



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un teclado mecánico de alta gama

Autor: Álvaro Martínez Quilis

Tutor: Roberto Capilla Lladró

Curso 2020-2021

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un teclado mecánico customizado de alta gama creado, de forma principal, por elementos desarrollados en gran parte por el autor.

El diseño del mismo ha sido llevado a cabo manteniendo una semblanza fidedigna a la de un producto realizado con fines comerciales. Debido a esto, se ha dado especial importancia a estudiar cada uno de los componentes por separado con el objetivo de justificar la forma en que se han creado o, en caso de no haber sido diseñados, la elección de los mismos, además de explicar sus posibles alternativas.

Un objetivo adicional es el de dar un paso hacia formalizar académicamente la industria de los teclados mecánicos customizados mediante este proyecto; debido a que, al tratarse de un sector vanguardista en la industria de los teclados de ordenador, gran parte de la misma no está establecida en el mundo empresarial, sino que se ve mantenida en el día a día por entusiastas (o *hobbyists*) que realizan proyectos personales al respecto.

Palabras clave

Teclado Mecánico, Diseño de PCB, Análisis MEF, Switch mecánico, O-ring

Abstract

The main goal of the following project is to develop a high-end customized mechanical keyboard that has been primarily assembled using components designed by its author.

The design of the keyboard has been carried out maintaining a resemblance to that of a product developed with commercial purposes. Due to this, each of the components created has been thoroughly scrutinized with the intention of justifying the way they have been created or, in case of not being designed, the reasoning behind their choice, as well as their possible alternatives.

An additional objective would be to take steps towards academically establishing the custom mechanical keyboard industry via this project, given that a grand majority of its existence isn't commercially developed due to its DIY nature, but instead is upheld by keyboard enthusiasts (or hobbyists) developing personal projects.

Keywords

Mechanical keyboards, PCB design, FEA, mechanical switch, O-ring

Índice

Resumen	2
Palabras clave	2
Abstract	2
Keywords	2
Índice	3
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	9
Glosario	10
Acrónimos	13
Agradecimientos	14
1. Introducción	15
1.1. Estado de la cuestión	16
1.1.1. Los teclados mecánicos customizados en la actualidad	17
1.2. Motivación	18
1.3. Objetivos	18
2. Requerimientos del sistema	19
2.1. Requerimientos generales	19
2.1.1. PCB	19
2.1.2. Switches	19
2.1.3. Estabilizadores	19
2.1.4. Placa de montaje	20
2.1.5. Carcasa	20
2.1.6. Keycaps	21
2.2. Requerimientos particulares de este proyecto	21
3. Metodología	22
3.1. Planteamiento de la solución	22
3.1.1. Planteamiento de la PCB	22
3.2. Diseño del teclado	24
3.2.1. Diseño de la PCB	24
3.2.1.1. Creación del entorno de trabajo para la PCB	24

3.2.1.2. Esquema electrónico de la PCB	25
3.2.1.3. Disposición geométrica de la PCB	31
3.2.2. Diseño de los switches	39
3.2.3. Diseño de la placa de montaje	40
3.2.4. Diseño de la carcasa	42
3.2.5. Diseño del o-ring	46
3.2.6. Diseño de los estabilizadores	47
3.2.7. Diseño de los keycaps	49
3.2.8. Diseño de los tornillos	50
3.3. Validación por Método de Elementos Finitos	51
3.3.1. Simplificación del modelo	51
3.3.2. Ejecución del análisis	51
3.3.3. Resultados del caso normal de cargas	52
3.3.4. Resultados del caso extremo de cargas	53
3.4. Resultado final	54
4. Planos	55
5. Pliego de condiciones	56
5.1. Carcasa superior	56
5.1.1. Descripción	56
5.1.2. Control de calidad	56
5.2. Carcasa inferior	56
5.2.1. Descripción	56
5.2.2. Control de calidad	56
5.3. Keycaps	57
5.3.1. Descripción	57
5.3.3. Control de calidad	57
5.4. Switches	57
5.4.1. Descripción	57
5.4.2. Control de calidad	57
5.5. Tornillos	58
5.5.1. Descripción	58
5.5.2. Control de calidad	58
5.6. O-ring	58

5.6.1. Descripción	58
5.6.2. Control de calidad	58
5.7. Estabilizadores	58
5.7.1. Descripción	58
5.7.2. Control de calidad	59
5.8. PCB	59
5.8.1. Descripción	59
5.8.2. Control de calidad	59
5.9. Placa de montaje	59
5.9.1. Descripción	59
5.9.2. Control de calidad	60
5.10. Espuma de neopreno	60
5.10.1. Descripción	60
5.10.2. Control de calidad	60
5.11. Ejecución	60
5.12. Ensamblaje	61
6. Presupuesto del proyecto	63
6.1. Desglose de precios	63
6.1.1. Materiales	63
6.1.2. Mano de obra	64
6.1.3. Maquinaria	64
6.2. Precio de diseño del teclado	65
6.3. Precio de fabricación de piezas	66
6.3.1. Carcasa superior	66
6.3.2. Carcasa Inferior	67
6.3.3. Placa de montaje	68
6.4. Precio de adquisición de componentes	69
6.5. Precio de ensamblaje	70
6.6. Coste total	71
7. Conclusiones	72
7.1. Futuras Implementaciones en el diseño	72
8. Bibliografía	74
Anexo I: Información básica sobre un teclado mecánico	78

I. Matriz de switches y diodos	78
II. Tamaños de teclado	79
III. Estilo de teclas	81
IV. Switch	82
V. Keycaps	83
V.I. Anchura de keycaps	83
V.II. Perfil de Keycaps	83
VI. PCBs multiformato	85
VII. Estilos de montaje	86
VII.I. Montaje por bandeja	86
VII.II. Montaje en carcasa superior	87
VII.III. Montaje en carcasa inferior	87
VII.IV. Montaje en sándwich	88
VII.V. Montaje en <i>gasket</i>	88
VIII. Flex cuts	89
Anexo II: Obtención y cálculo de costes	90
I. Mano de obra	90
II. Costes energéticos	91
III. Fresado	92
IV. Corte láser	93

Lista de Figuras

Figura 1. Tecla de un teclado de membrana en reposo (izquierda) y accionada (derecha). Vista frontal.....	15
Figura 2. Razer BlackWidow Lite.....	16
Figura 3. Logotipo de GeekHack.....	16
Figura 4. Placa trasera del teclado Scarra Keycult No. 2.....	20
Figura 5. Diagrama de bloques de la PCB.....	22
Figura 6. Menú de opciones de KiCAD situado en la esquina superior izquierda. Botón "Create new project" resaltado en azul.....	24
Figura 7. Menú de opciones de selección de librerías específicas al proyecto. Librerías ya añadidas (centro superior) y botón "add specific library" resaltado en azul.....	25
Figura 8. Componentes ATMEGA32U4-AU (izquierda) y TYPE-C-31-M-12 (derecha) colocados en el entorno del esquema electrónico de KiCAD.....	26
Figura 9. Esquema electrónico correspondiente a la implementación del MCU ATmega32U4-AU a la PCB. Circuito de reset (arriba a la izquierda) y conexionado de terminales 2, 14 y 24 a condensadores (abajo a la izquierda).....	27
Figura 10. Esquema electrónico correspondiente a la implementación del USB Type-C-31-M-12 a la PCB. Conexionado de DN, DP, CC1 y CC2 (centro), Vbus (arriba a la derecha), y GND (abajo a la derecha).....	28
Figura 11. Matriz de switches.....	29
Figura 12. Conexionado de filas y columnas al MCU.....	29
Figura 13. Botón "Annotate schematic symbols" resaltado (centro superior), ventana de anotación (centro) y botón "Annotate" (abajo a la derecha).....	30
Figura 14. Página web Keyboard Layout Editor. Pestaña "Preset" (arriba a la izquierda), formato de teclado ISO 60% (centro) y "raw data" resultante (abajo).....	31
Figura 15. Página web swillkb.com. Apartados "CAD Details" y "CAD Output" (arriba a la izquierda), cuadro "Plate Layout" (mitad superior) y opciones "Switch Type" y "Stabilizer Type" (centro).....	32
Figura 16. Apartado "CAD Output" de swillkb, botón de descarga de .DXF (arriba a la derecha) y la disposición geométrica de la placa de montaje y la PCB (centro).....	32
Figura 17. Captura de Fusion 360 que contiene los círculos ubicados en el centro de la ubicación de los switches y la protuberancia encargada de alojar al puerto USB (esquina superior izquierda).....	33
Figura 18. Esquema de la PCB en capa "Dwgs" de KiCAD.....	33
Figura 19. Botón "Assign footprints" resaltado (centro superior) y ventana de asignación (centro), con categoría "Footprint libraries", o librerías de componentes (izquierda).....	34
Figura 20. Conjunto de footprints de switch (centro) y diodo (abajo a la derecha).....	35
Figura 21. Conjunto de footprints de switches en disposición fila-columna.....	36
Figura 22. Plano de detalle del MCU.....	36
Figura 23. Plano de detalle del MCU con vías "5V" resaltadas.....	37
Figura 24. Plano de detalle del MCU con vías "GND" resaltadas.....	37
Figura 25. Esquema de la PCB en KiCAD.....	38
Figura 26. Modelado 3D de la PCB. Vista posterior (superior) y anterior (inferior).....	38
Figura 27. Switch Cherry MX Blue. Vista frontal en perspectiva axonométrica.....	39
Figura 28. Switch Cherry MX Blue. Vista trasera en perspectiva axonométrica.....	39
Figura 29. Placa de montaje. Vista frontal en perspectiva axonométrica.....	40
Figura 30. Detalle de corte entre tecla Alt izquierda y estabilizador de espacio izquierdo en la placa de montaje.....	41
Figura 31. Agujeros en los laterales del switch de la barra espaciadora en la placa de montaje. Vista frontal en perspectiva axonométrica.....	42
Figura 32. Carcasa inferior. Vista frontal en perspectiva axonométrica.....	43
Figura 33. Detalle de descansillo del o-ring.....	43

Figura 34. Vista trasera de la carcasa inferior en perspectiva axonométrica, con disposición de agujeros de atornillado visible (5 en la parte superior, 4 en la parte inferior).	44
Figura 35. Detalle de hueco para USB en la carcasa inferior.	44
Figura 36. Carcasa superior. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	45
Figura 37. Agujeros para atornillado en la parte superior izquierda de la carcasa superior. Vista trasera en perspectiva axonométrica.	45
Figura 38. Espuma de neopreno colocada sobre las muescas de la carcasa inferior.	46
Figura 39. O-ring. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	47
Figura 40. Conjunto PCB-placa de montaje-switches. Vista lateral en perspectiva axonométrica.	47
Figura 41. Estabilizador 2U. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	48
Figura 42. Estabilizador 6'25U. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	48
Figura 43. Representación 3D del modelo 1U de un keycap en fila 0 del tipo MX. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	49
Figura 44. Disposición en formato ISO 60% de los keycaps modelados. Vista frontal en perspectiva axonométrica.	49
Figura 45. Hueco en cruz existente en los switches del teclado. Vista trasera en perspectiva axonométrica.	50
Figura 46. Tornillo 91292A833 de McMaster-Carr. Vista lateral en perspectiva axonométrica.	50
Figura 47. Resultado de anclaje y aplicación de fuerzas en la placa de montaje.	52
Figura 48. Factor de seguridad de la placa de montaje resultante del análisis por MEF para el caso normal de cargas.	52
Figura 49. Desplazamiento en mm de la placa de montaje resultante del análisis por MEF del caso normal de cargas.	53
Figura 50. Factor de seguridad de la placa de montaje resultante del análisis por MEF para el caso extremo de cargas.	53
Figura 51. Modelado resultante del conjunto del teclado.	54
Figura 52. Renderizado 3D del conjunto del teclado.	54
Figura 53. Programa VIA empleado para comprobar el funcionamiento de una PCB. Teclas ya comprobadas resaltadas en rojo.	59
Figura 54. Daughterboard continente de un puerto USB-C(arriba).	72
Figura 55. Capa de tierra en el interior del MCU y alrededor del cristal de una PCB tipo.	73
Figura 56. Matriz de switches resultante en un teclado 60%.	79
Figura 57. Formato 100%, el cual conserva todas las teclas de un teclado convencional.	79
Figura 58. Formato TKL, en el cual se elimina el teclado numérico de la derecha.	79
Figura 59. Formato 65%, en el cual se eliminan las teclas función, el teclado numérico y parte de la isla auxiliar entre el teclado principal y el numérico, además de fusionar parte de la isla auxiliar junto con las flechas a la derecha de la isla principal.	80
Figura 60. Formato de teclado 60%, en el cual se eliminan completamente las teclas Función, el teclado numérico y la isla auxiliar, conservando únicamente la isla principal.	80
Figura 61. Ejemplo funcionalidad extra impreso en el lateral de teclas junto con la implementación de la tecla FN (abajo a la izquierda) en teclado Ducky One 2 Mini (60%).	80
Figura 62. Teclado Ducky One 2 Mini (60%) en formato ISO.	81
Figura 63. Estructura de un switch lineal (izquierda), táctil (centro) y "clicky" (derecha).	82
Figura 64. Gráfica fuerza(cN) / desplazamiento (mm) de un switch lineal (izquierda), táctil (centro) y "clicky" (derecha).	83
Figura 65. Perfiles de Keycaps según su fabricante.	84
Figura 66. PCB multiformato en las últimas 2 filas, así como en las teclas Bloq Mayus y Enter.	85
Figura 67. Montaje por bandeja.	86
Figura 68. Montaje en carcasa superior.	87
Figura 69. Montaje en carcasa inferior.	87
Figura 70. Montaje en sándwich.	88

Figura 71. Montaje en gasket.	88
Figura 72. Franjas horarias de las distintas tarifas eléctricas.	91

Lista de Tablas

Tabla 1. Asignación de componentes en KiCAD.	34
Tabla 2. Precio unitario de los materiales y componentes del proyecto.	63
Tabla 3. Precio por hora de la mano de obra estimada para este proyecto.	64
Tabla 4. Precio por hora de la maquinaria estimada para este proyecto.	64
Tabla 5. Precio total de la adaptación del diseño.	65
Tabla 6. Precio total de fabricación de la carcasa superior.	66
Tabla 7. Precio total de fabricación de la carcasa inferior.	67
Tabla 8. Precio total de fabricación de la placa de montaje.	68
Tabla 9. Precio total de la adquisición de piezas.	69
Tabla 10. Precio total del ensamblaje del teclado mecánico.	70
Tabla 11. Precio total del ensamblaje del teclado mecánico.	71
Tabla 12. Costes de mano de obra descompuestos.	90
Tabla 13. Costes de potencia de instalación de diferentes máquinas.	91
Tabla 14. Costes energéticos.	91
Tabla 15. Gasto en adquisición de maquinaria de fresado.	92
Tabla 16. Gasto en mantenimiento de maquinaria de fresado.	92
Tabla 17. Gasto en adquisición de cortadora láser.	93
Tabla 18. Gasto en mantenimiento de cortadora láser.	93

Glosario

%

Un número acompañado de un porcentaje, en lo que se refiere a un teclado, representa la cantidad de teclas presentes en el teclado comparado con un teclado convencional, compuesto por 104 teclas (que supondría el 100%). De esta forma, un teclado 60% dispone de 62 teclas. Los distintos tamaños de teclado comúnmente fabricados se explican más adelante en el [Anexo I](#).

Backspace

Tecla ubicada encima del botón Enter empleada para borrar caracteres en texto.

Computer-Aided Drawing

Comúnmente conocido como diseño asistido por ordenador, es una técnica de diseño que se ayuda de ordenadores en la creación, modificación, análisis y optimización de objetos tridimensionales.

Computer-Aided Manufacturing

Comúnmente conocido como fabricación asistida por ordenador, consiste en el uso de ordenadores y programas para controlar los procesos de fabricación de un producto y el ajuste de la maquinaria durante el mismo.

Cherry MX, MX

Cherry MX es la principal empresa fabricante de switches mecánicos, seguida por Gateron. En determinadas ocasiones se hace uso del término "MX" para hacer referencia al modelo de algún elemento, indicando que ha sido fabricado para su compatibilidad con un switch Cherry MX.

Do It Yourself

Anglicismo consistente en la práctica de la fabricación o reparación de objetos por cuenta propia.

Footprint

En el contexto de este trabajo, elemento 2D encargado de representar gráfica y espacialmente las dimensiones y características de un componente electrónico.

Gerber(s)

Archivos generados por KiCAD y software similar de fabricación de PCBs el cual recoge la disposición espacial capa a capa de los componentes de la misma.

Hobbyist

Aficionado/a, persona que practica por placer una actividad, generalmente artística o deportiva, habitualmente sin ánimo de lucro.

Hot-swap

Un estilo de fabricación de la PCB que permite evitar la necesidad de soldar los switches a la misma. Este estilo permite intercambiar fácilmente los switches de un teclado sin necesidad de desmontarlo y desoldarlo.

Keycap

Un *keycap* es el elemento que se ubica encima de las teclas de un teclado, comúnmente fabricado con PBT. En otras palabras, es el elemento de plástico de la tecla que se presiona con los dedos al teclear. Este elemento queda explicado en más detalle en el [Anexo I](#).

Micro-Controller Unit

En lo que se refiere a este trabajo, es un microchip encargado de descifrar la información incidente del circuito de una PCB y mandarla al puerto USB para que esta sea enviada al ordenador.

O-ring

Elemento toroidal, comúnmente fabricado con goma o material elástico equivalente, también conocido como junta tórica, cuyo uso principal es el de garantizar la estanqueidad de fluidos. En el contexto de este trabajo, se emplea para sujetar parte del teclado.

Printed Circuit Board

Superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora.

Quantum Mechanical Keyboard

Firmware programable de acceso libre y fuente abierta empleado para programar el MCU de un teclado mecánico customizado.

Switch mecánico

Sistema de contacto independiente, comúnmente referido como *switch*, que se ubica en cada una de las teclas y vuelve a su posición de reposo gracias a un muelle. A veces se ve acompañado de un elemento encargado de hacer un "clic" sonoro cuando se pulsa una tecla, lo que facilita al usuario reconocer que el ordenador ha registrado una pulsación, agilizando el proceso de tecleo.

Taladrina

La taladrina es un lubricante líquido empleado comúnmente para labores de carácter industrial, como el fresado o el torneado.

Unidad

En el contexto de este trabajo, una unidad corresponde al factor adimensional por el cual se ve multiplicada la anchura de una tecla. Queda explicado en más detalle en el [Anexo I](#).

VIA

Programa informático empleado junto con el firmware QMK para comprobar que la PCB de un teclado mecánico funciona correctamente.

Tenkeyless

Tamaño de teclado, explicado con más detalle en el [Anexo I](#).

.DXF, .STEP

Formatos de archivo empleados para documentos CAD en 3D.

Acrónimos

PCB Printed Circuit Board

DIY Do It Yourself

TKL Tenkeyless

MCU Micro-Controller Unit

MEF Método de Elementos Finitos

CAD Computer-Aided Drawing

CAM Computer-Aided Manufacturing

GND Ground

KLE Keyboard Layout Editor

U Unidad

PBT Polybutylene terephthalate

QMK Quantum Mechanical Keyboard

Agradecimientos

A mi familia, por apoyarme, aconsejarme y proporcionarme todas las facilidades posibles durante la realización de este trabajo.

A mi pareja y a mis amigos, por apoyarme y animarme durante la realización de este trabajo.

A mi tutor, por resolver mis dudas de forma clara y concisa.

1. Introducción

El teclado convencional es un elemento fundamental en el día a día de la sociedad contemporánea al ser una herramienta indispensable, junto con el ratón, para emplear un ordenador.

El funcionamiento básico de un teclado es muy simple: cuando una tecla se pulsa, el teclado dispone de un mecanismo que transmite una corriente a una unidad de control, la cual registra dicha pulsación y la envía a un ordenador. Para evitar que una tecla quede pulsada más del tiempo deseado, los teclados disponen de un sistema que se encarga de que la tecla vuelva a su posición original una vez deje de ser pulsada.

Actualmente, la gran mayoría de teclados hacen uso de un sistema de membrana, el cual se ayuda de una lámina de goma que dispone de protuberancias, ubicadas bajo las teclas. Dichas protuberancias se deforman elásticamente al pulsar una tecla, mientras que vuelven a su posición de reposo cuando ésta deja de pulsarse.

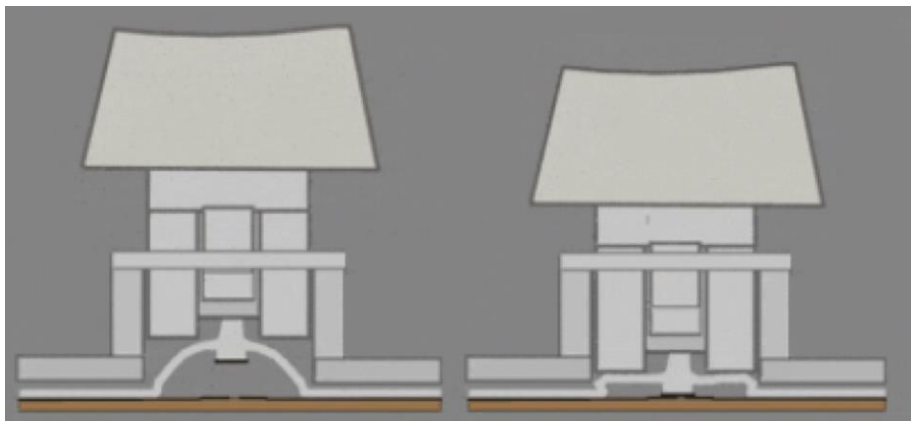


Figura 1. Tecla de un teclado de membrana en reposo (izquierda) y accionada (derecha). Vista frontal.

Este sistema se consolidó hace 30 años en la gran mayoría de teclados convencionales debido principalmente a su bajo coste y fácil implementación en un teclado. Sin embargo, una de las primeras versiones de los teclados de ordenador fue el teclado mecánico, que se implementó empleando un sistema conocido como el "switch mecánico". Este último se emplea en la actualidad en muchos teclados *gaming* debido a que ofrece una mayor precisión y rapidez que un teclado de membrana.

Es importante mencionar que se va a hacer mención de una gran cantidad de tecnicismos sobre teclados mecánicos en el grueso de este proyecto, por lo que se recomienda encarecidamente la lectura del [Anexo I](#) que recoge varios tecnicismos sobre teclados mecánicos explicados en detalle para una mejor comprensión del trabajo.

1.1. Estado de la cuestión

En la última década, el mundo de los videojuegos por ordenador ha crecido de forma exponencial, así como el número de empresas dedicadas a fabricar productos para el mismo. De esta manera, se han concebido una gran cantidad de teclados mecánicos que apuestan por ofrecer la precisión del switch mecánico a un precio moderado, manteniendo un coste de fabricación reducido mediante carcasas de plástico y fabricación en masa. Un claro ejemplo puede observarse a continuación, en la Figura 2.



Figura 2. Razer BlackWidow Lite.

A pesar de esto, ha surgido una pequeña comunidad principalmente compuesta por *hobbyists* que buscaban mejorar la experiencia de tecleo perfeccionando aspectos como la sensación de tecleo o el sonido emitido por las teclas. De esta forma, se han creado numerosos teclados mecánicos que optan por emplear distintos materiales, además de técnicas de fabricación y montaje novedosas.

Sin embargo, en lugar de publicar académicamente los resultados de la experimentación realizada, esta comunidad optó por emplear redes sociales como *Reddit* o el foro llamado *GeekHack* donde publicar sus prototipos DIY y tener discusiones con el objetivo de mejorar la metodología de la creación de los teclados mecánicos.



Figura 3. Logotipo de GeekHack.

La baja restricción en cuanto a requerimientos estructurales de un teclado mecánico permitió la experimentación de una gran cantidad de factores, como los materiales empleados, la forma de los componentes, e incluso los métodos empleados para sujetar los mismos, permitiendo así una gran customización en el proceso creativo.

Esto, junto a la naturaleza subjetiva de "la mejor experiencia al teclear", culminó en un producto en el que no existe una medida cuantitativa que defina lo bueno que es un teclado, sino que cada persona puede crear o buscar un producto que se adecúe lo más posible a sus gustos. Además de esto, algunos usuarios optan por comprar teclados de esta índole para posteriormente realizar sus propias modificaciones, como cambiar alguna de sus partes para adecuarlos más a su gusto.

1.1.1. Los teclados mecánicos customizados en la actualidad

Pese a lo descrito anteriormente, se puede distinguir un conjunto de teclados que disponen de una "buena praxis" en lo que se refiere a la metodología empleada a la hora de crearlos, debido a que son considerados como un ejemplo a seguir por varios miembros de la comunidad. Dichos teclados ofrecen una combinación de una selección de componentes de alta calidad, un perfil de sonido consistente a lo largo de todo el teclado y una sensación agradable al teclear, además de ser atractivos en cuanto a estética. Estos teclados son tema de discusión comúnmente en *Geekhack*, como, por ejemplo:

- [TGR x SINGA Unicorn 60%](#)
- [OTD 356 Mini \(60%\)](#)
- [TGR Jane v2 \(TKL\)](#)
- [KBDfans Tofu \(60%\)](#)

Cabe añadir que estos teclados han sido considerados como referencia durante el proceso creativo de los componentes del teclado.

1.2. Motivación

Este proyecto busca desarrollar un teclado mecánico desde cero, sin disponer de ninguno de los componentes necesarios durante el ensamblaje. Se considerará que la fabricación de los componentes se solicitará a terceros por encargo, mientras que los componentes que no se planean fabricar se comprarán. De esta forma, se abrirá la puerta al lector para entender por qué los teclados por encargo alcanzan precios muy altos y tardan mucho tiempo en fabricarse. Además, ofrece al autor la oportunidad de aprender sobre los métodos y técnicas industriales empleados para crear componentes customizados que podrían considerarse artesanales en el contexto de los teclados mecánicos.

En consecuencia, este trabajo puede considerarse como una consolidación del conocimiento existente en torno a la comunidad de los teclados mecánicos customizados, intentando ensalzar la complejidad del mismo y reconociendo su validez como tema a tratar en el campo de la ingeniería, al englobar electrónica e informática junto con cuestiones técnicas, como las propiedades de los materiales, las técnicas de fabricación industrial, el CAD y el análisis por MEF, cuestiones a tratar durante la creación de un teclado mecánico customizado.

1.3. Objetivos

A pesar de que algunos objetivos se han descrito tanto en la introducción como en la sección anterior, la presente sección describe los principales objetivos del trabajo de forma clara, concisa y organizada.

Para que este proyecto pueda considerarse como satisfactorio los siguientes requisitos deben llevarse a cabo correctamente:

1. Diseñar una PCB que pueda conectar los switches mecánicos al teclado y que sea capaz de transmitir la información del tecleo al ordenador.
2. Diseñar una placa de montaje que pueda recibir los switches del teclado mecánico y pueda apoyarse en la carcasa, cuyo desplazamiento al recibir fuerza incidente sea lo más consistente posible en torno a las teclas alfabéticas.
3. Diseñar una carcasa que sea capaz de acoger el conjunto formado por la placa de montaje, los switches, la PCB y el *o-ring*

En consecuencia, para lograr estos objetivos el autor debe ser capaz de:

1. Leer documentación técnica y ser capaz de implementar los distintos módulos necesarios para el diseño electrónico de una PCB
2. Aplicar pensamiento crítico y los conocimientos adquiridos durante el grado a la hora de realizar el proyecto.

2. Requerimientos del sistema

Dado lo explicado anteriormente, puede considerarse que cada teclado mecánico customizado tendrá sus propios requerimientos individuales, dependiendo de la metodología que se emplee para el mismo. Sin embargo, pueden distinguirse requerimientos comunes a todos los teclados realizados, los cuales se explican a continuación.

Cabe destacar que debido a que la máxima fuerza esperada es de unos 20 newtons (10 veces mayor que los 2 newtons que se aplican normalmente al teclear), no se han incluido menciones a requerimientos estructurales o factores de seguridad en la pieza, ya que se entiende que el conjunto no se verá sometido a cargas elevadas. Esto puede comprobarse más adelante en el análisis por MEF al que se ve sometido el teclado, el cual valida el modelado de este.

2.1. Requerimientos generales

2.1.1. PCB

Todo teclado mecánico debe disponer de una PCB, la cual tendrá huecos en los que encajar y soldar (en caso de que la PCB no disponga de *hot-swap*) el switch mecánico de cada una de las teclas; además de un MCU encargado de enviar al ordenador la información resultante del tecleo. Dependiendo del estilo de montaje escogido, la PCB puede o no ser anclada a la carcasa del teclado. Asimismo, la PCB debe disponer de un conector USB para poder conectarse con un ordenador. Como también, esta debe ser capaz de distinguir qué tecla se está pulsando, además de si se está pulsando más de una tecla en el teclado.

2.1.2. Switches

El teclado hace uso de switches mecánicos, los cuales se anclan en la placa de montaje (en caso de disponer de una) y se sueldan a la PCB del teclado. Para conseguir esto, los switches deben disponer de un elemento que se encargue de encajarse a tracción en la placa de montaje, además de protuberancias metálicas que permitan su soldadura. Los switches empleados se dejan a la elección del usuario, aunque deberán disponer de dimensiones similares a los switches *Cherry MX*.

2.1.3. Estabilizadores

Para las teclas más anchas que 2U, como el *backspace*, el *enter*, la mayúscula derecha y el espacio; se deben emplear estabilizadores: elementos auxiliares que disponen de protuberancias en forma de cruz en sus extremos laterales, las cuales encajan en las *keycaps* de la misma manera que el switch, proporcionando al mismo 3 puntos de apoyo para evitar su tambaleo en caso de que dicha tecla se pulse en uno de sus lados.

2.1.4. Placa de montaje

La placa de montaje debe estar construida en aluminio o latón y debe disponer de un espesor de entre 1.2 y 1.6mm. Además, debe ser capaz de sujetar los switches del teclado y, como norma general, se encuentra sujeta a la carcasa del teclado mediante tornillos; aunque podrá sujetarse mediante compresión de la carcasa con ayuda de un *o-ring*. El motivo de este requerimiento se explica en el [Anexo I](#).

