



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

ÍNDICE GENERAL:

DOCUMENTO N°1: MEMORIA Y ANEXOS.....	3
DOCUMENTO N°2: PRESUPUESTO.....	85
DOCUMENTO N°3: PLANOS.....	89



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

DOCUMENTO N°1: MEMORIA Y ANEXOS

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN DEL TRABAJO	9
1.1. Circuitos impresos	9
1.2. Historia de las impresoras 3D.....	10
1.3. Objetivos	12
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS	13
2.1. Hardware.....	13
2.1.1. Impresoras 3D	13
2.1.2. Fresadora y Taladro.....	15
2.1.3. Otros Materiales.....	18
2.2. Software	20
2.2.1. Software de control de la Impresora 3D	20
2.2.2. Software para desarrollo de PCB.....	21
CAPÍTULO 3: PUESTA EN MARCHA DE LA IMPRESORA 3D	23
3.1. Revisión del hardware 3D.....	23
3.2. Puesta en marcha del software 3D	29
3.2.1. Calibración del Firmware Marlin.	29
3.2.2. El software de impresión Cura	33
3.3. Graduaciones finales de la impresora	35
3.4. Recomendaciones de impresión	36
3.5. Fuentes de modelos 3D:.....	39
CAPÍTULO 4: ADAPTACIONES PARA ELABORAR PCB.....	41
4.1. Diseño de las piezas necesarias.....	41
4.1.1. Diseño del cabezal.....	41
4.1.2. Diseño de los soportes	45
4.1.3. Diseño de otras piezas necesarias.....	47

4.2. Impresiones realizadas	49
CAPÍTULO 5: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS	55
5.1. Elaboración de un circuito simple para las pruebas.....	55
5.1.1. Elaboración del esquema de un circuito	55
5.1.2. Creación del brd	56
5.1.3. Archivos Gerber y Excellon.....	56
5.2. Realización de las instrucciones G-Code.	57
5.2.1. GCodes para fresado	58
5.2.2. Gcodes para ataque por ácido	62
5.3. Elaboración de la placa.....	64
5.3.1. Elaboración por fresado	66
5.3.2. Elaboración por ataque de ácido.....	69
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	73
ANEXO I: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS IMPRESORAS	75
ANEXO II: CONEXIONES Y PINES DE LA RAMPS 1.4:	77
Referencias	79

RESUMEN

El presente trabajo plantea la puesta en marcha del software de una impresora 3D para su posterior adaptación en la automatización del proceso de fabricación de PCB (Printed Circuit Board) enfocado a prototipos. Para ello se ha seleccionado el modelo de impresora 3D Prusa i3 de hardware libre y se ha empleado una multiherramienta de fresado/taladrado.

En primer lugar, en el capítulo 1 se determina cuál es la motivación del estudio. A continuación, el capítulo 2 expone todos los materiales y software que se ha utilizado durante la realización del trabajo.

El capítulo 3 presenta la reparación, calibración y puesta en marcha de una impresora 3D. En esta parte del trabajo también se hablará de los problemas más usuales, sus posibles soluciones y orientaciones para su buen uso. Asimismo, se busca hacer un compendio de toda la información útil que se encuentra en la red de forma muy dispersa o difícil de encontrar. Del mismo modo, se completa dicha información desde la experiencia adquirida al poner en funcionamiento dos impresoras (Prusa i2 y Prusa i3) ya montadas, pero aún no funcionales, y del montaje y puesta en marcha de una tercera (Prusa i3).

Acto seguido, una vez puesta en funcionamiento la impresora 3D, el capítulo 4 y 5 desarrollarán la adaptación de ésta. El objetivo es que sea capaz de elaborar un circuito impreso simple mediante fresado sin perder la funcionalidad de imprimir.

Concretamente, en el capítulo 4 se diseñan e imprimen las piezas de plástico necesarias tanto como para fijar la herramienta de fresado en la impresora como para sujetar las placas de cobre.

Finalmente, en el capítulo 5 a partir de un circuito de prueba se generan los archivos necesarios para plasmarlo en una placa de cobre. Se detalla el proceso de obtener las órdenes GCode que dictan la trayectoria de la impresora 3D así como los programas para controlar a ésta durante el proceso.

Por último, cabe destacar que los ensayos realizados han demostrado que la utilización de la impresora 3D en la elaboración de PCB es un procedimiento viable, aunque los resultados obtenidos puedan ser muy mejorables. Por ese motivo se ha propuesto una modificación alternativa, tal como elaborar PCB por marcaje de las pistas mediante un rotulador indeleble para su posterior ataque por ácido, con lo que se han obtenido mejores resultados.

CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN DEL TRABAJO

1.1. Circuitos impresos

Desde inicios del siglo XX ya se experimentaba con la idea de reducir el tamaño de los circuitos electrónicos. En 1925, Charles Ducas (1) patentó un método para crear un camino conductor sobre una superficie aislante imprimiendo a través de una plantilla mediante tinta conductora, siendo este el origen del nombre de circuito impreso (2).

Ya en 1943, un científico Austriaco, el Dr Paul Eisler consiguió crear el primer PCB operativo y se le ha considerado como el inventor y desarrollador de esta tecnología, inventando también técnicas para su manufacturación. Pero no fue hasta pasada la segunda Guerra Mundial cuando los primeros circuitos impresos tal como los entendemos hoy se extendieron.

Una Placa de Circuito Impreso, PCB (por su nombre en inglés, (Printed Circuit Board) es una plancha de material aislante recubierta por una o ambas caras de pistas de cobre, que conectaran los componentes que irán sobre ella, formando un circuito. Siguiendo este planteamiento se elaboran asimismo placas multicapa apilando unas sobre otras.

Para su conformado, en la actualidad se parte de placas de fibra de vidrio o baquelita rellenas completamente de una fina capa de cobre por una o ambas caras. A partir de esta materia prima se grabará el dibujo del circuito en su superficie. Dejando a un lado los procedimientos empleados en la industria, los aficionados a la electrónica pueden crear sus prototipos de PCB con diversos métodos (3):

Circuito pre-impreso: Se parte de placas con las pistas ya impresas formando un patrón de líneas o puntos. Sólo hay que añadir los componentes i interconectarlos con tiras de estaño o cables.

Método del rotulador: A partir de una PCB totalmente cubierta de cobre, se dibuja a mano con un rotulador indeleble las pistas que se requieren para conectar los componentes. Posteriormente se le aplica a la placa un ataque por ácido que retirará el cobre no cubierto por la tinta. Finalmente se taladran los orificios de los componentes.

Planchado: A partir de un diseño realizado con un software de diseño de circuitos se imprime la imagen de éste y se coloca junto a una PCB nueva. Con la ayuda de una plancha, aplicándole calor, se transfiere el tóner del papel a la placa. Y se sigue un procedimiento de ataque por ácido como en el método anterior.

Insoladora: Se genera y se imprime el diseño del circuito como en el método anterior y se sitúa el papel sobre una PCB fotosensible. Después, con una insoladora, se aplica luz ultravioleta y se

impresiona el esquema. Se retira el papel y se revela el PCB con líquido revelador. Finalmente se aplica un ataque por ácido como en los dos métodos anteriores.

Fresadora CNC: Se utiliza una maquinaria de control numérico por computadora que puede mover la fresa en las tres direcciones del espacio mediante motores paso a paso. Se fija una PCB virgen y se ejecuta un programa de fresado. La maquinaria elimina el cobre del contorno de las pistas dejando a éstas eléctricamente aisladas del resto del circuito. La máquina debe ser robusta y tener una gran precisión. A finalizar cambia de herramienta y empleando un taladro realiza los orificios en sus posiciones. No es necesario ninguna fase de ataque por ácido posterior, solo se fresa, se taladra y la PCB está lista. Además, se puede obtener el mejor acabado de todos los métodos.

Como se ha visto, elaborar un PCB no es tarea trivial. Se requiere algo de práctica y el método correcto para el nivel de exigencia requerido.

De igualmente forma ocurre al realizar los taladros. Si se realizan de forma manual es difícil conseguir la alineación perfecta de estos a la hora de colocar componentes con muchas patas. Así pues, a nivel no industrial, resulta de gran ayuda la automatización del proceso.

Por todo lo anterior, se propone en este trabajo de final de grado, automatizar la elaboración de un PCB orientado a pequeños prototipos para profesionales independientes o aficionados a la electrónica. De esta forma, se podrán elaborar prototipos de forma rápida y sencilla.

Para ello se estudia la viabilidad de la utilización de una impresora 3D para realizar el fresado y taladrado de una placa, tal como lo haría una máquina CNC comercial diseñada para este fin. En principio se selecciona pues el último método de conformado de PCB explicado, aunque a lo largo del desarrollo del proyecto también se implementa la automatización del método del rotulador.

1.2. Historia de las impresoras 3D

La tecnología de la impresión 3D tiene pocos años de vida, surgió a partir de diversas patentes de los años 80 y siguientes hasta su consecución como tendencia tecnológica en la actualidad.

En contraposición a la fabricación tradicional, que funciona de forma subtractiva, eliminando material para quedarse con la forma requerida; la impresión 3D trabaja de forma aditiva, añadiendo material desde cero y formando la pieza sin perder material en el proceso. Para este proceso, existen en la actualidad diversas tecnologías (4):

El primer sistema que surgió fue el de la **estereolitografía (SLA)** (Figura 1.1), patentado en 1986 por Chuck Hull. En este método *“se parte de una base que se va sumergiendo (o saliendo) capa a capa en un baño de resina fotocurable. El láser de luz ultravioleta activa la curación de la resina líquida, solidificándola. En ese momento la base se desplaza hacia abajo para que el láser vuelva a ejercer su acción.”* (4)

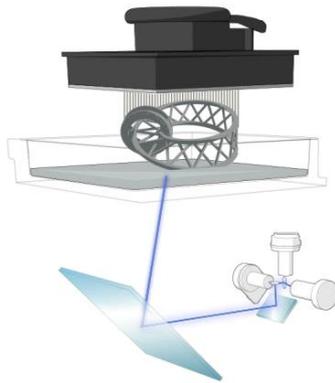


Figura 1.1 Método de la estereolitografía (4)

Simultáneamente, surge otra tecnología, la **Sinterización Selectiva por Láser (SLS)**. “Esta tecnología nació en la Universidad de Texas en los años 80 también y pese a tener ciertas similitudes con la tecnología SLA en concepto, permite utilizar un gran número de materiales. A diferencia de la impresión vía SLA que hace uso de un baño de un polímero líquido fotocurable se utiliza material en polvo (poliestireno, materiales cerámicos, cristal, nylon y materiales metálicos). El láser impacta en el polvo y funde el material y se solidifica (sinterizado).” (4)

Otra tecnología para la impresión 3D fue la **deposición de filamento fundido, FDM** por sus siglas en inglés patentado en 1992 por S. Scott Crump (5). Esto consiste en una máquina que incorpora un dispensador de material que solidifica a una temperatura determinada y una base que se mueve en las tres direcciones del espacio, X Y Z, en un patrón determinado con el fin de crear objetos en tres dimensiones apilando el material por capas. Actualmente, esta ha sido la tecnología que emplean la mayoría de impresoras personales de hardware libre. Para ello se hace pasar un filamento de ABS (el plástico con que se fabrican las piezas de Lego) o PLA (un polímero biodegradable formado por maíz o patata) a través de una conducción que calienta el material por la acción de una resistencia eléctrica. Éste se va depositando en una base de forma ordenada formando un objeto en tres dimensiones (Figura 1.2).

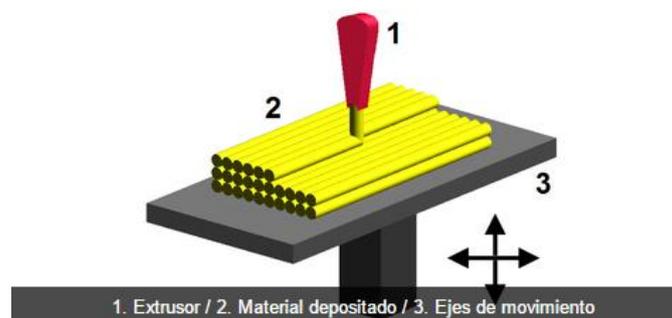


Figura 1.2 Método de deposición de filamento fundido, FDM (4)

En el año 2005, surgió el proyecto RepRap a manos de Adrian Bowyer de la Universidad de Bath, Reino Unido. Con este proyecto se pretendía la creación de máquinas autoreplicantes de hardware libre, de forma que se pudieran crear impresoras nuevas a partir de otras. (6)

Para la realización de este proyecto, se ha partido de una impresora 3D de hardware libre, surgida de la evolución de estas máquinas autoreplicantes. Éstas, emplean tecnología FDM y se ha aprovechado su característica de ser una máquina de posición por control numérico, CNC, suficientemente precisa como para controlar otro proceso, la elaboración de un PCB.

1.3. Objetivos

En la presente sección se detallan los objetivos del presente trabajo:

OBJETIVOS GENERALES:

Inicializar una impresora 3D y desarrollar una adaptación que permita elaborar circuitos impresos simples de forma automatizada.

Este objetivo general será alcanzado a través de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- 1- Comparar diferentes impresoras 3D de hardware libre.
- 2- Poner en funcionamiento una impresora 3D de hardware libre.
- 3- Documentar el funcionamiento y la puesta en marcha de una impresora 3D (manual de instrucciones).
- 4- Diseñar las piezas de un prototipo para adaptar la impresora 3D a la fabricación de PCB mediante fresado.
- 5- Búsqueda y comparación de diversos programas de software libre tanto como para generar instrucciones GCode como para controlar una máquina CNC.
- 6- Documentar el procedimiento de generación de las instrucciones para la elaboración de un PCB.
- 7- Realizar la validación del prototipo.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS

Para la realización del trabajo se han empleado los siguientes materiales e instrumentos. Para mayor claridad en la exposición de los mismos se han separado según su tipología en hardware o software.

Al tratarse de un proyecto sobre hardware libre no comercializable no se va a aplicar ninguna normativa. Este punto sería necesario para una posible comercialización posterior.

2.1. Hardware

Se va a detallar todo el hardware y herramientas utilizadas durante la realización del trabajo así como referencias de donde se pueden obtener.

2.1.1. Impresoras 3D

Se ha aplicado todo el procedimiento de calibrado, adecuación del firmware y puesta en marcha a tres impresoras de diferente modelo: Prusa i2, Prusa i3 Libelium de Cooking Hacks y Prusa i3 Hephestos de BQ. Y se han diseñado las modificaciones pertinentes para las dos Prusa i3.

Prusa Mendel i2 (7). Procedente del departamento de Astronomía de la Universitat de València. Se ha partido de la impresora ya armada tal como se muestra en la Figura 2.1 y se le ha aplicado el procedimiento de puesta en marcha y calibrado de firmware descrito en el Capítulo 3.

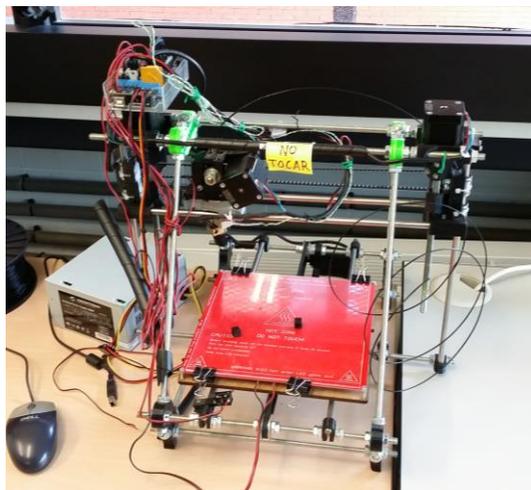


Figura 2.1 Impresora Prusa Mendel i2. Fotografía del autor

Prusa i3 Libelium de Cooking Hacks (8). Procedente del Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València. Se trata de una versión de la impresora Prusa i3 realizada por Cooking Hacks. Se ha partido de la impresora ya armada tal como se muestra en la Figura 2.2 y se le ha aplicado el procedimiento de puesta en marcha y calibrado de firmware descrito en el capítulo 3.

