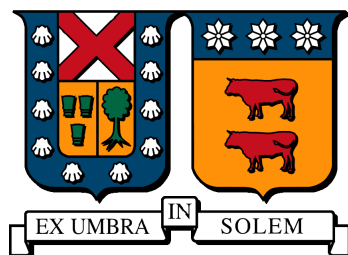


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
FRESADORA CNC PARA LA PRODUCCIÓN
DE PLACAS PCB

DIEGO ALFREDO LABARCA SANTIBÁÑEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY B.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. SHEILA LASCANO F.

Febrero 2018

Resumen

En el presente trabajo de título se realizó el diseño y construcción de una fresadora de control numérico por computador, capaz de desarrollar placas de circuito impreso o PCB, mediante mecanizado.

Siguiendo la metodología desarrollada por Morris Asimow, se divide el diseño en conceptual, configuración y detalle, agregando la etapa de manufactura. A partir de esto se obtuvo una mayor claridad en el problema a solucionar, estudiando y jerarquizando las necesidades de los potenciales usuarios, estableciendo requerimientos funcionales y realizando comparaciones entre equipos y componentes externos. Esto permitió generar diversas opciones y también encontrar la más adecuada para solucionar el problema.

Se determinaron las consideraciones estructurales para el diseño y se desarrolló el prototipo en Autodesk Inventor, luego se generaron los planos para realizar el mecanizado de las piezas en la cortadora láser y la fabricación en las impresoras 3D del Campus San Joaquín. Una vez cumplido el paso anterior, se precisó el costo total.

Finalmente se realizó la construcción del prototipo y efectuaron pruebas de mecanizado en madera y placas de cobre para comprobar su correcto funcionamiento y obtener parámetros de corte óptimos, demostrando que se cumplen todas las especificaciones de diseño y los objetivos propuestos.

Abstract

The present work shows the design and construction of a CNC milling cutter capable of developing PCB circuits boards by machining.

Following the methodology developed by Morris Asimow, design is divided into conceptual, configuration and detail, adding the manufacturing stage. From this a greater clarity was obtained in the problem to be solved, studying and prioritizing needs of potential users, establishing functional requirements and making comparisons between equipment and external components. This allowed generating various options and also finding the most appropriate solution to the problem.

The structural considerations for the design were determined and a prototype was developed in Autodesk Inventor, then plans were generated to perform machining of pieces in a laser cutter and manufacture in 3D printers in San Joaquín Campus. Once the previous step was completed, total cost was specified.

Finally, a prototype was constructed and machining tests were made on wood and copper plates to verify correct operation and obtain optimal cutting parameters, demonstrating that all design specifications and proposed objectives are met.

Lista de acrónimos

- CNC: Control numérico por computador, Computer Numerical Control.
- PCB: Placa de circuito impreso, Printed Circuit Board.
- PWM: Modulación por ancho de pulsos, Pulse Width Modulation.
- RPM: Revoluciones por minuto.
- SMD: Componente de montaje superficial, Surface Mount Device.
- SMT: Tecnología de montaje superficial, Surface Mount Technology.
- THD: Componente de montaje por agujeros, Through Hole Devices
- THT: Tecnología de montaje por agujeros, Through Hole Technology.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Lista de acrónimos	III
Índice general	VI
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Contextualización	1
1.1.1. Placas de Circuito Impreso	2
1.1.2. Fresado de placas de cobre	4
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo General	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Estructura	6
2. Diseño Conceptual	7
2.1. Necesidades del cliente	8
2.1.1. Lista de atributos	8
2.1.2. Objetivos de diseño	9
2.1.3. Restricciones	10
2.1.4. Funciones	10
2.1.5. Organización de objetivos de diseño	11
2.2. Análisis funcional	15
2.2.1. Caja negra	15
2.2.2. Caja transparente	16
2.3. Especificaciones de diseño	17

2.4.	Búsqueda externa	19
2.4.1.	Patentes	19
2.4.2.	Benchmarking	21
2.5.	Conceptos	23
2.5.1.	Brainstorming	23
2.5.2.	Carta morfológica	24
2.5.3.	Generación del concepto	26
2.6.	Selección de conceptos	39
3.	Diseño de configuración	41
3.1.	Sistema eléctrico	41
3.2.	Electrónica	42
3.3.	Componentes estándar	43
3.3.1.	Componentes especializados	47
3.4.	Controlador de motores	49
3.4.1.	Configuración	50
3.4.2.	Funciones	52
3.5.	Generador código G	54
4.	Diseño Detallado	56
4.1.	Consideraciones en estructura	56
4.1.1.	Pórtico	57
4.1.2.	Eje Z	61
4.1.3.	Base	62
4.2.	Planos	64
4.3.	Análisis de costos	65
5.	Manufactura	67
5.1.	Estructura	68
5.2.	Carros	70
5.3.	Eje Z	71
5.4.	Pórtico	75
5.5.	Base	80
5.6.	Final	85
5.7.	Componentes Electrónicos	87

6. Pruebas y Resultados	88
6.1. Pasos Previos	88
6.2. Resultados	92
6.3. Revisión de especificaciones	97
7. Conclusiones	98
7.1. Recomendaciones	100

Índice de figuras

1.1. PCB de 2 capas, se muestra diferencia entre componentes SMT y THT. Imagen no está a escala.	2
1.2. Placas de 1, 2, 3 y 4 caras con soldermask.	3
1.3. Morfología del diseño, desarrollada por Morris Asimow.	6
2.1. Modelo de caja negra.	15
2.2. Modelo de caja transparente.	16
2.3. Búsqueda de patentes.	20
2.4. Máquinas comparadas.	22
2.5. Brainstorming.	23
2.6. Diferentes tipos de estructuras, con pórtico con movimiento en 3 y 2 ejes, respectivamente.	26
2.8. Sistemas para movimiento de los ejes.	30
2.11. Programas para generar código G.	36
2.12. Tipos de controladores de motores paso a paso.	37
2.13. Fresas de grabado, punta esférica y punta plana.	38
2.14. Dibujo del prototipo con conceptos a utilizar.	40
3.1. Componentes electrónicos a utilizar.	42
3.2. Ballscrew de diámetro 16 mm, 5 mm de paso y 400 mm de largo.	43
3.3. Acople flexible, para ejes de 6 mm y 10 mm, como los usados en mo- tores NEMA23 y los husillos de bolas 1605 respectivamente.	44
3.4. Descansos BF12 y BK12.	44
3.5. Rodamiento 608-2RS, con diámetro interno de 8 mm y externo 22 mm.	45
3.6. Dremel 3000.	45
3.7. Motor paso a paso, modelo 23HS8610.	46
3.8. Dremel 3000 con el adaptador para montarlo en la máquina.	47

3.9. Base para la tuerca del husillo de bolas.	48
3.10. Función de los pines de Arduino con el software GRBL.	52
3.11. Antes y después de aplicar AutoLevel en Chilipeppr, con exageración de 50 veces en las diferencias de altura.	55
4.1. Vista lateral de estructura.	57
4.2. Vista lateral de soportes del eje X.	58
4.3. Vista lateral de soportes del eje Y.	59
4.4. Vista de los carros del eje Y.	60
4.5. Vistas frontal y lateral del eje Z.	61
4.6. Vista lateral de la base que soporta el peso del pórtico.	62
4.7. Vista lateral de la base.	63
5.1. Corte del terciado.	68
5.2. Trabajo en terciado.	68
5.3. Uniones en terciado.	69
5.4. Agujeros con taladro.	69
5.6. Enumeración de piezas del eje Z.	71
5.8. Eje Z con Dremel 3000.	74
5.9. Enumeración de piezas del pórtico.	75
5.10. Primera etapa en construcción del pórtico.	76
5.11. Soporte para carros del eje X.	77
5.12. Imágenes del pórtico.	78
5.13. Pórtico antes de montar eje Z.	78
5.14. Pórtico con eje Z en CAD.	79
5.15. Enumeración de piezas de la base.	80
5.16. Primer paso en construcción de la base.	81
5.17. Segundo paso en construcción de la base.	82
5.18. Tercer paso en construcción de la base.	83
5.19. Paso final.	84
5.20. Prototipo terminado en CAD.	85
5.21. Prototipo terminado.	86
5.22. Caja de componentes electrónicos.	87
6.1. Fresa para grabado de PCB. Vástago de 1/8" y punta de 0.2 mm y 15°. .	88
6.2. Base de placas	89

6.3. Diseño de base de placas.	89
6.4. Formas de realizar circuito.	90
6.5. Simulación de corte de placa.	91
6.6. Primera prueba, antes de mecanizar la base y sin usar la medición de altura. Fresa cilíndrica de 0.8 mm, profundidad de corte 0.2 mm.	92
6.7. Velocidad de avance = 500 mm/min y caminos de 1 mm de ancho	92
6.8. Velocidad de avance = 250 mm/min y caminos de 1 mm de ancho	93
6.9. Velocidad de avance = 80 mm/min y caminos de 0.5 mm de ancho	93
6.10. Velocidad de avance = 250 mm/min, caminos de 1 mm de ancho, 24.000 RPM, fresa de grabado de 0.1 mm.	93
6.11. PCB con SMD y THD.	94
6.12. Velocidad de avance desde izquierda a derecha: 80, 150, 250, 350, 450, 550 y 750 mm/min. 32.000 RPM. Fresa de grabado 0.3mm y 30°.	95
6.13. Velocidad de avance = 250 mm/min, caminos de 1 mm de ancho y 32.000. RPM	95

Índice de tablas

2.1. Tabla de organización de objetivos de diseño, según los tres arquetipos indicados: Seguridad, Costo y Desempeño.	11
2.2. Comparación de pesos, según los tres arquetipos de objetivos, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior.	12
2.3. Comparación de objetivos seleccionadas para seguridad, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior. .	13
2.4. Comparación de objetivos seleccionadas para costo, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior. . . .	13
2.5. Comparación de objetivos seleccionadas para desempeño, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior. .	13
2.6. Indicación de los pesos globales para los objetivos de diseño.	14
2.7. Indicaciones de los requerimientos de diseño, organizado por tipo, objetivo a cumplir y la especificación indicada.	18
2.8. Búsqueda de patentes.	19
2.9. Comparación de fresadoras CNC.	21
2.10. Carta morfológica	25
2.11. Comparación de estructuras mostradas en figura 2.6.	27
2.12. Comparación de materiales mostrados en figura 2.7.	29
2.13. Comparación de opciones mostradas en figura 2.8.	31
2.14. Comparación de guías mostradas en figura 2.9.	33
2.15. Comparación de herramientas mostradas en figura 2.10.	35
2.16. Carta morfológica con conceptos escogidos.	39
3.1. Componentes electrónicos a utilizar y voltaje necesario.	42
4.1. Costos de máquinas usadas.	65

4.2. Costos del prototipo.	66
6.1. Comparación entre objetivos pedidos y obtenidos en el prototipo.	97

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contextualización

Los proyectos relacionados con mecatrónica necesitan diversos componentes electrónicos, entre ellos se encuentran las placas de circuito impreso o PCB, las cuales son placas de fibra de vidrio de 1.5 a 3 mm de espesor, con cobre en la superficie con un espesor que va desde 35 hasta 140 micras y parte de este cobre es removido, por diversos métodos disponibles, para generar caminos que conectan eléctricamente un conjunto de componentes electrónicos.

En Chile las opciones disponibles en el mercado demoran semanas y solo se venden al por mayor [2], sin embargo, para desarrollar prototipos se requiere una cantidad muy menor.

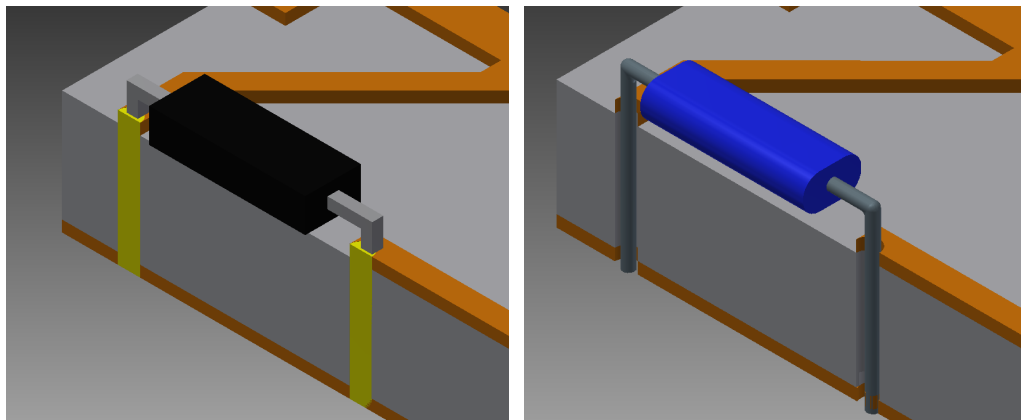
Por estas razones se decidió optar por el diseño y construcción de una máquina capaz de mecanizar estas placas. De esta forma se obtiene una solución que principalmente requiere solo de una inversión inicial, ya que luego los costos de operación corresponden únicamente a mantenimiento, herramientas y materia prima, es decir, las placas mencionadas anteriormente.

1.1.1. Placas de Circuito Impreso

Explicando en más detalle que es una PCB, es una placa de un material de baja conductividad eléctrica que cuenta con caminos de un material conductor. Con esto se busca que al montar un conjunto de componentes electrónicos se generen contactos entre estos. La placa comúnmente es de fibra de vidrio, aunque dependiendo de las propiedades necesarias, también es posible utilizar elementos de menor costo, entre ellas el más usado es un papel fenólico, más conocido como Pertinax [3]. Las desventajas que tiene este último son la menor resistencia al fuego, se transmiten mejor señales indeseadas, conocidas como ruido, son más propensos a doblarse cuando se usa más temperatura de la requerida al soldar y también la apariencia, ya que a simple vista parece de menor calidad.

El material escogido para los caminos normalmente es cobre, por su alta conductividad y bajo costo, en comparación con otros como plata o grafeno, que tienen mejor conductividad, pero un costo mayor[4].

Las PCB más simples tienen una capa de cobre en una o ambas caras. En la figura 1.1 se muestra una placa de 2 caras donde es necesario realizar agujeros y depositar cobre en ellos para tener una conexión eléctrica entre ambas caras, lo que representa el color amarillo en la imagen. Esto no es completamente obligatorio, ya que se pueden usar los mismos componentes electrónicos que se quieren conectar para unir eléctricamente ambas caras.



(a) Componente de montaje superficial o SMD (b) Componente de montaje por agujero o THD

Figura 1.1: PCB de 2 capas, se muestra diferencia entre componentes SMT y THT. Imagen no está a escala.

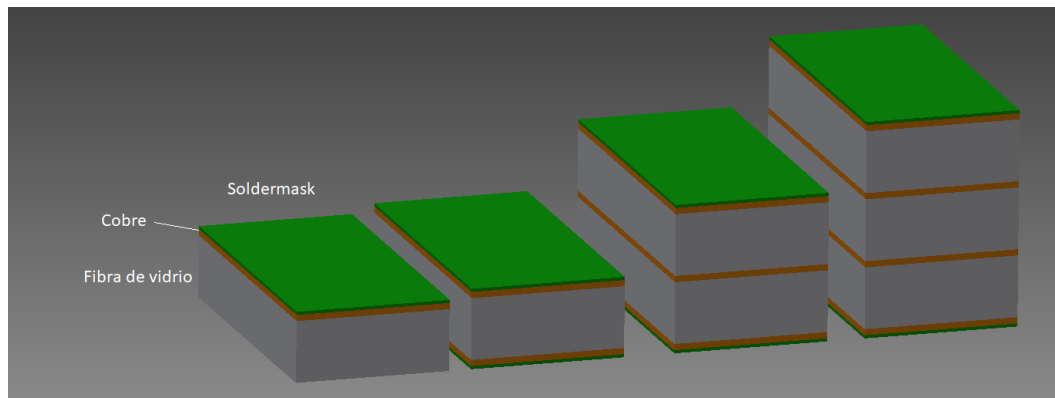


Figura 1.2: Placas de 1, 2, 3 y 4 caras con soldermask.

El cobre en la superficie de las placas está expuesto al deterioro por humedad, polvo o químicos. Si se deja sin protección, con el tiempo la placa podría quedar dañada o inutilizable[5]. Para evitar esto, se utiliza una cubierta protectora conocida como soldermask, que se deposita en la superficie antes de soldar los componentes y también es la que le entrega el color característico a la PCB, como se muestra en la figura 1.2. En este caso la cubierta es verde, pero se puede escoger en otros colores. Una segunda función es crear un aislamiento eléctrico entre la placa y el exterior.

Las normas usadas para el diseño de PCB están en la familia IPC-2220[6], que también incluyen ensamblado y control de calidad. Estas normas dividen las placas en 3 clases, determinada por la necesidad principal que deben cumplir y con esto también, la vida útil esperada. En clase 1 se encuentran las que se utilizan con juguetes baratos, por ejemplo, donde no se busca una larga vida útil y lo primordial es tener un bajo costo. En cambio, en clase 3 se espera que el producto funcione un prolongado tiempo y el costo no es un aspecto tan importante.

En la fabricación de PCB en bajas cantidades y sin máquinas de nivel industrial, uno de los métodos más comunes es el fresado químico. Se busca corroer el cobre que no se necesita de la superficie de la placa, mediante el ácido producido de una reacción química entre cloruro férrico y agua. Las principales desventajas corresponden a la seguridad, los químicos generados son corrosivos[7], por lo que se debe tratar con cuidado y no deben estar en contacto con ojos o piel, ni ser inhalados o ingeridos. Estos químicos no pueden ser desechados en el alcantarillado, según las normas chilenas NCh 382, NCh 2190 y DS 298 [8].

1.1.2. Fresado de placas de cobre

En el fresado se remueve cobre de las placas para generar caminos, puntos de conexión y agujeros. La calidad del fresado depende principalmente de la velocidad de corte y geometría de la fresa.

En cobre se busca tener una velocidad de corte entre 100 y 300 metros por minuto [9, 10]. Para el cálculo de esta velocidad se utiliza la ecuación 1.1, donde N son las RPM de la herramienta y D es diámetro de la fresa en milímetros.

$$V_c = \frac{D * \pi * N}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (1.1)$$

Con el objetivo de ocupar el menor espacio posible creando los caminos y manteniendo la seguridad de que no se creen conexiones indeseadas entre ellos, se utilizan fresas con diámetros que van desde 0.1 hasta 0.3 mm para voltajes menores a 30 v[6], por esta razón en la industria se utilizan herramientas capaces de girar a más de 100.000 RPM[11]. Como ejemplo, para una fresa de 0.3 mm, se necesitan 106.157 RPM para llegar a una velocidad de corte de 100 metros por minuto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir una máquina fresadora CNC con movimiento en 3 ejes, que permita desarrollar placas de circuito impreso, lo que disminuirá los costos y tiempos requeridos para obtenerlas.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Establecer los requerimientos funcionales para la fabricación de placas de circuito impreso mediante mecanizado.
2. Generar la arquitectura de la máquina teniendo en cuenta componentes estándar y comerciales.
3. Proponer el diseño de un prototipo basado en los requerimientos funcionales ya establecidos.
4. Desarrollar un prototipo funcional de la máquina.

1.3. Estructura

Se detalla la metodología usada para el diseño de una fresadora CNC capaz de mecanizar placas de circuito impreso. Utilizando los pasos mostrados, se logra un modelo funcional, seguro, confiable y competitivo que es posible construir.

El diseño se utiliza para encontrar soluciones a problemas no resueltos o nuevas formas de enfrentar a los que ya tienen solución. Es un proceso iterativo, en el que se deben tomar decisiones con o sin la información completa, a medida que se obtienen más datos, es posible volver atrás y hacer los ajustes necesarios. Este trabajo sigue el método de diseño definido por Morris Asimow [1], él explica que existen 7 pasos necesarios para el desarrollo de un producto, que se muestra en la figura 1.3, pero en este caso se usarán los 4 primeros, ya que los demás no resultan necesarios para conseguir el objetivo buscado en este trabajo.

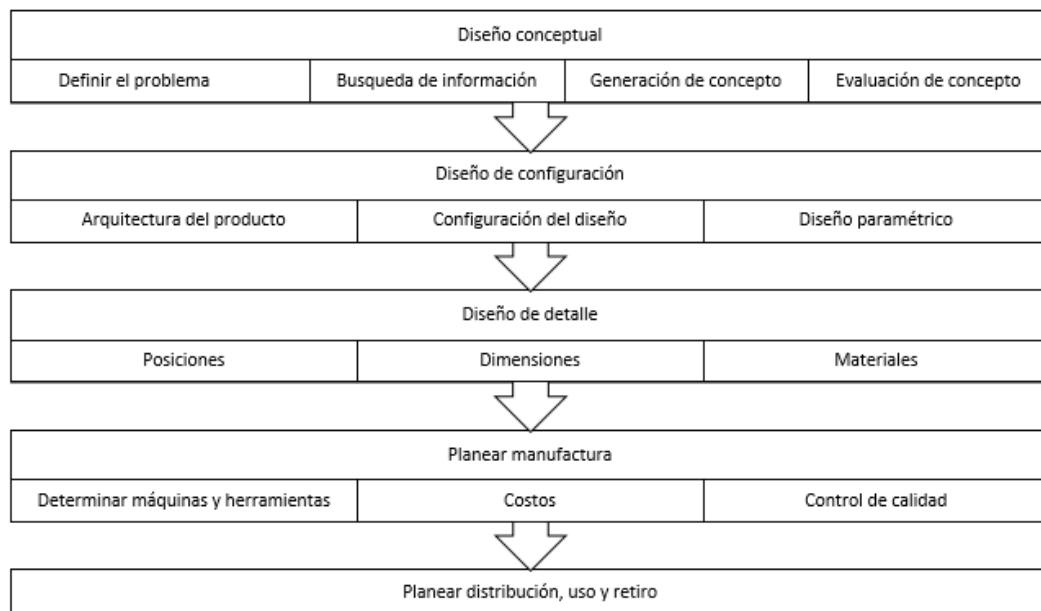


Figura 1.3: Morfología del diseño, desarrollada por Morris Asimow.

Capítulo 2

Diseño Conceptual

En este capítulo se desarrollan ideas para encontrar soluciones al problema planteado. Para esto se siguen los siguientes pasos:

- Necesidades del cliente: Se crea una lista con lo que busca el cliente, luego se divide en objetivos, funciones y restricciones.
- Análisis funcional: Se determinan las funciones que debe realizar el prototipo para cumplir los objetivos, se definen las especificaciones necesarias y se comparan con equipos externos.
- Conceptualización: Generar conceptos de diseño que cumplan las necesidades del cliente a partir de la información obtenida.

2.1. Necesidades del cliente

En la realización de un diseño correcto, que cumpla con los objetivos propuestos, es necesario analizar las necesidades que tendrán los usuarios. Se realiza una lista con estas necesidades y luego se dividen en objetivos de diseño, restricciones y funciones, para luego diferenciar las necesidades más importantes y poder enfocar el diseño en cumplir estas, aunque sin olvidar las menos importantes.

2.1.1. Lista de atributos

1. Fresar placas de cobre.
2. Marcar distintos materiales.
3. Alta rigidez estructural.
4. Tamaño de corte mínimo de 200x200x50 mm.
5. Tamaño de máquina máximo de 850x850x850 mm.
6. Peso máximo de 25 Kg.
7. Fácil de transportar.
8. Piezas o componentes reemplazables.
9. Bajo costo de fabricación.
10. Fácil fabricación.
11. Movimiento independiente en los 3 ejes.
12. Movimiento rápido.
13. Alta precisión en el movimiento.
14. Alta eficiencia para el movimiento.
15. Usa rodamientos sellados.
16. Ocupar poco espacio para la sujeción de piezas.
17. Volver a una posición de seguridad en caso de fallas.
18. Componentes electrónicos alejados del área de corte.
19. Ventilación para componentes electrónicos.
20. Utiliza software gratuito.

21. Quita energía a la máquina con un botón.
22. Quita energía automáticamente en caso de sobrepasar límites de mesa de corte.
23. Bajo tiempo de ajuste.
24. Trabaja a una temperatura ambiente mayor a 25 °C.
25. Usa cable USB.
26. Usar tornillo de bolas.
27. Alimentación de energía 220V.
28. Área de trabajo fija.
29. Herramienta con RPM variables.
30. Herramienta con altas RPM máximas.
31. Generar código G a partir de diseño de PCB.

2.1.2. Objetivos de diseño

1. Alta rigidez estructural.
2. Fácil de transportar.
3. Piezas o componentes reemplazables.
4. Bajo costo de fabricación.
5. Fácil fabricación.
6. Movimiento rápido.
7. Alta precisión en el movimiento.
8. Alta eficiencia para el movimiento.
9. Usa rodamientos sellados.
10. Utiliza software gratuito.
11. Quita energía a la máquina con un botón.
12. Quita energía automáticamente en caso de sobrepasar límites de mesa de corte.
13. Usa cable USB.
14. Usa tornillo de bolas.
15. Ocupa poco espacio para la sujeción de piezas.

16. Componentes electrónicos alejados del área de corte.
17. Ventilación para componentes electrónicos.
18. Bajo tiempo de ajuste.
19. Área de trabajo fija.
20. Herramienta con RPM variables.
21. Herramienta con altas RPM máximas.

2.1.3. Restricciones

1. Tamaño de corte mínimo de 200x200x50 mm.
2. Tamaño de máquina máximo de 850x850x850 mm.
3. Peso máximo de 25 Kg.
4. Movimiento independiente en los 3 ejes.
5. Trabaja a una temperatura ambiente mayor a 25 °C.
6. Alimentación de energía 220V.

2.1.4. Funciones

1. Fresar placas de cobre.
2. Marcar distintos materiales.
3. Volver a una posición de seguridad en caso de fallas.
4. Generar código G a partir de diseño de PCB.

2.1.5. Organización de objetivos de diseño

En la tabla 2.1 se ordenan los objetivos de diseño en cuatro tipos, se puede ver que la mayoría están relacionados con desempeño, en cambio apariencia solo tiene un objetivo.

Tabla 2.1: Tabla de organización de objetivos de diseño, según los tres arquetipos indicados: Seguridad, Costo y Desempeño.

Seguridad	Costo	Desempeño
1.1 Fácil de transportar	2.1 Bajo costo de fabricación	3.1 Alta rigidez estructural
1.2 Quita energía a la máquina con un botón	2.2 Fácil fabricación	3.2 Piezas o componentes reemplazables.
1.3 Quita energía en caso de sobrepasar límites de mesa de corte.	2.3 Alta eficiencia para el movimiento	3.3 Movimiento rápido
1.4 Componentes electrónicos alejados del área de corte	2.4 Utiliza software gratuito	3.4 Alta precisión en el movimiento
1.5 Ventilación para componentes electrónicos	2.5 Usa tornillo de bolas	3.5 Usa rodamientos sellados
1.6 Área de trabajo fija	2.6 Bajo tiempo de ajuste	3.6 Usa cable USB 3.7 Ocupar poco espacio para la sujeción de piezas 3.8 Herramienta con RPM variables 3.9 Herramienta con altas RPM máximas

Se compara la importancia de los tres arquetipos en la tabla 2.2, para calcular el peso de cada uno. Se nota que seguridad es el que tiene mayor peso, al ser 60 %, luego están costo y desempeño con 20 %.

Tabla 2.2: Comparación de pesos, según los tres arquetipos de objetivos, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior.

Comparación	Seguridad	Costo	Desempeño	Suma Fila	Peso
Seguridad	1,00	3,00	3,00	7,00	60,00 %
Costo	0,33	1,00	1,00	2,33	20,00 %
Desempeño	0,33	1,00	1,00	2,33	20,00 %
			Total	11,67	100,00 %

En las tablas 2.3, 2.4 y 2.5 se analizan los objetivos relacionados con seguridad, costo y desempeño, respectivamente. Los códigos de cada objetivo se muestran en la tabla 2.1.

Con estos datos también se realiza la tabla 2.6, donde se muestra el peso de cada objetivo en relación con el total. También se incluyen las restricciones y se ubican en el tipo que corresponde.

Tabla 2.3: Comparación de objetivos seleccionadas para seguridad, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior.

Seguridad	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	Suma Fila	Peso	Global
1.1	1,00	0,25	0,20	0,33	0,33	0,25	2,37	5 %	2,81 %
1.2	4,00	1,00	1,00	3,00	2,00	0,80	11,80	23 %	14,00 %
1.3	5,00	1,00	1,00	3,00	2,00	0,80	12,80	25 %	15,19 %
1.4	3,00	0,33	0,33	1,00	0,67	0,70	6,03	12 %	7,16 %
1.5	3,00	0,50	0,50	1,50	1,00	0,70	7,20	14 %	8,54 %
1.6	4,00	1,25	1,25	1,43	1,43	1,00	10,36	20 %	12,29 %
Total							50,56	100 %	60,00 %

Tabla 2.4: Comparación de objetivos seleccionadas para costo, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior.

Costo	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	Suma Fila	Peso	Global
2.1	1,00	1,00	3,00	2,00	2,00	7,00	16,00	27 %	5,40 %
2.2	1,00	1,00	3,00	2,00	1,00	7,00	15,00	25 %	5,06 %
2.3	0,33	0,33	1,00	0,50	0,50	3,00	5,67	10 %	1,91 %
2.4	0,50	0,50	2,00	1,00	0,75	5,00	9,75	16 %	3,29 %
2.5	0,50	1,00	2,00	1,33	1,00	5,00	10,83	18 %	3,66 %
2.6	0,14	0,14	0,33	0,20	0,20	1,00	2,02	3 %	0,68 %
Total							59,27	100 %	20,00 %

Tabla 2.5: Comparación de objetivos seleccionadas para desempeño, se identifica por los elementos de la izquierda por sobre los de la columna superior.