2.1.5. Carcasa

La carcasa del teclado debe encargarse de sujetar el resto de los elementos del teclado, construyéndose como norma general con aluminio, acrílico o plástico. Normalmente se compone de dos elementos, las partes superior e inferior, aunque se podrá emplear un tercer elemento: la placa trasera.

Las partes superior e inferior se sujetan entre sí mediante tornillos procedentes de la parte inferior. La placa trasera se emplea normalmente para esconder los agujeros de los tornillos en la carcasa inferior y se ancla mediante tornillos a su interior. Un ejemplo de esta placa puede mostrarse en la Figura 4.



Figura 4. Placa trasera del teclado Scarra Keycult No. 2.

2.1.6. Keycaps

Los *keycaps* del teclado están constituidos por plástico (preferiblemente PBT) y deben disponer de un agujero en forma de cruz en su parte inferior para encajar en la protuberancia con la misma forma de los switches. El juego de este agujero es el suficiente para que ambas piezas sean capaces de sujetarse mediante fricción.

Expresadas ya las generalidades de un proyecto de esta índole, se procede a explicar el criterio individual que se va a seguir para este trabajo.

2.2. Requerimientos particulares de este proyecto

El teclado que se pretende elaborar en este trabajo consiste en un teclado 60%, debido a que su tamaño permite una mejor homogeneización del sonido. Por ello, se empleará una montura *gasket* en el teclado, la cual queda explicada en el [Anexo I](#).

En consecuencia, la *PCB* no se anclará a la carcasa del teclado, sino que quedará suspendida gracias a estar enganchada a los switches del teclado, eliminando el requerimiento de atornillar la *PCB* a la carcasa.

Los switches del teclado reposarán sobre la placa de montaje, que será la encargada de sujetarlos. Sin embargo, el elemento empleado para sujetar la placa no será la carcasa, sino que se empleará un *o-ring*. Dicho *o-ring* se estirará y se colocará en el hueco entre la *PCB* y la placa de montaje, sujeto a los *switches* exteriores del teclado; y reposará en protuberancias situadas en los muros internos de la carcasa, con el objetivo de amortiguar la fuerza aplicada al teclear. Además, se empleará para aislar la placa de montaje y la *PCB* de la carcasa para evitar que el tecleo genere resonancia causada por el choque de partes metálicas en el teclado.

Con este mismo fin, la placa de montaje se comprimirá entre la carcasa superior e inferior mediante protuberancias en sus laterales, evitando el contacto entre dichas superficies metálicas con la ayuda de plaquitas de espuma de neopreno ubicadas en sus puntos de contacto.

El pliego de condiciones, ubicado más adelante, recoge información adicional sobre las características de las piezas específicas empleadas en este proyecto, así como sus métodos de fabricación y controles de calidad deseados.

3. Metodología

A continuación, se comentan los pasos que se han realizado en orden cronológico para conseguir los objetivos mencionados anteriormente, además del criterio que se ha empleado en la toma de decisiones al respecto. Cabe resaltar que la metodología empleada no pretende ser utilizada a modo de tutorial, sino que muestra el procedimiento realizado por el autor además de exponer el criterio empleado durante el desarrollo del proyecto.

3.1. Planteamiento de la solución

Para la creación del teclado, se ha empleado el programa de CAD *Fusion 360* para el modelaje de todos los componentes en 3D, además de la forma genérica de la PCB. También se ha utilizado KiCAD para la creación del esquema electrónico y el modelaje final de la PCB.

El motivo por el que se ha optado por emplear estos programas es debido a que ambos son programas de uso personal gratuito.

3.1.1. Planteamiento de la PCB

En un proyecto de carácter electrónico, se suele incorporar un diagrama de bloques el cual expone las conexiones necesarias para el circuito electrónico correspondiente al diseño durante el proyecto. No obstante, dado que el único componente electrónico presente en el proyecto es la *PCB*, el diagrama puede simplificarse en gran medida, resultando en la Figura 5, mostrada a continuación.

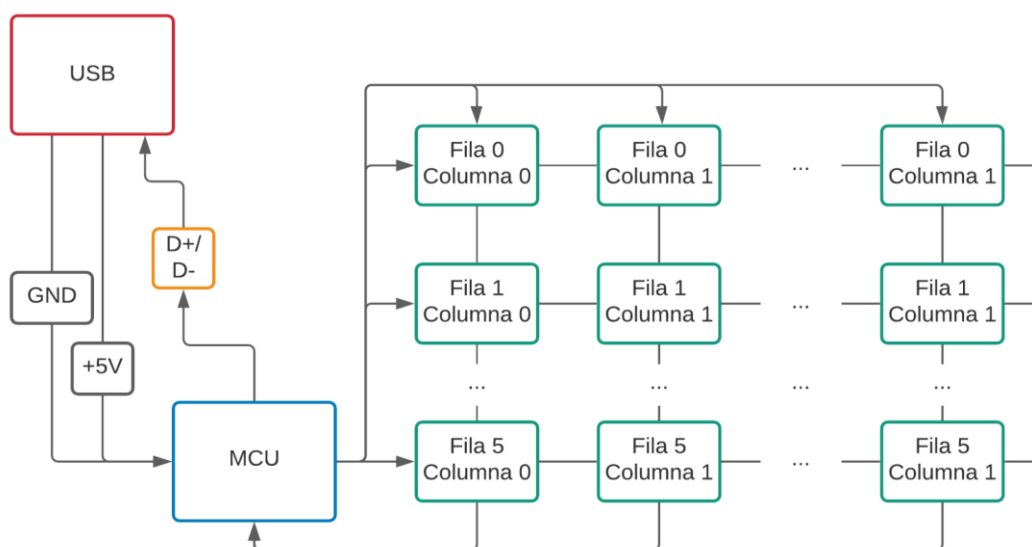


Figura 5. Diagrama de bloques de la PCB.

En este caso, se hace uso del MCU ATmega32U4, un microchip comúnmente utilizado en este tipo de proyectos puesto que dispone de una cantidad de pines suficiente para conectar todas las filas y columnas del teclado, además del resto de elementos necesarios para el correcto funcionamiento del microchip. Entre una de sus características de uso, cabe destacar la compatibilidad con *QMK*, el firmware empleado para programar un teclado mecánico.

El motivo por el cual se hace uso de filas y columnas de switches en lugar de conectar cada switch individualmente queda explicado en el [Anexo I](#).

3.2. Diseño del teclado

3.2.1. Diseño de la PCB

3.2.1.1. Creación del entorno de trabajo para la PCB

En primer lugar, se crea un repositorio en KiCAD, el cual recoge el esquema electrónico de la PCB, así como su disposición geométrica resultante. Esto se puede conseguir abriendo KiCAD y haciendo clic en el icono "Create new project", mostrado en la Figura 6 a continuación.

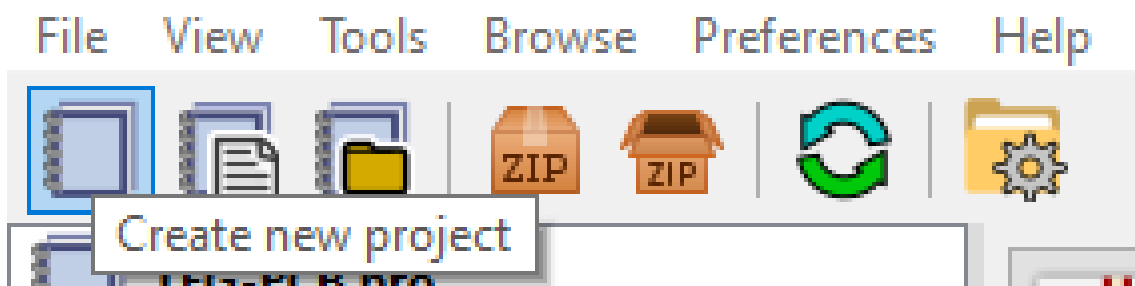


Figura 6. Menú de opciones de KiCAD situado en la esquina superior izquierda. Botón "Create new project" resaltado en azul.

Después de hacer clic en este apartado, se escoge un directorio en Windows el cual acoge todos los archivos generados con relación a la PCB. La ubicación de este directorio es puramente arbitraria.

Antes de proceder con la fabricación de la PCB, es necesario importar una serie de librerías que contengan representaciones en 3D y esquemas electrónicos fidedignos de los componentes. Estas librerías pueden seleccionarse en el apartado "Manage symbol libraries" de la pestaña "Properties" ubicada en el menú superior de la aplicación.

La ventana que se abre posteriormente recoge las librerías disponibles para su uso en KiCAD por defecto para todos los proyectos, llamadas "Global Libraries". Se hace clic en el apartado junto a este llamado "Project Specific Libraries", el cual recoge las librerías empleadas como excepción para este proyecto en concreto. Aquí, se hace clic en el botón "add specific library" situado en la parte inferior izquierda, y se añaden las librerías que se van a emplear en este proyecto, mostradas a continuación:

- MX_Alps_Hybrid
- random-keyboard-parts
- TYPE-C-31-M-12

La Figura 7, ilustrada a continuación, recoge estas librerías ya seleccionadas y añadidas en el proyecto, así como el botón “add specific library”.

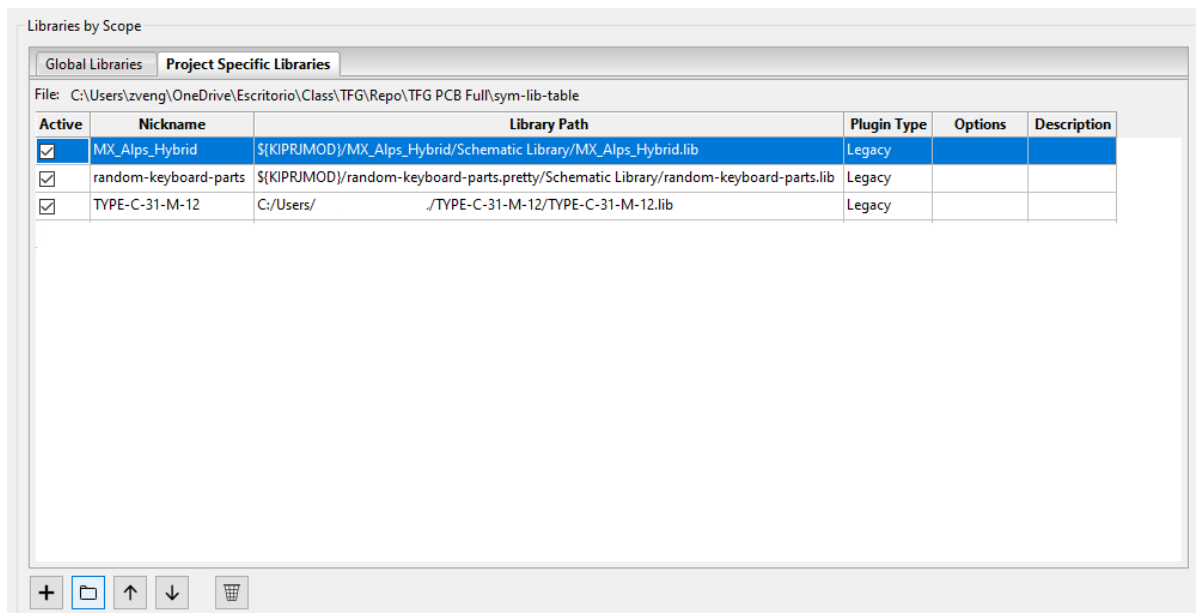


Figura 7. Menú de opciones de selección de librerías específicas al proyecto. Librerías ya añadidas (centro superior) y botón “add specific library” resaltado en azul.

3.2.1.2. Esquema electrónico de la PCB

El esquema electrónico de la PCB se llevará a cabo teniendo en cuenta dos requisitos principales:

1. La PCB debe acoger un puerto USB tipo C que conecte el teclado al ordenador.
2. La PCB debe acoger un MCU ATmega32U4 que se encargue del funcionamiento del teclado.

En consecuencia, se colocan estos dos elementos en el entorno de KiCAD. El método para realizar este paso consiste en pulsar el botón “a” en la pestaña del esquema electrónico. Hecho esto, se muestra una ventana que contiene todos los componentes contenidos en las librerías tanto globales como específicas para el proyecto, además de una barra de búsqueda en la cual se pueden filtrar estas librerías para encontrar el componente deseado. En esta barra de búsqueda se escribe “ATmega32U4” para posteriormente seleccionar el componente “ATmega32U4-AU”, que es el MCU empleado en este proyecto.

De igual modo, se escribe “Type-C”, seleccionando posteriormente el componente “Type-C-31-M-12”, el cual es el puerto USB empleado para alimentar la placa y transferir información desde el MCU hasta el ordenador.

Estos dos elementos colocados sobre el entorno del esquema electrónico se encuentran en la siguiente Figura 8.

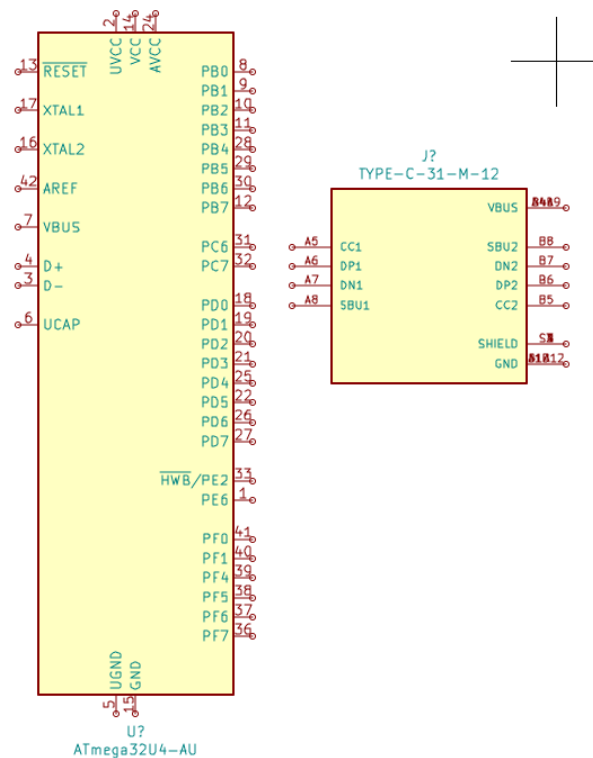


Figura 8. Componentes ATMEGA32U4-AU (izquierda) y TYPE-C-31-M-12 (derecha) colocados en el entorno del esquema electrónico de KiCAD.

El fabricante del MCU comenta en la [datasheet](#) del mismo que debe incluirse una serie de requerimientos en la implementación de este componente en una PCB. Estos destacan:

1. La existencia de resistencias de $22\ \Omega$ entre los terminales "D+" y "D-" que conectan el USB al MCU.
2. La existencia de un condensador entre el terminal UCAP y la toma a tierra.
3. La existencia de un condensador de $0.1\ \mu\text{F}$ entre cada uno de los terminales UVCC, VCC y AVCC y su conexión a 5 Voltios.
4. La existencia de un botón de reset que emplee una red de descarga para reiniciar el MCU.
5. La existencia de un cristal de entre 8 y 16 MHz que regule la frecuencia de procesamiento del MCU, con los terminales "XTAL1" y "XTAL2" conectados a tierra por un condensador de $22\ \text{pF}$.
6. La existencia de una resistencia de $10\ \text{k}\ \Omega$ entre el terminal PE2 y la toma a tierra.
7. La conexión directa de los terminales "AREF" y "VBUS" a 5 Voltios.
8. La conexión directa de los terminales "GND" y "UGND" a tierra.

Se aclara también que los pines 8-12, 18-33 y 36-41 pueden asignarse para las filas y columnas de los switches.

Por consiguiente, se obtiene el conexionado mostrado en la Figura 9. Se destaca que para no realizar un conexionado directo de los componentes, se ha hecho uso de "global labels", aplicables con Control+H, las cuales permiten conectar dos cables separados entre sí, aunque no se encuentren el uno cerca del otro siempre y cuando las dos labels contengan el mismo nombre.

Para colocar las resistencias se emplea el botón "a" y se selecciona el componente "R_Small", repitiendo este paso para los capacitadores con el componente "C_Small", el botón de reset con el componente "SW_Push" y el cristal con el componente "Crystal_GND24_Small". Los símbolos de "+5V" y "GND" se colocan pulsando el botón "p" y buscando el nombre de estos componentes en la barra de búsqueda, como con el botón "a".

La forma para cablear las conexiones se realiza pulsando el botón "W", mientras que, si se quiere colocar un cable en un punto del espacio, se pulsa "K".

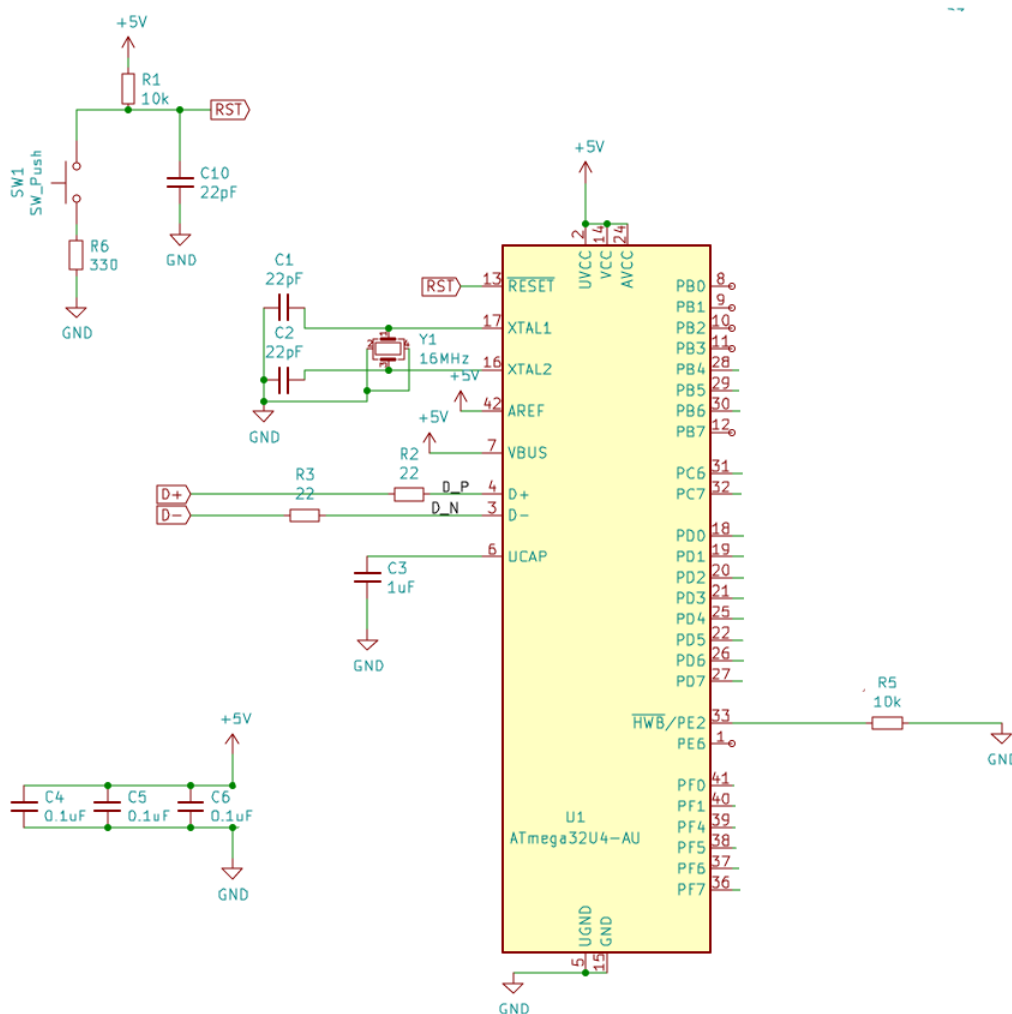


Figura 9. Esquema electrónico correspondiente a la implementación del MCU ATmega32U4-AU a la PCB. Circuito de reset (arriba a la izquierda) y conexionado de terminales 2, 14 y 24 a condensadores (abajo a la izquierda).

Más adelante, para el correcto conexionado del USB tipo C, se siguen las instrucciones del [datasheet](#) correspondiente al fabricante del componente, las cuales requieren los siguientes aspectos:

1. El conexionado de los terminales "DP1" y "DP2" al terminal "D+" del MCU.
2. El conexionado de los terminales "DN1" y "DN2" al terminal "D-" del MCU.
3. El conexionado de los terminales "CC1" y "CC2" a tierra mediante una resistencia de 5.1k Ω .
4. El conexionado del terminal "VBUS" a 5 Voltios mediante un fusible de 500mA
5. El conexionado del terminal "GND" a tierra

Dado que no se hace uso del *shielding* del USB, se deja desconectado el terminal "SHIELD", así como los terminales "SBU1" y "SBU2". El fusible se coloca empleando el componente "Polyfuse_Small". Una correcta implementación de las instrucciones mencionadas anteriormente se encuentra en la siguiente figura.

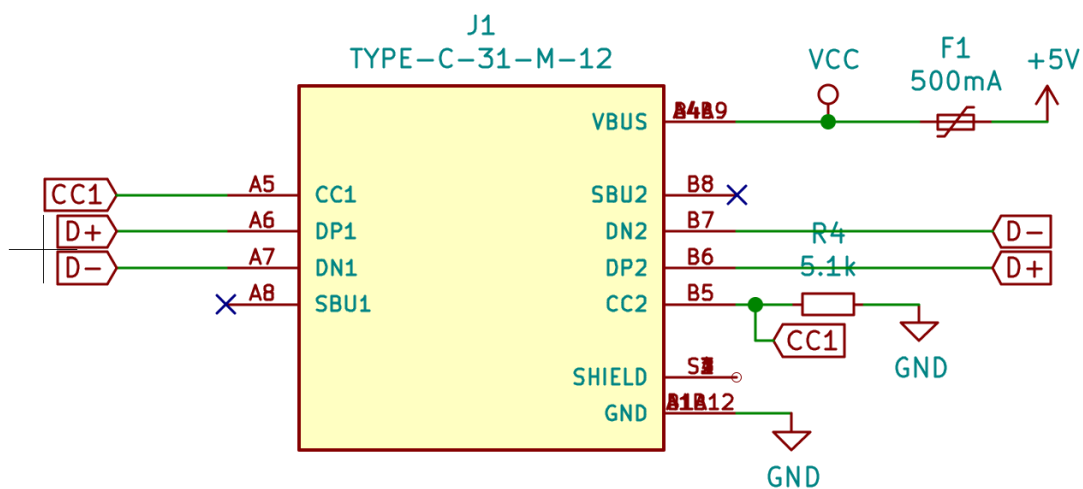


Figura 10. Esquema electrónico correspondiente a la implementación del USB Type-C-31-M-12 a la PCB. Conexionado de DN, DP, CC1 y CC2 (centro), Vbus (arriba a la derecha), y GND (abajo a la derecha).

Como se ha mencionado anteriormente, se hace uso de una matriz de switches, la cual permite al microchip mediante QMK el reconocimiento de pulsación de cada uno de los switches del teclado. Es por esto que los switches se encuentran conectados a la MCU mediante filas y columnas etiquetadas como "ROW" y "COL", las cuales comienzan su numeración desde 0 debido a que es la numeración empleada por el firmware.

La disposición en matriz de los switches puede observarse en la Figura 11. La Figura 12 recoge la conexión de la matriz de los switches al lado derecho del MCU ATmega32U4-AU. Hay que recalcar que el conexionado es arbitrario en los pines disponibles, pero la disposición del autor se ha realizado para obtener una mejor estética. Los switches se introducen con el componente "MX_NoLED". Como puede observarse, cada switch empleará un diodo que lo conecte desde su columna hasta su fila, representado por el componente "D_Small".

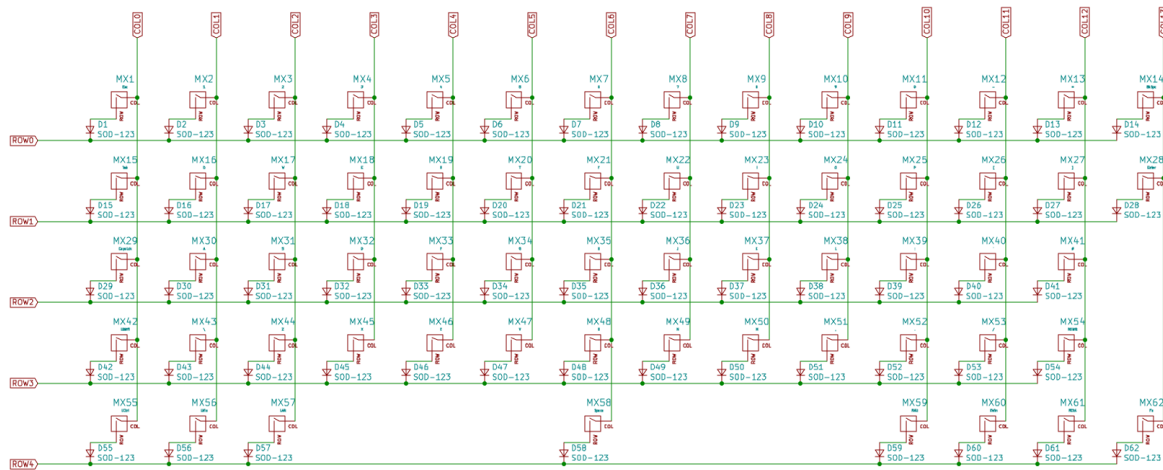


Figura 11. Matriz de switches.

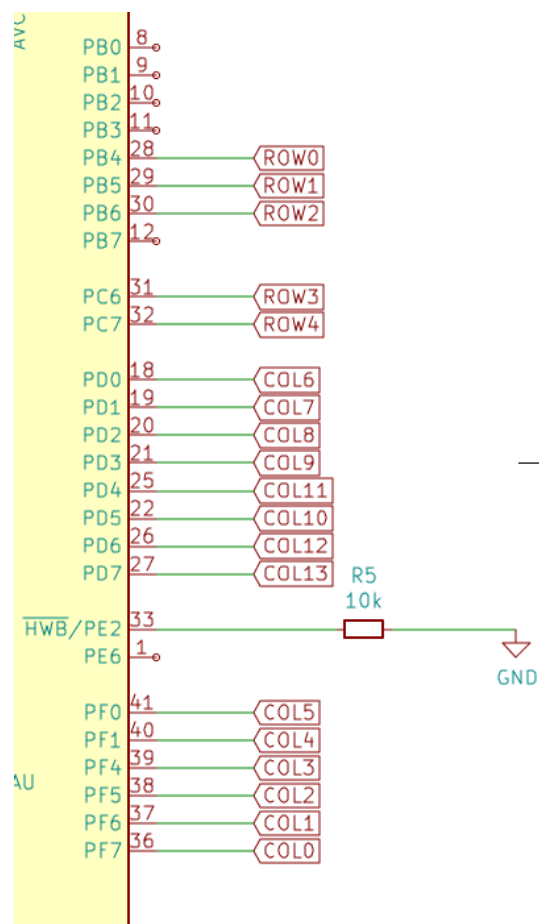


Figura 12. Conexión de filas y columnas al MCU.

Se puede apreciar, hay columnas que no disponen de 5 filas. Esto se debe a que, dada la disposición de las teclas en el teclado, una conexión de una matriz completamente cuadrada dificulta el conexionado de cables con la PCB debido a que irregularizaran su disposición a lo largo de la misma.

Una vez ya colocados todos los componentes en el esquema electrónico, se procede a anotar los mismos mediante numeración. En las figuras ya mostradas los elementos se encuentran numerados; sin embargo, no lo estarán en un primer momento. Para poder ser

numerados, se pulsa el botón "Annotate schematic symbols", para más adelante seleccionar el orden "by Y position", el cual asigna un orden a las piezas de izquierda a derecha. Pulsando el botón "Annotate", este proceso se realizará automáticamente. Este paso queda recogido en la Figura 13, que muestra el botón necesario para anotar, la ventana emergente y el botón "Annotate".

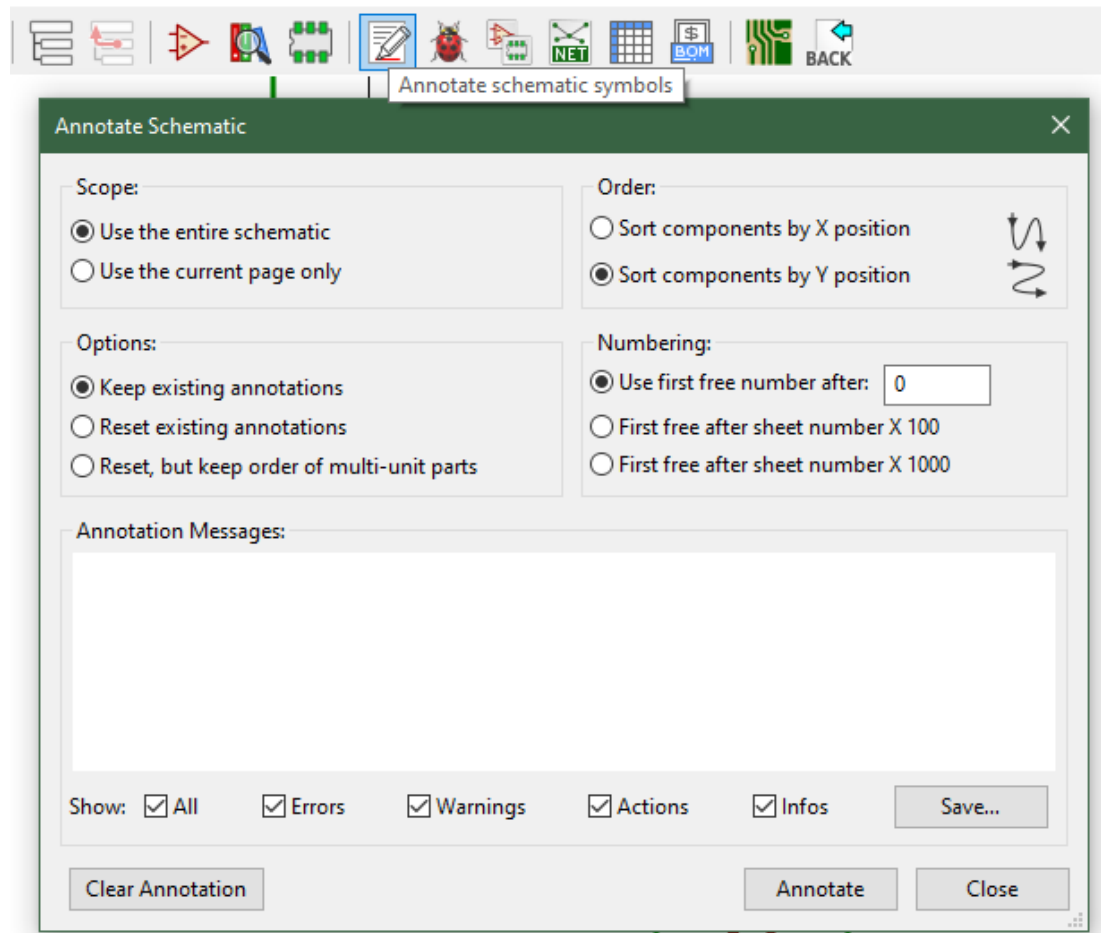


Figura 13. Botón "Annotate schematic symbols" resaltado (centro superior), ventana de anotación (centro) y botón "Annotate" (abajo a la derecha).