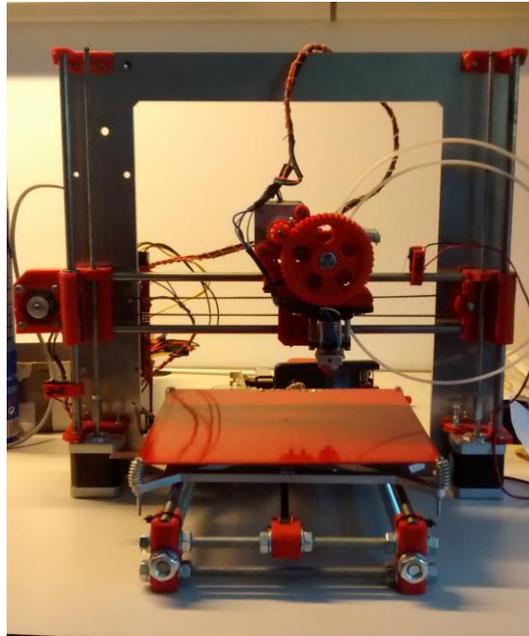


Figura 2.2. Impresora Prusa i3 Libelium. Fotografía del autor

Prusa i3 Hephestos de BQ (9). Propiedad del alumno que realiza el trabajo.

Como se indica en (4): “La impresora 3D Prusa i3 Hephestos es un proyecto libre diseñado y desarrollado por el departamento de Innovación y Robótica de bq. Hephestos toma la base de la Prusa i3 y añade varias mejoras extraídas de otras impresoras como la PowerCode, usuarios de la comunidad RepRap, modificaciones de estas piezas y diseños propios del departamento”.

“Este proyecto busca ofrecer un diseño de impresora robusto que soluciona varias de las carencias de los diseños anteriores como por ejemplo la sujeción de los finales de carrera y el guiado de los cables”. (10)

Se trata de un modelo similar a la Libelium, pues las dos parten de la tercera iteración de la Prusa cada una con sus particularidades.

Se ha montado la impresora resultando en la Figura 2.3 pero no ha sido necesario realizarle la puesta en marcha y adecuación del firmware pues éste ya viene correctamente calibrado de fábrica.



Figura.2.3 Impresora Prusa i3 Hephestos. Fotografía del autor

Las especificaciones técnicas de las tres impresoras están detalladas en el ANEJO 1.

2.1.2. Fresadora y Taladro

Para la segunda parte del trabajo, donde se automatizará la elaboración de un PCB, es necesaria una herramienta capaz de mecanizar las placas de circuito. Es decir, que sea capaz de fresar y realizar los taladros necesarios.

Se ha comparado dos posibles herramientas para el fresado de la PCB. Se han probado dos soluciones:

- 1.-Un pequeño motor DC de 12 voltios.
- 2.-Adaptación de una multiherramienta DREMEL que es casi un standard en la industria de las microherramientas mediante un eje flexible de modo que la herramienta se sitúe en un lugar elevado y el eje esté acoplado al carro de la impresora 3D.

Para tal fin se han utilizado:

WLXY Mini Electric Hand Drill DIY Electric Drill Drilling Tool Set:

Se trata de un pack que incluye un pequeño motor eléctrico DC de 12 voltios, un eje con sus dos fijaciones, 6 boquillas del tamaño descrito en la Figura 2.4 y una llave Allen. A un precio de 6.15€ en el momento de la consulta. (11)



Figura 2.4. WLXY Mini Electric Hand Drill DIY Electric Drill Drilling Tool Set (11)

Dremel 200:

Se ha empleado esta herramienta disponible en el laboratorio de Física Aplicada donde se ha realizado el trabajo.

Según se indica en la página del fabricante (12): “La Dremel 200 Series (Figura 2.5) es la herramienta ideal para iniciarse en el mundo de Dremel. Su utilización es sencilla y cómoda, y ofrece la calidad y fiabilidad de Dremel a un precio muy asequible. Esta herramienta es compatible con todo tipo de accesorios y complementos de la marca”



Figura 2.5 Dremel 200 Series (12)

A continuación se describen sus especificaciones técnicas:

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas de Dremel 200 Series

Potencia nominal de entrada	125 W
Tensión	230 V

Peso	0,55 kg
Longitud	18,5 cm
Velocidad en vacío	15.000 - 35.000 rpm
Ajuste de velocidad	Velocidad dual
Sistema de cambio rápido de accesorios	No
Presión acústica	74,5 dB(A)
Potencia sonora	85,5 dB(A)
Vibración	3,8 - 5,1 m/s ²

Eje flexible para Dremel:

Tal como se describe en la web del fabricante (13), es el “Complemento ideal para trabajos precisos y detallados, y para lugares de difícil acceso.” Se ajusta un extremo a la Dremel (Figura 2.6) y el otro a la herramienta que se quiera utilizar. La longitud del cable flexible es de 1070 mm.



Figura 2.6 Eje flexible junto la Dremel instalados. Fotografía del autor

Fresas:

Se ha empleado una fresa esférica de diámetro 0.8 mm y 3.2mm de diámetro del vástago (14) (Figura 2.7).



Figura 2.7 Fresa de grabado de diámetro 0.8mm (14)

Brocas:

Se ha utilizado una Broca de Perforación para PCB de Carburo, de diámetro 0.6mm del distribuidor RS (15) cuyo código es 753-8593 (Figura 2.8) y de 0.8mm de código 753-8606 (16).



Figura 2.8 Broca de perforación de diámetro 0.6mm procedente de RS (15)

2.1.3. Otros Materiales

Placa de Cobre para PCB:

Se ha adquirido una placa de cobre de una cara, de grosor 35 μm y dimensiones 200 x 300 x 1.6 mm del distribuidor RS (17) cuyo código es 219-2123 (Figura 2.9) que se recortará para realizar diversos ensayos.



Figura 2.9 Placa de Cobre para PCB de 200 x 300 x 1.6 mm procedente de RS (17)

Rollo de filamento PLA de BQ:

“Bobina de plástico PLA Premium de 1,75 mm de diámetro que contiene 1 Kg de filamento.

Material: 100% Ácido Poliláctico (Poly-Lactic Acid, PLA)”. (18)

Se ha utilizado filamento de dos bobinas, una de color Negro y otra de color Amarillo, tal como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Bobinas de plástico PLA de BQ (18)

2.2. Software

Se han separado los programas utilizados durante el Trabajo en dos apartados. Primero los utilizados para inicializar una impresora 3D, controlar su impresión y diversas herramientas de diseño. En segundo lugar, los programas utilizados si se pretende modificar ésta para ayudar en la elaboración de PCB.

2.2.1. Software de control de la Impresora 3D

IDE de Arduino: Compilador que se utilizará para modificar el firmware de la placa Arduino Mega de hardware libre presente en las impresoras. Es el propio software de esta placa, por lo que ya tiene incluido los drivers necesarios. Es completamente freeware y se puede descargar desde su página web (19).

Con este software se pueden modificar los programas de control numérico como el Marlin, el firmware controlador de la impresora 3D. También se va a emplear para programar unos sketches elaborados por el autor de este trabajo para comprobar por separado el correcto funcionamiento de los componentes que forman la máquina.

Marlin: Es el firmware de control de la impresora 3D, es una mezcla de Sprinter, Grbl y partes originales. Se puede obtener de GitHub ya que es open source (20).

Se deberá modificar para adecuarlo a las características de cada impresora. Se puede seguir una guía de su configuración procedente de la web de ZonaMaker (21), donde se explican los parámetros que se deben cambiar.

Cura: Se trata de un programa open source creado por Ultimaker (22) que a partir de los modelos 3D stl genera el código gcode (formado por las instrucciones de movimientos paso por paso) necesario para controlar las impresoras 3D. Permite gran cantidad de personalización en la generación de gcodes (la velocidad de impresión, temperaturas etc.). Cura lamina el modelo 3D en capas con las que, una encima de otra, se va formando el objeto físico.

Cura genera una estructura hueca en el interior de las piezas, favoreciendo un ahorro en el consumo de material y tiempo de impresión. De igual forma, permite modificar la densidad de material en el interior de la pieza, modificando de este modo su robustez y resistencia.

También permite el control manual de la impresora, precalentarla o moverla.

Se puede descargar gratuitamente desde la página web de software de Ultimaker (23).

Autodesk Inventor Professional 2014: *“El software de CAD 3D Inventor® (Inventor, 2015) ofrece un conjunto de herramientas profesionales para diseño mecánico, documentación y simulación de productos en 3D”* (24). Este software es utilizado para el diseño de las piezas que posteriormente se imprimirán. No es freeware, por lo que hay que adquirir una licencia de uso. Sin embargo si dispone de una licencia educativa gratuita para alumnos.

Para los mismos requerimientos se puede utilizar otro software: como Solidworks (25) mediante licencia, o OpenSCAD (26) que sí es freeware, como alternativa. No se utilizó ya que no era el propósito de este TFG y el autor no estaba acostumbrado a su manejo. Sin embargo, todo lo expuesto en este trabajo podría derivar de cualquier programa de diseño 3D que sea capaz de crear un fichero STL.

MeshLab: Se trata de un software capaz de procesar y editar mallas triangulares 3D no estructuradas (27). Ayuda a procesarlas y repararlas para poder ser posteriormente editadas en otros programas como Inventor.

2.2.2. Software para desarrollo de PCB

Eagle: Es un software de diseño de circuitos que a partir del esquema del circuito y los componentes de éste elegidos entre sus librerías permite crear un circuito impreso. De donde se extraerán los archivos Gerber y Excellon que definen una placa de circuito impreso. Se puede adquirir una licencia del programa completo o descargar una versión light freeware desde su web (28). Para los requerimientos de este trabajo será suficiente con la versión reducida.

Otra opción es usar KiCad, que ofrece características similares al Eagle pero es completamente freeware y opensource (29). Se pueden realizar las mismas operaciones y extraer los mismos ficheros que con el anterior.

FlatCam: Se trata de un software que partiendo de los archivos Gerber y Excellon genera las instrucciones de movimiento de una máquina CNC. Se utilizará para transformar los archivos exportados del Eagle a instrucciones que la impresora sea capaz de interpretar. Es un programa gratuito descargable desde su web y tiene un buen manual de aprendizaje. (30)

También se puede encontrar un buen tutorial del programa en castellano aquí (31).

CNCControl: Se trata de un software de control de una CNC de firmware tipo Grbl, Sprinter, Marlin etc. especialmente enfocado para una máquina con hardware basado en Arduino. Este programa se encarga de mandar las instrucciones de movimiento a partir de los Gcode leídos y ejecutar sus movimientos así como permitir realizar un control manual de la máquina. También presenta una interfaz de control cómoda. Su página web ofrece su descarga gratuita, además de un manual y foros de ayuda (32).

CNCGCodeController: Realiza las mismas funciones que el CNCControl aunque con diferentes opciones de personalización y calibración. Presenta una interfaz sencilla e intuitiva. Se puede utilizar como alternativa durante el fresado / dibujado / perforación del PCB. También se puede encontrar de forma gratuita (33) así como un manual del programa (34).

Inkscape: *“Inkscape es un editor profesional de gráficos vectoriales para Windows, Mac OS X y Linux. Es libre y de código abierto”* (35). Es un software enfocado a ilustradores y diseñadores. Junto con una de las últimas actualizaciones permite generar directamente instrucciones GCode desde imágenes vectorizadas, por lo que se aprovechará por esta característica.

Se utiliza también el lenguaje de programación GCODE:

El lenguaje de programación GCode es el más usado para herramientas de control numérico. Esencialmente consta de instrucciones de movimiento de varios tipos y la velocidad a la que ha de moverse la herramienta. El código se ejecuta línea tras línea y se puede modificar fácilmente desde un procesador de textos tipo txt. Se utiliza para maquinaria de corte, pero también para impresoras 3D, máquinas de medición etc.

Éste código de programación contiene muchos tipos de instrucciones. En la red se puede obtener el significado de éstas ordenadas por su letra y número además de los firmwares que son capaces de interpretarlas (36) (37). Aun así, las instrucciones que se han empleado en este trabajo son las siguientes:

Movimiento:

G00: Posicionamiento rápido

G01: Interpolación lineal

G21: Programación en milímetros

G28: Retorno a la posición 0 (Homing)

G90: Programación absoluta con referencia al 0

G92: Registro de la posición actual como si de otra nueva se tratara

G94: avance por minuto

CAPÍTULO 3: PUESTA EN MARCHA DE LA IMPRESORA 3D

En este capítulo se describirá el proceso que se ha desarrollado para poner en funcionamiento las impresoras 3D. Se empezará comprobando que el hardware de las impresoras funciona correctamente y se seguirá modificando el firmware si fuese necesario para adecuarlo a las características de cada modelo. Posteriormente, también se hablará de los problemas más usuales en todo el proceso, sus posibles soluciones y orientaciones para un buen uso.

En este apartado se busca hacer un compendio de toda la información que se encuentra en la red muchas veces de forma muy dispersa o difícil de encontrar. Se han consultado numerosos foros, blogs, guías, videos, etc. Asimismo, el trabajo de documentación engloba gran parte de la experiencia adquirida por el alumno durante la realización del proyecto.

Este Trabajo Final de Carrera parte de dos impresoras ya armadas (Prusa i2, Prusa i3 Libelium) y de una sin armar (Prusa i3 Hephestos). Se ha aplicado el procedimiento de puesta en marcha a las tres, y se ha ensamblado ésta última. Nótese que no se detalla la etapa de su ensamblaje pues no entra en el contenido de éste trabajo, simplemente se van a citar algunos recursos de utilidad para tal fin.

3.1. Revisión del hardware 3D

Para realizar el montaje de una impresora 3D hay gran cantidad de recursos, manuales, tutoriales, videos, etc de libre acceso en la red, tanto para una Prusa i2 (38) (39), como para una Prusa i3 (40) (41).

En el caso particular de la impresora Libelium de Cooking Hacks se dispone de una página web tutorial (42). Además, se dispone de un foro donde formular las posibles dudas que surjan durante el montaje (43).

Por otra parte, el pack de la impresora Prusa i3 Hephestos incluye un manual en papel donde se explica el montaje por pasos y de forma clara y precisa. Bq también dispone de un foro para cuestiones relacionadas (44).

Dado que el montaje de la impresora 3D es una tarea sistemática y ampliamente desarrollada en los manuales anteriormente mencionados, no forma parte específica de los resultados del presente trabajo. El usuario cuenta con una gran cantidad de recursos a su disposición en la web.

Una vez terminado el montaje, la siguiente labor lógica es la puesta en marcha del software 3D. Sin embargo, es conveniente comprobar que todos los componentes de la impresora están bien instalados así como su correcto funcionamiento.

Una forma de asegurarse de esto es hacer la comprobación componente por componente. Ésta es la estrategia que se va a desarrollar a continuación, modificando el sketch que ejecuta la placa Arduino para cada componente.

Básicamente se quiere evidenciar que las conexiones se han realizado de forma correcta, de acuerdo a la Figura 3.1, que los componentes mecánicos estén bien montados y que todos los accesorios están en buen estado. Es el primer control de calidad de la impresora que se realizará por partes. De este modo se acota el problema, ya que es mucho más complicado identificar las causas de mal funcionamiento en el control de toda la impresora.

RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4

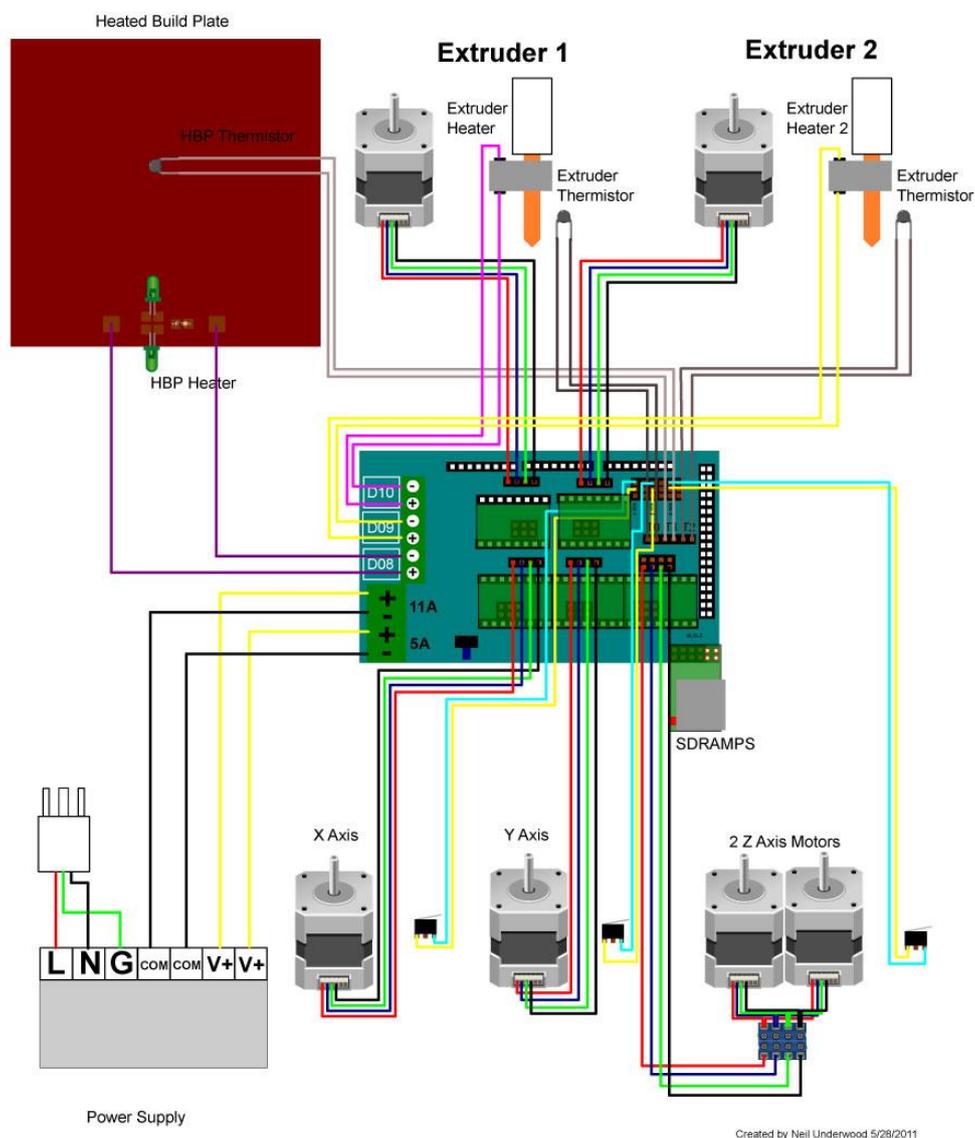


Figura 3.1 Conexiones de la electrónica en la placa Ramps 1.4 (42)

Para tal fin se han creado y utilizado los sketch descritos en la Tabla 3.1, donde ya están inicializados los pines asignados a cada elemento.

Tabla 3.1 Sketch desarrollados para revisar los componentes

Motor Eje X	Desplazamiento eje X de derecha a izquierda	
Motor Eje Y	Desplazamiento eje Y adelante y atrás	
Motor Eje Z	Desplazamiento eje Z arriba y abajo	
Motor Extrusor	Movimiento del motor extrusor en un sentido y en el otro	
Finales de Carrera	Eje X	Indicación de contacto al tocar manualmente
	Eje Y	Indicación de contacto al tocar manualmente
	Eje Z	Indicación de contacto al tocar manualmente

Motor Eje X:

Este sketch mueve el eje X a derecha e izquierda continuamente durante 5 segundos en cada sentido. Es conveniente situar el carro del extrusor en el centro para que no tropiece con el final de carrera o el final de las guías. Hay que asegurarse de que la correa dentada esté bien tensada. El carro se debe mover de forma fluida y sin hacer ruidos causados por el rozamiento.

```

#define X_STEP_PIN    54
#define X_DIR_PIN     55
#define X_ENABLE_PIN  38

void setup() {
  pinMode(X_STEP_PIN , OUTPUT);
  pinMode(X_DIR_PIN  , OUTPUT);
  pinMode(X_ENABLE_PIN , OUTPUT);
  digitalWrite(X_ENABLE_PIN , LOW);
}

void loop () {
  if (millis() %10000 <5000) { digitalWrite(X_DIR_PIN , HIGH); }
  else { digitalWrite(X_DIR_PIN , LOW); }
  digitalWrite(X_STEP_PIN , HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(X_STEP_PIN , LOW);
}

```

Motor EjeY:

Este sketch mueve el eje Y en los dos sentidos de forma similar al eje X. Hay que comprobar también la tensión de la correa.

```
#define Y_STEP_PIN    60
#define Y_DIR_PIN     61
#define Y_ENABLE_PIN  56

void setup() {
  pinMode(Y_STEP_PIN , OUTPUT);
  pinMode(Y_DIR_PIN  , OUTPUT);
  pinMode(Y_ENABLE_PIN , OUTPUT);
  digitalWrite(Y_ENABLE_PIN , LOW);
}

void loop () {
  if (millis() %10000 <5000) { digitalWrite(Y_DIR_PIN  , HIGH); }
  else { digitalWrite(Y_DIR_PIN  , LOW); }
  digitalWrite(Y_STEP_PIN  , HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(Y_STEP_PIN  , LOW);
}
```

Motor Eje Z:

Generalmente el eje Z es el más problemático debido a que es el más castigado. Al probar el sketch se ha de corroborar que los dos motores giren en el mismo sentido. Si no es así, simplemente se ha de invertir la polaridad de uno de ellos girando su conexión a la placa.

Si se observa que los motores no tienen fuerza suficiente para subir y bajar el carro (esto puede identificarse al escuchar una especie de pitido de los motores) se les puede aumentar la potencia suministrada desde la placa. Esto se realiza girando un potenciómetro desde un pequeño tornillo del controlador del motor llamado A4988 (45), un reemplazo del driver pololu que normalmente se utiliza. Hay que girarlo muy suavemente hasta que el motor empiece a responder.

Si durante la posterior calibración del Marlin algún motor vuelve a fallar podemos probar a subir la potencia desde el pololu. Y lo mismo se puede aplicar a los otros dos ejes.

```
#define Z_STEP_PIN    46
#define Z_DIR_PIN     48
#define Z_ENABLE_PIN  62
```

```

void setup() {
  pinMode(Z_STEP_PIN , OUTPUT);
  pinMode(Z_DIR_PIN  , OUTPUT);
  pinMode(Z_ENABLE_PIN  , OUTPUT);
  digitalWrite(Z_ENABLE_PIN  , LOW);
}
void loop () {
  if (millis() %20000 <10000) { digitalWrite(Z_DIR_PIN  , HIGH); }
  else { digitalWrite(Z_DIR_PIN  , LOW); }
  digitalWrite(Z_STEP_PIN  , HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(Z_STEP_PIN  , LOW);
}

```

Motor Extrusor:

Este sketch mueve el motor del extrusor primero en un sentido durante 5 segundos y luego en el otro durante el mismo tiempo, así sucesivamente.

Antes de iniciar este sketch hay que cerciorarse de que el extrusor no esté cargado con el filamento, pues el sketch simplemente moverá el motor en ambos sentidos sin calentar la resistencia y por tanto sin derretir el plástico.

```

#define E_STEP_PIN    26
#define E_DIR_PIN     28
#define E_ENABLE_PIN  24
void setup() {
  pinMode(E_STEP_PIN , OUTPUT);
  pinMode(E_DIR_PIN  , OUTPUT);
  pinMode(E_ENABLE_PIN  , OUTPUT);
  digitalWrite(E_ENABLE_PIN  , LOW);
}
void loop () {
  if (millis() %10000 <5000) { digitalWrite(E_DIR_PIN  , HIGH); }
  else { digitalWrite(E_DIR_PIN  , LOW); }
  digitalWrite(E_STEP_PIN  , HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(E_STEP_PIN  , LOW);
}

```

Finales de carrera:

Con el fin de que la impresora tenga un punto de referencia fijo, los finales de carrera en los 3 ejes han de estar funcionales. Para comprobarlo se pueden usar los siguientes sketch, en los que se utiliza el comando INPUT_PULLUP (para que el Arduino use las resistencias internas). En ellos se mostrará desde el compilador cuando se produzca contacto con el final de carrera. Por tanto al iniciar los sketch se debe abrir el Monitor Serial (Ctrl+Shift+M) y pulsar manualmente el final de carrera que se esté ensayando para que aparezca la palabra “contacto” en la pantalla.

Final_de_carrera_X:

```
const int X_MIN_PIN = 3;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(X_MIN_PIN , INPUT_PULLUP);
}
void loop () {
  if( digitalRead(X_MIN_PIN) == HIGH ){
    Serial.print("contacto\n");
    delay(100);
  }
  delay(1);
}
```

Final_de_carrera_Y:

```
const int Y_MIN_PIN = 14;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Y_MIN_PIN , INPUT_PULLUP);
}
void loop () {
  if( digitalRead(Y_MIN_PIN) == HIGH ){
    Serial.print("contacto\n");
    delay(100);
  }
  delay(1);
}
```

Final_de_carrera_Z:

```
const int Z_MIN_PIN = 18;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(Z_MIN_PIN , INPUT_PULLUP);
}
void loop () {
  if( digitalRead(Z_MIN_PIN) == HIGH ){
    Serial.print("contacto\n");
    delay(100);
  }
  delay(1);
}
```

3.2. Puesta en marcha del software 3D

Una vez todos los componentes funcionen correctamente, se empezará calibrando el software que se hace cargo del funcionamiento de la impresora, el Marlin. A continuación se precisaran los valores que se han tomado en las impresiones realizadas en el Cura.

3.2.1. Calibración del Firmware Marlin.

El procedimiento detallado para la correcta configuración del Marlin se puede encontrar en ZonaMaker. El tutorial de Raúl Diosdado es el que se ha consultado para la realización de este apartado (21).

A modo de resumen, los parámetros más importantes (listados por orden de aparición en el sketch) elegidos para la impresora que se está modificando se han incluido en la Tabla 3.2. Se trata de los valores una vez calibrados los ejes tal como se explica en el apartado 3.2.3.

Hay que añadir que estos valores son orientativos, pues dependen en gran medida de la configuración de cada máquina. Por ejemplo hay valores como INVERT_Y_DIR que producen el mismo efecto que invertir la polaridad de la conexión del cable con la placa. Otros como los límites de impresión (X_MAX_POS, X_MIN_POS, etc) no es necesario cambiarlos, pues se pueden establecer los límites de impresión al configurar la impresora en el programa de impresión Cura.

Tabla 3.2 Parámetros de configuración del firmware Marlin

	Parámetro	Valor original	Valor Prusa i2	Valor Prusa i3 Libelium	Valor Prusa i3 Hephestos
Placa	Motherboard	33	33	33	33
Thermal settings	TEMP_SENSOR_0	7	7	7	1
	TEMP_SENSOR_BED	1	1	1	0
	HEATER_0_MINTEMP	5	5	5	5
	BED_MINTEMP	5	5	5	5
	HEATER_0_MAXTEMP	275	250	250	260
	BED_MAXTEMP	150	110	110	150
	EXTRUDE_MINTEMP	170	170	170	170
Mechanical Settings	X_ENDSTOPS_INVERTING	true	false	false	true
	Y_ENDSTOPS_INVERTING	true	false	false	true
	Z_ENDSTOPS_INVERTING	true	false	false	true
	INVERT_X_DIR	false	true	true	true
	INVERT_Y_DIR	false	true	false	false
	INVERT_Z_DIR	true	true	false	true
	INVERT_E0_DIR	false	true	false	false
	X_HOME_DIR	-1	-1	-1	-1
	Y_HOME_DIR	-1	-1	-1	-1
	Z_HOME_DIR	-1	-1	-1	-1
	min_software_endstops	true	true	true	true
	max_software_endstops	true	true	true	true
	X_MAX_POS	170	170	185	215
	X_MIN_POS	0	0	0	0
	Y_MAX_POS	170	170	185	210
	Y_MIN_POS	0	0	0	0
	Z_MAX_POS	180	180	180	180
Z_MIN_POS	0	0	0	0	
HOMING_FEEDRATE	{50*40, 50*40, 4*40, 0}	{50*40, 50*40, 110, 0}	{50*40, 50*40, 100, 0}	{2000, 2000, 150, 0}	

	DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT	{145,145,5255,1900}	{61.38,76.66,2438,1750} ⁽¹⁾	{80, 80, 4000, 836}	{80, 80, 4000,100.47095761381482}
	DEFAULT_MAX_FEEDRATE	{30, 30, 5, 45}	{30, 30, 3.3, 25}	{30, 30, 1.7, 25}	{250, 250, 3.3, 25}
	DEFAULT_MAX_ACCELERATION	{9000,9000,100,10000}	{9000,9000,20,10000}	{9000,9000,100,10000}	{3000,3000,100,10000}

⁽¹⁾ Estos valores son aproximados ya que no se han comprobado.

Para hacer el cálculo de alguno de estos valores se puede utilizar la calculadora que ofrece Prusaprinters.org (46).