Desempeño	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	Suma Fila	Peso	Global
3.1	1,00	3,00	3,00	1,00	2,00	3,00	5,00	3,00	2,00	23,00	26 %	5,22 %
3.2	0,33	1,00	0,50	0,20	0,33	0,33	2,00	0,50	0,50	5,70	6 %	1,29 %
3.3	0,33	2,00	1,00	0,50	1,00	1,20	2,00	1,00	1,00	10,03	11 %	2,28 %
3.4	1,00	5,00	2,00	1,00	3,00	3,00	7,00	3,00	3,00	28,00	32 %	6,36 %
3.5	0,50	3,00	1,00	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	10,83	12 %	2,46 %
3.6	0,33	3,00	0,83	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	10,50	12 %	2,38 %
3.7	0,20	0,50	0,50	0,14	0,50	0,50	1,00	0,50	0,50	4,34	5 %	0,99 %
3.8	0,33	2,00	1,00	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	9,67	11 %	2,20 %
3.9	0,50	2,00	1,00	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	9,83	11 %	2,23 %
Total										88,07	100 %	20,00 %

De la tabla 2.6 es posible observar que el objetivo que tiene mayor importancia es quitar la energía en caso de sobrepasar los límites de la mesa de corte, con 15,19 %. Esto se debe a que si la energía a los motores no se corta, se pueden quemar al colisionar contra la estructura o ejes.

Tabla 2.6: Indicación de los pesos globales para los objetivos de diseño.

Seguridad	Costo	Desempeño
1.1 Fácil de transportar 2,81 %	2.1 Bajo costo de fabricación 5,40 %	3.1 Alta rigidez estructural 5,22 %
1.2 Quitar energía a la máquina con un botón 14,00 %	2.2 Fácil fabricación 5,06 %	3.2 Piezas o componentes reemplazables. 1,29 %
1.3 Quitar energía en caso de sobrepasar límites de mesa de corte. 15,19 %	2.3 Alta eficiencia para el movimiento 1,91 %	3.3 Movimiento rápido 2,28 %
1.4 Comp. electrónicos alejados del área de corte 7,16 %	2.4 Utiliza software gratuito 3,29 %	3.4 Alta precisión en el movimiento 6,36 %
1.5 Ventilación para componentes electrónicos 8,54 %	2.5 Usa tornillo de bolas 3,66 %	3.5 Usa rodamientos sellados 2,46 %
1.6 Área de trabajo fija 12,29 %	2.6 Bajo tiempo de ajuste 0,68 %	3.6 Usa cable USB 2,38 % 3.5 Ocupar poco espacio para la sujeción de piezas 0,99 % 3.8 Herramienta con RPM variables 2,20 % 3.6 Herramienta con altas RPM máximas 2,23 %

2.2. Análisis funcional

2.2.1. Caja negra

Se muestran cuales son los flujos de entrada y salida del sistema, es decir, lo que recibe y lo que produce. La máquina toma energía eléctrica, placas e información para mover los motores. Produce placas fresadas, viruta de cobre, fibra de vidrio y aserrín de la base de madera donde se ubica la placa a fresar. Mientras está trabajando, el sistema muestra información del mecanizado en la pantalla.

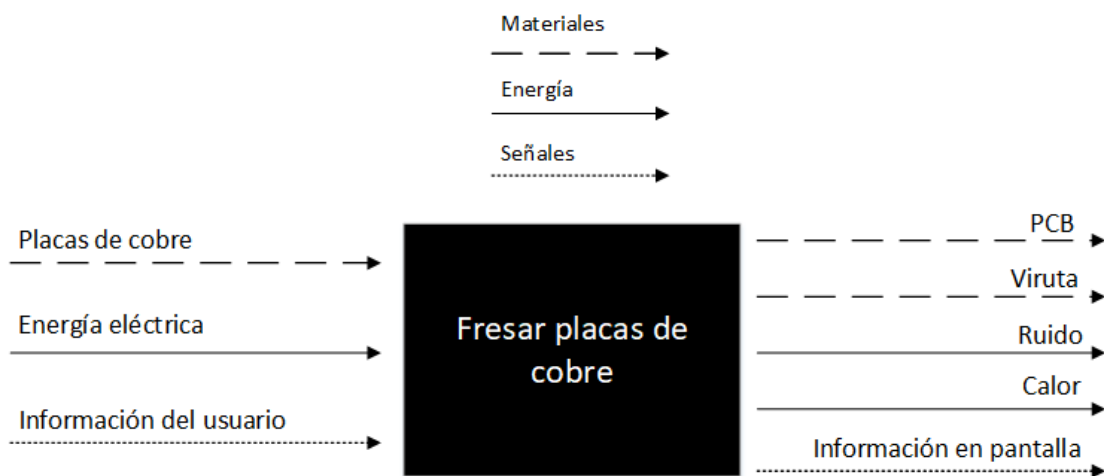


Figura 2.1: Modelo de caja negra.

2.2.2. Caja transparente

Este modelo es más completo que el anterior, en la figura 2.2 se muestra lo que pasa dentro de la caja negra y se detallan las entradas y salidas.

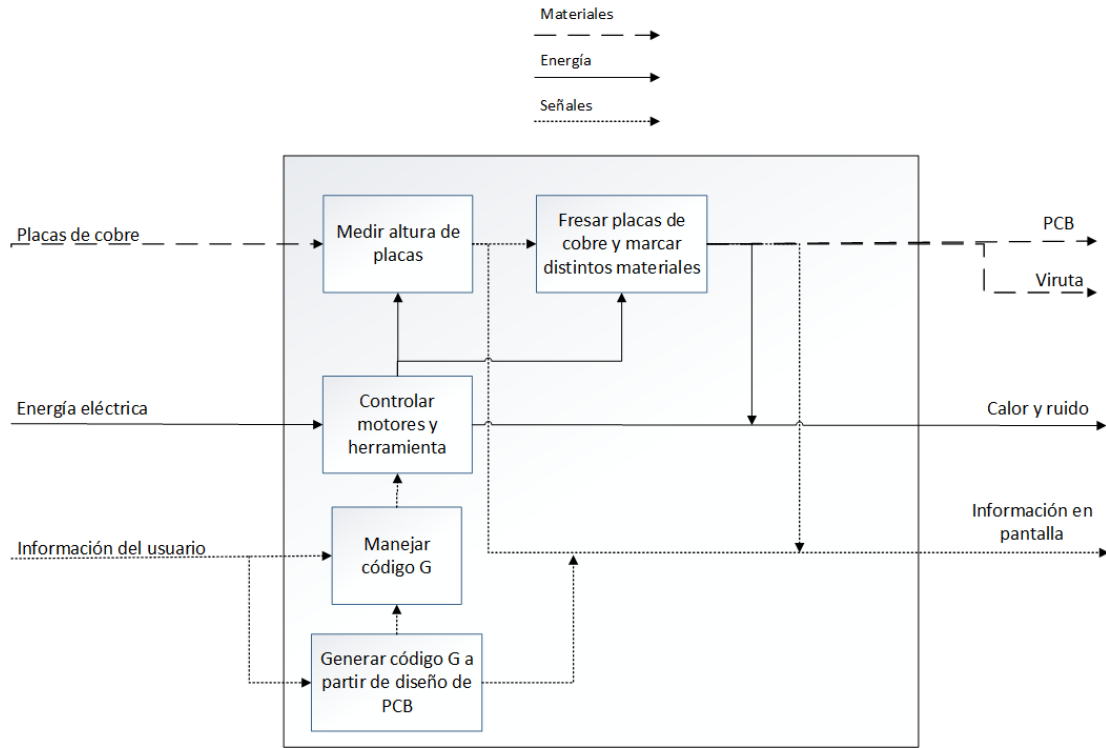


Figura 2.2: Modelo de caja transparente.

2.3. Especificaciones de diseño

En la tabla 2.7 se muestran las especificaciones que debe tener el diseño. Estas pueden ser solicitadas por el cliente o propuestas por el diseñador para asegurar que el equipo cumpla las funciones que se requiere.

Las dos primeras no son estrictamente necesarias, ya que, si no se cumple con la velocidad mínima, de igual forma se pueden realizar las funciones, aunque los tiempos aumentarían.

En temas de seguridad se incluye soportar una temperatura ambiente mayor a 25 °C, esto es necesario, ya que los componentes electrónicos generan calor durante el funcionamiento y si llegan a cierta temperatura se apagan automáticamente, en este caso sería necesario realizar el fresado nuevamente desde el principio.

El botón de emergencia es obligatorio porque siempre puede haber accidentes. Los programas existentes cuentan con esta función, pero en caso de emergencia, es más fácil y rápido presionar un botón que usar el mouse para hacerlo en el programa.

La viruta de cobre puede generar conexiones involuntarias al estar en contacto con componentes electrónicos, por lo que es indispensable tomar esto como una prioridad. Solo es recomendable utilizar rodamientos sellados, para evitar el contacto con la viruta y que sufran más desgaste de lo normal.

Para disminuir costos, se prefiere utilizar software gratuito y el límite que existe para la fabricación está determinado por los fondos obtenidos.

La primera especificación de dimensión está para asegurar que las piezas de la máquina puedan ser fabricadas en la cortadora láser del Campus. El tamaño de corte máximo es- ta dado por el largo de los tornillos de bolas con que se cuenta y también por el tamaño máximo de las placas que se venden en Chile.

Finalmente se incluye un peso máximo para que no sea necesario ubicarla en un lugar especial para utilizarla y que pueda ser transportada por una persona sin ayuda.

Tabla 2.7: Indicaciones de los requerimientos de diseño, organizado por tipo, objetivo a cumplir y la especificación indicada.

Tipo	Objetivo	Especificación
Movimiento	Alta velocidad de desplazamiento en vacío	Velocidad mínima 700 mm/min.
	Alta velocidad de desplazamiento en corte	Velocidad mínima 500 mm/min.
Seguridad	Poder trabajar en verano	Soportar temperatura ambiente sobre 25 °C.
	Poder parar operación inmediatamente	300 ms con botón de emergencia.
	Evitar cortocircuito	Componentes electrónicos en ubicación cerrada. IP20.
	Evitar contacto entre rodamientos y viruta	Utilizar rodamientos sellados.
Costos	Bajo costo de software	Utilizar software gratuito.
	Bajo costo de fabricación	Costo de fabricación máximo \$600.000.
Dimensión	Tamaño de cada pieza	Dimensiones máximas 600x600x10 mm.
	Gran tamaño de corte	Tamaño de corte mínimo de 200x200x50 mm.
	Bajo peso	Peso máximo de 25 Kg.

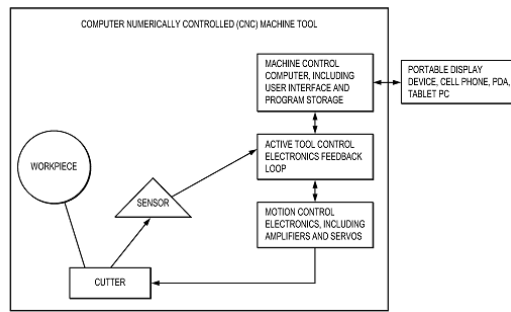
2.4. Búsqueda externa

2.4.1. Patentes

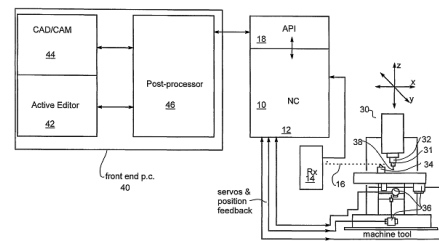
Se realiza una búsqueda de patentes para no caer en copias de material intelectual y para ayudar a orientar el diseño hacia mecanismos mejorados. En la tabla 2.8 se muestran las patentes encontradas y en la figura 2.3 las imágenes correspondientes.

Tabla 2.8: Búsqueda de patentes.

Función	Patente	Descripción
Control de movimiento	US 8136432 B2	Medición en tiempo real de las propiedades operacionales de la herramienta
Operaciones auxiliares	US 8195310 B2	Agregar operaciones auxiliares durante los procedimientos
Generación de código	US 6112133 A	Sistema visual para generar programa CNC en superficies planas y curvas
Husillo de bolas	US 3667311 A	Husillo de bolas recirculantes con lubricación mejorada para prevenir contaminación



(a) Control de movimiento



(b) Operaciones auxiliares

U.S. Patent Aug. 29, 2000 Sheet 1 of 14 6,112,133

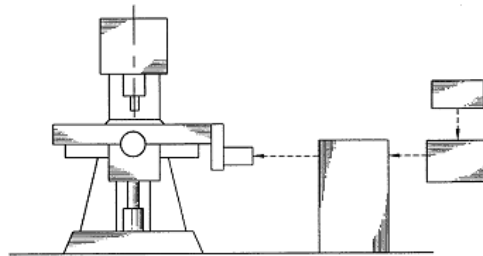


FIG. 1a

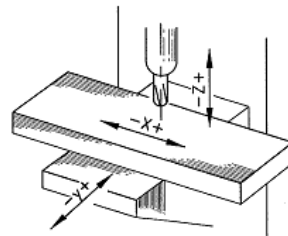
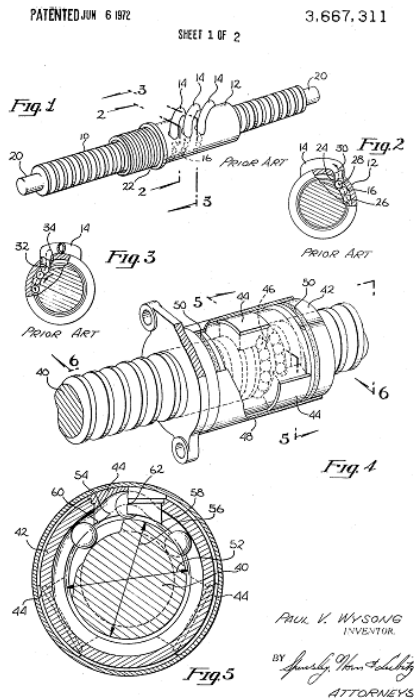


FIG. 1b



(d) Husillo de bolas

(c) Generación de código

Figura 2.3: Búsqueda de patentes.

2.4.2. Benchmarking

El objetivo del benchmarking es comparar el producto que se está diseñando, con máquinas que están a la venta en el mercado. No fue posible encontrar aparatos en el comercio chileno, solo existen importadoras que traen estas máquinas desde otros países, por lo que la siguiente comparación también incluye mercados extranjeros.

En la tabla 2.9 se encuentra el benchmarking con 4 máquinas (figura 2.4), pero es importante notar que al traer equipos de este tipo desde otro país, se deben incluir los costos de envío, impuestos y desaduanamiento, lo que aumenta los gastos de adquisición en al menos el 30 % [12].

La máquina CNC3040 puede trabajar en distintos materiales. El nombre es genérico y está relacionado con el área de trabajo, por lo que es posible encontrar otras con el mismo nombre, fabricadas por distintas empresas y con diferentes especificaciones, pero la que se muestra acá es la más común. A diferencia de la anterior, las máquinas Othermill Pro y Cirquoid están diseñadas específicamente para el fresado de PCB.

Tabla 2.9: Comparación de fresadoras CNC.

Nombre	En diseño	CNC3040	Othermill Pro	Cirquoid
Precio (pesos)	600.000	820.000	2.200.000	1.900.000
País de fabricación	Chile	China	Estados Unidos	Letonia
Material	Terciado	Aluminio	Aluminio y plástico	Aluminio
Volumen de trabajo (mm)	200x200x50	280x390x55	140x114x40.6	160x100x20
RPM máxima	32.000	11.000	26.000	30.000
Velocidad en vacío (mm/min)	700	3.500	2.600	1.000
Transmisión de movimiento	Tornillo de bolas	Tornillo trapezoidal	Tornillo trapezoidal	Tornillo de bolas
Transmisión de información	USB	Puerto paralelo	USB	USB
Peso (kg)	25	28	8	14

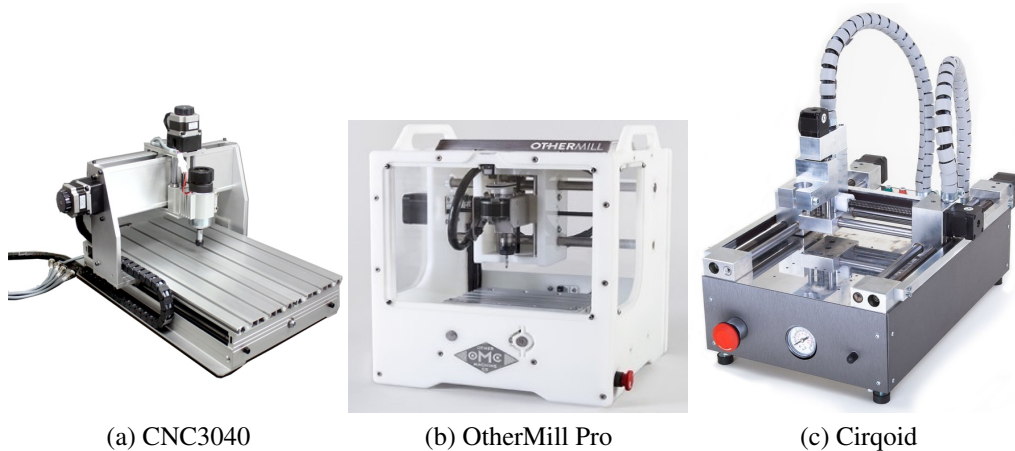


Figura 2.4: Máquinas comparadas.

En la tabla 2.9 se muestra que las máquinas de Letonia y Estados Unidos son 3 veces más caras, sin incluir los costos de envío mencionados anteriormente. Solo el equipo de fabricación china se acerca al precio esperado de la máquina en diseño, aunque es el único que utiliza un puerto paralelo, es necesario también comprar un computador específico para ocuparlo, ya que los computadores en los últimos años no cuentan con esta conexión.

Se busca usar fresas de menos de 1 mm de diámetro, por lo que las RPM deben tener un valor mayor a 28.000 [13]. Solo la máquina china no cumple, según la recomendación debiera usar fresas de 1/8" de diámetro, obligando a realizar PCB con espacios entre las pistas más grandes a los necesarios [14] y tampoco se podrían usar componentes electrónicos estándar.

La velocidad buscada en el prototipo es menor a la del resto, los movimientos en vacío serán notoriamente más lentos, pero durante el corte es cercana a lo recomendado [15], aunque de todas formas es necesario realizar pruebas para encontrar la velocidad de avance correcta y determinar la velocidad máxima en vacío.

El peso esperado de la máquina es mayor al resto, lo que en parte está relacionado con el volumen de trabajo. Las máquinas Othermill Pro y Cirqoid pesan menos de la mitad, pero de todas formas cumple el requerimiento de poder ser transportada por 1 persona.

2.5. Conceptos

2.5.1. Brainstorming

Lo que se busca en este trabajo es crear una máquina capaz de fresar PCB, pero hay distintas formas para llegar a cumplir esto. El objetivo del brainstorming es buscar nuevas ideas para cada sistema de la máquina, como se ve en la figura 2.5 y en los pasos siguientes poder determinar cual es la que mejor cumple la función requerida.

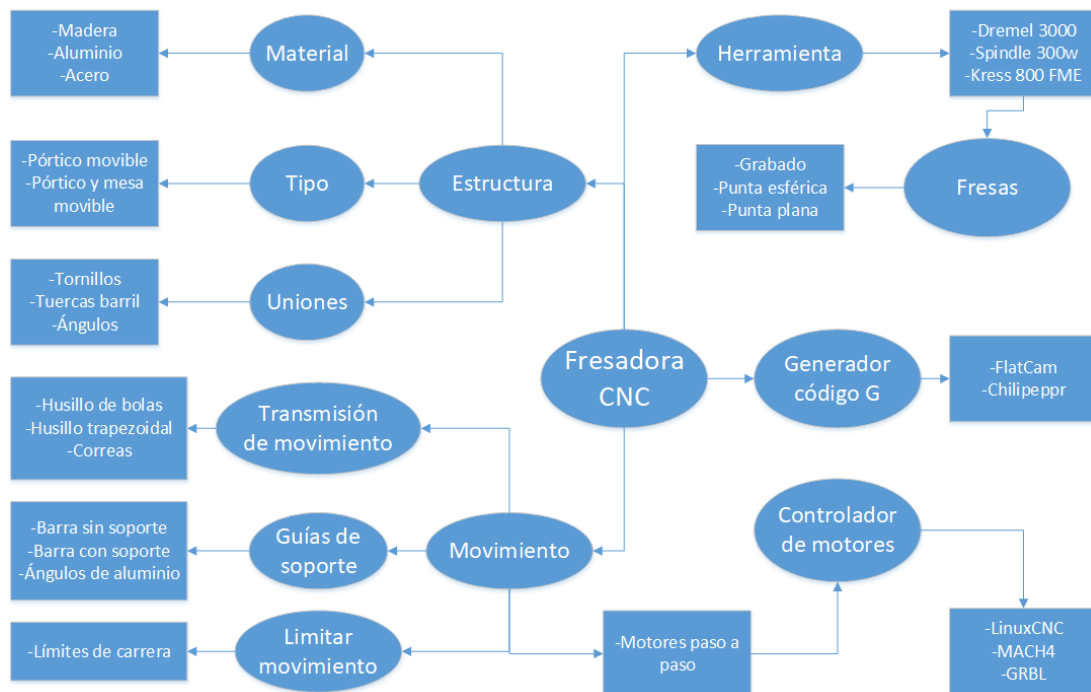
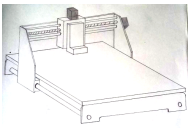
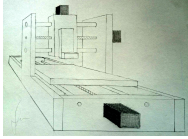
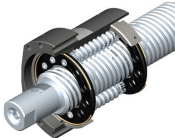
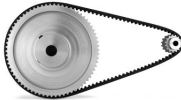
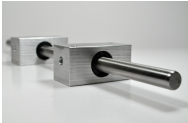
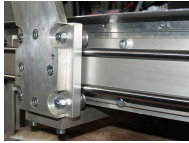


Figura 2.5: Brainstorming.

2.5.2. Carta morfológica

Se toman las ideas del paso anterior y se crea la tabla 2.10. Se muestra que existen distintas alternativas para cada sistema, aunque algunas no se pueden cumplir, ya que van en contra de lo que quiere el cliente, de todas formas se incluyen para ayudar en el proceso creativo.

Tabla 2.10: Carta morfológica

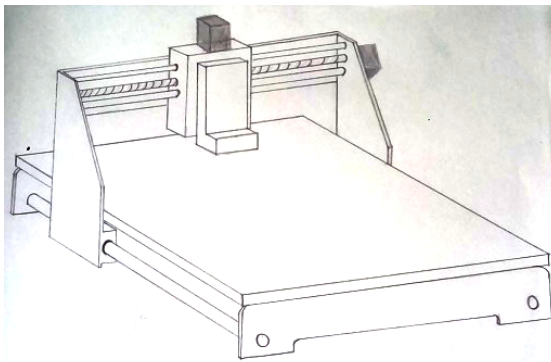
Función	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4
Tipo de estructura	Pórtico movible 	Mesa y pórtico movibles 		
Material	Aluminio	Madera	Acero	Acrílico
Transmisión de movimiento	Husillo de bolas 	Husillo Trapezoidal 	Correas 	Cadenas 
Guías para soporte	Barra sin soporte 	Barra con soporte 	Ángulos de aluminio 	Perfiles de aluminio 
Herramienta	Dremel 3000/4000 	Spindle 300w 	Kress 800 FME 	Spindle 1.5kw 
Generador código G	FlatCam	ChiliPepr	PCB-gcode	
Controlador de motores	LinuxCNC	MACH4	GRBL	
Fresas	Grabado 	Esférica 	Plana 	

2.5.3. Generación del concepto

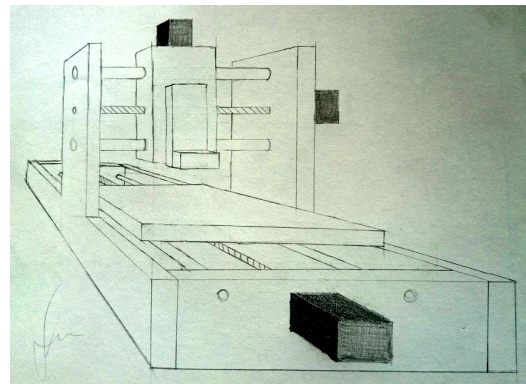
En este paso, se explican en más detalle los sistemas o componentes nombrados anteriormente. Se evalúa cada concepto con puntuación de 1 a 5, en base a los objetivos de diseño que estén relacionados. Se elige la opción con mayor puntaje en cada tabla, aunque en algunos casos aplican restricciones del cliente que se deben cumplir, sin importar la puntuación.

Tipo de estructura

En la figura 2.6 se puede ver que se estudiaron 2 tipos de estructuras principalmente. La primera cuenta con una base fija y un pórtico movable, que puede moverse libremente en los 3 ejes. En la segunda, la mesa, donde se ubica la pieza a cortar, se mueve en un eje y el pórtico en los 2 restantes.



(a) Mesa fija y pórtico movable



(b) Pórtico estático y mesa movable

Figura 2.6: Diferentes tipos de estructuras, con pórtico con movimiento en 3 y 2 ejes, respectivamente.

Tabla 2.11: Comparación de estructuras mostradas en figura 2.6.

Objetivo	Opción A	Opción B
Alta rigidez de estructura	4	5
Portátil	5	5
Modificable	5	3
Bajo costo de fabricación	5	5
Fácil fabricación	5	5
Área de trabajo fija	5	1
Total	29	24

Como se ve en la tabla 2.11, en ambas opciones se cumplen los objetivos de forma semejante. La primera diferencia está en la rigidez de la estructura, la opción B es más rígida porque el pórtico, donde está el mayor peso, está fijo y no siempre en movimiento como en la primera opción.

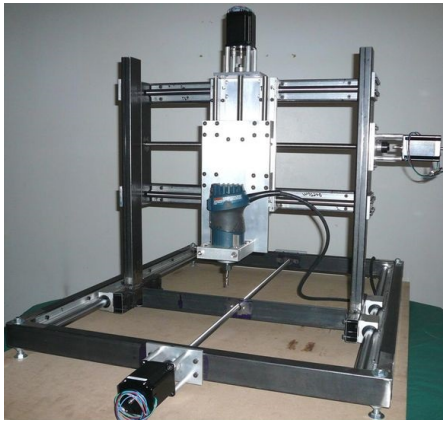
En la segunda opción el pórtico es parte de la estructura de la máquina, en caso de fallas o de querer cambiar levemente el diseño, es necesario reemplazar la pieza completa. Al ser solo 1 pieza, es más complicado fabricarla que 2 piezas simples, por temas de espacio, ya que se usará una cortadora láser con tamaño limitado.

Finalmente, en la opción B, a medida que se trabaja en los extremos, la mesa sale de la estructura, lo que podría provocar accidentes si el operador no está atento a lo que está ocurriendo o si la máquina está en una ubicación en que no tiene espacio libre para este desplazamiento.

Por estas razones se elige la opción A, con mesa fija y pórtico movable.

Material de estructura

Se analizaron 3 materiales distintos para la estructura, como se ve en la figura 2.7. Uno de los requerimientos del cliente es usar madera, pero de todas formas se realiza una comparación y se muestran los resultados.



(a) Aluminio



(b) Madera



(c) Acero

Figura 2.7: Máquinas con distintos materiales para la estructura.

Tabla 2.12: Comparación de materiales mostrados en figura 2.7.

Objetivo	Opción A	Opción B	Opción C
Alta rigidez de estructura	4	3	5
Modificable	3	5	2
Bajo costo de fabricación	3	5	1
Fácil fabricación	3	5	1
Total	16	18	9

El material más fácil para trabajar es madera, ya que se puede ocupar la cortadora láser del Campus, en cambio, aluminio y acero requieren aparatos más específicos que solo pueden ser encontrados en un taller, lo que aumenta los costos y tiempos de fabricación. Esto también impide que se puedan hacer cambios rápidos a la máquina.

El material que se elige es madera principalmente porque es uno de los requerimientos del cliente y también es la alternativa más fácil para trabajar. A pesar de tener la menor rigidez, se puede cumplir con las funciones pedidas, debido a los bajos esfuerzos generados durante el corte de placas de cobre.

Transmisión de movimiento

Para generar el movimiento de los ejes se consideran 3 alternativas. Como se aprecia en la figura 2.8, la primera consiste en un husillo de bolas. La segunda opción es un husillo trapezoidal y la tercera es un sistema similar a los usados en impresoras 3D, con correas y poleas.