Ya creado el esquema electrónico, se procede a la disposición geométrica de la PCB.

3.2.1.3. Disposición geométrica de la PCB

En primer lugar, se asigna la disposición de teclas empleando la página web [Keyboard Layout Editor](#) (o *KLE*), la cual permite obtener un esquema gráfico de la ubicación de las teclas en función del formato de teclado que se busque.

Debido a que se quiere realizar un teclado 60% con formato ESP (el formato extendido en España que emplea la tecla Ñ), se escoge "ISO 60%" presente en la pestaña "Preset" ubicada arriba a la izquierda. Dicha pestaña sirve para seleccionar el formato de teclado del que se busca obtener un esquema gráfico. Realizado esto, se procede a hacer clic en el apartado "raw data" presente en la mitad inferior de la pantalla. La Figura 14, mostrada a continuación, recoge el resultado final de ejecutar los pasos anteriores.

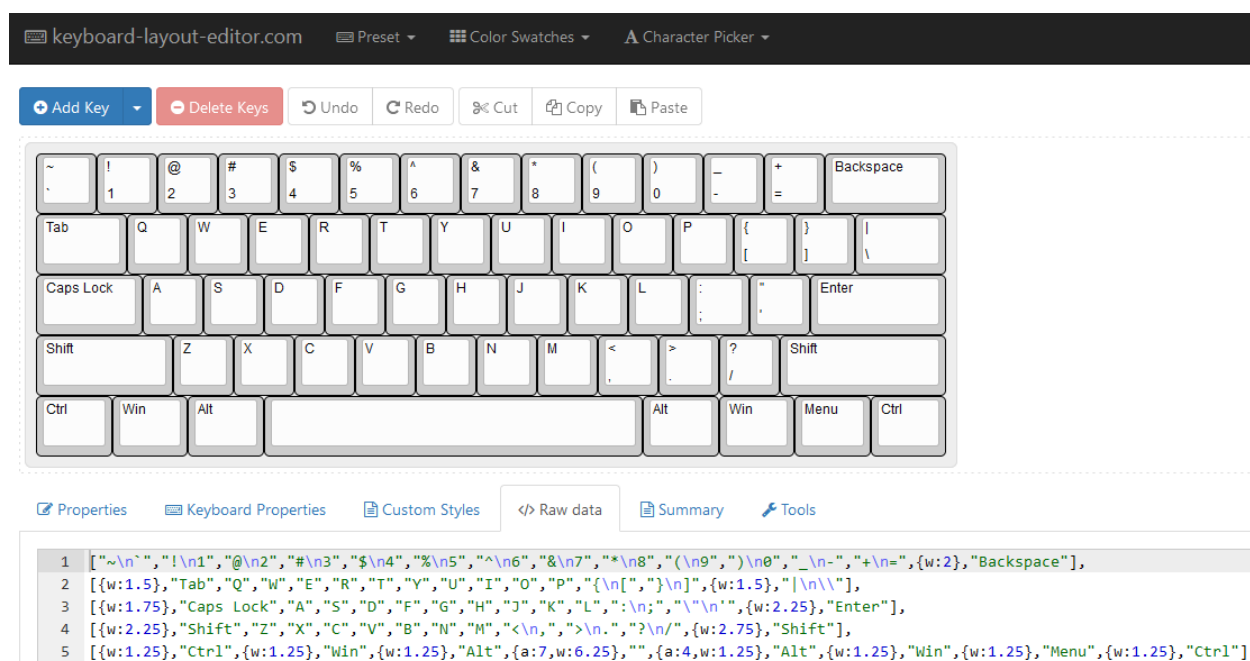


Figura 14. Página web Keyboard Layout Editor. Pestaña "Preset" (arriba a la izquierda), formato de teclado ISO 60% (centro) y "raw data" resultante (abajo).

Las líneas de texto contienen información acerca del tamaño de las teclas que se van a encontrar presentes en el teclado. Esta información es posteriormente procesada por la página web [swillkb](#), la cual se encarga de procesar el "raw data" generado en *KLE* y proporcionarle una disposición espacial apropiada para el formato escogido.

Esta información se pega en el apartado "plate layout" de *swillkb*, la primera opción presente en el apartado "CAD Details" de la página web. Más abajo, la opción "switch type" define la geometría que emplea el programa para la disposición de switches en el teclado. Puesto que, se busca emplear esta disposición de forma auxiliar para la PCB, se emplea la geometría más simple posible: el cuadrado proporcionado por el switch MX {*t*:1}. Por ello, se selecciona este tipo de switch.

Además, se hace uso de estabilizadores de tipo MX durante este proyecto, por lo que se escogerán estos mismos seleccionando "Cherry Only {s:2}" en la pestaña "stabilizer type". El resto de las opciones en la página web se encontrarán correctamente escogidas por defecto. La Figura 15, mostrada a continuación, recoge las opciones ya escogidas en la página web swillkb.

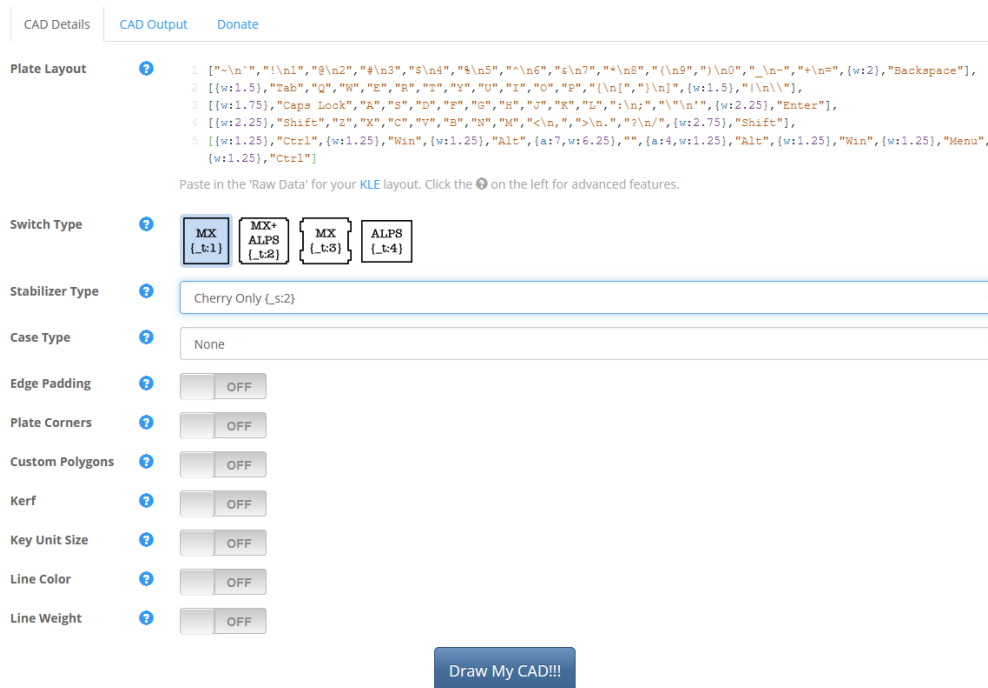


Figura 15. Página web swillkb.com. Apartados "CAD Details" y "CAD Output" (arriba a la izquierda), cuadro "Plate Layout" (mitad superior) y opciones "Switch Type" y "Stabilizer Type" (centro).

Haciendo clic en "Draw my CAD" en el inferior de la página web se puede apreciar en el apartado "CAD Output" que se obtiene una representación visual de los huecos cuadrados en los que se situará un switch en la placa de montaje del teclado. Debido a que la placa de montaje y la PCB están alineadas verticalmente, esta disposición corresponde a la de la PCB. La Figura 16 contiene el dibujo CAD resultante, el cual se descarga como un archivo .DXF para su posterior implementación en Fusion 360.

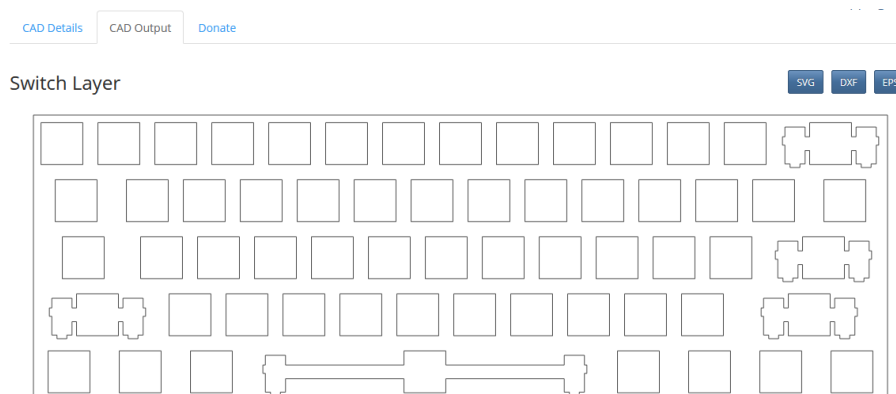


Figura 16. Apartado "CAD Output" de swillkb, botón de descarga de .DXF (arriba a la derecha) y la disposición geométrica de la placa de montaje y la PCB (centro).

Como puede observarse en la figura anterior, se encuentra la disposición exacta equivalente al formato de teclado "ISO 60%" presente en la Figura 14, en un formato que permite al autor trabajar en un entorno CAD 3D. Puede apreciarse que cada rectángulo corresponde a la ubicación de uno de los switches en el teclado. Asimismo, los cuadrados con switches encargados de alojar *keycaps* de grosor mayor a 2U disponen de elementos laterales para representar gráficamente la futura ubicación de sus respectivos estabilizadores.

Una vez importado el .DXF en Fusion 360, se colocan círculos de radio de 2mm en el centro de cada uno de los cuadrados presentes en el plano, incluyendo los cuadrados correspondientes a switches con estabilizador. Adicionalmente, se realiza una protuberancia de 2 mm en vertical a 19'5 mm hacia la derecha de la esquina superior izquierda, encargada de alojar el puerto USB; y se redondean las esquinas mediante un radio de 2mm. El resultado de este paso puede observarse en la Figura 17.

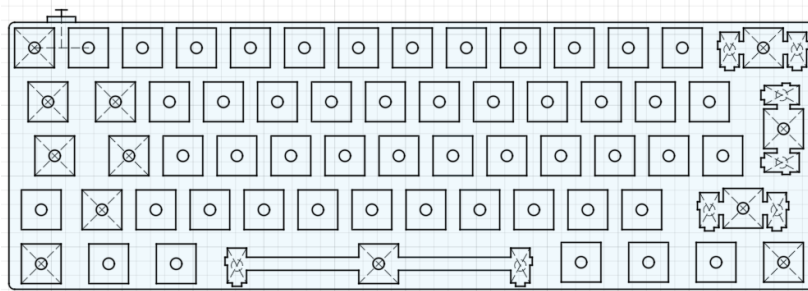


Figura 17. Captura de Fusion 360 que contiene los círculos ubicados en el centro de la ubicación de los switches y la protuberancia encargada de alojar al puerto USB (esquina superior izquierda).

Este archivo se exporta desde Fusion como un .STEP, el cual dispone de la misma geometría que en Fusion 360; con el objetivo de implementarse en el diagrama 2D de KiCAD en la capa "Dwgs", la cual recoge anotaciones que pueden emplearse como referencias en el colocado de piezas. El resultado puede mostrarse a continuación, en la Figura 18. Cabe añadir que se han realizado pequeñas anotaciones adicionales para identificar cada tecla.

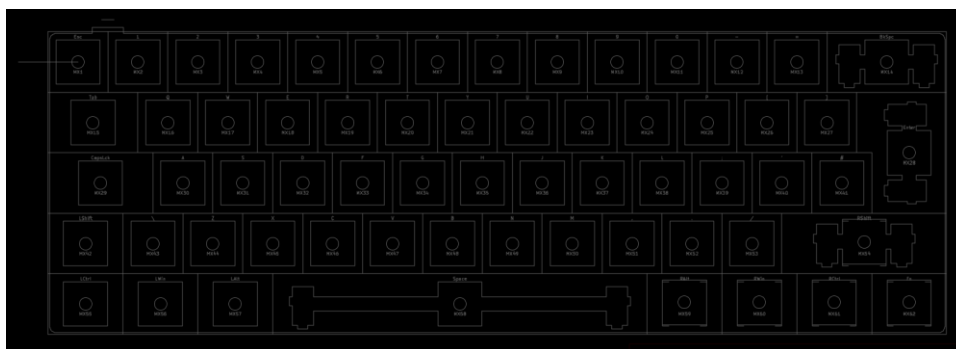


Figura 18. Esquema de la PCB en capa "Dwgs" de KiCAD.

Llevado a cabo este paso, se procede a la implementación de los elementos del esquema electrónico de la PCB en el entorno 2D de KiCAD.

En primer lugar, se asignan los *footprints* en el esquema electrónico. Se hace clic en el icono "Assign PCB footprints to schematic symbols", que abre una ventana de asignación de footprints. Este botón y la ventana consiguiente se encuentran representados en la Figura 19.

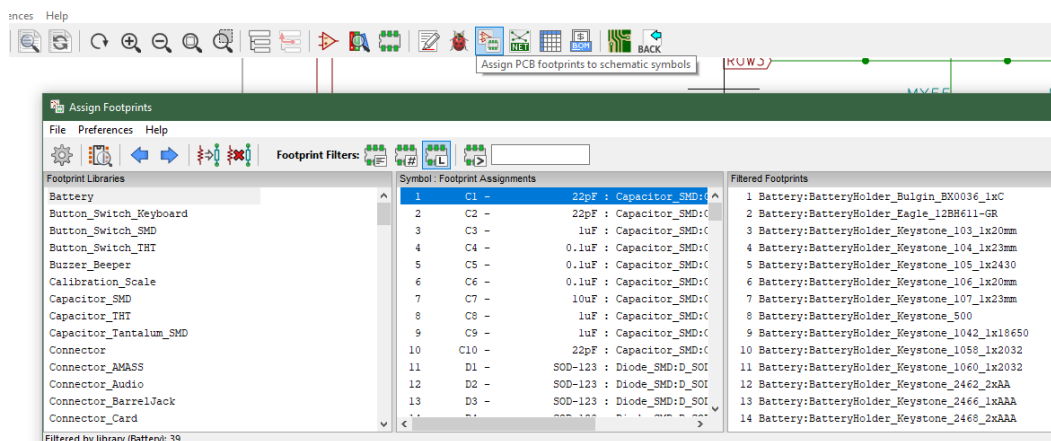


Figura 19. Botón "Assign footprints" resaltado (centro superior) y ventana de asignación (centro), con categoría "Footprint libraries", o librerías de componentes (izquierda).

En esta ventana, se procede a la asignación de componentes. Se realizan las siguientes asignaciones, categorizadas en la Tabla 1. Su procedimiento es el siguiente:

1. Hacer clic en el componente que se quiere anotar en el panel central
2. Seleccionar la librería del componente que anotar del panel de la izquierda
3. Seleccionar la asignación correcta haciendo doble clic en el componente deseado del panel de la derecha

Tabla 1. Asignación de componentes en KiCAD.

Componente	Librería del componente (Figura 19)	Asignación
ATMega32U4-AU	Package_QFP	TQFP-44_10x10mm_P0.8mm
C_Small	Capacitor_SMD	C_0805_2012Metric
Crystal_GND24_Small	Crystal	Crystal_SMD_3325-4Pin_3.2x2.5mm
D_Small	Diode_SMD	D_SOD-123
MX_NoLED	MX_Only	MXOnly-1U
Polyfuse_Small	Fuse	Fuse_1206_3126Metric
R_Small	Resistor_SMD	R_0805_2012Metric
Sw_Push	random-keyboard-parts	SKQG-1155865
Type-C-31-M-12	Type-C-31-M-12	HRO_Type-C-31-M-12

Es importante aclarar que se han empleado los componentes electrónicos mencionados anteriormente debido a su abundancia y facilidad de adquisición, además de su alta durabilidad para su bajo coste. Estos componentes no han sido tenidos en cuenta en el presupuesto, debido a que la fabricación de la PCB contará con el precio ponderado de los mismos, así como su coste de ensamblaje.

A causa de querer evitar la posible replicación de la PCB desarrollada, se explica superficialmente su disposición, en lugar de entrar en detalle. Aunque, se encuentra disponible en la bibliografía un enlace a una serie de vídeos que recogen información pertinente para el [desarrollo propio de una PCB](#).

Cabe destacar que en el entorno 2D de la PCB, cualquier cable o componente rojo se ubica en la parte delantera de la PCB, mientras que un cable o componente verde se ubica en la parte trasera. Para facilitar la fabricación y posterior ensamblaje automatizado de la PCB, se incluyen todos sus componentes en la parte trasera de la misma. Como también, cualquier agujero o corte en la placa se representa mediante un círculo amarillo.

Se puede observar que, cada switch dispone de un diodo en la parte inferior derecha del mismo, que conecta el terminal derecho del switch con su correspondiente fila en la parte trasera de la PCB; en cambio en el terminal izquierdo se conecta en la parte delantera a su correspondiente columna. La Figura 20 recoge un ejemplo del conjunto switch-diodo ya conectado a sus partes colindantes.

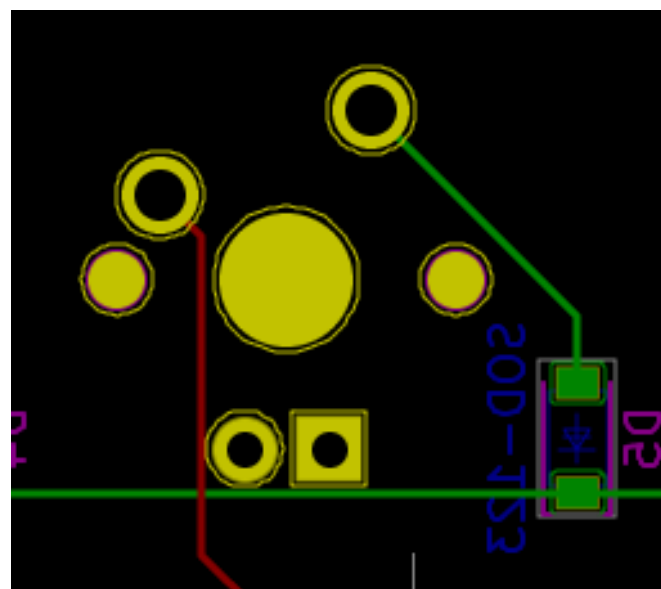


Figura 20. Conjunto de footprints de switch (centro) y diodo (abajo a la derecha).

Cada una de las filas y columnas asignadas en el esquema electrónico son conectadas directamente al MCU: las columnas se llevan hasta la parte inferior de la PCB, donde se llevan horizontalmente al MCU; por el contrario, las filas son conectadas mediante una serie de vías verticales en la parte central derecha de la placa que las lleva a la parte derecha de la barra espaciadora y, de ahí, al MCU.

En la siguiente figura se puede ver representado un conjunto de filas y columnas de switches como ejemplo.

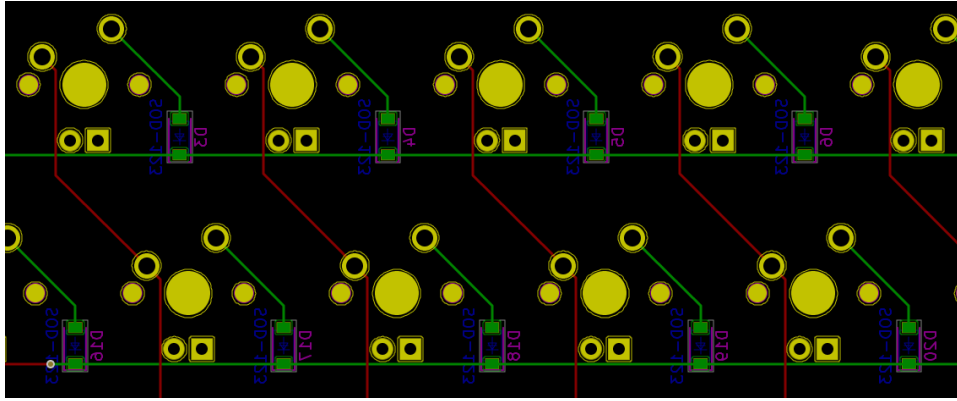


Figura 21. Conjunto de footprints de switches en disposición fila-columna.

Los pines GND del MCU son conectados entre sí empleando la superficie ubicada debajo del procesador, mientras que los pines conectados a 5V son enlazados en la parte superior de la PCB para su posterior conexión al USB. De la misma forma, se realiza la conexión con el GND y con los pines diferenciales “D+” y “D-” desde el MCU hasta el USB.

Las Figuras 22, 23 y 24 muestran un plano de detalle del conexionado del MCU, resaltando las conexiones en GND y en 5V. Aquí, puede observarse que cada uno de los pines conectados a 5V dispone de un condensador que regule su conexión, como se estableció en la explicación del esquema informático.

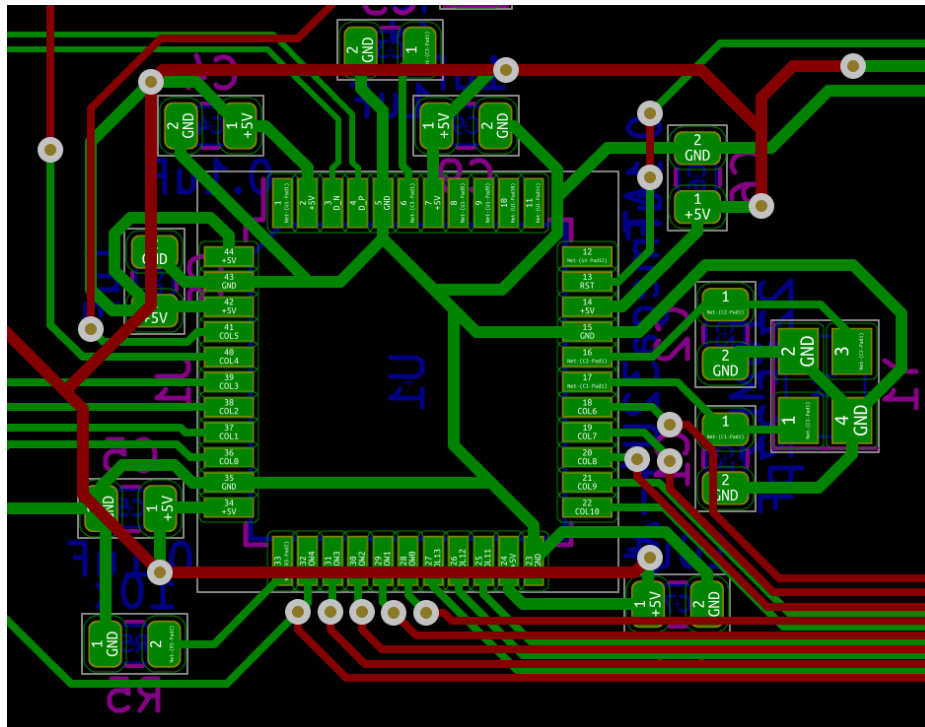


Figura 22. Plano de detalle del MCU.

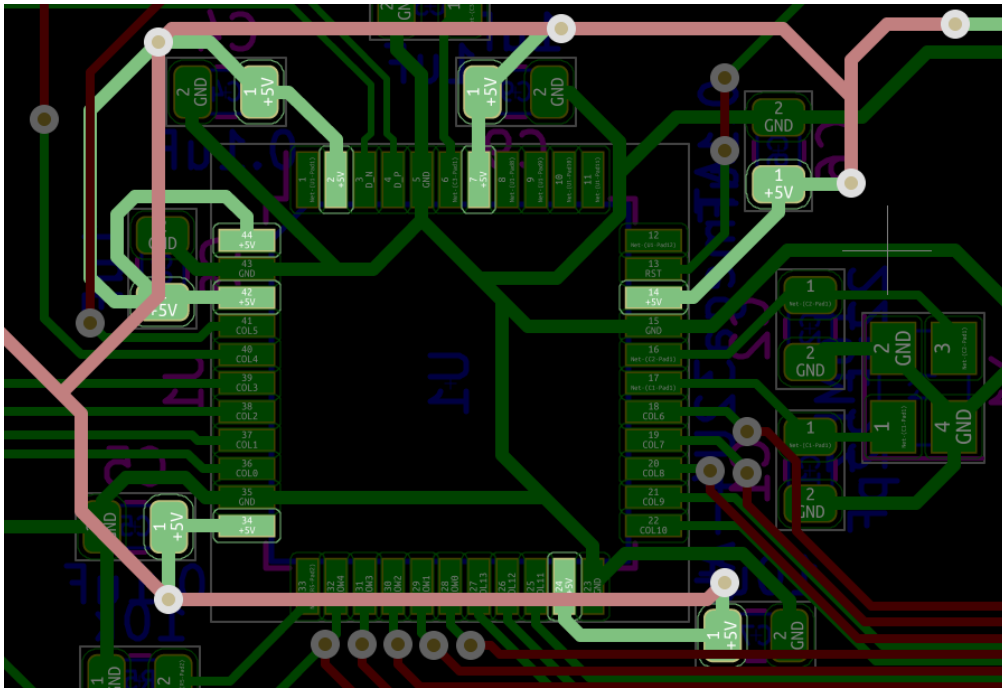


Figura 23. Plano de detalle del MCU con vías "5V" resaltadas.

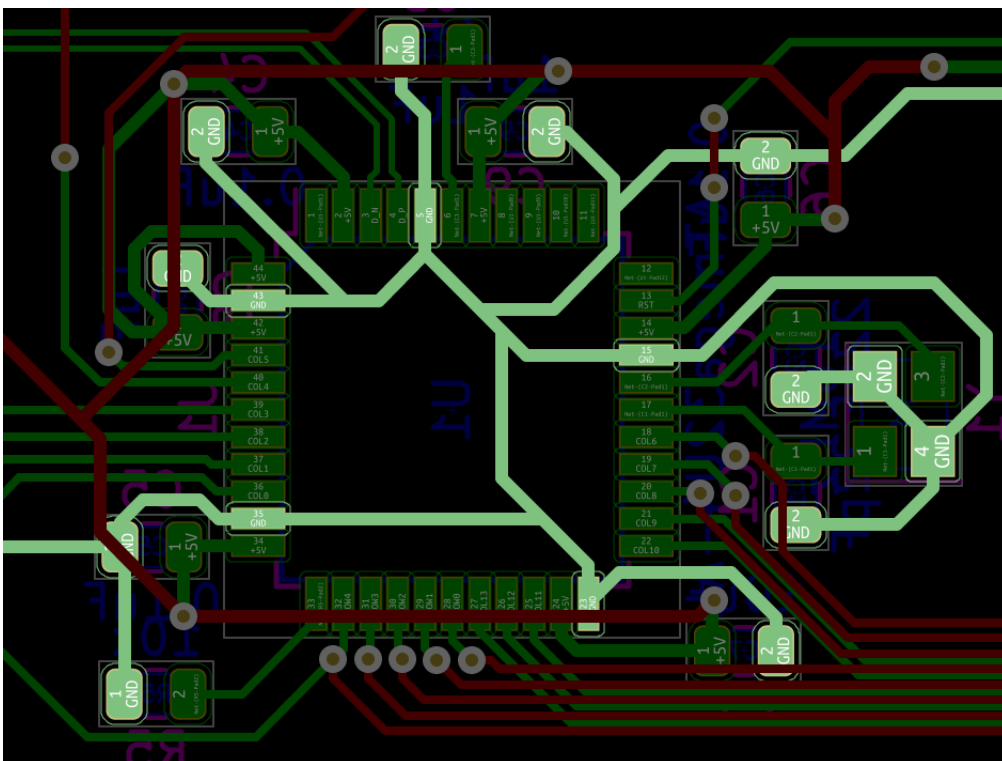


Figura 24. Plano de detalle del MCU con vías "GND" resaltadas.

A pesar de haber sido diseñada por el autor, la fabricación de esta placa es encargada a un tercero, como la empresa [JLPCB](https://www.jlcpcb.com/).

El resultado final del plano 2D de la PCB puede encontrarse en la Figura 25, mientras que la Figura 26 muestra la apariencia esperada tras su fabricación.

