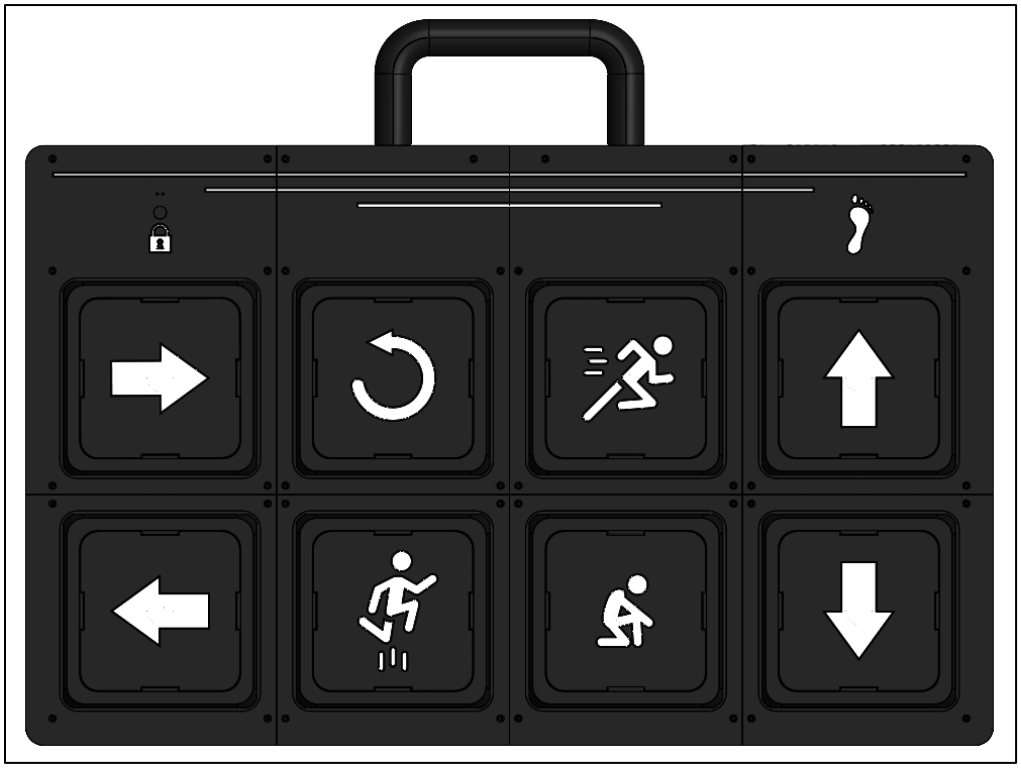


Figura 158. Piezas ensambladas de los retenedores con el arreglo de acciones.

Figura 159. Piezas ensambladas de los retenedores con el arreglo de letras y símbolos.

3.6.6 Piezas de recubrimientos

Al igual que las piezas de las teclas, se utilizaron 8 piezas idénticas del recubrimiento modelado en el prototipo B, ya que su funcionalidad es la misma para todas las teclas.

De tal modo que el ensamble final del teclado con todas las piezas es el siguiente:

Figura 160. Ensamble final del teclado con el arreglo de acciones.

Figura 161. Vista isométrica del ensamble final del teclado con el arreglo de acciones.

Figura 162. Ensamble final del teclado con el arreglo de letras y símbolos.

Figura 163. Vista isométrica del ensamble final del teclado con el arreglo de acciones.

Por lo tanto, una vez concluido con el modelado de todas las piezas que componen al teclado y dado que se había verificado el correcto funcionamiento de las teclas tanto en simulación como de manera práctica con los materiales seleccionados, se procedió con la manufactura de todo el teclado.

- Consultar el **apéndice A** para visualizar los planos de las piezas del módulo 6 del teclado. La selección del módulo 6 para los planos se debe a que con base en este se realizaron todos los análisis de las piezas y las demás piezas únicamente poseen variaciones en sus dimensiones.

3.7 Manufactura

Como se mencionó anteriormente, la máquina empleada para la manufactura de las piezas fue una impresora Ender 3 con una boquilla de 0.4 [mm] con un espacio de trabajo de 220 [mm] x 220 [mm] x 250 [mm], y los 3 materiales seleccionados para las piezas fueron PETG de color negro para las piezas del teclado, PLA de color blanco para los elementos decorativos y TPU transparente para los recubrimientos de tecla.

Una impresora 3D es un dispositivo que permite crear objetos tridimensionales a partir de un modelo digital que utiliza un proceso aditivo donde el material es depositado capa por capa para construir el objeto deseado, lo cual permite un prototipado rápido y la elaboración de geometrías complejas que mediante otros métodos de manufactura serían difíciles de obtener; fue por ello por lo que se optó por la manufactura aditiva para obtener el prototipo del teclado para pies.

Para la manufactura de piezas mediante una impresora 3D es necesaria la generación de un código G que permita la manufactura de la figura deseada. El código G es un lenguaje de programación que se utiliza comúnmente para controlar máquinas automatizadas, en este caso, proporcionando instrucciones a la impresora sobre cómo moverse, incluyendo la velocidad de impresión, la dirección de movimiento, la cantidad de material a extruir, entre otras indicaciones.

La manera en la que se generaron los códigos G fue mediante un laminador, el cual permite establecer los parámetros de manufactura necesarios para las piezas con base en el material que se emplee. Para que el programa pueda manipular las piezas es necesario proporcionar los archivos bajo la extensión “.stl”, es decir, el acrónimo de "*Stereolithography*”, ya que los archivos STL contienen información sobre la geometría de un objeto tridimensional a partir de la superficie del objeto mediante una colección de triángulos, sin incluir color, textura u otra propiedad física de la pieza.

Y una vez que los parámetros de manufactura son ajustados de acuerdo con lo requerido, el laminador se encarga de crear el código G correspondiente a la pieza para proporcionar las instrucciones hacia la impresora 3D y que esta pueda manufacturarlos.

- Para la creación de los códigos G de las piezas se utilizó el software *UltiMaker Cura*.

Una vez que el archivo es abierto en el laminador, en él se pueden ajustar las dimensiones de la pieza, posición de la pieza, parámetros de manufactura, entre otras opciones.

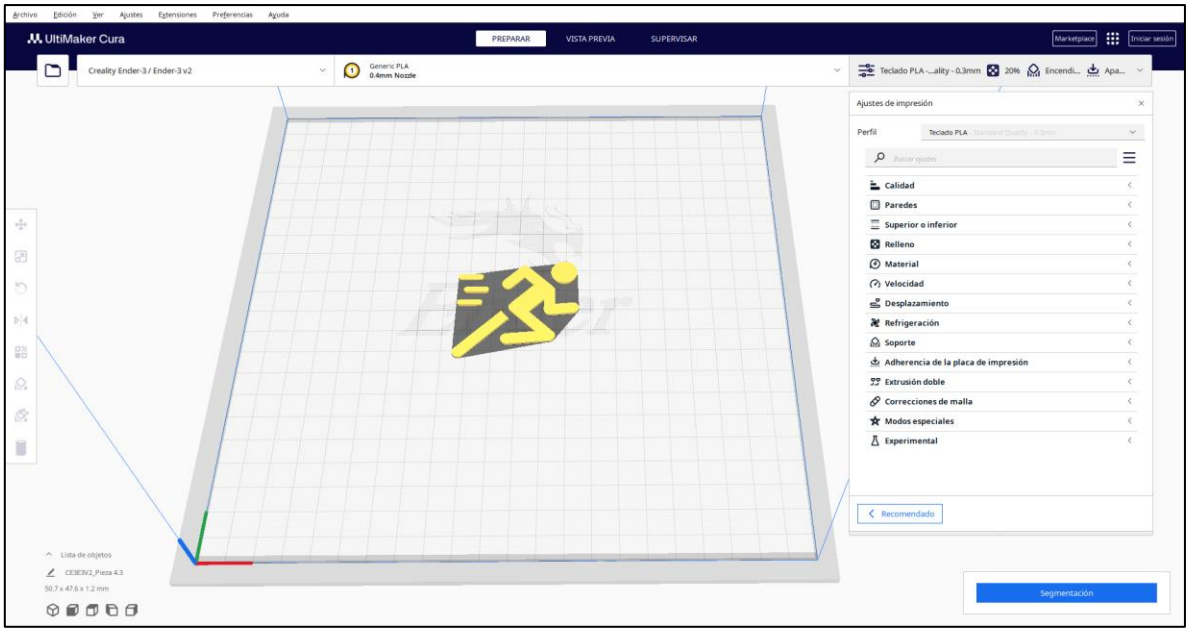


Figura 164. Laminador UltiMaker Cura con una pieza de logotipo.

Entre los parámetros más relevantes a considerar de acuerdo con cuál sea el material para manufacturar una pieza se encuentran los siguientes:

1. Temperatura del extrusor.
2. Temperatura de la cama.
3. Altura de capa.
4. Anchura de línea.
5. Densidad de relleno.
6. Velocidad de impresión.
7. Densidad de soporte.

Por lo tanto, al tener 3 materiales distintos para la manufactura de las piezas, se tuvieron que realizar 3 configuraciones distintas para los parámetros.

Sin embargo, para los recubrimientos manufacturados con TPU transparente no se empleó una boquilla de 0.4 [mm], que es con la que cuenta la impresora Ender 3 por defecto; en su lugar se optó por emplear una boquilla de 1 [mm], ya que al tratarse de un material transparente, el hecho de contar con una boquilla más grande permite que se requiera de una menor cantidad de capas para manufacturar la pieza, lo cual provoca que el recubrimiento sea más nítido, ya que al usar una boquilla de 0.4 [mm] se requiere de una mayor cantidad de capas lo cual deriva que la pieza se vuelva más opaca y, a su vez, el hecho de implementar esta boquilla supone una reducción considerable para el tiempo de manufactura.

Por otro lado, para el resto de las piezas se utilizó la boquilla de 0.4 [mm], debido a que al emplear la boquilla de 1 [mm], si bien se reduce considerablemente el tiempo de manufactura, causa que la calidad del acabado de las piezas sea menor, aspecto que es importante para el teclado y no tanto para el recubrimiento.

Parámetro	Material		
	PETG	PLA	TPU
Temperatura del extrusor [°C]	220	190	220
Temperatura de la cama [°C]	75	60	60
Altura de capa [mm]	0.32	0.32	0.8
Anchura de línea [mm]	0.4	0.4	1
Densidad de relleno [%]	15	20	100
Velocidad de impresión [mm/s]	40	50	20
Densidad de soporte [%]	10	0	0

Tabla 52. Parámetros de manufactura.

La temperatura de extrusión es aquella que permite fundir el filamento de plástico para permitir su deposición al realizar la manufactura de las piezas. La temperatura que requieren el PETG y TPU es mayor que la del PLA, dedo que estos materiales cuentan con una mayor temperatura de fusión que generalmente va entre los 220 [°C] a 250 [°C], mientras que la del PLA va entre los 180 [°C] y 220 [°C].

La cama de impresión es la superficie sobre la cual se adhiere la pieza al manufacturarse, y el hecho de emplear una cama caliente en lugar de una temperatura ambiente permite una mejor adhesión de la primera capa y evita deformaciones en la pieza una vez que el material se empieza a contraer. El PLA y el TPU son materiales que requieren de una menor temperatura de cama para que sean adheridos, puesto que presentan una menor contracción cuando el material se comienza a enfriar, a comparación del PETG que requiere de una mayor temperatura.

La altura de capa es el espesor de material que es depositado por el extrusor; este parámetro está limitado por el diámetro de la boquilla que se esté empleando y mientras más pequeño sea el valor de la altura, se tendrán mejores acabados en las piezas, pero esto aumentará el tiempo de manufactura, ya que se requiere de una mayor cantidad de capas, y viceversa. Para las piezas de PETG y PLA se utilizó la boquilla de 0.4 [mm] por lo que la altura de capa es muy próxima a este valor para tener la menor cantidad de capas posibles y, por ende, el menor tiempo de manufactura posible, pero manteniendo la calidad del acabado que proporciona esta boquilla. Por otro lado, para el TPU se utilizó la boquilla de 1 [mm] como se mencionó anteriormente para mantener la transparencia del material.

Al igual que la altura de capa, la anchura de línea está limitada por el diámetro de la boquilla y este parámetro recibe el mismo valor de dicho diámetro; por ende, las piezas de PETG y PLA tienen una anchura de línea de 0.4 [mm] y los recubrimientos de TPU de 1 [mm].

La densidad de relleno corresponde a la cantidad de material que es utilizado en el interior de la pieza. Para el prototipo A manufacturado de PLA se utilizó de manera arbitraria un 20% de relleno para verificar si era necesario utilizar un valor mayor o si incluso era posible emplear un valor menor. Una vez realizadas las pruebas de los prototipos A y B, se observó que las piezas soportaban el funcionamiento de la tecla de manera adecuada; por lo tanto, para las piezas de PLA se definió dicho valor.

A su vez, otro aspecto a considerar fue que mientras mayor porcentaje de relleno se tuviera, se requeriría una mayor cantidad de material y, por consecuente, las piezas tendrían un mayor peso y tiempo de manufactura, así que se debía tener un equilibrio entre la resistencia y el peso de las piezas con un porcentaje de relleno reducido.

Con base en ello, para el prototipo C manufacturado de PETG se probó con un porcentaje menor de 15% de relleno para observar el funcionamiento del módulo, el cual fue satisfactorio después de las pruebas mencionadas anteriormente, siendo este el porcentaje establecido para las piezas elaboradas de PETG.

Mientras que para los recubrimientos de TPU se utilizó un 100% para que las piezas pudieran mantener la transparencia del material.

La velocidad de impresión es la rapidez con la que el extrusor se mueve mientras deposita el material. El PETG y el TPU requieren de menores velocidades que el PLA, debido a que el PETG es un material más viscoso cuando se funde y una velocidad menor permite que se deposite de mejor manera, mientras que el TPU por su naturaleza elástica necesita de velocidades bajas para ser extruido de manera adecuada sin que ocurran atascos en los que el filamento se pudiera doblar.

Por último, el material de soporte es aquel que se utiliza de manera temporal durante el proceso de manufactura de una pieza que posee salientes, voladizos o ángulos pronunciados en alguna zona de su geometría. Dado que las piezas de PLA y TPU no cuentan con alguna de estas características, no requieren de material de soporte. Por otro lado, las piezas de PETG sí requieren de material de soporte en las piezas de la agarradera, las bases en la zona de los soportes del espacio de electrónica y en las piezas de las teclas por su geometría compleja. Al material de soporte de estas piezas se le asignó un 10% de densidad debido a que solo se trata de un apoyo que requiere emplear poco material.

Fue así como se utilizaron estas 3 configuraciones para la manufactura de las piezas.

Una vez que los parámetros para la pieza son establecidos, en el laminador se selecciona la opción de “segmentación” y posteriormente se genera el código G correspondiente a la pieza y es posible visualizar una vista previa de la manufactura de la pieza que incluye todas las capas y la trayectoria de las líneas de material que se depositarán, así como el material de soporte en caso de que la pieza lo requiera.

De igual modo, el laminador indica la cantidad de material que la pieza requiere y el tiempo de manufactura.

Figura 165. Pieza de logotipo segmentada por el laminador.

Fue así como se segmentaron y obtuvieron los códigos G requeridos para todas las piezas del teclado, así como el material y tiempo de manufactura total de las piezas. Con base en ello, se realizó una tabla que indicara para cada pieza de cada módulo el tiempo de manufactura, el material total requerido incluyendo soportes y el peso final una vez retirando el material de soporte, para definir la cantidad requerida de filamento para el teclado, al igual que su peso final.

Para ello, para las piezas de placas con logotipo y los logotipos se tomó en cuenta el set de acciones de manera inicial.

Resultando en la siguiente tabla:

Módulo	Pieza	Tiempo [h]	Material total [g]	Peso [g]
1	1	25:01	262	260
	2	9:48	102	81
	3	2:40	26	25
	4	0:08	2	2
	5	6:20	62	62
	6	0:20	11	11
	Total PETG	43:49	452	428
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:08	2	2
	Total	44:17	-	441

Módulo	Pieza	Tiempo [h]	Material total [g]	Peso [g]
2	1	21:32	222	220
	2	9:48	102	81
	3	2:40	25	25
	4	0:06	1	1
	5	5:42	55	55
	6	0:20	11	11
	Total PETG	39:42	404	381
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:06	1	1
	Total	40:08	-	393
3	1	21:34	223	219
	2	9:48	102	81
	3	2:42	26	25
	4	0:07	1	1
	5	5:41	55	55
	6	0:20	11	11
	Total PETG	39:45	406	380
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:07	1	1
	Total	40:12	-	392
4	1	25:01	262	260
	2	9:48	102	81
	3	2:40	26	25
	4	0:08	2	2
	5	6:17	62	62
	6	0:20	11	11
	Total PETG	43:46	452	428
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:08	2	2
	Total	44:14	-	441

Módulo	Pieza	Tiempo [h]	Material total [g]	Peso [g]
5	1	17:03	182	181
	2	9:48	102	81
	3	2:40	26	25
	4	0:08	2	2
	5	3:14	31	31
	6	0:20	11	11
	Total PETG	32:45	341	318
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:08	2	2
	Total	33:13	-	331
6	1	16:03	168	167
	2	9:48	102	81
	3	2:43	26	25
	4	0:07	1	1
	5	2:44	26	26
	6	0:20	11	11
	Total PETG	31:18	322	299
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:07	1	1
	Total	31:45	-	311
7	1	16:03	168	167
	2	9:48	102	81
	3	2:42	26	25
	4	0:06	1	1
	5	2:44	26	26
	6	0:20	11	11
	Total PETG	31:17	322	299
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:06	1	1
	Total	31:43	-	311

Módulo	Pieza	Tiempo [h]	Material total [g]	Peso [g]
8	1	17:02	182	181
	2	9:48	102	81
	3	2:40	26	25
	4	0:08	2	2
	5	3:13	31	31
	6	0:20	11	11
	Total PETG	32:43	341	318
	Total TPU	0:20	11	11
	Total PLA	0:08	2	2
	Total	33:11	-	331
Adicionales	Agarradera	6:21	70	70
	Soporte tarjeta	0:19	3	3
	Logo Candado	0:01	0.2	0.2
	Logo Pie	0:02	0.3	0.3
	Tira 1.1 (x2)	0:02	0.6	0.6
	Tira 1.2 (x2)	0:02	0.6	0.6
	Tira 2.1 (x2)	0:02	0.2	0.2
	Tira 2.2 (x2)	0:02	0.6	0.6
	Tira 3 (x2)	0:02	0.4	0.4
	Tira 4 (x4)	0:04	1.6	1.6
	Tira 5 (x4)	0:04	1.2	1.2
	Total PETG	6:40	73	73
	Total PLA	0:21	15.3	15.3
	Total	7:01	-	88.3
Teclado total	Total PETG	301:45	3113	2924
	Total TPU	2:40	88	88
	Total PLA	1:19	27.3	27.3
	Total	305:44	-	3039.3

Tabla 53. Material y tiempo de manufactura de las piezas del teclado.

Y a su vez se obtuvo el material y tiempo de manufactura de las piezas del set de letras y símbolos.

Módulo	Pieza	Tiempo [h]	Material total [g]	Peso [g]
Set de letras y símbolos	3.A	2:38	25	24
	3.S	2:40	25	24
	3.D	2:37	25	24
	3.W	2:36	25	23
	3.R	2:38	25	24
	3.Space	2:40	26	25
	3.Shift	2:41	26	25
	3.CTRL	2:43	26	25
	4.A	0:10	2	2
	4.S	0:09	2	2
	4.D	0:11	2	2
	4.W	0:15	3	3
	4.R	0:11	2	2
	4.Space	0:04	1	1
	4.Shift	0:04	1	1
	4.CTRL	0:04	1	1
	Total PETG	21:13	203	194
	Total PLA	1:08	14	14
	Total	22:21	-	208

Tabla 54. Material y tiempo de manufactura de las piezas del set de letras y símbolos.