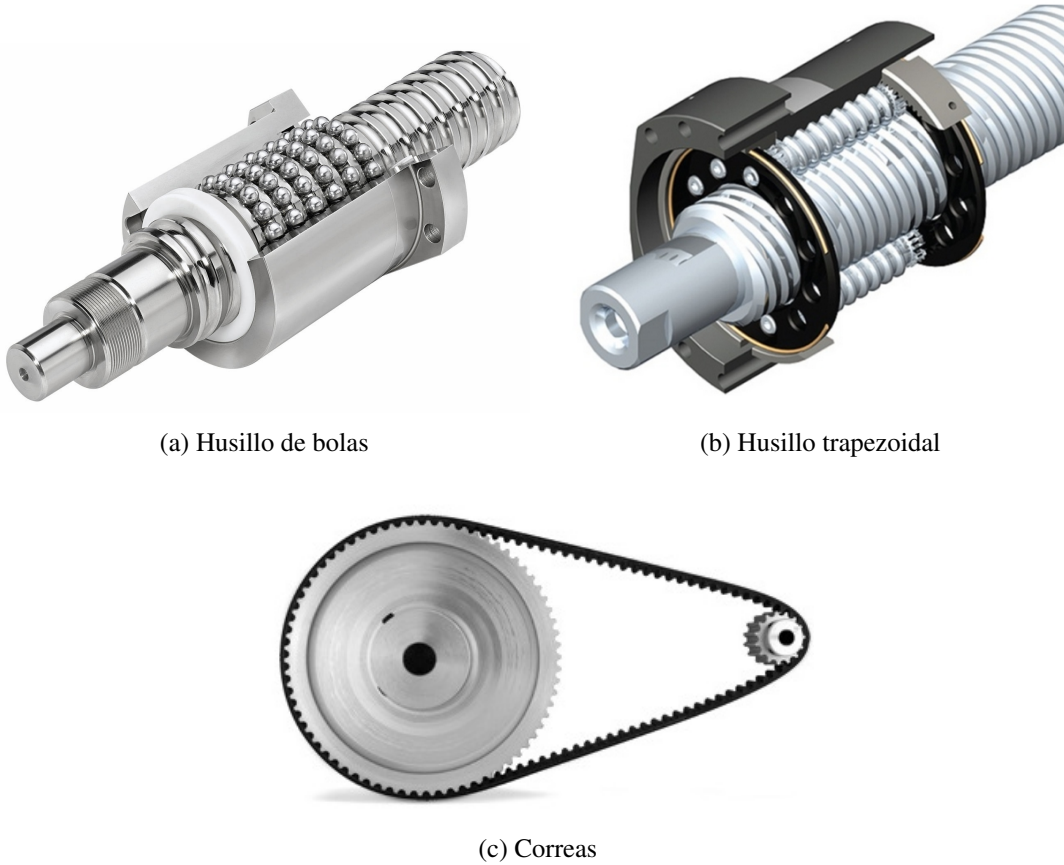


Figura 2.8: Sistemas para movimiento de los ejes.

Tabla 2.13: Comparación de opciones mostradas en figura 2.8.

Objetivo	Opción A	Opción B	Opción C
Bajo costo de fabricación	4	5	2
Movimiento rápido	3	3	5
Alta precisión en el movimiento	5	4	5
Alta eficiencia para el movimiento	5	3	5
Total	17	15	17

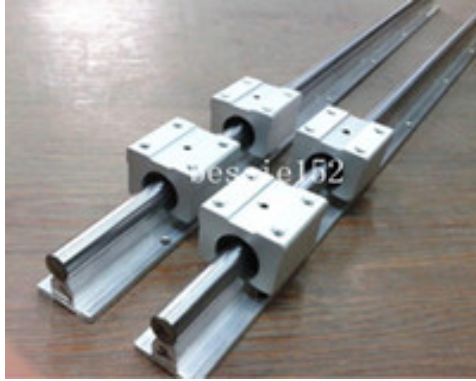
La opción de correas es la que puede operar a mayor velocidad, como se puede ver en las impresoras 3D, pero las que se necesitan para este tipo de máquinas deben tener mayor espesor o ancho que las encontradas en impresoras 3D, ya que los esfuerzos a los que estará sometida son mayores. Por esto sería necesario comprar correas de un costo elevado, las que se utilizan en sistemas de transmisión de automóviles no sirven, ya que están diseñadas para transmitir movimiento a altas velocidades y no para tener precisión, que es más importante para una máquina de este tipo.

El husillo de bolas y las correas tienen una eficiencia mayor al 90 %, en cambio el husillo trapezoidal es cercano al 50 % [16, 17].

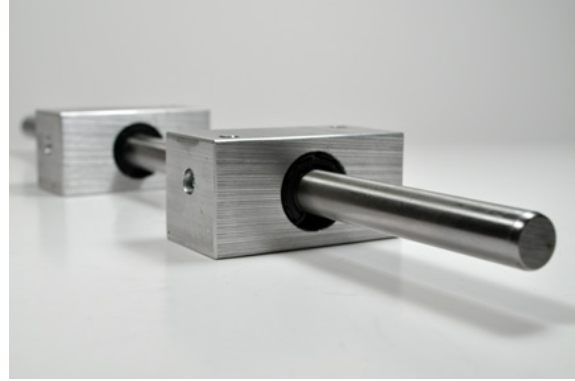
En la tabla 2.13 tienen el mismo puntaje las opciones A y C, pero se elige la opción A ya que se cuenta con husillos de bolas de un proyecto anterior y no es necesario comprarlos.

Guías para soporte

Se estudian 3 opciones para guías de soporte (figura 2.9), que son las encargadas de resistir el peso de la estructura y los esfuerzos producidos durante el corte.



(a) Barra con soporte



(b) Barra sin soporte



(c) Ángulos de aluminio con rodamientos como ruedas

Figura 2.9: Tipos de guías de soporte. En (a) y (b) las barras son de acero y se utilizan rodamientos lineales

Tabla 2.14: Comparación de guías mostradas en figura 2.9.

Objetivo	Opción A	Opción B	Opción C
Alta rigidez de estructura	5	2	5
Modificable	3	5	5
Bajo costo de fabricación	2	5	5
Fácil fabricación	4	5	3
Total	14	17	18

La barra sin soporte es la que tiene menor rigidez, ya que solo está sostenida en los extremos y esto aumenta la deformación en el centro. En las otras opciones se pueden utilizar apoyos en todo el largo, o donde sea necesario.

Las opciones A y B se compran y solo es necesario cortar la barra para ajustarla al largo que se necesite. Para la última se deben utilizar múltiples herramientas para poder elaborarlas, aumentando la complejidad de la fabricación.

El de mayor costo es la opción A, se debe comprar en el exterior y enviar algo de ese tamaño y peso no es conveniente. Entre las 2 opciones restantes los costos son similares, puesto que en la barra sin soporte se utilizan rodamientos lineales del diámetro de la barra y en la opción C los rodamientos son más pequeños y baratos, pero se requieren más, por lo que los costos son cercanos.

Se escoge la opción C. En la tabla 2.14 las 3 opciones alcanzan puntajes cercanos, pero la opción C tiene el mayor, a pesar de ser la más compleja de fabricar.

Herramienta

Es posible encontrar una gran cantidad de herramientas capaces de fresar PCB, pero para esta comparación se incluyen solo las 3 de la figura 2.10.

La herramienta Spindle 300w es elaborada en China y es fabricada por más de 1 empresa, aunque todos tienen características similares, también se encuentran en 400 o 500w, manteniendo igual el resto de las especificaciones, pero el precio aumenta y para fresar PCB no es necesaria esta potencia extra.



(a) Dremel 3000



(b) Spindle 300w



(c) Kress 800 FME

Figura 2.10: Comparación de herramientas para fresar PCB.

Tabla 2.15: Comparación de herramientas mostradas en figura 2.10.

Objetivo	Opción A	Opción B	Opción C
Bajo costo de fabricación	5	4	1
Fácil fabricación	5	3	3
Herramienta con altas RPM máximas	5	3	5
Total	15	10	9

El Dremel 3000 y Spindle 300w se pueden encontrar por precios similares, la diferencia principal radica en que la opción A se puede comprar en prácticamente todas las tiendas de herramientas en Chile, en cambio, el Spindle 300w se debe importar de China y también incluir una fuente de poder de 48v, finalmente termina siendo más caro y difícil de conseguir.

La opción C es definitivamente la más cara y también se debe importar, esta herramienta está diseñada principalmente para fresar materiales más complicados, como aluminio, pero de todas formas puede fresar PCB.

Las opciones A y C pueden alcanzar más de 30.000 RPM, en cambio la opción B solo llega a 12.000, esto implicaría usar fresas de mayor diámetro para llegar a la velocidad de corte correcta en cobre.

Como lo muestra la tabla 2.15, lo mejor es utilizar un Dremel 3000, opción A.

Generador código G

Para convertir el diseño de una PCB en un lenguaje que puedan entender los controladores de los motores, se necesita un programa generador de código G. Se realiza una comparación entre 2 software enfocados en PCB, estos son FlatCam y Chilipeppr, figura 2.11.

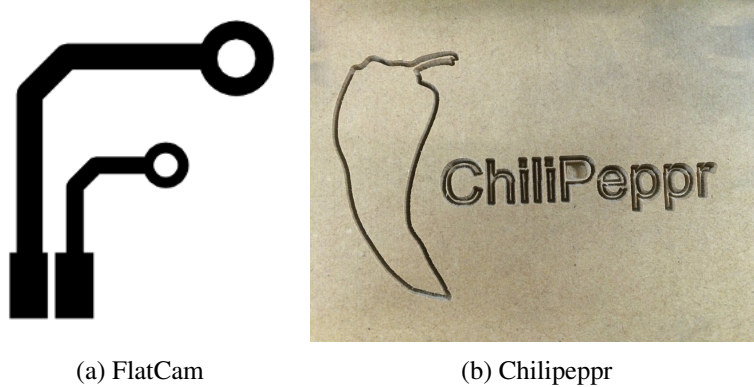


Figura 2.11: Programas para generar código G.

En este caso no se realiza una tabla, ya que el único objetivo de diseño relacionado es utilizar software gratuito y ambos lo cumplen.

Ambos son capaces de generar código G a partir de un diseño, la diferencia entre los 2 radica en que FlatCam se puede utilizar con todos los programas de diseño, pero Chilipeppr está hecho solo para Autodesk Eagle.

No es necesario escoger uno de los 2 programas, ya que se puede utilizar el que resulte más conveniente dependiendo del programa usado.

La ventaja de Chilipeppr es que puede importar directamente un archivo de diseño. En FlatCam es necesario separarlo en tareas (fresado de caminos, taladrado y fresado de dimensiones) y es más lento que hacerlo todo de una vez. La desventaja que tiene Chilipeppr es que siempre debe haber una conexión a internet o sino el envío de datos termina.

Se escoge Chilipeppr para realizar las pruebas con el prototipo, se muestran más detalles de este programa en el apartado 3.5.

Controlador de motores

Para controlar los motores paso a paso, las 3 opciones más usadas se muestran en la figura 2.12. Estas son MACH4, LinuxCNC y GRBL.

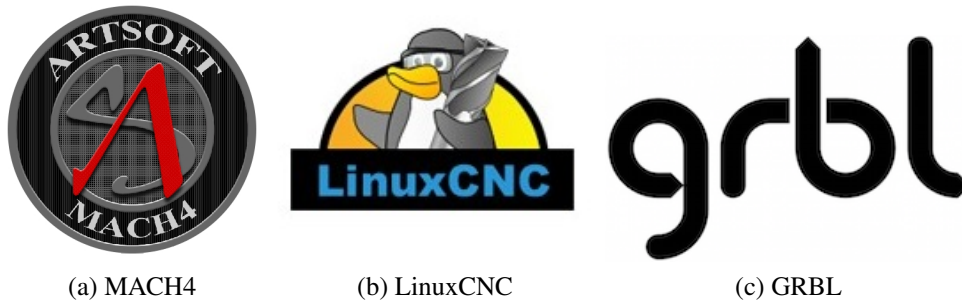


Figura 2.12: Tipos de controladores de motores paso a paso.

Una de las restricciones del proyecto es utilizar software gratuito, por lo que Mach4 se descarta. También es una restricción usar cable USB y solo GRBL lo cumple, por lo que es la opción elegida.

La desventaja de GRBL es que solo puede trabajar en 3 ejes, en cambio los otros pueden hasta 9, pero esto no es necesario para fresar PCB. En el resto, los 3 programas pueden realizar funciones similares.

En el apartado 3.4 se explica en más detalle GRBL.

Fresas

Dos opciones para fresar los caminos en las placas se aprecian en la figura 2.13. Las fresas de grabado tienen una ventaja en su bajo costo y se pueden encontrar en diámetros desde 0.1 mm, pero son frágiles y si no se usa la velocidad de corte correcta, se dañan fácilmente. En la punta estas fresas por un lado son planas, por el otro forma de cono y cuentan con un filo con ángulo de ataque bajo, pensado para mecanizar materiales blandos, como el cobre. Una desventaja de este tipo de fresas ocurre al descender hasta la profundidad de corte deseada. En este paso la fresa debe taladrar el cobre y es posible que se rompa, puesto que en el centro de la punta la velocidad es cercana a cero y solo empuja en vez de cortar el material.

La fresa de punta esférica cuenta con la ventaja de poder taladrar sin problemas, pero no se encuentran en el mercado nacional en diámetros menores a 1 mm.

Se prefiere la fresa de grabado por su disponibilidad y menor costo.

Para fresar las dimensiones de la placa, la mejor opción disponible es la fresa con punta plana. La fresa de punta esférica no genera bordes rectos y sería necesario lijar el material no removido en los bordes de la placa.



Figura 2.13: Fresas de grabado, punta esférica y punta plana.

2.6. Selección de conceptos

Tomando los conceptos con mayor puntaje, se crea la tabla 2.16 con las opciones escogidas para diseñar el equipo y en la figura 2.14 se muestra un dibujo del concepto a diseñar.

Tabla 2.16: Carta morfológica con conceptos escogidos.

Función	Concepto
Tipo de estructura	Pórtico movible
Material	Madera
Transmisión de movimiento	Husillo de bolas
Guías para soporte	Ángulos de aluminio
Herramienta	Dremel 3000
Generador código G	ChiliPepr
Controlador de motores	GRBL
Fresa	Grabado

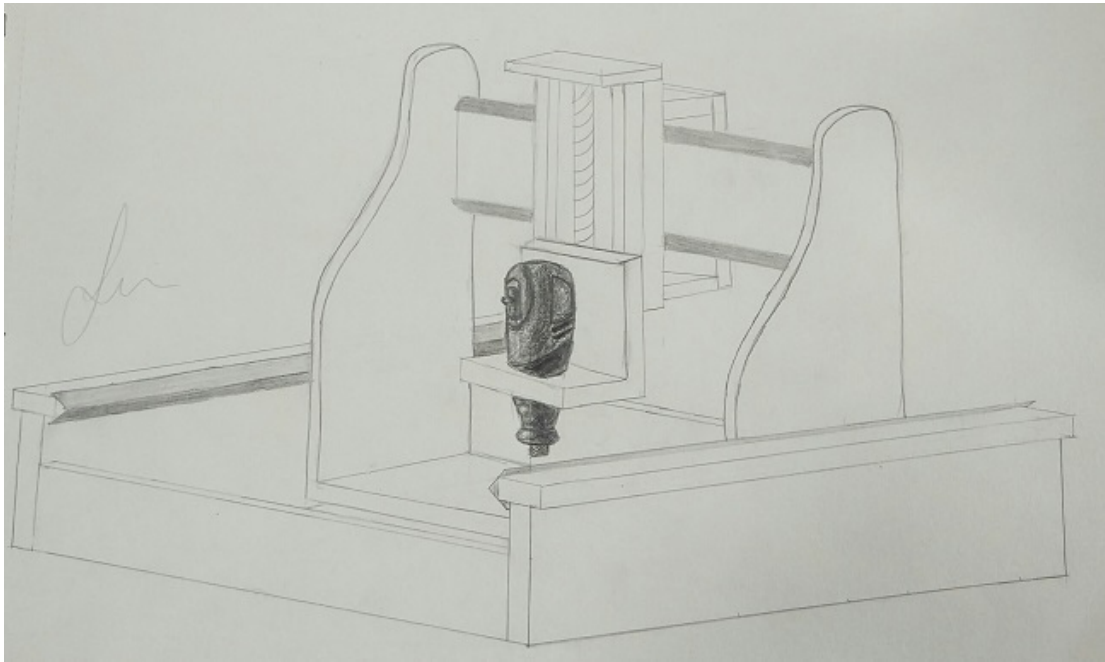


Figura 2.14: Dibujo del prototipo con conceptos a utilizar.

Capítulo 3

Diseño de configuración

En este capítulo se muestra el software y componentes requeridos, incluyendo las especificaciones necesarias para cada uno.

3.1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico requiere 220V en corriente alterna para la herramienta, 24-36V para los controladores de los motores y 5V para Arduino. Se obtiene 220V directamente de la red y 5V por el cable USB que recibe la información del computador.

Se necesita un transformador AC-DC que reciba 220V AC y entregue 24-36V DC y una corriente que sea por lo menos igual a la que requieren los 3 motores paso a paso cuando están funcionando a máxima potencia, esto es 6A, como se muestra más adelante en la selección de motor.

3.2. Electrónica

La parte electrónica corresponde a lo mencionado anteriormente, permite el movimiento y control del equipo. La lista completa está en la tabla 3.1 y se muestran en la figura 3.1

Tabla 3.1: Componentes electrónicos a utilizar y voltaje necesario.

Componente	Fuente de energía
Arduino Uno R3	5V DC
CNCShield	12 - 36V DC
DRV8825	5V DC y 24 - 45V DC
Límites de carrera	5V DC
Botón de emergencia	-

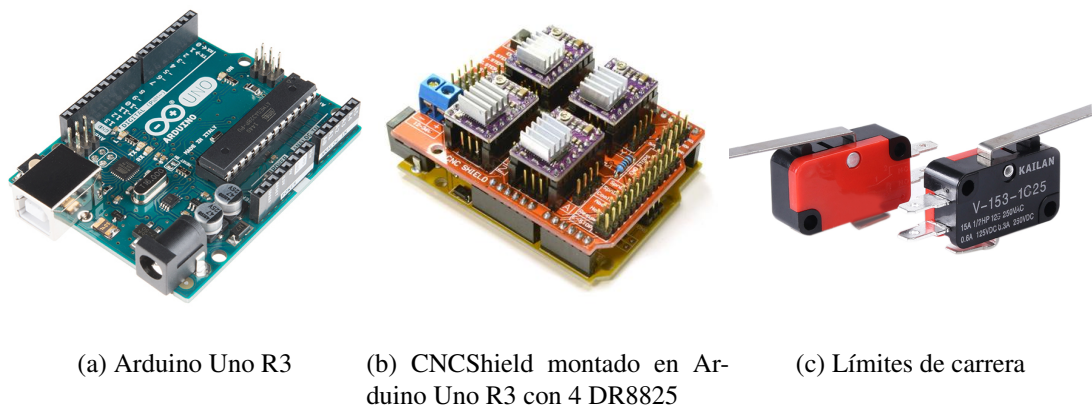


Figura 3.1: Componentes electrónicos a utilizar.

3.3. Componentes estándar

Son los componentes que se seleccionan desde catálogos, estos son ejes, acoples, descansos, rodamientos, herramienta, y motores.

Ejes

Los husillos de bolas determinan el tamaño total de la máquina, como también el área de corte máximo. Los ejes a utilizar fueron escogidos del proveedor Seariver y las especificaciones se encuentran en Anexos A.1, En la figura 3.2 se aprecian los ejes seleccionados. Los extremos están maquinados para usar descansos de 12 mm y acoples de 10 mm.



Figura 3.2: Ballscrew de diámetro 16 mm, 5 mm de paso y 400 mm de largo.

Acoples

Estas piezas se utilizan para unir el eje de los motores a los husillos del punto anterior. El tamaño a utilizar es determinado por el diámetro del motor y del husillo. Se escogen acoples flexibles sobre los fijos, para permitir un pequeño error en la ubicación de los motores en caso de que sea necesario. En anexos A.1 están las especificaciones y el acople seleccionado en la figura 3.3.



Figura 3.3: Acople flexible, para ejes de 6 mm y 10 mm, como los usados en motores NEMA23 y los husillos de bolas 1605 respectivamente.

Descansos

Los descansos se utilizan para evitar que el peso del husillo sea soportado solo por los rodamientos de los motores paso a paso o que estén en contacto con la estructura de la máquina mientras estén girando. Por esta razón el tamaño a utilizar es completamente dependiente del husillo de bolas escogido. Las especificaciones de distintos tamaños se encuentran en Anexos A.1 y los escogidos se muestran en la figura 3.4.



Figura 3.4: Descansos BF12 y BK12.

Rodamientos

Los rodamientos para utilizar en las guías de soporte fueron escogidos en base a su geometría y resistencia, figura 3.5, en anexos A.1 están las especificaciones.



Figura 3.5: Rodamiento 608-2RS, con diámetro interno de 8 mm y externo 22 mm.

Herramienta

En el trabajo de fresado en las placas, se utiliza un Dremel 3000 y para sujetarlo en la máquina se debe fabricar un adaptador, como se explica más adelante. Se muestra en la figura 3.6 y en anexos A.1 están las especificaciones.



Figura 3.6: Dremel 3000.

Motores

Los motores paso a paso fueron escogidos por el torque máximo que pueden generar, sin tomar en cuenta otras especificaciones, como la inductancia o resistencia de fase. El motor seleccionado, figura 3.7, es bipolar, de tamaño NEMA23, 1.8° por paso, inductancia por fase 18 mH, resistencia por fase 8.6Ω y torque 2.0 Nm.

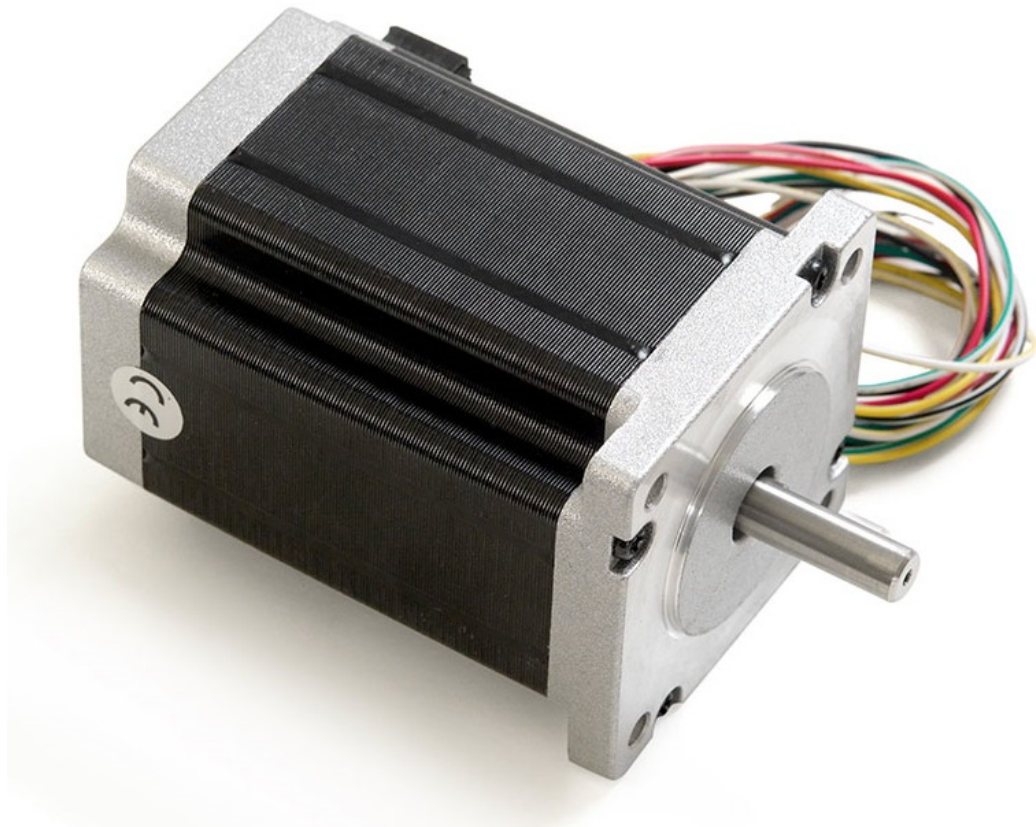


Figura 3.7: Motor paso a paso, modelo 23HS8610.

3.3.1. Componentes especializados

Estos son componentes que no se compran y se deben diseñar, para luego fabricar.

Adaptador Dremel 3000

La herramienta Dremel 3000 no cuenta con una geometría que permita montarla directamente al eje Z de la máquina, es preciso diseñar y fabricar un adaptador. Al ser una herramienta muy común, es posible encontrar diseños de las piezas necesarias [18], por lo que se toman y fabrican en una impresora 3D en ABS, con 20 % de relleno. Se usa el adaptador de la figura 3.8.



Figura 3.8: Dremel 3000 con el adaptador para montarlo en la máquina.

Porta tuerca

Esta pieza se utiliza para que la tuerca del tornillo de bolas, que es redonda, tenga una superficie plana, donde se pueda unir con la máquina. Esta pieza se puede comprar, pero para disminuir costos y tiempos, se diseña y fabrica en una impresora 3D en ABS. En la figura 3.9 se aprecia que tiene una abertura, el objetivo es poder desmontarlo sin desarmar el eje completo, se puede desatornillar y sacar rápidamente.

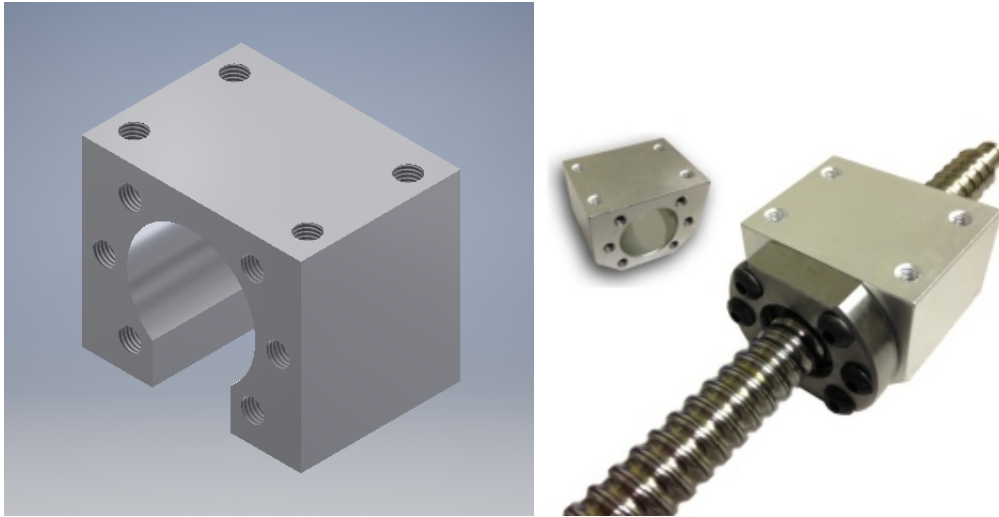


Figura 3.9: Base para la tuerca del husillo de bolas.

3.4. Controlador de motores

Los motores paso a paso funcionan con pulsos, cuando reciben uno avanzan un paso, esto es una ventaja sobre los motores de corriente continua o alterna, porque al saber la cantidad de pulsos enviados, se puede conocer el número de pasos que giró el motor y con esto, la posición.

Para simplificar el proceso se utiliza el código G, este es un lenguaje de programación que permite dar instrucciones a los motores. Estas tareas son interpretadas por el software GRBL y envía los pulsos necesarios a los motores. GRBL es capaz de controlar la máquina en general, puede manejar la herramienta, sensores, refrigerante y otros sistemas que la máquina pueda tener.

El usuario puede escribir el código G o también se utiliza un programa que lo genere, esto es más conveniente, ya que las instrucciones para fresar PCB pueden ser de miles de líneas de código que un programa las genera en segundos. De todas formas, es útil que el usuario conozca el código G, para revisar tareas simples, corregir errores o realizar cambios en las instrucciones. En Anexos A.2 se encuentra la lista de comandos del código G compatibles con GRBL.

Cuando se envía una instrucción de movimiento, los motores no pueden girar a la velocidad pedida de forma inmediata, todo el sistema de movimiento tiene inercia y debe acelerar por un tiempo antes de alcanzar dicha velocidad. De la misma forma, cuando los motores están girando y deben parar, no lo hacen inmediatamente. Por esto GRBL realiza cada movimiento considerando una rampa de aceleración, luego velocidad constante y finaliza con una rampa de desaceleración [19].

3.4.1. Configuración

GRBL se usa en distintas máquinas, por lo que es necesario realizar una configuración antes de poder utilizarla. Esta sección incluye solo los valores más importantes que se deben cambiar, la lista completa de configuración se encuentra en Anexos A.3.

GRBL solo se encuentra en inglés, de modo que no es conveniente traducir los nombres de las funciones a castellano.

Los comandos que aparecen a continuación se deben escribir en el programa que envía el código a los motores, en este caso, Chilipeppr.

- **Hard Limits:** Se utilizan límites de carrera en los extremos de la máquina, como los de la imagen 3.1. Cuando uno se activa, los motores se detienen de forma inmediata de una forma no controlada, por lo que se pierde la posición exacta en que está la máquina por algunas décimas de milímetros. Para activar $\$21=1$ y desactivar $\$20=0$. Los límites se conectan Normalmente Abierto (Normally Open), de lo contrario se debe cambiar el código de GRBL y también incluir resistencias en serie en el circuito para evitar que se queme.
- **Homing:** Esta función sirve para tener siempre una posición de referencia. Al ejecutarlo, el eje Z se mueve hacia arriba rápido hasta tocar el límite de carrera, luego se aleja y vuelve a subir a una velocidad menor hasta tocar nuevamente, esta posición queda definida como cero, luego se mueven los ejes X e Y en sentido positivo, repitiendo lo hecho en el eje Z. $\$22=1$ para activar y $\$22=0$ para desactivar. Si está activado, es obligatorio ejecutarlo por lo menos 1 vez al prender la máquina. Las velocidades se determinan en $\$24$ para la lenta y $\$25$ la rápida, en milímetros por minuto.
- **Soft limits:** Son límites imaginarios, se activan cuando el programa detecta que un movimiento está fuera de los límites de la máquina y provocan una detención programada de los motores, es decir, no se pierde la posición. Para activarlos $\$20=1$ y para desactivarlos $\$20=0$. Los límites se determinan en Max travel.
- **Max travel:** Distancia máxima que se puede mover la máquina desde el cero determinado en Homing. Esto solo sirve si los Soft limits están activados. $\$130$, $\$131$, $\$132$ para X, Y y Z respectivamente.