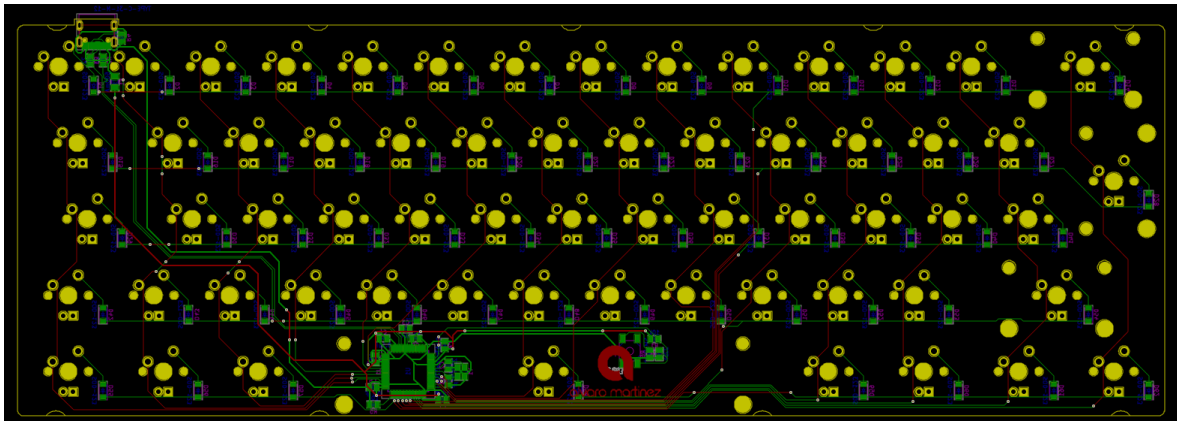


Figura 25. Esquema de la PCB en KiCAD.

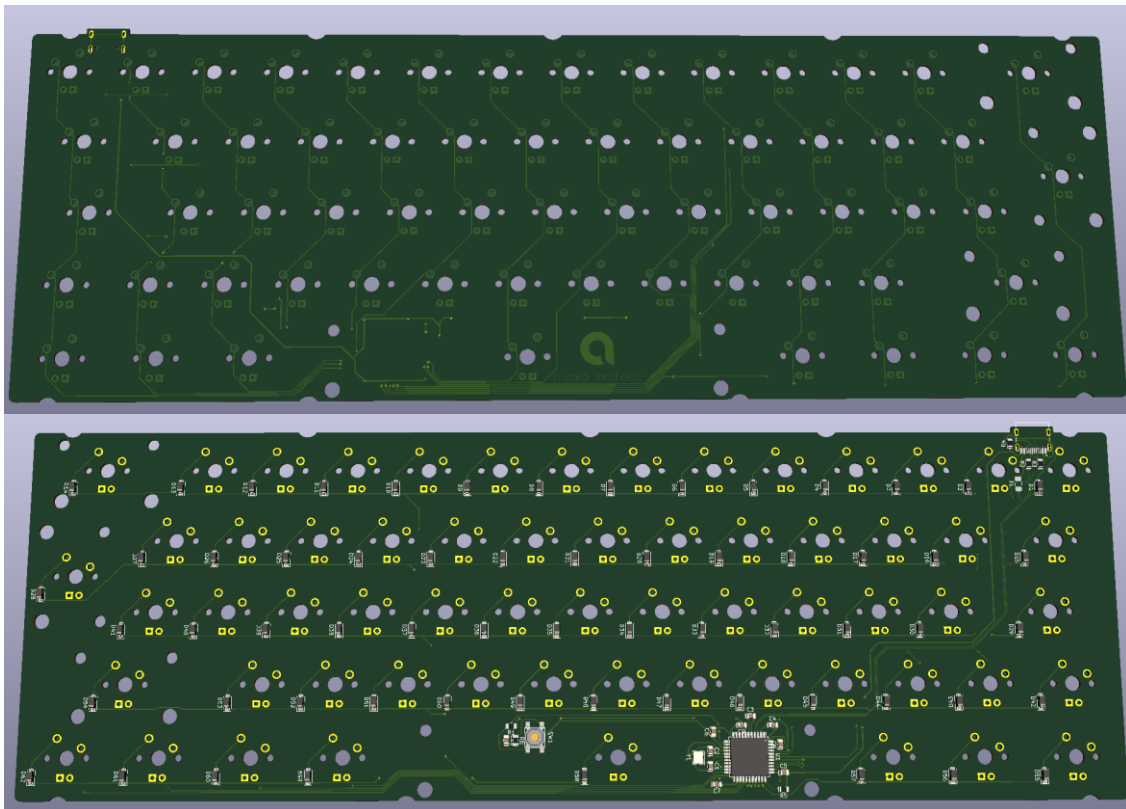


Figura 26. Modelado 3D de la PCB. Vista posterior (superior) y anterior (inferior).

Como puede observarse, el MCU es colocado en la parte izquierda de la barra espaciadora (visto desde la parte posterior de la PCB), además de que el USB es colocado en la parte superior izquierda, alineado con el dibujo realizado previamente en Fusion 360. El resultante modelo 3D se exporta de KiCAD como archivo .STEP para su posterior implementación en el ensamblaje del teclado.

3.2.2. Diseño de los switches

El modelo 3D de los switches es importado mediante [grabCAD](#), como se ha mencionado anteriormente. En él, se eliminó la visibilidad del elemento "MX_PLATE" encargado de simular la placa de montaje existente alrededor de los switches, además de dar color a las piezas que componen al switch. Una imagen del modelo importado se encuentra a continuación, en la Figura 27. La Figura 28 muestra la vista trasera del mismo modelo.

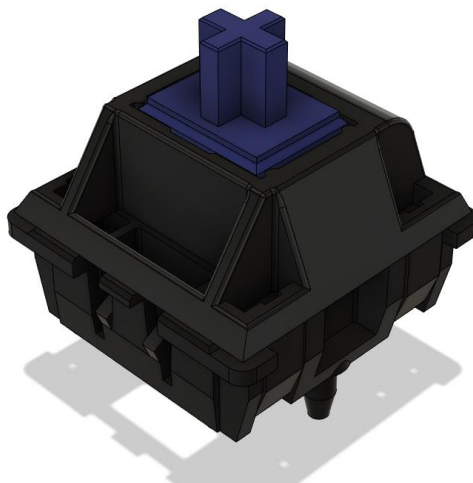


Figura 27. Switch Cherry MX Blue. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

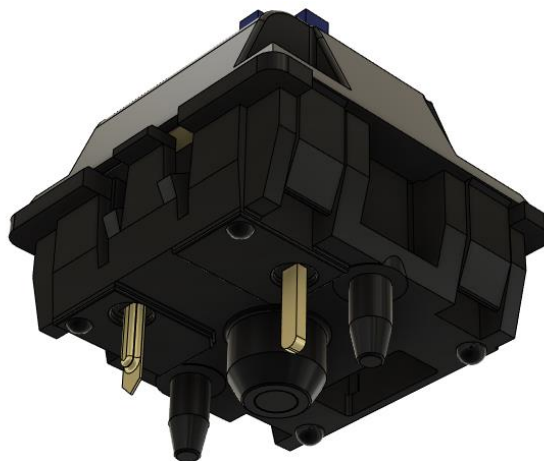


Figura 28. Switch Cherry MX Blue. Vista trasera en perspectiva axonométrica.

Se observa en las figuras anteriores, que el switch dispone de dos elementos dorados encargados de introducirse en la PCB para su posterior soldadura, además de 3 elementos plásticos empleados para su correcta alineación en la PCB. En la parte superior, dispone de la protuberancia en cruz ya mencionada para su correcta inserción en el keycap.

Para este proyecto, se decidió emplear los switches Cherry MX Blue por razones puramente arbitrarias, ya que cualquier otro switch Cherry MX dispondría de las mismas dimensiones y apariencia externa.

3.2.3. Diseño de la placa de montaje

Una vez importada la PCB en el entorno de Fusion 360, se crea la placa de montaje con el objetivo de apoyar a la altura de los switches en el teclado. Esto se logra alineando las pestañas de montaje del modelo de switch importado mediante la página web grabCAD, la cual recoge modelos 3D en formatos compatibles con programas de CAD realizados por la comunidad. Este modelo de switch en concreto dispone de una plancha que ayuda a representar la ubicación del mismo en la placa de montaje, el cual se tomó como referencia para la ubicación de la placa de montaje respecto al switch. Para la ubicación del switch en la PCB, se alineó un switch a cada uno de los agujeros para los mismos en la PCB y, posteriormente, se desplazaron para que se encontrasen ligeramente por encima de la PCB, pero sin entrar en contacto.

Al obtener la distancia del switch a la PCB y la distancia de la placa de montaje al switch, se pudo averiguar, en consecuencia, el desplazamiento vertical necesario para la ubicación de la placa de montaje.

En vez de describir el procedimiento llevado a cabo para la realización de la pieza, se va a comentar brevemente la geometría de la misma, pudiendo encontrarse su modelo exacto en el plano 1.3 del apartado Planos de este proyecto.

En primer lugar, se muestra el diseño final de la placa de montaje en la Figura 29.

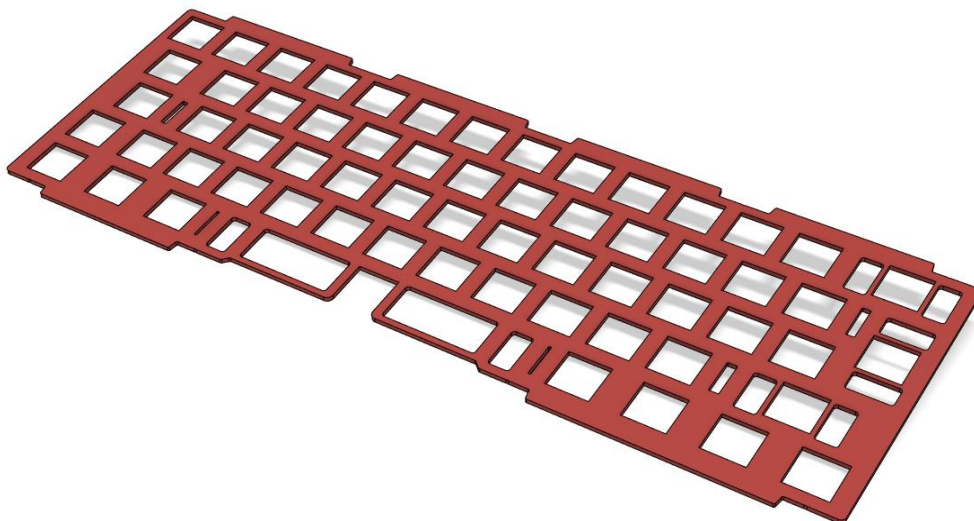


Figura 29. Placa de montaje. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

Como puede observarse, la placa de montaje dispone de pequeñas protuberancias en los lados superior e inferior de la misma, las cuales son diseñadas con una doble función: ayudar a encajarse entre la carcasa superior e inferior, facilitando su correcto ensamblaje; y para ayudar al o-ring a distribuir la fuerza incidente gracias a su apoyo en pestañas de neopreno.

También se aprecia la presencia de huecos en los laterales de la barra espaciadora y las teclas "Backspace", Enter y Mayúscula derecha. Estos huecos tienen como principal función acoger a los estabilizadores de las teclas de más de 2U de espesor, los cuales se anclan a la placa de montaje de la misma forma que los switches.

No obstante, existen otro tipo de agujeros, ubicados entre la tecla Enter y "+", la tecla Mayúscula derecha y "-", la tecla Bloq Mayus y "A" y los laterales de la barra espaciadora. Estos huecos se realizan en los puntos en los que existe una distancia entre switches mayor que 11 mm (equivalente a el doble de la distancia que separa a un switch de 1U de otro) y su principal propósito es aportar mayor flexibilidad en esos puntos, debido a que el exceso de material por la falta de switches en su periferia se traduciría en inconsistencias en el sonido del teclado en las teclas situadas cerca de esos puntos, al tener una mayor rigidez que el resto de la placa. La Figura 30 muestra en detalle uno de estos agujeros.

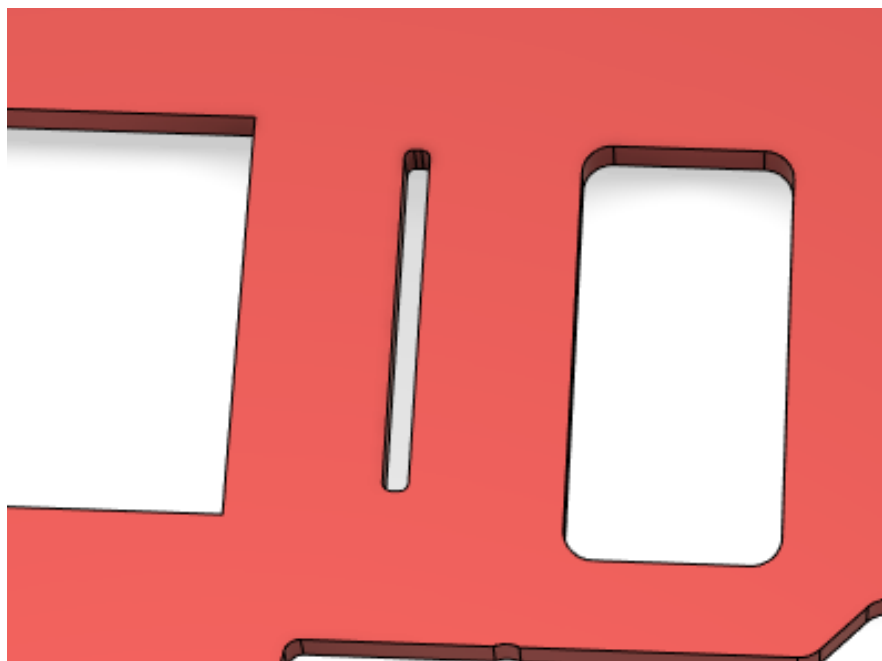


Figura 30. Detalle de corte entre tecla Alt izquierda y estabilizador de espacio izquierdo en la placa de montaje.

Asimismo, la placa de montaje hace uso de unos agujeros de gran dimensión en los laterales que sujetan al switch de la barra espaciadora. Se proporciona menos material a la sección de los nervios conectados a la barra espaciadora porque sus grandes dimensiones pueden producir una mayor reverberación del sonido debido a la elevada superficie de área de la placa de montaje alrededor del switch de la barra espaciadora comparada con el resto de los switches. De igual modo, se ha optado por no encerrar al switch en la barra espaciadora completamente con el objetivo de rigidizar menos su desplazamiento al ser pulsado. Una vista en detalle de estos agujeros se muestra a continuación en la Figura 31.

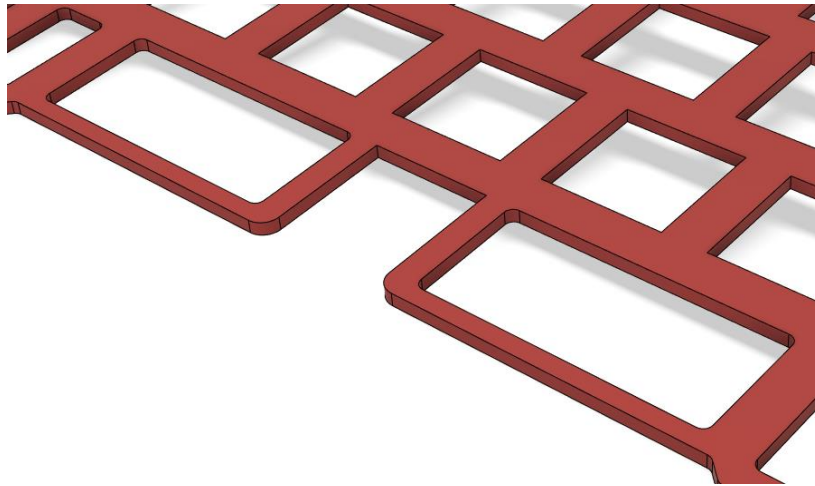


Figura 31. Agujeros en los laterales del switch de la barra espaciadora en la placa de montaje. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

La placa de montaje es fabricada con Aluminio 5052 debido a su abundante presencia en industria (y consecuente fácil accesibilidad) y su menor reverberación de sonido ya que a un mayor coeficiente de absorción acústica, al tratarse de un material más blando que; por ejemplo, el Aluminio 6061, el cual se consideraría como material alternativo para la fabricación. El color rojo ha sido escogido puramente por motivos estéticos

3.2.4. Diseño de la carcasa

La carcasa, tanto inferior como superior, se realiza en base a las dimensiones de tanto la PCB como la placa de montaje. En vez de describir el procedimiento llevado a cabo para la realización de las piezas, se va a comentar brevemente la geometría de las mismas, pudiendo encontrarse sus modelos exactos en los planos 1.1 y 1.5 del apartado Planos de este proyecto.

En primer lugar, se muestra el diseño final de la carcasa inferior en la Figura 32.

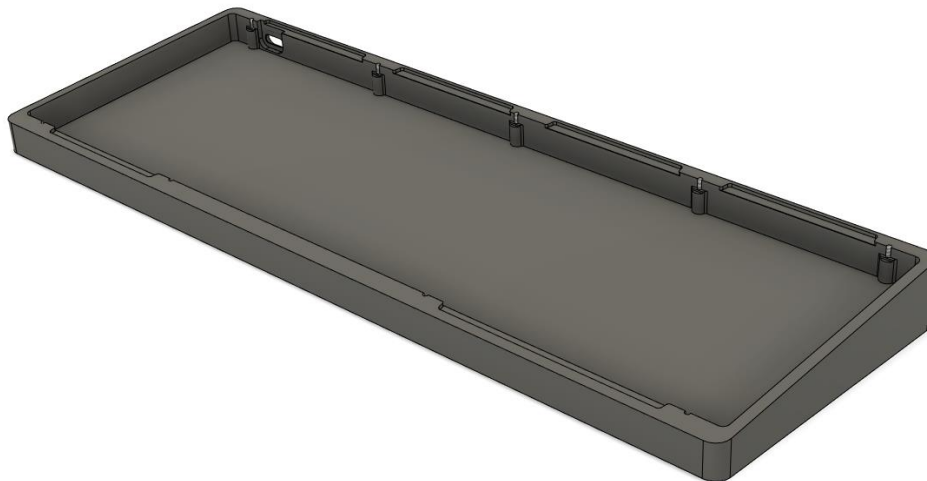


Figura 32. Carcasa inferior. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

Como puede observarse, la carcasa inferior dispone de cuatro muescas en su parte de arriba, las cuales permiten la colocación de la placa de montaje, tanto suelta como combinada con los switches y la PCB. Además, se pueden apreciar cinco protuberancias sobresalientes en el extremo superior del interior de la carcasa.

Estas protuberancias disponen de una pequeña muesca en su superficie superior, la cual tiene la función de permitir el descanso del o-ring cuando se encuentre introducido entre la PCB y la placa de montaje, actuando como un amortiguador ante la fuerza incidente para que esta se distribuya de mejor forma por la carcasa que empleando un anclaje por puntos. Estas protuberancias, por tanto, serán los descansillos del o-ring y puede encontrarse una de ellas en detalle en la Figura 33.

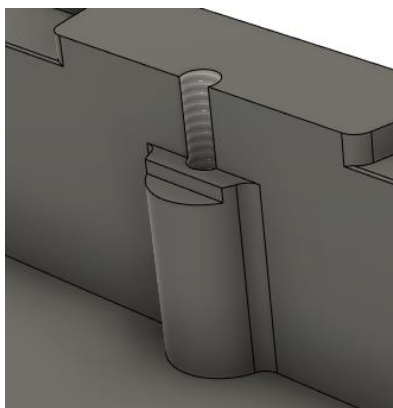


Figura 33. Detalle de descansillo del o-ring.

En el centro de la circunferencia de estos descansillos, se ubican agujeros que atraviesan la carcasa inferior con el objetivo de atornillarla a la superior. Estos agujeros, en consecuencia, son pasantes. La Figura 34, mostrada a continuación, recoge la disposición de estos agujeros (y, en consecuencia, las protuberancias) visibles desde la parte de abajo de la carcasa inferior.

Cabe añadir que estos agujeros se situarán en la parte inferior para evitar su necesidad en la parte superior, con el objetivo de una mejor estética aparente.

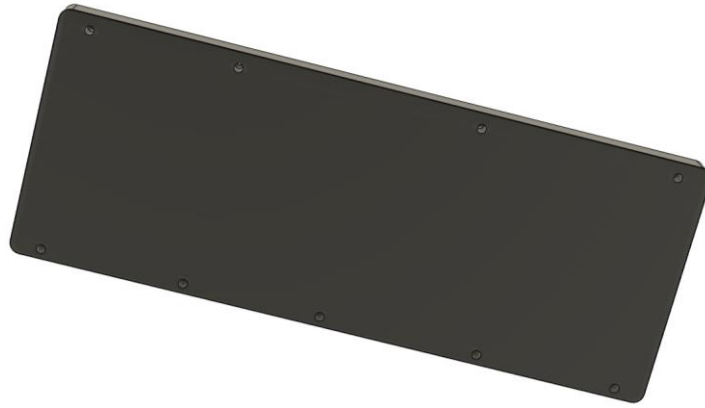


Figura 34. Vista trasera de la carcasa inferior en perspectiva axonométrica, con disposición de agujeros de atornillado visible (5 en la parte superior, 4 en la parte inferior).

La carcasa inferior dispone también de un hueco situado en la parte superior izquierda del interior de esta, el cual tiene la función de alojar la protuberancia de la PCB que contiene el USB-C. Este hueco se muestra en la Figura 35.

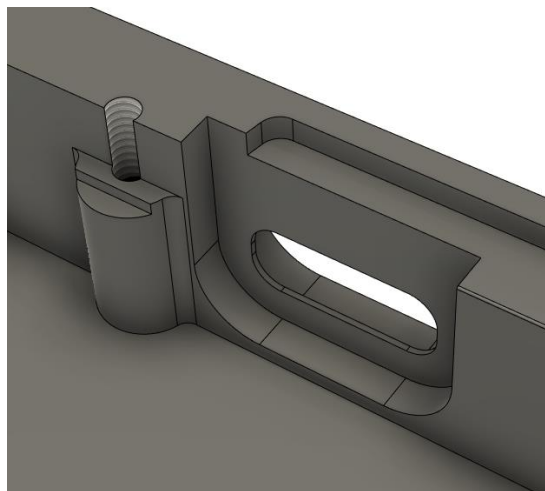


Figura 35. Detalle de hueco para USB en la carcasa inferior.

Se muestra también el diseño final de la carcasa superior en la Figura 36.

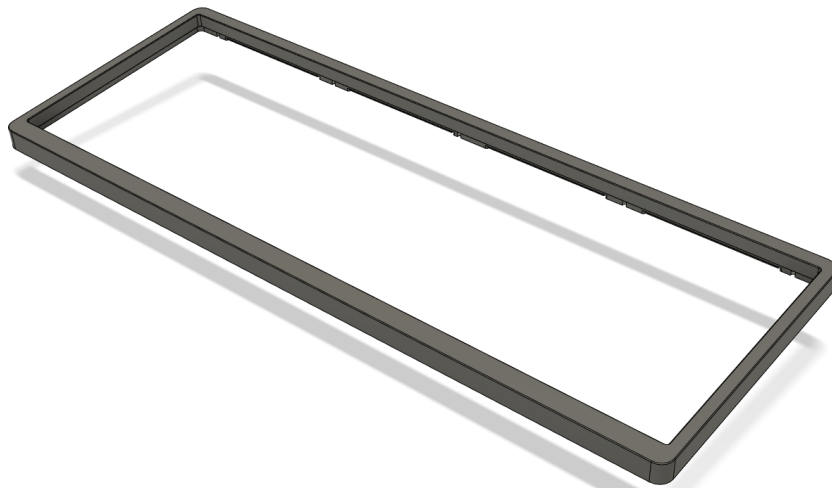


Figura 36. Carcasa superior. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

La carcasa superior dispone de agujeros alineados con la carcasa inferior que permiten el anclaje entre ambas mediante atornillado. Dichos agujeros pueden encontrarse en la Figura 37, situada en la siguiente página. La carrera resultante entre la suma de la existente en la carcasa inferior y la superior es de 11mm aproximadamente, con un hueco con la profundidad suficiente para la inserción de tornillos M2x10mm.



Figura 37. Agujeros para atornillado en la parte superior izquierda de la carcasa superior. Vista trasera en perspectiva axonométrica.

Cabe resaltar que se ha realizado el diseño de las carcasas superior e inferior con la idea de que una fina lámina de espuma de neopreno se coloque en las superficies de las muescas para las pestañas de la placa de montaje. Esta espuma tiene el objetivo de evitar el contacto de las partes metálicas de la carcasa con la placa de montaje, como se ha comentado anteriormente. La implementación de la espuma en algunas de las muescas de la carcasa inferior puede observarse en la Figura 38.

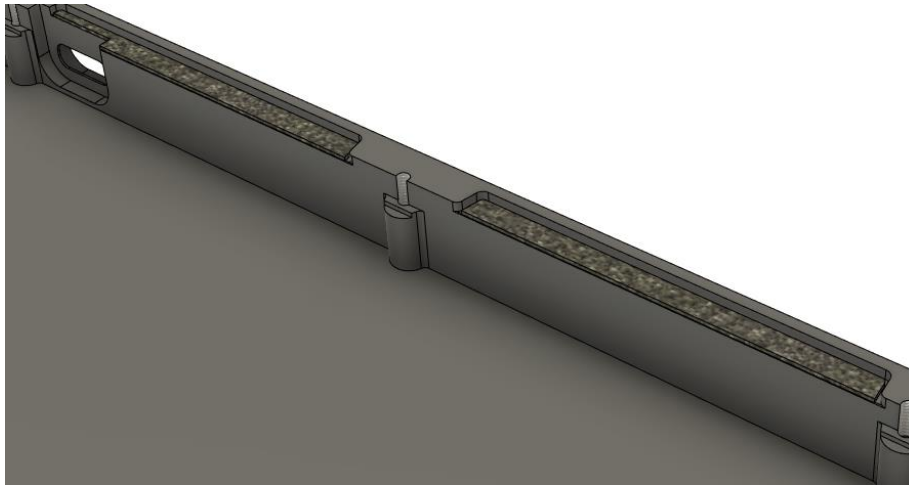


Figura 38. Espuma de neopreno colocada sobre las muescas de la carcasa inferior.

Puede observarse también que la espuma se cortará en la esquina superior izquierda de la carcasa inferior para permitir la introducción de la PCB en el hueco resultante.

Para concluir, se fabrica la carcasa, tanto inferior como superior, mediante Aluminio 5052. Esta decisión dispone de la misma justificación que la expresada para la placa de montaje. El color gris ha sido escogido por motivos puramente estéticos.

3.2.5. Diseño del o-ring

Debido a que el o-ring empleado para el teclado es un o-ring de diámetro de sección 3'5mm y longitud de circunferencia de 185 mm, se calcula que la estricción provocada por la tensión del o-ring al situarse entre la PCB y la placa de montaje proporciona un diámetro de sección eficaz de unos 3'3 mm. En consecuencia, el modelado realizado en el teclado dispone de este diámetro.

Se modela el o-ring de manera que repose en los switches en el perímetro exterior de la PCB. A continuación, se simplifica el modelo en Fusion 360 para que su ubicación en los laterales fuese puramente vertical. Sin embargo, la forma esperada para el o-ring se acerca más a un trapecoide debido a la diferencia entre la posición horizontal de la tecla Esc y de la tecla Control izquierda. Pese a que la función del o-ring es puramente informativa de la ubicación del mismo en el conjunto PCB-placa de montaje-switches, no es necesario proceder a un montaje más fidedigno. El modelado en Fusion 360 se muestra a continuación en la Figura 39. En la Figura 40. se muestra el conjunto PCB-placa de montaje-switches-o-ring.

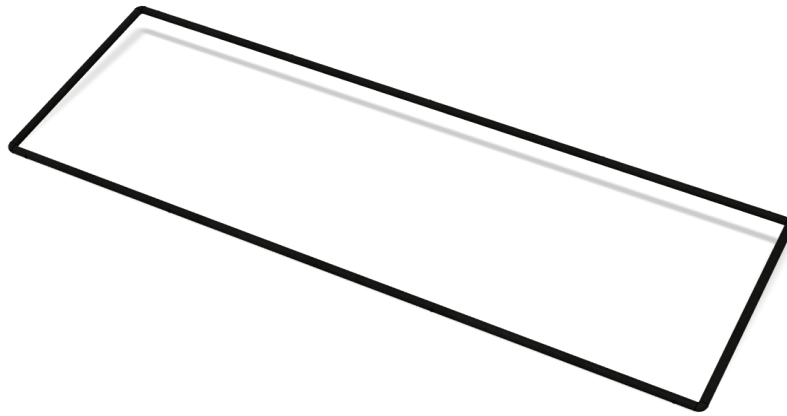


Figura 39. O-ring. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

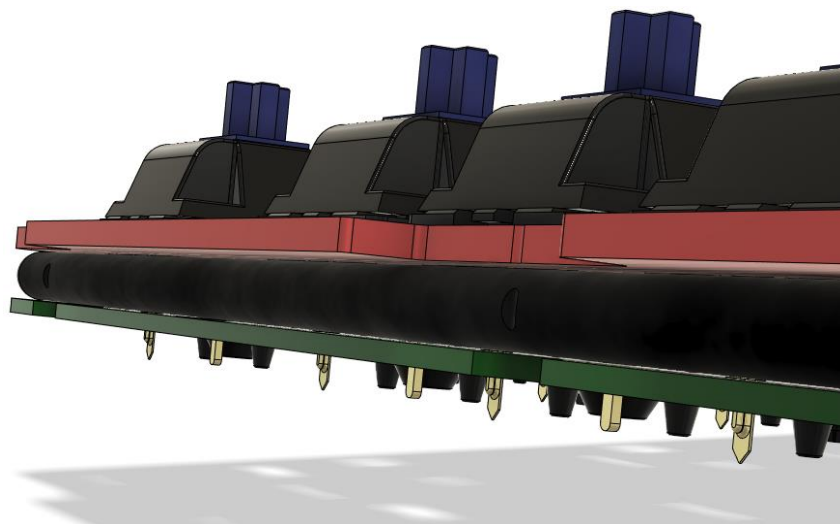


Figura 40. Conjunto PCB-placa de montaje-switches. Vista lateral en perspectiva axonométrica.

3.2.6. Diseño de los estabilizadores

Los estabilizadores son exportados, al igual que los switches, mediante [grabCAD](#). Debido a que el único ejemplo fidedigno encontrado era el correspondiente a un estabilizador 2U, se procede a su modificación, ajustando el tamaño del elemento metálico que conecta ambos extremos, para su adecuada implementación en un estabilizador 6'25U, correspondiente al empleado en la barra espaciadora. Las Figuras 41 y 42 muestran el modelo correspondiente a los estabilizadores 2U y 6'25U respectivamente.