Uno de los parámetros más importantes a la hora de calibrar una impresora 3D se trata de:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {X, Y, Z, E}
```

Es decir, los pasos del motor por mm recorrido. En este parámetro los tres primeros valores son los referentes a los ejes XYZ y el cuarto al extrusor. Cada uno de estos valores se calcula de forma diferente (47), dependiendo de la configuración mecánica de los ejes.

Eje X e Y:

Para los ejes X e Y el valor está por defecto en 80. Se calcula de la siguiente forma,

$$\text{Pasos por mm}_x = \frac{\text{Pasos del motor por revolución}}{\text{Dientes de la polea} \cdot \text{Paso de la correa}}$$

(Ecuación 3.1)

Donde,

$$\text{Pasos del motor por revolución} = \text{pasos del motor por vuelta} \cdot \text{micropasos del pololu}$$

(Ecuación 3.2)

Como los motores de las impresoras ensayadas (NEMA 17) tienen 200 pasos por vuelta, con controladores pololu de 16 micropasos. Por tanto los pasos del motor por revolución son 3200.

Los valores para el cálculo de los pasos por mm_x y mm_y son los mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores para determinar pasos por mm_x y mm_y

	Prusa i2	Prusa i3 Libelium	Prusa i3 Hephestos
Pasos del motor por revolución:	3200	3200	3200
Dientes de la polea X e Y:	16	16	20
Paso de la correa (separación entre dientes):	2.5	2.5	2
Pasos por mm_x y mm_y :	80	80	80

-Eje Z:

Para el eje Z la ecuación empleada es la siguiente:

$$\text{Pasos por } mm_z = \frac{\text{Pasos del motor por revolución}}{\text{Paso de la varilla roscada}}$$

(Ecuación 3.3)

Los valores para el cálculo de los pasos por mm_z son los mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores para determinar pasos por mm_z

	Prusa i2	Prusa i3 Libelium	Prusa i3 Hephestos
Pasos del motor por revolución:	3200	3200	3200
Métrica de la varilla roscada	M8	M5	M5
Paso de la varilla roscada	1.25	0.8	0.8
Pasos por mm_z	2560	4000	4000

-Extrusor:

Para calibrar los valores del extrusor, aunque existen ecuaciones para su determinación, éstas no se adecuan a la realidad tan bien como las anteriores. Resulta rápida y sencilla la determinación de este valor de un modo iterativo. Se va a describir a continuación el método a emplear en este caso.

Se realiza el protocolo (21) válido para cualquier eje y descrito consecuentemente de forma general.

En primer lugar, desde el control de movimiento que permite Cura se procede de la siguiente forma:

- Se mueve la impresora un valor teórico Xmm en un sentido (por ejemplo 100 mm).
- Se mide la distancia real recorrida, el valor real.
- Se modifica el valor del firmware en esa dirección según la siguiente ecuación:

$$valor_firmware_{i+1} = valor_firmware_i \cdot \frac{valor\ te\acute{o}rico}{valor\ real}$$

Ecuación 3.4

- Se repite el proceso hasta que la diferencia entre el valor teórico y el valor real sea un error asumible.

Para recalibrar el extrusor se procede de forma similar, tal como se puede encontrar en (48) (49). Se hacen dos marcas en el filamento a 100mm con un rotulador permanente y le indicamos extruir la misma distancia. Se modifica su valor por defecto del firmware mediante la Ecuación 3.5.

Esta operación se debe realizar con el extrusor caliente o bien desmontar el extrusor, además de desactivar la opción del firmware #define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE, que impide extrudir en frío. Otra opción más sencilla es calentar el extrusor y extruir unos centímetros, aunque se pierda este material.

Ya se ha explicado como calibrar de forma teórica (dependiendo de la rosca, pasos del motor, etc.) los 3 ejes y de forma iterativa el extrusor. Sin embargo, si al imprimir no se adecua la medida real de algún eje con su medida teórica del modelo 3D puede que se necesite una recalibración. Es posible que los ejes se muevan una mayor o menor distancia que la que le manda el programa Cura debido a correas no perfectamente tensas, rozamientos etc.

Por tal motivo, cuando la impresora tenga la base nivelada y sea capaz de imprimir, se debe comprobar la veracidad de estos parámetros imprimiendo unas piezas de calibración. Se puede imprimir un cubo de 10x10x10mm teóricos (50) y medir éste en las tres dimensiones con un pie de rey para observar posibles desviaciones. Luego, si hubiese alguna desviación, se modifica el valor del firmware de forma iterativa empleando la Ecuación 3.4 tal como se ha hecho para el caso del extrusor. De esta forma se puede obtener gran precisión.

3.2.2. El software de impresión Cura

Para la realización de este apartado se ha consultado el manual de Cura por Raúl Diosdado de la web ZonaMaker (51), donde se detalla la configuración del Cura y el ajuste de todos sus parámetros. Se recomienda en gran medida la consulta de este material a la hora de configurar Cura.

La configuración de las impresoras (machine settings) se detalla en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros "Machine settings" de Cura para las tres impresoras ensayadas

MACHINE SETTINGS	Parámetro	Valor Prusa i2	Valor Libelium	Valor Hephestos
	E-Steps per 1mm filament	0 (usa el valor del firmware)	0 (usa el valor del firmware)	0 (usa el valor del firmware)
	Maximum width (mm)	170	185	215
	Maximum depth (mm)	170	185	210
	Maximum height (mm)	180	180	180
	Extruder count	1	1	1
	Heated bed	true	true	false
	Machine center 0,0	false	false	false
	Build area shape	Square	Square	Square
	GCode Flavor	RepRap (Marlin/Sprinter)	RepRap (Marlin/Sprinter)	RepRap (Marlin/Sprinter)

El perfil de impresión que se ha utilizado en las impresoras es el descrito en la Tabla 3.5, aunque finalmente se ha empleado exclusivamente la Prusa i3 Hephestos para todas las impresiones realizadas debido a la comodidad de tenerla en casa y a la larga duración de las impresiones.

Tabla 3.5 Perfil de impresión 1 de Cura para las tres impresoras ensayadas

BASIC	Parámetro	Valor Prusa i2	Valor Libelium	Valor Hephestos
Quality	Layer height (mm)	0.2	0.16	0.2
	Shell thickness (mm)	0.4	1.0	0.4
	Enable retraction	false	false	true
Fill	Bottom/Top thickness (mm)	0.6	0.9	0.6
	Fill Density (%)	20 - 50	20 - 50	20 - 50
Speed and Temperature	Print speed (mm/s)	40	30	40
	Printing temperature (C)	220	235	220
	Bed temperatura (C)	0	85	-
Support	Support type	Everywhere	Everywhere	Everywhere
	Platform adhesión type	None	None	None
Filament	Diameter (mm)	1.75	3	1.75
	Flow (%)	100	100	100

Tabla 3.6 Perfil de impresión 2 de Cura para las tres impresoras ensayadas

ADVANCED	Parámetro	Valor Prusa i2	Valor Libelium	Valor Hephestos
Machine	Nozzle size (mm)	0.4	0.35	0.4
Retraction	Speed (mm/s)	40	40	40
	Distance (mm)	4	4.5	4
Quality	Initial layer thickness (mm)	0.1	0	0.1
	Initial layer line width (%)	100	100	100
	Cut off object bottom (mm)	0	0	0
	Dual extrusión overlap (mm)	0	0	0
Speed	Travel speed (mm/s)	130	130	140
	Bottom layer speed (mm/s)	20	20	22
	Infill speed (mm/s)	30	30	40
	Outer shell speed (mm/s)	25	25	28
	Inner Shell speed (mm/s)	20	20	30
Cool	Minimal layer time (sec)	10	10	10
	Enable cooling fan	-	-	true

3.3. Graduaciones finales de la impresora

Antes de proceder con las primeras impresiones, como los cubos de calibración, son necesarias unas graduaciones finales y entender unos últimos conceptos relevantes:

La horizontalidad del eje Z:

Se debe verificar la horizontalidad completa del carro extrusor a lo largo de su movimiento por el eje X. Esto es, que al trasladarse por este eje mantenga siempre la misma distancia a la base de impresión.

Basta con asegurar que la altura del eje X en las dos varillas roscadas del eje Z sea la misma, girando manualmente un motor si fuera necesario para tal fin (52) (53).

La nivelación de la base:

Uno de los últimos pasos antes de poder imprimir sin problemas es la nivelación de la base. Este paso puede resultar tedioso, pero una vez realizado correctamente no será necesaria una nueva nivelación, siempre que no movamos la impresora. De este proceso depende en

gran medida la forma con que se asienta el filamento fundido en la base y por tanto la calidad final de las piezas producidas.

Básicamente se persiguen dos objetivos:

- Que el plano de la superficie de impresión sea totalmente paralelo al plano XY de movimiento del carro extrusor.
- Que la separación entre la boca del extrusor y la base sea la adecuada.

Como se muestra en la imagen Figura 3.2, se desea una deposición del plástico a una altura tal que permita una correcta unión entre todos los hilos de material y también un buen contacto con la base para que no se despegue. Por contraposición, una altura no adecuada provocará una mala fijación del PLA/ABS con la base (caso 1) o que se atasque o pegue el material con la boca caliente del extrusor (caso 3) (54).

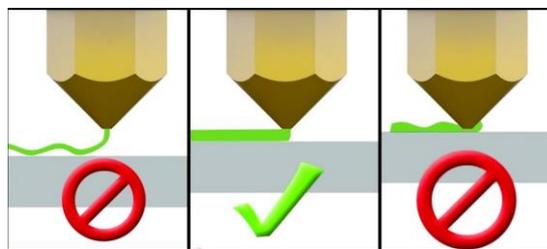


Figura 3.2 Esquema de altura correcta del extrusor (54)

Si ya se ha asegurado la horizontalidad del eje Z del paso anterior, para nivelar la base se procederá del siguiente modo:

Desde el control de manual de Cura (u otro software de control) se moverá la boca del extrusor a los 4 extremos de la base. Se ajustará el tornillo regulador de la altura de cada extremo de forma que pase rozando un folio entre la boca y la base (54).

3.4. Recomendaciones de impresión

Por último, se realizan unas recomendaciones de impresión que pretenden dar indicaciones a las cuestiones más frecuentes que surgen durante la impresión 3D.

La base de impresión:

Además de estar correctamente nivelada, la superficie de la base debe ser lisa y no contener imperfecciones. Por esta razón, utilizar un cristal o espejo es una buena opción. Asimismo, al iniciarse la impresión, es frecuente que la primera capa de plástico no se adhiera perfectamente a la superficie y se despegue al poco tiempo, esto puede ocurrir aunque la boca del extrusor esté a una altura correcta, como en el caso 2 de la Figura 3.2. Para acotar este problema existen diversas soluciones no excluyentes:

· Si la impresora posee una cama caliente, esto es, una base con resistencia calefactora, ayudará a limitar este percance. Es más, si se quiere imprimir con un material diferente de PLA, por ejemplo ABS, esto es imprescindible. Este componente reducirá la diferencia térmica existente entre el plástico al salir de la boca del extrusor (normalmente a unos 220°C) y la superficie (a temperatura ambiente). Al subir ésta a unos 90°C, se reducirá la brecha térmica.