- Step/mm: Determinan la cantidad de pasos en el motor para 1 milímetro de avance de la máquina. Está relacionado con los grados que gira el motor en cada paso y el husillo usado. \$100 para eje X, \$101 eje Y y \$102 eje Z.
- Max rate: Velocidad máxima a la que se mueve cada eje. Cuando en el código G se pide un movimiento con G0, esta es la velocidad con que se desplaza. \$110, \$111 y \$112 para X, Y y Z respectivamente.

Para ver la configuración actual, se utiliza \$\$.

3.4.2. Funciones

En la figura 3.10 se muestra la función de cada pin de Arduino con el software GRBL 1.1 y luego el detalle de cada uno. Debido a la limitada memoria con que cuenta Arduino Uno R3, no es posible incluir todas las funciones que tienen controladores para programas como LinuxCNC o Mach3.

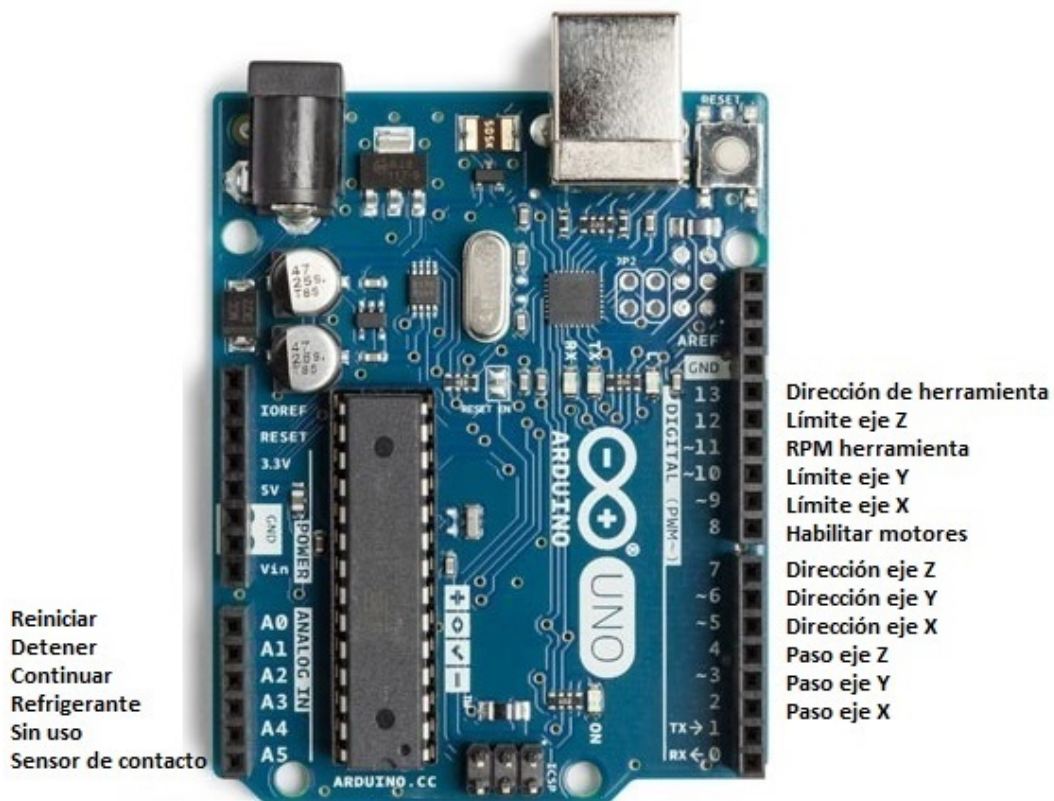


Figura 3.10: Función de los pines de Arduino con el software GRBL.

- A0-Reiniciar: Reiniciar GRBL.
- A1-Detener: Detención de forma controlada, no se pierde la posición, similar a Soft limits.
- A2-Continuar: Para reanudar el envío de datos después de una detención.
- A3-Refrigerante: Para activar el refrigerante, en esta máquina no se puede utilizar líquido por ser de madera, pero sí aire o algo similar para enfriar la herramienta o motores.
- A4-Sin uso: En GRBL 1.1 no tiene uso, pero se encuentra reservado por si se utiliza más adelante.
- A5-Sensor de contacto: Para determinar la posición en el eje Z en que se encuentra la pieza a cortar. Se conecta la fresa al pin A5 y la placa de cobre a GND, cuando la fresa toca la placa, se cierra el circuito eléctrico y se detiene. Un ejemplo de uso es G38.2 Z-10 F30, esto hace que el eje Z baje a 30 mm/min y se detenga cuando toque la placa, si el circuito no se cierra, se detiene al descender 10mm.
- 13-Dirección de herramienta: Determina el sentido del giro de la herramienta. No es compatible con Dremel 3000, ya que solo gira en un sentido.
- 12-Limite eje Z: Se conecta a los límites de carrera del eje Z.
- 11-RPM herramienta. Determina la velocidad de giro de la herramienta a través de un pulso PWM. No es compatible con Dremel 3000, puesto que se controla con un botón en la herramienta.
- 10-Limite eje Y: Se conecta a los límites de carrera del eje Y.
- 9-Limite eje X: Se conecta a los límites de carrera del eje X.

El resto de las funciones corresponden a los motores paso a paso y se conectan directamente a través de CNCShield, como se muestra en la figura 3.1.

3.5. Generador código G

El código G que recibe Arduino, es generado y enviado por el programa Chilipeppr. El cual recibe el diseño de una PCB en un archivo .brd creado en Autodesk Eagle y lo transforma a código G. Además del archivo, el usuario ingresa las siguientes especificaciones para generar el código.

- Cara a fresar, frontal o trasera.
- Parámetros de fresado de agujeros de identificación para girar la placa. Solo es necesario si se busca fresar en ambas caras.
- Diámetro de la fresa para fresar caminos.
- Profundidad de corte.
- Parámetros de taladrado.
- Parámetros de fresado de agujeros y dimensiones de la placa.
- Parámetros de fresado de tabs, para separar la placa al terminar la operación.
- Determinar sentido de fresado, convencional, de escalada o ambos.

Algo opcional es usar la función de sensor de contacto en el eje Z, para determinar la altura de algunos puntos de la placa y extrapolar el resto, como se ve en la figura 3.11. Al realizar esto, el código G se actualiza automáticamente a la altura nueva en cada punto, para que el fresado siempre tenga la misma profundidad. Mientras más puntos se midan, mejor será la extrapolación de la altura.

Finalmente se envía el código G y comienza el fresado. Si la operación requiere cambiar la fresa en algún momento, el programa se detiene, se reemplaza manualmente la fresa o broca, se mide la altura en un punto para determinar la nueva altura cero y luego continua el fresado de la placa. Esta operación se repite las veces que sea necesario.

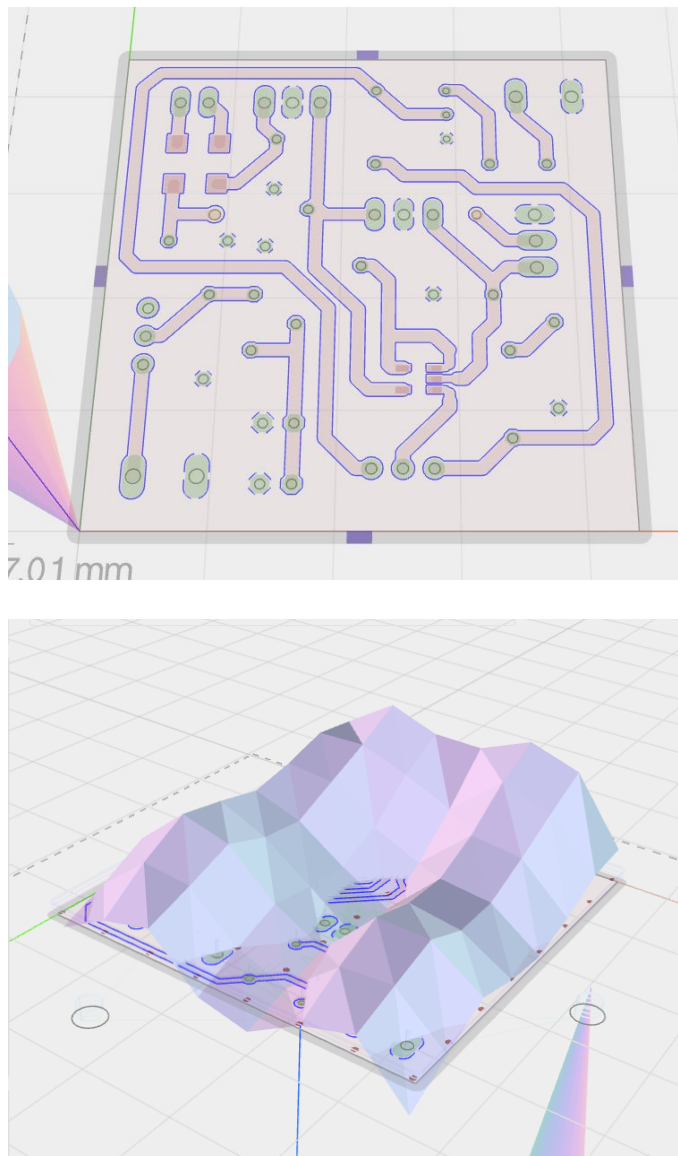


Figura 3.11: Antes y después de aplicar AutoLevel en Chilipeppr, con exageración de 50 veces en las diferencias de altura.

En la figura 3.11 se aprecia lo que muestra el programa antes y después de medir la altura. En la segunda imagen la diferencia entre el punto más alto y más bajo es 0.3 mm.

Capítulo 4

Diseño Detallado

En este capítulo se toman las últimas consideraciones en el diseño, luego se completa y se crean los planos de fabricación. Finalmente, se determina el costo de fabricación.

4.1. Consideraciones en estructura

En el diseño de la estructura se busca que los esfuerzos a los que esté expuesta sean los más bajos posibles, para evitar tener un desgaste mayor al necesario. Se muestran las fuerzas que tienen mayor influencia en el diseño de la estructura y qué consideraciones se deben tomar para minimizar los esfuerzos generados.

4.1.1. Pórtico

A continuación, se presentan las consideraciones que se toman en el diseño del pórtico.

Distancia entre la punta de la fresa y los soportes del eje X

Al cortar un camino en la placa en el eje Y, se produce una fuerza de corte en la punta de la fresa que se opone al movimiento. Se generan fuerzas y torques para contrarrestar esto, pero para simplificar se desprecian las fuerzas y se considera que el torque está en el centro entre los soportes del eje X, como se muestra en la figura 4.1, a una distancia A de la fuerza F_y . El torque generado es proporcional a esta distancia, según la ecuación de torque en 2 dimensiones (4.1), donde τ es torque, r distancia y F fuerza.

$$\tau = r * F \quad (4.1)$$

El objetivo es disminuir la distancia A , que representa a r en la ecuación (4.1), al mínimo posible.

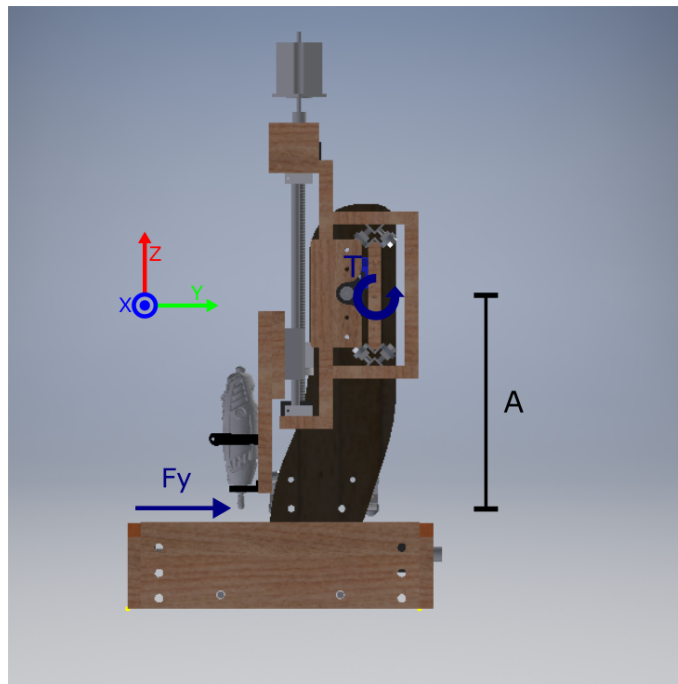


Figura 4.1: Vista lateral de estructura.

Distancia entre los soportes del eje X

En la figura 4.2 se muestra que el torque del paso anterior genera fuerzas en los soportes del eje X. Por sumatoria de fuerzas, F_{2a} y F_{2b} deben ser de la misma magnitud y sentido contrario. De la ecuación (4.1) se desprende que mientras mayor sea la distancia B , menor serán las fuerzas resultantes.

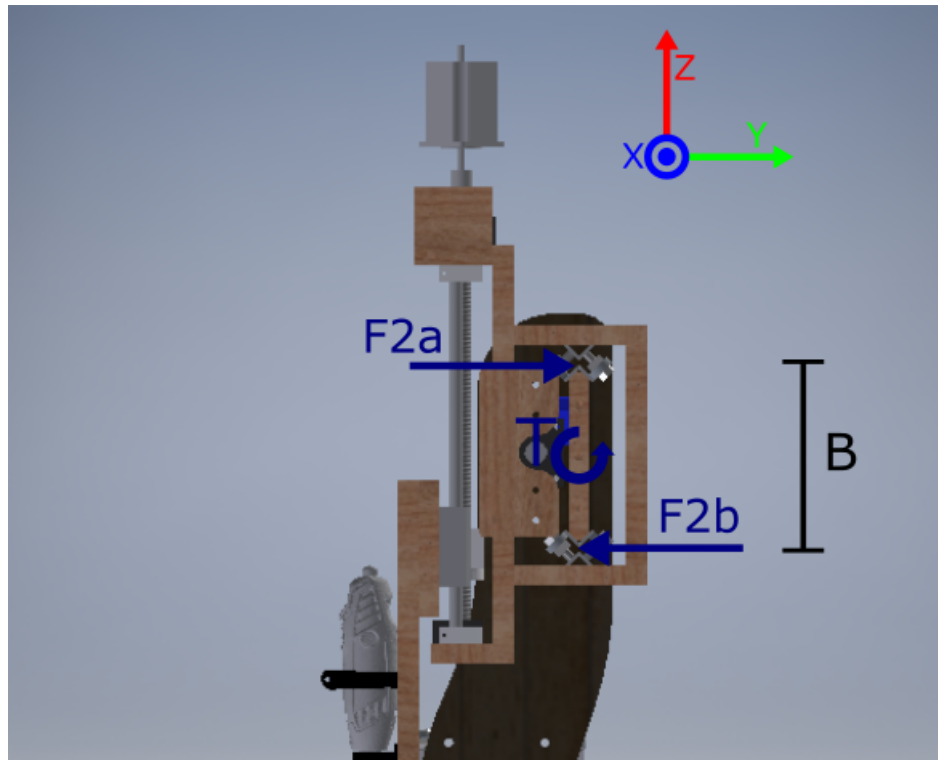


Figura 4.2: Vista lateral de soportes del eje X.

Distancia entre los soportes del eje X e Y

La fuerza F_{2a} al ser de la misma magnitud que F_{2b} , pero al estar más alejada del soporte del eje Y, genera una rotación en este eje que se debe compensar con las fuerzas F_{3a} y F_{3b} , como se muestra en la figura 4.3. La distancia C se debe minimizar, para evitar o disminuir estas fuerzas durante el corte.

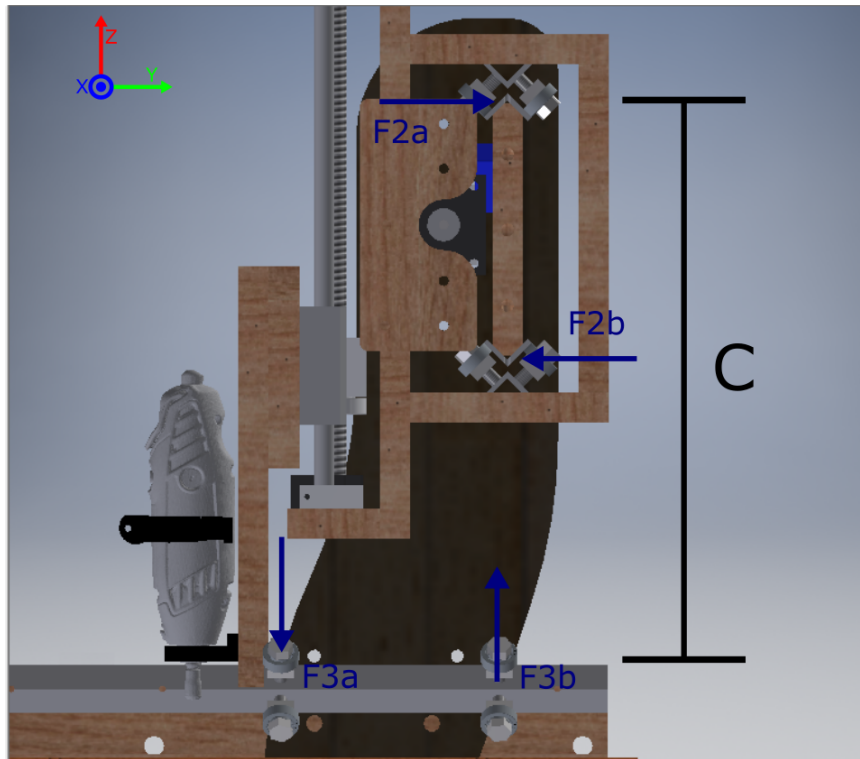


Figura 4.3: Vista lateral de soportes del eje Y.

Centro de gravedad

El peso del pórtico es soportado por el carro del eje Y, que cuenta con 2 pares de rodamientos, como muestra la figura 4.4. Si el centro de gravedad no está en el medio del carro, las fuerzas en los rodamientos no son iguales, se genera un torque y el pórtico rota hacia el rodamiento que soporta mayor peso. Esta rotación se puede sumar o restar a la mostrada en el punto anterior, dependiendo del sentido del corte, pero asumiendo que el corte puede ser en todas las direcciones, se debe tomar en cuenta el peor de los casos. Por esta razón no es posible eliminar completamente la rotación del pórtico, pero el objetivo es disminuirla al mínimo posible.

Para el cálculo del centro de gravedad se debe incluir el peso del pórtico, conteniendo motores, herramientas y todo lo extra que puede haber.

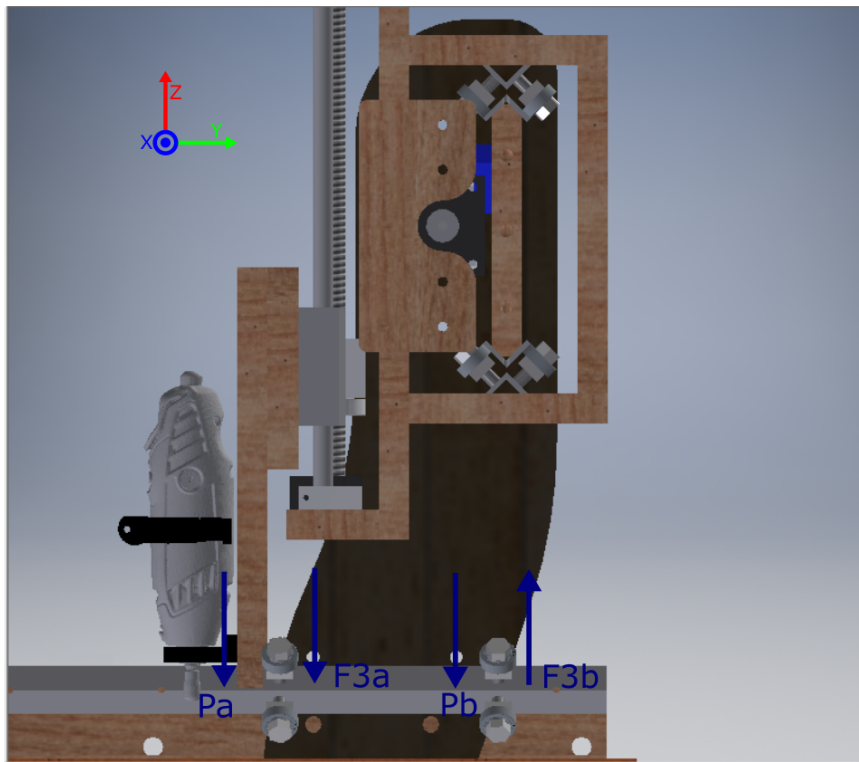


Figura 4.4: Vista de los carros del eje Y.

4.1.2. Eje Z

A continuación, se presentan las consideraciones que se toman en el diseño del eje Z.

Distancia entre la punta de la fresa y los soportes del eje Z

Cuando el movimiento es en el eje X, la fuerza de corte genera un momento y fuerzas, como se muestra en la figura 4.5. Siguiendo el mismo desarrollo que en el caso del pórtico, se llega a que se deben minimizar las distancias D y G y maximizar E y H.

Al analizar la fuerza en el eje Y, se aprecia que también se debe maximizar la distancia H.

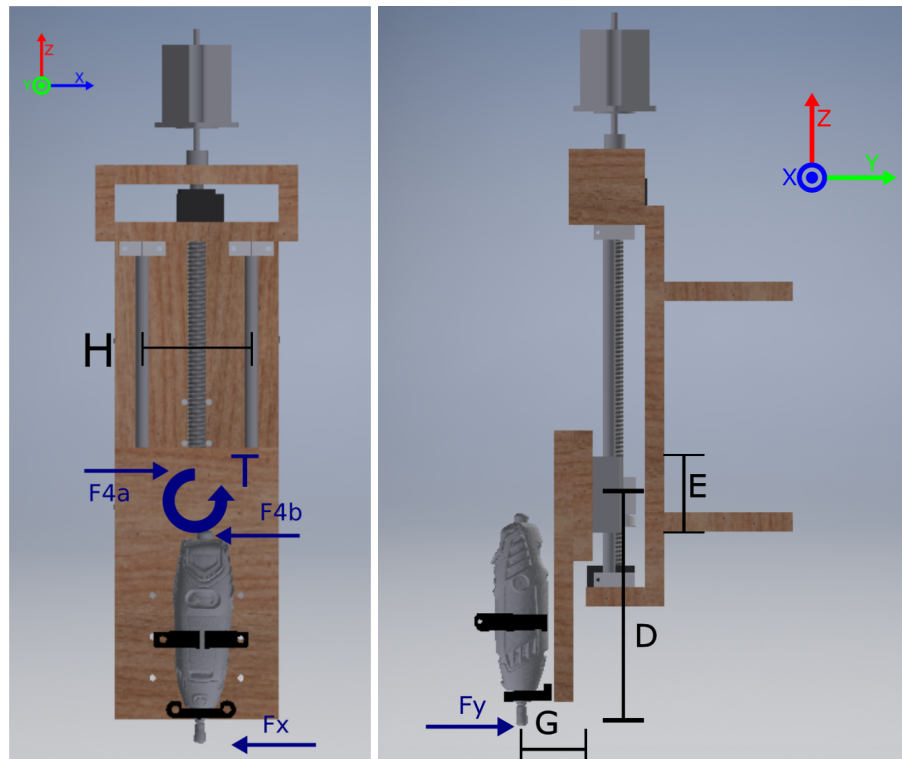


Figura 4.5: Vistas frontal y lateral del eje Z.

4.1.3. Base

A continuación, se presentan las consideraciones que se toman en el diseño de la base.

Distancia entre ángulos de soporte del eje Y y base

De la figura 4.6 se infiere que mientras más grande sea la distancia A, mayor será la deflexión causada por la componente en el eje Z del peso del pórtico en esta pieza, representada por F_c .

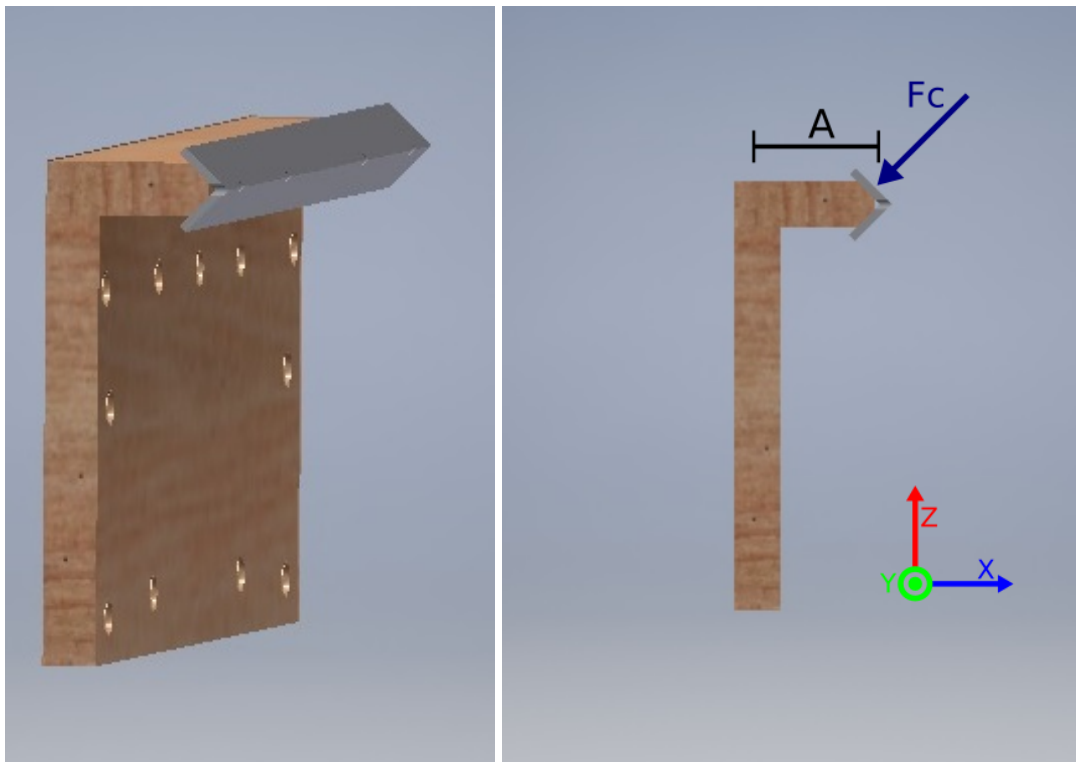


Figura 4.6: Vista lateral de la base que soporta el peso del pórtico.

Distancia entre altura máxima de la base y su sujeción

La componente en el eje X de la fuerza F_c de la figura 4.7 ocasiona que la base gire hacia los lados y cambie el ángulo en que están dispuestos los soportes del eje Y, esto provoca que no todos los rodamientos del carro del pórtico puedan estar en contacto con los soportes, aumentando el desgaste en los que sí están. El objetivo de diseño es minimizar el largo B de la figura. Se exhibe en color azul para mostrar donde termina esta pieza y donde se ubican los pernos.

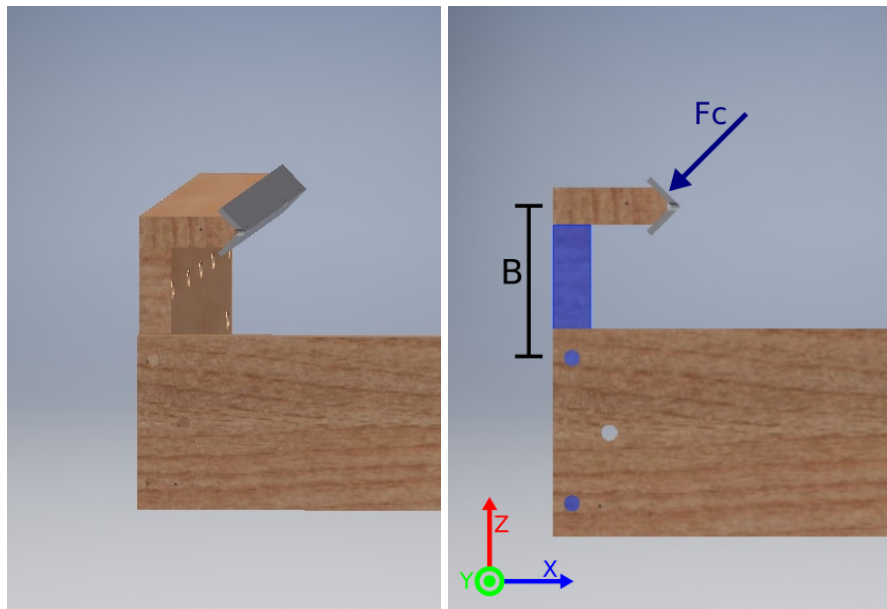
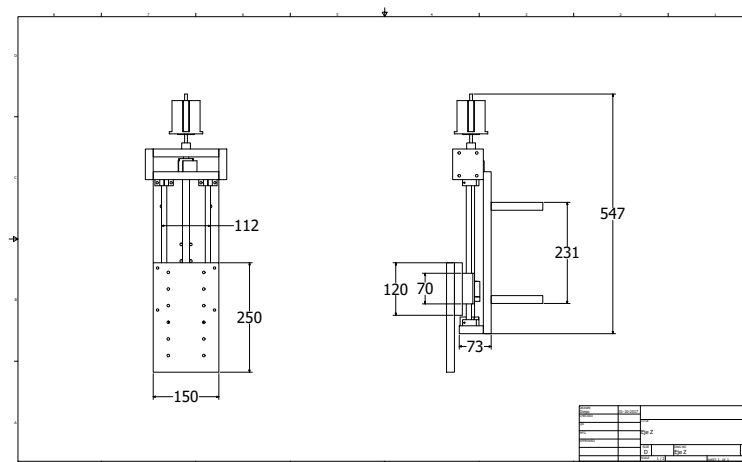
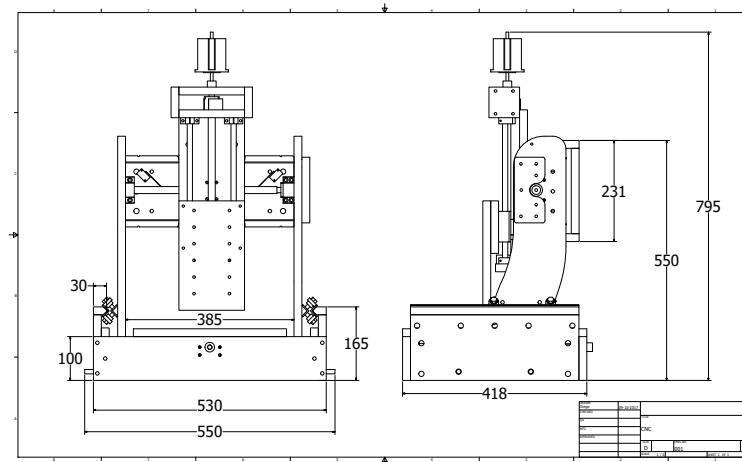


Figura 4.7: Vista lateral de la base.