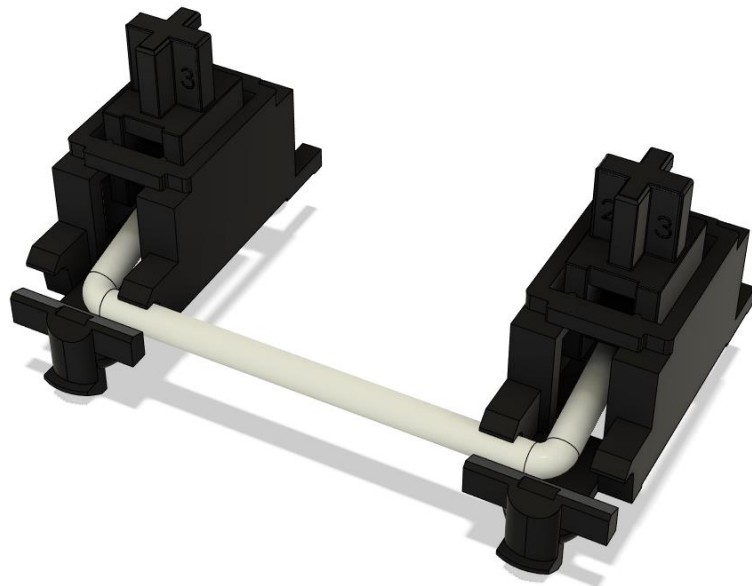


Figura 41. Estabilizador 2U. Vista frontal en perspectiva axonométrica.



Figura 42. Estabilizador 6'25U. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

3.2.7. Diseño de los keycaps

El diseño de los keycaps se realizó en un documento externo al ensamblaje, en el cual se modelaron en base a los existentes en el teclado *Ducky One 2 Mini*. Estos keycaps corresponden a un perfil MX. Una imagen representativa de este teclado, así como la explicación de los perfiles de las keycaps, puede encontrarse en el [Anexo I](#). Se tomaron medidas mediante un pie de rey de las dimensiones generales de los keycaps y se modeló un elemento 3D representativo de los mismos a nivel puramente visual. Sus dimensiones, en consecuencia, corresponden a las de un keycap tipo MX.

Se parametrizó el diseño en base a la U del keycap deseada, ampliando su grosor en proporción a la misma. El resultado es un keycap idéntico al empleado en cualquier teclado mecánico de perfil MX, con una geometría distinta para cada fila y para cada U. Como mención especial, se realizó un corte rectangular a la esquina inferior izquierda del enter para simular su apariencia en el formato ISO. La representación de un keycap modelado en 1U queda recogida en la Figura 43, mientras que la Figura 44 muestra todos los switches ya modelados y dispuestos espacialmente en el formato ISO 60%.

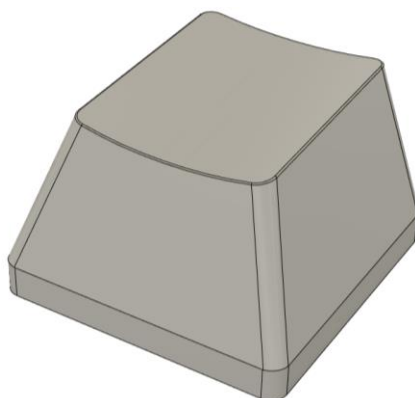


Figura 43. Representación 3D del modelo 1U de un keycap en fila 0 del tipo MX. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

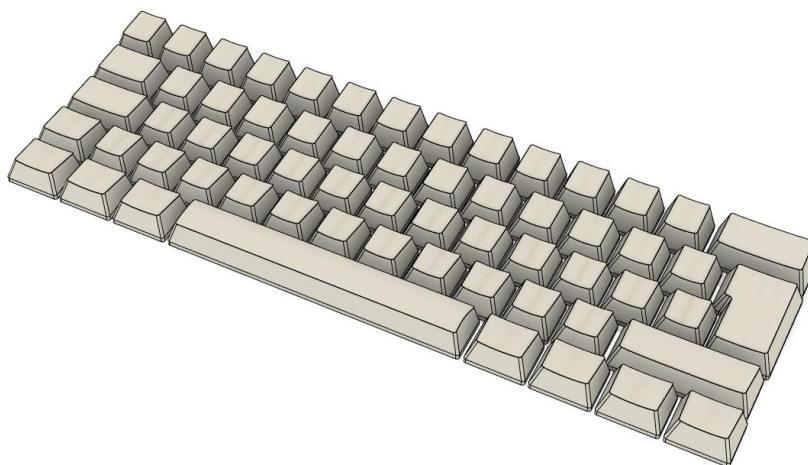


Figura 44. Disposición en formato ISO 60% de los keycaps modelados. Vista frontal en perspectiva axonométrica.

Se modela el hueco en forma de cruz existente en la parte inferior del keycap para alojar a la protuberancia del switch, además de nervios que dificulten su rotura, también presentes en el modelo real.

Para las teclas que emplean estabilizadores, se ubican sus correspondientes huecos en el perfil inferior del keycap de forma que también se encuentren alineados. Un ejemplo de esto en un keycap de 1U puede encontrarse a continuación en la Figura 45.

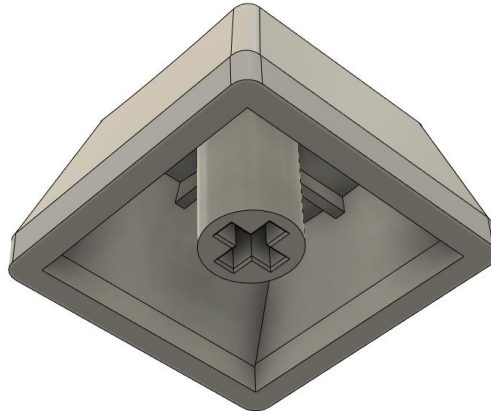


Figura 45. Hueco en cruz existente en los switches del teclado. Vista trasera en perspectiva axonométrica.

3.2.8. Diseño de los tornillos

El modelo 3D de los tornillos se descarga mediante la opción "Insert McMaster-Carr component" existente en Fusion 360, la cual permite importar archivos 3D de piezas normalizadas como tornillos, arandelas y tuercas. El modelo correspondiente al empleado en el trabajo es el de un tornillo de M2x10mm modelo 91292A833 encontrado en la página web de McMaster-Carr, de cabeza hexagonal y fabricado con acero inoxidable. Se puede observar este modelo en la Figura 46.



Figura 46. Tornillo 91292A833 de McMaster-Carr. Vista lateral en perspectiva axonométrica.

3.3. Validación por Método de Elementos Finitos

Una vez desarrollada la placa de montaje, se realiza un análisis mediante el Método de los Elementos Finitos del comportamiento de la misma cuando se encuentre sometida a las fuerzas esperadas durante el tecleo, así como la inclusión de un caso extremo de fuerzas en el que se comprobará que la pieza es capaz de soportar tensiones extremas.

Este análisis también permite la posterior comprobación de consistencia en el desplazamiento de la placa de montaje, la cual se desea que se encuentre distribuida lo máximo posible de manera que no se encuentren puntos en la placa con un desplazamiento superior a sus puntos colindantes.

3.3.1. Simplificación del modelo

Debido a la disposición del conjunto pcb-placa de montaje-switches, se puede asumir que el conjunto realizará un movimiento solidario en cuanto se realice presión en la placa de montaje. En consecuencia, puede simplificarse el modelo del teclado, eliminando la presencia de la PCB, los switches, los estabilizadores y los keycaps de la simulación.

Además, debido a que el *o-ring* reposa sobre los descansillos de las protuberancias de la carcasa interior de la Figura 33, puede asumirse que el área de la placa de montaje correspondiente al próximo a la ubicación de estas protuberancias será el encargado de reaccionar a las fuerzas incidentes.

En consecuencia, se realizan unas pequeñas muescas en la placa de montaje con el objetivo de colocar en ellas los puntos de anclaje del análisis de fuerzas. Esto, además, permite la eliminación de la carcasa tanto inferior como superior de la simulación en 3D del conjunto.

Se entiende que las pestañas superiores e inferiores de la placa de montaje también se ven flexionadas hasta hacer contacto con la carcasa superior en un caso extremo de fuerzas, pero se descarta la idea de incluir esta parte de la pieza en el análisis puesto que el punto más crítico es el de las protuberancias, el cual se ve sometido a un esfuerzo de punzonamiento mayor que la posible flexión de las pestañas.

3.3.2. Ejecución del análisis

Como ya se ha mencionado antes, se procede a anclar las muescas presentes en la placa de montaje en todos los grados de libertad.

Para realizar esto, se hace clic en cada una de las superficies de las muescas y, en la pestaña "constraints", se seleccionan U_x , U_y y U_z .

Para aplicar la fuerza en la placa, se hace clic en la pestaña "loads" para posteriormente hacer clic sobre la superficie superior de la placa (lo cual aplica una fuerza puntual a lo largo de toda esta superficie) y se introducen "2 N" o "200 N", en función del caso de cargas que se desee analizar, en campo del valor de la fuerza aplicada. El resultado puede observarse en la Figura 47.

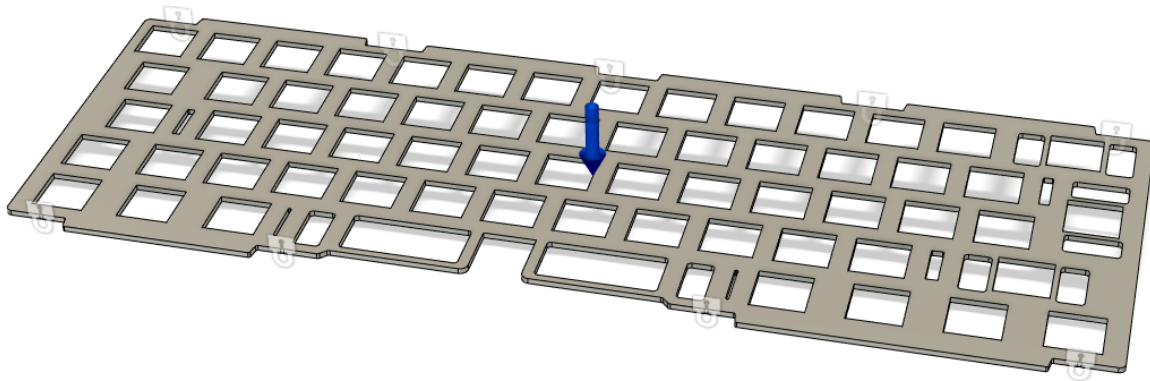


Figura 47. Resultado de anclaje y aplicación de fuerzas en la placa de montaje.

3.3.3. Resultados del caso normal de cargas

Como puede observarse en la Figura 48, la pieza soporta el caso de cargas estándar con creces. Esto se comprueba debido a que el coeficiente de seguridad mínimo en la pieza es de 15, el máximo computable por Fusion 360, lo cual indica que el coeficiente de seguridad real es mayor de 15.

Por tanto, se demuestra que, durante el uso normal del teclado, nunca se va a alcanzar un caso de cargas que vulnere la estabilidad estructural del teclado.

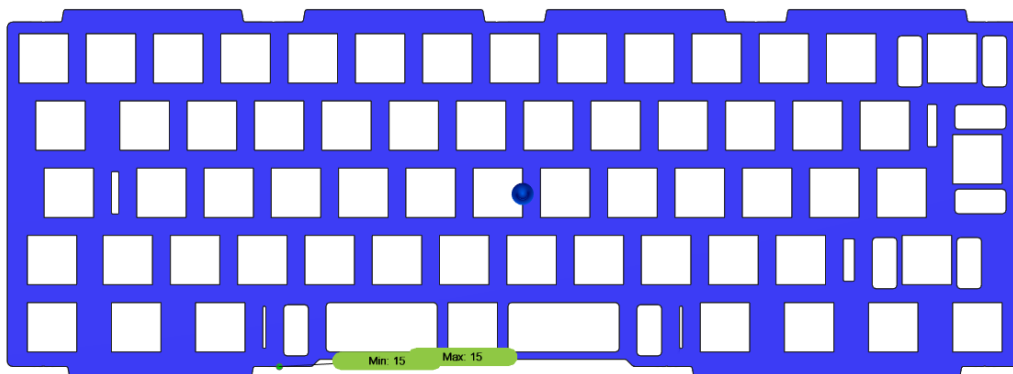


Figura 48. Factor de seguridad de la placa de montaje resultante del análisis por MEF para el caso normal de cargas.

Como medida adicional, se obtiene también el mapa de calor del desplazamiento resultante por la fuerza aplicada.

Se puede apreciar que el desplazamiento es prácticamente consistente en todas las teclas alfabéticas salvo en el entorno directamente encima de la barra espaciadora. Esto puede explicarse dado que la simplificación del entorno no tiene en cuenta la presencia de los switches encajados en la placa de montaje, los cuales dificultan en mayor medida el desplazamiento vertical de la placa; además del anclaje por o-ring realizado, el cual también distribuiría las fuerzas a lo largo de la barra espaciadora.

Conjuntamente, el desplazamiento máximo de 6,8 milésimas de milímetro se traduce en una placa de montaje con menor reverberación que una que permita una mayor flexibilidad del teclado. El mapa de calor mencionado anteriormente se observa a continuación en la Figura 49.

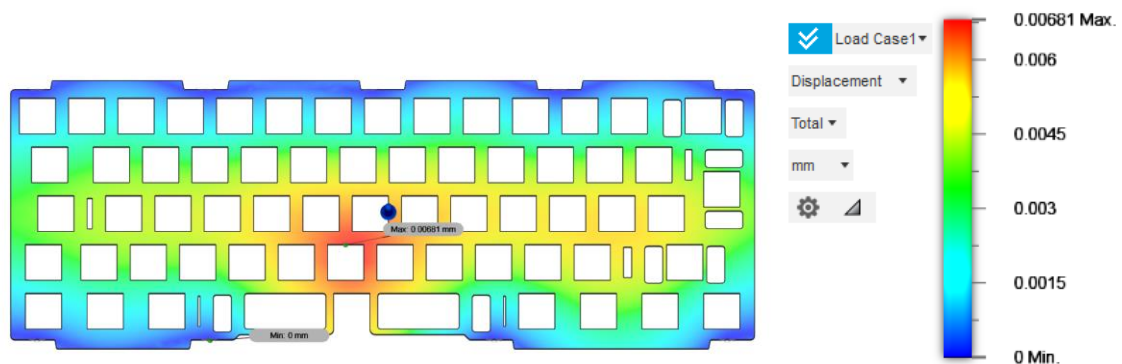


Figura 49. Desplazamiento en mm de la placa de montaje resultante del análisis por MEF del caso normal de cargas.

Por tanto, se puede confirmar que el teclado proporcionará un sonido consistente a lo largo de sus teclas.

3.3.4. Resultados del caso extremo de cargas

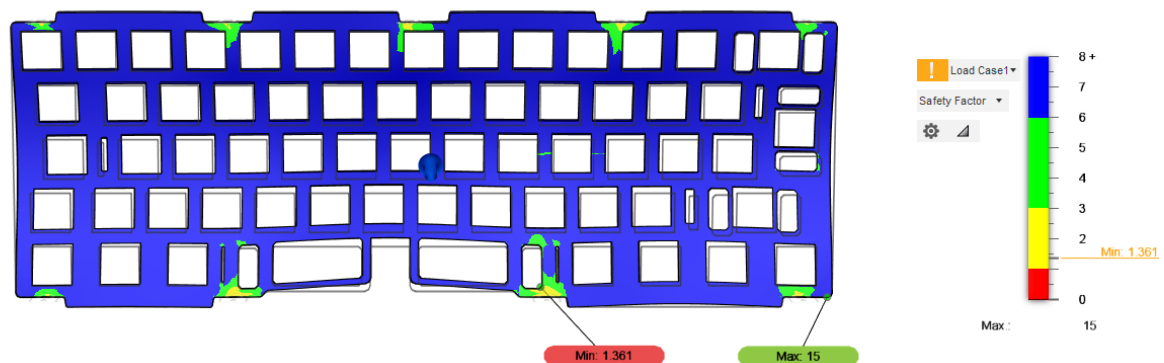


Figura 50. Factor de seguridad de la placa de montaje resultante del análisis por MEF para el caso extremo de cargas.

La Figura 50 muestra que el factor de seguridad del caso de cargas extremo sigue siendo superior a 1, por lo que se consideraría que la pieza soporta el caso de cargas. No es necesario calcular el desplazamiento de la placa de montaje, debido a que no se espera llegar a este caso de cargas y, en consecuencia, proporcionaría información irrelevante.

3.4. Resultado final

Una vez diseñado el conjunto del teclado, se colocan las piezas creadas una sobre la otra para formar el ensamblaje del mismo. El resultado se observa en la Figura 51, así como un posterior renderizado 3D mediante la pestaña "Render" de Fusion 360 en la Figura 52.



Figura 51. Modelado resultante del conjunto del teclado.

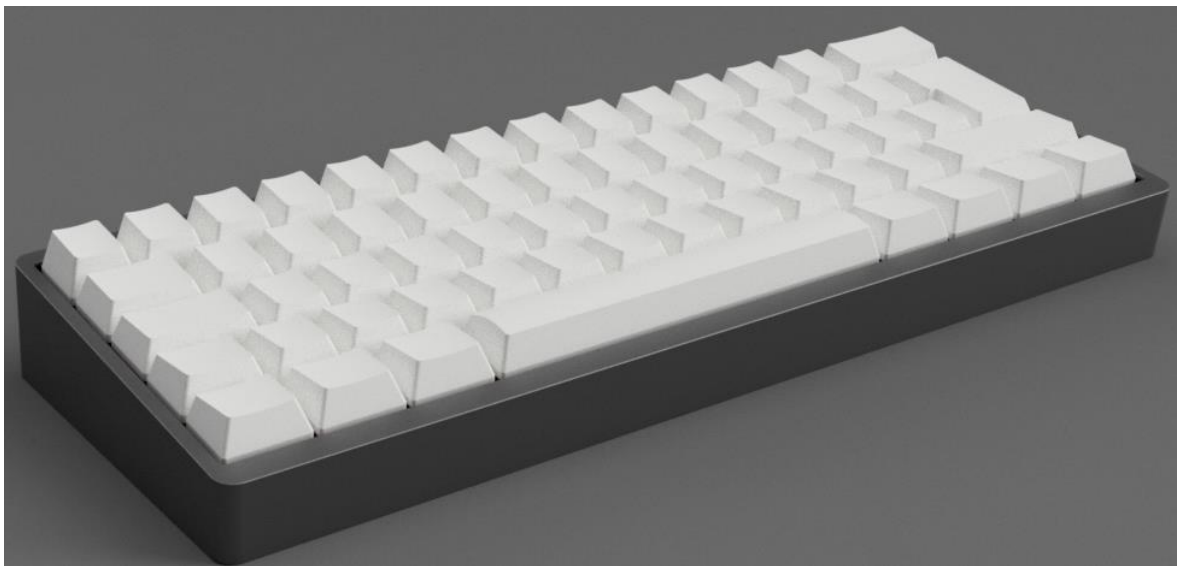
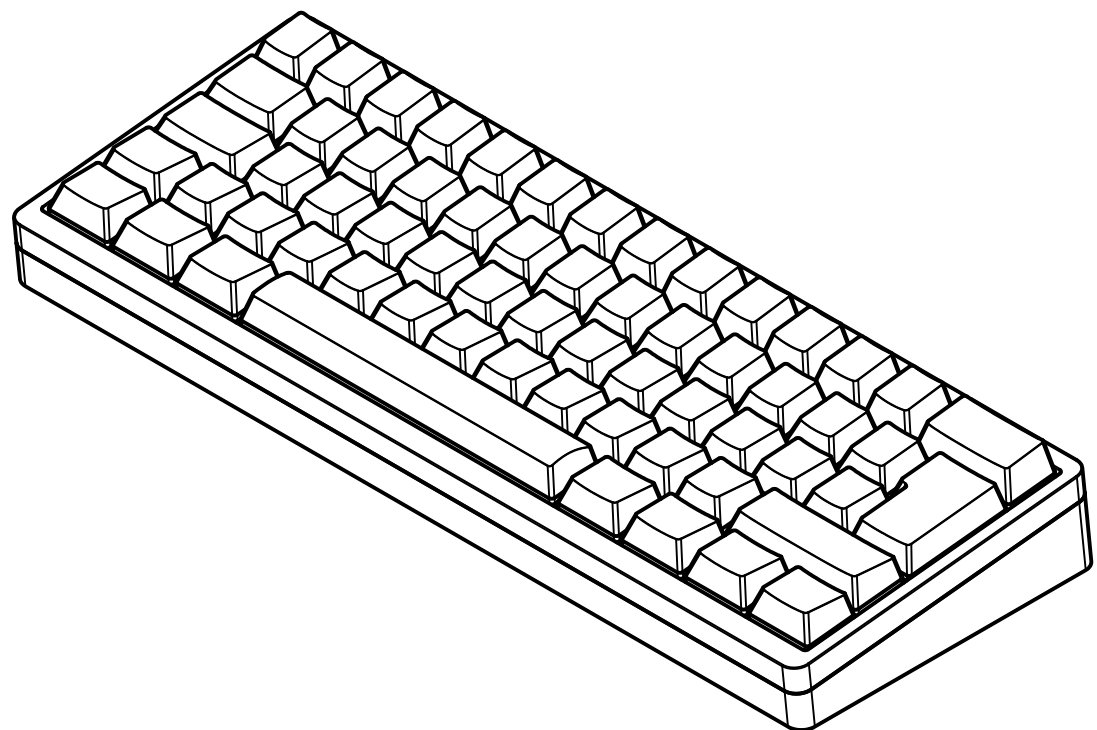
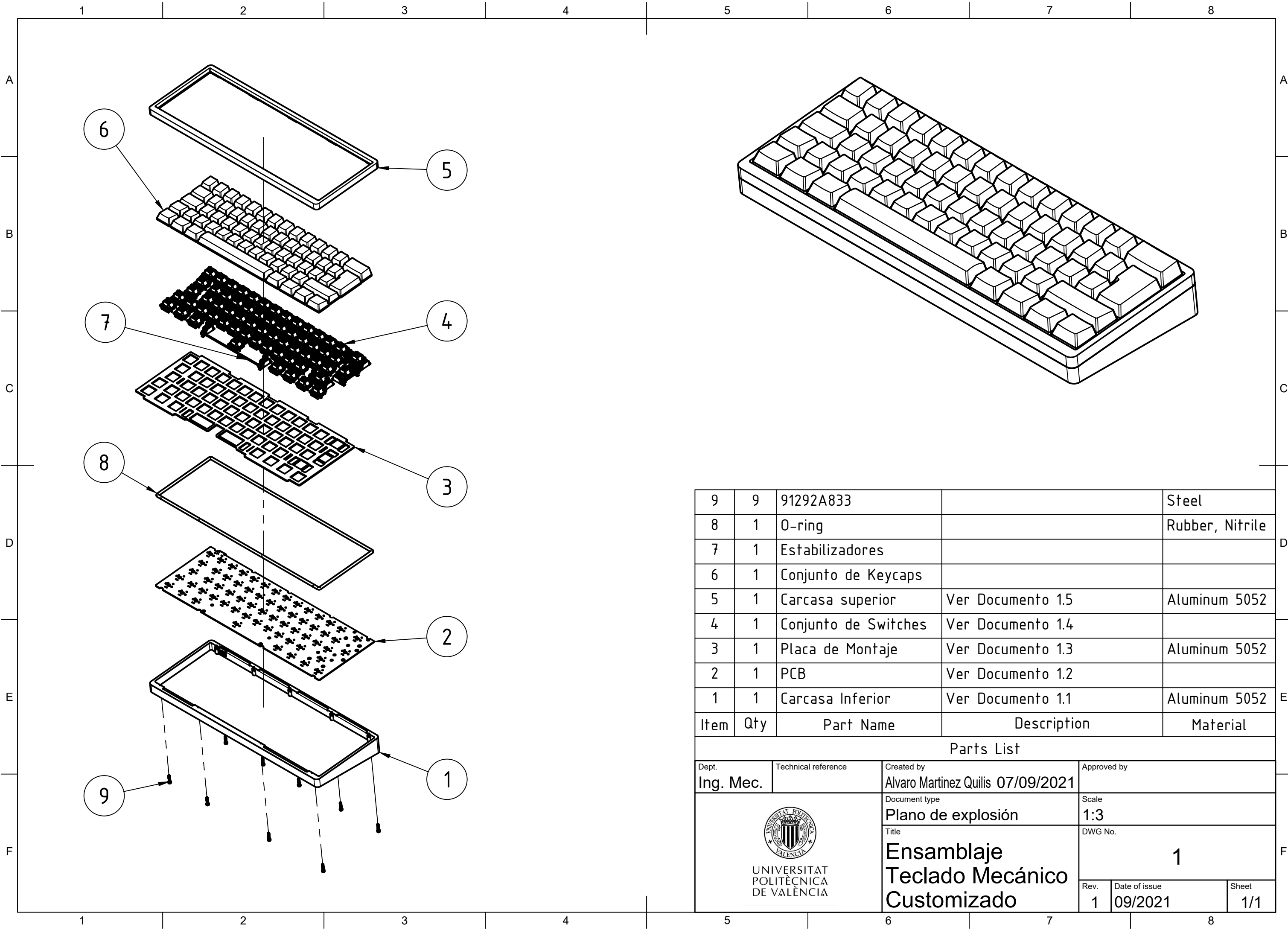


Figura 52. Renderizado 3D del conjunto del teclado

4. Planos


A partir de cada una de las piezas creadas desde cero durante el proceso de diseño, se obtienen los planos correspondientes de las piezas que posteriormente serán mandadas a fabricar. De igual forma, se realiza un plano en explosión del switch, así como un plano en detalle de la PCB ambos con fin ilustrativo.

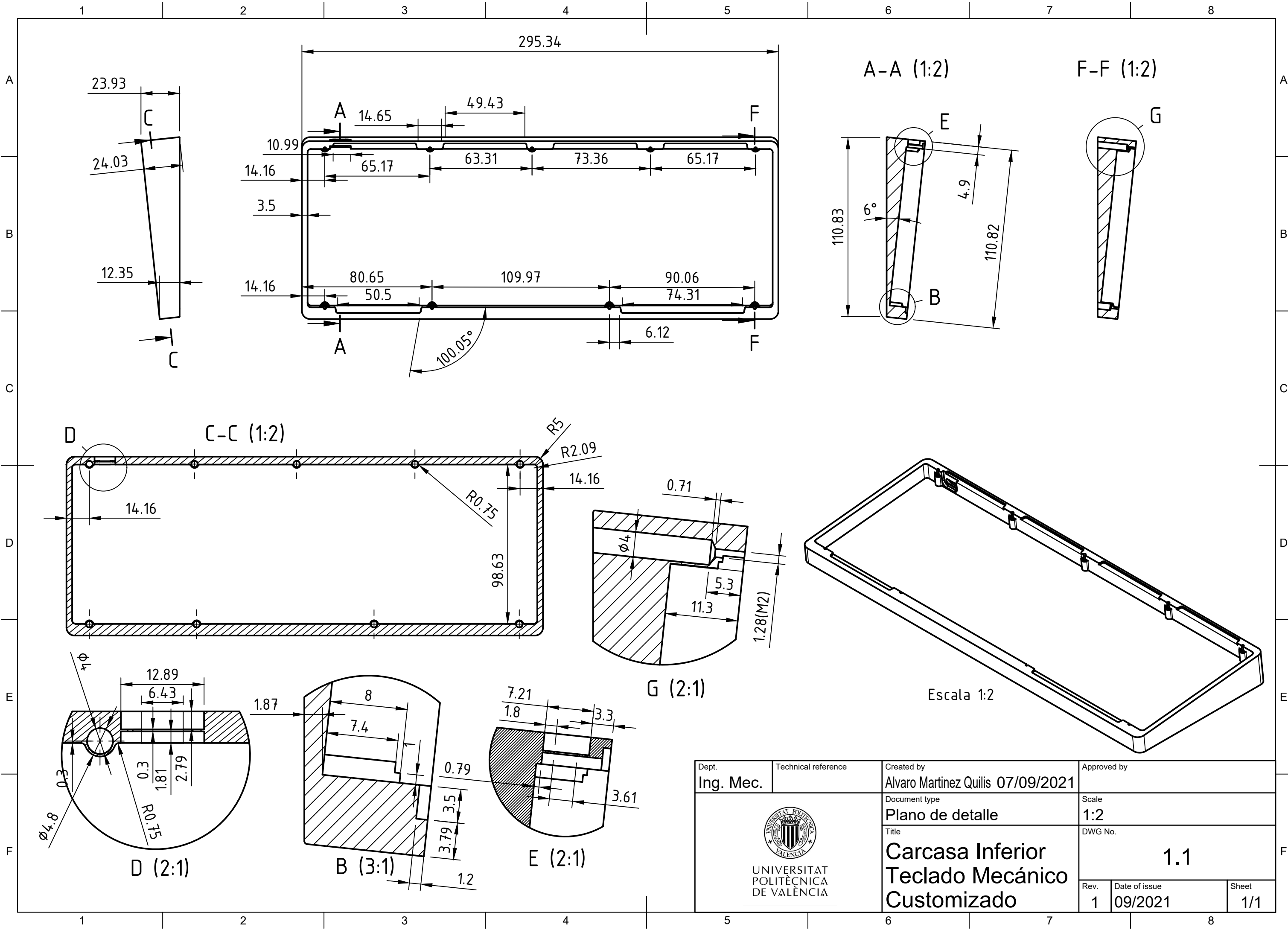
Para el caso de los *switches*, estos son adquiridos a terceros, lo cual hace innecesaria el diseño de un plano de los mismos; mientras que la PCB se encarga a *JLCPCB* mediante archivos *gerber*, los cuales recogen toda la información perteneciente a las distintas capas que componen a la *PCB* y permiten su posterior fabricación de mejor forma que un plano, debido a la complejidad de fabricación de la misma.