De la tabla 53 se puede apreciar que el peso total de las piezas del teclado sin incluir material de soporte es de 3039.3 [g], mientras que el tiempo de manufactura, incluyendo las piezas del set de letras y símbolos, es de 328:05 [h], es decir, 13 días y 16 horas aproximadamente. Por otro lado, el material total de PETG empleado, incluyendo material de soporte, es de 3316 [g], de PLA 41.3 [g] y de TPU 88 [g].

A su vez, durante la manufactura del prototipo A, inicialmente se había utilizado una plataforma de impresión de cristal para mejorar la adherencia de las piezas; sin embargo, para la pieza de la base se detectó un gran inconveniente provocado por la amplia área de contacto de 150 [mm] x 150 [mm] que presentó la pieza a lo largo de la plataforma, por lo cual fue complicado retirarla y durante dicho proceso se dañó la superficie de la pieza.

Por lo tanto, para los prototipos B y C se cambió la plataforma de cristal por una flexible, la cual permitió retirar de manera óptima las piezas. Pero, a su vez, se decidió conservar la plataforma de cristal para los recubrimientos debido a que esta permitía un mejor acabado para el TPU a comparación de la cama flexible.

Con todos los códigos G generados con los parámetros correspondientes al material de cada pieza, se procedió con la manufactura de todas las piezas.

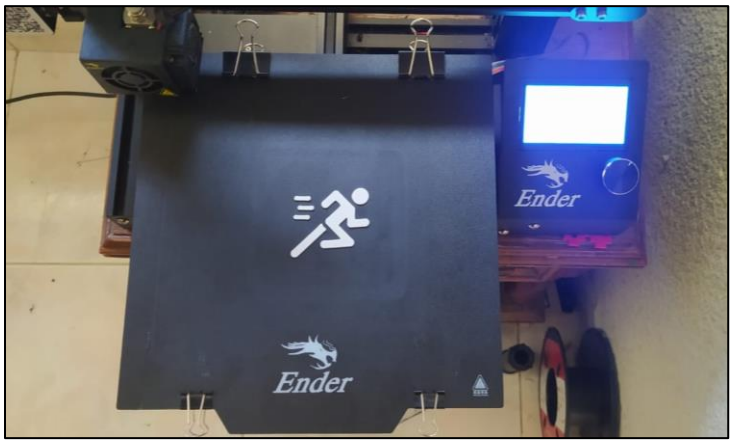


Figura 166. Pieza de logotipo manufacturada.

3.8 Electrónica

Antes de realizar el ensamble total de las piezas, durante el modelado de estas se realizaron de manera simultánea pruebas del circuito que tendría el teclado. Para ello se utilizaron placas de pruebas con componentes electrónicos simples, con el propósito de verificar su funcionamiento e implementarlo una vez que las piezas comenzaran a ser ensambladas.

- De igual forma se elaboró la programación de la tarjeta Pro Micro de manera simultánea.

La manera en la que opera un teclado convencional es mediante un arreglo matricial sobre el cual se distribuyen las teclas a lo largo de diferentes filas y columnas, de manera que al ser presionada una tecla se envía una señal eléctrica que es interpretada mediante un microcontrolador, el cual se encarga de leer la fila y la columna a la que corresponde dicha pulsación y así la computadora puede determinar de qué tecla se trata.

Por otro lado, si el microcontrolador posee la capacidad de tener arreglos de botones con resistencias *pull-up* desde la programación, es posible omitir el uso de resistencias físicas en el circuito, el cual es el caso de la tarjeta Pro Micro.

Un arreglo de un botón pulsador en *pull-up* se basa en que, si el botón se encuentra en estado de reposo, el microcontrolador siempre leerá un estado “alto” o lógico de “1”, y será una vez que el botón es pulsado que el estado cambiará a “bajo” o un “0” lógico al conectar el circuito a tierra.

- Para los diagramas de conexiones se utilizó el software *Proteus*.

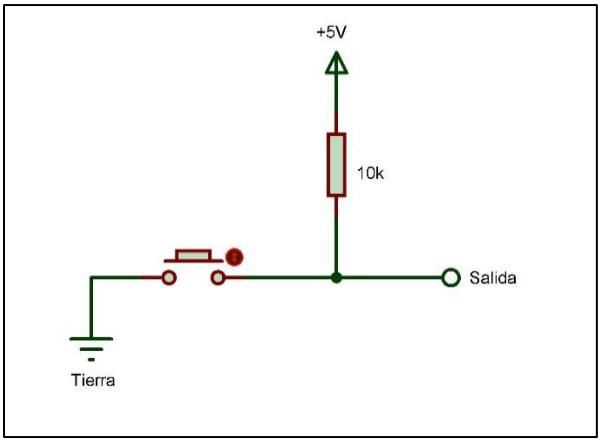


Figura 167. Arreglo de un botón en pull-up.

Por lo tanto, para el teclado para pies se buscó utilizar la misma base de funcionamiento mediante un arreglo matricial que estuviera compuesto por 2 filas y 4 columnas en el cual se encontraran distribuidas las 8 teclas y que aprovechara la funcionalidad de entradas programadas en *pull-up* para omitir el uso de resistencias adicionales.

Sin embargo, para un arreglo matricial de botones es importante considerar el denominado efecto "*ghosting*", el cual consiste en que al pulsar de manera simultánea diversas teclas que se encuentran en diferentes filas y columnas, el microcontrolador podría interpretar que también han sido pulsadas teclas que en realidad se encuentran en reposo (Manik. 2021).

Suponiendo el ejemplo de una matriz de botones de 2 filas y 2 columnas, donde los 4 botones se encuentran conectados mediante cables y las columnas son las entradas, mientras que las filas las salidas de la señal eléctrica:

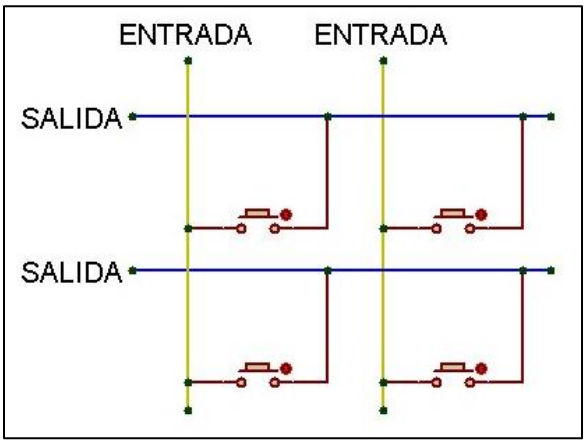


Figura 168. Arreglo matricial de botones de 2x2.

En el caso de que 3 de los 4 botones fueran pulsados a la vez, el microcontrolador en lugar de interpretar que estos 3 botones han sido pulsados, indicaría que los 4 se encuentran activos.

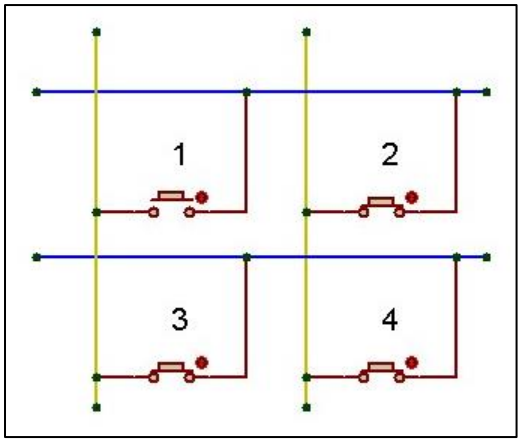


Figura 169. Arreglo matricial de botones de 2x2 con 3 botones pulsados.

Esto ocurre dado que la manera en la que se realiza la lectura de los botones es leyendo el estado fila por fila y columna por columna, es decir, comenzando por la primera fila del arreglo y leyendo todas las columnas que la componen y subsecuentemente con cada una de las filas hasta finalizar el arreglo. Analizando el ejemplo anterior, una vez que son pulsados los 3 botones que se muestran en la figura 169 y se realiza la lectura del botón "1" con la primera columna actuando como entrada *pull-up* y la primera fila como salida en *low*, el recorrido que tiene la señal es el que se muestra a continuación en líneas rojas:

- La manera en la que son programadas las entradas y salidas de las filas y columnas se aborda más adelante en el apartado de programación.

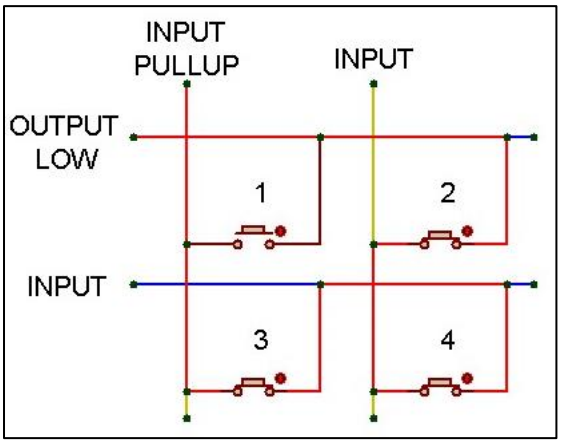


Figura 170. Arreglo matricial de botones de 2x2 con 3 botones pulsados.

En consecuencia, los otros 3 botones pulsados actúan como un circuito cerrado que provoca que la primera columna se conecte con la primera fila y se interprete que el primer botón está pulsado a pesar de encontrarse desactivado.

La manera de solucionar este inconveniente es implementando diodos a la salida de cada uno de los botones pulsadores, y de este modo evitar el paso de la señal a lo largo del resto de los botones que se encuentran pulsados. Esto se debe a que los diodos son componentes electrónicos que permiten el flujo de corriente eléctrica únicamente en un sentido, bloqueando el flujo en dirección opuesta.

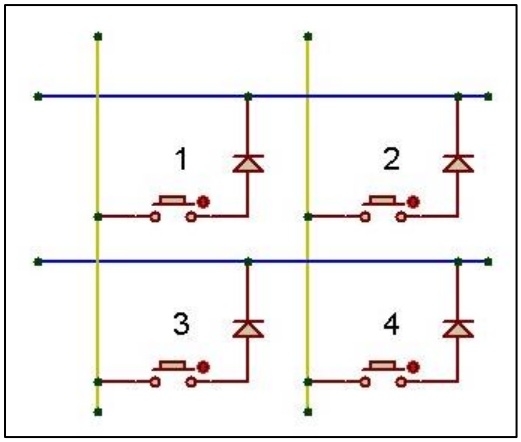


Figura 171. Arreglo matricial de botones de 2x2 con diodos.

Analizando nuevamente el caso con la pulsación simultánea de 3 botones, ahora el circuito no es capaz de cerrarse y conectar a la primera fila con la primera columna, puesto que el paso de la señal se ve interrumpido por el diodo del botón 4 y, por ende, el microcontrolador podrá interpretar de manera adecuada que el botón no está pulsado.

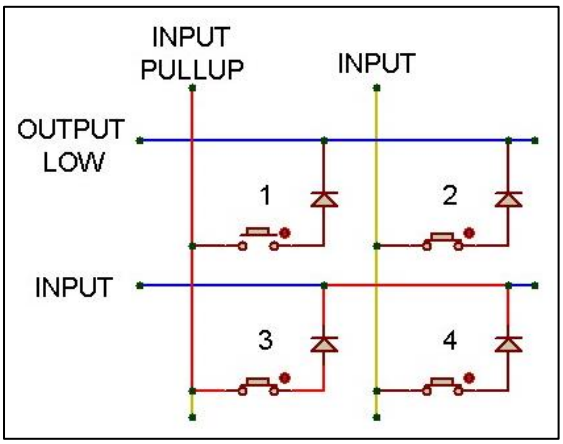


Figura 172. Arreglo matricial de botones de 2x2 con diodos y 3 botones pulsados.

Como se puede apreciar, con la implementación de diodos, una matriz de botones puede funcionar de manera adecuada sin el efecto *ghosting*.

Por lo tanto, se procedió a realizar el diagrama de conexiones del arreglo matricial de 2 filas y 4 columnas, incluyendo el botón y el LED indicador de la función de “bloquear”.

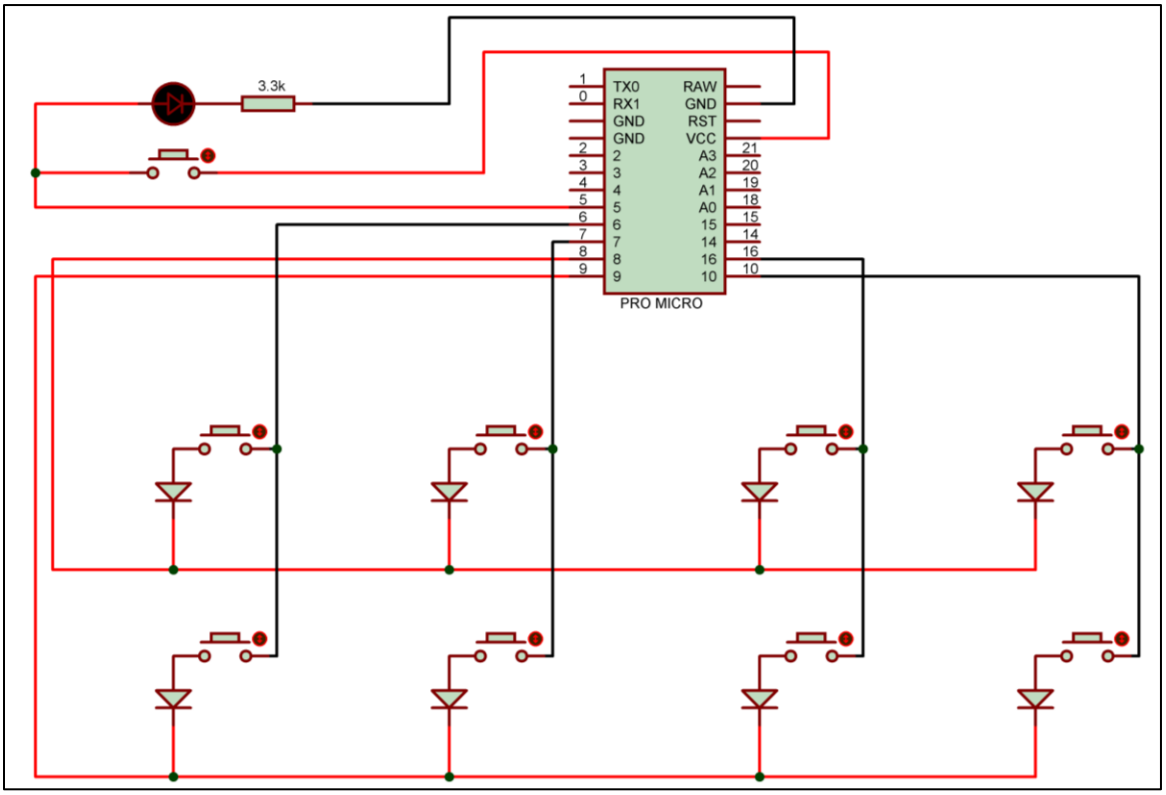


Figura 173. Diagrama de conexiones del teclado.

Como se puede apreciar, se utilizan un total de 9 pines de la tarjeta, 2 para las filas y 4 para las columnas del arreglo de botones, 1 para la salida DEL botón de bloqueo, el pin de 5 [V] que está conectado a la entrada del botón de bloqueo y 1 pin de tierra de la tarjeta que está conectado a una resistencia y el LED indicador, los cuales a su vez se encuentran conectados a la salida del botón de bloqueo, esto último para tener un arreglo que sin la necesidad de programación permita que el LED sea encendido una vez que el botón se encuentre activado.

La manera en la que se probó el arreglo fue sobre 2 placas de pruebas, utilizando 8 botones pulsadores, 1 tarjeta Pro Micro, 8 diodos de germanio 1N4148, 1 interruptor ON OFF, 1 LED blanco pequeño, 1 resistencia de 3.3 [kΩ] y alambre de cobre calibre 24 AWG.

La manera más sencilla de probar el circuito de prueba fue sobre 2 placas de pruebas, ya que estas permiten realizar las conexiones sin necesidad de soldar los componentes electrónicos, a diferencia del arreglo real del teclado donde sí fue necesario realizarlo.

Los botones pulsadores empleados en el circuito de prueba fueron utilizados en sustitución de los interruptores mecánicos, debido a que estos cumplen la misma función y están diseñados para ser colocados sobre placas de prueba.

La tarjeta de desarrollo utilizada para la función de “procesar información” fue la tarjeta Pro Micro, la cual utiliza el microcontrolador ATMEGA32U4 compatible y programable con el entorno de desarrollo integrado (*IDE*) de *Arduino*, con un voltaje de funcionamiento de 5 [V] a 500 [mA], entrada micro USB, y que posee un total de 24 pines que proporcionan como máximo 5 [V] de salida a 10 [mA], de los cuales 12 son digitales y 4 analógicos.

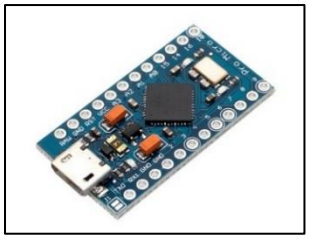


Figura 174. Tarjeta de desarrollo Pro Micro.

La principal característica de interés para el teclado es que esta tarjeta puede ser empleada como dispositivo de interfaz humana (*HID*); esto quiere decir que permite emular dispositivos como teclados, ratones y mandos de juegos sin la necesidad de incorporar componentes adicionales a la tarjeta.

El diodo de germanio 1N4148 es un diodo de alta velocidad que soporta una corriente directa máxima de 300 [mA], mientras que la corriente máxima que puede proporcionar la tarjeta Pro Micro es de 10 [mA]. Por lo tanto, es adecuado para ser empleado en el circuito del teclado.

Figura 175. Diodo 1N4148.

El interruptor ON OFF empleado en el circuito de prueba fue distinto al empleado en el arreglo final del teclado; sin embargo, ambos cumplen la misma función de bloquear el teclado una vez que este es pulsado, ya que cuentan con un enclavamiento cuya función es permitir o interrumpir el paso de corriente eléctrica. Soporta un voltaje de 30 [V] y una corriente de 1 [A], así que es apropiado para ser empleado de manera simultánea con la tarjeta Pro Micro.

Figura 176. Interruptor pulsador ON OFF.

En complemento con el interruptor, se utilizó un LED de color blanco que permitiera visualizar si el botón se encuentra activado o desactivado, y para ello este fue conectado a la salida del botón pulsador y a su vez a una resistencia de 3.3 [kΩ] que se encuentra conectada a tierra. La manera en la que el valor de la resistencia fue determinado fue mediante pruebas experimentales en las que se variaba el valor de la resistencia hasta hallar un valor comercial de que permitiera al LED proporcionar una intensidad luminosa baja, siendo este valor 3.3 [kΩ].

A manera de cálculo, la intensidad de corriente se puede obtener mediante la ley de Ohm:

$$i = \frac{V}{R}$$

Donde:

i – Intensidad de corriente
V – Voltaje suministrado
R – Valor de resistencia

La corriente requerida por un LED blanco para que funcione de manera adecuada es de 20 [mA]; sin embargo, como se mencionó anteriormente, se deseaba que el LED proporcionara una intensidad luminosa por debajo de lo habitual. Tomando el valor de 5 [V] que suministra la tarjeta Pro Micro y la resistencia de 3.3 [kΩ], se tiene la siguiente intensidad de corriente para el LED:

$$i = \frac{5[V]}{3300[\Omega]} = 0.0015[A]$$

Es decir, la intensidad de corriente que se le proporciona al LED es de 1.5 [mA], por debajo de los 20 [mA], lo cual permite tener el efecto deseado de una luminosidad menor.