· Otra opción, que es la que se ha aplicado, es emplear laca normal para el pelo. Simplemente se le rocía una pasada por la superficie antes de imprimir (55). Debido a los aditivos que se le añade a estas lacas la superficie se vuelve más pegadiza. Resulta una solución cómoda y efectiva para que las piezas se adhieran bien. En lugar de laca, también se puede añadir cinta Kapton por toda la superficie para que los objetos se adhieran mejor (56).

· Otro factor importante, es la temperatura de la habitación. Esta no debe ser muy baja (menor de 10°C - 15°C) pues, como se ha dicho, la brecha térmica entre el plástico extruido y la base será aún mayor. Asimismo, se deben evitar las corrientes de aire sobre la superficie.

Materiales para impresión 3D:

Actualmente, los plásticos más utilizados para la impresión 3D son el ABS y PLA. Pero existen más materiales y a medida que la tecnología de la impresión 3D se hace más popular van surgiendo nuevos.

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno, “Cada uno de estos componentes aporta características diferentes a este material. El acrolonitrilo aporta rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno aporta tenacidad a bajas temperaturas y resistencia a impacto. Por último, el estireno aporta resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza.” (57) La temperatura adecuada para su impresión es de 230-245°C y tiene una densidad de 1.05 g/cm³. Para lograr imprimir correctamente con este material se pueden seguir las recomendaciones de Griffin Kahnke (58).

PLA: Ácido Poliláctico o Poliláctido, es un material biodegradable obtenido a partir de maíz o patata. “El PLA se ha convertido en un material un poco más fácil de imprimir, debido a su capacidad de impresión en temperaturas más bajas que el ABS y la no necesidad de adherirse a una plataforma de impresión a temperatura demasiado elevada”. (57) La temperatura adecuada para su impresión es de 210-220°C, y tiene una densidad entre 1,2 y 1,4 g/cm³. Se trata del material que se ha empleado para las impresiones realizadas en este proyecto.

Sin embargo, presenta limitaciones, como por ejemplo su bajo punto de fusión, lo que lo hace inviable para aplicaciones que requieran soportar un mínimo de generación de calor. Por ejemplo, en la Figura 3.3 se muestra una polea que, a causa del calor generado por el motor (un potente motor Brushless) y transmitido a través de su eje, se ha fundido a los pocos minutos de funcionamiento.



Figura 3.3 Polea de PLA derretida por uso a alta temperatura. Fotografía del autor

Entre los otros materiales que se pueden encontrar en el mercado (59) están el PVA (Alcohol Polivinilo), PC (Policarbonato), Filaflex, Soft PLA (Ácido Poliláctico flexible), HDPE (Polietileno de alta densidad), Nailon, Laybrick, Laywoo-D3 etc además de compuestos formados por un plástico más otro material como el filamento de madera de Bq (70% PLA-30% fibras de madera) u otros incluso con metales.

Temperaturas:

Ya se ha propuesto un rango de temperaturas para los dos tipos de plástico más comunes, pero como norma general hay que considerar que a mayor velocidad de impresión mayor temperatura será necesaria.

Acabado de las piezas:

Se puede mejorar el acabado final de las piezas aplicando acetona en su superficie con un pañuelo, tanto para las fabricadas con ABS como con PLA. Ésta reducirá las rugosidades propias de la acumulación de capas u otras imperfecciones obteniendo un acabado más liso y suave.

Consejos para diseñar objetos correctamente:

Aunque es verdad que la impresión 3D permite fabricar piezas que no se podrían obtener fácilmente mediante los procedimientos tradicionales de producción, sí que es recomendable conocer algunos consejos que faciliten la impresión de éstas. Por ejemplo, las figuras deben estar orientadas de forma que si tienen caras planas grandes estén en contacto con la base, las curvas se imprimen mejor si se orientan en un plano paralelo a la base etc. Estas y muchas otras recomendaciones se pueden encontrar en (60), así como sugerencias para diseñar objetos especialmente enfocados a impresión 3D (61).

Una vez calibrado correctamente el firmware, nivelado la base y tener en consideración las recomendaciones de impresión, la calidad de las piezas impresas debe ser aceptable. Con la experiencia, tras muchas horas de funcionamiento, se pueden conocer mejor las características y limitaciones de nuestra propia impresora e ir adecuándolas. Con el tiempo y después de utilizar algún rollo de filamento se conseguirá la práctica para obtener piezas de buena calidad.

3.5. Fuentes de modelos 3D:

Si no se quiere diseñar una pieza 3D para su impresión o no se tienen los conocimientos necesarios, en la actualidad existe la posibilidad de buscarla en una biblioteca online de piezas. Éstas son grandes bases de datos que contienen las piezas que los usuarios han diseñado y subido previamente, de forma que cualquier persona pueda descargarse su modelo 3D e imprimirse una copia en su casa. Algunos ejemplos de estos sitios son Thingiverse (62), o Youmagine (63).

CAPÍTULO 4: ADAPTACIONES PARA ELABORAR PCB

En este capítulo se expone cómo se han desarrollado y diseñado las diferentes piezas que se han utilizado en la adaptación de la impresora para realizar placas de circuito impreso.

4.1. Diseño de las piezas necesarias

Se ha empezado por diseñar un cabezal que pueda albergar el taladro, en segundo lugar una base que pueda sujetar las placas de cobre a la propia base de la impresora y finalmente dos adaptadores para el cabezal que permitan acoplar nuevos instrumentos y herramientas.

4.1.1. Diseño del cabezal

Para realizar el fresado y taladrado del PCB inicialmente se ha pensado en utilizar el motor de 12 voltios detallado en el apartado de materiales (11). Partiendo de esa idea, se pretende diseñar un soporte para dicho motor que sea compatible con el carro del extrusor de la impresora, es decir, que se pueda sujetar mediante tornillos u otro acople al carro y que no entorpezca la movilidad de éste durante la impresión, fresado u otra operación.

Lamentablemente, hay diversas versiones de carro en la Prusa i3 por lo que el soporte no puede ser utilizado en todas. Por consiguiente, se han diseñado 2 versiones del soporte del motor: la primera para la impresora Prusa i3 Libelium (que es la que se va a utilizar principalmente) y una segunda para la Prusa i3 Hephestos.

El procedimiento seguido para este diseño parte del modelo de extensión .stl del soporte del carro del extrusor de cada versión, ya sea para Libelium (64) o para la Hephestos (65). De este archivo se puede extraer el modelo 3D para trabajar desde Autodesk Inventor y a partir de éste realizar las mediciones necesarias para diseñar un soporte que acople perfectamente.

A continuación se detalla cómo se ha realizado el diseño del soporte del motor para el caso específico del Libelium (que ha sido el que se ha utilizado en las pruebas). En las otras versiones se sigue un procedimiento similar.

Se empieza por abrir el archivo .stl desde inventor seleccionando este tipo de archivo desde el menú de abrir. Se representa un sólido que no se puede manipular como se haría normalmente en inventor (figura 4.1).

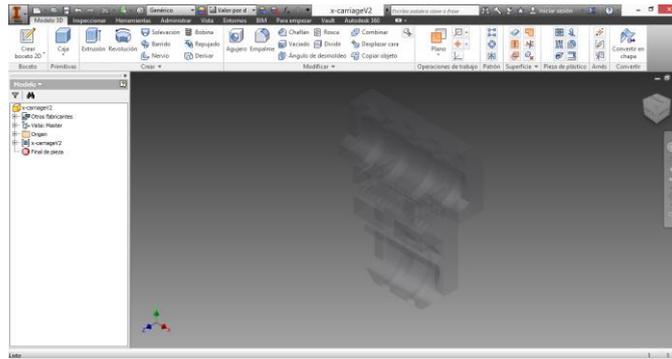


Figura 4.1 Pantallazo al abrir un archivo stl

Para poder trabajar con él se debe transformar a un modelo 3D de inventor. Para poder realizar esta función desde el programa es necesario descargar una aplicación de extensión desde su web: Mesh Enabler (66)

Una vez instalada, se selecciona la pieza con la herramienta “seleccionar cara y aristas” y con el botón derecho se selecciona la opción (que solo sale después de obtener esta extensión) “Convert to Base Feature” marcando la opción de “Solid/Surface”. Con ello se obtiene el modelo del soporte. Hay que añadir que a veces al abrir el archivo stl el sólido se presenta desfigurado y no se detectan bien las caras. Para solucionar este problema se puede abrir el archivo stl descargado con un programa de visualización de stl como el MeshLAB que automáticamente reunifica vértices y exporta el archivo como stl otra vez, reparándose de esta forma.

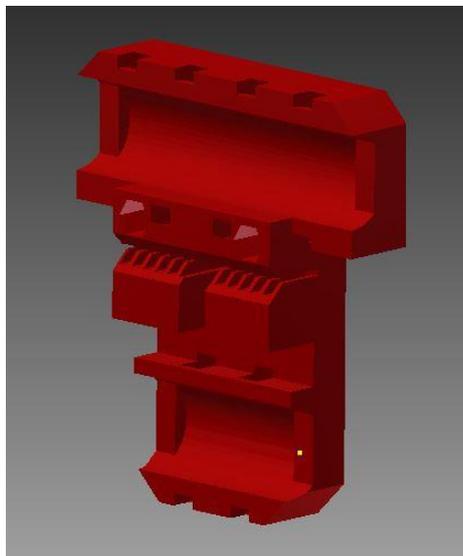


Figura 4.2 Modelo del carro del extrusor de la Prusa i3 Libelium

Ahora ya se pueden realizar medidas de distancias para el diseño del soporte del motor. Para ello se diseña un boceto en la parte plana del soporte. Las medidas son complicadas ya que las circunferencias en realidad están formadas por gran cantidad de rectas e Inventor no puede

encontrar el centro. Sin embargo se puede dibujar un círculo tangente a esas rectas y solucionar esto.

Con ello se obtiene el centro y podemos obtener los diámetros necesarios para el diseño.

A continuación, a partir de las dimensiones de esta pieza se realiza una similar pero con una extensión para sujetar el motor. Para ello se han tomado las medidas de éste.

Así pues se han diseñado varios modelos dependiendo de la pieza a la que han de acoplar:

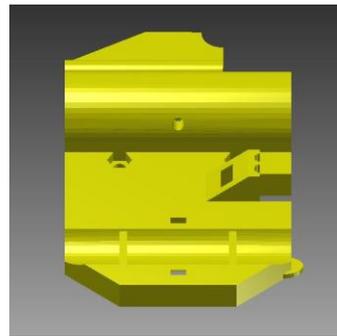
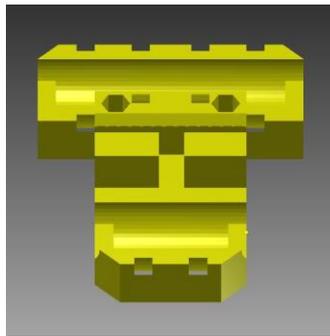


Figura 4.3 Carro del extrusor Prusa i3 Libelium Figura 4.4 Carro del extrusor Prusa i3 Hephestos

El modelo para la Prusa i3 Libelium:

En el caso de la Prusa i3 Libelium, se ha diseñado el cabezal de la Figura 4.5 (pieza en color naranja) con un amarre que envuelve el motor y mediante un tornillo en el extremo lo sujeta de forma inmóvil. También se diseña una pieza para ajustar el motor por la parte de encima (pieza en color gris), aunque posteriormente se comprueba que no es necesario ya que el amarre lateral permite una sujeción firme y suficiente.

Se utilizan orificios de métrica 3 para estas sujeciones y métrica 4 para su acople al carro, determinado por el tamaño de su orificio. Además de los dos tornillos de acople con el carro, por la parte trasera se incluyen dos orificios que forman un arco alrededor del rodamiento y que permiten añadir dos bridas y sujetar el cabezal de forma completa.

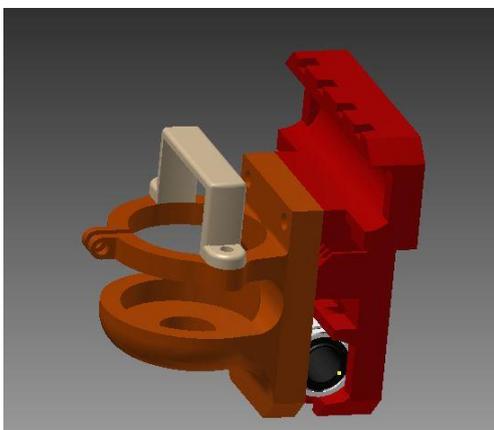


Figura 4.5 Ensamblaje del cabezal con el carro para la Prusa i3 Libelium

El modelo para la Prusa i3 Hephestos:

En este caso, el soporte es básicamente el mismo que en la Libelium pero más ancho para adecuarlo al tamaño del carro X de la Hephestos tal como se ve en la Figura 4.6 (pieza en color naranja), los orificios en los que va sujeto esta vez son de métrica 3 y además se añade una pieza por donde pasan los tornillos.

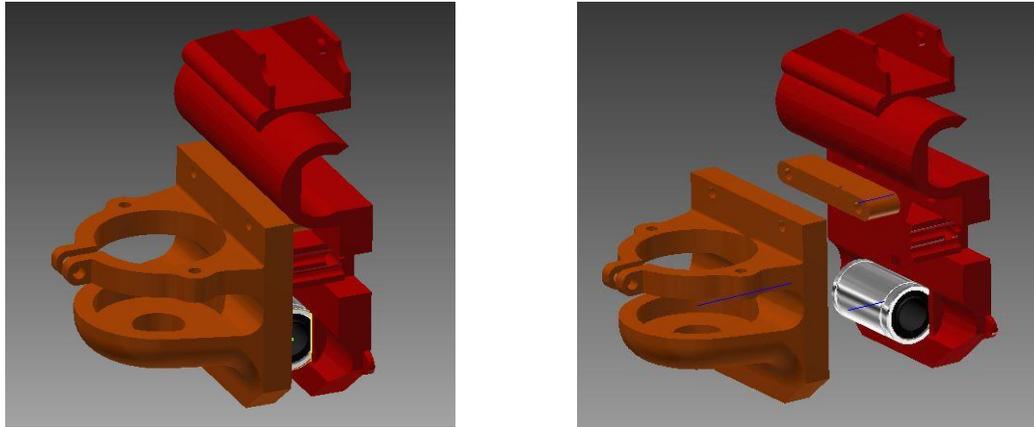


Figura 4.6 Ensamblaje del cabezal con el carro para la Prusa i3 Hephestos

En fases posteriores de la realización del TFG se comprueba que la estructura de este diseño se puede romper por el uso continuado así como por el cambio frecuente el motor fresador o el Dremel.

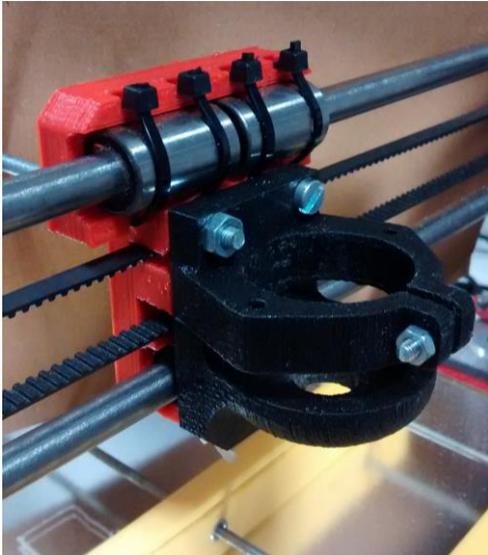
Con el fin de mejorar la robustez del soporte y sabiendo que la evacuación del calor no es gran problema, pues no se calienta en exceso, se rediseña el soporte. Se aumenta la amplitud de la abrazadera del motor y la sección y se reducen bordes angulosos en los concentradores de tensión. El diseño del nuevo modelo 3D para la impresora Libelium se muestra en la Figura 4.7 y para la impresora Hephestos en la 4.8. Finalmente el montaje para la impresora Libelium y Hephestos queda tal como se muestra en la Figura 4.9 y Figura 4.10.



Figura 4.7 Cabezal mejorado para Prusa i3 Libelium



Figura 4.8 Cabezal mejorado para Prusa i3 Hephestos



*Figura 4.9 Montaje del soporte para la impresora Libelium.
Fotografía del autor*



*Figura 4.10 Montaje del soporte para la impresora Hephestos.
Fotografía del autor*

4.1.2. Diseño de los soportes

Se diseña también un modo de sujetar las placas a la superficie de impresión de forma que estén completamente fijas. Además, se pretende que este método de sujeción sea válido para una amplia gama de tamaños de lámina, sea robusto, fácil y rápido de utilizar.

Se realizan dos diseños para éste propósito: un primer modelo simple lo más pequeño posible (para evitar grandes tiempos de impresión) y un segundo modelo más grande y robusto.

Modelo 1:

El siguiente diseño pretende que la pieza A de éste modelo (Figura 4.11) se sujete con pinzas a la base de impresión y la pieza B que tiene dos ganchos en los extremos se mueva a través de la base. La placa va en la parte superior sujeta con pinzas más pequeñas a través de los huecos que tienen las dos piezas.

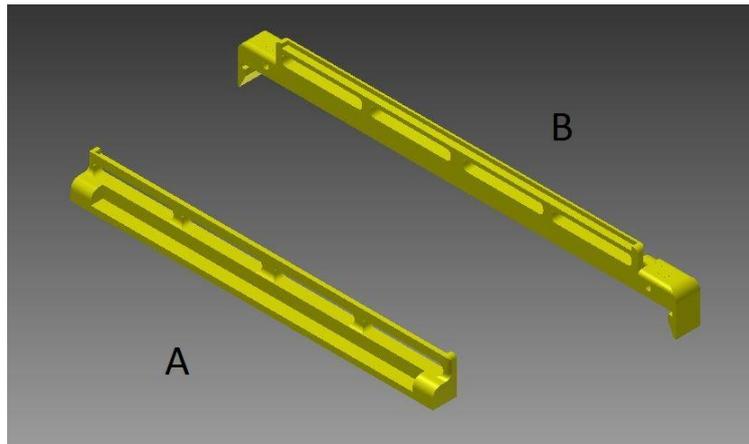


Figura 4.11 Primer modelo de soporte de la placa

No obstante, este planteamiento no ha dado buenos resultados, siendo difícil una correcta sujeción de la placa y, aunque recibe bien los esfuerzos normales como los taladros, se desajustan las placas muy fácilmente al recibir esfuerzos tangenciales típicos del fresado.

Por esta razón, después de varias pruebas, se ha descartado este plan y se ha preferido el siguiente modelo.

Modelo 2:

Se elige sujetar las placas de circuito desde sus bordes por compresión. En primer lugar, se busca un diseño más grande y robusto, pero al mismo tiempo versátil, para diferentes tipos y tamaños de placas. Además, es interesante que este sistema sea rápido de instalar en la impresora 3D (sin necesidad de atornillar nada) y que las placas de circuito se puedan quitar y poner fácilmente. La primera versión de este modelo es la mostrada en la Figura 4.12, que ejemplifica la intención del diseño.

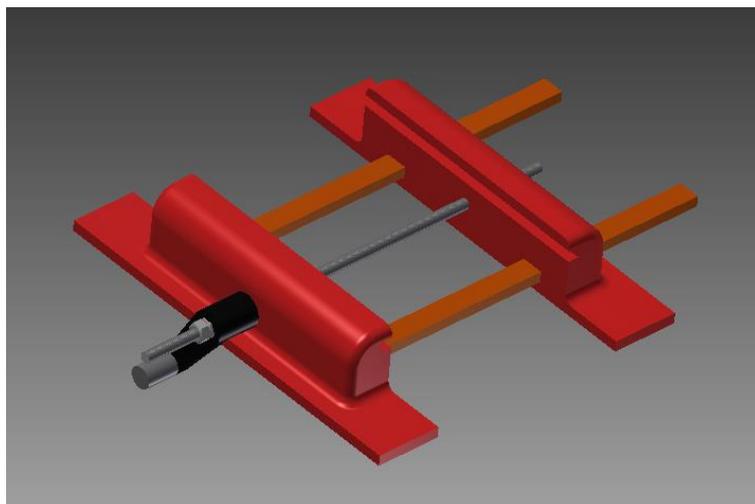


Figura 4.12 Segundo modelo de soporte de la placa en la primera versión

La idea es que toda la estructura se instale encima de la base de impresión mediante pinzas y se pueda abrazar la placa con la ranura al mover la manivela. Las dos piezas naranjas son las guías por las que se mueven las piezas y la manivela gira solidaria junto a una varilla roscada que es la que junta o separa las dos piezas rojas.

A partir de esta disposición se busca maximizar el borde de sujeción de la placa (para poder sujetar PCBs más grandes) y, al mismo tiempo, se reduce la sección de las abrazaderas (para ahorrar material y tiempos de impresión) tal como se muestra en la Figura 4.13.

En lugar de una base en la que se puedan poner las pinzas se emplazan dos entradas rectangulares donde acoplen éstas perfectamente. Además, se añaden dos varillas roscadas más por si fuera necesario posteriormente sus respectivas manivelas para abrazar el circuito desde más puntos. Haciendo esto se puede prescindir de las dos guías de plástico negras ya que las varillas hacen la misma función de alinear y guiar las piezas. Finalmente, en las pruebas de uso se decide descartarlas y no imprimirlas.

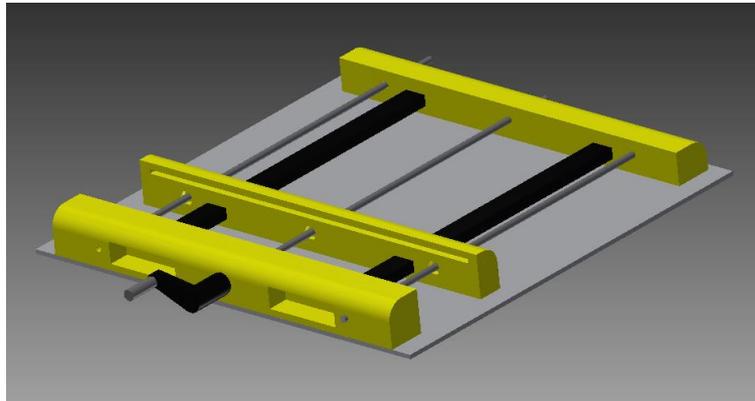


Figura 4.13 Segundo modelo de soporte de la placa en la segunda versión

Este diseño en la práctica se ha visto muy fiable. Las placas se sujetan perfectamente y no se mueven durante el fresado, taladrado u otras operaciones.

4.1.3. Diseño de otras piezas necesarias

Adaptador para el eje flexible de Dremel:

Como se ha mencionado, se realizan pruebas con el motor de 12 voltios (11) y también con el taladro comercial *Dremel 200 Series*. Para ello, resulta necesario el acople de dicho taladro a los cabezales anteriormente descritos. Esto se realiza mediante un eje flexible tipo manguera tal como se ha descrito en el apartado 2.1.2, que permite el movimiento del taladro en su extremo acoplado el otro a la herramienta. El extremo de la manguera tiene un diámetro menor que el del motor, por lo que es encajado al soporte del motor mediante este adaptador (Figura 4.14).

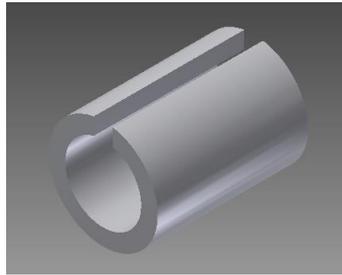


Figura 4.14 Adaptador para el eje flexible de Dremel (modelo 3D)

Por otro lado se diseñan asimismo dos piezas similares, una tiene dos hendiduras para añadirle las roscas (Figura 4.15), mientras la otra no (Figura 4.16) que inmovilicen la manguera por encima del soporte del motor. Las dos se acoplan una con otra y se aprietan con dos tornillos y un amarre. Se puede ver todo el montaje en la Figura 4.17 y en la Figura 4.18.

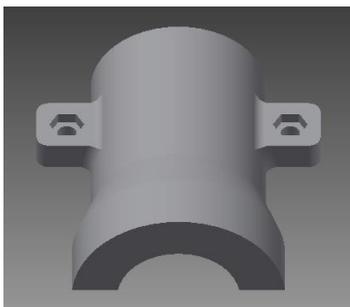


Figura 4.15 Adaptador para el eje flexible de Dremel 2ª (modelo 3D)

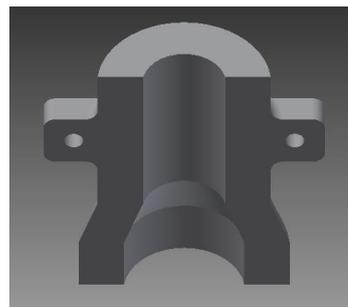


Figura 4.16 Adaptador para el eje flexible de Dremel 2B (modelo 3D)

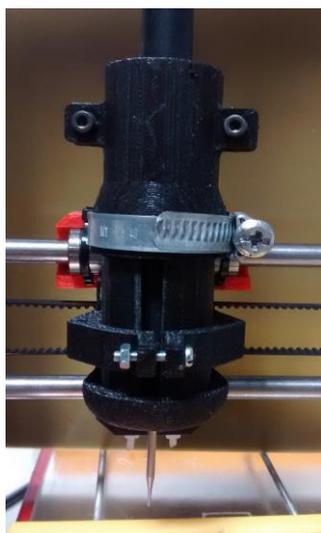


Figura 4.17 Adaptador para el eje flexible de Dremel.
Fotografía del autor

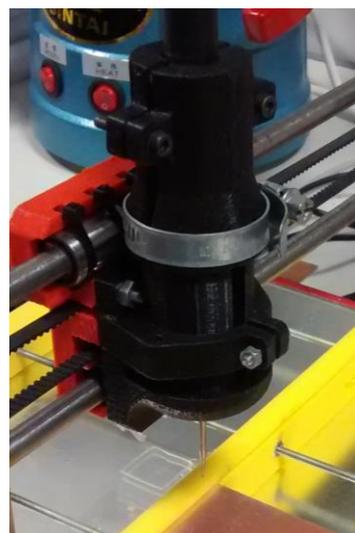


Figura 4.18 Adaptador para el eje flexible de Dremel.
Fotografía del autor

Adaptador para rotulador:

También se realiza un adaptador para acoplar un rotulador indeleble en el soporte del motor con el que es posible realizar más pruebas. El diseño es similar al anterior, se reduce el diámetro interno y se añade una hendidura que añade flexibilidad a la pieza al ajustarla exteriormente tal como se muestra en la Figura 4.19. Se puede ver el resultado en la Figura 4.20.

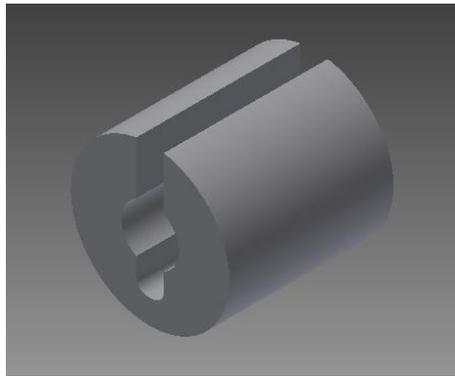


Figura 4.19 Adaptador para un rotulador indeleble (modelo 3D)



Figura 4.20 Adaptador para un rotulador indeleble

4.2. Impresiones realizadas

A continuación se detallan los diseños que finalmente se han impreso. En un principio se ha impreso la primera versión de los cabezales, pero han terminado fracturándose durante la realización de las pruebas. Esta ha sido la motivación de su segunda versión.

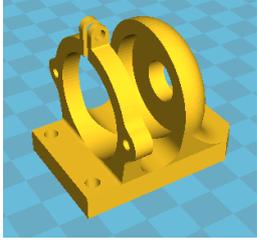
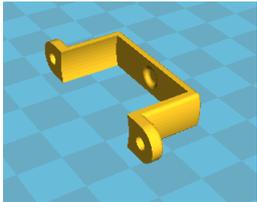
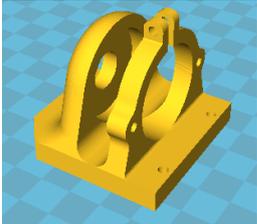
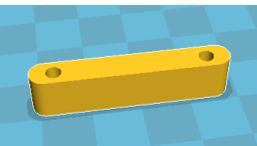
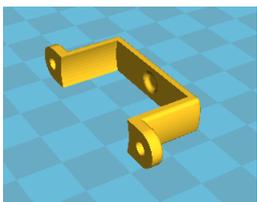
Una vez realizada, se sustituye el cabezal para ambas versiones y éste cumple su cometido correctamente sin fractura.

Con esta sustitución se aprovecha la versatilidad de las impresiones 3D, ya que permiten reponer componentes rápidamente. Es posible mejorar y probar nuevos prototipos a un coste muy bajo.

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se puntualizan las piezas finalmente impresas y sus características. Se utiliza la impresora Bq Hephestos para todas las impresiones con PLA como material. Asimismo, se selecciona el perfil Hephestos preconfigurado detallado en las Tablas 3.5 y 3.6, modificando la densidad interna de algunas piezas del 20 al 50% para otorgarle una mayor robustez.

Tabla 4.1 Análisis de cabezales impresos y sus características

	Pieza	Densidad interna de la pieza (%)	Tiempo	Filamento (m)	Peso (g)	Precio (€)
Libelium versión 1		50	1h 57min	5.39	13	0.27
		50	10min	0.42	1	0.03
	TOTAL	-	2h 7min	5.80	14	0.30
Hephestos versión 1		50	2h 20min	7.00	18	0.35
		50	11min	0.50	1	0.02
		50	10min	0.42	1	0.03
	TOTAL	-	2h 41min	7.92	20	0.40

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

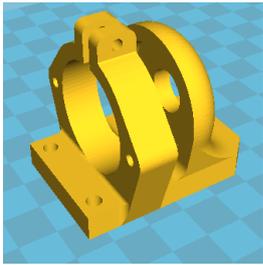
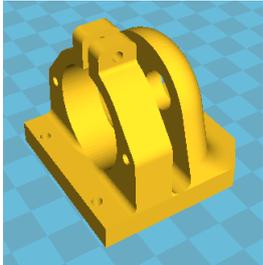
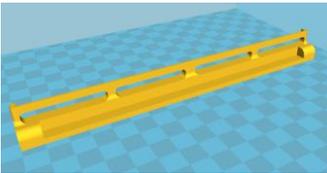
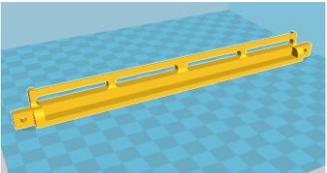
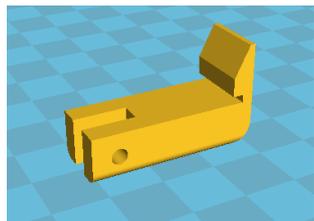
Libelium versión 2		50	2h 14 min	6.29	16	0.31
Hephestos versión 2		50	2h 38min	8.01	20	0.40

Tabla 4.2 Análisis de soportes de la placa impresos y sus características

	Pieza	Densidad interna de la pieza (%)	Tiempo	Filamento (m)	Peso (g)	Precio (€)
Modelo 1		50	1h 28min	4.62	12	0.23
		50	1h 32min	4.92	12	0.24
		50	20	0.89	2	0.06
	TOTAL	-	3h 20min	10.43	26	0.53

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

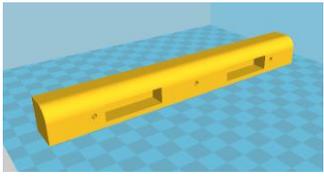
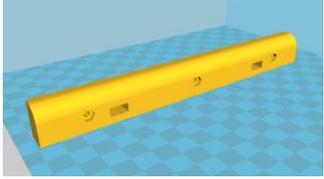
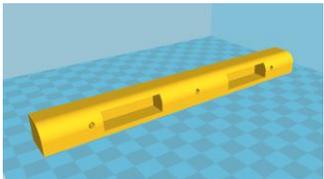
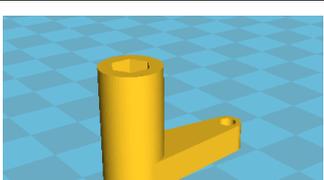
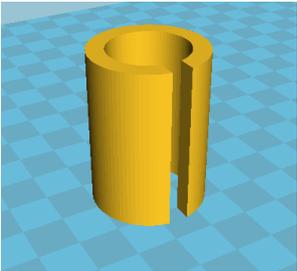
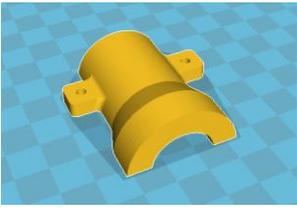
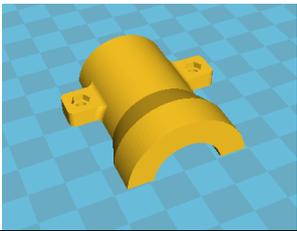
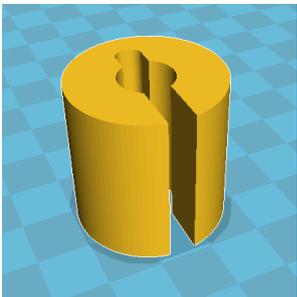
Modelo 2		50	3h 43min	13.36	33	0.67
		50	2h 36min	9.43	24	0.47
		50	2h 41 min	9.80	25	0.49
		50	18min	0.48	1	0.02
	TOTAL	-	9h 18min	33.07	83	1.65

Tabla 4.3 Análisis de adaptadores impresos y sus características

	Pieza	Densidad interna de la pieza (%)	Tiempo	Filamento (m)	Peso (g)	Precio (€)
Adaptador para eje flexible de Dremel		20	53min	2.01	5	0.10

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

		20	50min	2.19	5	0.11
		20	50min	2.19	5	0.11
	TOTAL	-	2h 33min	6.39	15	0.32
Adaptador rotulador		20	47 min	2.02	5	0.10

Estos parámetros son obtenidos antes de cada impresión desde el software Cura, que proporciona esta información. Para ello se indica un precio de filamento de 19.90 €/Kg (precio del filamento en la tienda online de Bq en el momento de la consulta) (67). Tanto el tiempo, los metros de filamento, el peso y el precio por pieza incluyen las estructuras de apoyo impresas durante la realización de la pieza.