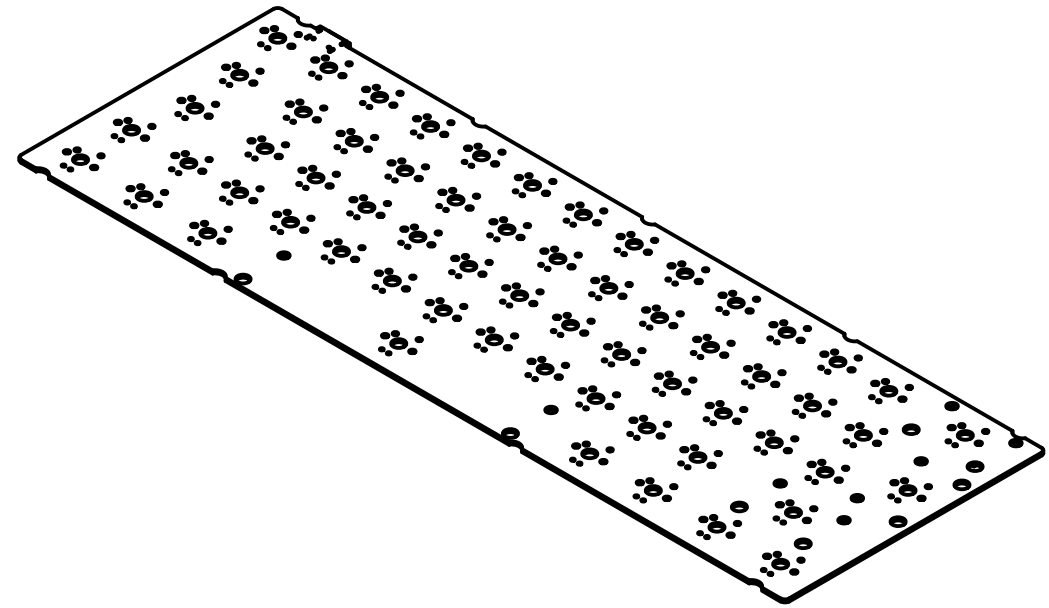
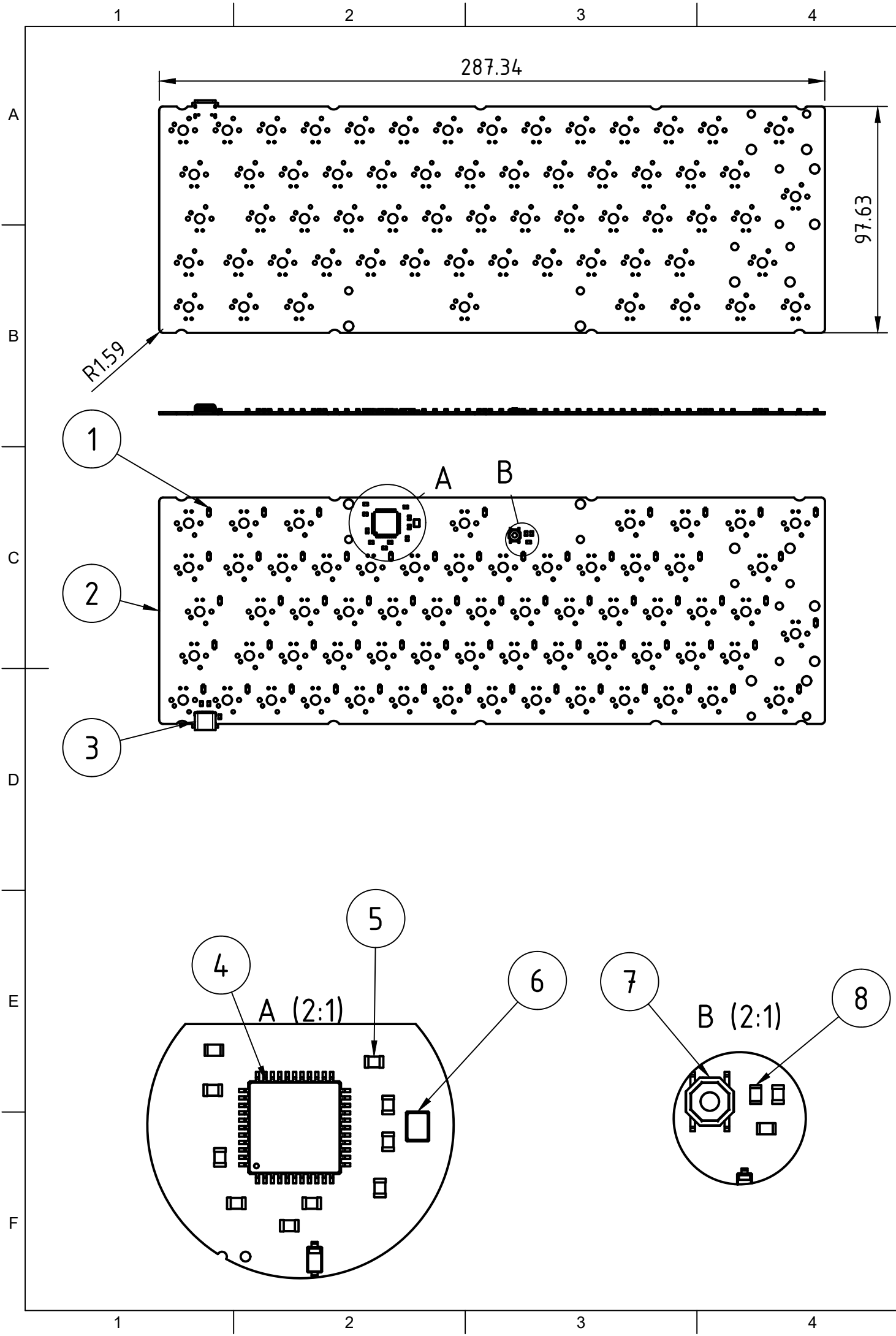
9	9	91292A833		Steel
8	1	O-ring		Rubber, Nitrile
7	1	Estabilizadores		
6	1	Conjunto de Keycaps		
5	1	Carcasa superior	Ver Documento 1.5	Aluminum 5052
4	1	Conjunto de Switches	Ver Documento 1.4	
3	1	Placa de Montaje	Ver Documento 1.3	Aluminum 5052
2	1	PCB	Ver Documento 1.2	
1	1	Carcasa Inferior	Ver Documento 1.1	Aluminum 5052
Item	Qty	Part Name	Description	Material


Parts List

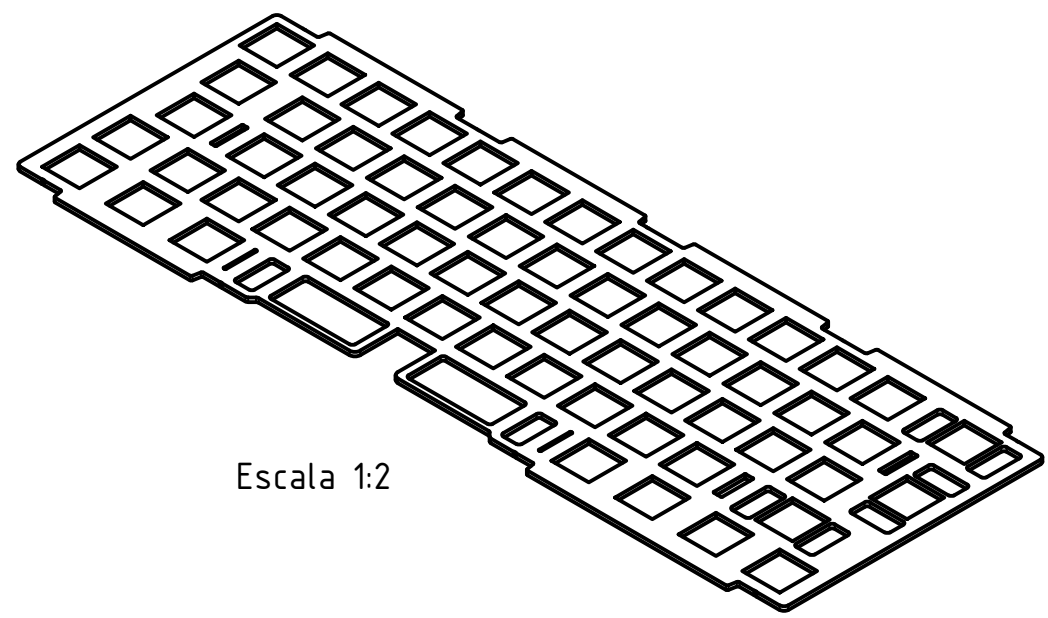
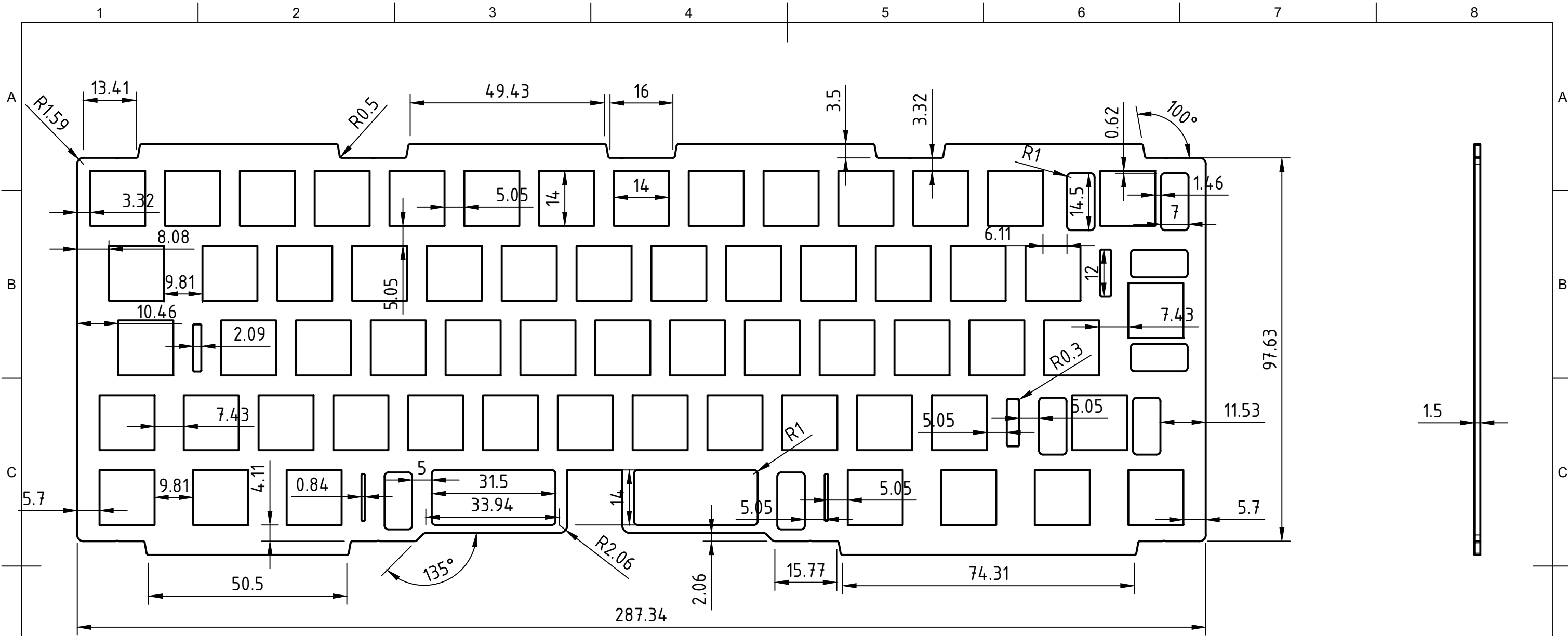
Dept. Ing. Mec.	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Document type Plano de explosión	Scale 1:3
		Title Ensamblaje Teclado Mecánico Customizado	DWG No. 1
Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1	




Dept. Ing. Mec.	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Document type Plano de detalle	Scale 1:2
		Title Carcasa Inferior Teclado Mecánico Customizado	DWG No. 1.1
Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1	

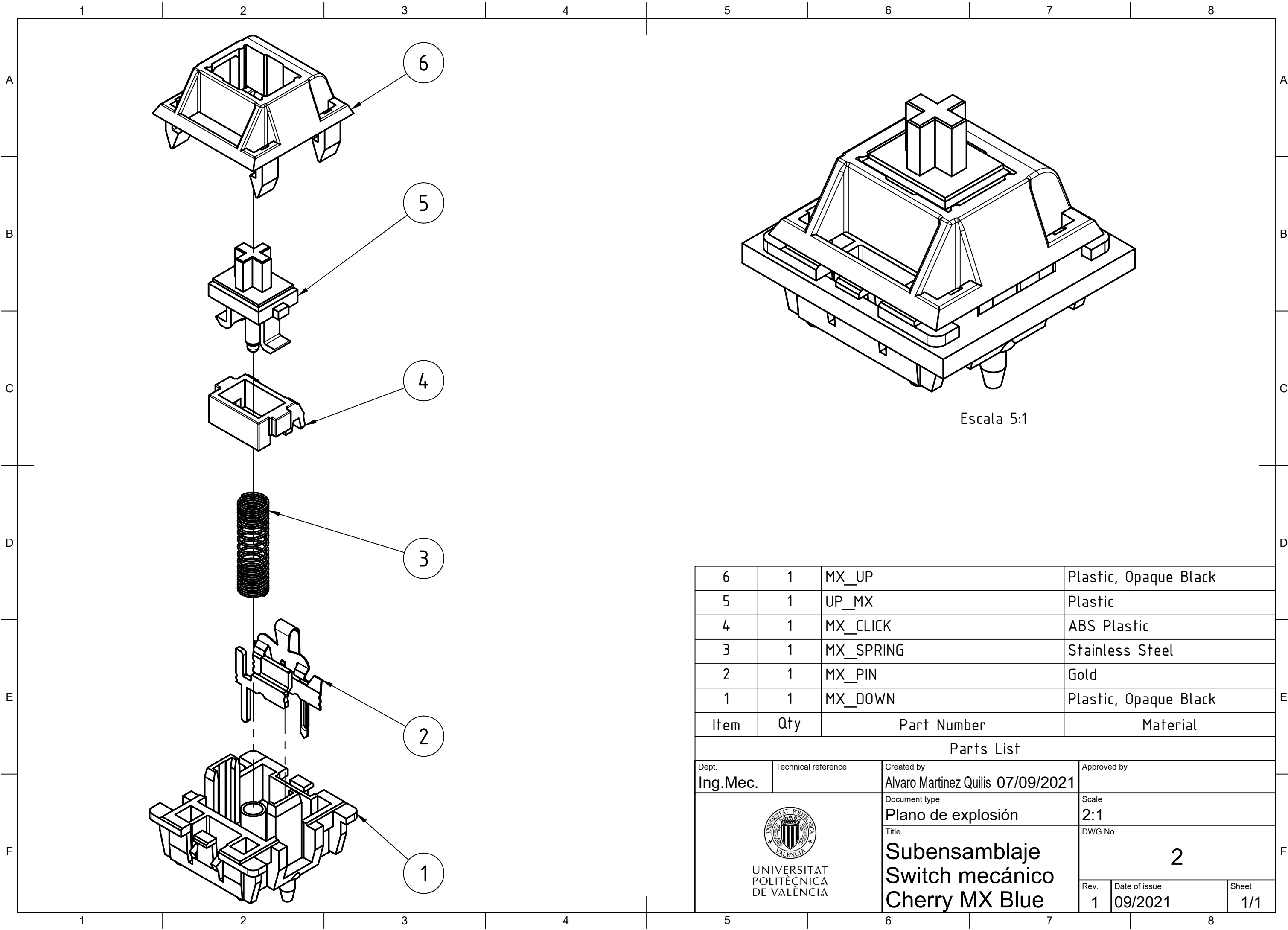


8	6	R_0805_2012Metric	
7	1	SW_SPST_TL3342	
6	1	Crystal_SMD_3225-4Pin_3.2x2.5mm	
5	10	C_0805_2012Metric	
4	1	TQFP-44_10x10mm_P0.8mm	
3	1	HRO TYPE-C-31-M-12 v1	
2	1	COMPOUND	
1	62	D_SOD-123	
Item	Qty	Part Name	Description
Parts List			
Dept. Ing. Mec.	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Document type Plano de detalle	Scale 1:1
		Title PCB Teclado Mecánico Customizado	DWG No. 1.2
Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1	



Escala 1:2


Dept. Ing. Mec.	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Document type Plano de detalle	Scale 1:1
		Title Placa de Montaje Teclado Mecánico Customizado	DWG No. 1.3
Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1	



Escala 5:1

6	1	MX_UP	Plastic, Opaque Black
5	1	UP_MX	Plastic
4	1	MX_CLICK	ABS Plastic
3	1	MX_SPRING	Stainless Steel
2	1	MX_PIN	Gold
1	1	MX_DOWN	Plastic, Opaque Black
Item	Qty	Part Number	Material

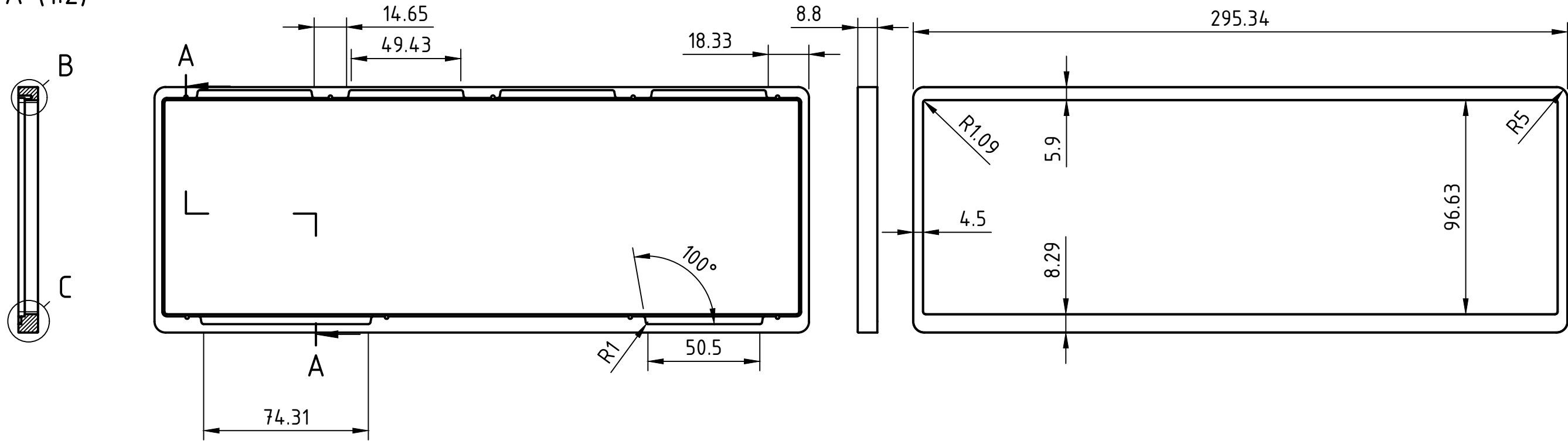
Parts List

Dept. Ing.Mec.	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Document type Plano de explosión	Scale 2:1
		Title Subensamblaje Switch mecánico Cherry MX Blue	DWG No. 2
Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1	

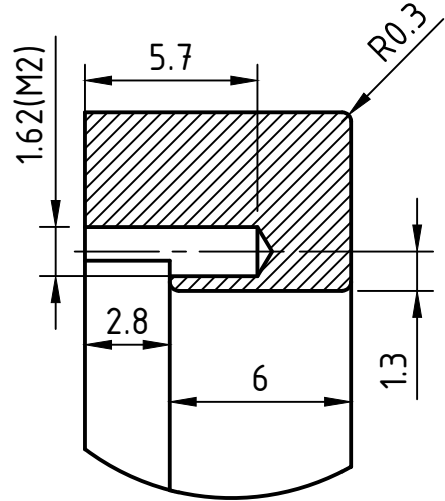
1 2 3 4 5 6 7 8

A
B
C
D
E
F

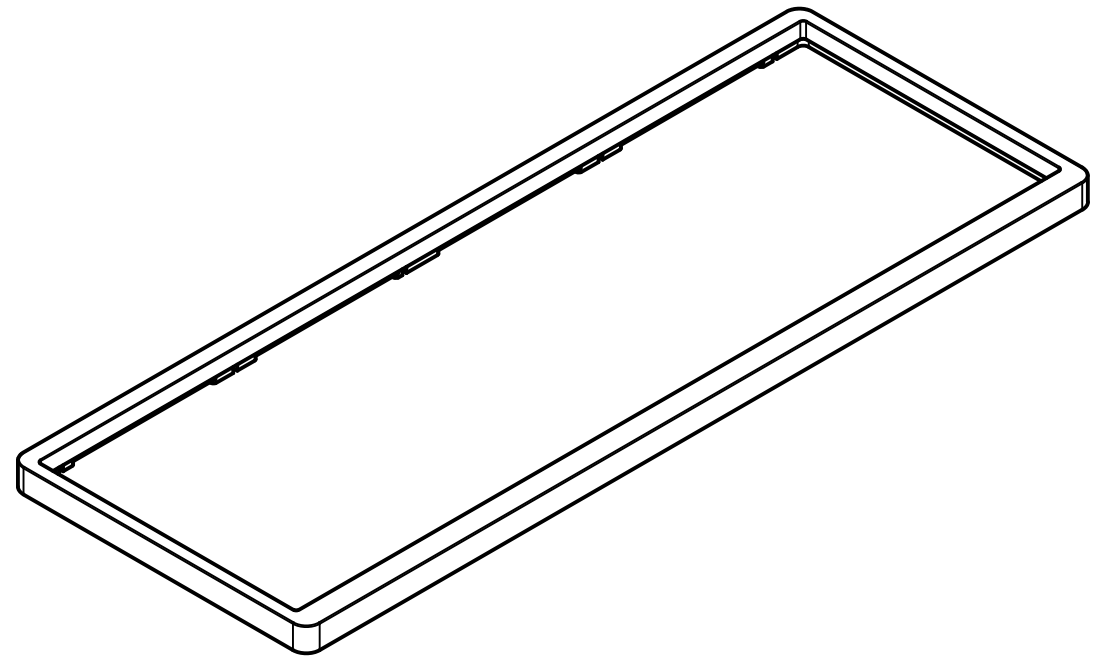
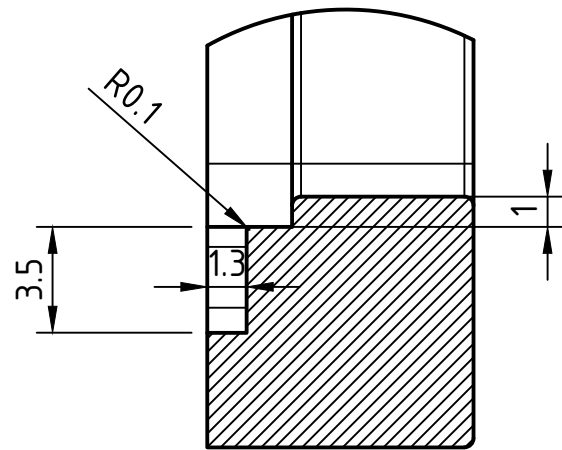
A-A (1:2)




B (4:1)



C (4:1)



Dept. Ing. Mec	Technical reference	Created by Alvaro Martinez Quilis 07/09/2021	Approved by
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	Document type Plano de detalle	Scale 1:2	DWG No.
	Title Carcasa Superior Teclado Mecánico Customizado	1.5	
	Rev. 1	Date of issue 09/2021	Sheet 1/1

1 2 3 4 5 6 7 8

A
B
C
D
E
F

5. Pliego de condiciones

5.1. Carcasa superior

5.1.1. Descripción

La carcasa superior dispone de unas dimensiones generales de 295x110x9mm y es fabricada mediante Aluminio 5052, anodizada y arenada. Estará anclada a la carcasa inferior mediante tornillos de métrica M2x10 procedentes de la misma. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.5 de este proyecto.

5.1.2. Control de calidad

Se realiza una medición de la pieza tras su fabricación y se comparan las dimensiones obtenidas a las del plano de diseño

Si las medidas no cumplen con la tolerancia específica indicada en el plano, la pieza se descarta y se fabrica de nuevo. Además, se revisa que los agujeros para tornillos realizados en la misma permiten su correcto atornillado con la carcasa inferior y se inspecciona la pieza visualmente para comprobar la existencia de posibles grietas o marcas a causa de errores en el mecanizado.

5.2. Carcasa inferior

5.2.1. Descripción

La carcasa inferior dispone de unas dimensiones generales de 295x110x24mm y es fabricada mediante Aluminio 5052, anodizada y arenada. Está anclada a la carcasa superior mediante tornillos de métrica M2x10. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.1 de este proyecto.

5.2.2. Control de calidad

Se realiza una medición de la pieza tras su fabricación y se comparan las dimensiones obtenidas a las del plano de diseño. Si las medidas no cumplen con la tolerancia específica indicada en el plano, la pieza se descarta y se fabrica de nuevo. Además, se revisa que los orificios para tornillos realizados en la misma permiten su correcto atornillado con la carcasa superior y se inspecciona la pieza visualmente para comprobar la existencia de posibles grietas o marcas a causa de errores en el mecanizado o anodizado.

5.3. Keycaps

5.3.1. Descripción

El conjunto de keycaps empleado en este proyecto dispone de dimensiones similares a las del modelo *Hades 68* de *HK Gaming* y está compuesto por *PBT*. Las dimensiones y el peso varían en función del tamaño del keycap y quedan explicadas con detalle en el [Anexo I](#). Como referencia, un *keycap* de 1U tendrá unas dimensiones generales de 18x18x1mm. Sin embargo, cabe destacar que podrá emplearse cualquier otro *keycap* de material y/o fabricantes distintos siempre y cuando disponga de dimensiones similares y de un hueco en forma de cruz equivalente que permita el encaje de un *switch MX*.

5.3.3. Control de calidad

Se comprueba que las keycaps encargadas corresponden al modelo correspondiente mediante inspección visual. Además, se comprueba que se inserten correctamente en los agujeros de los *switches* y que el juego entre *switch* y *keycap* no sea el suficiente como para que el *keycap* pueda extraerse con facilidad estirando del mismo con los dedos ejerciendo una fuerza suave.

5.4. Switches

5.4.1. Descripción

El conjunto de switches empleado en este proyecto se corresponde al modelo *Blue* de *Cherry MX*, el cual emplea un mecanismo *clicky*. Este mecanismo queda explicado en detalle en el [Anexo I](#), el cual también recoge un plano que representa visualmente a un switch. Sin embargo, cabe añadir que podrá emplearse cualquier otro tipo de *switch* mecánico siempre y cuando disponga de dimensiones similares y de una protuberancia en forma de cruz equivalente.

5.4.2. Control de calidad

En primer lugar, se comprueba que el switch encargado dispone del mecanismo deseado mediante un ensayo manual en el que se presiona sobre su protuberancia en forma de cruz para comprobar que se escucha un "clic" sonoro al llegar a su fin de carrera. Después, se realiza un ensayo con uno de los switches para comprobar que pueda soldarse correctamente en la PCB.

5.5. Tornillos

5.5.1. Descripción

Los tornillos de apriete se corresponden al modelo 91292A833 de *McMaster-Carr*, con una métrica M2, 3.8mm de diámetro de cabeza y 10mm de profundidad de tornillo eficaz. Sin embargo, cabe resaltar que podrá emplearse cualquier otro tipo de tornillo siempre y cuando disponga de dimensiones similares.

5.5.2. Control de calidad

Se realiza una medición de los tornillos tras su fabricación y se comparan las dimensiones obtenidas a las del modelo encargado. Se comprueba que encajan correctamente en los huecos ubicados en la parte de abajo de la carcasa inferior, además de comprobar que se atornillan apropiadamente en el agujero de la misma.

5.6. O-ring

5.6.1. Descripción

El o-ring empleado en este modelo se corresponde al modelo OD185x3.5 de Yi Biao, fabricado con nitrilo 70a. Sus dimensiones generales son un diámetro de sección de 3.5mm y una circunferencia externa sin estirar de 185 mm. Sin embargo, cabe añadir que podrá emplearse cualquier otro o-ring con un material distinto siempre y cuando sus dimensiones correspondan con las de este modelo.

5.6.2. Control de calidad

Se realiza una medición de la pieza y se comparan las dimensiones obtenidas a las descritas anteriormente para asegurarse de que se ha recibido el modelo correcto. Además, se inspecciona visualmente para comprobar la existencia de posibles grietas o marcas a causa de errores en el mecanizado y se estira de dos extremos opuestos hasta separarlos 25 cm para comprobar que la elasticidad del o-ring es apropiada para su correcto ensamblaje.

5.7. Estabilizadores

5.7.1. Descripción

Los estabilizadores empleados en este proyecto se corresponden a los modelos 2U y 6.25U de *Cherry MX*. Estos estabilizadores tienen un elemento en forma de "u" ancha que permite enganchar a cada uno de sus lados otro elemento con una protuberancia en cruz equivalente a la de un switch que se desplazará en caso de ser pulsada. Sin embargo, cabe resaltar que podrán emplearse otros modelos de estabilizadores siempre y cuando sus dimensiones y elementos correspondan con los de este modelo.

5.7.2. Control de calidad

En primer lugar, se comprueba que el modelo de estabilizador dispone de las dimensiones deseadas mediante la colocación de un keycap de U equivalentes sobre sus dos protuberancias en forma de cruz para comprobar que ambas piezas encajan apropiadamente. Después, se comprueba que puede colocarse en la PCB mediante presión o atornillado (dependiendo del mecanismo que emplee) asegurándose que no existe juego entre el estabilizador y la PCB.

5.8. PCB

5.8.1. Descripción

La PCB dispone de unas dimensiones generales de 287x98x1mm, y será fabricada por JLCPCB.

5.8.2. Control de calidad

Descrito de forma breve, se comprueba que la PCB puede conectarse a un ordenador mediante USB-C (conectándose al mismo), además de comprobar que la disposición de agujeros en la misma es correcta, empleando el programa VIA además del firmware QMK. Esto se realiza empleando la ayuda de pinzas metálicas de cabeza en aguja, las cuales se introducen en los agujeros de los switches (que cierran el circuito en la PCB) para cada uno de los switches presentes en el teclado, comprobando que su ubicación en el programa es la correcta. La Figura 53 muestra una captura del programa VIA mientras se comprueba el correcto funcionamiento de una PCB.