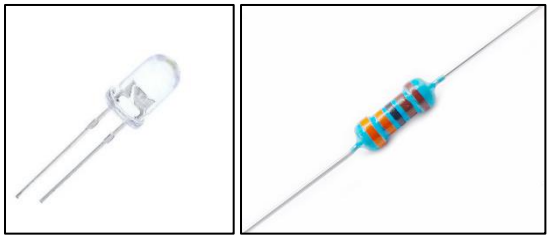


Figura 177. LED blanco y resistencia de 3.3 [kΩ].

Para el cableado, tanto para el circuito de pruebas como para el circuito real del teclado, se empleó alambre de cobre calibre 24 AWG con recubrimiento de plástico de distintos colores, ya que estos son capaces de soportar una intensidad de corriente de hasta 3.5 [A] a una temperatura de 75 [°C], mientras que la corriente máxima que puede proporcionar una salida de la tarjeta es de 0.01 [A], debido a esto es posible emplear este tipo de cableado para ambos circuitos sin ningún tipo de inconveniente.

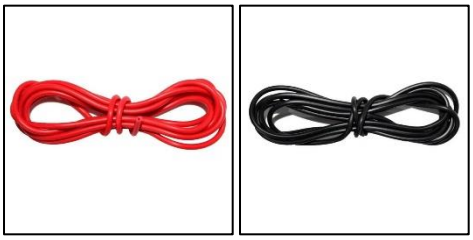


Figura 178. Alambre de cobre calibre 24 AWG.

Finalmente, se realizó el circuito sobre ambas placas de prueba y se verificó el funcionamiento junto con el código programado y cargado en la tarjeta Pro Micro.

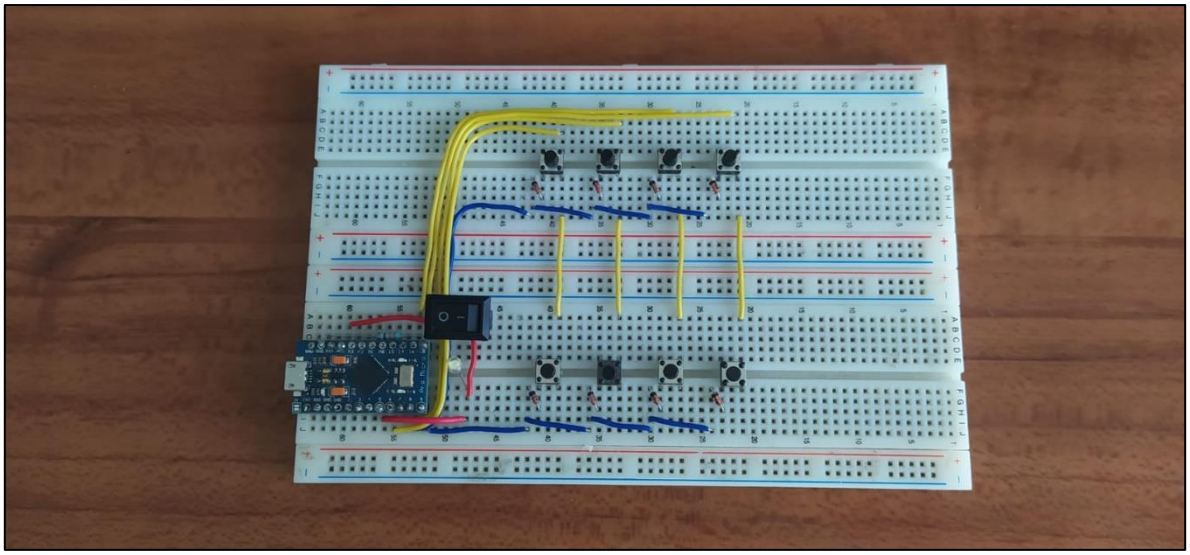


Figura 179. Circuito de prueba de la electrónica del teclado.

De lo cual se pudo observar que operaba de la manera esperada, para posteriormente adaptarlo al teclado real durante su ensamble. En el siguiente apartado se muestra la prueba realizada para el circuito y el código de manera conjunta.

3.9 Programación

Como se mencionó anteriormente, la programación del teclado se realizó de manera simultánea al apartado de electrónica y modelado de las piezas.

De manera inicial, se propuso programar la tarjeta de tal modo que actuara como un teclado, es decir, que cada tecla tuviera una tecla asignada por defecto; sin embargo, esto provocaría que cada que se quisiera reconfigurar alguna tecla, esta labor se tuviera que realizar desde la propia programación de la tarjeta para posteriormente volver a cargar el código.

Por lo tanto, se optó por programar la tarjeta como un mando de juegos para que fuera posible reprogramar las teclas sin necesidad de modificarlo a nivel de código, sino mediante un software que permitiera asignar la letra, símbolo o carácter deseado para cada una de las teclas.

- Para la programación de la tarjeta Pro Micro se utilizó el *IDE* de *Arduino*.

El *IDE* de *Arduino* es una aplicación que permite la escritura, edición, compilación y carga de programas, principalmente para placas de desarrollo de *Arduino*; sin embargo, también puede soportar otro tipo de tarjetas como la Pro Micro.

La manera en la que es programada un código se basa principalmente en 2 funciones denominadas “setup()” y “loop()”, la primera de estas se ejecuta únicamente una vez al encender la tarjeta de desarrollo, mientras que la segunda se encarga de ejecutar en bucle el código que se encuentre escrito dentro de ella. A su vez, es posible la inclusión de bibliotecas adicionales para ampliar las funcionalidades básicas del *IDE*.

Para la programación del código del teclado, desde el entorno de desarrollo se implementó la biblioteca “Joystick.h” que permite a la tarjeta Pro Micro actuar como *HID* y ser configurada como mando de juegos (Dan's Tech Box, 2020; Bitwise Ar, 2020).

Dentro de la programación, antes de las funciones “setup()” y “loop()”, se comenzó declarando las variables y constantes requeridas para la lectura de los estados de las 8 teclas del teclado. Se estableció el número de filas y columnas de la matriz de botones de dimensiones 2x4, así como 2 arreglos que almacenan los pines de la tarjeta que corresponden a las filas y columnas. La manera en la que se asignaron estos pines fue de acuerdo con la ubicación física que tienen dentro del teclado, como se puede apreciar en la figura 173 del diagrama de conexiones, y así facilitar el cableado.

Se optó por arreglos para almacenar la numeración de pines, ya que de este modo es posible acceder a ellos mediante ciclos programados que permiten simplificar el código en las instrucciones repetitivas en las que se encuentran implícitas las filas y las columnas.

Por otro lado, también se requirió de otros 2 arreglos de 2x4 para almacenar los estados anteriores y actuales de las 8 teclas, de modo que cada vez que el estado de una tecla es leído y almacenado en el arreglo de estados actuales, se compara con su correspondiente estado anterior para verificar si ha ocurrido algún cambio y poder actualizar el estado en el mando de juegos y así comunicarlo a la computadora. En caso contrario, si no existe ningún cambio en el estado de la tecla, no es necesario actualizarlo en el mando de juegos.

También se utiliza una variable booleana para almacenar el estado del botón ON OFF para el bloqueo del teclado, al igual que 3 variables de conteo, las cuales son empleadas durante los ciclos iterativos dentro del código y, para la lectura de los datos, se asignó un *delay* de 10 [ms], puesto que se buscaba tener la menor cantidad de tiempo posible debido a que en los videojuegos el tiempo de respuesta entre el periférico y computadora es un factor crucial, y durante las pruebas se observó que al asignar un valor menor había ocasiones en las que las lecturas se tomaban de manera errónea.

- Mediante un análisis realizado por una inteligencia artificial, se estimó que el tiempo total de ejecución del código completo es de aproximadamente 10.31 [ms], incluyendo el tiempo de procesamiento del microcontrolador de la tarjeta Pro Micro.

Por último, para el apartado de variables y constantes, también se configuró el mando de juegos de acuerdo con los parámetros que requería el teclado. Los primeros 2 parámetros permiten definir el tipo de dispositivo que se va a programar, en este caso el mando de juegos al cual le corresponde la ID 0x04, posteriormente, los siguientes 2 parámetros son para los pulsadores con los que cuenta el mando, en este caso, es aquí donde se asignó un valor de 8 correspondiente a las teclas que posee el teclado, y 0 para los botones de sombrero, mientras que para el resto de parámetros se asignó un “false” ya que los siguientes rubros permitían configurar características con las que no cuenta el teclado, como desplazamientos y rotaciones en los ejes “X”, “Y” y “Z” para alguna palanca de juegos, y opciones para el control de vehículos aéreos, marítimos y terrestres, como aceleradores, volantes y frenos.

```
//Código de teclado para los pies

#include "Joystick.h"           //Biblioteca que permite configurar
                                //la tarjeta como mando de juegos.

//Arreglo matricial de botones

int F = 2;                      //Número de filas del arreglo.
int C = 4;                      //Número de columnas del arreglo.

int filas[]={8,9};              //Pines correspondientes a las filas.
int columnas[]={6,7,16,10};     //Pines correspondientes a las columnas.

int ls_tecla[2][4]={{0,0,0,0},  //Arreglo que almacena el estado
                    {0,0,0,0}}; //anterior de las teclas.

int cs_tecla[2][4]={{0,0,0,0},  //Arreglo que almacena el estado
                    {0,0,0,0}}; //actual de las teclas.

//Botón de bloqueo del teclado
bool lock;                      //Estado del botón de bloqueo.

//Variables de conteo
int i,j,k;

//Delay entre cada lectura de los estados de las teclas
int del=10;

//Configuración del mando de juegos
Joystick_ Joystick(0x04,        //Creación del mando de juegos.
  JOYSTICK_TYPE_JOYSTICK,
  8, 0,                         //N. teclas, N. botones de sombrero.
  false, false, false,          //Ejes "X", "Y" y "Z".
  false, false, false,          //Rotación en "X", "Y" y "Z".
  false, false,                 //Timón, Palanca de aceleración.
  false, false, false);         //Acelerador, Freno, Volante.
```

Figura 180. Declaración de variables y constantes de la programación del teclado.

Una vez declaradas todas las variables y constantes, en la función “setup()” se asignaron todos los pines de las filas y columnas como entradas, así como el pin del botón de bloqueo, y se inicializó el mando de juegos para que la tarjeta Pro Micro operara de este modo.

```
void setup() {

  //Inicialización de todos los pines de las filas y columnas
  //como entradas.
  for (i=0;i<F;i++){
    pinMode(filas[i],INPUT);
  }
  for (i=0;i<C;i++){
    pinMode(columnas[i],INPUT);
  }

  //Inicialización del pin del botón de bloqueo como entrada.
  pinMode(5,INPUT);

  //Inicialización del mando de juegos.
  Joystick.begin();
}
```

Figura 181. Función setup() de la programación del teclado.

El motivo por el cual las filas y columnas se mantienen de manera inicial como entradas es porque a lo largo de la lectura de los estados, cada que se lee una tecla, su fila correspondiente cambia su configuración a una salida en *low,* mientras que su columna correspondiente a una entrada *pull-up*, con la finalidad de que al mantenerse el resto de filas y columnas como entradas, la única trayectoria posible por la cual el circuito se podría cerrar sería mediante la fila y columna correspondientes a la tecla en cuestión para así verificar si se encuentra pulsada o en reposo.

Una vez que finaliza la lectura de la tecla, su estado es almacenado en el arreglo de estados actuales y su fila y columna regresan a la configuración de entrada para realizar la misma secuencia con el resto de las teclas mediante ciclos *for*. Primero se realiza la lectura de las 4 columnas que conforman la primera fila, y posteriormente las 4 columnas que conforman la segunda.

Dado que se están empleando entradas *pull-up*, la lectura que se tomaría de la tecla cuando está en reposo correspondería a un estado *high* o “1” lógico, mientras que cuando esté pulsada sería un estado *low* o “0” lógico. Para invertir estas lecturas y tener un estado “1” cuando la tecla esté pulsada y un “0” cuando esté en reposo, al momento de almacenar el estado se utiliza el operador de negación lógica “!”.

Esta secuencia iterativa de la lectura de las teclas fue incluida en una nueva función llamada “leerMatriz()”.

```
//Función de la lectura del estado de cada una de las teclas.
void leerMatriz(){
  //Ciclo para leer fila por fila.
  for (i=0;i<F;i++){
    pinMode(filas[i],OUTPUT);
    digitalWrite(filas[i],LOW);
    //Ciclo para leer columna por columna.
    for (j=0;j<C;j++){
      pinMode(columnas[j],INPUT_PULLUP);
      //Almacenamiento del estado leído.
      cs_tecla[i][j]=!digitalRead(columnas[j]);
      pinMode(columnas[j],INPUT);
    }
    pinMode(filas[i],INPUT);
  }
}
```

Figura 182. Función leerMatriz() de la programación del teclado.

Por último, en la función “loop()” se comienza leyendo el estado del botón de bloqueo y mediante una estructura *if* se verifica si el botón de bloqueo se encuentra activado o desactivado, ya que, en caso de estar activado, directamente no se ejecutaría el resto del código de la función y por lo tanto no se realizaría la lectura de teclas ni se comunicaría algo hacia la computadora.

Por otro lado, si el botón de bloqueo se encuentra desactivado, la estructura *if* permite que se ejecute el resto del código. En primera instancia, se realiza una llamada a la función “leerMatriz()” para realizar la lectura y almacenamiento de los estados de todas las teclas.

Posterior a ello, con 2 ciclos *for,* para cada una de las teclas se verifica con otra estructura *if* si existió un cambio entre el estado anterior y actual de la tecla; en caso de que sí, se realiza una actualización de estado a la tecla del mando de juegos para que sea comunicada a la computadora y se reescribe el estado anterior de la tecla por el nuevo estado para posteriormente volver a hacer la comparativa si el estado ha cambiado nuevamente. En caso contrario, si no existe ningún cambio de estado, no se realiza ninguna actualización. Este proceso iterativo se realiza hasta concluir con las 8 teclas del arreglo.

Una vez concluido, se tiene el *delay* de 10 [ms] y se vuelve a ejecutar a manera de ciclo el código contenido en la función “loop()”.

```
void loop() {

  //Lectura del estado del botón de bloqueo.
  lock=digitalRead(5);

  //Si el botón está en reposo, se permite la
  //lectura del estado de las teclas.
  if(lock==0){
    leerMatriz();

    k=-1;
    //Una vez leídos los estados de las 8 teclas, se asignan dichos
    //estados a los botones del mando de juegos para comunicar las
    //instrucciones de pulsación hacia la computadora.
    for (i=0;i<F;i++){
      for (j=0;j<C;j++){
        k++;
        //Solo si existe un cambio de estado es que se realiza
        //esta actualización en la tecla correspondiente.
        if(cs_tecla[i][j]!=ls_tecla[i][j]){
          Joystick.setButton(k,cs_tecla[i][j]);
          //Finalmente se actualiza el estado previo de la tecla por
          //el estado actual, para seguir realizando la comparativa
          //en la siguiente lectura.
          ls_tecla[i][j]=cs_tecla[i][j];
        }
      }
    }
    delay(del);
  }

}
```

Figura 183. Función loop() de la programación del teclado.

- Consultar el **apéndice B** para visualizar el código completo y el enlace de *GitHub* en el que el código se encuentra almacenado.

Una vez concluido el código, este fue cargado a la tarjeta Pro Micro desde el *IDE* de *Arduino* y junto con el circuito de prueba se verificó que el mando de juego fuera reconocido por el componente de la función de “interpretar información”, es decir, la computadora.

Para ello, se conectó la tarjeta mediante el componente asignado para la función de “comunicar periférico – computadora”, el cable USB Tipo A - micro USB, y se accedió al apartado de “dispositivos de juego” de la computadora para observar si el dispositivo era reconocido.

- Para la comprobación del mando de juegos se utilizó una computadora de escritorio y una portátil, ambas con el sistema operativo Windows 11.

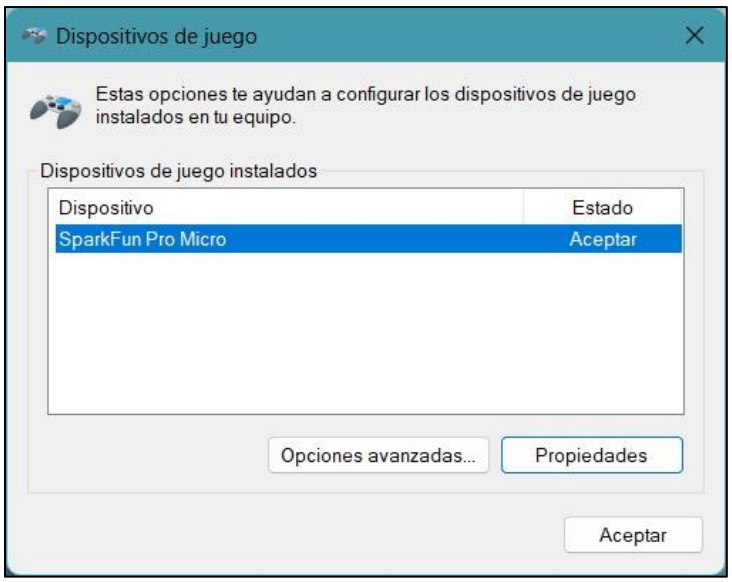


Figura 184. Ventana de dispositivos de juego.

Una vez reconocido el dispositivo, en el apartado de “propiedades” es posible visualizar el estado de los botones y palancas de juego con las que cuente el mando de juegos, en este caso, únicamente los 8 botones del circuito de pruebas.

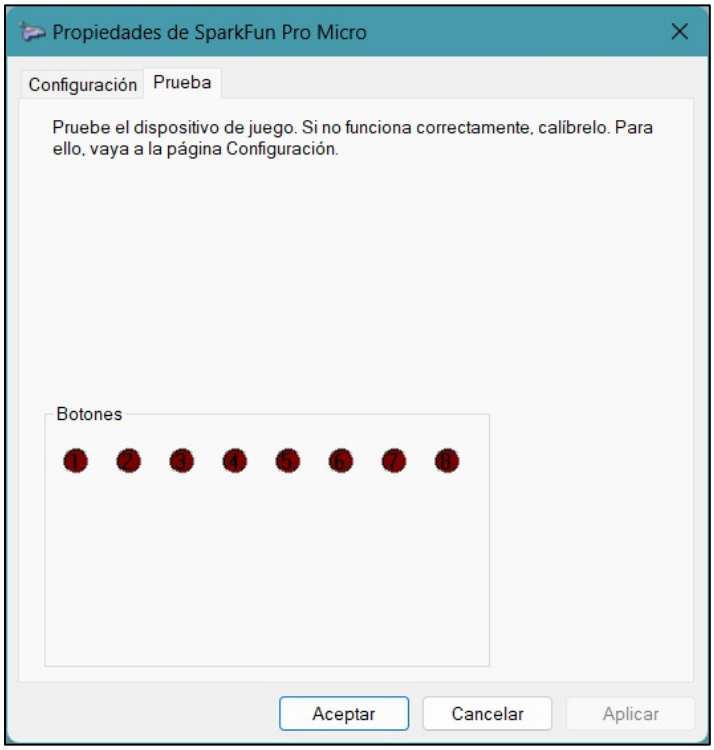


Figura 185. Ventana de las propiedades del dispositivo.