En la realización del presupuesto se podría tomar el valor del peso de cada pieza para multiplicarlo por el precio por Kg de filamento (tal como Cura calcula el precio). Sin embargo, como el valor del peso se muestra redondeado, es más exacto tomar el valor del precio directamente.

Se han subido estos diseños a una biblioteca de modelos 3D de forma que se puedan compartir libremente. Se pueden visualizar y descargar desde [Youmagine](#) (68)

CAPÍTULO 5: REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

En este capítulo se expone el procedimiento seguido para generar una placa de circuito impreso desde su creación esquemática hasta el procedimiento automatizado de plasmación de éste en la placa realizada por la impresora 3D.

Se empieza por la elección y diseño de un circuito simple para, a partir de éste, generar los archivos necesarios con el objetivo de concebir las instrucciones que dictarán el recorrido de la herramienta.

5.1. Elaboración de un circuito simple para las pruebas

Se requiere utilizar un circuito sencillo y pequeño para las pruebas de fresado de placas y se ha pensado en una aplicación del integrado 555. Una vez se compruebe el correcto funcionamiento y solucionen los diversos problemas que puedan surgir, se puede probar con fresar circuitos más complejos.

Particularmente, se ha optado por un Flash Led regulable mediante un potenciómetro basado en el diseño de Arielle Hein (69).

5.1.1. Elaboración del esquema de un circuito

En primer lugar, se reproduce el circuito eléctrico (Figura 5.1) mediante el software Eagle y se seleccionan los componentes desde la librería del programa. Como ya se ha especificado en el apartado 2.2.2 se puede utilizar otro software como KiCad para realizar el mismo procedimiento.

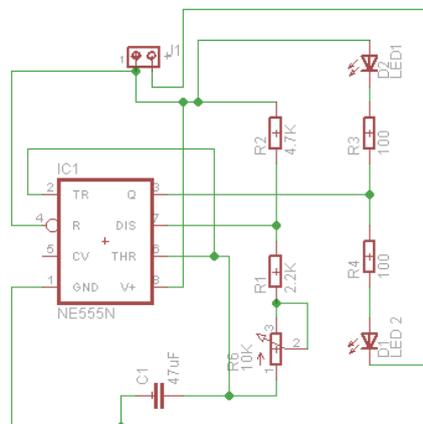


Figura 5.1 Esquema del circuito utilizado basado en el diseño de Arielle Hein (69)

5.1.2. Creación del brd

Una vez realizado el diseño del circuito se plasma éste en componentes y pistas. Esto se realiza generando el llamado board. Se enlazan las uniones con pistas y se sitúan los componentes de forma ordenada. El resultado es el mostrado en la Figura 5.2.

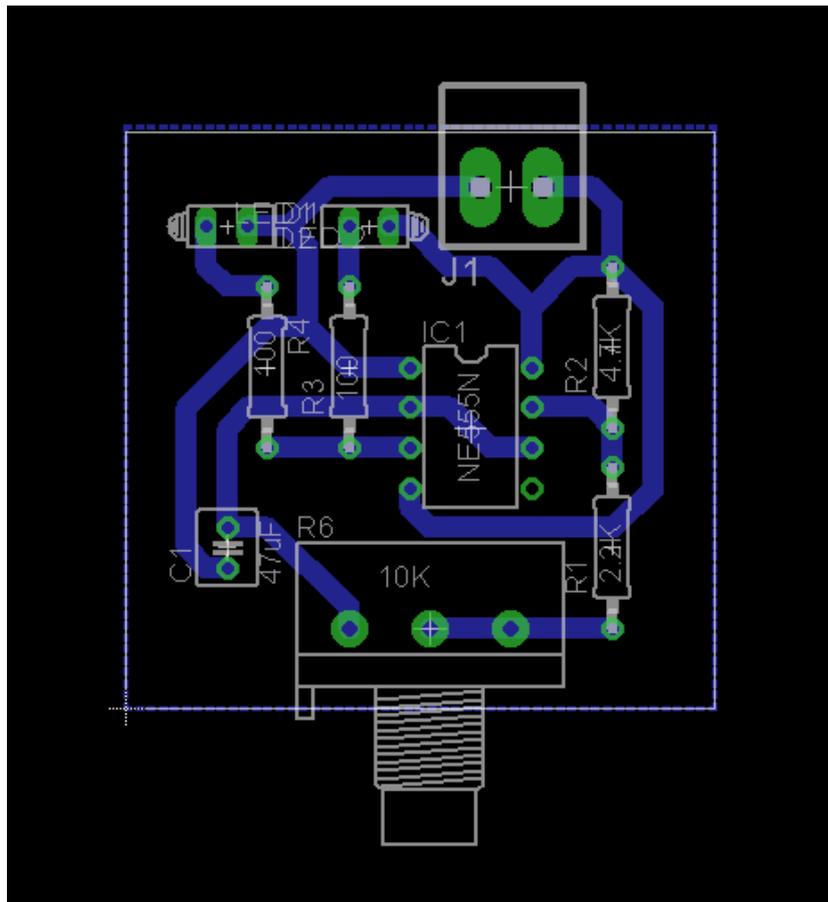


Figura 5.2 Board del circuito utilizado basado en el diseño de Arielle Hein (69)

5.1.3. Archivos Gerber y Excellon

Una vez diseñado el circuito y colocados los componentes, el siguiente paso en el proceso es la creación del archivo Gerber y Excellon. Mediante estos archivos se podrá exportar la imagen del circuito para su posterior transformación en órdenes GCode.

Concretamente se trata de archivos de imagen 2D por vector destinados a la fabricación de PCB (70). Básicamente estos ficheros contienen las coordenadas de los agujeros (Excellon) y las coordenadas y recorrido de las pistas (Gerber). Para generarlos, el software Eagle tiene el icono de “CAM Processor” donde se pueden exportar estos dos archivos.

Para generar el Gerber (71), dentro del CAM Processor, en “Device” se selecciona el tipo de archivo “GERBER RS-274X”, que es el estándar actualmente. Se eliminan todas las capas seleccionadas y sólo se marcan *Bottom o Top (la que se haya utilizado para las pistas), Pads, Vias*. En “File” se selecciona la ruta donde exportar los archivos, se pone nombre y se le añade la extensión “.cmp”. Finalmente se selecciona “Process Job”.

Para generar el Excellon (71), se procede de forma similar. Se selecciona el tipo de archivo “EXCELLON”, se desmarcan todas las capas y sólo seleccionamos *Drills y Holes*. Se nombra al archivo y se le añade la extensión “.drc”. Finalmente se selecciona “Process Job”

Si se prefiere también se puede seleccionar la opción Gerber274 o Excellon en “Job”, de esta forma se seleccionan las opciones anteriores automáticamente.

Con este proceso se exporta la información de las pistas y orificios para la posterior conformación del PCB.

5.2. Realización de las instrucciones G-Code.

El siguiente paso es crear las instrucciones G-Code, que la impresora/CNC es capaz de entender, a partir de los archivos Gerber y Excellon generados anteriormente. Para ello se utiliza un software específico que realiza esta tarea, los llamados programas CAM. Estos programas son los encargados de generar la ruta que seguirá la herramienta de fresado a partir de la tarea que se quiere realizar. En el caso de éste proyecto, a partir de un diseño de PCB generará las órdenes para el mecanizado de éste.

Para este proyecto se utiliza el software FlatCAM por estar precisamente enfocado a la realización de PCB. Además es libre, ofrece bastantes opciones de edición y presenta buenos tutoriales de aprendizaje. Funciona muy bien con los ficheros Gerber de las pistas, pero no siempre es capaz de analizar e interpretar correctamente los Excellon para los orificios. En las FAQ del programa ya avisan sobre este hecho:

“Parsing Excellon is a nightmare and formats from different PCB programs seem to be quite inconsistent. FlatCAM does not have a clear set of rules to understand coordinate numbers.” (72)

Y efectivamente, al analizar los archivos Excellon generados por Eagle, FlatCAM no sólo no escala correctamente los agujeros de la placa (problema que se puede solucionar fácilmente mediante reescalado) sino que distorsiona completamente sus coordenadas. De inicio esto imposibilita generar GCodes para taladrar.

Sin embargo, después de varias pruebas y mucha búsqueda de información entre usuarios, se ha encontrado una solución en el foro de FlatCAM (73), consistente en abrir el archivo Excellon con extensión .drc en un visualizador de Gerber (74) y salvar esa capa, reparándose de esta forma.

Otra opción viable, es utilizar otro software que sea capaz de leer los archivos correctamente. Rapid-PCB por ejemplo (75), aunque ofrece menos opciones es un software online gratuito y se puede utilizar en cualquier navegador sin necesidad de instalaciones adicionales.

El funcionamiento es sencillo, se importan los ficheros creados anteriormente, se caracteriza el tipo de máquina CNC que utilizamos (tamaño, diámetros de fresas etc) y se puede exportar el GCode. No presenta el problema de escalado y distorsión de los archivos Excellon por lo que se puede trabajar correctamente.

Otra opción para este mismo fin es CooperCAM, con una versión limitada gratuita (76). Y aunque es exclusivo para ficheros Excellon también puede resultar útil “Convert Excellon Drill File to G-Code” (77).

Para la realización del trabajo finalmente se opta por utilizar completamente FlatCAM reparando los archivos Excellon con el visualizador. Si se quiere información sobre la utilización de este software se puede consultar su manual (30) o el tutorial de Luis Díaz sobre el programa (31).

No obstante, como se verá en el apartado 5.3.1, la elaboración de la placa por fresado no resulta completamente viable. Por tal motivo se trata la opción de su elaboración mediante otra técnica, como es el marcaje de las pistas mediante un rotulador indeleble. De esta forma se protegen del ataque posterior de un ácido. Se desarrollan a continuación como generar los gcode para estas dos opciones.

5.2.1. GCodes para fresado

A la hora de generar estas instrucciones se utiliza el software FlatCAM, tanto para las pistas (Gerber) como los taladros (Excellon).

GERBER:

Al abrir este fichero desde FlatCAM se muestra el contenido de la Figura 5.3.

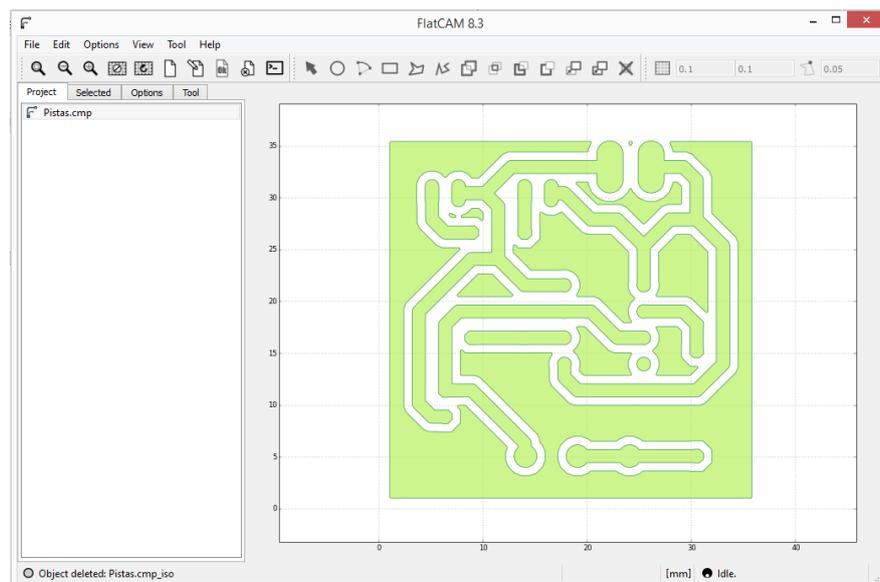
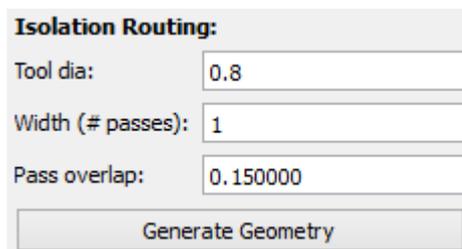


Figura 5.3 Pantallazo de FlatCAM al abrir un archivo Gerber

Si se selecciona este objeto se pueden agregar los parámetros de fresado deseados en la pestaña Selected. Se seleccionan unos valores adecuados en “Isolation Routing” (Figura 5.4). Se modifica el valor del diámetro de la fresa (se utiliza una fresa de diámetro 0.8). Con esto se selecciona “Generate Geometry” y se genera un nuevo objeto, la ruta de la herramienta.



Isolation Routing:

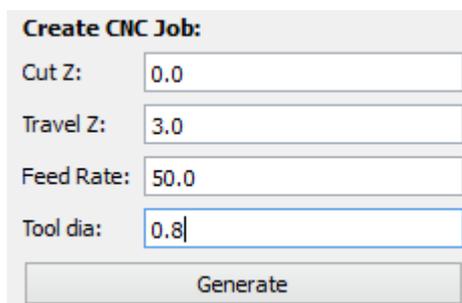
Tool dia:

Width (# passes):

Pass overlap:

Figura 5.4 Parámetros de Isolation Routing en FlatCAM

Después se selecciona este objeto y en la opción de crear un nuevo trabajo para la herramienta CNC se modifican los parámetros (Figura 5.5). La herramienta se situará a altura 0 para cortar, cuando no frese viajará a entre pistas a una altura de 3 mm, fresará a 50mm/min y su diámetro es de 0.8 mm.



Create CNC Job:

Cut Z:

Travel Z:

Feed Rate:

Tool dia:

Figura 5.5 Parámetros de Create CNC Job en FlatCAM

Una vez realizado se Genera este nuevo objeto. Con esto se obtiene la trayectoria de la herramienta (Figura 5.6). Ahora sólo queda seleccionar la opción de “Export GCode”, se elige la carpeta contenedora y se obtiene el GCode.

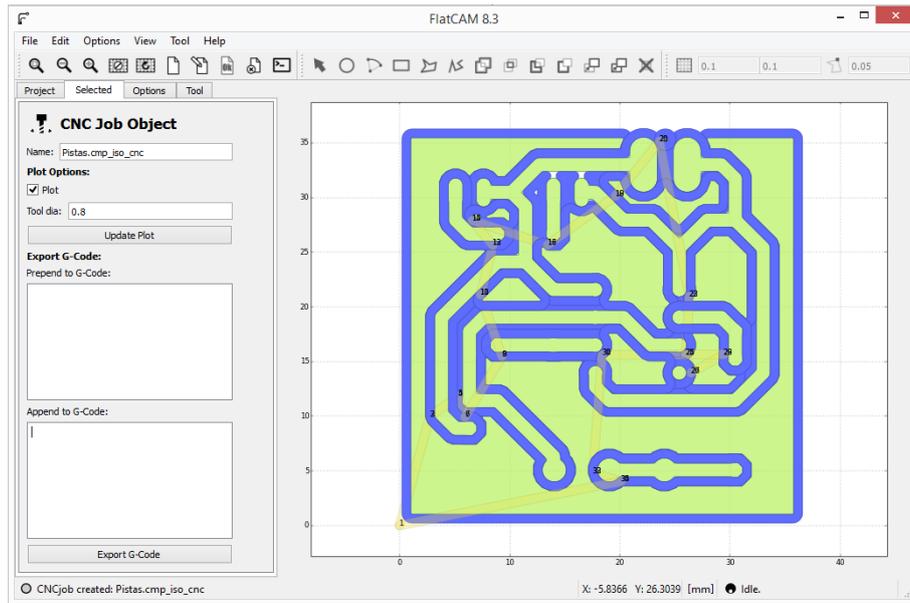


Figura 5.6 Pantallazo de FlatCAM de la trayectoria a seguir en las pistas

-EXCELLON:

Se procede de forma similar, pero antes se debe reparar el fichero o no se visualizará nada. Como ya se ha indicado, se abre con un visualizador de Gerber/Excellon (74) y se guarda con la misma extensión. Ahora sí, se abre el fichero con FlatCAM y se muestran correctamente la posición de los taladros (Figura 5.7)

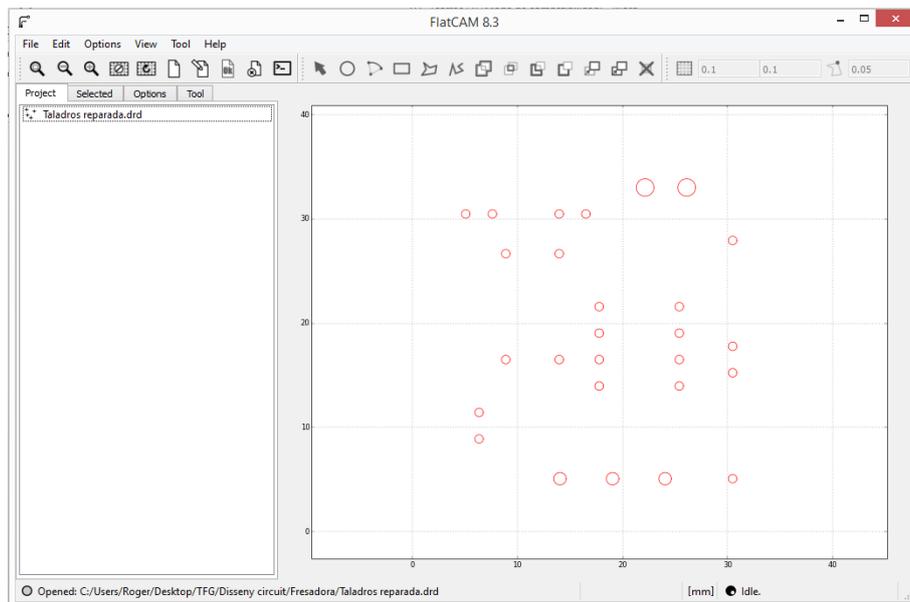


Figura 5.7 Pantallazo de FlatCAM al abrir el fichero Excellon reparado

Tal como se muestra en la Figura 5.8, se seleccionan los tres diámetros de broca que precisa el circuito para generar unas instrucciones que taladre los tres (por simplificar el proceso, si se quisiera se seleccionaría solamente un diámetro por Gcode y se realizaría el proceso de taladrado varias veces, una por diámetro, cambiando el tamaño de la broca en cada ejecución). Se marca una altura de perforación de 0, movimiento entre taladros a 5 mm y velocidad de 60 mm/min y se le clica en “Generate”.

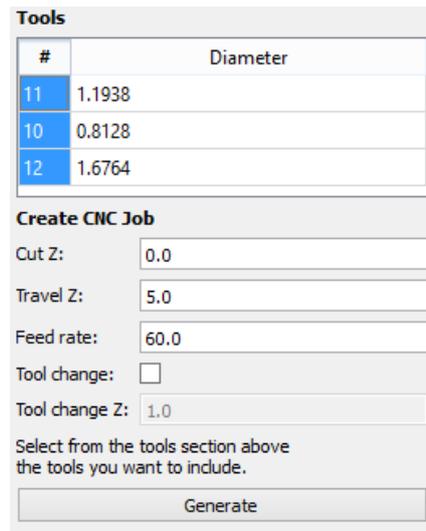


Figura 5.8 Parámetros de Tools y Create CNC Job en FlatCAM

Se consigue de ésta forma la trayectoria de la herramienta (Figura 5.9) y ya se puede exportar el fichero GCode de los taladros seleccionando la carpeta contenedora.

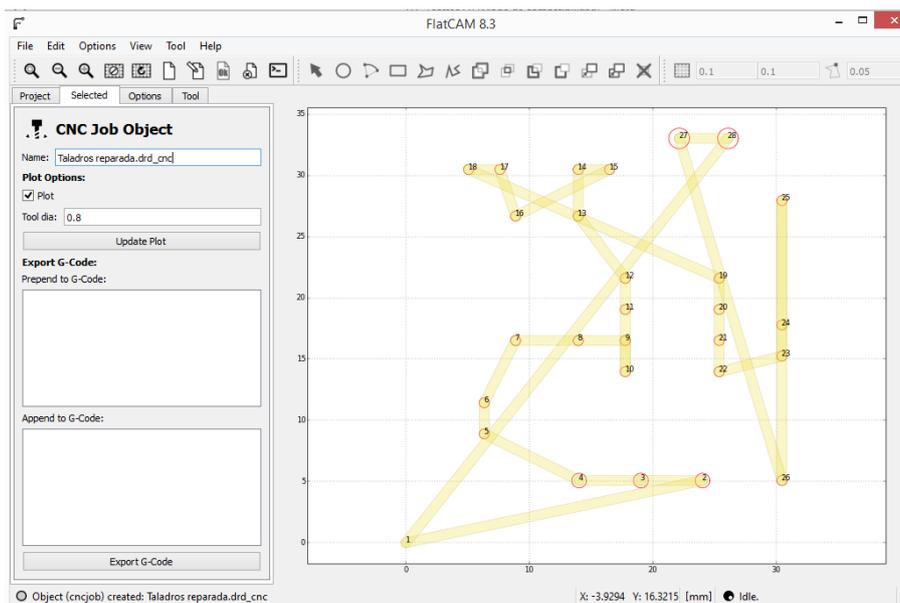


Figura 5.9 Pantallazo de FlatCAM de la trayectoria a seguir en los taladros

5.2.2. Gcodes para ataque por ácido