4.2. Planos

Para la creación de los planos se toman las consideraciones del apartado anterior y las especificaciones de diseño relacionadas con la dimensión, estas son tamaño de corte mínimo de 200x200x50 mm, tamaño máximo de cada pieza 600x600x10 mm y peso máximo de 25 Kg. También se toman en cuenta las dimensiones de las piezas mostradas en el capítulo 3.



Los planos se encuentran en mayores dimensiones en Anexos A.5

4.3. Análisis de costos

En la tabla 4.2 se detallan los costos del prototipo y en la tabla 4.1 los costos estimados de las máquinas utilizadas en el Campus.

Tabla 4.1: Costos de máquinas usadas.

	Precio por hora	Horas	Precio total
Impresora 3D	\$9.000	5	\$45.000
Cortadora láser	\$15.000	4	\$60.000
Total			\$105.000

Tabla 4.2: Costos del prototipo.

Pieza	Especificación	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Pernos y tuercas		1	\$55.000	\$55.000
Terciado	Plancha de 1.2x2.4m 9mm de espesor	3	\$15.000	\$45.000
Motores paso a paso	Nema23 2 Nm	3	\$25.000	\$75.000
Husillo de bolas	1605 400 mm de largo	3	\$33.000	\$99.000
Dremel	3000	1	\$45.000	\$45.000
Descansos	BK12 y BF12	3	\$13.000	\$39.000
Coupler	6.35 y 10 mm	3	\$3.000	\$9.000
Rodamientos	SC12LUU	2	\$5.000	\$10.000
Soporte barra guía	SK12	4	\$1.500	\$6.000
Rodamientos	ABEC-5 608-2RS	8	\$1.000	\$8.000
Barras guía	Diámetro 12mm Largo 400 mm	2	\$1.500	\$3.000
Ángulo	Aluminio Largo 4 m	1	\$5.000	\$5.000
Cables	2x y 3x	1	\$20.000	\$20.000
Límites de carrera	SPDT V-153-1C25	6	\$800	\$4.800
Botón de emergencia	LAY37-11ZS	1	\$4.000	\$4.000
Portacables	10x10 mm Largo 1m	2	\$4.500	\$9.000
Arduino	Uno R3	1	\$15.900	\$15.900
CNCShield	V3.41	1	\$12.500	\$12.500
Controladores de motores	DRV8825	3	\$12.000	\$36.000
Fuente de poder	36V 10A	1	\$30.000	\$30.000
Fresas y brocas		10	\$2.500	\$25.000
Cola fría	500g	1	\$4.500	\$4.500
Lubricante	WD40	1	\$5.500	\$5.500
Total				\$581.280

Capítulo 5

Manufactura

En este capítulo se muestra la fabricación del prototipo. Se incluyen imágenes de los primeros ensayos creados en MDF, del prototipo en terciado y de diseños hechos en Autodesk Inventor Professional.

En las siguientes secciones se explica la manufactura tomando en cuenta el siguiente sistema de coordenadas. Al mirar la máquina de frente, el eje Z tiene sentido arriba y abajo, el eje X hacia los lados y el eje Y hacia atrás y adelante.

Los pernos con diámetros mayores o iguales a 1/4 pulgadas tienen cabeza hexagonal. Los pernos con un diámetro menor son una combinación de phillips y schlitz o paleta, es decir, se pueden ocupar ambos desatornilladores.

5.1. Estructura

Se utiliza terciado y el primer paso es cortarlo con láser como se puede observar en la figura 5.1. La cortadora láser utilizada es Speedy 400 de Trotec y se corta con la potencia máxima de 100 w. Las especificaciones de la cortadora se encuentran en Anexos A.3.

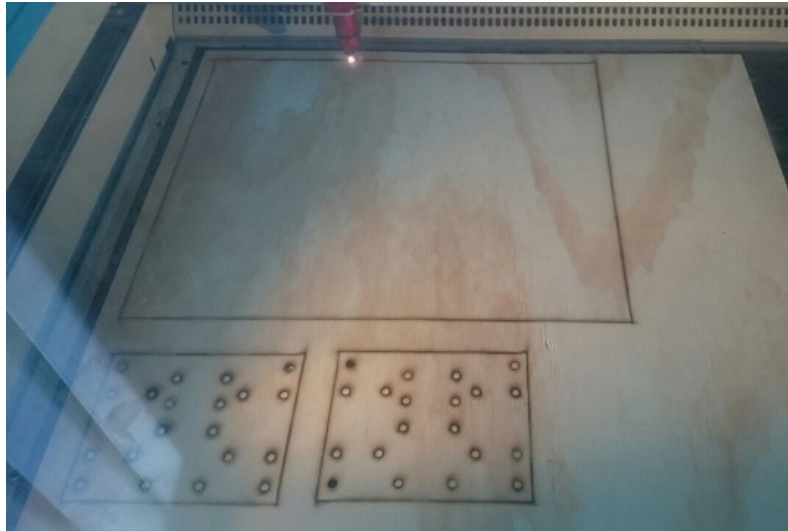


Figura 5.1: Corte del terciado.

En la construcción de este prototipo se busca utilizar terciado de 18 mm de espesor, pero la cortadora láser del Campus puede trabajar con un máximo de 10 mm, por lo que se usa de 9 mm y luego se pega con cola fría. Después de esto se lija, ya que el corte con láser quema la madera, como se aprecia en la figura 5.2.

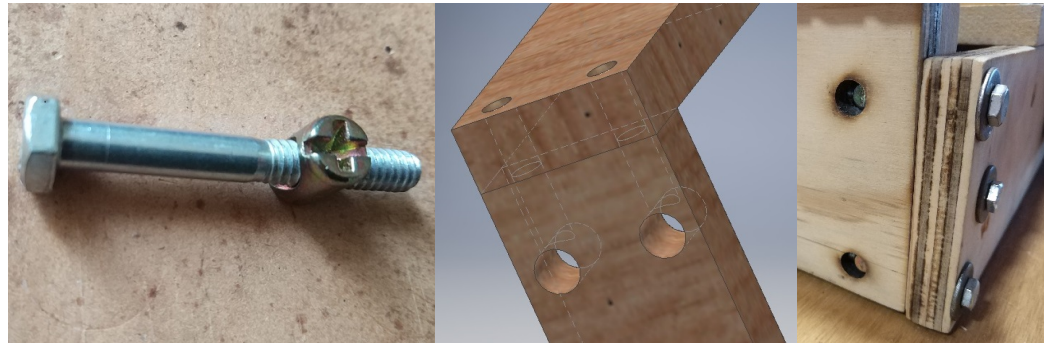


(a) Pegada y antes de lijar

(b) Después de lijar

Figura 5.2: Trabajo en terciado.

Las uniones de la madera se realizan con pernos y tuercas barril. Se taladra en el borde de la madera con una broca de 8 mm hasta llegar al orificio creado con la cortadora láser, luego se introduce un perno de 6.35 mm en el agujero nuevo y una tuerca barril en el antiguo.



(a) Perno y tuerca barril

(b) Ubicación de agujeros

(c) Ejemplo de unión

Figura 5.3: Uniones en terciado.

En la figura 5.4 se muestra que los agujeros no siempre quedan centrados. Estos orificios se realizan de forma manual, a diferencia del resto, por esta razón se utiliza una broca de un diámetro mayor al de los pernos.



Figura 5.4: Agujeros con taladro.

5.2. Carros

El sistema de carros permite el movimiento en el eje X e Y. Se utilizan ángulos de aluminio de 20x20x1 mm y para aumentar la resistencia se ocupan 2 en cada carro, ampliando el espesor a 2 mm. Se cortan en 15 cm de largo y luego se taladran con broca de 8 mm para situar los pernos necesarios para los rodamientos. Finalmente se ubican las tuercas para fijarlos en la posición, como muestra la figura 5.5.



(a) Ángulo durante taladrado



(b) Carro completado



(c) Prueba de movimiento del carro sobre otro ángulo

Figura 5.5: Carros para movimiento en ejes X e Y.

5.3. Eje Z

A continuación se describen los pasos para la construcción del eje Z, utilizando la enumeración mostrada en la figura 5.6.

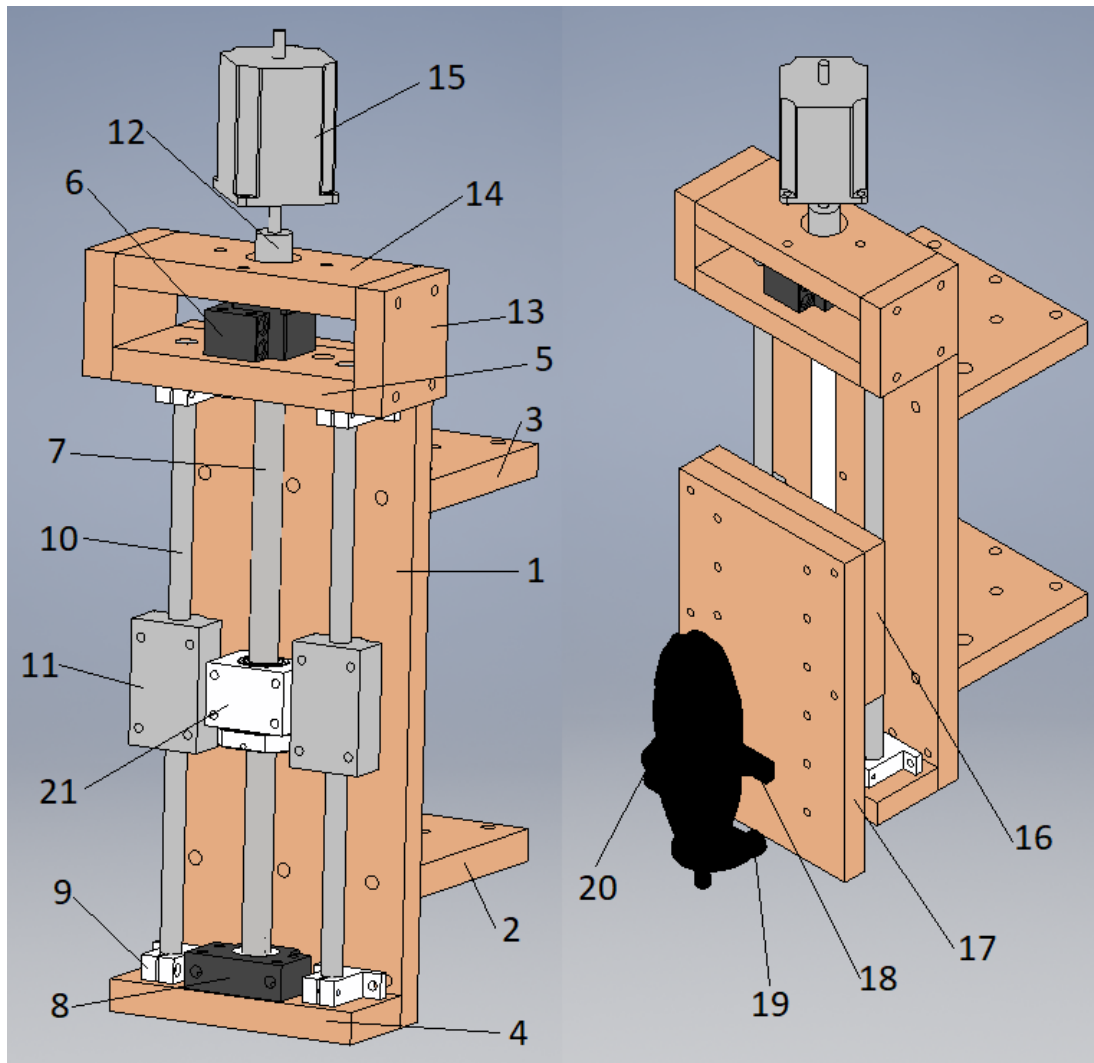


Figura 5.6: Enumeración de piezas del eje Z.

1. Unir la pieza principal (1) con las que permiten el movimiento en el eje X (2 y 3).
2. Instalar la base superior (5), descanso (6) y husillo (7), luego la base inferior (4) y descanso (8).
3. Ubicar los cuatro soportes (9), luego ambas barras guía (10) y rodamientos lineales (11). Al finalizar esto se aprietan los soportes (9) para evitar que las barras se muevan por gravedad.
4. Situar acople (12) en la punta superior del husillo (7).
5. Usar insertos roscados para unir los soportes verticales del motor (13) a la base superior (5) y después el soporte horizontal (14) con los verticales (13). Este paso se muestra en más detalle en la figura 5.7.
6. Instalar porta tuerca (21).
7. Montar porta herramienta (16), apernándolo en los rodamientos lineales (11) y porta tuerca (21).
8. Montar porta Dremel (17) en la pieza anterior (16) con pernos en las cuatro esquinas.
9. Instalar los soportes del Dremel (18 y 19).
10. Situar Dremel 3000 (20) y atornillar el soporte (18).

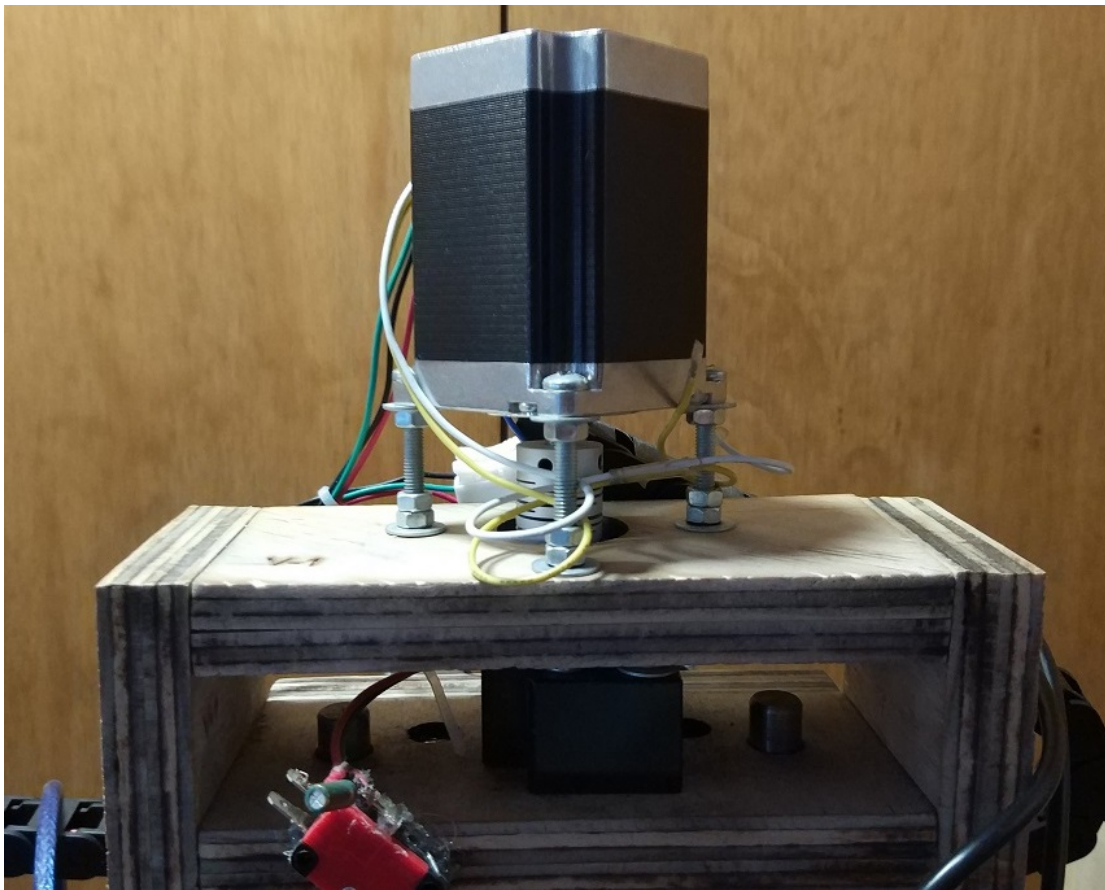
En caso de usar una herramienta distinta al Dremel 3000, es necesario fabricar una pieza para reemplazar el porta Dremel (17) y los soportes (18 y 19) con las medidas necesarias.



(a) Perno e inserto roscado



(b) Insertos instalados en soporte horizontal (14)



(c) Motor instalado

Figura 5.7: Pasos necesarios para instalar motor paso a paso.

El eje Z terminado se muestra en la figura 5.8.

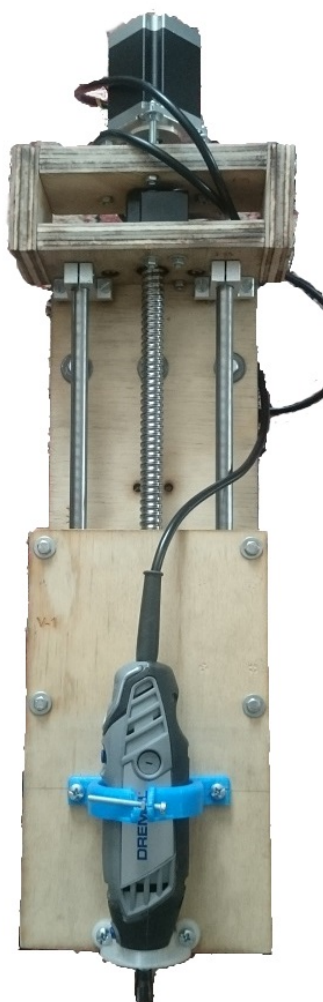


Figura 5.8: Eje Z con Dremel 3000.

5.4. Pórtico

A continuación se muestran los pasos para la construcción del pórtico, utilizando la enumeración mostrada en la figura 5.9.

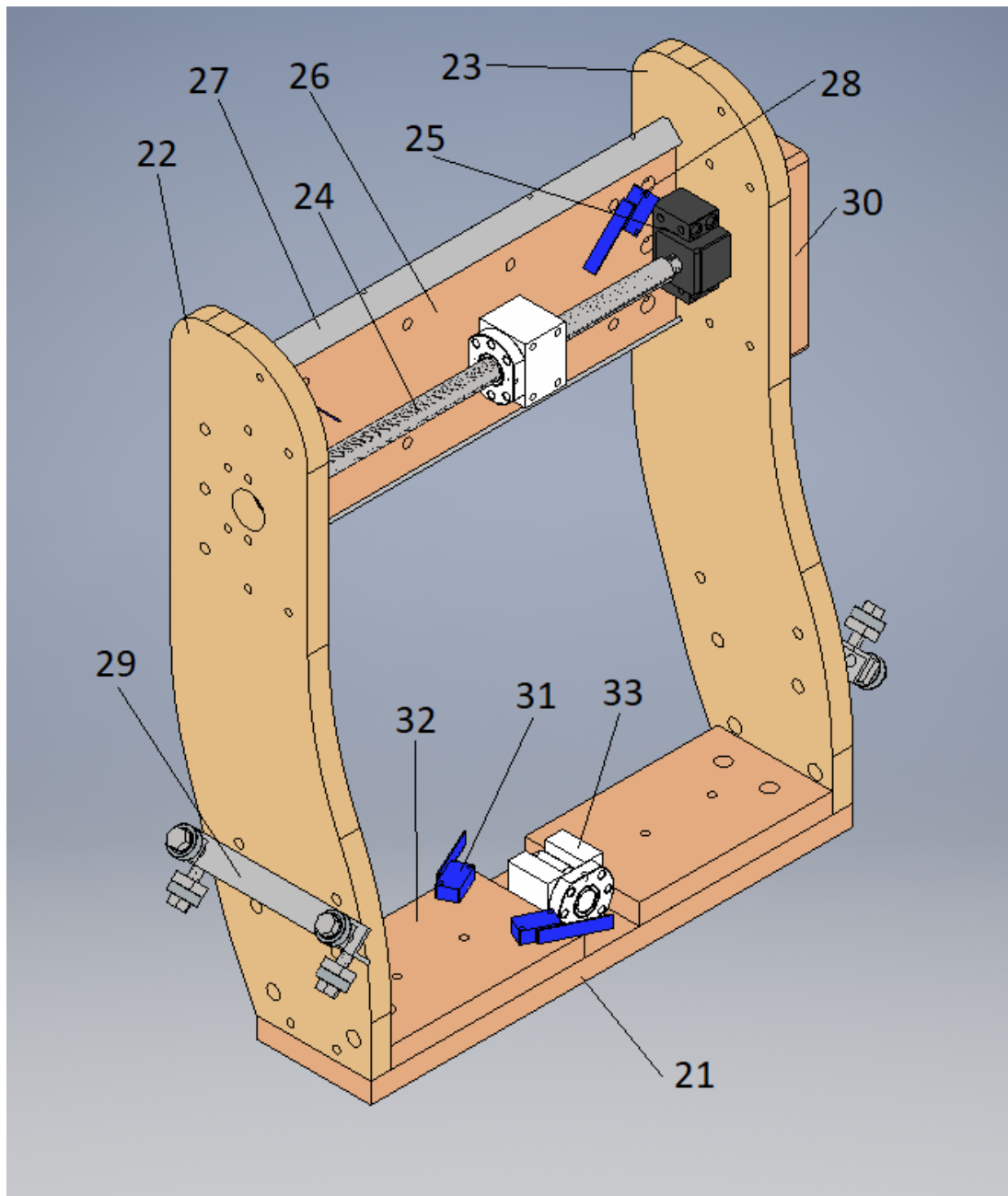


Figura 5.9: Enumeración de piezas del pórtico.

El pórtico cuenta con el soporte para que el eje Z tenga movimiento en el eje X. En la construcción se comienza por unir la pieza horizontal (21) a los 2 verticales que están a los costados (22 y 23), figura 5.10. Esta unión en un principio debe ser con un apriete leve en los pernos para permitir mover estas piezas al instalar el husillo (24) y los descansos (25).



Figura 5.10: Primera etapa en construcción del pórtico.

Luego se conecta la pieza vertical (26), donde se ubican los ángulos en que se mueven los carros del eje Z (27). En esta pieza previamente se realiza un chaflán con fresa en V de 90° , para que el ángulo de aluminio esté en contacto en todo el ancho y no solo en 1 punto, como se aprecia en la figura 5.11. No es necesario apernar o pegar estos ángulos a la pieza, ya que la presión con los carros, que se instalan más adelante, evita que se muevan.

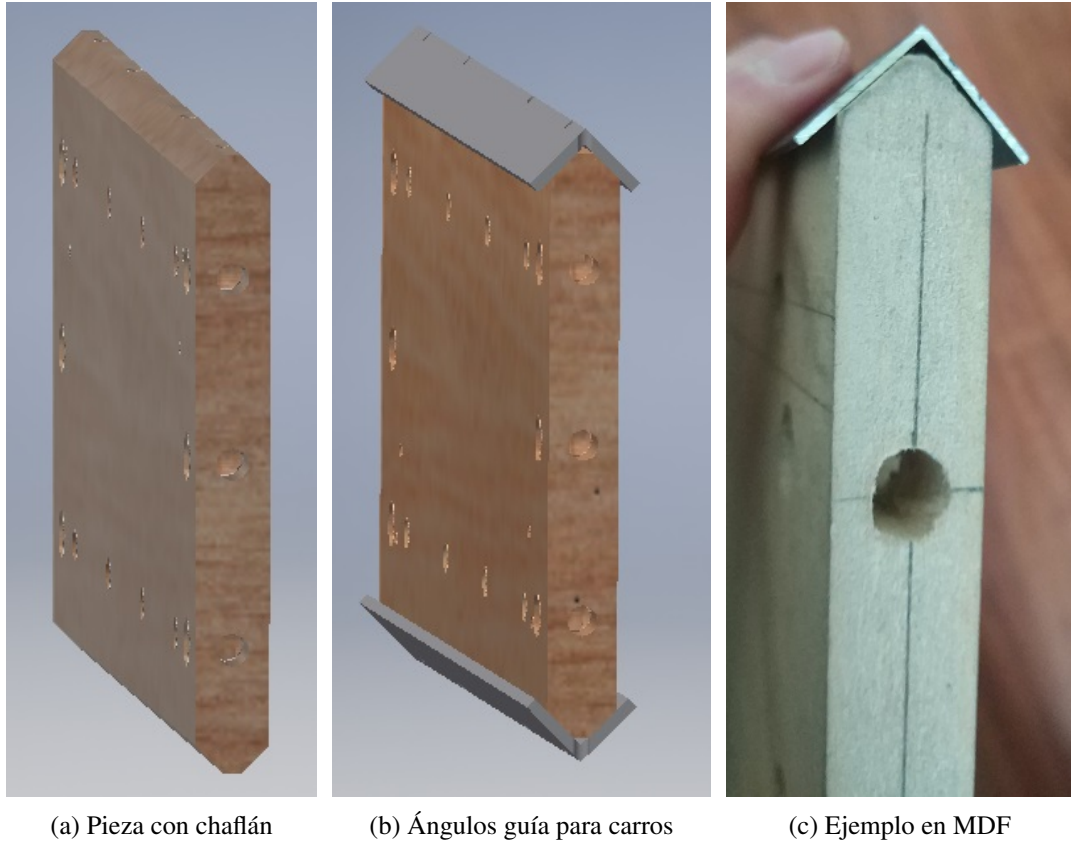
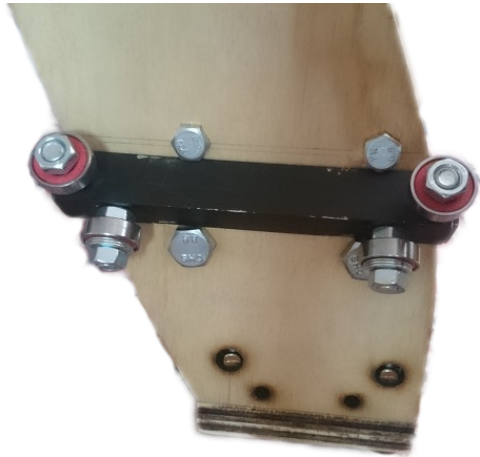
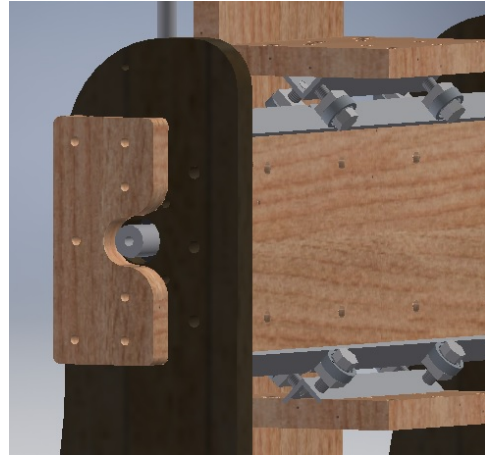


Figura 5.11: Soporte para carros del eje X.

Se ubican los límites de carrera para el eje X (28) y el paso siguiente es instalar los carros que mueven el pórtico en el eje Y (29). Esto se une con cuatro pernos, dos de 10 mm se encargan de mantener el carro a la altura correcta para luego apretarlo al pórtico con los dos restantes de 8 mm. Finalmente se instala el motor y su soporte (30). Se muestra en la figura 5.12. En la figura 5.13 se aprecia el avance hasta el momento en el pórtico.



(a) Sujeción de carro al pórtico



(b) Soporte para motor

Figura 5.12: Imágenes del pórtico.

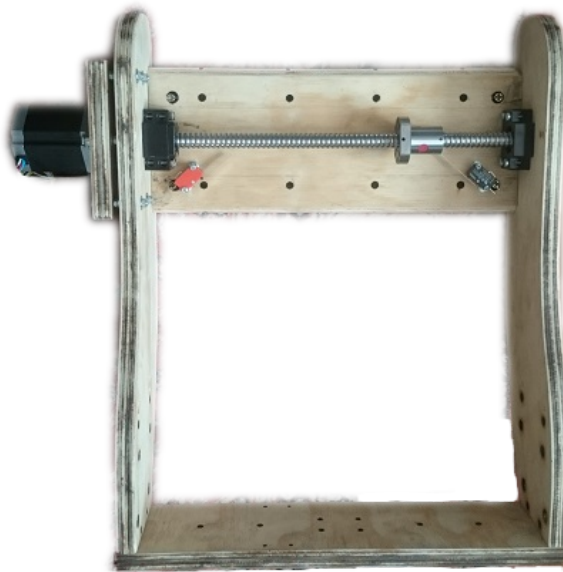


Figura 5.13: Pórtico antes de montar eje Z.