Desde esta ventana, fue posible verificar que los botones funcionaban de manera adecuada una vez que eran pulsados, ya que, al ser presionados los botones, los íconos rojos correspondientes pasan de estar apagados a encendidos.

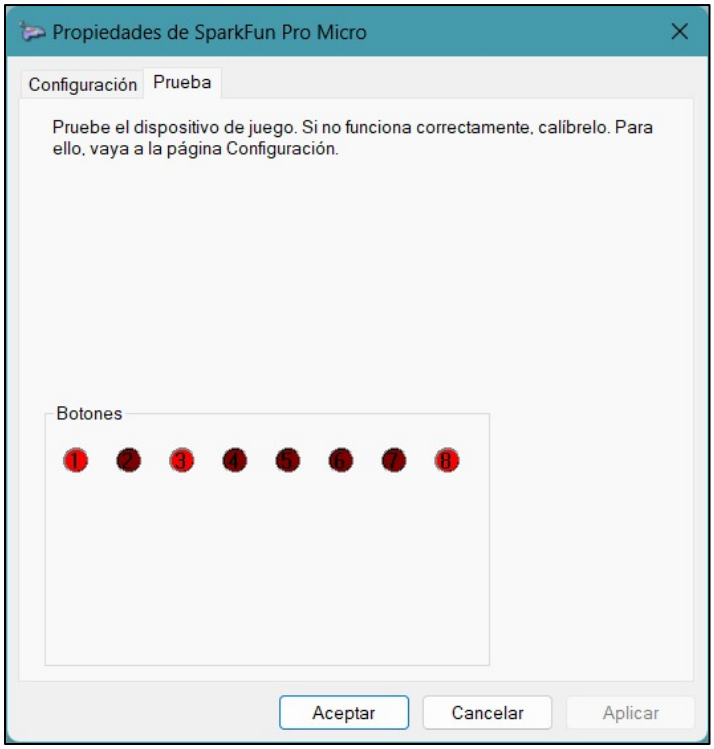


Figura 186. Ventana de las propiedades del dispositivo con 3 botones pulsados.

Se comprobó que todos los botones pudieran ser pulsados, se pudieran pulsar los botones de manera simultánea, no existiera el efecto *ghosting* y que una vez que el botón de bloqueo estuviera activado el resto de los botones no fueran detectados a pesar de ser pulsados.

Sin embargo, a pesar de que el dispositivo pudiera ser detectado por la computadora, todavía no podía ser utilizado en algún videojuego, esto debido a que los botones no estaban configurados bajo ninguna letra, número o carácter perteneciente al teclado o función de un mando de videojuegos convencional; para ello fue necesario el uso de un software que permitiera configurar los botones.

- Para la configuración de las teclas se utilizó el software *AntiMicro*.

AntiMicro es un programa gratuito y descargable en la tienda virtual de *Microsoft* cuya funcionalidad es mapear las teclas del teclado y movimientos del ratón a mandos de juego en un sistema operativo. Está destinado principalmente a videojuegos que no tienen soporte nativo para controladores más allá del teclado y ratón.

En él, se puede asignar cualquier tecla del ratón o teclado a un botón perteneciente al controlador externo, así como también palancas analógicas. También permite la creación de diferentes perfiles personalizados, lo cual da la oportunidad de cambiar entre diferentes configuraciones de manera sencilla.

- Se optó por utilizar un software existente en lugar de desarrollar un controlador exclusivo para teclado, debido a que va más allá de los objetivos del proyecto.

La manera en la que se asignan las teclas es mediante una interfaz gráfica que permite seleccionar la letra, número o carácter del teclado que se desea asignar a cada uno de los botones.

Con solo conectar el dispositivo hacia la computadora, el *software* se encarga de detectarlo automáticamente.

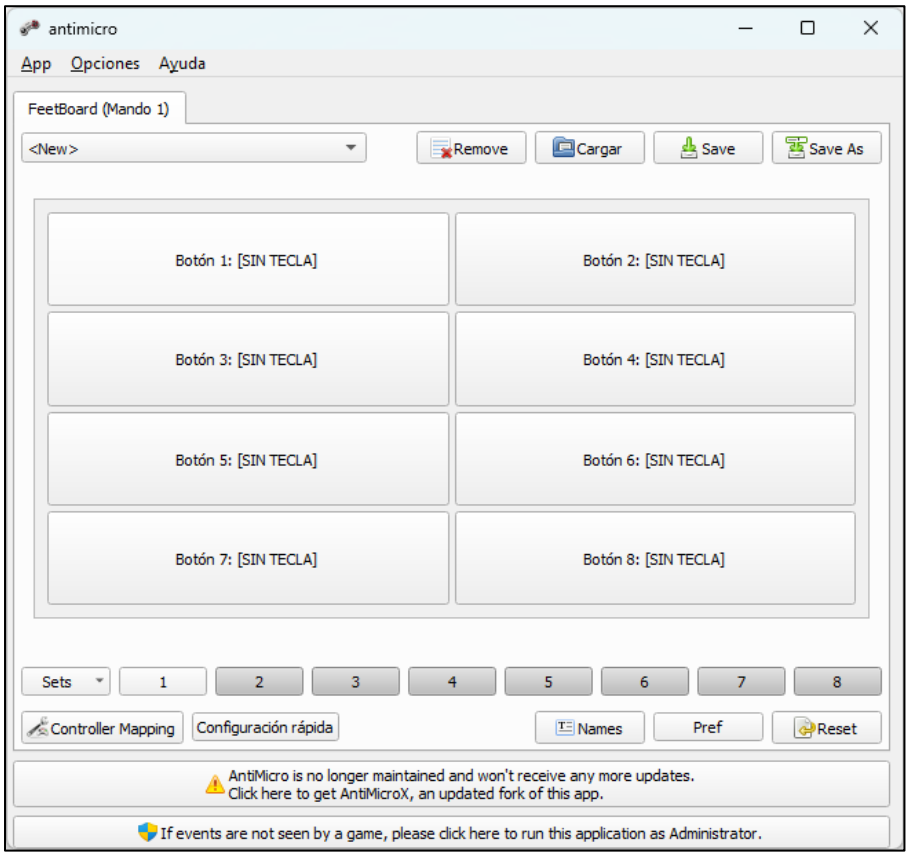


Figura 187. Mando de juegos visto desde el programa AntiMicro.

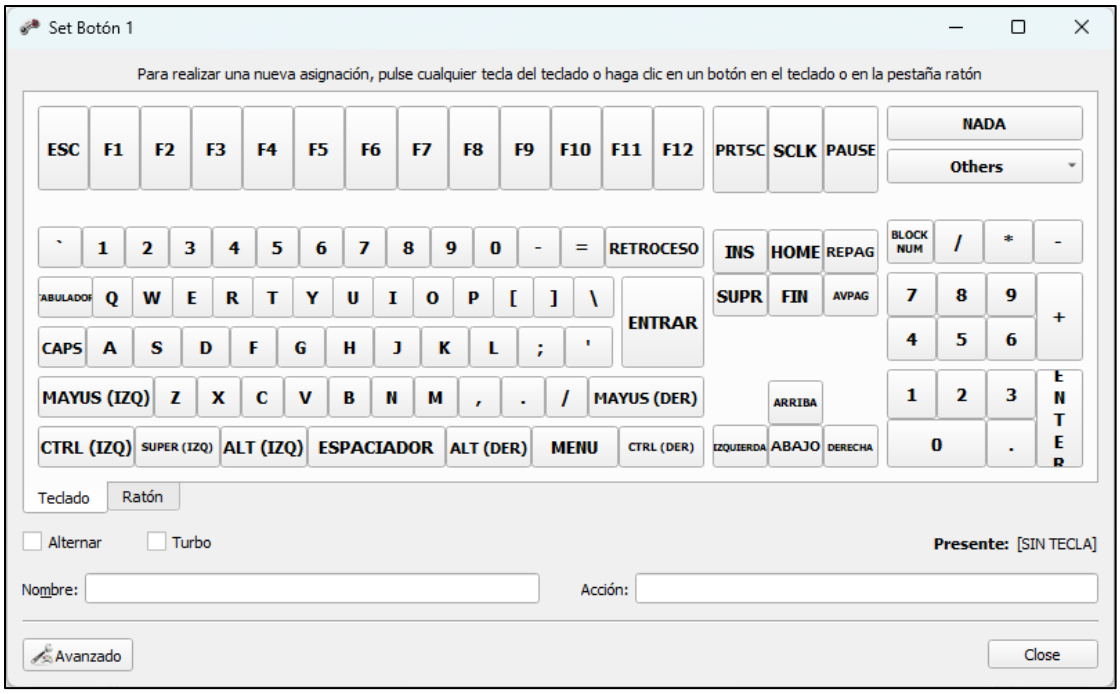


Figura 188. Ventana de mapeo para un botón del mando de juegos.

Por lo tanto, de manera inicial se configuraron las 8 teclas de tal modo que coincidieran con el arreglo preliminar propuesto para el set de piezas de letras y símbolos, figura 144. De tal modo que la configuración para los botones del circuito de prueba resultó de la siguiente manera:

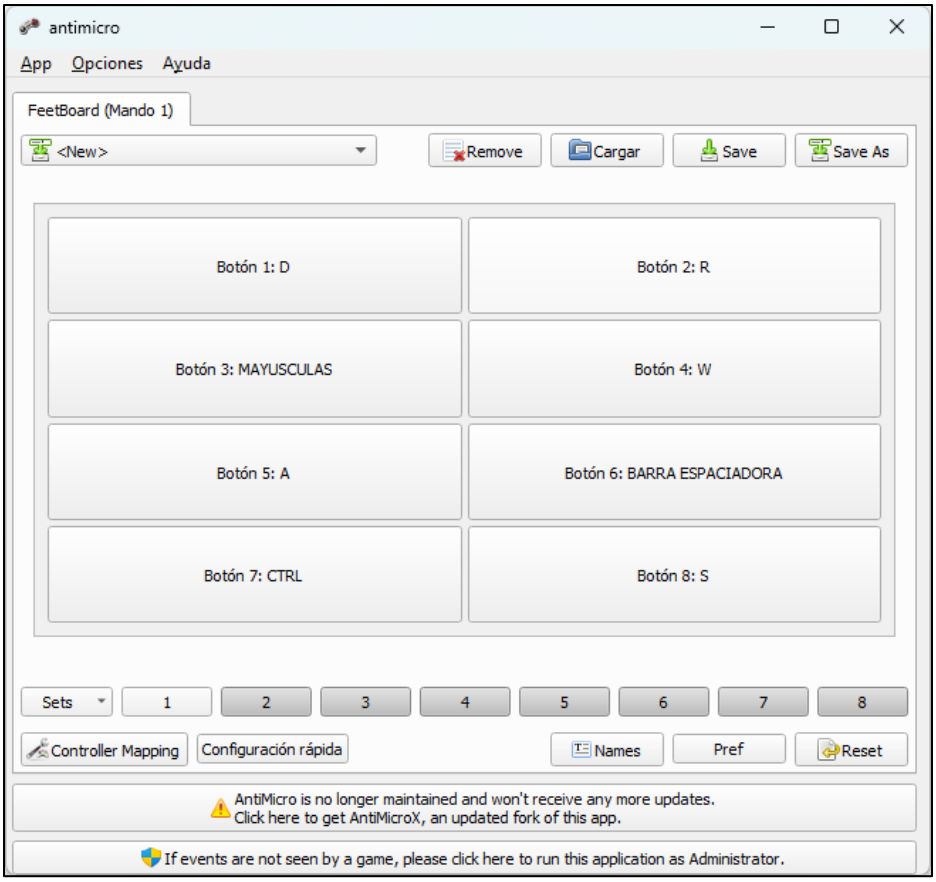


Figura 189. Configuración del mando de juegos.

Una vez configurado, se probó el circuito en 2 videojuegos pertenecientes a la lista de los 8 videojuegos de disparos más jugados, tabla 9, *Fortnite* y *Overwatch*.

En ambos juegos se configuraron las 8 acciones más frecuentes con sus respectivas teclas y se probó que al oprimir los botones en el circuito de prueba se realizaran las acciones correspondientes.

A continuación, se muestran capturas de las 8 teclas presionadas de manera simultánea en las que se realizan los movimientos correspondientes dentro del videojuego *Overwatch*.

- Para las imágenes, como referencia de las acciones de movimiento se tomó la diana de tiro situada al frente del personaje tal y como se puede apreciar a continuación.

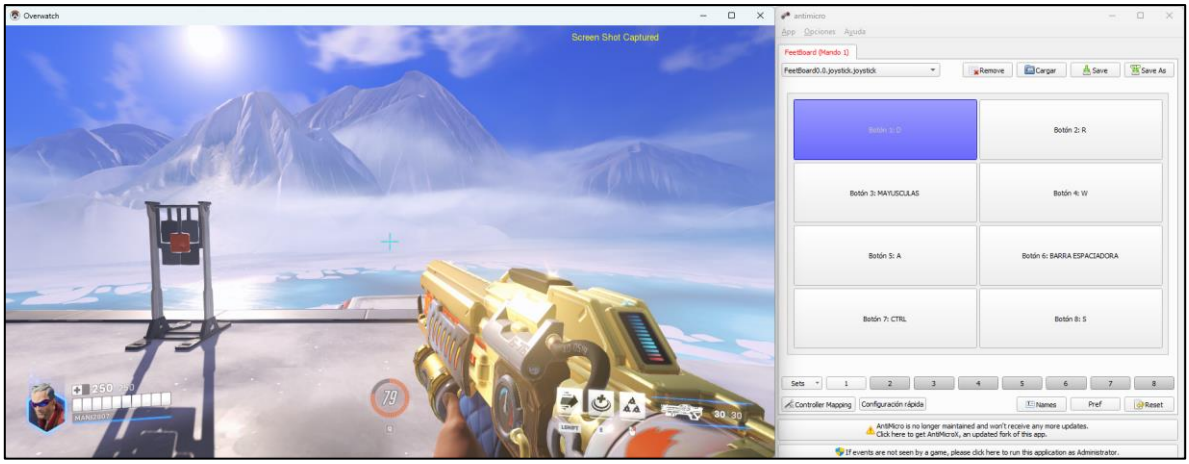


Figura 190. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "desplazamiento hacia la derecha".

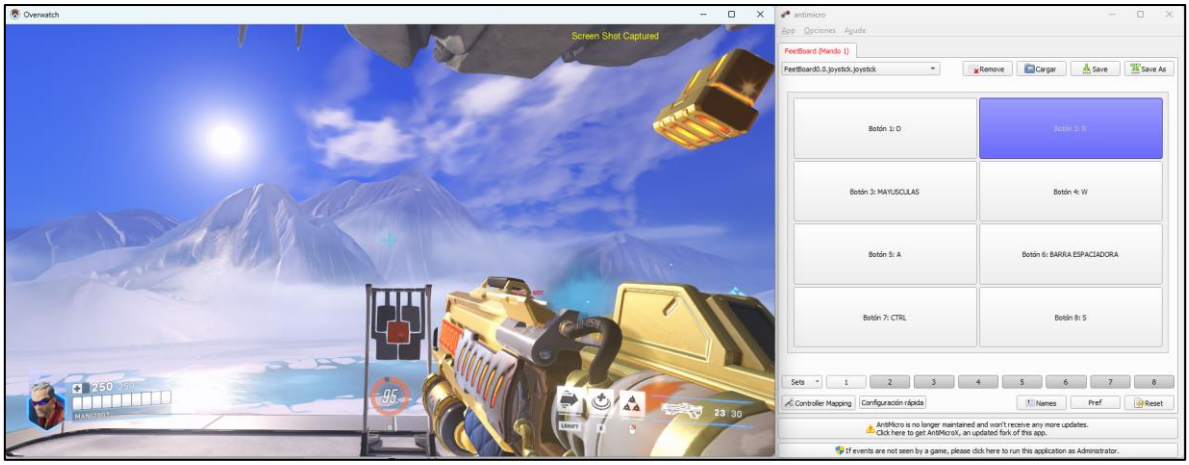


Figura 191. Pulsación del botón correspondiente a la acción "recargar".

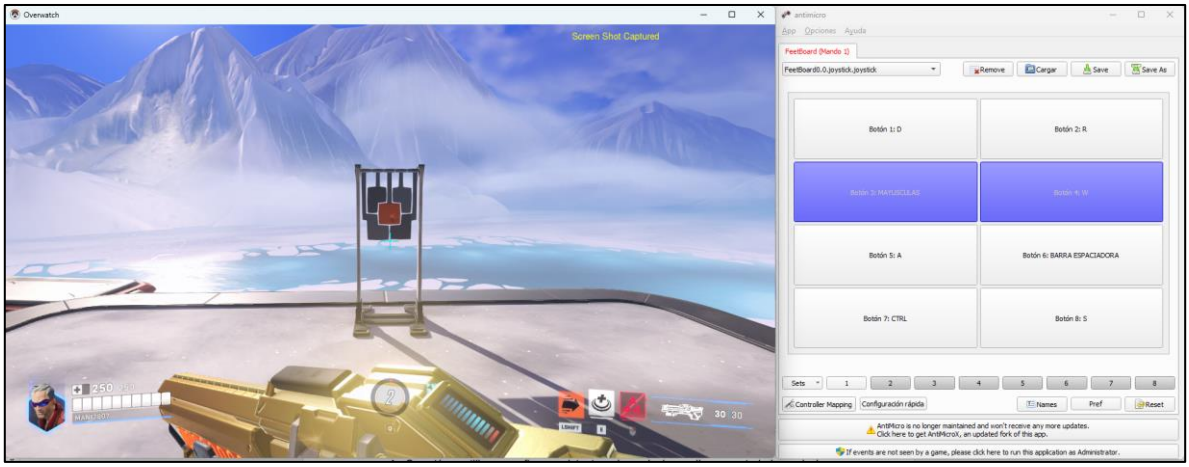


Figura 192. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "correr".

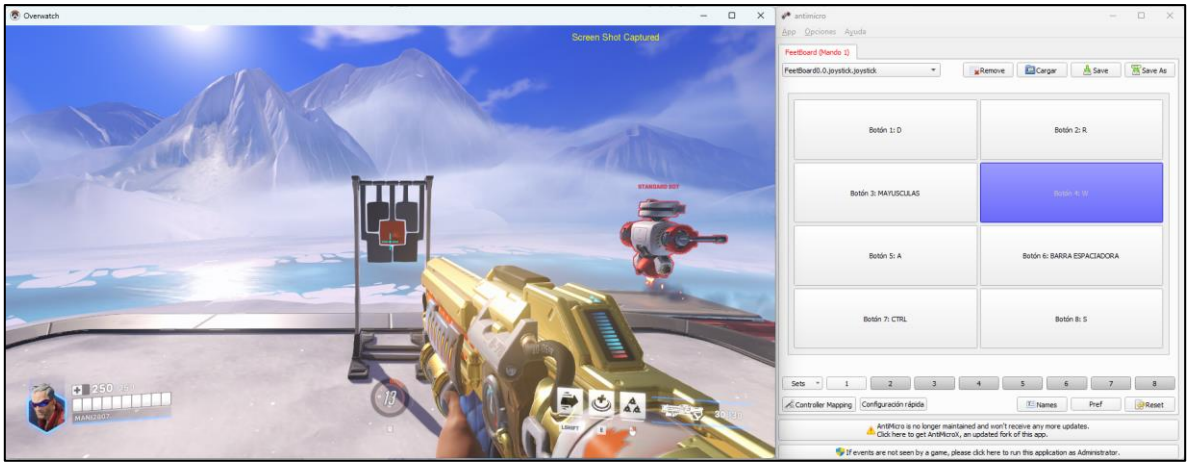


Figura 193. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "desplazamiento hacia adelante".