Figura 53. Programa VIA empleado para comprobar el funcionamiento de una PCB. Teclas ya comprobadas resaltadas en rojo.

5.9. Placa de montaje

5.9.1. Descripción

La placa de montaje dispone de unas dimensiones generales de 287x104x1.5mm, y es fabricada y anodizada mediante Aluminio 5052. Estará sujeta a la carcasa inferior mediante

compresión de la carcasa superior al o-ring, situado entre la placa de montaje y la PCB. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.3 de este proyecto.

5.9.2. Control de calidad

Se realiza una medición de la pieza tras su fabricación y se comparan las dimensiones obtenidas a las del plano de diseño. Si las medidas no cumplen con la tolerancia específica indicada en el plano, la pieza se descarta y se fabrica de nuevo. Además, se revisan los orificios para switches realizados en la misma y se inspecciona visualmente para comprobar la existencia de posibles grietas o marcas a causa de errores en el mecanizado.

5.10. Espuma de neopreno

5.10.1. Descripción

Se encargará espuma de neopreno de 1mm de espesor para apoyar la placa de montaje en la carcasa por las partes superior e inferior de las pestañas ubicadas en las partes de arriba y abajo de la placa, evitando el contacto de piezas metálicas.

5.10.2. Control de calidad

Se realiza una medición de la plancha tras su fabricación y se comparan las dimensiones obtenidas con las encargadas. Además, se inspecciona visualmente la lámina para comprobar que el material recibido es el correcto.

5.11. Ejecución

Se fabricarán la carcasa inferior y la carcasa superior del teclado en fresadora. Durante el proceso, se amarrarán adecuadamente las piezas para no perjudicar la geometría deseada. Se asegurará de hacer coincidir de manera concéntrica los agujeros presentes en ambas carcasas de forma que su alineación permita la inserción de un tornillo que sujete ambas piezas correctamente. Posteriormente, se realizará un proceso de anodizado y arenado, con propósito estético además de para eliminar las posibles rebabas presentes en la pieza producidas por su mecanizado.

Se producirá mediante cortado láser la placa de montaje del teclado, al estar compuesta por geometría en 2D con un espesor constante. Esta pieza también se verá sometida a un anodizado y arenado con el mismo fin que las piezas anteriores.

Para los productos solicitados a terceros, se encargará la fabricación de la PCB a JLCPCB, mientras que se encargará un pack de 100 tornillos 91292A833 a McMaster-Carr, 4 estabilizadores de 2U de Cherry MX, 1 estabilizador de 6.25U de Cherry MX, un set de 139 keycaps a HK Gaming y un set de 120 switches a Cherry MX. Se encargarán también 0.03

metros cuadrados de espuma de neopreno, la cual posteriormente se cortará en 8 pestañas de dimensiones generales de 49x3.5mm, 2 pestañas de dimensiones generales de 50 x 3,5 mm y 2 pestañas de dimensiones generales de 75 x 3,5 mm. Además, se cortará un rectángulo de 11x2mm de una de las esquinas de una de las pestañas de 49 x 3,5 mm.

Cabe añadir que no se hará uso de todos los elementos de estos últimos componentes, pero, debido a su indivisibilidad, deberán ser comprados en packs de este tamaño.

5.12. Ensamblaje

Para el ensamblaje se hará uso de 62 switches, 62 keycaps, 9 tornillos 91292A833, 1 o-ring la placa de montaje, la PCB (ya ensamblada), las pestañas de espuma de neopreno ya cortadas en la forma deseada, 4 estabilizadores 2U y 1 estabilizador 6.25U.

En primer lugar, se encajará un elemento con protuberancia en cruz a cada uno de los lados de la "u" de los estabilizadores para montarlos adecuadamente. Hecho esto, se anclarán a la PCB mediante presión con los dedos o atornillado hasta asegurarse de que se encuentran firmemente anclados.

Una vez anclados los estabilizadores, se alineará la placa de montaje a la PCB insertando los estabilizadores por los agujeros para estabilizadores presentes en la placa. La placa se presionará con los dedos en los extremos de los estabilizadores con cruz hasta notar un "clic" tanto físico como sonoro, el cual indicará que la placa se ha anclado al estabilizador correctamente. De esta forma, la placa reposará sustentada por los estabilizadores sin hacer contacto con la PCB.

Hecho esto, se montarán los switches, insertándose en los agujeros cuadrados de la placa de montaje, presionando con los dedos hasta notar el mismo "clic". Este paso se hará asegurándose de que las protuberancias de los switches estén alineadas con los agujeros de la PCB.

Es importante resaltar el hecho de que, durante este paso, la placa de montaje y la PCB no estarán ancladas entre sí de forma segura. Por este motivo, es recomendable que se comience colocando switches en las cuatro esquinas de la placa y, una vez hayan sido colocados, se suelde con estaño sus protuberancias más anchas a la PCB de forma momentánea. Tras soldar las esquinas, el orden en el que se insertan y sueldan el resto de los switches es arbitrario y se deja a la elección del ensamblador.

Una vez todos los switches han sido insertados y soldados en la placa, se fundirá el estaño de una de las soldaduras de las esquinas a la vez que se aplica presión entre el switch soldado y la PCB. Esta presión se mantendrá hasta que el estaño vuelva a solidificarse. En este caso, el orden en el que se realiza este paso con los switches será puramente arbitrario, aunque se recomienda que se realice en filas. El motivo por el que se lleva a cabo este paso es el de reducir lo más posible la distancia entre la PCB y el switch a través de todo el conjunto, además de homogeneizar la distancia a la cual se encuentran la PCB y los switches (y, como consecuencia directa, la placa de montaje).

Cuando todos los switches se hayan vuelto a soldar, se procederá a introducir el o-ring entre la PCB y la placa de montaje. Para llevar a cabo este paso, se introducirá parte del o-ring por el lateral que contenga el puerto USB-C, asegurándose de que encaje en el hueco entre la PCB y la placa por toda su superficie, estando en contacto con los switches del borde exterior de la PCB. Una vez hecho esto, se comenzará a introducir el resto del o-ring por el hueco, comenzando por uno de sus laterales para continuar por la parte superior y, finalmente, el otro lado. En cuanto se compruebe que no puede introducirse el resto del o-ring sin estirar, se estirará levemente hasta que la longitud del mismo permita su inserción con cuidado de no estirarlo demasiado, evitando así su posible rotura.

Antes de realizar nada más, se procederá a adherir las pestañas de neopreno a la carcasa inferior mediante una fina capa de adhesivo 3M aplicada mediante cola o pegamento de barra, colocando las pestañas de 49 x 3,5 mm en el lado superior, una pestaña de 50 x 3,5 mm en el lado inferior izquierdo y una pestaña de 75 x 3,5 mm en el lado inferior derecho. Esto se realizará también en el lado superior de la carcasa.

Teniendo el conjunto formado por la PCB, el o-ring, los switches y la placa de montaje ya ensamblado, se insertará el mismo en la carcasa inferior, asegurándose de que esta se encuentra alineada correctamente en las pestañas de la placa de montaje. Mientras se realiza esto, se empujará con los dedos al o-ring en las muescas redondas presentes en la PCB y placa de montaje para introducirlo en el desnivel existente en las protuberancias situadas en el interior de la carcasa inferior. Debido a que existen más de 2, este paso se realizará muesca a muesca. Este paso puede considerarse como completado satisfactoriamente cuando, gracias a él, se compruebe que la placa de montaje reposa completamente sobre las pestañas de neopreno, momento en el cual el o-ring se encontrará en los pequeños descansillos situados en cada una de las protuberancias de la carcasa inferior.

Hecho esto, se procederá a colocar la carcasa superior sobre la placa de montaje, apoyándola sobre la misma. Debido al espesor combinado de la espuma de neopreno y la placa, la carcasa superior no descansará sobre la inferior, sino que quedará suspendida ligeramente. Para solventar esto, se dará media vuelta al conjunto del teclado, apoyándolo sobre sus extremos laterales para evitar la compresión de los switches.

Una vez la parte inferior de la carcasa se encuentre boca arriba, se introducirá un tornillo en cada uno de los orificios de la misma para posteriormente atornillar la carcasa superior con la inferior mediante una llave Allen, empleando el lado corto como palanca y dejando de aplicar par de apriete cuando sea difícil realizarse con los dedos.

Para finalizar, volteando el conjunto a su posición original, se podrá considerar el proceso de ensamblaje como válido.

6. Presupuesto del proyecto

Toda la justificación para la obtención de los costes de materiales, salarios y procesos puede consultarse en el [Anexo II](#).

6.1. Desglose de precios

6.1.1. Materiales

Tabla 2. Precio unitario de los materiales y componentes del proyecto.

Referencia	Unidad	Descripción	Precio (€/ud)
MAT1	m ³	Aluminio 5052 para plancha de corte láser y fresado	58'800
MAT2	ud	Herramientas de la fresadora (coste medio amortizado)	25'000
MAT3	l	Taladrina	15'000
MAT4	m ²	Espuma de neopreno	2'500
MAT5	m	Alambre de estaño para soldadura	0'175
MAT6	ud	Keycaps HK Gaming Hades 68	38'450
MAT7	ud	Pack 5 uds PCB + ensamblaje por SMT	16'760
MAT8	ud	Pack 100 Tornillos M2x10mm 91292A833 <i>McMaster-Carr</i>	4'720
MAT9	ud	Pack estabilizadores Cherry MX 60% (4x2U, 1x6'25U)	10'480
MAT10	ud	O-ring OD185x3.5mm	4'000
MAT11	ud	Pack de 120 switches Cherry MX Blue	57'790

6.1.2. Mano de obra

Tabla 3. Precio por hora de la mano de obra estimada para este proyecto.

Referencia	Unidad	Descripción	Precio (€/h)
MO1	h	Ingeniero industrial / ingeniero mecánico	21'363
MO2	h	Operador de control numérico computarizado	15'150
MO3	h	Técnico de taller	18'077
MO4	h	Ingeniero diseñador de componentes (autor)	10'000

6.1.3. Maquinaria

Tabla 4. Precio por hora de la maquinaria estimada para este proyecto.

Referencia	Unidad	Descripción	Precio (€/h)
MAQ1	h	Fresadora	9'525
MAQ2	h	Cortadora láser	7'872
MAQ3	h	Estación de soldadura con estaño	0'008

6.2. Precio de diseño del teclado

En este apartado se incluirá el coste existente de adaptación del teclado ya creado en función de los posibles cambios deseados por el cliente del producto. Este coste se percibirá como un beneficio bruto para el autor.

Tabla 5. Precio total de la adaptación del diseño.

Referencia	Unidad	Descripción	Importe	Cantidad	Precio parcial (€)
DT	ud	Adaptación del diseño del teclado al proyecto			
MANO DE OBRA					
MO4	h	Ingeniero diseñador de componentes (autor)	10'000	5	50'000
Total importe adaptación del diseño (€)					50'000

6.3. Precio de fabricación de piezas

6.3.1. Carcasa superior

Tabla 6. Precio total de fabricación de la carcasa superior.

Referencia	Unidad	Descripción	Importe	Cantidad	Precio parcial (€)
T1	ud	Fabricación de carcasa superior, excluido coste del ensamblaje			
MATERIALES					
MAT1	m ³	Aluminio 5052 para plancha de corte láser y fresado	58'800	2'92E-04	0'017
MAT2	ud	Herramientas de la fresadora (coste medio amortizado)	25'000	1	25'000
MAT3	l	Taladrina	15'000	0'125	1'875
MAT4	m ²	Espuma de neopreno	2'500	0'015	0'375
MANO DE OBRA					
MO1	h	Ingeniero industrial/ Ingeniero mecánico	21'363	0'5	10'682
MO2	h	Operador de control numérico computerizado	15'150	0'25	3'788
MAQUINARIA					
MAQ1	h	Fresadora	9'525	0'5	4'763
Total importe ejecución material (€)					46'500

6.3.2. Carcasa Inferior

Tabla 7. Precio total de fabricación de la carcasa inferior.

Referencia	Unidad	Descripción	Importe	Cantidad	Precio parcial (€)
T2	ud	Fabricación de carcasa inferior, excluido coste del ensamblaje			
MATERIALES					
MAT1	m ³	Aluminio 5052 para plancha de corte láser y fresado	58'800	7'79E-04	0'046
MAT2	ud	Herramientas de la fresadora (coste medio amortizado)	25'000	1	25'000
MAT3	l	Taladrina	15'000	0'25	1'875
MAT4	m ²	Espuma de neopreno	2'500	0'015	0'375
MANO DE OBRA					
MO1	h	Ingeniero industrial/ Ingeniero mecánico	21'363	0'5	10'682
MO2	h	Operador de control numérico computerizado	15'150	0'25	3'788
MAQUINARIA					
MAQ1	h	Fresadora	9'525	0'5	4'763
Total importe ejecución material (€)					46'529

6.3.3. Placa de montaje

Tabla 8. Precio total de fabricación de la placa de montaje.

Referencia	Unidad	Descripción	Importe	Cantidad	Precio parcial (€)
T3	ud	Fabricación de placa de montaje, excluido coste del ensamblaje			
MATERIALES					
MAT1	m ³	Aluminio 5052 para plancha de corte láser y fresado	58'800	4'47E-05	0'003
MANO DE OBRA					
MO1	h	Ingeniero industrial/ Ingeniero mecánico	21'363	0'5	10'682
MO2	h	Operador de control numérico computarizado	15'150	0,25	3'788
MAQUINARIA					
MAQ2	h	Cortadora láser	7'872	0'25	1'968
Total importe ejecución material (€)					16'441

6.4. Precio de adquisición de componentes

Tabla 9. Precio total de la adquisición de piezas.

Referencia	Unidad	Descripción	Precio (€)
PA	ud	Precio de adquisición de componentes no fabricados	
MAT6	ud	Keycaps HK Gaming Hades 68	38'450
MAT7	ud	Pack 5 uds PCB + ensamblaje por SMT	16'760
MAT8	ud	Pack 100 Tornillos M2x10mm 91292A833 <i>McMaster-Carr</i>	4'720
MAT9	ud	Pack estabilizadores Cherry MX 60% (4x2U, 1x6'25U)	10'480
MAT10	ud	O-ring OD185x3.5mm	4'000
MAT11	ud	Pack de 120 switches Cherry MX Blue	57'790
Total importe adquisición de componentes (€)			132'200

6.5. Precio de ensamblaje

Tabla 10. Precio total del ensamblaje del teclado mecánico.

Referencia	Unidad	Descripción	Importe	Cantidad	Precio parcial (€)
ET	ud	Ensamblaje teclado. Soldadura de PCB a switches, corte y colocación de neopreno, colocación de componentes y unión mediante tornillería y presión por un técnico de taller			
MATERIALES					
MAT5	m	Alambre de estaño para soldadura	0'175	1	0'175
MANO DE OBRA					
MO3	h	Técnico de taller	9'507	2	19'014
MAQUINARIA					
MAQ3	h	Estación de soldadura con estaño	0'008	1'5	0'012
Total importe ejecución ensamblaje (€)					19'201

6.6. Coste total

Tabla 11. Precio total del ensamblaje del teclado mecánico.

Referencia	Descripción	Importe (€)	Cantidad	Precio parcial (€)
DT	Adaptación Diseño	50'000	1	50'000
T1	Fabricación Carcasa Superior	46'500	1	46'500
T2	Fabricación Carcasa Inferior	46'529	1	46'529
T3	Fabricación Placa de Montaje	16'441	1	16'441
PA	Adquisición de piezas no fabricadas	132'200	1	132'200
ET	Ensamblaje Teclado	19'201	1	19'201
Presupuesto ejecución material				310'871
13% de gastos generales				40'413
6% de beneficio industrial				18'652
Suma				369'936
21% IVA				77'687
Presupuesto de ejecución por contrata (€)				447'623

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata a la expresada cantidad de CUATROCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS CON SESENTA Y DOS CÉNTIMOS.

7. Conclusiones

La realización de este proyecto ha supuesto un reto debido a la complejidad del tema tratado durante el mismo, así como la disposición del mismo en un formato pensado para la fácil comprensión del tema tratado por parte del lector, requiriendo un bajo nivel de conocimiento sobre teclados mecánicos.

Esto, junto a la dificultad de realizar un prototipado o maquetación adecuados para representar fielmente a un teclado mecánico ha dificultado tanto la redacción como la validación de la creación de este teclado mecánico, incluyendo también un componente de naturaleza altamente electrónica, como lo es una PCB. Sin embargo, se ha conseguido superar cada uno de estos obstáculos de forma satisfactoria: validando el diseño mediante el MEF, realizando un buen diseño de una PCB y realizando un anexo que recoge toda la información pertinente considerada como necesaria previa a la introducción de este trabajo. De esta forma, se han condensado aspectos de carácter tanto electrónico como mecánico e industrial en una memoria que recoge el procedimiento de diseño de cada uno de los componentes de un teclado mecánico para su posterior ensamblaje por medios industriales. Asimismo, se han propuesto futuras implementaciones a considerar en el diseño realizado durante el proyecto del teclado mecánico.

7.1. Futuras Implementaciones en el diseño

Como mejoras para tener en cuenta para una futura implementación en un teclado mecánico, se han considerado las siguientes ideas:

- La inclusión de una *daughterboard*, o pequeña PCB, que recoja al puerto USB-C en una ubicación alejada de la PCB para evitar su posible rotura debido a la flexión de la PCB al escribir, además de su fácil reemplazo por una equivalente en caso de obtener un puerto USB-C defectuoso o del posible deterioro de este con el tiempo. Una imagen de una *daughterboard* empleable para un teclado tipo puede encontrarse mostrada en la Figura 54.

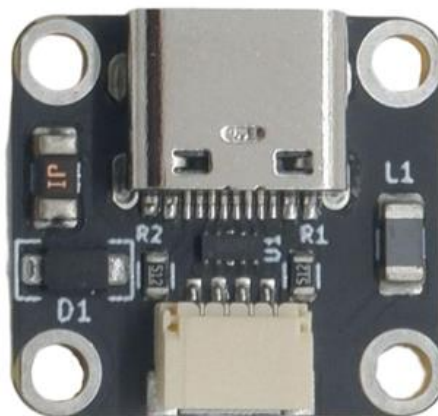


Figura 54. Daughterboard continente de un puerto USB-C(arriba).

- La inclusión de *shielding* en el puerto USB Tipo C para evitar posibles interferencias de carácter electromagnético tanto en el MCU como en el ordenador.
- La implementación de un *ground fill*, o capa de tierra, en la superficie cercana a tanto el MCU como el cristal como el puerto USB para minimizar cuanto sea posible la existencia de interferencias creadas por la proximidad de diversos circuitos eléctricos. Un ejemplo del *ground fill* realizado en el componente de una PCB queda recogido en la Figura 55.

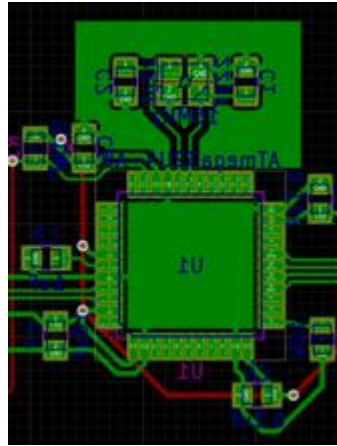


Figura 55. Capa de tierra en el interior del MCU y alrededor del cristal de una PCB tipo.

8. Bibliografía

1. 356 Mini Custom Mechanical Keyboard. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://deskthority.net/viewtopic.php?t=5185>
2. 356 Mini - The Lost Manual (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://geekhack.org/index.php?topic=87603.0>
3. 6061 ALUMINIO Vs. 5052 ALUMINIO. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021. <http://m.foildealuminio.com/news/6061-aluminum-vs-5052-aluminum-30160134.html>
4. Alldatasheet.com. (n.d.). ATMEGA32U4-AU Datasheet. Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/392232/ATMEL/ATMEGA32U4-AU.html>
5. A. (2018). Pcb designer guide. Última fecha de consulta en febrero de 2021.
<https://wiki.ai03.com/books/pcb-design/chapter/pcb-designer-guide>
6. Baart, T. (2019, April 08). Cheat sheet: Custom keyboard mounting styles. Última fecha de consulta en julio de 2021.
<https://thomasbaart.nl/2019/04/07/cheat-sheet-custom-keyboard-mounting-styles/>
7. CHERRY MX Blue. (n.d.). Última fecha de consulta entre agosto/septiembre de 2021. <https://www.cherrymx.de/en/mx-original/mx-blue.html#techSpecs>
8. A complete beginner guide to the world of mechanical keyboards. (n.d.). Última fecha de consulta en agosto de 2021.
https://www.reddit.com/r/MechanicalKeyboards/comments/hlf0ql/a_complete_beginner_guide_to_the_world_of/
9. CÁLCULO del TIEMPO DE REVERBERACIÓN. (2018, March 05). Última fecha de consulta en agosto de 2021. <https://www.internationalacoustic.com/es/calculo-del-tiempo-de-reverberacion/>

10. Esponja de Espuma De Neopreno 1mm 1m x 10m ROLLO de longitud. (n.d.). Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://www.ebay.es/itm/254545125372>
11. GrabCAD - MX stabilizer 2'25U. (n.d.). Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://grabcad.com/library/cherry-mx-stabilizer-mx-1>
12. GrabCAD - Switch Cherry MX Blue. (n.d.). Última fecha de acceso en septiembre de 2021.
<https://grabcad.com/library/cherry-mx-1>
13. Guide: XDA, SA, cherry, dsa Keycap profiles explained. (2021, August 30). Última fecha de consulta entre agosto/septiembre de 2021.
<https://www.eloquentclicks.com/es/guide-xda-sa-cherry-dsa-keycap-profiles-explained/>
14. HK gaming Teclas De sublimación de Tinte: Perfil DE cereza: Teclas PBT GRUESAS para teclado MECÁNICO (139 Teclas, lazo). (n.d.). Última fecha de consulta en julio de 2021. https://www.amazon.es/HK-Gaming-sublimaci%C3%B3n-Dye-mec%C3%A1nico/dp/B08JKYF7XH/ref=sr_1_5?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=pbt%2Bkeycaps%2Bhk%2Bgaming&qid=1631124466&sr=8-5
15. Imgur. (n.d.). OTD 356 mini v2. Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://imgur.com/a/O1H0b#K53qrXf>
16. Iskandanari, H. (2020, April 23). PCB design for mechanical Keyboards Pt.1 - Layout selection and configuration. Última fecha de consulta en junio de 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=BhFqkVggv8Q&t=4s>
17. Iskandanari, H. (2020, June 01). The switch matrix - pcb design for mechanical Keyboards Pt. 3. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
https://www.youtube.com/watch?v=vLGklanzQlc&list=PLbtY7JsOJDYkHNuTmBtGgaWv_qipKeL-u
18. KBDFans Tofu 60% custom mechanical keyboard. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.

<https://geekhack.org/index.php?topic=112534.0>

19. Keyboard layout editor. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<http://www.keyboard-layout-editor.com/#/>
20. KiCad EDA. (n.d.). Última fecha de consulta en abril de 2021.
<https://www.kicad.org/>
21. Kim, T. (2018). Scarra Keyboard. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://www.taehatypes.com/scarra>
22. Kim, T. (2019, July 21). Building scarra's custom mechanical keyboard. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=dVOXLvgbUG8>
23. Original cherry pcb-mount stabilizers. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021. <https://kbfans.com/products/cherry-original-pcb-stabilizers>
24. Pascual, J. (2018, April 14). Teclado mecánico: Historia, Tipos y por qué deberías usarlo. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://computerhoy.com/noticias/hardware/teclado-mecanico-historia-tipos-que-deberias-usarlo-78659>
25. PCB from scratch WITH Gondo. (2019, September 06). Última fecha de consulta en julio de 2021.
https://www.youtube.com/watch?v=Nk0egpDFqRA&ab_channel=MrKeeps
26. PCB prototype & PCB Fabrication manufacturer. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://jlcpcb.com/>
27. Plate & Case Builder - swillkb. (n.d.). Última fecha de consulta entre agosto/septiembre de 2021.
<http://builder.swillkb.com/>

28. QMK firmware Docs. (n.d.). Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://docs.qmk.fm/#/>
29. S. (n.d.). The 356 custom keyboard series. Última fecha de consulta en septiembre de 2021. <https://deskthority.net/viewtopic.php?t=255>
30. Stainless Steel Socket Head Screws. (n.d.). Última fecha de consulta en agosto de 2021. <https://www.mcmaster.com/screws/socket-head-screws/length~10-mm/thread-size~m2/material~stainless-steel/>
31. Stormy, B. (2020, June 12). How to Gasket Mount KBDfans tofu (part 1) - lesson On Gasket Mount Keyboards. Última fecha de consulta entre junio/julio de 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=rybhrGRzr5E>
32. TGR Jane v2. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://geekhack.org/index.php?topic=97552.0>
33. TheVerge. (2019, June 21). Building my first mechanical keyboard. Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
https://www.youtube.com/watch?v=0c8UdKX6GBA&ab_channel=TheVerge
34. Tran, L. (2020, November 07). TGR Jane V2 CE, O-Ring MOUNT ASSEMBLING. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=L7Fq1jmPw9w>
35. Type-C-31-M-12 Datasheet. (n.d.). Última fecha de acceso en septiembre de 2021.
https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1811131825_Korean-Hroparts-Elec-TYPE-C-31-M-12_C165948.pdf
36. UK-Keycaps. (n.d.). Cherry MX SWITCHES (HYPERGLIDE). Última fecha de consulta en marzo de 2021.
<http://www.ukkeycaps.co.uk/product/cherry-mx-switches>
37. V. (2020, March 02). TGR Jane V2 CE: Assembly & typing sounds (GASKET-MOUNTED; Cherry MX Vintage Black). Última fecha de consulta en mayo de 2021.
<https://www.youtube.com/watch?v=KsF2LuV2A9Q>

38. Volpato, A. ". (n.d.). Introduction to Acheron PCBs. Última fecha de consulta en agosto de 2021.
<https://acheronproject.com/doddle60/intro.html>
39. Y. (n.d.). TGR Jane v2 CE. Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://geekhack.org/index.php?topic=100415.0>
40. [GB] UNIKORN 60: TGR x Singa. (n.d.). Última fecha de consulta en septiembre de 2021.
<https://geekhack.org/index.php?topic=98587.0>

Anexo I: Información básica sobre un teclado mecánico

I. Matriz de switches y diodos

Para poder implementar correctamente las más de 60 teclas de un teclado en los pines de un MCU convencional, que son unos 26, se establece un patrón de filas y columnas de switches. Cuando se pulsa un switch en una fila y una columna determinados, se produce un flujo de corriente procedente de la columna, el cual fluye hacia el contacto entre fila y columna producido por el switch para posteriormente proporcionar una diferencia de potencial en el pin de la fila correspondiente.

Sin embargo, el MCU de un teclado mecánico realiza un barrido pin a pin de las columnas del mismo a una frecuencia de 1000Hz, por lo que no hay dos columnas activas en el mismo instante de tiempo. En consecuencia, si se pulsase un elemento de una columna distinta a la ya activa, la corriente recircularía por la misma hacia una de las columnas por activar, dañando posiblemente el MCU.

Para evitar esto, se hace uso de un diodo, colocado en las filas del teclado, con el objetivo de impedir la recirculación de corriente en caso de que se pulse más de una tecla en la misma fila en el mismo instante de tiempo. De esta forma, además, se consigue limitar el número de pines necesarios para los switches a los correspondientes a la suma de filas y columnas presentes en el teclado. Una imagen aclaratoria de estas filas y columnas puede observarse en la Figura 56.

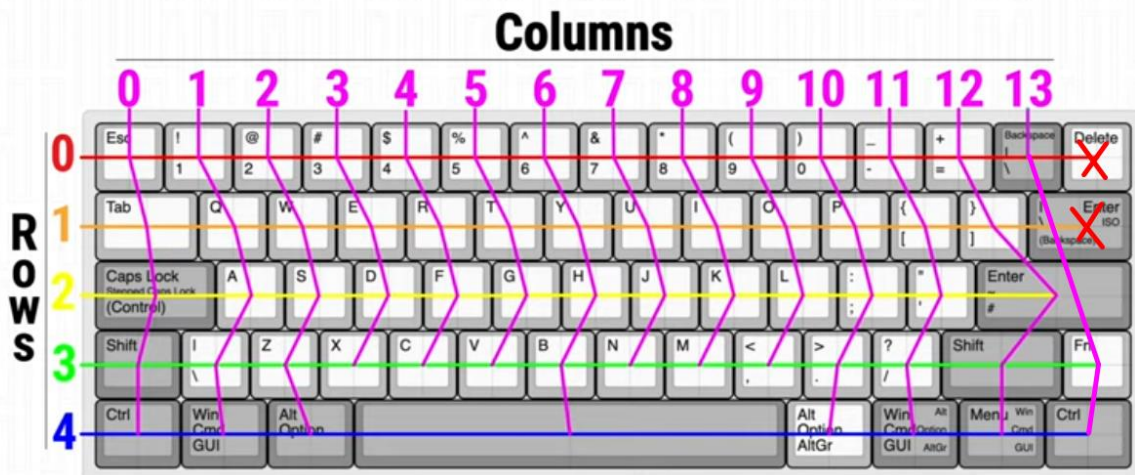


Figura 56. Matriz de switches resultante en un teclado 60%.

II. Tamaños de teclado

En el entorno de los teclados mecánicos customizados, se suelen emplear tamaños de teclados distintos al convencional con varios objetivos: en primer lugar, el condensar las teclas del teclado para reducir su cantidad; en segundo lugar, el de obtener un formato simétrico que permita una mejor consistencia en la reverberación del sonido del teclado a lo largo de su PCB. Debido a esto, rara vez se realiza un teclado mecánico customizado con todos los componentes de un teclado mecánico convencional de membrana. Los tipos más populares de teclados se muestran a continuación, en orden de mayor a menor número de teclas:



Figura 57. Formato 100%, el cual conserva todas las teclas de un teclado convencional



Figura 58. Formato TKL, en el cual se elimina el teclado numérico de la derecha.



Figura 59. Formato 65%, en el cual se eliminan las teclas función, el teclado numérico y parte de la isla auxiliar entre el teclado principal y el numérico, además de fusionar parte de la isla auxiliar junto con las flechas a la derecha de la isla principal.