En este paso se debe volver al eje Z, instalar los carros, montar sobre los ángulos del pórtico y apretar los soportes con el eje Z. Finalmente se ubica el límite de carrera (31) con su base (32) y el porta tuercas para el eje Y (33). El diseño del pórtico terminado con el eje Z montado se presenta en la figura 5.14.

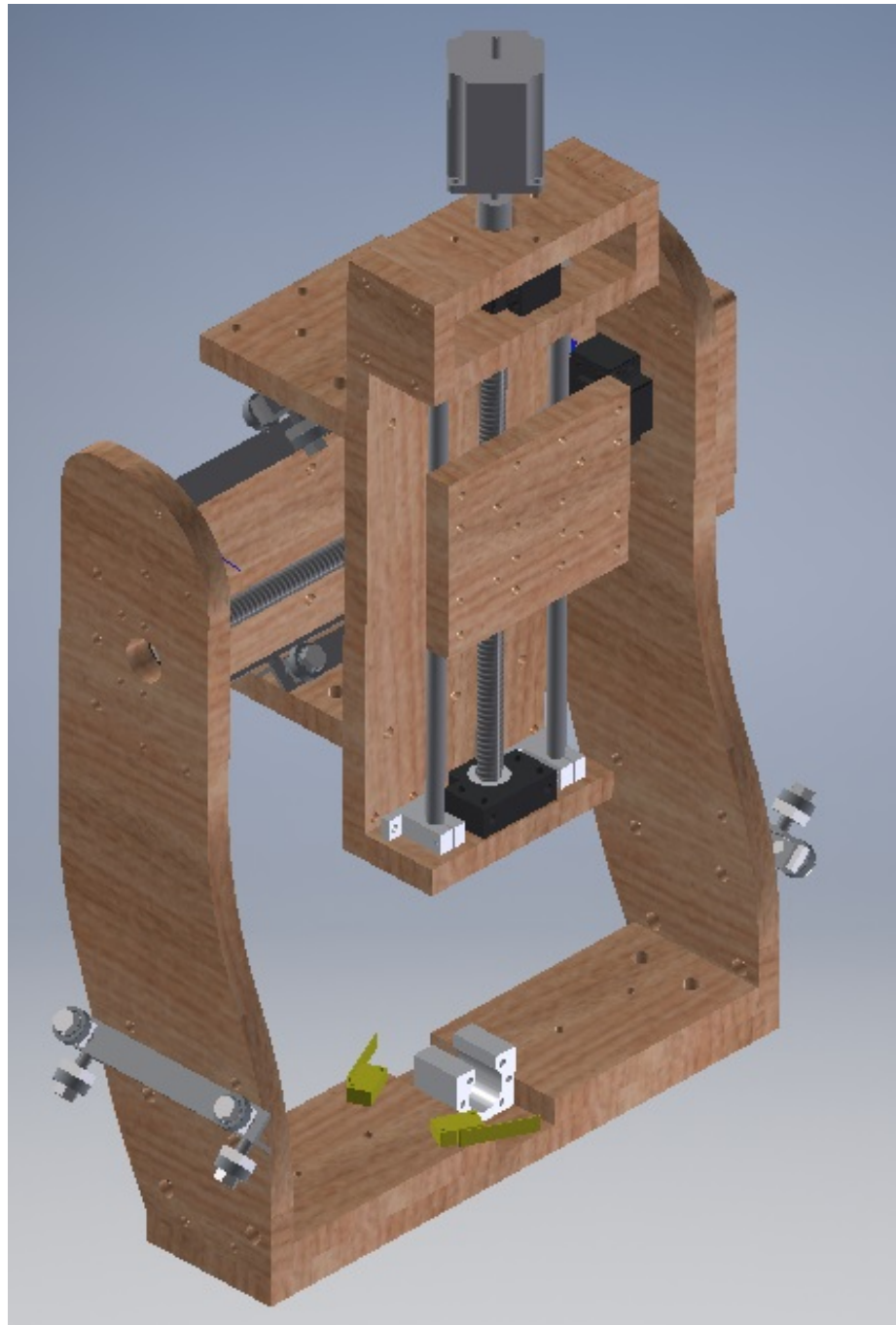


Figura 5.14: Pórtico con eje Z en CAD.

5.5. Base

A continuación se muestran los pasos para la construcción de la base, utilizando la enumeración mostrada en la figura 5.15.

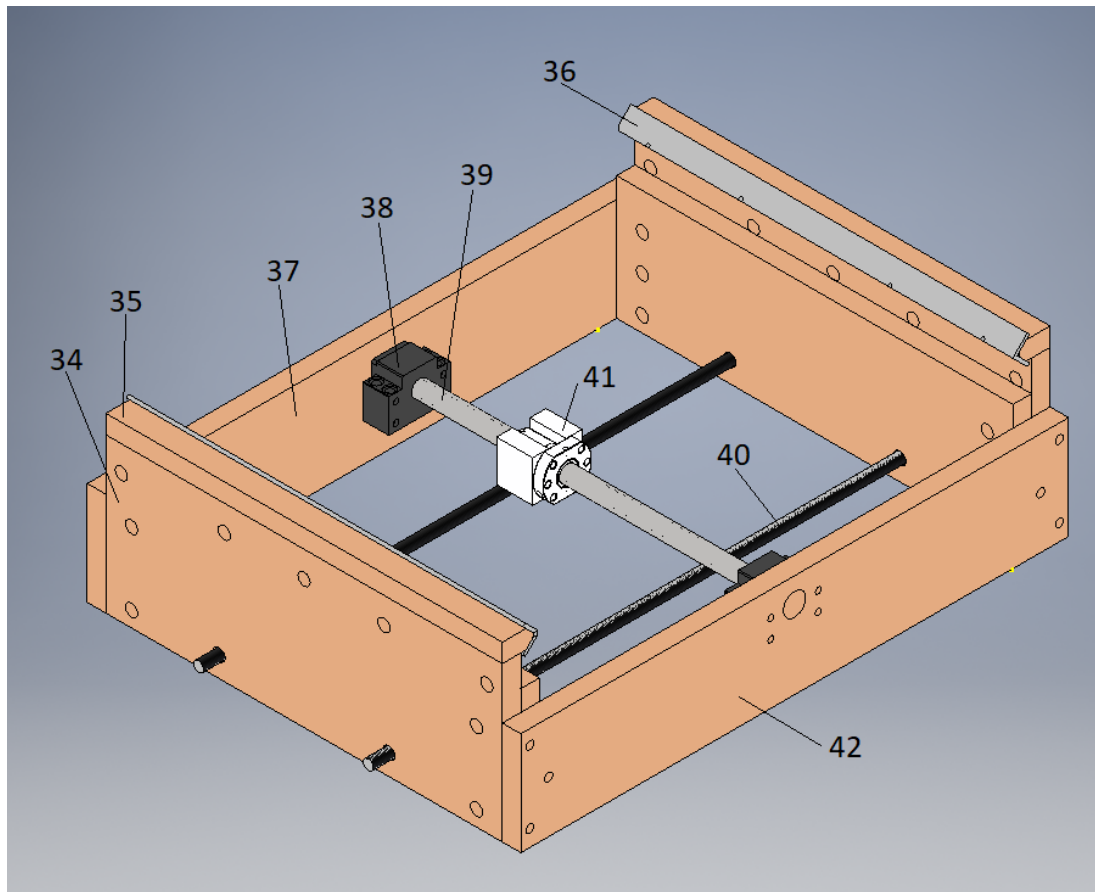
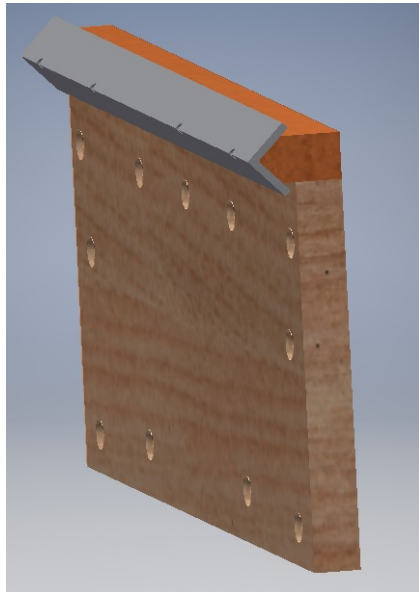


Figura 5.15: Enumeración de piezas de la base.

La base es donde se ubican el husillo y los ángulos de soporte para el movimiento en el eje Y. La construcción empieza por unir las piezas donde se instalan los ángulos (35 y 36), estas tienen un largo mayor que las partes a las que se unen (34), figura 5.16, ya que por la geometría del pórtico es necesario que esto sea así, de lo contrario, se perderían aproximadamente 50 mm de movimiento en el eje Y y no se cumpliría una de las necesidades del cliente, que es tener 200 mm de tamaño de corte en este eje. Al igual que en el caso del pórtico, no es necesario que los ángulos estén apernados a la madera, la presión con los carros es suficiente.



(a) Unión de piezas, con colores distintos para diferenciarlas



(b) Largo extra de los ángulos

Figura 5.16: Primer paso en construcción de la base.

Lo siguiente es unir las piezas de la figura anterior con la parte que sostiene el descanso (37). Luego se introduce el husillo (38 y 39), pero al estar sujeto solo en un extremo, es necesario usar un soporte temporal en la otra punta. En la figura 5.17 también se muestran 2 barras de acero que atraviesan la máquina (40), el objetivo de esto es evitar que la base se doble cuando el peso del pórtico empuje estas piezas a los lados.

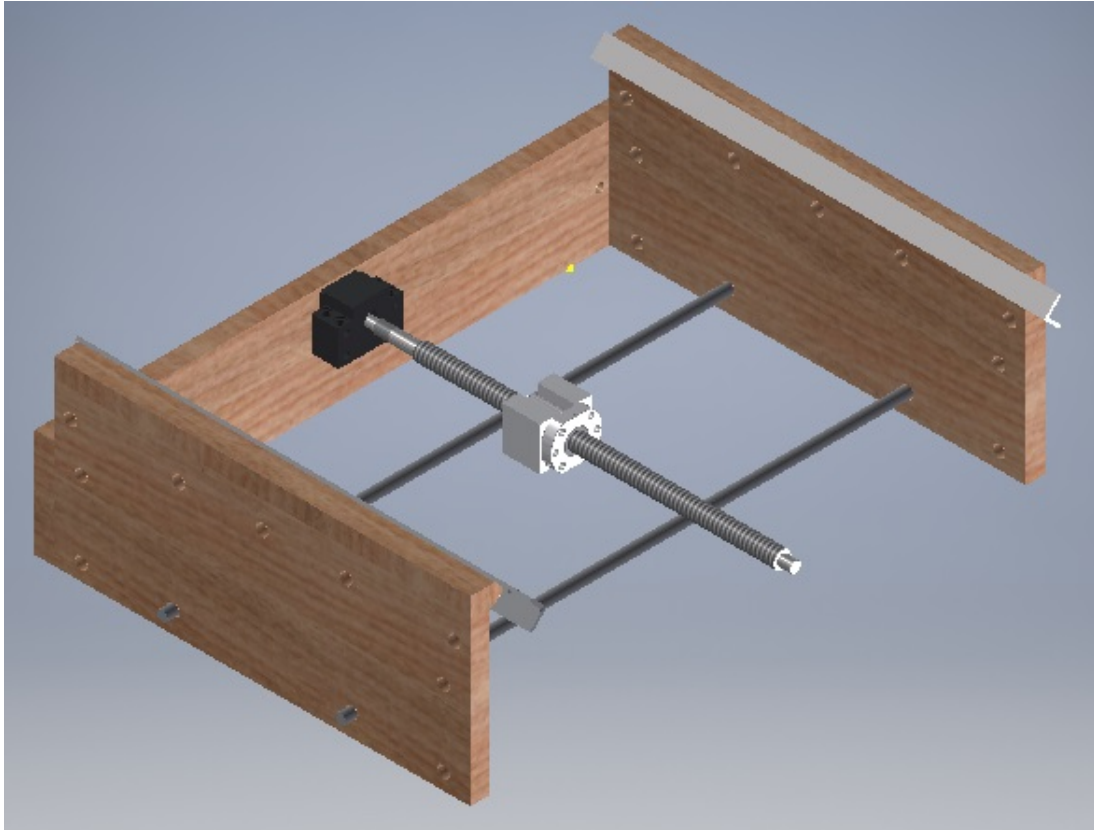


Figura 5.17: Segundo paso en construcción de la base.

A continuación, instalar el motor y el pórtico sobre la base, conectando el porta tuerca (41) con el husillo de la base (39) y manteniendo los carros alineados, como se aprecia en la figura 5.18.

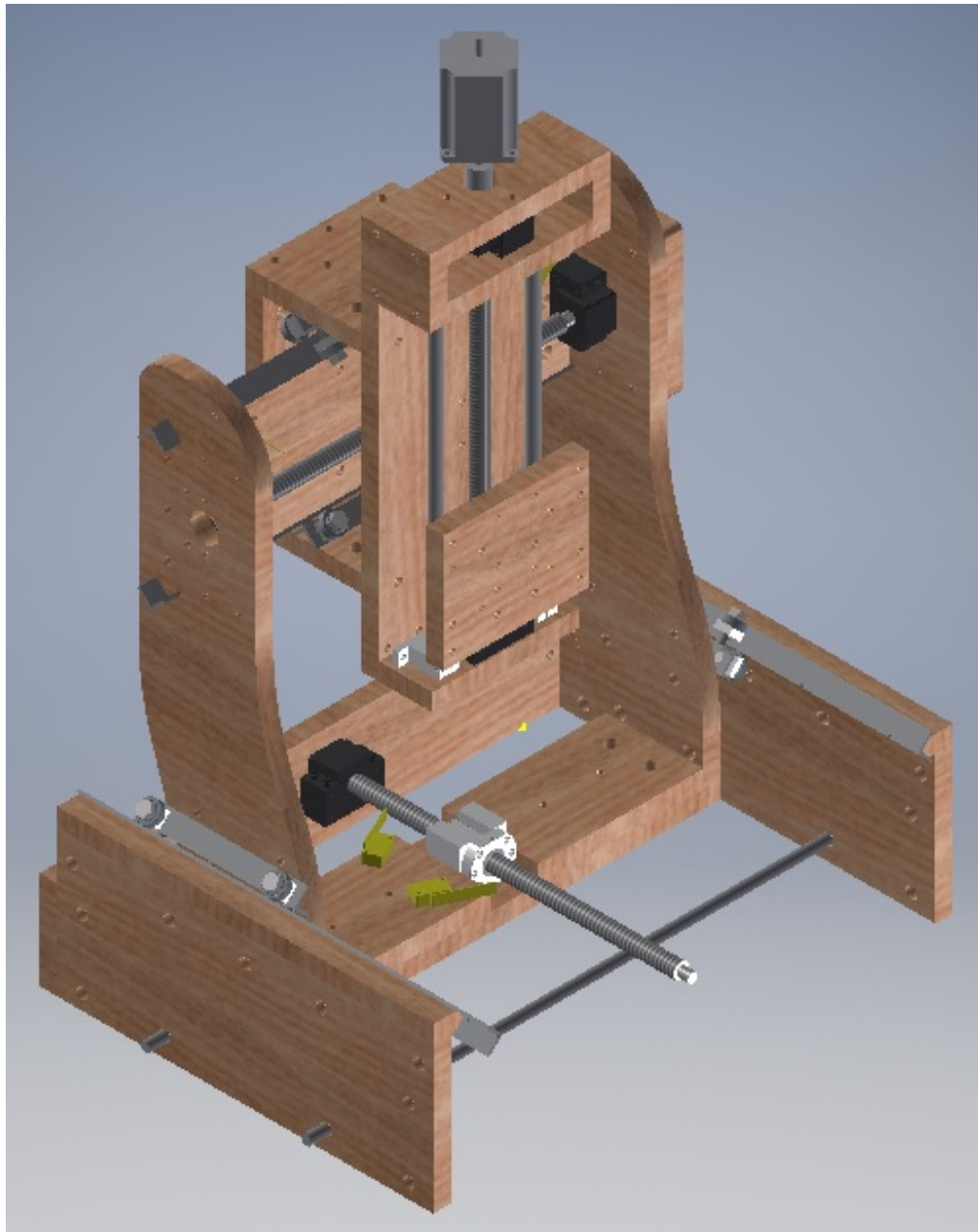


Figura 5.18: Tercer paso en construcción de la base.

Finalmente se instala la pieza final de la base con el segundo descanso del husillo (42) y la mesa donde se instalan las placas a cortar, figura 5.19.

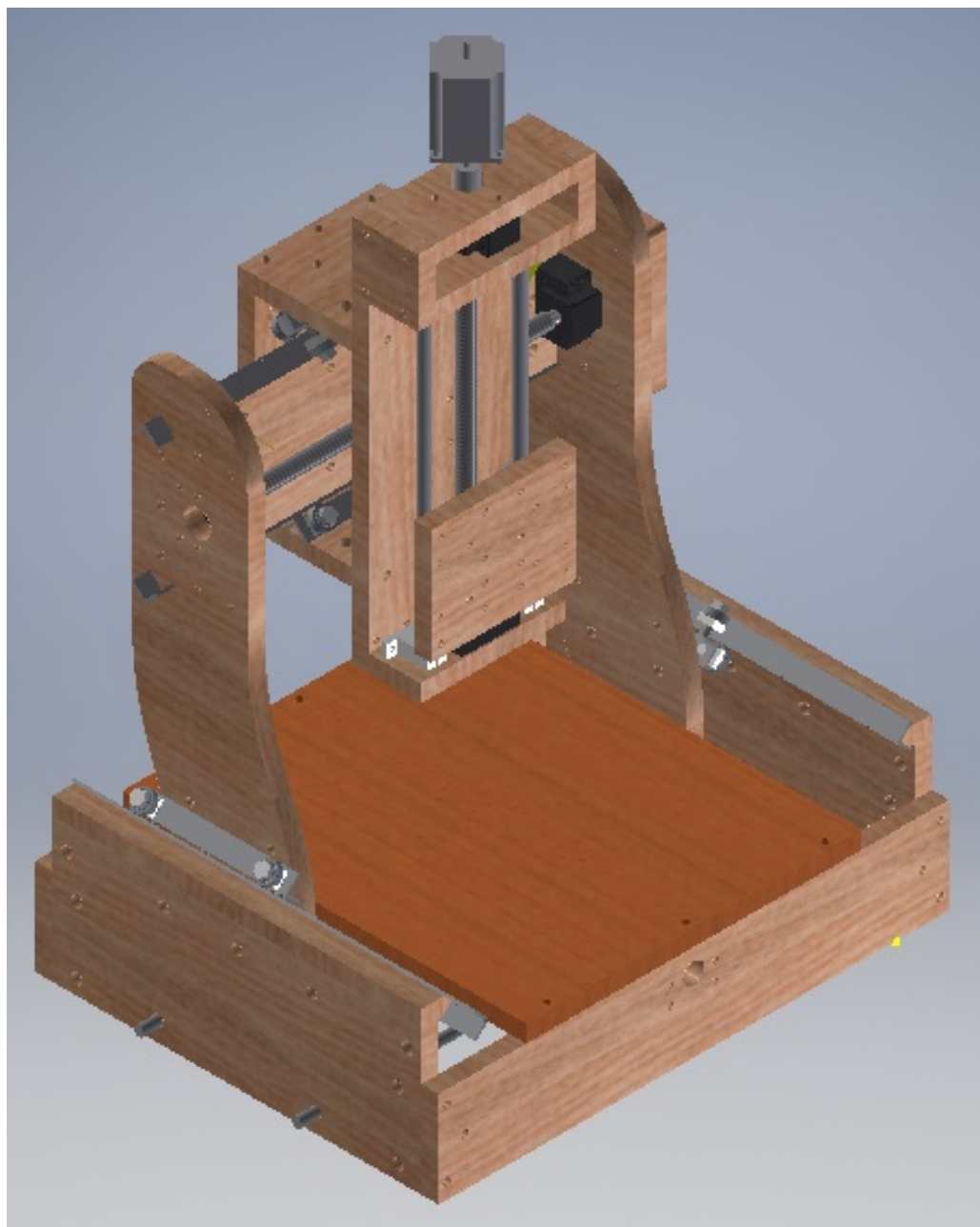


Figura 5.19: Paso final.

5.6. Final

El último paso en la construcción del prototipo, si todavía no se ha hecho, es instalar las piezas impresas (18 y 19) y montar el Dremel (20). Este paso se puede realizar en cualquier momento durante la construcción. El prototipo terminado se muestra en las figuras 5.20 y 5.21.

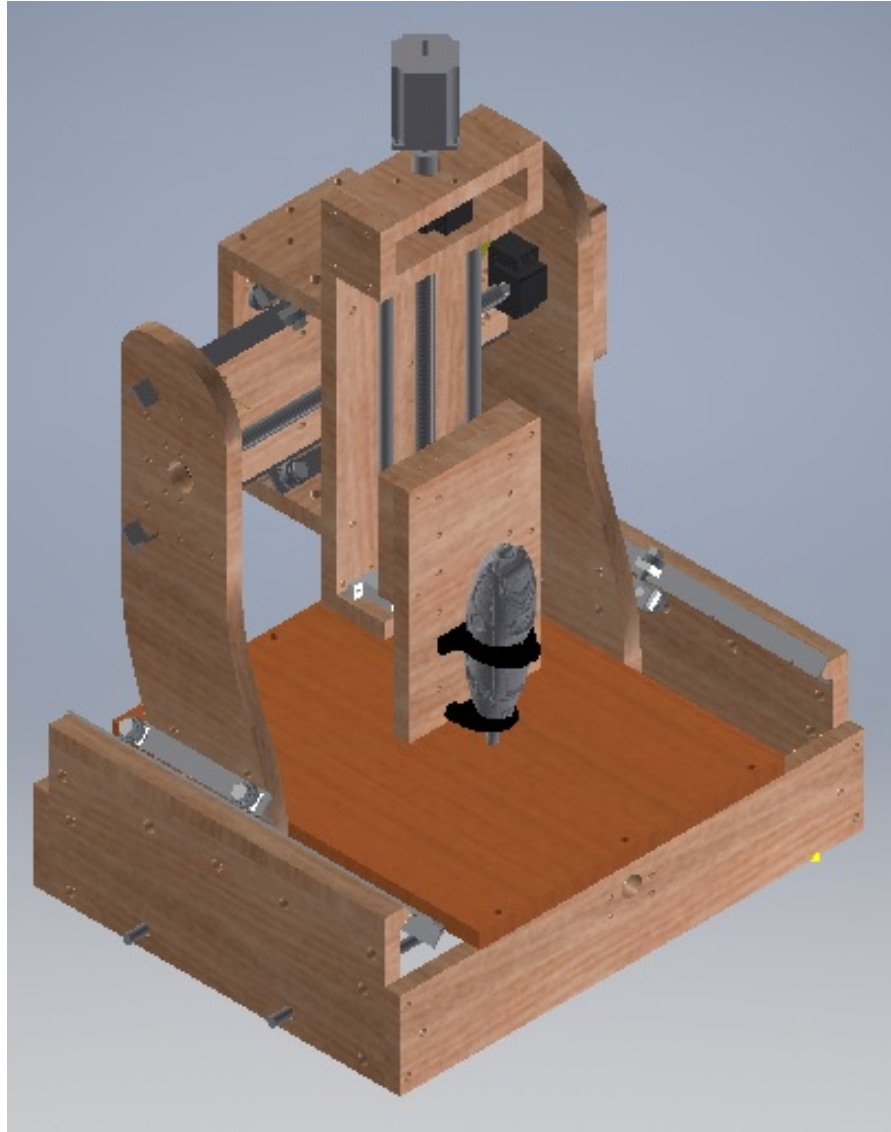


Figura 5.20: Prototipo terminado en CAD.

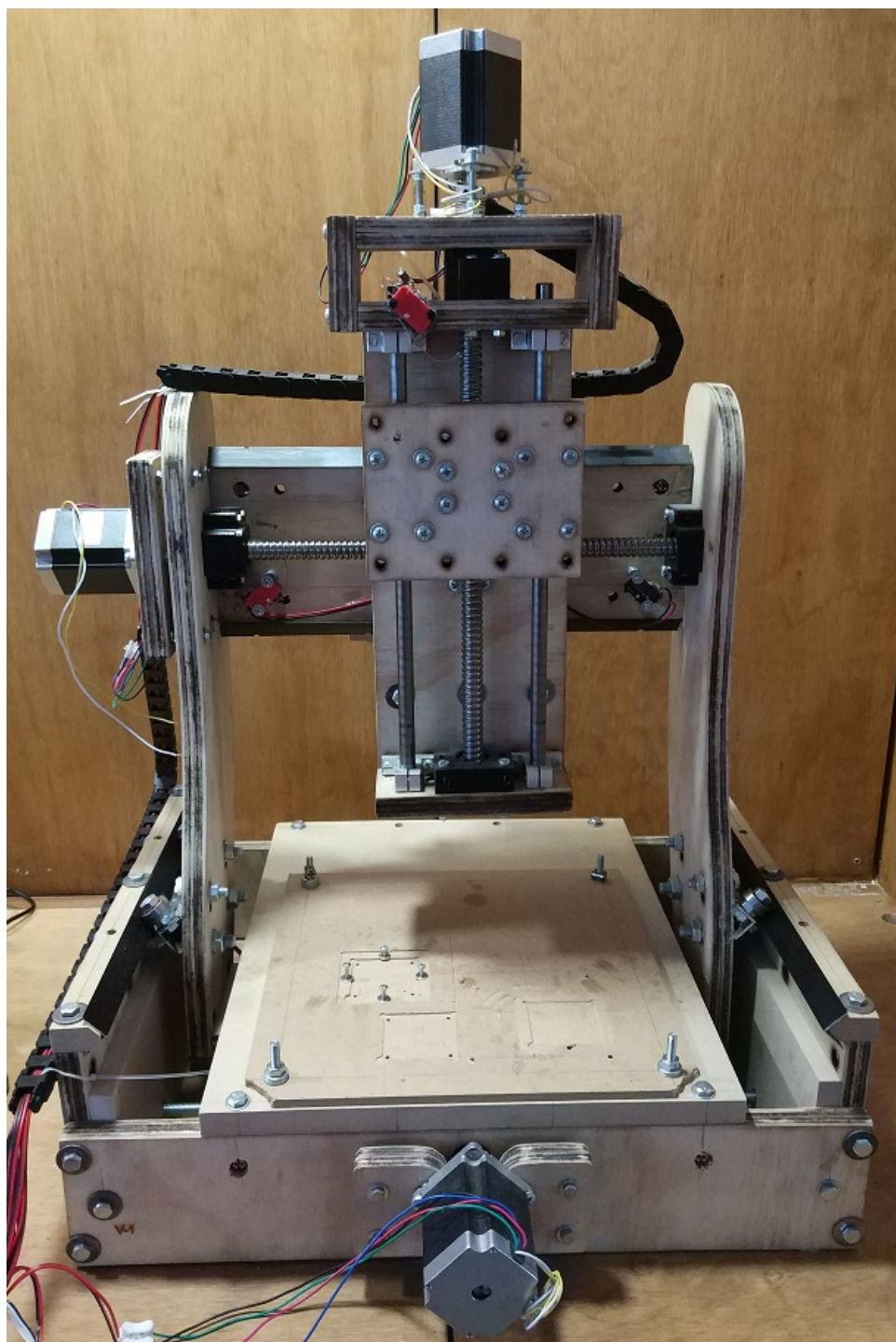
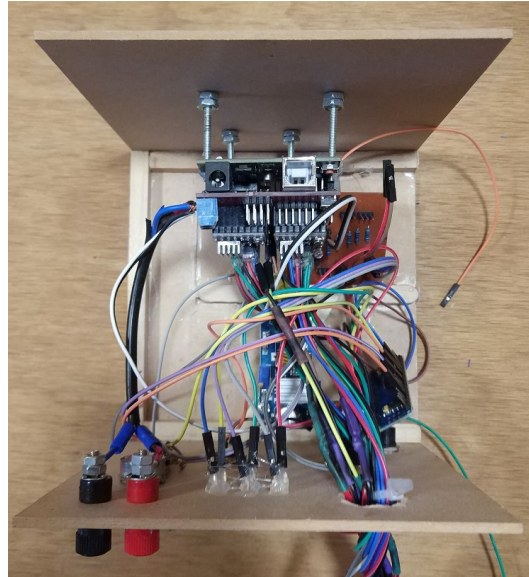


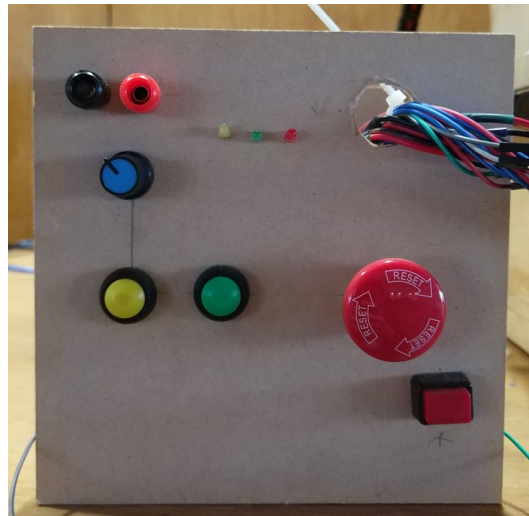
Figura 5.21: Prototipo terminado.

5.7. Componentes Electrónicos

En la figura 5.22 se aprecia la caja donde se ubican las luces de estado, controladores de los motores, botones para detener, reiniciar, continuar y de emergencia. Se utilizan placas de 15x15x3 mm en MDF y se taladran o cortan con láser los agujeros para ubicar los botones y luces.