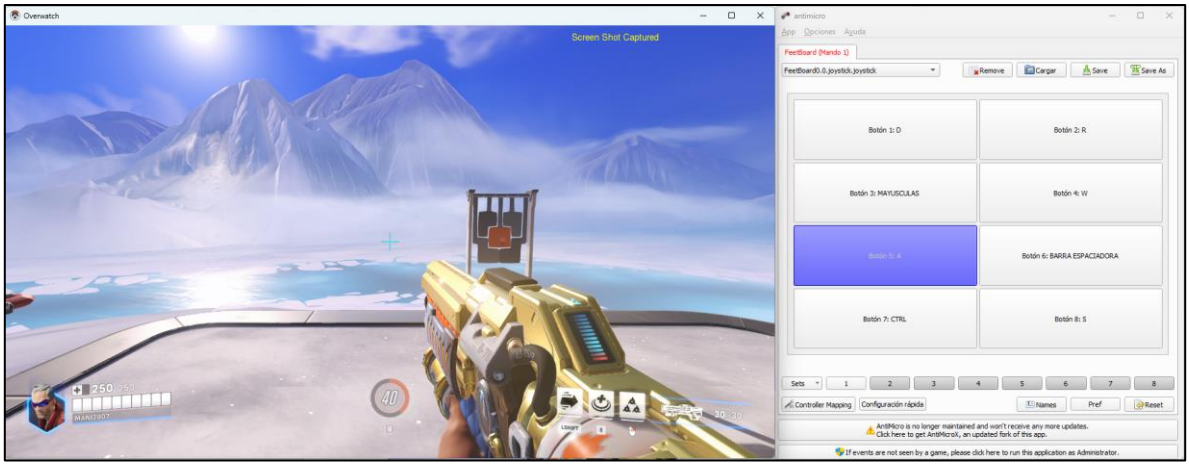


Figura 194. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "desplazamiento hacia la izquierda".

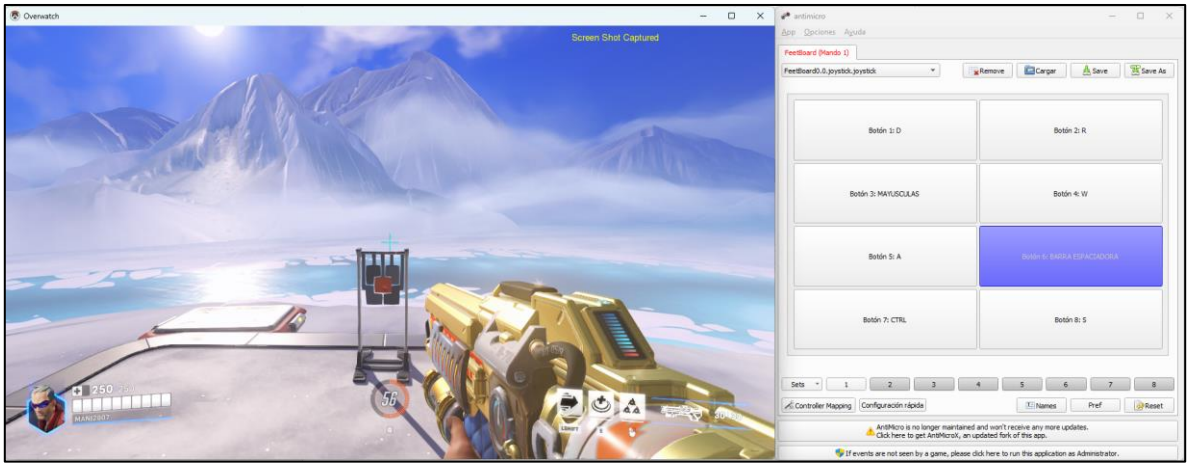


Figura 195. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "saltar".

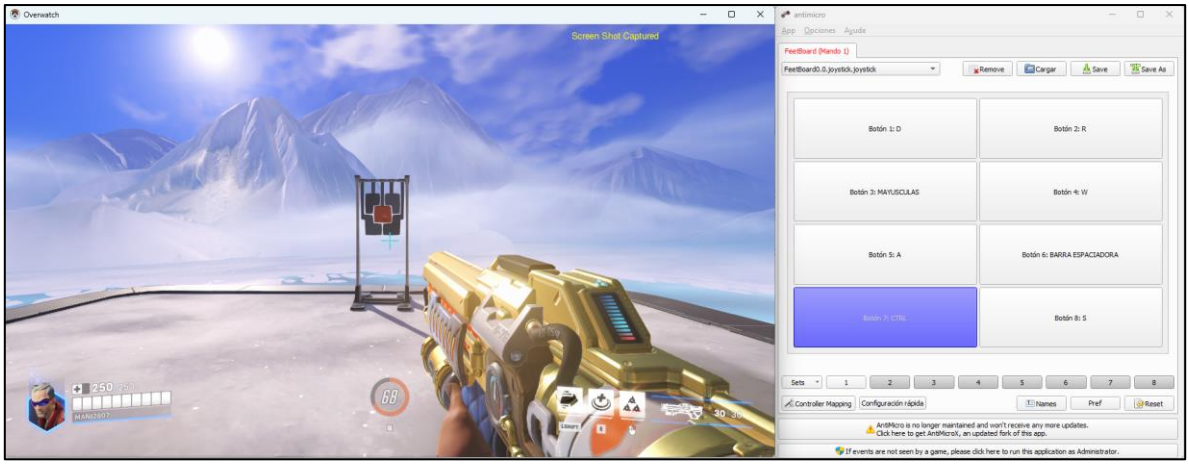


Figura 196. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "agacharse".

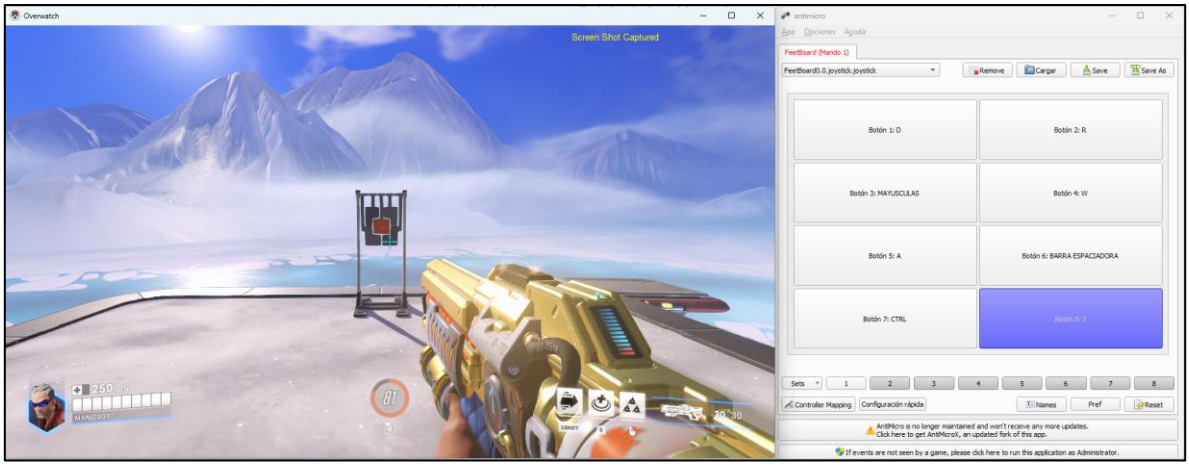


Figura 197. Pulsación del botón correspondiente al movimiento "desplazamiento hacia atrás".

De lo anterior, en ambos casos se observó que al pulsar los botones se realizaban las acciones solicitadas dentro de los videojuegos; por lo tanto, la programación y el uso del software *AntiMicro* cumplieron con el objetivo deseado.

Fue así como una vez verificados los apartados de electrónica y programación mediante el circuito de prueba, se procedió con el ensamble del teclado.

3.10 Ensamble

Una vez manufacturadas todas las piezas y teniendo el diagrama de conexiones, así como el código programado, se procedió con el ensamble de todo el teclado, comenzando por las piezas de las bases.

La manera en la que se ensamblaron las piezas de las bases de los 8 módulos fue mediante los tornillos M3x16 y sus respectivas tuercas, los cuales fueron colocados de manera manual en los 4 orificios de las paredes de los módulos que se encuentran contiguas a otro módulo. La forma en la que fueron colocados los tornillos fue alternadamente tal y como se muestra a continuación:

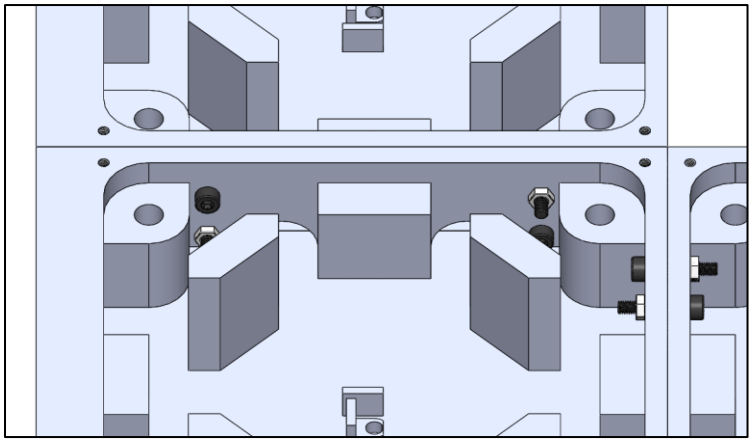


Figura 198. Distribución de los tornillos de ensamble sobre cada pared.

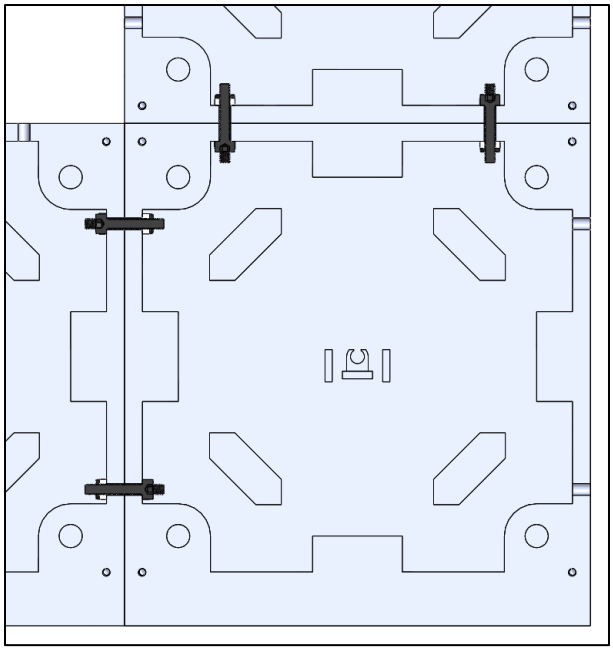


Figura 199. Vista de corte de la distribución de los tornillos de ensamble sobre cada pared.

El motivo por el cual se colocaron los tornillos de este modo fue para distribuir las tuercas y cabezas de tornillo sobre todos los módulos y así evitar que algunos de ellos quedaran con distribuciones desiguales. En total se requirieron de 45 tornillos y 45 tuercas para el ensamble de las bases.

Al momento de unir los módulos 2 y 3, primero se colocó el cable USB junto con la tarjeta Pro Micro y el soporte de la tarjeta, ya que de otro modo el cable no podría ser introducido posteriormente, ya que la geometría de las piezas está realizada de tal modo para que el cable se mantenga fijo mediante un ajuste geométrico. Para el soporte de tarjeta se utilizaron 2 tornillos M2x16.

- Se optó por emplear una tarjeta de desarrollo Pro Micro en lugar de desarrollar una PCB con los requerimientos del teclado, puesto que se trata de un prototipo.

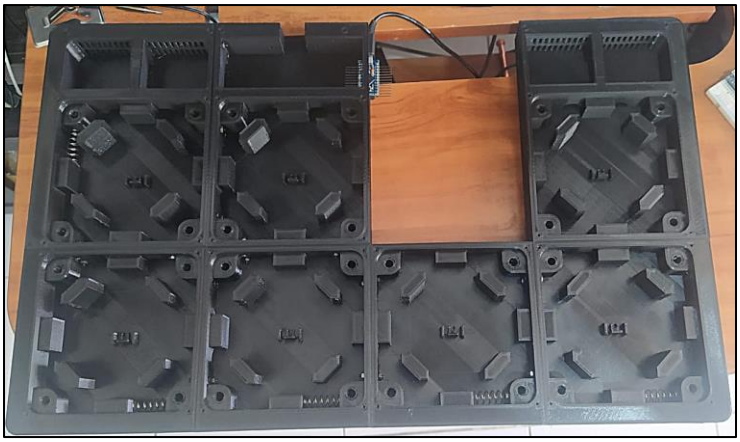


Figura 200. Piezas de las bases ensambladas.

Posteriormente al ensamble de todas las bases, se realizó el cableado del teclado.

De manera inicial, se soldó un diodo 1N4148 a cada uno de los pines izquierdos de los interruptores mecánicos para que estos fueran soldados a los cables de las filas de la matriz, mientras que los pines derechos de los interruptores mecánicos fueran soldados a los cables de las columnas.

Para el cableado del teclado se utilizó alambre de cobre calibre 24 AWG color rojo para las filas del arreglo de interruptores y color negro para las columnas. De igual forma, el color rojo fue utilizado para la sección correspondiente al botón de bloqueo y el LED indicador; a excepción del cable que está conectado a la tierra de la tarjeta, para este se utilizó uno color negro.

A su vez, el recubrimiento del cable rojo fue retirado en los segmentos en los que debía ser soldado con los diodos de las teclas, mientras que el cable negro en los segmentos en los que debía ser soldado con pines de los interruptores mecánicos.

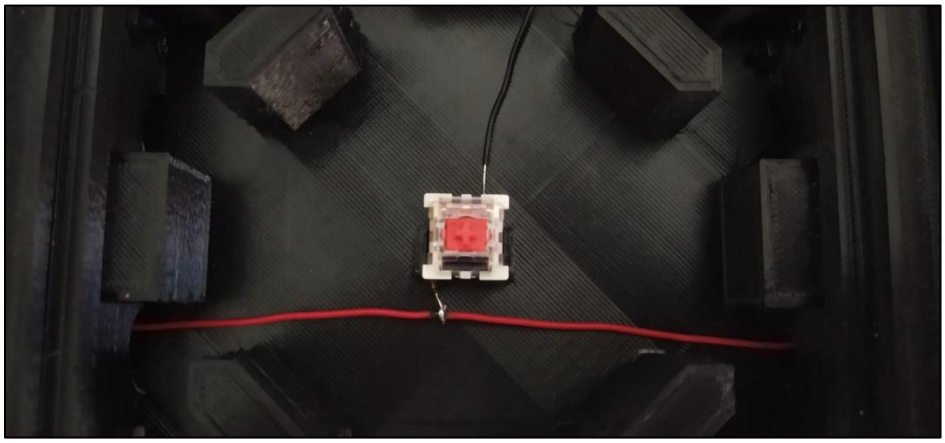


Figura 201. Soldadura de los cables sobre un interruptor.

Por lo tanto, se realizaron todas las conexiones de los interruptores mecánicos, así como del interruptor *ON OFF* y el LED indicador, y se conectaron hacia la tarjeta Pro Micro.

Figura 202. Cableado del teclado.

Posteriormente, todos los logotipos y las tiras decorativas de PLA fueron adheridas con el pegamento de cianocrilato en sus respectivas cavidades.

Figura 203. Fijación del logotipo de la acción “correr”.

Figura 204. Set de logotipos.

Figura 205. Set de letras y símbolos.

Para la fijación de las piezas de las teclas, para cada módulo fue necesario colocar 1 resorte en la parte superior del interruptor mecánico y colocar la pieza de tal modo que los postes guía coincidieran con los 4 orificios de la base, al igual que hacer pasar el acople del interruptor a través del resorte hasta lograr acoplarlo con el interruptor mecánico. Una vez logrado esto, de manera simultánea se requirió fijar el retenedor de tecla con los tornillos M2x16 hacia la pieza de la base para conseguir el ensamble entre las 3 piezas, el resorte y el interruptor. En total se requirieron de 40 tornillos para el ensamble de los retenedores.

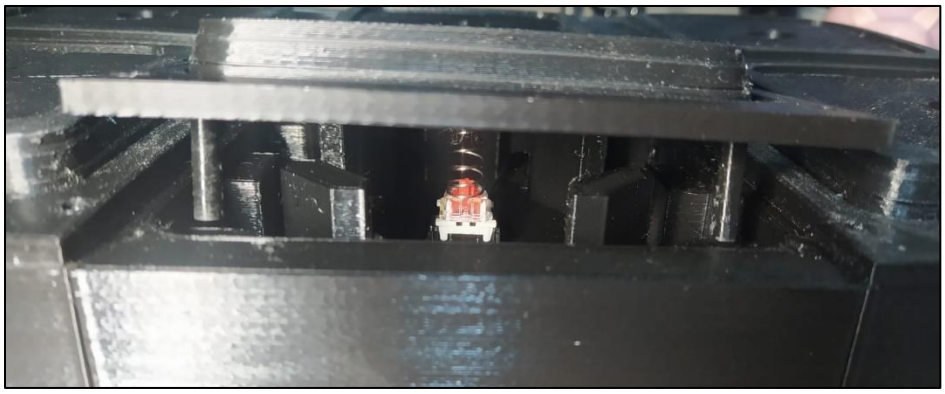


Figura 206. Ensamble de la base, tecla y retenedor.

Antes del ensamble de las teclas y los retenedores de los módulos 2 y 3, se fijó la pieza de la agarradera hacia las bases con los 4 tornillos M3x40 y 4 tuercas.

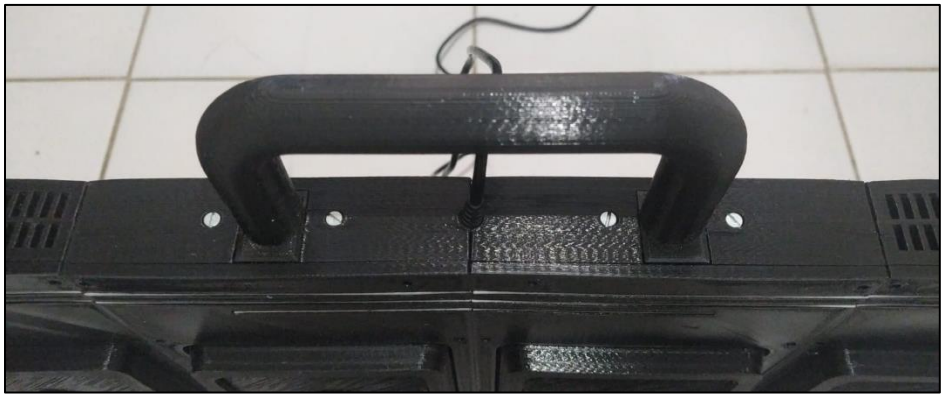


Figura 207. Ensamble de la agarradera.

Dando como resultado el siguiente ensamble al tener las piezas de las bases, teclas, retenedores y elementos decorativos:

Figura 208. Ensamble de bases, teclas y retenedores.

- Para cada módulo, una vez que su tecla y retenedor eran ensamblados, se comprobaba desde el programa *AntiMicro* que al pulsar la tecla esta fuera detectada.

Mientras que en la parte inferior del teclado se colocaron las 12 almohadillas antideslizantes distribuidas en las bases de los módulos.

Figura 209. Almohadillas antideslizantes del teclado.