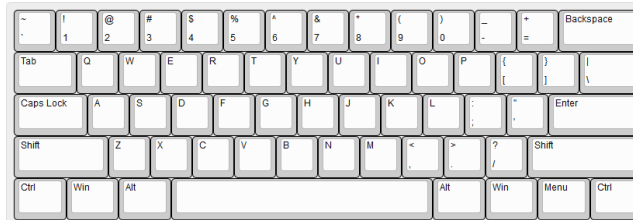


Figura 60. Formato de teclado 60%, en el cual se eliminan completamente las teclas Función, el teclado numérico y la isla auxiliar, conservando únicamente la isla principal.

En los teclados "60%", se suele situar un botón "Fn" abajo a la derecha con las funcionalidades perdidas, como muestra la siguiente figura, la Figura 61.



Figura 61. Ejemplo funcionalidad extra impreso en el lateral de teclas junto con la implementación de la tecla FN (abajo a la izquierda) en teclado Ducky One 2 Mini (60%).

Cabe añadir que gran parte de los teclados mecánicos customizados suelen realizarse en teclados de tamaño 60%, seguidos por TKL y 65%, como se ha ilustrado con los ejemplos repartidos a lo largo de este trabajo.

III. Estilo de teclas

Además de los tamaños de teclado mostrados anteriormente, puede realizarse una principal distinción en los estilos de teclado: el tamaño de la letra Enter. Como puede observarse, el teclado mostrado anteriormente hace uso de una tecla Enter rectangular, lo cual resulta extraño en Europa, debido a que este estilo de tecla se emplea comúnmente en E.E.U.U. y Asia.

Este tipo de formato es el ANSI, el cual coloca una tecla adicional en la parte superior del Enter, la cual reemplaza a la tecla perdida en la fila inferior al haberse expandido horizontalmente el botón de enter. Sin embargo, el formato ISO hace uso del Enter grande, tecla de geometría característica extendida comúnmente por Europa. El mismo modelo de teclado que la Figura 61 en formato ISO puede encontrarse a continuación, en la Figura 62.



Figura 62. Teclado Ducky One 2 Mini (60%) en formato ISO.

IV. Switch

Un switch está compuesto por las carcasas inferior y superior, encargadas de proteger el mecanismo interior y anclarse a la placa de montaje; un elemento en forma de cruz sobresaliente por la parte superior, encargado de acoger el keycap correspondiente; un muelle en espiral empleado para devolver el switch a su posición de reposo una vez deja de ser pulsado; además de un muelle de hoja formado por 2 elementos dorados los cuales conducen la electricidad. Estos últimos tienen protuberancias sobresalientes por la parte inferior de los mismos, las cuales van soldadas a la PCB. Por tanto, cuando un switch se pulsa, el elemento que realiza un cortocircuito en la tecla correspondiente no es la cruz desplazándose hacia abajo, sino que es el muelle de hoja el que cierra el circuito presionando los contactos de los elementos dorados entre sí.

Existen 3 tipos principales de switches:

1. Los switches de tipo lineal, los cuales disponen de un desplazamiento puramente lineal sin ningún bache que ofrezca resistencia puntual al avance.
2. Los switches de tipo táctil, que emplean un bache en el perfil del elemento en cruz para ofrecer resistencia háptica; la cual, en caso de ser vencida, indica que la tecla ha sido pulsada.
3. Los switches de tipo "clicky", que implementan un sistema táctil que además choca con la base del switch para realizar un sonoro "clic" al pulsar dicha tecla.

Estos quedan mostrados en la Figura 63 a continuación.

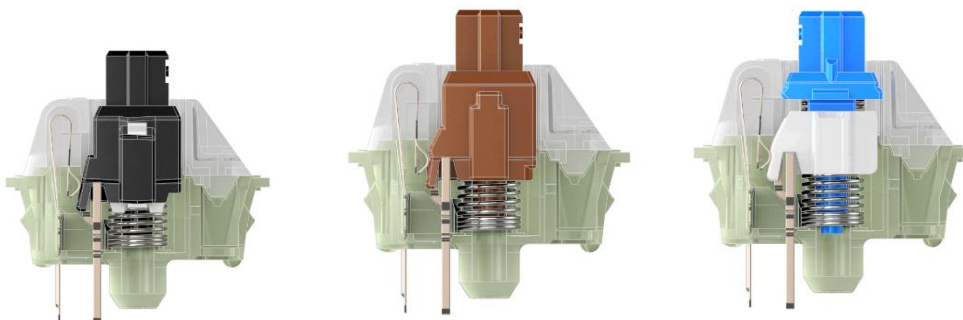


Figura 63. Estructura de un switch lineal (izquierda), táctil (centro) y "clicky" (derecha).

Como puede observarse en la figura anterior la pendiente del perfil del elemento deslizante en forma de cruz no dispone de bache alguno, mientras que la del táctil dispone de un ligero bache y el elemento con pendiente queda completamente desconectado del elemento deslizante en forma de cruz, permitiendo su choque con la base del switch.

Cherry MX también incluye una gráfica con la fuerza de activación de cada uno de los switches anteriores, mostrada en la siguiente página en la Figura 64.

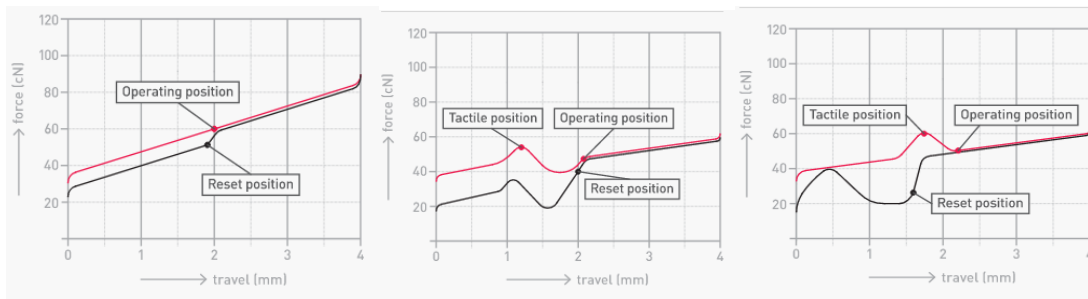


Figura 64. Gráfica fuerza(cN) / desplazamiento (mm) de un switch lineal (izquierda), táctil (centro) y "clicky" (derecha).

En esta figura puede apreciarse el motivo tras la denominación del switch "lineal", además de las semejanzas entre el táctil y el clicky en cuanto a su comportamiento al ser pulsados. Además, se destaca que la fuerza necesaria para actuar un switch hasta su fin de carrera no es mayor de 100cN, por lo que el caso de fuerzas empleado en el análisis MEF tiene en cuenta un caso de fuerzas ligeramente sobreestimado al necesario para la actuación del teclado, debido a que al teclear no se aplicará la fuerza exacta para llegar al fin de carrera del teclado, sino que se aplicará una fuerza arbitraria con la que se garantiza la activación de la tecla.

V.Keycaps

Los keycaps son los elementos dispuestos encima de los switches (o huecos de membrana) que se pulsán con los dedos al teclear. Existen una gran variedad de factores que definen un keycap, por los que se explicarán en detalle a continuación.

V.I. Anchura de keycaps

Para facilitar la implementación de keycaps en un teclado, tanto mecánico como de membrana, se decidió convencionalizar la anchura de una keycap en múltiplos de 0.25U para facilitar su implementación en teclados y PCBs. De esta forma, un keycap de 1U con una anchura de 18mm pasaría a medir 27mm para un keycap de 1'5U. Para la disposición de teclado "ISO 60%", las teclas ubicadas en la fila inferior son de 1'25U, mientras que la barra espaciadora es de 6,25U. Esto, en consecuencia, indica que la anchura total de un teclado 60% deberá ser de 15U. Como excepción, la tecla Enter ISO dispone de una altura de 2U, siendo la altura del resto de keycaps de 1U.

V.II. Perfil de Keycaps

La forma de un keycap depende tanto de su ubicación en el teclado como de su tipo de keycap. Existen estilos que emplean distintas geometrías y pendientes, las cuales quedan recogidas en la Figura 65, mostrada a continuación.

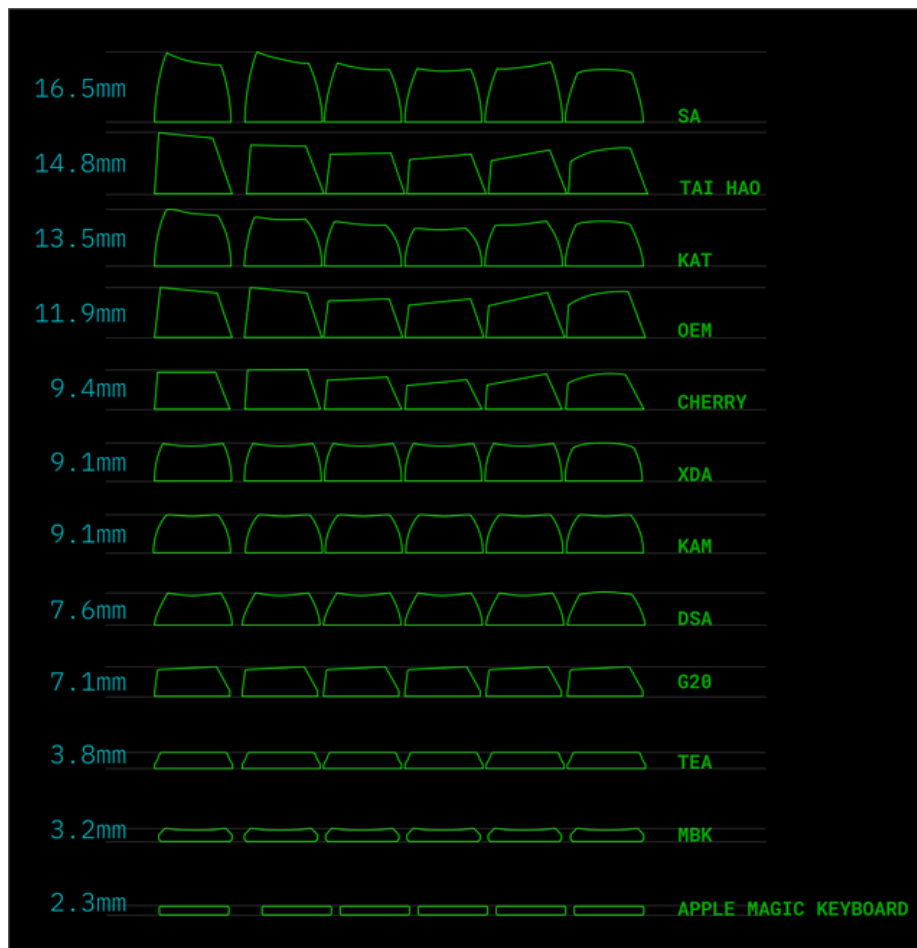


Figura 65. Perfiles de Keycaps según su fabricante.

El keycap empleado durante la elaboración de este TFG es de tipo *Cherry*, el cual dispone de una parte superior cóncava, la cual se encuentra inclinada hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de su ubicación en el teclado: la fila 1 se encuentra en horizontal, mientras que la 2 se encuentra prácticamente horizontal y el resto de filas se inclinan hacia abajo, exceptuando la barra espaciadora, que mantiene una forma convexa para acomodar el reposo de los pulgares sobre la misma.

VI. PCBs multiformato

Existen una cierta variedad de PCBs que disponen de más de un agujero ubicado en posiciones relativamente cercanas entre sí, las cuales llegan a superponerse en determinadas ocasiones. Esto suele realizarse por diseñadores que pretenden proporcionar versatilidad en sus teclados ofreciendo la opción de cambiar el tamaño de algunas de sus teclas. La Figura 66 muestra un ejemplo de este tipo de PCBs.

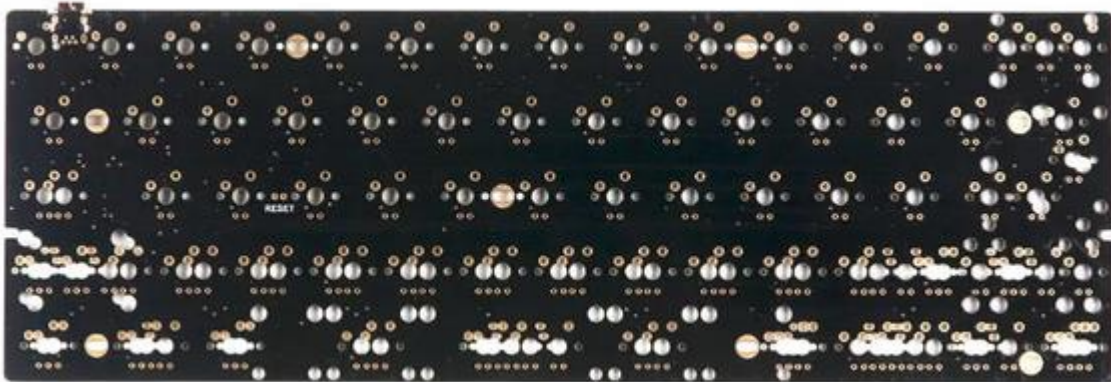


Figura 66. PCB multiformato en las últimas 2 filas, así como en las teclas Bloq Mayus y Enter.

VII. Estilos de montaje

En base al estilo de teclado que quiera fabricarse, se emplearán distintos estilos de montaje de los componentes móviles del teclado a la carcasa del mismo. Estos quedan recogidos y explicados con detalle en esta sección.

VII.I. Montaje por bandeja

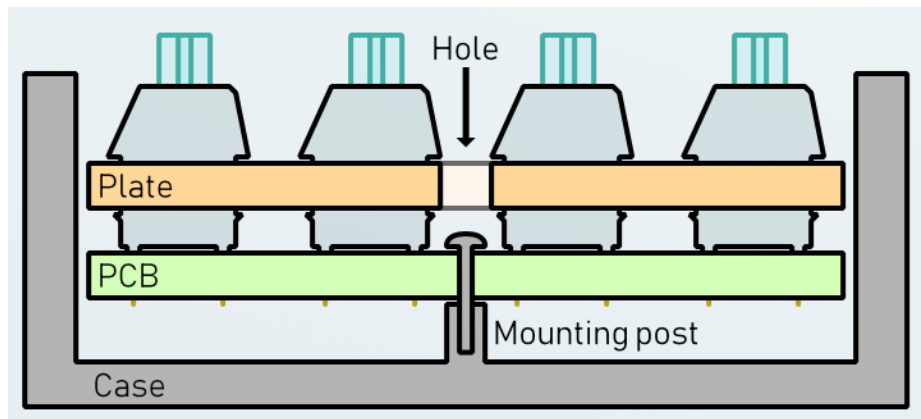


Figura 67. Montaje por bandeja.

El montaje por bandeja es el formato de montaje estandarizado en más de 60% de los teclados mecánicos existentes en la actualidad, debido a su fácil mecanización y automatizado a gran escala. Mediante este formato, se ancla la PCB a la base de la carcasa mediante tornillos incidentes en la parte superior de la PCB a través de agujeros presentes en la placa de montaje, insertados en protuberancias procedientes del interior de la carcasa inferior. En este estilo de montajes no suele ser necesario el uso de una carcasa exterior, aunque puede emplearse por motivos de estética. Sin embargo, este estilo de teclados suele ocasionar sonidos inconsistentes a lo largo del teclado debido al desplazamiento irregular de la placa de montaje en base a la fuerza aplicada al teclear.

VII.II. Montaje en carcasa superior

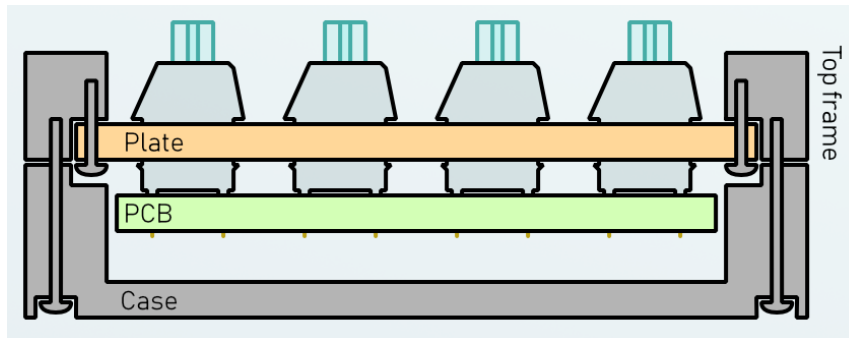


Figura 68. Montaje en carcasa superior.

En este estilo de montaje, se ancla mediante tornillería la placa de montaje a la carcasa superior, mientras que la carcasa superior se ancla a la carcasa inferior. Este estilo puede proporcionar un mejor sonido y permite variaciones en el diseño, pero puede generar resonancias metálicas en el teclado y requiere el mecanizado de una placa de montaje personalizada.

VII.III. Montaje en carcasa inferior

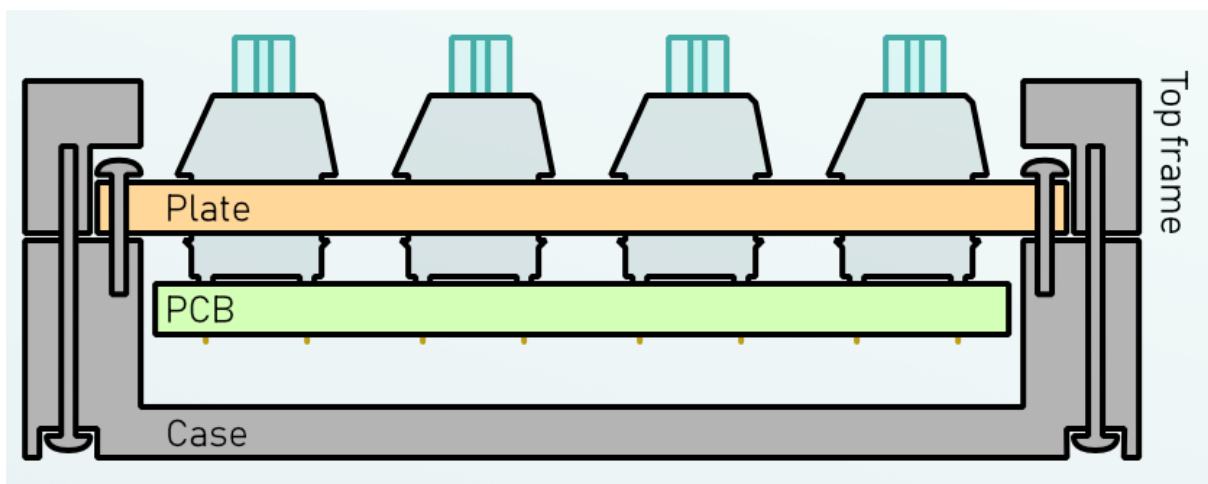


Figura 69. Montaje en carcasa inferior.

Como puede imaginarse, el montaje de la placa inferior hace uso de la misma técnica que el montaje superior, pero anclando la placa de montaje a la parte inferior. En consecuencia, sus características son prácticamente equivalentes a las del montaje en carcasa superior.

VII.IV. Montaje en sándwich

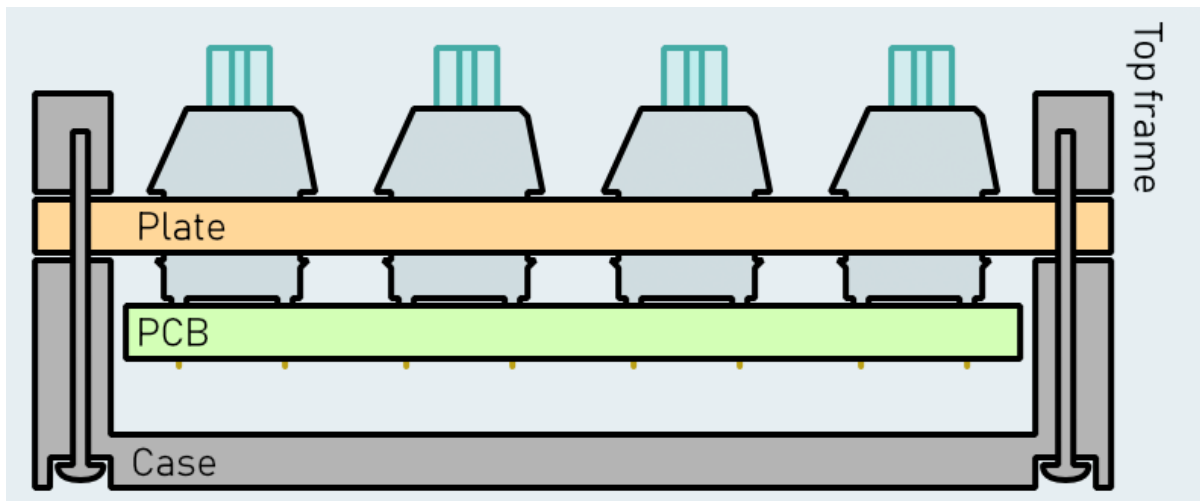


Figura 70. Montaje en sándwich.

En el montaje en sándwich, la parte superior e inferior de la carcasa se comprimen mediante apriete de tornillos sobre protuberancias laterales presentes en el perímetro de la placa de montaje. Este procedimiento proporciona un sonido más consistente, pero tiende a ser menos flexible que el resto de montajes. Se destaca el hecho de que el teclado realizado en este trabajo implementa parcialmente este estilo, al hacer uso de protuberancias para sujetar parte de la placa de montaje. Sin embargo, el objetivo principal de estas protuberancias no es el del anclaje, debido a que el o-ring es el encargado del mismo.

VII.V. Montaje en gasket

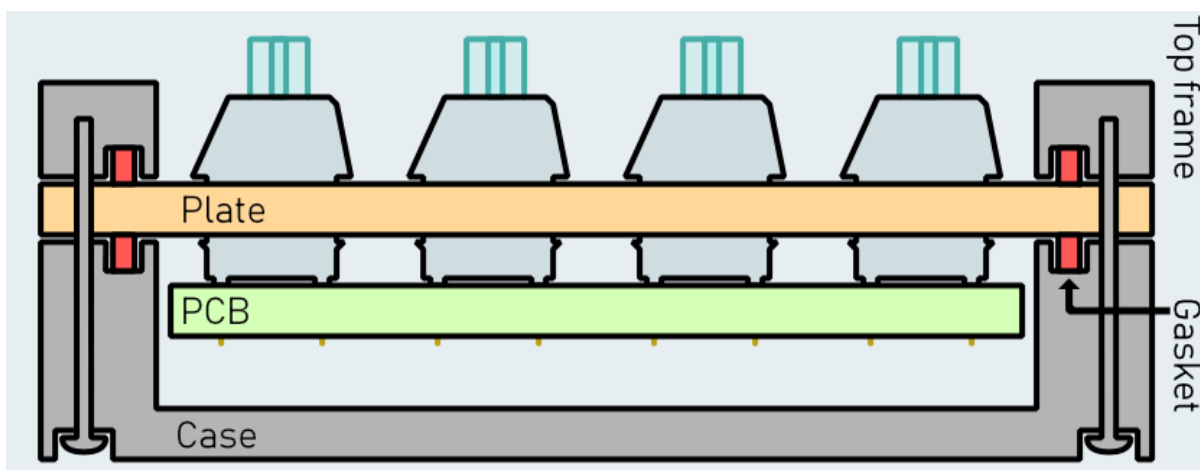


Figura 71. Montaje en gasket.

El montaje en gasket hace uso de un material amortiguante elástico que se inserta entre la carcasa. Este tipo de montaje proporciona una sensación y sonido más amortiguados y permite una mayor tolerancia en la fabricación del teclado, pero tiende a ser más caro que las alternativas.

VIII. Flex cuts

Los *flex cuts*, o cortes en relieve, son cortes realizados mayoritariamente en disposición horizontal situados entre filas de switches en las PCB y placas de montaje. Este tipo de cortes aportan una mayor flexibilidad a estos elementos al recibir fuerza incidente, pero sin embargo dificultan el diseño de la PCB debido a que el cableado vertical debe reenviarse hacia los lados.

Anexo II: Obtención y cálculo de costes

I. Mano de obra

Tabla 12. Costes de mano de obra descompuestos.

	Mecánico	Operador CNC	Ingeniero
Salario	1.200'00€	1.800'00	2.600'00€
Horas trabajadas mensuales	180	180	180
IRPF	4'0%	12'9%	12'9%
Contingencias comunes	23'6%	23'6%	23'6%
Contingencias profesionales	6'7%	6'7%	3'1%
Accidentes e incapacidades	2'0%	2'0%	2'0%
Desempleo (general)	5'5%	5'5%	5'5%
Proceso aprendizaje	0'6%	0'6%	0'6%
FOGASA	0'2%	0'2%	0'2%
Horas extra	12'0%	12'0%	12'0%
Coste extra para la empresa	511'20%	926'80€	1.245'10€
Total coste salarial	1.711'20%	2.726'80€	3.845'10€
Total coste por hora (€/h)	9'51€	15'15€	21'36€
Total coste por minuto (€/min)	0'158€	0'253€	0'356€

II. Costes energéticos

Tabla 13. Costes de potencia de instalación de diferentes máquinas.

Referencia	Máquina	Potencia (kW)
MAQ1	Corte láser	6'50
MAQ2	Estación de soldadura con estaño	0'06
MAQ3	Oficina	3'30
MAQ4	Fresadora 3 ejes	22'40
Total		32'26

La tarifa contratada con la que se obtendrá el coste energético de la maquinaria anterior según las distintas tarifas diarias será la: "Tarifa industrial para potencia superior a 15kW".



Figura 72. Franjas horarias de las distintas tarifas eléctricas.

Tabla 14. Costes energéticos

	Punta	Llano	Valle
Término de potencia (€/kW·año)	42'203054	25'601311	18'2111416
Término de energía (€/kWh)	0'120861	0'103177	0'076134
Horas diarias	4	12	8
Costes energéticos (€/kWh)		0'168082	

III. Fresado

Tabla 15. Gasto en adquisición de maquinaria de fresado.

	Gasto (€)
Fresadora	46.983'33
Transporte	616'74
Seguro riesgos laborales	975'00
Cimentación	87'84
Instalación eléctrica	72'00
Aire comprimido	3.140'00
Ventilación y extracción de gases	1.280'00
Accesorios iniciales	3.000'00
Subtotal	56.164'41

Tabla 16. Gasto en mantenimiento de maquinaria de fresado.

	Gasto (€)
Coste medio de las herramientas	25'00
Taladrina (1L)	15'00
Mantenimiento general (anual)	550'00

Este proceso precisará de un ingeniero encargado de crear un archivo CAM de la pieza. Su coste dependerá del tiempo empleado en la preparación del archivo en minutos (T_{prog}), el cual variará según la complejidad de la pieza (número de caras y de operaciones). Su coste será:

$$C_{ingeniero} = MO1 \cdot t_{prog}$$

Un técnico se encargará de preparar la máquina para la operación de fresado y será responsable de su control durante el mecanizado. Su coste dependerá del tiempo de preparación de la máquina (t_{prep}) y del tiempo de mecanizado (ambos tiempos en minutos) (t_{mec}):

$$C_{técnico} = MO3 \cdot (T_{prep} + t_{mec})$$

El gasto en material depende del precio medio las herramientas (MAT2), el número de herramientas utilizadas (N), el material utilizado (MAT1), el volumen del bruto (Vb) y el gasto en taladrina (Ct), el cual asumiremos de 6€/h.

$$C_{material} = MAT2 \cdot N + Vb \cdot MAT1 + t_{mec} \cdot Ct$$

Tomando una amortización constante lo más larga posible por ley, 8 años; y asumiendo un uso mensual de 180 horas, se obtiene una amortización de 9.525€/h (MAQ1). Conociendo la potencia de la máquina (P) y el coste de la energía eléctrica (Cel), se calcularán los costes energéticos. Además, se estimarán los gastos de mantenimiento como 3.24€/h (CMan). Los costes de la máquina serán:

$$C_{máquina} = t_{mec} \cdot (MAQ1 + CMan + P \cdot Cel)$$

Finalmente, el coste total del proceso de fresado será:

$$C_{fresado} = C_{ingeniero} + C_{técnico} + C_{material} + C_{máquina}.$$

IV. Corte láser

Tabla 17. Gasto en adquisición de cortadora láser.

	Gasto (€)
Cortadora láser	60.255'69
Transporte	650'00
Seguro riesgos laborales	975'00
Cimentación	87'84
Instalación eléctrica	72'00
Subtotal	61.952'59

Tabla 18. Gasto en mantenimiento de cortadora láser.

	Gasto (€)
Mantenimiento general (anual)	550'00

Este proceso precisará de un ingeniero encargado de crear un archivo CAM de la pieza. Su coste dependerá del tiempo empleado en la preparación del archivo en minutos (Tprog), el cual variará según la complejidad de la pieza (número de caras y de operaciones). Su coste será:

$$C_{ingeniero} = MO1 \cdot t_{prog}$$

Un técnico se encargará de preparar la máquina para la operación de corte por láser y será responsable de su control durante el proceso de corte. Su coste dependerá del tiempo de preparación de la máquina (t_{prep}) y del tiempo de corte (ambos tiempos en minutos) (t_{mec}):

$$C_{técnico} = MO3 \cdot (T_{prep} + t_{mec})$$

El gasto en material depende del material utilizado ($MAT1$) y el volumen del bruto (V_b).

$$C_{material} = V_b \cdot MAT1$$

Tomando una amortización constante lo más larga posible por ley de 8 años y asumiendo un uso mensual de 180 horas, se obtiene una amortización de 7.872€/h ($MAQ1$). Conociendo la potencia de la máquina (P) y el coste de la energía eléctrica (C_{el}), se calcularán los costes energéticos. Además, se estimarán los gastos de mantenimiento como 3.24€/h (C_{Man}). Los costes de la máquina serán:

$$C_{máquina} = t_{mec} \cdot (MAQ3 + C_{Man} + P \cdot C_{el})$$

Finalmente, el coste total del proceso de fresado será:

$$C_{corte_láser} = C_{ingeniero} + C_{técnico} + C_{material} + C_{máquina}.$$