(a) Vista superior, sin tapas laterales ni superior



(b) Vista frontal

Figura 5.22: Caja de componentes electrónicos.

Capítulo 6

Pruebas y Resultados

6.1. Pasos Previos

Con el prototipo construido, se realizan pruebas de operación para determinar si se pueden mecanizar placas de cobre.

Se utilizan las placas más comunes, de fibra de vidrio de 1.63 mm de espesor y en la superficie una capa de 70 micrómetros de cobre, lo que da un total de 1.7 mm.

Las fresas utilizadas en estas pruebas de mecanizado de PCB tienen una forma de cono (figura 6.1), en la punta está el diámetro menor y va aumentando hasta llegar al vástago. Para asegurar que todo el mecanizado se realiza con el mismo diámetro, se debe fresar siempre a la misma altura. Para obtener la mejor precisión en la determinación de altura, se realizan los siguientes procedimientos.



Figura 6.1: Fresa para grabado de PCB. Vástago de 1/8" y punta de 0.2 mm y 15°.

Lo primero es nivelar la mesa de corte, se utiliza una fresa de 1/8" de diámetro con la que se deja la superficie de la mesa a la misma altura en todo lugar. Posteriormente se ubica la placa y se fija con pernos de acero como se aprecia en la figura 6.2. Es importante que sean de acero y no de nylon u otro plástico, ya que, si los pernos y golillas no son conductores de electricidad, se deben realizar detenciones durante la siguiente medición de altura.

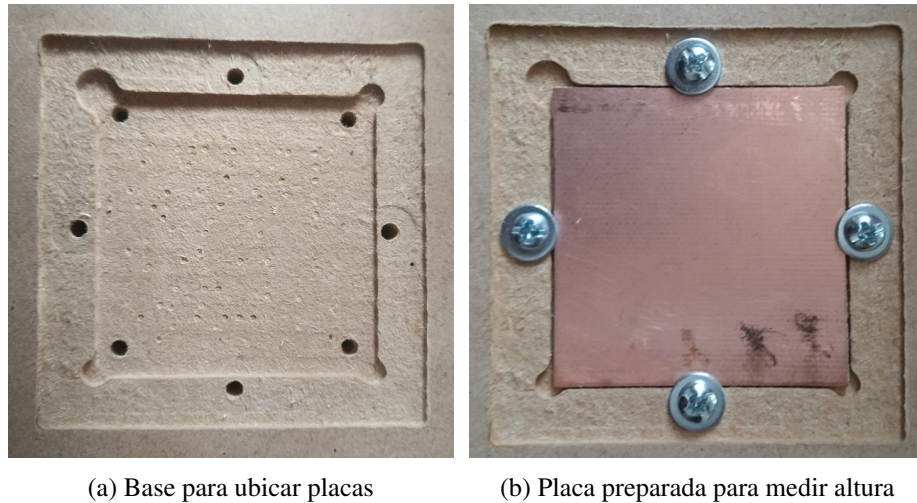


Figura 6.2: Base de placas

El diseño de esta pieza se muestra en la figura 6.3, realizado en Autodesk Inventor Professional. Para la generación y simulación del código G se empleó la extensión HSM.

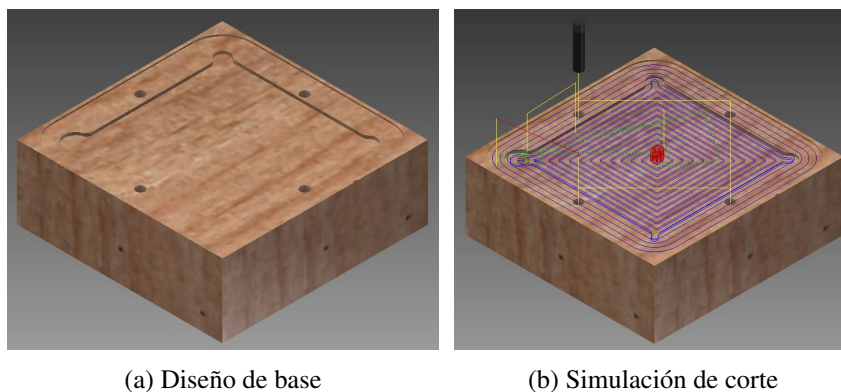
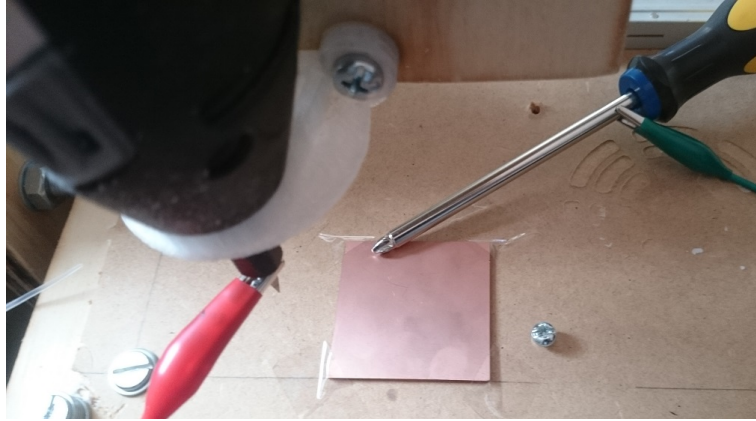
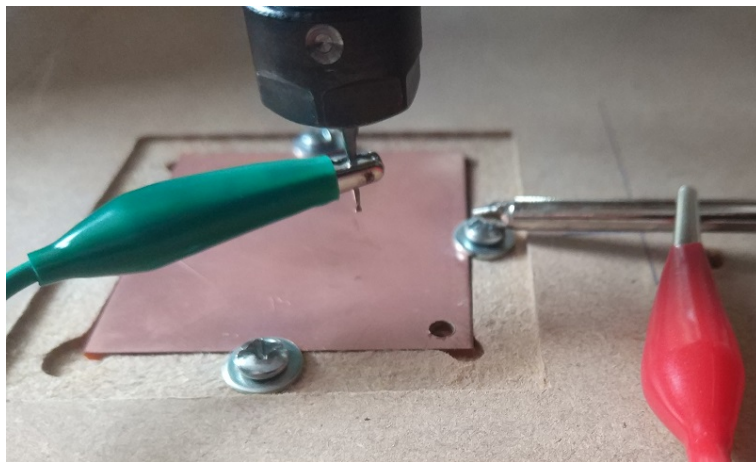


Figura 6.3: Diseño de base de placas.

En la medición de altura de puntos en la placa, se conecta un cable al pin A5 de Arduino y a la fresa, el segundo cable se conecta a GND y a la placa de cobre o algo que este en contacto con ella y que sea conductor, como los pernos de acero. Las diferencias se aprecian en la figura 6.4. En la primera donde se utiliza un desatornillador en contacto con la placa, si se deja en esa posición durante toda la medición, quedará registrada la altura del desatornillador en algunos puntos y no la de la placa.



(a) Contacto directo a la placa



(b) Contacto a través de un perno

Figura 6.4: Formas de realizar circuito.

Con este procedimiento se busca compensar las diferencias en altura que quedan al fresar la base mostrada en la figura 6.2, también las deformaciones que puede sufrir por los cambios de temperatura o humedad y los defectos de fabricación de las placas de cobre. Cuando termina la medición de altura, se debe agregar al código G del mecanizado, la simulación del corte se muestra en la figura 6.5.

Durante las pruebas realizadas, en algunas ocasiones los cables se soltaron y al hacer contacto la fresa con la placa, no se cerró el circuito. Esto provocó que las fresas se rompieran y hubiera proyección de fragmentos, por lo que es importante utilizar gafas de seguridad.

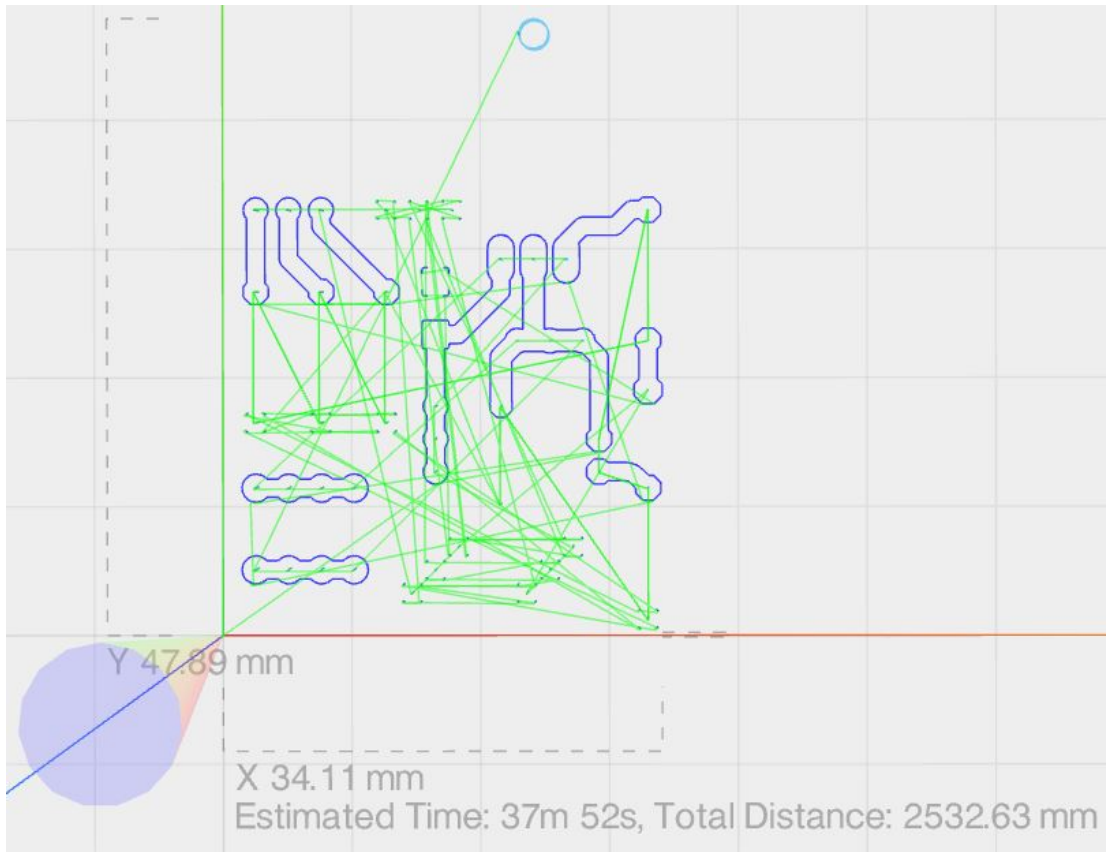


Figura 6.5: Simulación de corte de placa.

En la figura 6.5 el cono en la esquina inferior izquierda representa la fresa, las líneas azules los caminos a cortar y las verdes reposicionamiento. También incluye el área total de la placa, el tiempo estimado de corte con la velocidad de avance determinada, pero sin incluir los cambios de fresa y la distancia total que se mueve la herramienta.

6.2. Resultados

Se realizaron diversas pruebas de mecanizado, variando velocidad de avance, ancho de los caminos y profundidad de corte. Las pruebas se muestran a continuación en las figuras 6.6 a 6.10. Todas las pruebas se realizaron a 32000 RPM, profundidad de 0.13 mm y una fresa de grabado de 0.3 mm y 30°, salvo donde se indica lo contrario.

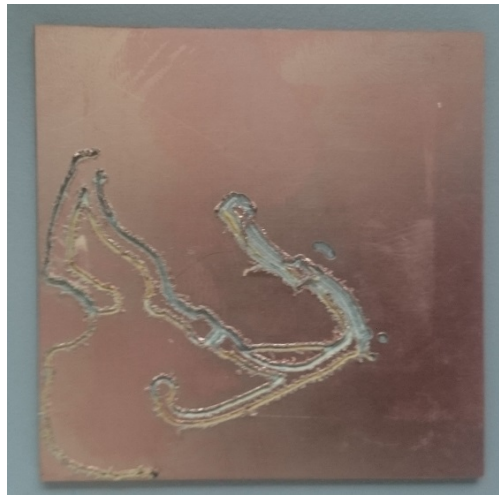


Figura 6.6: Primera prueba, antes de mecanizar la base y sin usar la medición de altura. Fresa cilíndrica de 0.8 mm, profundidad de corte 0.2 mm.

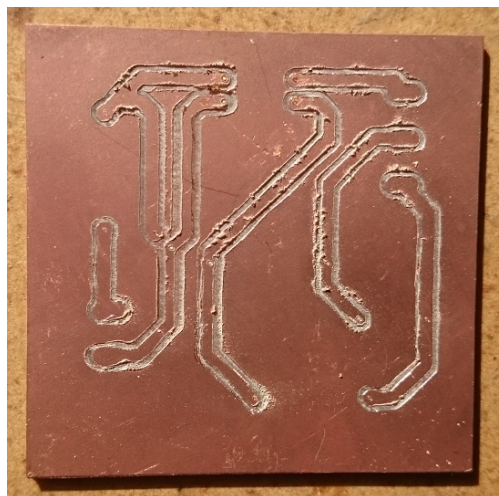


Figura 6.7: Velocidad de avance = 500 mm/min y caminos de 1 mm de ancho

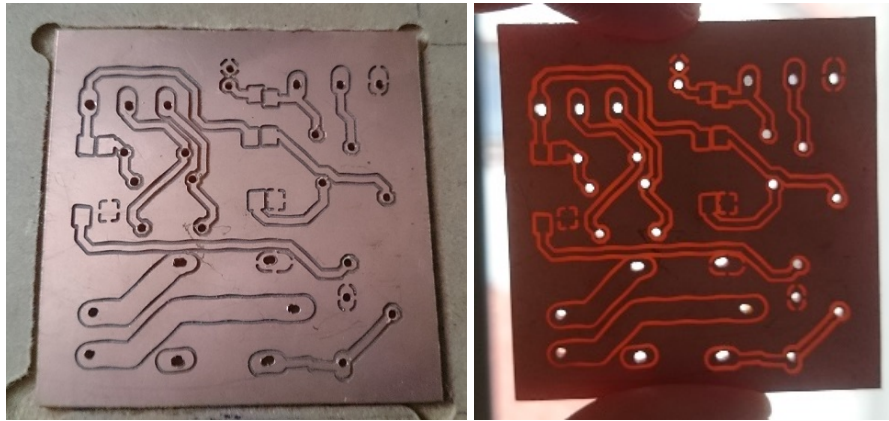


Figura 6.8: Velocidad de avance = 250 mm/min y caminos de 1 mm de ancho

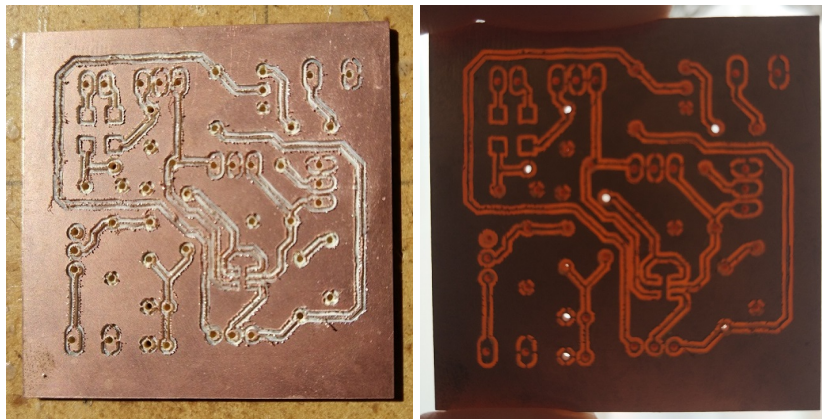


Figura 6.9: Velocidad de avance = 80 mm/min y caminos de 0.5 mm de ancho

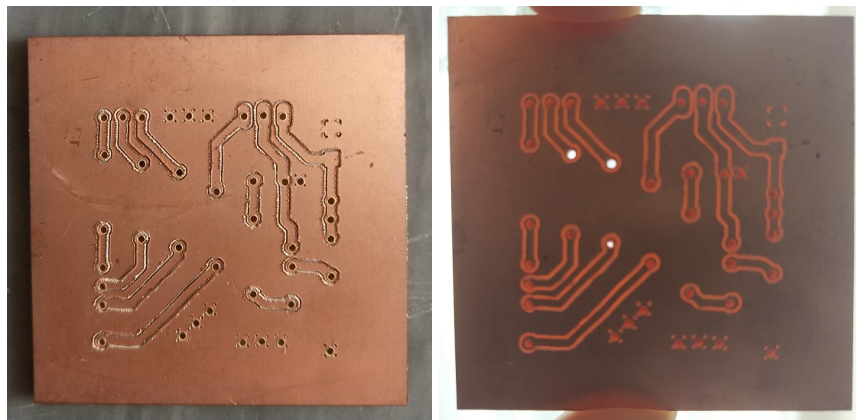


Figura 6.10: Velocidad de avance = 250 mm/min, caminos de 1 mm de ancho, 24.000 RPM, fresa de grabado de 0.1 mm.

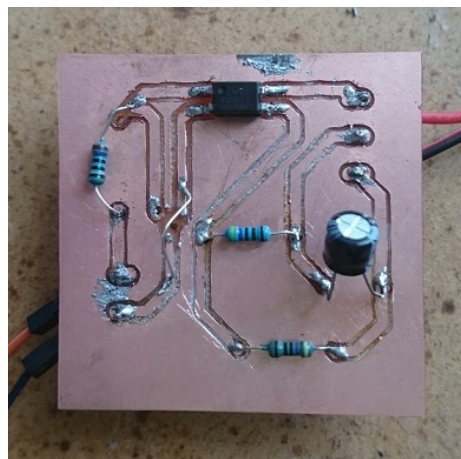
De las figuras anteriores se muestra que se cumple el objetivo de fresar placas de cobre. En las figuras 6.7, 6.8 y 6.10 se ven los caminos claramente diferenciados del resto. También se aprecia que la velocidad de avance correcta es 250 mm/min y que los caminos deben tener 1 mm de ancho, aunque es recomendable seguir realizando pruebas, ocupando distintas fresas, velocidades y profundidades para obtener mejores resultados.

En la figura 6.8 se nota que los caminos no son rectos. El soporte de la herramienta se rompió y provocó que el Dremel se moviera levemente durante el corte. Esto se arregló y como se muestra en las figuras 6.9 y 6.10, este problema disminuye.

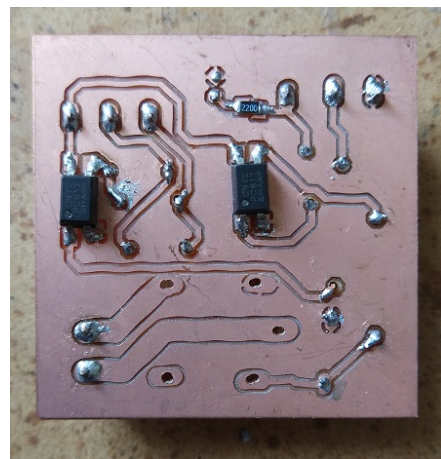
Al bajar las RPM y diámetro de la fresa, es decir, reducir la velocidad de corte, se nota que disminuye la calidad del mecanizado, esto se aprecia fácilmente al comparar las figuras 6.8 y 6.10.

La punta de la fresa de 0.1 mm usada en la figura 6.9 se rompió al comenzar la prueba, se aprecia que el mecanizado de todas formas es realizado, pero generando más rebaba que las previas.

En la figura 6.11 se muestran las placas anteriores con componentes soldados, para realizar pruebas de los circuitos y comprobar que el fresado de las placas cumplió el objetivo propuesto.



(a) Placa de figura 6.7



(b) Placa de figura 6.8

Figura 6.11: PCB con SMD y THD.

Se agrega un soporte en la estructura para aumentar la rigidez y se efectúa una nueva prueba de corte, con distintas velocidades de avance en cada rectángulo mostrado en la figura 6.12. Se aprecia que desde 350 mm/min la rebaba es más notoria y que arriba de 450 los caminos quedan cada vez más intermitentes. No se observa una diferencia considerable entre los mecanizados a menos de 250 mm/min.

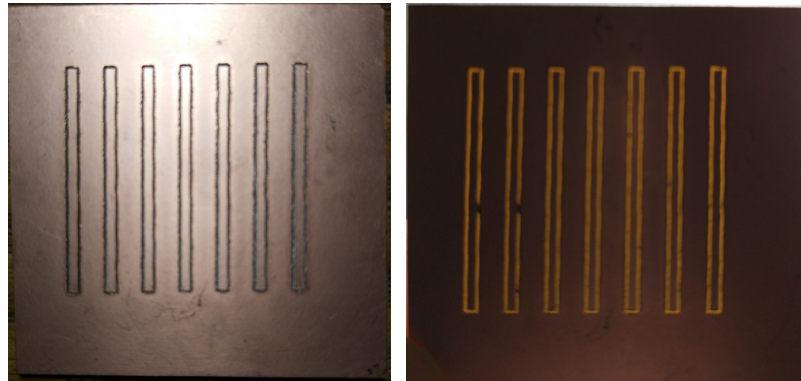


Figura 6.12: Velocidad de avance desde izquierda a derecha: 80, 150, 250, 350, 450, 550 y 750 mm/min. 32.000 RPM. Fresa de grabado 0.3mm y 30°.

En la figura 6.13 se muestra una placa fresada con los parámetros de corte ideales según las pruebas anteriores. Hay un poco de rebaba, pero todos los caminos están claramente diferenciados y se confirma haciendo pruebas de continuidad. No es posible mirar a través de todos los agujeros, ya que quedan con una pequeña capa de material que se debe romper con una aguja o clip, dependiendo del diámetro.

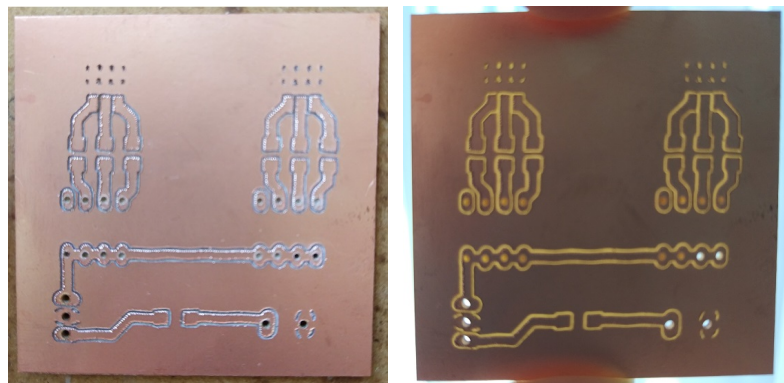


Figura 6.13: Velocidad de avance = 250 mm/min, caminos de 1 mm de ancho y 32.000. RPM

Todas las placas mostradas en las figuras anteriores son de fibra de vidrio de 50x50 mm, se prefirió usar este tamaño en las pruebas para disminuir costos.

Durante cada una de estas pruebas la máquina estuvo en operación continua por 10-60 minutos y no se detectó un aumento considerable en la temperatura de la herramientas ni en los soportes de ABS.

6.3. Revisión de especificaciones

Anteriormente se determinaron las especificaciones de diseño que debe cumplir el prototipo y en la tabla 6.1 se muestra el total cumplimiento en cada una de ellas.

Tabla 6.1: Comparación entre objetivos pedidos y obtenidos en el prototipo.

Objetivo	Pedido	Prototipo
Velocidad de desplazamiento en vacío	700 mm/min	750 mm/min
Velocidad de desplazamiento en corte	500 mm/min	750 mm/min
Temperatura de trabajo	Mayor a 25° C	28° C
Detener operación inmediatamente	300 ms con botón de emergencia	250 ms
Evitar cortocircuito	Componentes electrónicos en ubicación cerrada. IP 20.	Cumplido
Evitar contacto entre rodamientos y viruta	Rodamientos sellados	Cumplido
Bajo costo de software	Software gratuito	\$0
Bajo costo de fabricación	\$600.000	\$581.280
Tamaño máximo de piezas	600x600x10 mm	530x250x9 mm
Tamaño mínimo de corte	200x200x50 mm	200x200x140 mm
Peso	Menor a 30 Kg	25 Kg

La velocidad máxima de corte que alcanza el prototipo es la misma que alcanza en vacío, pero al mecanizar placas es recomendable utilizar una velocidad menor, como se explicó anteriormente. Solo se realizaron cortes a 750 mm/min durante el fresado de la base de madera para las placas, mostrada en la figura 6.2.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo de título se logró diseñar y construir una máquina capaz de mecanizar placas de cobre, con el fin de disminuir los costos y tiempos requeridos para obtenerlas.

El método de diseño utilizado permitió dividir este trabajo en 4 etapas: diseño conceptual, configuración, detalle y manufactura. En la primera se obtuvieron las necesidades de los usuarios, que luego fueron divididas en objetivos, restricciones y funciones. A partir de esto se determinaron las necesidades más importantes y las funciones indispensables que se deben cumplir para resolver el problema planteado.

En la generación de la arquitectura de la máquina, se realizó una comparación de distintos componentes disponibles en el mercado. A pesar de que a primera vista hay muchas similitudes entre el prototipo y una impresora 3D, existen diferencias importantes en las piezas y componentes usados. El prototipo al estar expuesto a mayores esfuerzos no puede utilizar piezas comunes en impresoras 3D que son fáciles de encontrar en Chile, como correas delgadas, motores y controladores pequeños, rodamientos lineales y husillos de 8 mm. Esto implica que algunas piezas deben ser compradas en el exterior, lo que aumenta los tiempos y costos del proyecto.

Al basar el diseño en los requerimientos funcionales, se logró desarrollar el concepto de diseño que cumple con las especificaciones necesarias como también los requerimientos de los usuarios.

Con la construcción del prototipo se consiguió fabricar PCB en minutos, en vez de días o semanas que demoran las empresas en el mercado. También se obtuvo un método de fabricación más seguro y rápido que el realizado con líquidos y ácidos que demora horas y genera gases tóxicos.

Es posible construir una máquina CNC de madera completamente funcional y que los problemas causados por cambios de temperatura o humedad pueden ser resueltos satisfactoriamente mediante software, como se demuestra con el uso de las mediciones de altura.

Se concluye que el adaptador para Dremel 3000 fabricado no es lo suficientemente resistente para el trabajo requerido, ya que se rompió 2 veces y debió ser reemplazado. Al romperse, las fuerzas de corte provocan que la herramienta se mueva y las líneas rectas horizontales quedan levemente onduladas. Esto se soluciona cambiando el diseño del adaptador o utilizando un porcentaje de relleno mayor al usado en la impresión.

Los parámetros de corte ideales para el diseño y fresado de PCB en esta máquina, obtenidos en las pruebas son:

- Caminos de 1 mm de ancho
- Velocidad de avance 250 mm/min
- Utilizar fresa para grabar de diámetro 0.3 mm y 30°
- 32.000 RPM
- Profundidad de corte 0.13 mm

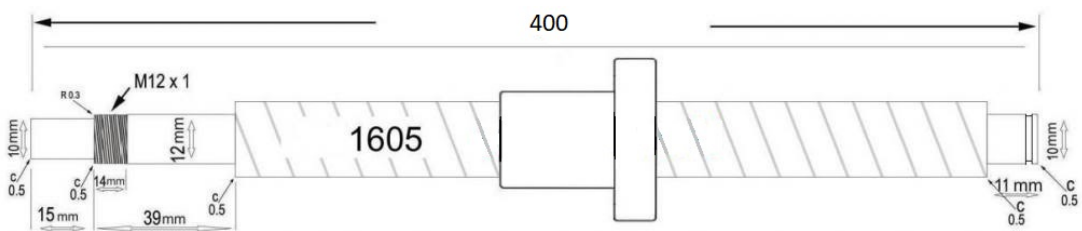
7.1. Recomendaciones

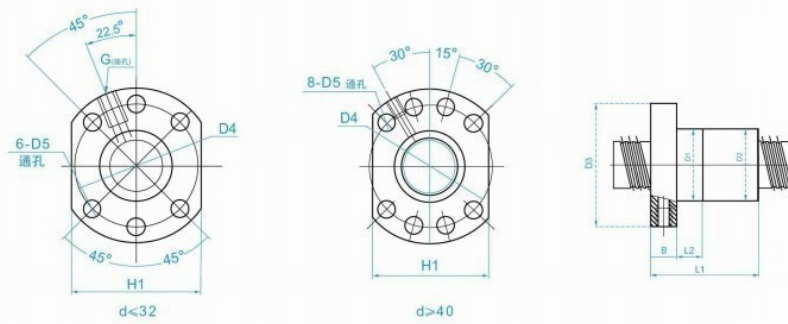
- Realizar más pruebas con fresas de distintos diámetros y geometrías, variando velocidad de avance, profundidad y RPM hasta obtener un acabado correcto en las placas, en el menor tiempo posible.
- Estudiar el uso de soldermask en la superficie de las placas.
- Reemplazar motores por unos con menor inductancia que permitan tener una velocidad mayor en vacío.
- Agregar un sistema de luces que muestre en todo momento si los cables de medición de altura están conectados, para evitar que la fresa choque con la placa y no se cierre el circuito por estar desconectados los cables, rompiendo la fresa.
- Reemplazar la herramienta por una que permita mayores RPM, para alcanzar la velocidad de corte adecuada para el cobre con fresas de diámetros menores a 0.5mm.
- Fresar con pasadas de menor profundidad, para disminuir los daños en la punta de la fresa.
- Utilizar fresas de punta esférica. A diferencia de las fresas de grabado, que son usadas principalmente en pantógrafos, las fresas de punta esférica no se dañan al taladrar y no es necesario reemplazarlas tan frecuentemente.
- En caso de querer mecanizar materiales como aluminio, es recomendado reemplazar la herramienta por una con rodamientos más resistentes.
- Utilizar una estructura de aluminio o acero para mecanizar materiales más duros y poder usar refrigerante.