Si bien este ensamble ya es funcional, solo es cuestión de agregar las placas con logotipos y los recubrimientos para que el ensamble esté completo. Por ende, se pueden realizar diferentes configuraciones de acuerdo con las preferencias del usuario, ya sea con el arreglo de logotipos o el de letras y símbolos.

Figura 210. Teclado para pies con logotipos de acciones.

Figura 211. Teclado para pies con logotipos de letras y símbolos.

Fue así como el teclado quedó ensamblado por completo y se puso a prueba en diferentes videojuegos para comprobar su funcionalidad.

4. Fase de pruebas

Para las pruebas finales del teclado, primero fue conectado hacia una computadora de escritorio y posteriormente hacia una portátil mediante el cable USB y se verificó que cada una de las teclas fuera detectada independientemente de la zona en la que fuera pulsada.

Figura 212. Conexión del teclado para pies hacia una computadora de escritorio.

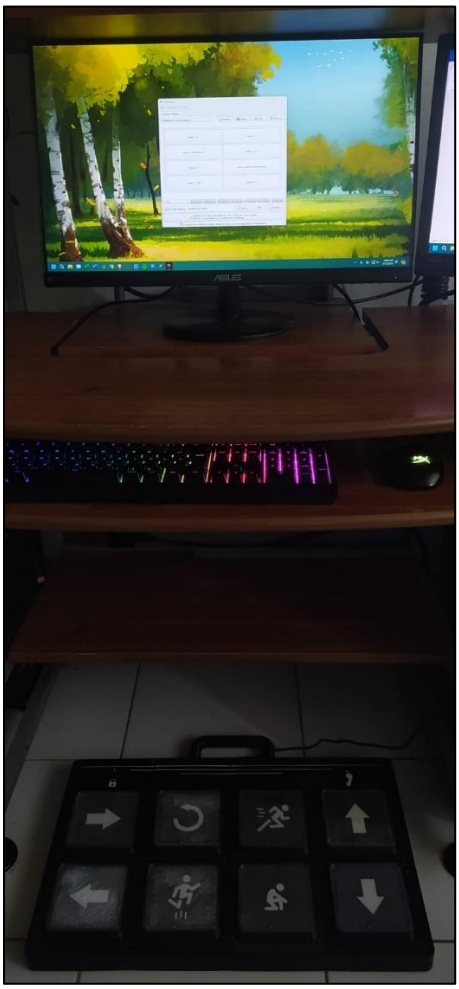


Figura 213. Conexión del teclado para pies hacia una computadora de escritorio.

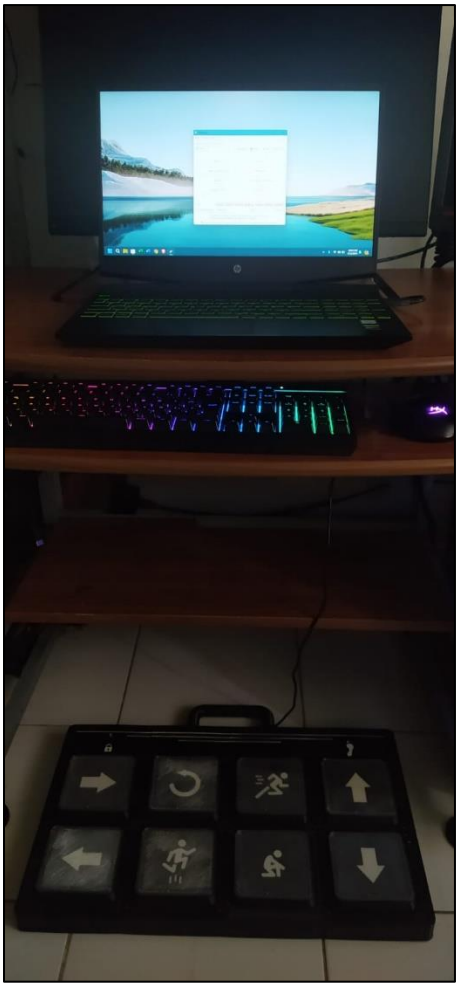


Figura 214. Conexión del teclado para pies hacia una computadora portátil.

De lo cual se pudo observar que todas eran detectadas de la manera esperada. Posteriormente, también se comprobó que el botón de bloqueo evitara que las teclas fueran detectadas al ser pulsadas.

Figura 215. Teclado para pies en modo desbloqueado.

Figura 216. Teclado para pies en modo bloqueado.

De igual forma, el botón de bloqueo actuó de la manera correcta.

Una vez comprobados ambos aspectos, fue así como se procedió a probar el teclado en 4 de los 8 videojuegos de disparos de la tabla 9. Estos fueron *Overwatch, Fortnite, PUBG* y *GTA V*.

En cada uno de ellos, dentro de la propia configuración del juego, se asignaron las 8 acciones requeridas a la tecla correspondiente.

Acción	Tecla asignada	Logotipo
Desplazarse hacia adelante	W	Flecha hacia arriba
Desplazarse hacia atrás	S	Flecha hacia abajo
Desplazarse hacia la izquierda	A	Flecha hacia la izquierda
Desplazarse hacia la derecha	D	Flecha hacia la derecha
Saltar	Barra espaciadora	Muñeco saltando
Agacharse	LCtrl	Muñeco agachado
Recargar	R	Flecha circular
Correr	LShift	Muñeco corriendo

Tabla 55. Logotipo correspondiente a cada tecla asignada.

Ya que, independientemente de que se esté empleando el set de logotipos de acciones, es necesario configurar desde el programa *AntiMicro* la tecla a la que se hace alusión en el teclado.

Posterior a ello, para cada uno de los videojuegos se probó el teclado en las respectivas modalidades multijugador en línea de cada uno de ellos durante 2 horas, utilizando únicamente el teclado para pies y la mano derecha para manipular el ratón.

Fue solo para acciones puntuales y estáticas en las que se empleó el teclado convencional, mientras que se usó el teclado para pies para todo tipo de acciones dinámicas. Ya que, como se mencionó desde un inicio, el teclado para pies no busca sustituir en su totalidad las funciones que realiza un teclado convencional, sino ser un dispositivo de accesibilidad complementario que puede ser utilizado de manera simultánea con otro tipo de periféricos.

Figura 217. Teclado para pies en uso.

Figura 218. Teclado para pies en Overwatch y Fortnite.

Figura 219. Teclado para pies en PUBG y GTA V.

Después de probar el teclado en los 4 videojuegos, se pudo observar lo siguiente:

1. El tiempo de respuesta entre la pulsación de una tecla y la ejecución de la acción en el videojuego es adecuado, debido a que no es perceptible el tiempo de retraso entre la pulsación y la ejecución, debido a que el microcontrolador posee un *delay* de 10 [ms] e incluso hay teclados convencionales con retrasos de hasta 30 [ms].

2. La distribución y las dimensiones de las teclas permiten que 1 pie pueda pulsar hasta 4 teclas al mismo tiempo, es decir, sería posible pulsar las 8 teclas en caso de desearlo, lo cual da la posibilidad de realizar acciones simultáneas dentro de los videojuegos en caso de ser requeridas.

3. Debido a que la distribución de las teclas fue una propuesta preliminar, fue preferible modificar la ubicación de algunas de estas para tener una configuración más adecuada a las preferencias del usuario. Esta labor fue fácil de realizar con las placas con logotipos intercambiables y la interfaz gráfica de configuración con la que cuenta el programa *AntiMicro*.

4. En caso de sostener el teclado desde la agarradera a manera de portafolio, las placas con logotipos se mantienen en su posición gracias a los recubrimientos transparentes, cuyas pestañas son introducidas con una ligera presión sobre la pieza de la tecla y son fáciles de retirar una vez que son jalados con una mano.

5. A pesar de la pulsación de las teclas, el teclado se mantiene en su posición sin desplazamientos laterales gracias a las almohadillas antideslizantes situadas en la parte inferior de las bases de los módulos.

6. Al igual que con cualquier dispositivo de control, se requiere de un tiempo de adaptación para acostumbrarse a la distribución de las teclas y a realizar las acciones de los videojuegos mediante este periférico en lugar de un teclado convencional.

7. Si bien el botón de bloqueo cumple con su funcionalidad, una vez que el usuario se encuentra manipulando el teclado mediante los pies, es difícil pulsarlo con esta parte del cuerpo, por lo que es conveniente pulsarlo con un dedo de la mano.

8. Durante el uso del teclado, existían momentos en los que alguno de los pies no requería pulsar ninguna de las teclas y, por ende, este se encontraba en reposo; sin embargo, no era posible apoyar el pie por encima de las teclas para reposar el pie sobre ellas, debido a que el peso del propio pie era suficiente para accionarlas, por lo que era necesario colocarlo a un costado del teclado.

9. Una vez que el teclado es conectado hacia la computadora, no existe una retroalimentación visual que indique que se encuentra encendido, sino hasta pulsar el botón de bloqueo o consultar el estado del teclado desde el apartado de “dispositivos de juego” o en el programa *AntiMicro*.

De manera general, el teclado cumple con el objetivo principal de ser un periférico complementario a los teclados y ratones convencionales que proporciona una alternativa para realizar las acciones más frecuentes al momento de jugar videojuegos de disparos, que puede ser configurado de acuerdo a las preferencias de cada usuario, con un tiempo de respuesta corto, una geometría y dimensiones aptas para ambos pies, fácil de transportar con una sola mano y capaz de soportar desplazamientos laterales así como una carga excesiva sobre las teclas.

Por otro lado, los últimos 3 puntos anteriores señalan áreas de oportunidad que mejorarían el funcionamiento del teclado. Para el primero de ellos, el botón de bloqueo podría ser mejorado al implementar otra tecla que pudiera seguir siendo pulsada por los pies, pero de un tamaño más reducido que de igual forma se pudiera colocar por encima del apartado de electrónica.

El segundo podría ser solucionado al intercambiar y probar resortes con una mayor rigidez que requirieran una mayor fuerza para ser pulsados, y de este modo los pies pudieran estar en reposo sobre las teclas cuando estas no sean requeridas.

Por último, la implementación de otro LED indicador que se active una vez que el teclado sea conectado podría otorgar una mejor visualización de que el teclado se encuentre encendido.

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo, fue posible identificar una problemática que existe dentro del amplio mundo de los videojuegos en aquellas personas que cuentan con algún tipo de discapacidad de miembro superior, ya que, como se pudo observar, en la actualidad los videojuegos representan un gran medio de entretenimiento en todos los grupos de edades; por ende, es importante mirar más allá de los dispositivos que existen en la actualidad los cuales están en gran medida diseñados con estándares enfocados a personas que no cuentan con algún tipo de discapacidad, mientras que aquellos dispositivos que sí lo hacen, es de manera generalizada sin dar énfasis a algún tipo de discapacidad en específico; sí bien dan la posibilidad de proporcionar accesibilidad a una gran cantidad de estas, cada una de ellas cuenta con sus propias necesidades.

Fue gracias al análisis realizado sobre los tipos de discapacidades más frecuentes en personas que juegan videojuegos que se pudo identificar que la que se presenta más frecuentemente se halla en algún miembro superior, así como las tendencias en los videojuegos que se juegan hoy en día. Con base en ello, fue posible realizar un periférico enfocado principalmente a este tipo de discapacidad y así cubrir sus necesidades, de modo que se utilizaron los rubros del diseño, mecánica, electrónica y programación para la creación de este.

Para la realización física del teclado, se puso en práctica el análisis de las dimensiones antropométricas en el sector de edad más representativo de jugadores de 19 a 24 años, al igual que tomar en cuenta la postura de una persona al estar sentada y el espacio de trabajo de ambos pies para, con base en ello, poder realizar diversos prototipos del funcionamiento de una tecla y llegar a una tercera iteración final compuesta de 6 piezas distintas, base, tecla, placa con logotipo, logotipo, retenedor y recubrimiento que fueron modeladas tomando como referencia la geometría rectangular seleccionada y las dimensiones promedio de un pie de 250 [mm].

Dichas piezas dieron paso a realizar análisis estáticos de fuerzas, tomando como base el criterio de falla de Von Mises y las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el método de manufactura aditiva empleado, con el propósito de validar el diseño con factores de seguridad de las piezas que se encuentran constantemente bajo cargas como el peso del usuario, lo cual posteriormente fue verificado en pruebas experimentales de los prototipos con cargas reales.

De igual forma, debido a la manufactura aditiva, el teclado fue segmentado en distintas piezas, lo cual implicó realizar 2 métodos de ensamble distintos, fijación mediante tornillos y tuercas, y adhesión mediante un pegamento de cianoacrilato.

Para el funcionamiento del teclado, se requirió comparar y seleccionar distintos componentes electrónicos que de manera conjunta fueran compatibles para tener una configuración que diera solución a todas las funciones requeridas para el funcionamiento del teclado, teniendo como componente principal a la tarjeta Pro Micro debido a su capacidad de actuar como dispositivo de interfaz humana que le permite ser reconocida por la computadora como un periférico, en este caso, como un mando de juegos.

De manera conjunta con la electrónica del teclado, se programó el código de la tarjeta para la lectura de las pulsaciones de las teclas y, a su vez, con un programa externo se mapeó cada una de las teclas para que estas correspondieran a alguna de un teclado convencional con la finalidad de que pudieran ser reconocidas dentro de los videojuegos.

Posteriormente, se validó a lo largo de diversos videojuegos que el teclado cumpliera con las necesidades establecidas inicialmente. Y con base en ello, se detectaron áreas de oportunidad que permitirían un trabajo a futuro para un mejor funcionamiento del prototipo.

Por otro lado, además de las propuestas mencionadas en la sección anterior, de vista a un teclado más robusto que el prototipo desarrollado a lo largo de este trabajo, también se identificaron las siguientes opciones:

1. Pruebas del teclado con usuarios que sufren discapacidades de miembro superior para obtener una retroalimentación de otras áreas de mejora.

2. Optimizar la geometría de las piezas para reducir la cantidad de material empleado en caso de contar con un tipo de manufactura que implique 100% de relleno en las piezas, para que el peso no aumente demasiado.

3. Cambiar el tipo de manufactura aditiva por inyección de plástico para reducir considerablemente los tiempos de manufactura.

4. Cambio y selección de nuevos materiales que sean compatibles con el nuevo método de manufactura.

5. Elaboración de moldes para cada una de las piezas para la inyección de plásticos.

6. Optimización de los ensambles para disminuir o eliminar los tornillos y tuercas.

7. Elaboración de una PCB para el microcontrolador.

8. Implementación de cable especializado para las conexiones de los interruptores.

La implementación de cada uno de estos aspectos daría la oportunidad de cambiar el enfoque del desarrollo de un prototipo a un teclado que pudiera ser utilizado por el público en general.

Como se mencionó a lo largo del trabajo, el teclado para pies es un dispositivo que no busca sustituir totalmente las funciones que realiza un teclado convencional, sino que se trata de un periférico que puede ser empleado de manera conjunta con otro tipo de dispositivos como lo pueden ser un teclado convencional, un ratón con botones adicionales, un mando de videojuegos y que, incluso, puede ser utilizado por personas que no cuentan con ningún tipo de discapacidad.

Por último, si bien el diseño y prototipado del teclado tuvo como principal enfoque el sector de los videojuegos, también se trata de un dispositivo de control, el cual puede ser extrapolado a otras áreas que requieran la manipulación manual de algún tipo de maquinaría o medio digital, como la robótica, automatización, teleoperación, sistemas de entrenamiento, entre otras, donde las personas con alguna discapacidad de miembro superior podrían tener consecuencias inmediatas al no poder manipular los dispositivos de control estándares que existen en la actualidad.

Es por ello por lo que el desarrollo de este tipo de dispositivos puede ser destinado y diversificado a otras tareas con el propósito de poder brindar una mayor accesibilidad e inclusión a aquellas personas que cuentan con alguna discapacidad.

Referencias

1. Chávez, A. (2023). Global: Los videojuegos ganan mayor popularidad que la TV. En YouGov. Recuperado en enero 2024 de: https://business.yougov.com/es/content/46619-global-videojuegos-ganan-mayor-popularidad-que-la-tv

2. YouGov. (2023). Reaching Gamers - everywhere. En YouGov. Recuperado en enero 2024 de: https://commercial.yougov.com/rs/464-VHH-988/images/YouGov-Gaming-and-Esports-whitepaper-2023-Reaching-Gamers-everywhere.pdf

3. IFT. (2022). Reporte Especial Estado del Gaming en México 2021. En Somos Audiencias IFT. Recuperado en noviembre 2024 de: https://somosaudiencias.ift.org.mx/archivos/INFORME_Videojuegos2022OCT_VF.pdf

4. Microsoft. (2024). Xbox Adaptive Controller. En Xbox. Recuperado en febrero 2024 de: https://www.xbox.com/es-ES/accessories/controllers/xbox-adaptive-controller

5. Sony Interactive Entertainment. (2024). Control Access. En PlayStation. Recuperado en febrero 2024 de: https://www.playstation.com/es-mx/accessories/access-controller/

6. Gaming Readapted. (2024). Azeron Cyro Controller. En Gaming Readapted. Recuperado en febrero 2024 de: https://www.gamingreadapted.com/azeron-cyro-controller

7. Evil Controllers. (s.f.). Accessible Gaming. En Evil Controllers. Recuperado en febrero 2024 de: https://www.evilcontrollers.com/accessible-gaming

8. Beeston, J. (2020). Social experiences of people with disabilities in playing (in)accessible digital games. White Rose eTheses Online. Recuperado en noviembre 2024 de: https://etheses.whiterose.ac.uk/29408/1/Beeston_102026788_ThesisClean.pdf

9. Wikijuegos. (2024). Géneros de videojuegos. En Wikijuegos. Recuperado en febrero 2024 de: https://videojuegos.fandom.com/es/wiki/G%C3%A9neros_de_videojuegos

10. Romp Te Mueve. (2022). Tipos y causas de amputación. En Romp Te Mueve. Recuperado en febrero 2024 de: https://romptemueve.org/amputacion-tipos-y-causas/

11. Instituto Provincial de Administración Pública. (s.f.). Manual de procedimientos administrativos. Recuperado en febrero 2024 de: https://ipap.chaco.gov.ar/uploads/publicacion/8c8a0751a6c8e0cb80694a0d8f07130f09ed56c4.pdf

12. ActivePlayer. (2024). Top 15 most popular PC games of 2024. En ActivePlayer. Recuperado en febrero 2024 de: https://activeplayer.io/top-15-most-popular-pc-games-of-2022/

13. Steam. (2024). Los más jugados. En Steam. Recuperado en febrero 2024 de: https://store.steampowered.com/charts/mostplayed

14. Vt en línea. (2018). Todo sobre Arduino Pro Micro. [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/3BVeO-Uj8g0?si=JHC8iM4VzzD2UtoR

15. Ávila, R., Prado, L. R., & González, E. L. (2007). Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile. ResearchGate. Recuperado en marzo 2024 de: https://www.researchgate.net/publication/31722433_Dimensiones_antropometricas_de_la_poblacion_latinoamericana_Mexico_Cuba_Colombia_Chile_R_Avila_Chaurand_L_R_Prado_Leon_EL_Gonzalez_Munoz

16. Grupo Fisioderm. (s.f.). Cómo sentarse correctamente. En Grupo Fisioderm. Recuperado en marzo 2024 de: https://grupfisioderm.com/como-sentarse-correctamente/

17. Ultimaker. (2017). Ficha de datos técnicos PLA. Recuperado en junio 2024 de: https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf

18. Ultimaker. (2021). PETG Technical data sheet. Recuperado en junio 2024 de: https://docs.rs-online.com/8b3d/A700000007852876.pdf

19. Ultimaker. (2017). Ficha de datos técnicos ABS. Recuperado en junio 2024 de: https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/ABS/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf

20. SafetyCulture. (2024). Factor de seguridad: Coeficiente de seguridad en el diseño y el uso. En SafetyCulture. Recuperado en junio 2024 de: https://safetyculture.com/es/temas/factor-de-seguridad/

21. Profe Recursos. (2024). La Ley de Hooke | Fórmula y Ejemplo. En Profe Recursos. Recuperado en junio 2024 de: https://www.proferecursos.com/la-ley-de-hooke/

22. Manik. (2021). Matriz de botones con Arduino - Código e implementación [Video]. YouTube. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/G82X3Z7S5uM?si=knH3woY5su2jDJ8b

23. Dan's Tech Box. (2020). Arduino Joystick 2.0 Library - Beginners Guide [Video]. YouTube. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/hoCOq9Ngp44?si=7r4a9ePJI4LYvSYa

24. Bitwise Ar. (2020). HID con Pro Micro [Video]. YouTube. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/NmOefV36RY0?si=-CHHZVfC4dzXV3TP

Bibliografía

1. Linus Tech Tips. (2019). Is Microsoft… the Good Guy? - Xbox Adaptive Controller [Video]. YouTube. Recuperado en enero 2024 de: https://youtu.be/MwYTLiXI6zY?si=eFLd0vJp-PGy8As9

2. ABSHOW. (2019). Xbox Adaptive Controller ONE Handed | Gaming With My Feet??? [Video]. YouTube. Recuperado en enero 2024 de: https://youtu.be/Yk6Oeix0AH0?si=-esoH5L57VeYltcv

3. Prezi. (2015). Discapacidad de extremidades superiores. En Prezi. Recuperado en enero 2024 de https://prezi.com/fjtuyn4vroeq/discapacidad-de-extremidades-superiores/

4. ScienceDirect. (2021). Amputaciones y desarticulaciones de los miembros: miembro superior. Recuperado en enero 2024 de: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211033X21457683?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=8b8d8a27baa18c3d

5. El Rincón de Cabra. (s.f.). Call of Duty Warzone: Guía de controles en PC, PS4 y Xbox. En El Rincón de Cabra. Recuperado en febrero 2024 de: https://elrincondecabra.com/call-of-duty-warzone-guia-de-controles-en-pc-ps4-y-xbox/

6. Manuals Plus. (2021). Controles de teclado de Valorant. En Manuals Plus. Recuperado en febrero 2024 de: https://manuals.plus/es/keyboards/valorant-keyboard-control-guide

7. P4H Bionics Academy. (2024). En P4H Bionics Academy. Recuperado enero 2024 de: https://www.p4hbionics.academy/

8. Rubber Keypad. (2021). ¿Cómo funciona la cúpula de goma? En Rubber Keypad. Recuperado en febrero 2024 de: http://es.rubber-keypad.com/%C2%BFC%C3%B3mo-funciona-la-c%C3%BApula-de-goma-id3329148.html

9. Cegarrandres. (2022). ¿Cuales son los mejores switches para teclados mecánicos gamer? [Video]. Recuperado en febrero 2024 de: https://youtu.be/NmFtTbZu7NA?si=ZT_OBqgsB-3WfIYV

10. ImpresoEn3D. (2022). Configuraciones para imprimir Filamento Flexible tipo TPU flexible [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/1KrPS6L4xrE?si=WuUT2j48JfcnkDIq

11. Control 3D. (2021). Cómo imprimir PETG [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/0SfIS04zRhI?si=IS-JwMQq4nwS8xLL

12. Oscar Gonzalez. (2020). 5 Razones para Imprimir sobre Vidrio [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/mBllHl0uV54?si=elK26Wy5RfTH7zco

13. Prevencionar. (2020). 3 recomendaciones sobre los reposapiés. En Prevencionar. Recuperado en marzo 2024 de: https://prevencionar.com/2020/12/28/3-recomendaciones-sobre-los-reposapies/

14. Unit Electronics. (s.f.). 1N4148 Diodo de germanio. En Unit Electronics. Recuperado en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/producto/1n4148-diodo-de-germanio/

15. Unit Electronics. (s.f.). Kit de LEDs 3mm (caja con 500pcs). En Unit Electronics. Recuperado en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/producto/kit-de-leds-3mm-caja-con-500pcs/

16. LearnMetrics. (s.f.). AWG Wire Gauge Chart For All 44 Wires (Ampacity Chart). En LearnMetrics. Recuperado en abril 2024 de: https://learnmetrics.com/wire-gauge-chart-amp-wire-sizes/#24_Gauge_Wire_Details_Amps_mm_mm2_24_AWG_Wire_Suggestion

17. Juan Miguel García. (2023). Cómo hacer un teclado mecánico [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/oJpLL1_bO_c?si=7a6wcpR4Z21qAS91

18. Electronic GURU. (2019). Arduino Game Controller | Arduino pro micro PS2 game Controller [Video]. Recuperado en marzo 2024 de: https://youtu.be/U0oaebN8pbc?si=ZJn8GbFA8ggtkvI-

Referencias de tablas

1. Tabla 1. Recuperada en enero 2024 de: https://commercial.yougov.com/rs/464-VHH-988/images/YouGov-Gaming-and-Esports-whitepaper-2023-Reaching-Gamers-everywhere.pdf
2. Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Recuperadas en noviembre 2024 de: https://etheses.whiterose.ac.uk/29408/1/Beeston_102026788_ThesisClean.pdf
3. Tabla 9. Recuperada en febrero 2024 de: https://activeplayer.io/top-15-most-popular-pc-games-of-2022/
4. Tabla 48. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.researchgate.net/publication/31722433_Dimensiones_antropometricas_de_la_poblacion_latinoamericana_Mexico_Cuba_Colombia_Chile_R_Avila_Chaurand_L_R_Prado_Leon_EL_Gonzalez_Munoz
5. Tabla 49. Recuperada en junio 2024 de: https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf
6. Tabla 49. Recuperada en junio 2024 de: https://docs.rs-online.com/8b3d/A700000007852876.pdf
7. Tabla 49. Recuperada en junio 2024 de: https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/ABS/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf
8. Tabla 50. Recuperada en noviembre 2024 de: https://www.leespring.mx/es/resortes-de-compresion

Referencias de imágenes

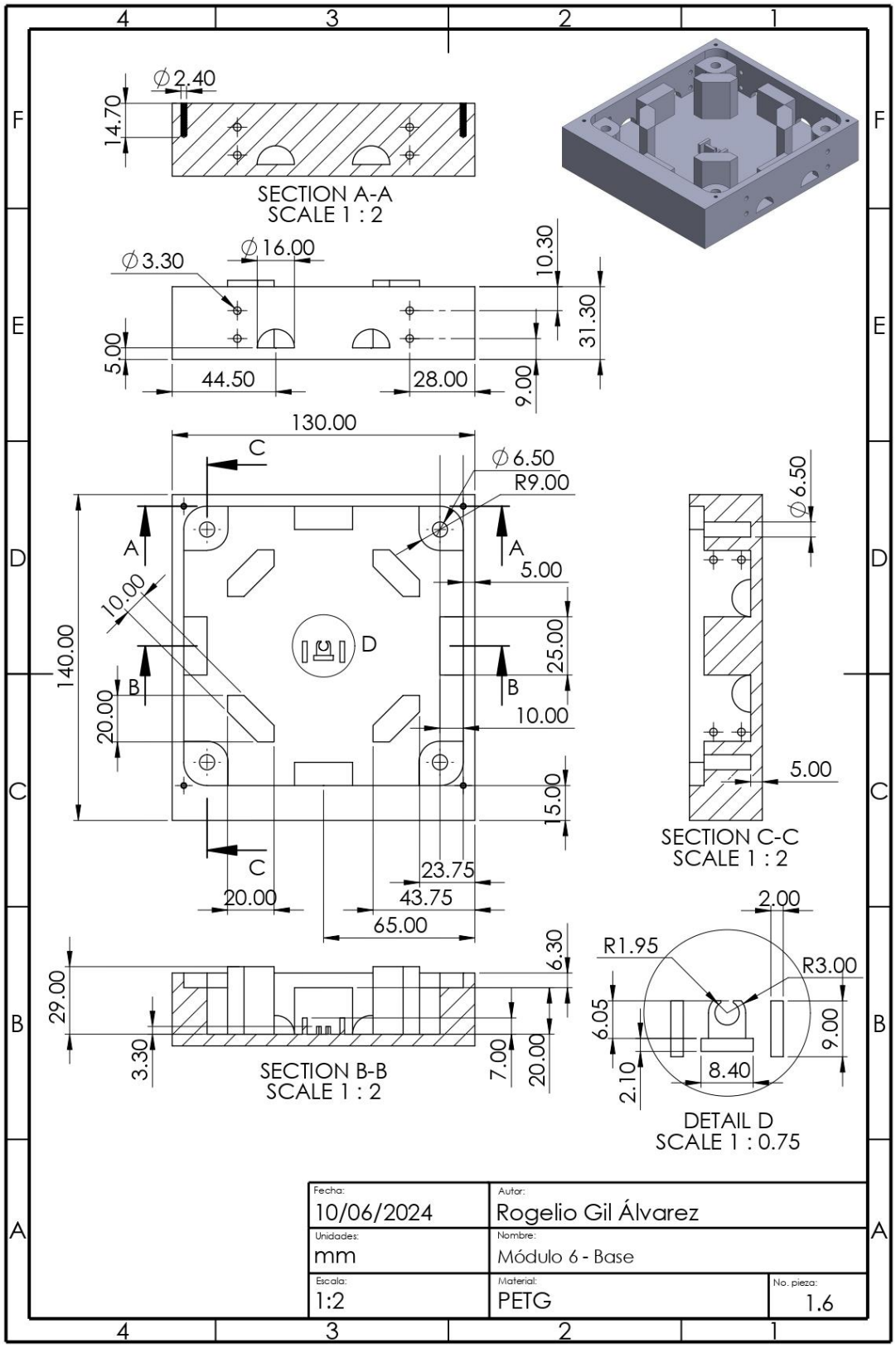
1. Figuras 5 y 6. Recuperadas en febrero 2024 de: https://www.xbox.com/es-ES/accessories/controllers/xbox-adaptive-controller
2. Figura 7. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.logitechg.com/es-es/products/gamepads/adaptive-gaming-kit-accessories.943-000339.html
3. Figura 8. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.playstation.com/es-mx/accessories/access-controller/
4. Figura 9. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.logitechg.com/en-eu/products/gamepads/adaptive-gaming-kit-for-access-controller.943-001254.html
5. Figura 10. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.gamingreadapted.com/azeron-cyro-controller
6. Figuras 11, 12 y 13. Recuperadas en febrero 2024 de: https://www.evilcontrollers.com/accessible-gaming
7. Figura 14. Recuperada en febrero 2024 de: https://romptemueve.org/amputacion-tipos-y-causas/
8. Figura 15. Recuperada en febrero 2024 de: https://fortnite-archive.fandom.com/wiki/Controls
9. Figura 16. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.researchgate.net/figure/The-default-keyboard-mapping-for-the-game-Counter-Strike-SourceR-Consistency-between_fig1_260386138
10. Figura 17. Recuperada en febrero 2024 de: https://manuals.plus/keyboards/valorant-keyboard-control-guide
11. Figura 18. Recuperada en febrero 2024 de: https://overwatch-archive.fandom.com/wiki/Game_Options
12. Figura 19. Recuperada en febrero 2024 de: https://apexlegends.fandom.com/wiki/Controls
13. Figura 20. Recuperada en febrero 2024 de: https://frondtech.com/warzone-2-controls-and-keybinds/
14. Figura 21. Recuperada en febrero 2024 de: https://www.ign.com/wikis/playerunknowns-battlegrounds/PC_Controls
15. Figura 22. Recuperada de: https://gta.fandom.com/wiki/Controls_for_GTA_V
16. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://static.wikia.nocookie.net/depredador-avp/images/4/4f/Fortnite_F.png/revision/latest?cb=20231126072405&path-prefix=es
17. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://logowik.com/content/uploads/images/cs-go-counter-strike676.logowik.com.webp
18. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://cdn.vectorstock.com/i/1000v/37/87/valorant-game-logo-icon-eps-10-gaming-streamer-vector-33193787.jpg
19. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://e7.pngegg.com/pngimages/301/231/png-clipart-overwatch-logo-overwatch-logo-games-overwatch.png
20. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Apex_legends_simple_logo.jpg

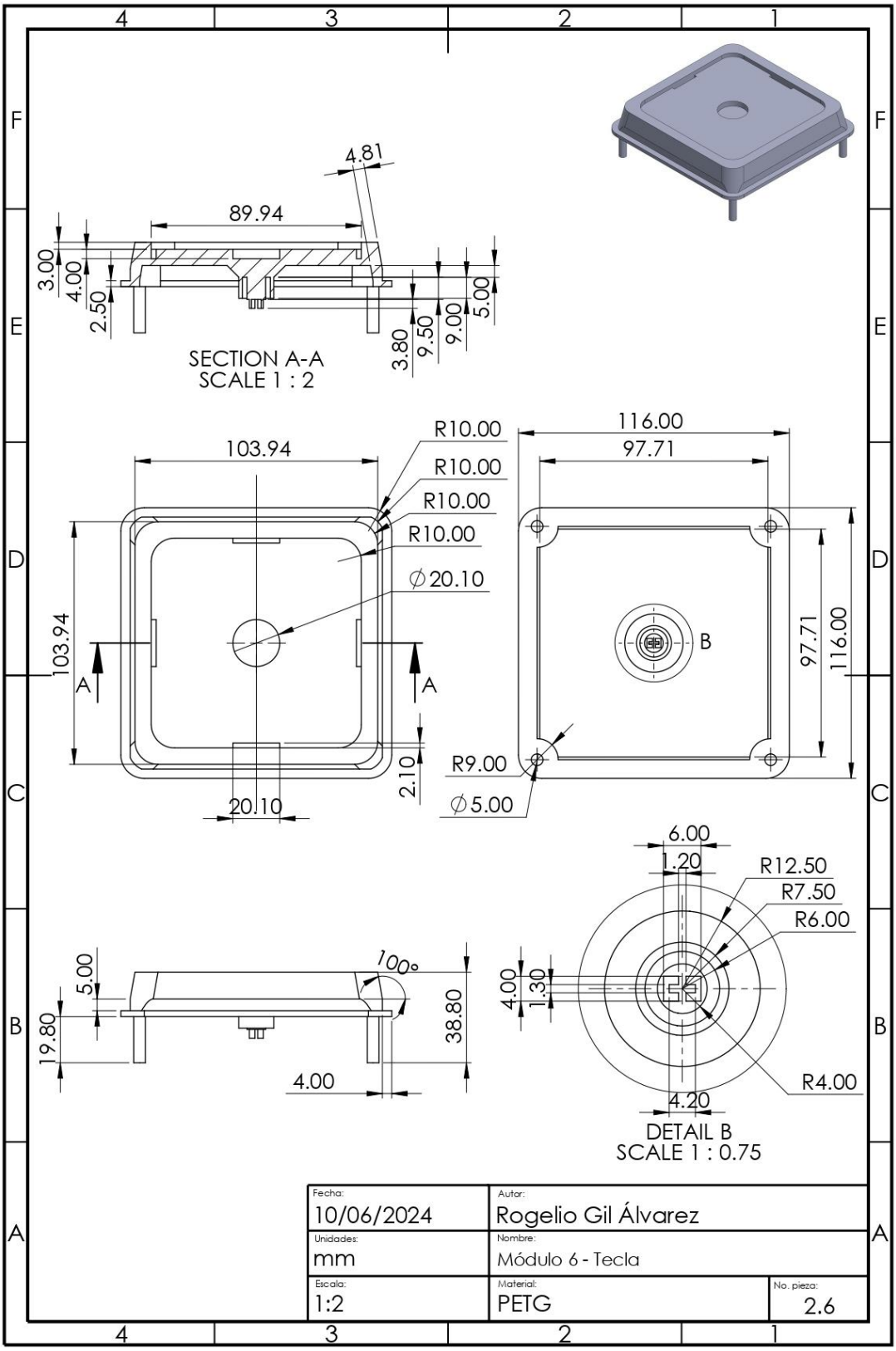
21. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://w0.peakpx.com/wallpaper/491/732/HD-wallpaper-cod-mobile-amoled-android-call-of-duty-game-logo-thumbnail.jpg
22. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://w0.peakpx.com/wallpaper/217/893/HD-wallpaper-pubg-logo-gradient-gold-black-guns-war-gun-game-orange-yellow.jpg
23. Figura de tabla 27. Recuperada en febrero 2024 de: https://w7.pngwing.com/pngs/392/551/png-transparent-grand-theft-auto-five-illustration-grand-theft-auto-v-grand-theft-auto-san-andreas-gta-5-online-gunrunning-playstation-4-mod-gta-miscellaneous-emblem-label-thumbnail.png
24. Figura 23. Recuperada en febrero 2024 de: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_del_teclado#/media/Archivo:KB_Latin_American.svg
25. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2021/12/AR3014-Bateria-18650-3.7V-3000mAh-3.jpg
26. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_679929-MLM71550264695_092023-O.webp
27. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_961688-MLM53072163167_122022-O.webp
28. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://es.manhattanproducts.eu/cdn/shop/products/phpThumb_b47cf52f-361f-4c25-a56e-c60ef61a8a8b_1024x1024@2x.jpg?v=1641937865
29. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/01/AR0242-Interruptor-ON-OFF-Rojo-2-Pines-127V-6A-V1.jpg
30. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/AR1502-Mini-Interruptor-On-Off-Negro.jpg
31. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://aelectronics.com.mx/6406-thickbox_default/dip-switch-3-posiciones-tipo-ci.jpg
32. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.conquistainternet.com/fotos/blog/400/TeclaCTRL.jpg
33. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://solectroshop.com/6378-large_default/advancer-technologies-sensor-myoware-medico.jpg
34. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_634565-MLM54467274589_032023-O.webp
35. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2020/11/AR1731-FSR402-Sensor-de-Fuerza-Resistivo-v2.jpg
36. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/AR1496-Sensor-de-Flexion-45.jpg
37. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://click.fixferreterias.com/media/product/b08/resorte-para-fumigadores-fum-15-16-y-20-truper-982.jpg
38. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://image.made-in-china.com/202f0j00WSCicTzggHbh/Custom-Membrane-Keyboard-Conductive-Rubber-Dome.webp
39. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2021/11/AR2891-Pro-Micro-ATmega32U4-Black-5V16MHz.jpg

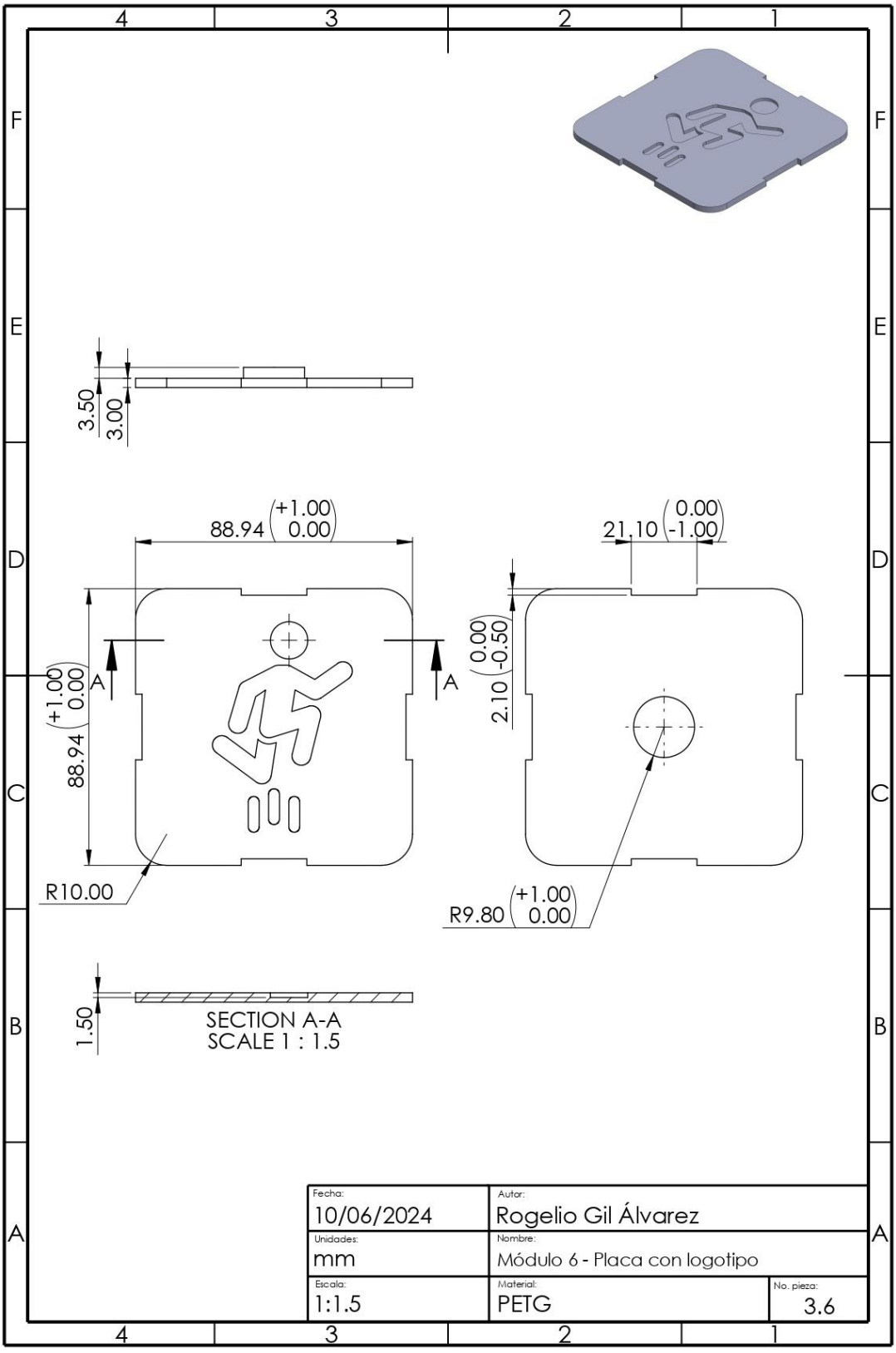
40. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2021/06/AR2664-Arduino-Uno-Rev3-8.jpg
41. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://store.arduino.cc/cdn/shop/products/A000005_03.front_934x700.jpg?v=1628695103
42. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2023/07/AR0453-Esp32-Modulo-Wifi-Bluetooth-6.jpg
43. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2019/12/AR1240-Mg90s-Servomotor-V5.jpg
44. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2022/02/AR3060-DC-Motor-R250-2.jpg
45. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.geekfactory.mx/wp-content/uploads/2015/06/motor-a-pasos-28byj-48-unipolar.jpg
46. Figura de tabla 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_2X_830681-MLM49317184122_032022-F.webp
47. Figura de tabla 33. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.info-computer.com/139570-medium_default/teclado-logitech-k120-corded-usb-qwerty-espanol-negro.jpg
48. Figura de tabla 33. Recuperada en marzo 2024 de: https://m.media-amazon.com/images/I/51ngc5b61eL._AC_SX300_SY300_QL70_ML2.jpg
49. Figura de tabla 33. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.trustedreviews.com/wp-content/uploads/sites/54/2022/05/Bluetooth-logo.jpg
50. Figura de tabla 33. Recuperada en marzo 2024 de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/LG_L194WT-SF_LCD_monitor.jpg/1200px-LG_L194WT-SF_LCD_monitor.jpg
51. Figura 30. Recuperada en marzo 2024 de: https://m.media-amazon.com/images/I/61TO4omVWHL.AC_UF1000,1000_QL80.jpg
52. Figura 31. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.researchgate.net/publication/31722433_Dimensiones_antropometricas_de_la_poblacion_latinoamericana_Mexico_Cuba_Colombia_Chile_R_Avila_Chaurand_L_R_Prado_Leon_EL_Gonzalez_Munoz
53. Figura 66. Recuperada de: https://es.123rf.com/photo_77703391_joven-hombre-avatar-car%C3%A1cter-sentado-isom%C3%A9trico-ilustraci%C3%B3n-vectorial-dise%C3%B1o.html
54. Figura 67. Recuperada en marzo 2024 de: https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/articulacion-coxofemoral
55. Figura 125. Recuperada en abril 2024 de: https://diamant.com.mx/wp-content/uploads/2023/07/H1427.jpg
56. Figura 125. Recuperada en abril 2024 de: https://diamant.com.mx/wp-content/uploads/2020/01/326.jpg
57. Figura 141. Recuperada en abril 2024 de: https://www.clipartmax.com/png/middle/328-3285638_crouching-drawing-action-vector-black-and-white-crouching-stick-figure.png
58. Figura 141. Recuperada en abril 2024 de: https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ82cstOIHHOqt2VPoTPFY0B7ROne1dcz0U_9gq8ucA3v1A9sh4

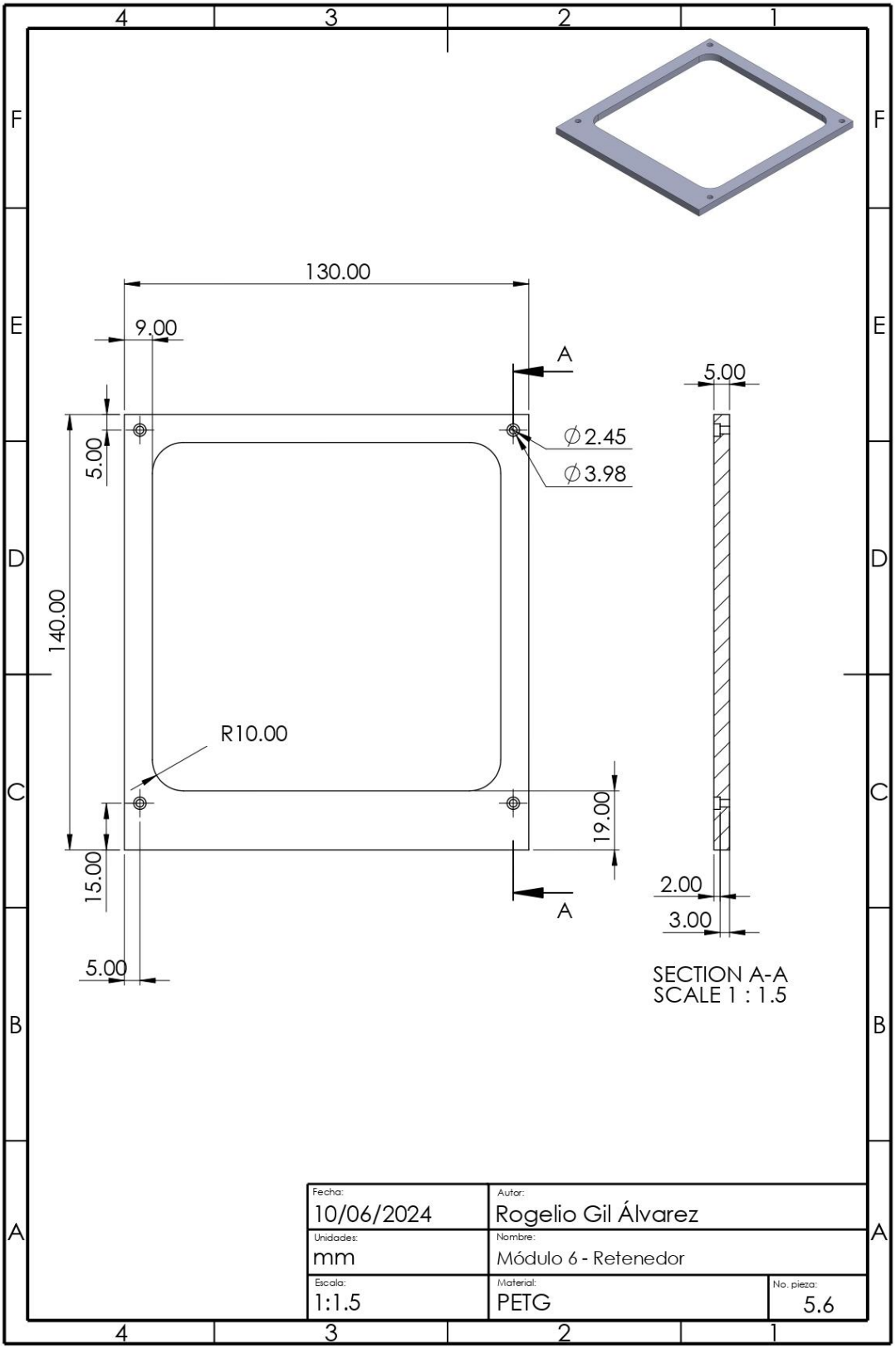
59. Figura 141. Recuperada en abril 2024 de: https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTn5bT4BvEYNmjp7TkBcPmbTmMSB0YM3nVuu_T6tISKGGDLD0cD
60. Figura 150. Recuperada en abril 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2021/01/AR0104-Led-Ultrabrillante-Blanco-5mm-V1.jpg
61. Figura 154. Recuperada en abril 2024 de: https://as2.ftcdn.net/v2/jpg/01/95/89/19/1000_F_195891939_QCificPGcd212knJCoJGSfxJ778TJdXa.jpg
62. Figura 174. Recuperada en abril 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2022/06/IMG_8892.jpg
63. Figura 175. Recuperada en abril 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/AR0215_1N4148_V2-1.jpg
64. Figura 177. Recuperada en abril 2024 de: https://sieeg.com.mx/wp-content/uploads/2023/02/3k31-2w-e1675533594894.png
65. Figura 178. Recuperada en abril 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2022/06/AR1238-Alambre-Rojo.jpg
66. Figura 178. Recuperada en abril 2024 de: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2022/06/AR1237-Alambre-Negro.jpg

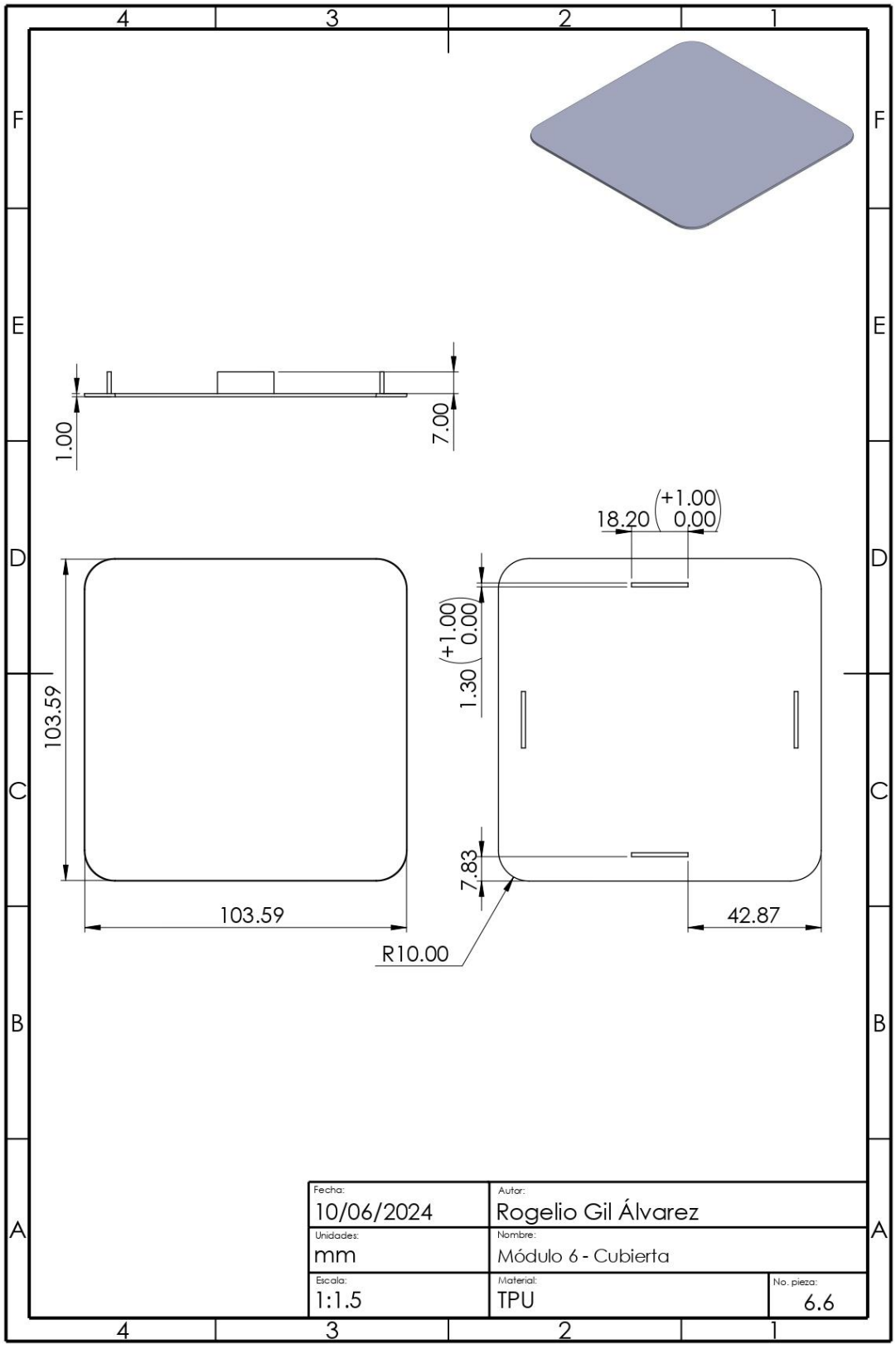
Apéndice A. Planos de las piezas del módulo 6




4.81
89.94
3.00
4.00
2.50
5.00
9.00
9.50
3.80
SECTION A-A
SCALE 1 : 2
R10.00
R10.00
R10.00
R10.00
103.94
∅20.10
103.94
A
A
20.10
2.10
116.00
97.71
B
97.71
116.00
R9.00
∅5.00
6.00
1.20
R12.50
R7.50
R6.00
100°
5.00
19.80
38.80
4.00
4.00
1.30
R4.00
4.20
DETAIL B
SCALE 1 : 0.75
Fecha: 10/06/2024
Autor: Rogelio Gil Álvarez
Unidades: mm
Nombre: Módulo 6 - Tecla
Escala: 1:2
Material: PETG
No. pieza: 2.6


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
3.50
3.00
88.94 (+1.00 0.00)
21.10 (0.00 -1.00)
88.94 (+1.00 0.00)
A
A
2.10 (0.00 -0.50)
R10.00
R9.80 (+1.00 0.00)
1.50
SECTION A-A
SCALE 1 : 1.5
Fecha: 10/06/2024
Autor: Rogelio Gil Álvarez
Unidades: mm
Nombre: Módulo 6 - Placa con logotipo
Escala: 1:1.5
Material: PETG
No. pieza: 3.6


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
130.00
9.00
A
5.00
∅2.45
∅3.98
5.00
140.00
R10.00
19.00
15.00
5.00
A
5.00
2.00
3.00
SECTION A-A
SCALE 1 : 1.5
Fecha:
10/06/2024
Autor:
Rogelio Gil Álvarez
Unidades:
mm
Nombre:
Módulo 6 - Retenedor
Escala:
1:1.5
Material:
PETG
No. pieza:
5.6


4
3
2
1
F
E
D
C
B
A
1.00
7.00
18.20 (+1.00 0.00)
(+1.00 0.00) 1.30
103.59
103.59
7.83
42.87
R10.00
Fecha: 10/06/2024
Autor: Rogelio Gil Álvarez
Unidades: mm
Nombre: Módulo 6 - Cubierta
Escala: 1:1.5
Material: TPU
No. pieza: 6.6

Apéndice B. Código del teclado

```
//Código de teclado para los pies

#include "Joystick.h"           //Biblioteca que permite configurar
                                //la tarjeta como mando de juegos.

//Arreglo matricial de botones

int F = 2;                      //Número de filas del arreglo.
int C = 4;                      //Número de columnas del arreglo.

int filas[]={8,9};              //Pines correspondientes a las filas.
int columnas[]={6,7,16,10};     //Pines correspondientes a las columnas.

int ls_tecla[2][4]={{0,0,0,0},  //Arreglo que almacena el estado
                    {0,0,0,0}}; //anterior de las teclas.

int cs_tecla[2][4]={{0,0,0,0},  //Arreglo que almacena el estado
                    {0,0,0,0}}; //actual de las teclas.

//Botón de bloqueo del teclado
bool lock;                      //Estado del botón de bloqueo.

//Variables de conteo
int i,j,k;

//Delay entre cada lectura de los estados de las teclas
int del=10;

//Configuración del mando de juegos
Joystick_ Joystick(0x04,        //Creación del mando de juegos.
  JOYSTICK_TYPE_JOYSTICK,
  8, 0,                         //N. teclas, N. botones de sombrero.
  false, false, false,          //Ejes "X", "Y" y "Z".
  false, false, false,          //Rotación en "X", "Y" y "Z".
  false, false,                 //Timón, Palanca de aceleración.
  false, false, false);         //Acelerador, Freno, Volante.

void setup() {

  //Inicialización de todos los pines de las filas y columnas
  //como entradas.
  for (i=0;i<F;i++){
    pinMode(filas[i],INPUT);
  }
  for (i=0;i<C;i++){
    pinMode(columnas[i],INPUT);
  }

  //Inicialización del pin del botón de bloqueo como entrada.
  pinMode(5,INPUT);

  //Inicialización del mando de juegos.
  Joystick.begin();
}
```

```
//Función de la lectura del estado de cada una de las teclas.
void leerMatriz(){
  //Ciclo para leer fila por fila.
  for (i=0;i<F;i++){
    pinMode(filas[i],OUTPUT);
    digitalWrite(filas[i],LOW);
    //Ciclo para leer columna por columna.
    for (j=0;j<C;j++){
      pinMode(columnas[j],INPUT_PULLUP);
      //Almacenamiento del estado leído.
      cs_tecla[i][j]=!digitalRead(columnas[j]);
      pinMode(columnas[j],INPUT);
    }
    pinMode(filas[i],INPUT);
  }
}

void loop() {

  //Lectura del estado del botón de bloqueo.
  lock=digitalRead(5);

  //Si el botón está en reposo, se permite la
  //lectura del estado de las teclas.
  if(lock==0){
    leerMatriz();

    k=-1;
    //Una vez leídos los estados de las 8 teclas, se asignan dichos
    //estados a los botones del mando de juegos para comunicar las
    //instrucciones de pulsación hacia la computadora.
    for (i=0;i<F;i++){
      for (j=0;j<C;j++){
        k++;
        //Solo si existe un cambio de estado es que se realiza
        //esta actualización en la tecla correspondiente.
        if(cs_tecla[i][j]!=ls_tecla[i][j]){
          Joystick.setButton(k,cs_tecla[i][j]);
          //Finalmente se actualiza el estado previo de la tecla por
          //el estado actual, para seguir realizando la comparativa
          //en la siguiente lectura.
          ls_tecla[i][j]=cs_tecla[i][j];
        }
      }
    }
    delay(del);
  }

}
```

Enlace a GitHub del código:

https://github.com/RogelioGil/FeetBoard