Anexos

Anexo A.1 - Especificaciones de Componentes

	DRV8825	DRV8824	DRV8880	DRV8884	DRV8885	DRV8886
Vs (Min) (V)	8.2	8.2	6.5	8	8	8
Vs (Max) (V)	45	45	45	37	37	37
Number of Full Bridges	2	2	2	2	2	2
RDS(ON) (HS + LS) (mOhms)	400	1280	630	1400	860	600
RMS Output Current (A)	1.8	1.1	1.41	0.7	1	1.4
Peak Output Current (A)	2.5	1.6	2.5	1	1.5	2
Micro-Stepping Levels	32	32	16	16	16	16
Control I/F	STEP/DIR	STEP/DIR	STEP/DIR	STEP/DIR	STEP/DIR	STEP/DIR
Additional Features	1/32 Microstepping P2P w/ DRV8824	1/32 Microstepping P2P w/ DRV8825	AutoTune	Integrated Current Sensing	Integrated Current Sensing	Integrated Current Sensing
Pin/Package	28HTSSOP	28HTSSOP 28VQFN	28HTSSOP 28WQFN	24HTSSOP	24HTSSOP	24HTSSOP
Rating	Catalog	Catalog	Catalog	Catalog	Catalog	Catalog
Operating Temperature Range (C)	-40 to 85	-40 to 85	-40 to 125	-40 to 125	-40 to 125	-40 to 125

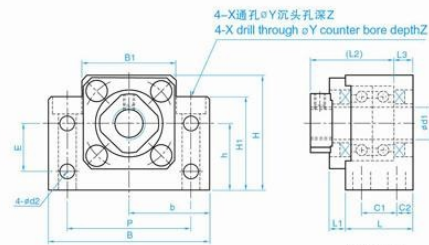




单位(Unit):mm

规格型号	公称 直径	公称 导程	钢球 直径	法兰 型式	循环 圈数	螺 母 安 装 连 接 尺 寸											额定载荷(KN)	
						D1(g6)	D ₂ ^{h7/g6}	D3	D4	D5	L1	L2	B	G	H1	动载荷 Ca	静载荷 Coa	
SFU 1204-3	12	4	2.381	d<32	3	22	21.5	42	32	4.8	35	10	8	M6	30	4	6.7	
SFU 1604-3	16	4	2.381	d<32	3	28	\	48	38	5.5	36	\	10	M6	40	4.35	9.2	
SFU 1605-3	16	5	3.175	d<32	3	28	27.8	48	38	5.5	42	10	10	M6	40	7.65	13.2	
SFU 1610-2	16	10	2.778	d<32	2(双头)	28	27.8	48	38	5.5	42	10	10	M6	40	7.36	12.75	
SFU 2005-3	20	5	3.175	d<32	3	36	35.8	58	47	6.7	42	10	10	M6	44	8.6	17.1	
SFU 2010-2 SFU 2010-3	20	10	3.175	d<32	2(双头) 3(双头)	36	35.8	58	47	6.7	42 52	10	10	M5	40	8.35	16.8	
SFU 2504-3	25	4	2.381	d<32	3	40	\	62	51	6.6	40	\	10	M6	48	9.1	26.5	
SFU 2505-3	25	5	3.175	d<32	3	40	39.5	62	51	6.6	42	10	10	M6	48	9.8	23	
SFU 2510-3	25	10	4.763	d<32	3	40	39.5	62	51	6.8	85	16	15	M6	48	8.7	20.5	
SFU 3205-3	32	5	3.175	d<32	5	50	49.5	80	65	9	55	10	12	M6	62	16.9	51	
SFU 3210-3	32	10	6.35	d<32	3	50	49.5	80	65	9	74	16	12	M8X1	62	26.1	53.1	
SFU 4005-5	40	5	3.175	d>40	5	63	62.5	93	78	9	55	10	14	M6	70	19	66.2	
SFU 4010-3	40	10	6.35	d>40	3	63	62.5	93	78	9	71	16	14	M8X1	70	30.1	71	
SFU 4020-2 SFU 4020-3	40	20	6.35	d>40	2(双头) 3(双头)	63	62.5	93	78	9	94 144	20	14	M8X1	70	40.3	98.4	
SFU 5010-4	50	10	6.35	d>40	4	75	74.5	110	93	11	95	16	16	M8X1	85	53.1	155	
SFU 6310-5	63	10	6.35	d>40	5	90	\	125	108	11	97	\	18	M8X1	95	60.7	206	
SFU 8010-5	80	10	6.35	d>40	5	105	\	145	125	13.5	101	\	20	M8X1	110	66.6	265	

丝杠支撑座 BK 固定端 Fixed Side

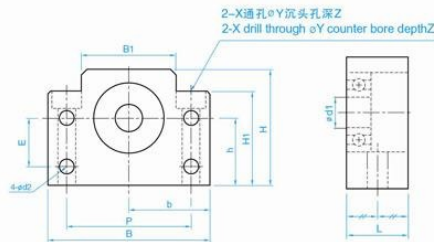


滚珠丝杠支撑座

单位(Unit) : mm

公称型号 Model No.	d1	L	L1	L2	L3	C1	C2	B	H	b ^{+0.02} ₀	h ^{+0.02} ₀	B1	H1	E	P	d2	X	Y	Z
BK 10	10	25	5	29	5	13	6	60	39	30	22	34	32.5	15	46	5.5	6.6	10.8	5
BK 12	12	25	5	29	5	13	6	60	43	30	25	34	32.5	18	46	5.5	6.6	10.8	1.5
BK 15	15	27	6	32	6	15	6	70	48	35	28	40	38	18	54	5.5	6.6	11	6.5
BK 17	17	35	9	44	7	19	8	86	64	43	39	50	55	28	68	6.6	9	14	8.5
BK 20	20	35	8	43	8	19	8	88	60	44	34	52	50	22	70	6.6	9	14	8.5
BK 25	25	42	12	54	9	22	10	106	80	53	48	64	70	33	85	9	11	17.5	11
BK 30	30	45	14	61	9	23	11	128	89	64	51	76	78	33	102	11	14	20	13
BK 35	35	50	14	67	12	26	12	140	96	70	52	88	79	35	114	11	14	20	13
BK 40	40	61	18	76	15	33	14	160	110	80	60	100	90	37	130	14	18	26	17.5

BF 支持端 Floated Side



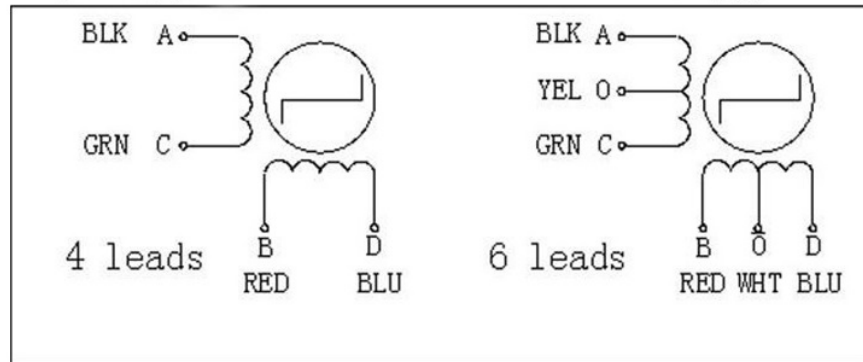
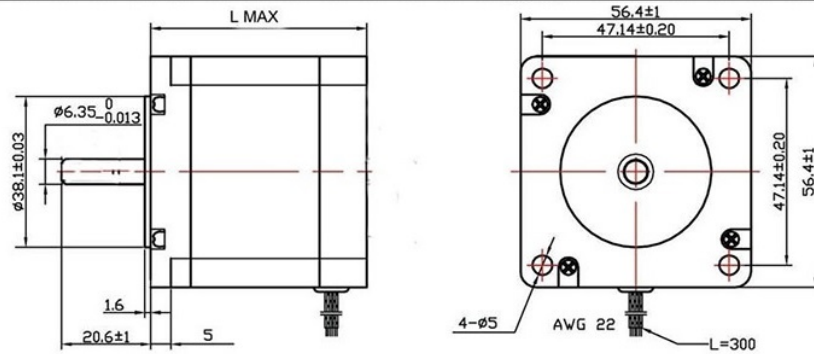
单位(Unit) : mm

公称型号 Model No.	d1	L	B	H	b ^{+0.02} ₀	h ^{+0.02} ₀	B1	H1	E	P	d2	X	Y	Z
BF 10	8	20	60	39	30	22	34	32.5	15	46	5.5	6.6	10.8	5
BF 12	10	20	60	43	30	25	34	32.5	18	46	5.5	6.6	10.8	1.5
BF 15	15	20	70	48	35	28	40	38	18	54	5.5	6.6	11	6.5
BF 17	17	23	86	64	43	39	50	55	28	68	6.6	9	14	8.5
BF 20	20	26	88	60	44	34	52	50	22	70	6.6	9	14	8.5
BF 25	25	30	106	80	53	48	64	70	33	85	9	11	17.5	11
BF 30	30	32	128	89	64	51	76	78	33	102	11	14	20	13
BF 35	35	32	140	96	70	52	88	79	35	114	11	14	20	13
BF 40	40	37	160	110	80	60	100	90	37	130	14	18	26	17.5



Basic Bearing No.	Bore d mm inch		Outer Diameter D mm inch		Width W Mm inch		Radius r mm inch		Basic Load Rating KN		Maximum Run out Speed		Weight Kg/pc
									Dynamic C	Static CO	Grease r/min	Oil r/min	
604	4	.1575	12	.4724	4	.1575	0.2	.008	0.97	0.36	43000	51000	0.002
605	5	.1969	14	.5512	5	.1969	0.2	.008	1.33	0.505	39000	46000	0.0035
606	6	.2362	17	.6693	6	.2362	0.3	.012	2.19	0.865	30000	38000	0.006
607	7	.2756	19	.7480	6	.2362	0.3	.012	2.24	0.91	28000	36000	0.008
608	8	.3149	22	.8661	7	.2756	0.3	.012	3.35	1.40	26000	34000	0.012
609	9	.3543	24	.9449	7	.2756	0.3	.012	3.40	1.45	22000	30000	0.014
6000	10	.3937	26	1.0236	8	.3150	0.3	.012	4.55	1.96	20000	28000	0.019
6001	12	.4724	28	1.1024	8	.3150	0.3	.012	5.10	2.39	19000	26000	0.021
6002	15	.5906	32	1.2598	9	.3543	0.3	.012	5.60	2.84	18000	24000	0.030
6003	17	.6693	35	1.3780	10	.3937	0.3	.012	6.80	3.35	17000	22000	0.039
6004	20	.7874	42	1.6535	12	.4724	0.6	.024	9.40	5.05	15000	19000	0.069
6005	25	.9843	47	1.8504	12	.4724	0.6	.024	10.10	5.85	13000	17000	0.080
6006	30	1.1811	55	2.1654	13	.5118	1.0	.039	13.20	8.30	12000	15000	0.116
6007	35	1.3780	62	2.4409	14	.5512	1.0	.039	16.00	10.30	10000	13000	0.155
6008	40	1.5748	68	2.6772	15	.5906	1.0	.039	16.80	11.50	8000	11000	0.185
6009	45	1.7717	75	2.9528	16	.6299	1.0	.039	21.00	15.10	7200	9000	0.231
6010	50	1.9685	80	3.1496	16	.6299	1.0	.039	21.80	16.60	6400	7800	0.250
6011	55	2.1654	90	3.5433	18	.7087	1.1	.043	28.30	21.20	5700	7000	0.362
6012	60	2.3622	95	3.7402	18	.7087	1.1	.043	29.50	23.20	5000	6300	0.385

Model	Step angel (°)	Motor Length L(mm)	Rate Voltage (V)	Rate Current (A)	Phase Resistance (Ω)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (oz.in)	Lead Wire	Rotor Inertia (g.cm2)	Detent Torque (kg.cm)	Motor Weight (kg)
23HS8610	1.8	78	8.6	1	8.6	18	287	6	480	0.68	1



Anexo A.2 - Código G

Lista de código G soportado por Grbl v1.1:

- Comandos no modales: G4, G10L2, G10L20, G28, G30, G28.1, G30.1, G53, G92, G92.1
- Movimiento: G0, G1, G2, G3, G38.2, G38.3, G38.4, G38.5, G80
- Velocidad: G93, G94
- Milímetros / pulgadas: G20, G21
- Coordenadas absolutas / relativas: G90, G91
- Modo de arco IJK: G91.1
- Modo de plano: G17, G18, G19
- Distancia de la herramienta: G43.1, G49
- Compensación de corte: G40
- Sistema de coordenadas: G54, G55, G56, G57, G58, G59
- Control: G61
- Flujo del programa: M0, M1, M2, M30
- Control de Refrigerante: M7, M8, M9
- Control de Herramienta: M3, M4, M5
- Letras validas: F, I, J, K, L, N, P, R, S, T, X, Y, Z

Anexo A.3 - Funciones GRBL

La siguiente lista no se traduce al castellano para evitar malentendidos, ya que GRBL solo se encuentra en inglés.

- \$0 – Step pulse, microseconds
- \$1 - Step idle delay, milliseconds
- \$2 – Step port invert, mask
- \$3 – Direction port invert, mask
- \$4 - Step enable invert, boolean
- \$5 - Limit pins invert, boolean
- \$6 - Probe pin invert, boolean
- \$10 - Status report, mask
- \$11 - Junction deviation, mm
- \$12 – Arc tolerance, mm
- \$13 - Report inches, boolean
- \$20 - Soft limits, boolean
- \$21 - Hard limits, boolean
- \$22 - Homing cycle, boolean
- \$23 - Homing dir invert, mask
- \$24 - Homing feed, mm/min
- \$25 - Homing seek, mm/min
- \$26 - Homing debounce, milliseconds
- \$27 - Homing pull-off, mm
- \$30 - Max spindle speed, RPM

- \$31 - Min spindle speed, RPM
- \$32 - Laser mode, boolean
- \$100, \$101 and \$102 – [X,Y,Z] steps/mm
- \$110, \$111 and \$112 – [X,Y,Z] Max rate, mm/min
- \$120, \$121, \$122 – [X,Y,Z] Acceleration, mm/sec²
- \$130, \$131, \$132 – [X,Y,Z] Max travel, mm

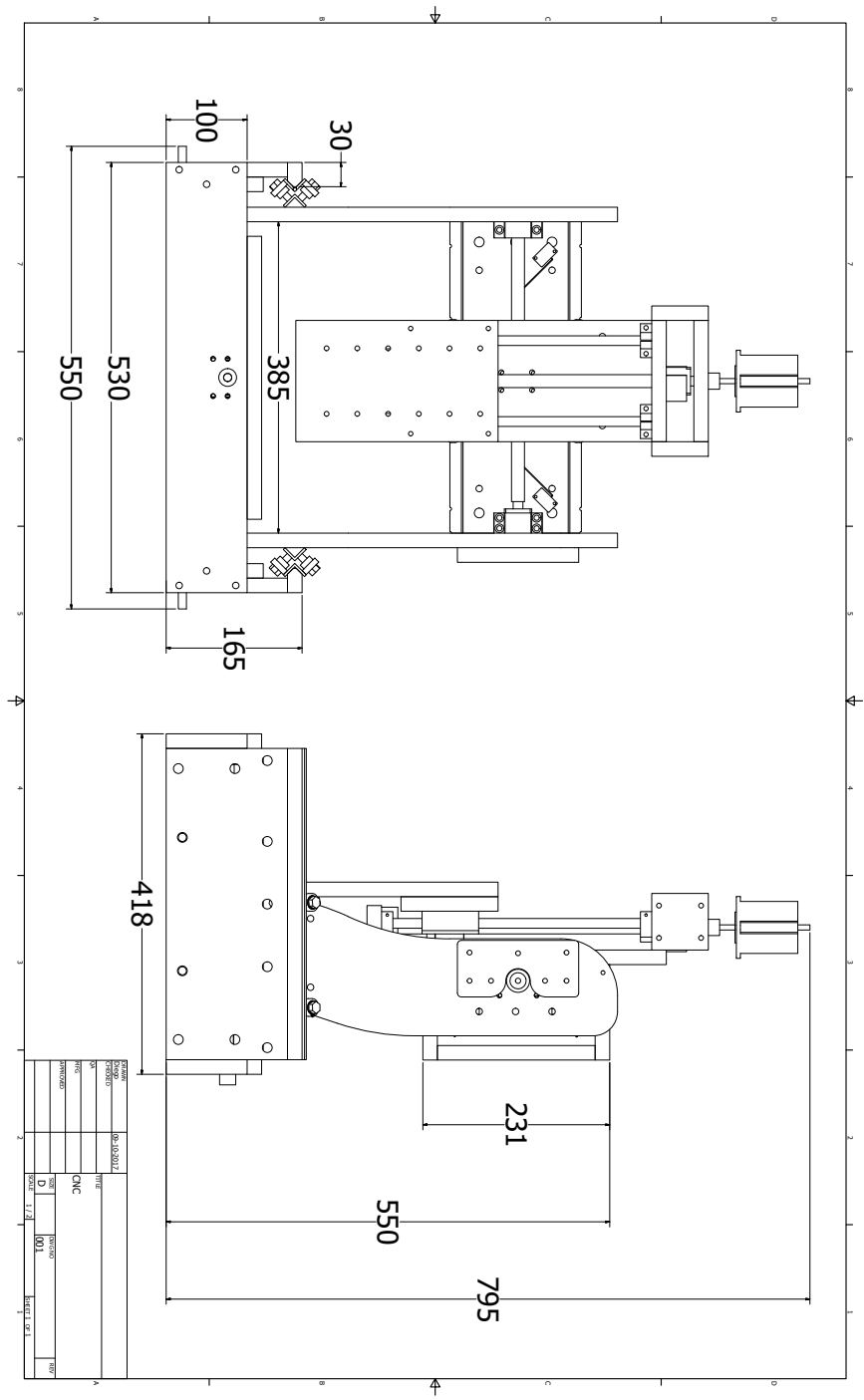
Anexo A.4 - Máquinas usadas

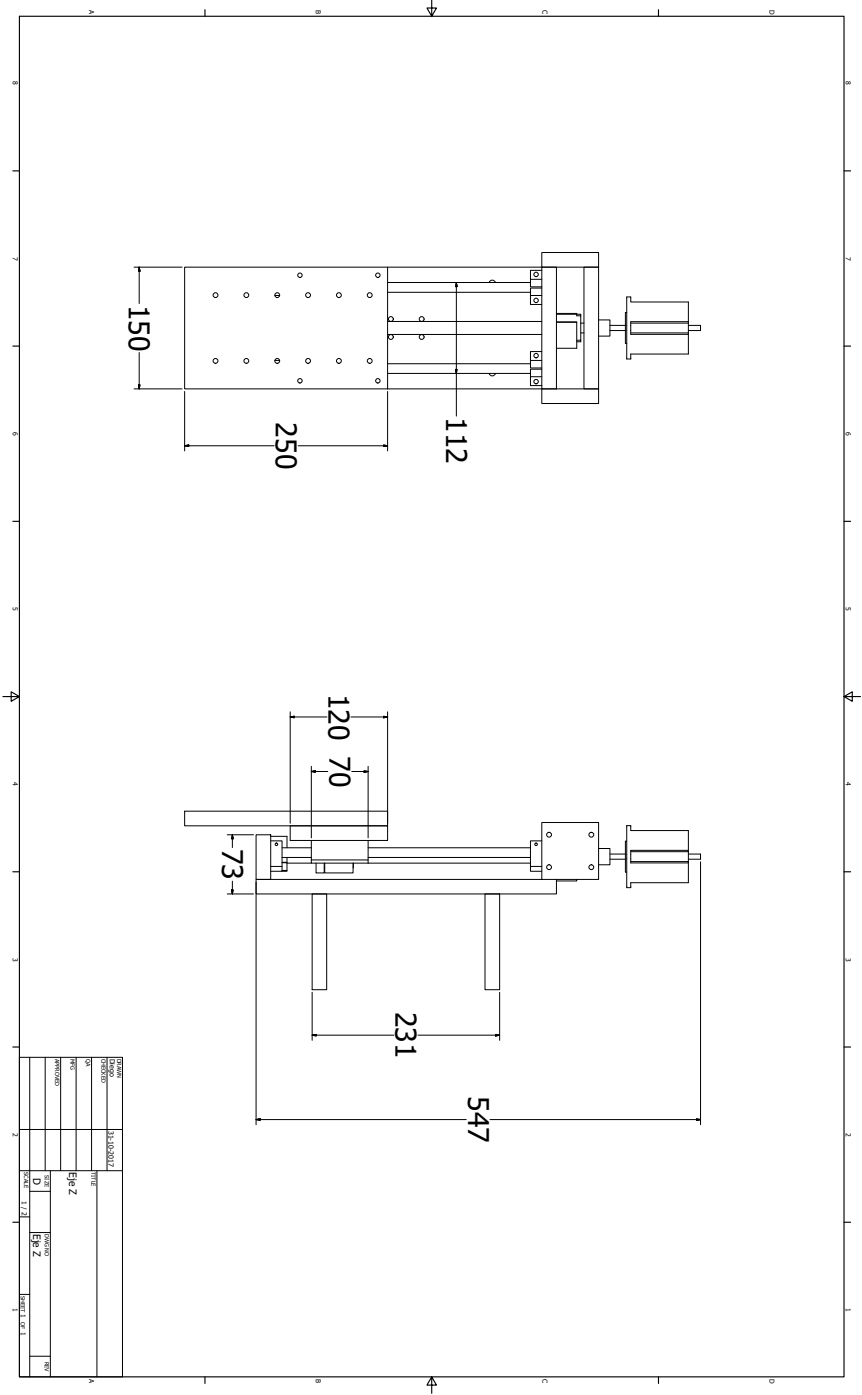
→ Datos técnicos de la serie Speedy

	Speedy 100	Speedy 300	Speedy 360	Speedy 400
Productos disponibles	Speedy 100 Speedy 100 fiber Speedy 100 flexx	Speedy 300 Speedy 300 fiber Speedy 300 flexx	Speedy 360 Speedy 360 fiber Speedy 360 flexx	Speedy 400 Speedy 400 fiber Speedy 400 flexx
Dimensiones (an x al x prf)	982 x 994 x 739 mm	1128 x 1054 x 911 mm	1221 x 1055 x 790 mm	1408 x 1070 x 960 mm
Área de trabajo	610 x 305 mm	726 x 432 mm	813 mm x 508 mm	1000 x 610 mm
Altura máx. de la pieza de trabajo	170 mm	200 mm	280 mm	305 mm
Velocidad de trabajo máx.				
Láser de CO ₂	2.8 m/seg	3.55 m/seg	3.55 m/seg	3.55 m/seg
Láser de fibra	2 m/seg	2 m/seg	2 m/seg	2 m/seg
Aceleración	4g	5 g	5 g	4 g
Potencia del láser				
Láser de CO ₂	12-60 W	12-120 W	40-120 W	40-120 W
Láser de fibra	10-30 W	10-50 W	10-50 W	10-50 W
Mesa multifuncional				
Accesorio Rotatorio	•	•	•	•
Opción bandeja de entrada				
Tecnología InPack™	•	•	•	•
Job Control® Vision		•	•	•
Tecnología Sonar™			•	•

Variant	Ultimaker Original	Ultimaker 2	Ultimaker 2 Go	Ultimaker 2 Extended	Ultimaker 3	Ultimaker 3 Extended
Release date	March 2011	September 2013	April 2015	April 2015	October 2016	October 2016
Build volume	21 cm x 21 cm x 20.5 cm	22.3 cm x 22.3 cm x 20.5 cm	12 cm x 12 cm x 11.5 cm	22.3 cm x 22.3 cm x 30.5 cm	21.5 cm x 21.5 cm x 20.0 cm	21.5 cm x 21.5 cm x 30.0 cm
Dual extrusion build volume	?		Not supported		19.7 cm x 21.5 cm x 20.0 cm	19.7 cm x 21.5 cm x 30.0 cm
Layer resolution			up to 20 microns			
Print speed			30 mm - 300 mm/s			
Travel speed			30 mm - 350 mm/s			
Filament diameter			2.85 mm recommended			
Nozzle diameter		0.4 mm swappable			0.4 mm swappable	
Operating nozzle temperature		180°C - 260°C			160°C - 280°C	
Operating heated bed temperature		50°C - 100°C		50°C - 100°C	20°C - 100°C	
Frame Dimensions	35.7 cm x 34.2 cm x 38.6 cm	35.7 cm x 34.2 cm x 38.8 cm	25.8 cm x 25.0 cm x 28.75 cm	49.3 cm x 34.2 cm x 68.8 cm	34.2 cm x 38.0 cm x 38.9 cm	34.2 cm x 38.0 cm x 48.9 cm
Printer technology			Fused Filament Fabrication (FFF)			
Software			Cura (supplied)			

Anexo A.5 - Planos





Anexo A.6 - Código pruebas

N1 G21 N2 G90 G0 X0 Y0 Z2 N3 G1 Z-0.1 F80 N4 G1 Y30 F80 N5 G1 X1.5 F80
N6 G1 Y0 F80 N7 G1 X0 F80 N8 G0 Z2 N9 G0 X5 Y0 N10 G1 Z-0.1 F150 N11 G1
Y30 F150 N12 G1 X6.5 F150 N13 G1 Y0 F150 N14 G1 X5 F150 N15 G0 Z2 N16 G0
X10 Y0 N17 G1 Z-0.1 F220 N18 G1 Y30 F220 N19 G1 X11.5 F220 N20 G1 Y0 F220
N21 G1 X10 F220 N22 G0 Z2 N23 G0 X15 Y0 N24 G1 Z-0.1 F300 N25 G1 Y30 F300
N26 G1 X16.5 F300 N27 G1 Y0 F300 N28 G1 X15 F300 N29 G0 Z2 N30 G0 X20 Y0
N31 G1 Z-0.1 F450 N32 G1 Y30 F450 N33 G1 X21.5 F450 N34 G1 Y0 F450 N35 G1
X20 F450 N36 G0 Z2 N37 G0 X25 Y0 N38 G1 Z-0.1 F555 N39 G1 Y30 F555 N40
G1 X26.5 F555 N41 G1 Y0 F555 N42 G1 X25 F555 N43 G0 Z2 N44 G0 X30 Y0 N45
G1 Z-0.1 F750 N46 G1 Y30 F750 N47 G1 X31.5 F750 N48 G1 Y0 F750 N49 G1 X30
F750 N50 G0 Z20 N51 G0 X0 Y0

Bibliografía

- [1] Nigan Bayazit. Investigating design: A review of forty years of design research. *Design issues*, 20(1):16–29, 2004.
- [2] Catalogo Online Olimex MCI Ltda. https://www.olimex.cl/en_US/page/pcb#iframe_1/, 2017.
- [3] Lee W Ritchey and Speeding Edge. A survey and tutorial of dielectric materials used in the manufacture of printed circuit boards. *Speeding Edge, Circuitree Magazine*, 1999.
- [4] Wencai Ren and Hui-Ming Cheng. The global growth of graphene. *Nature nanotechnology*, 9(10):726–730, 2014.
- [5] Hsiang-Chen Hsu, Shih-Jeh Wu, Feng-Jui Hsu, Meng-Chieh Weng, and Shen-Li Fu. Electrochemical migration failure on fr-4 pcb by hygro-thermo-vapor pressure coupled analysis. In *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2013 8th International*, pages 166–169. IEEE, 2013.
- [6] Design standard series for printed boards, ipc-2220.
- [7] T. Bailey H. Durrant-Whyte. Simultaneous localization and mapping: part i. 13:99–110, 2006.
- [8] Hoja de datos de seguridad de productos.
- [9] Velocidad de corte en cobre. https://www.itc-ltd.co.uk/wp-content/uploads/2015/11/milling_speeds_and_feeds.pdf/, 2016.

- [10] Velocidad de corte en cobre. <http://www.rockrivertool.com/documents/milling-speeds-and-feeds.pdf/>, 2017.
- [11] RPM de herramienta. <http://www.mitspcb.com/edoc/spindle.htm/>, 2014.
- [12] Preguntas frecuentes importaciones, Aduanas Chile. <https://www.aduana.cl/importaciones-de-productos/aduana/2007-02-28/161116.html/>, 2016.
- [13] Router Feed Rate and Spindle Speed Estimator for PCB. http://www.getecha.com/content/uploads/Articles/Feeds_and_Speeds_Suggested_2.pdf/, 2017.
- [14] Wei Huang, David Pommerenke, Jiang Xiao, Dazhao Liu, Jin Min, Giorgi Muchaidze, Soonjae Kwon, and Ki Hyuk Kim. A measurement technique for esd current spreading on a pcb using near field scanning. In Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009. IEEE International Symposium on, pages 18–23. IEEE, 2009.
- [15] Mechanical Fabrication of Printed Circuit Boards (PCB). http://www.precisebits.com/tutorials/pcb_mech_etch.htm/, 2016.
- [16] Dumitru Olaru, George C Puiu, Liviu C Balan, and Vasile Puiu. A new model to estimate friction torque in a ball screw system. Product Engineering, Springer Netherlands, page 333, 2004.
- [17] WT Townsend and JK Salisbury. The efficiency limit of belt and cable drives. ASME J. Mech., Transm., Autom. Des, 110(3):303–307, 1988.
- [18] Adaptador Dremel 3000. <https://www.thingiverse.com/thing:1057649/>, 2015.
- [19] Movimiento de GRBL. <https://github.com/Protoneer/GRBL-Arduino-Library/blob/master/stepper.cpp/>, 2012.