Antes de comenzar con las orientaciones para generar éste GCode hay que señalar una particularidad importante. Si se pretende generar una placa por fresado el objetivo es eliminar el cobre alrededor de lo que serán las pistas, de esta forma se aíslan estas del resto del circuito.

Sin embargo, si de lo que se pretende es usar un ácido para eliminar el cobre alrededor de las pistas, se debe proteger éstas de alguna forma. La forma elegida es marcándolas con un rotulador indeleble (resistente al ácido) acoplado a la impresora para automatizar el proceso. Por tanto, la trayectoria de la herramienta no debe ser el contorno de las pistas, sino las pistas en sí. Más adelante se explicará en detalle este método.

Lamentablemente, FlatCAM no permite crear trayectorias que cubran las propias pistas y no su contorno, por este motivo se ha buscado un software alternativo. Si bien el fichero Excellon de los taladros creado anteriormente sí que se va a utilizar.

Finalmente se ha utilizado Inkscape, ya que en una de sus últimas actualizaciones permite la generación de Gcodes a partir de dibujos vectoriales.

Para generar las trayectorias de la herramienta desde Inkscape se sigue el siguiente proceso:

Se importa la imagen del circuito (ésta se exporta desde Eagle o directamente se recorta) y se escala manualmente para hacerla coincidir con el tamaño real de la placa (indicado en Eagle) modificando su altura y anchura (Figura 5.10).

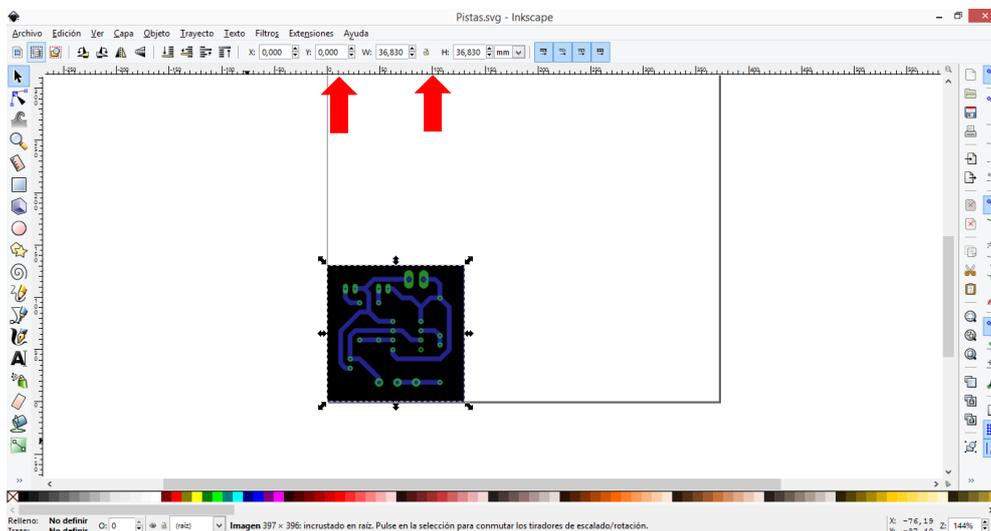


Figura 5.10 Pantallazo de Inkscape al escalar la imagen

A continuación seleccionada la imagen, en la pestaña “Objeto” se clicla “Objeto a trayecto”. En segundo lugar, en la pestaña “Trayecto” se clicla “Vectorizar mapa de bits” con los parámetros de pasada simple: Corte de Luminosidad (umbral 0.100) e invertir imagen. Seguidamente se puede

eliminar el borde cuadrado del circuito si no se quiere proteger del ácido recortando su trayecto. Con esto se han conseguido las pistas escaladas que se quiere marcar en la placa de cobre, tal como se muestra en la Figura 5.11.

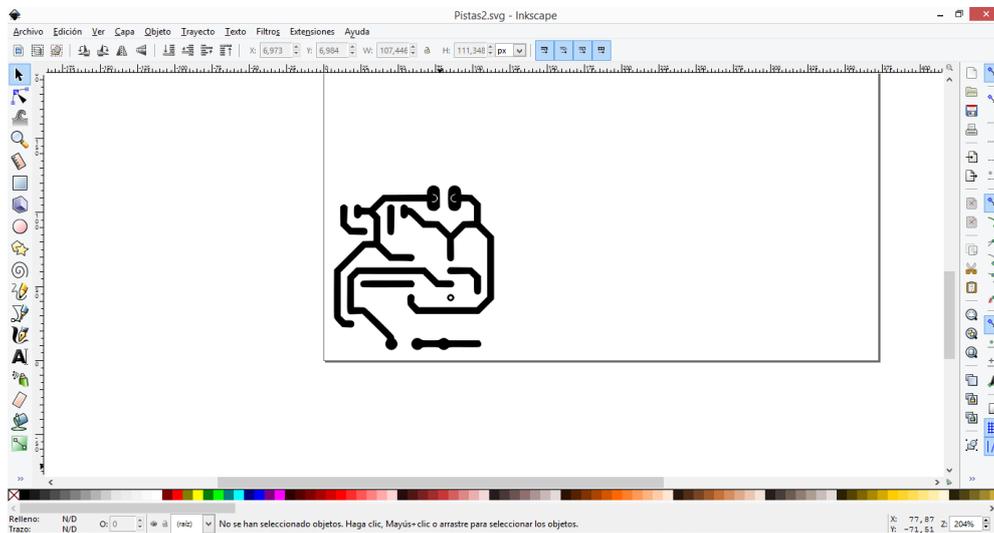


Figura 5.11 Pantallazo de Inkscape de las pistas

Para que la posición de las pistas esté acorde a la de los taladros es importante que ambos Gcodes empiecen desde el mismo punto. Para ello se propone esta solución. Se importará a Inkscape una imagen (un recorte) de la trayectoria de los taladros de FlatCAM y se escalará al tamaño real del circuito tal como se ha hecho antes (la cuadrícula de FlatCAM puede ayudar donde cada cuadro son 10mmx10mm). Una vez hecho esto se superponen ambas imágenes tal como se muestra en la Figura 5.12, colocando la nueva debajo de las pistas desde "Objeto" "Traer al fondo". Se hace coincidir el punto inicial de los taladros con el borde inferior izquierdo de Inkscape. De esta forma ambos Gcode inician su trayectoria desde el mismo punto.

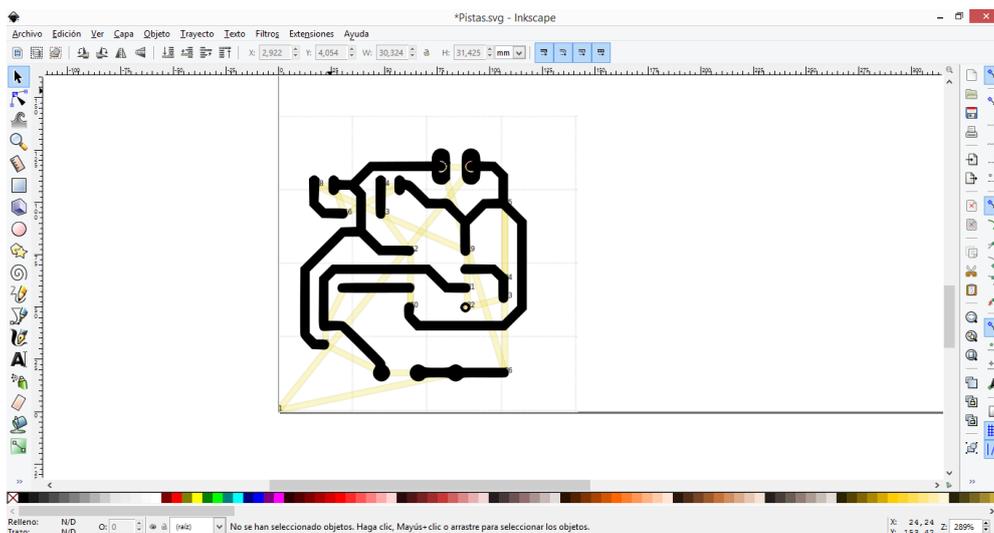


Figura 5.12 Pantallazo de Inkscape de las pistas superpuestas con la trayectoria del taladro

En siguiente lugar se debe crear una capa con el dibujo del circuito. Para ello “Capa” y “Añadir capa” y después se mueve el objeto de las pistas a esta capa. Una vez realizado, en la pestaña “Extensiones”, “GcodeTools” se accede a “puntos de Orientación” marcando “2-points mode”, “Superficie Z”=0, “Profundidad Z”=0 y unidades en mm. Ahora se accede a la “Biblioteca de herramientas” y se selecciona la opción “cilindro”.

Con todo esto sólo quedará configurar los parámetros de la herramienta tal como se ha hecho en la Figura 5.13 mediante la herramienta de texto.

Luego, se selecciona la opción “Grabado” en la misma pestaña de “GCodeTools”. En preferencias se introducirá una altura de movimiento de 5mm y se le determinará el directorio donde se extraerá el código. Volviendo a la pestaña “Grabado” se clic en “Aplicar”. De este modo se habrán conseguido las trayectorias de la herramienta para marcar las pistas y sus instrucciones. El resultado es el mostrado en la Figura 5.13.

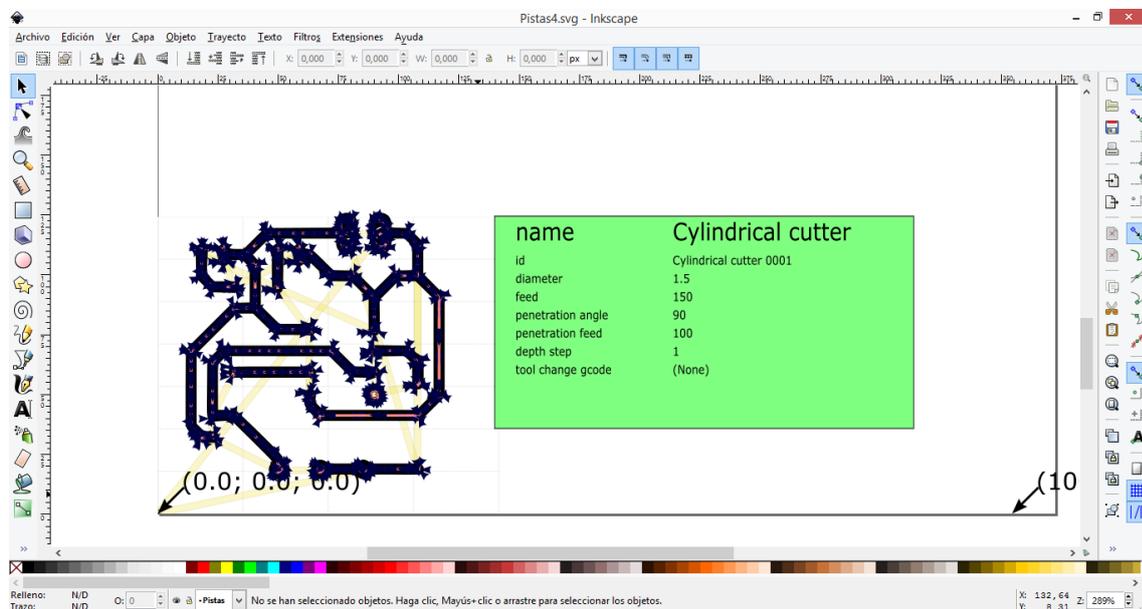


Figura 5.13 Pantallazo de Inkscape de la trayectoria de la herramienta

5.3. Elaboración de la placa

Al elaborar la placa, se opta en primer lugar por realizar las pistas mediante fresado. Posteriormente, para obtener mejor calidad se opta por otro método alternativo.

Antes de iniciar los GCodes, se debe preparar el montaje (Figura 5.14). En otras palabras, instalar la base que soportará la placa de cobre, instalar el cabezal del motor fresador mediante dos tornillos y bridas y otro preparativo más. Resulta necesario incorporar un nuevo final de carrera para el eje Z tal como se muestra en la Figura 5.15 con el fin de establecer la altura exacta de la broca u otro instrumento, pues ésta puede no ser la misma al cambiar la herramienta. Se fija pues con cola

termofusible a un lateral del soporte de la placa. Para facilitar el proceso, se sustituye la conexión al Arduino del final de carrera Z original por éste nuevo, con lo que no hace falta modificar el firmware Marlin para contemplar dos finales de carrera. La idea detrás de esto es que antes de iniciar el proceso de fresado en si la broca se dirija a este final de carrera para así determinar su altura.



Figura 5.14 Montaje completo del soporte de placas. Fotografía del autor

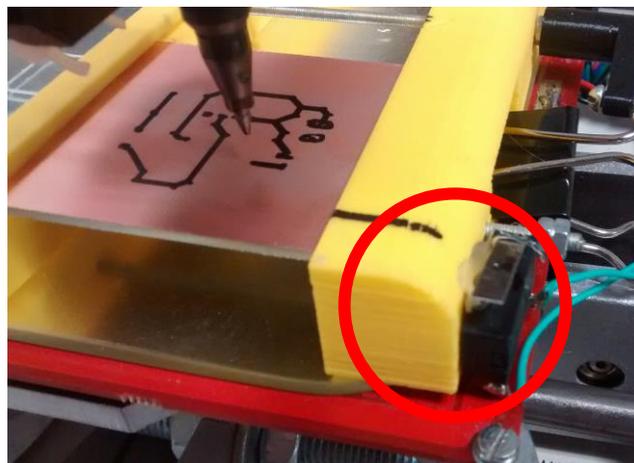


Figura 5.15 Final de carrera instalado en un lateral del soporte de placas. Fotografía del autor

Así pues, se han modificado todos los GCode de tal forma que antes de iniciar el proceso siga estas instrucciones de inicialización:

1. Se aplica la instrucción Homing en los Ejes X Y originales de la impresora, de tal forma que se determine el punto 0 de ambos.

2. El cabezal se dirige a la zona donde está situado el nuevo final de carrera y se hace un Home en este eje.
3. La broca se dirige a un punto donde se iniciará la elaboración de la PCB.
4. Se modifica este punto como nuevo 0 de las coordenadas X Y Z para los Gerber y con un Z 1 para los taladros, de forma que pueda descender más y así realizar los orificios. Estos valores son orientativos y se deben determinar de forma práctica, pues dependen de la altura en que se ha situado el final de carrera respecto a la placa. Sin embargo una vez determinado los valores correctos, servirán para todas las demás pruebas.
5. Inicia la parte del GCode con las instrucciones para elaborar la placa.

Las instrucciones de inicialización propuestas que se han utilizado son las siguientes:

G21 ; programación en milímetros

G90 ; posición definida con referencia al 0

G28 X0 Y0 ; Homing en X e Y

G1 Y125 F1000 ; movimiento con interpolación a la posición Y125 con feedrate 1000

G28 Z0 ; Homing en Z

G1 Z6 ; movimiento a Z=6mm

G1 X10 Y60 ; se le indica la posición de la placa donde se empezará a fresar

G1 Z0.8 ; se le indica la altura de la superficie de la placa respecto al Home Z
; Modificando éste valor se modifica la profundidad a la que se fresará. ; 0.8 se ha obtenido de forma práctica después de varios ensayos

G92 X0 Y0 Z0 ; Se designa este punto como el nuevo punto 0,0,0

Para controlar el proceso se han utilizado dos programas CNControl y CNCCodeController, ambos definidos en el apartado 2.2.2. Los dos funcionan bien, pero el primero de ellos es más versátil a la hora de modificar las instrucciones y por ello es el que se ha elegido para realizar la tarea.

Para todas las operaciones a realizar se copiará el código de inicialización anterior y se modificará si se quisiera cambiar el punto de inicio, profundidad de fresado.

A continuación se detalla por separado los resultados obtenidos en los dos procedimientos diferentes realizados.

5.3.1. Elaboración por fresado

En este proceso en primer lugar se ha optado por utilizar el motor DC de 12V tanto para fresar como para realizar los agujeros. Se ha alimentado directamente de la toma de alimentación de la

impresora 3D, que también es de 12 voltios, a través de un interruptor de forma que se pueda encender al realizar las pruebas (Figura 5.16). Sin embargo, tras algunos ensayos se comprueba que esta herramienta carece de la potencia necesaria, se atasca con mucha facilidad y es incapaz de fresar. Por ello, se decide emplear un Dremel con su manguera extensora tal como se vio en las Figuras 4.17 y 4.18.

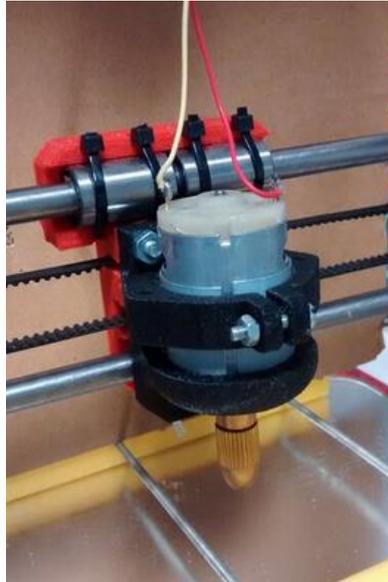


Figura 5.16 Motor de 12 voltios instalado

Pero esta opción conlleva modificar la estructura de soporte diseñada para el pequeño motor de 12V. Se desea aprovechar el trabajo hecho y por eso se diseña un nuevo adaptador para sujetar e inmovilizar con la ayuda de un amarre la punta de la manguera del Dremel.

La propia máquina Dremel se sitúa en un lugar elevado para, en lo posible, mantener la manguera recta, lo que minimiza el calor por rozamiento generado.

Para el fresado se emplea la misma fresa que se emplea con el motor DC, una fresa esférica de diámetro 0.8mm.

Es necesario asegurar la planitud en la base sobre la que se va a realizar el fresado y que este plano sea paralelo al de movimiento del eje X Y. Asegurar esto es muy importante, pues de no hacerlo la profundidad de fresado en algunas zonas puede ser la correcta, pero en otras más bajas puede obtenerse una profundidad menor. Y esto puede provocar zonas donde no se elimine el cobre completamente y exista continuidad eléctrica donde no debería haberla. Para tal fin ha sido necesario retirar los muelles que regulan la altura de la superficie de impresión de forma que esta superficie sobre la que apoya el montaje esté completamente fija y horizontal.

Para iniciar el fresado se abre el fichero GCode de las pistas y se le añade las instrucciones de inicialización como se ha explicado anteriormente.

Tras varias pruebas de ensayo y error (Figura 5.17) se ha determinado la profundidad de fresado adecuada y se le ha modificado este parámetro en las instrucciones de inicialización.

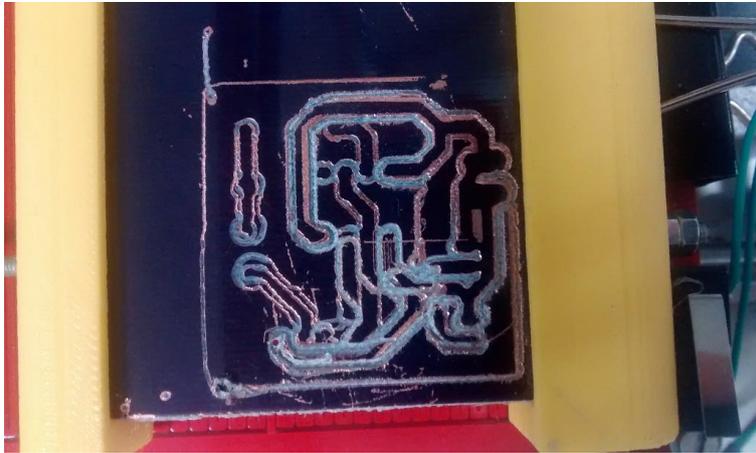


Figura 5.17 Primeras pruebas de fresado. Fotografía del autor

Finalmente se ha realizado un fresado del diseño del circuito con dos pasadas. El resultado se muestra en la Figura 5.18.



Figura 5.18 Resultado del fresado de la placa. Fotografía del autor

La apariencia de la placa (Figura 5.18) no es la deseada, presenta un aspecto muy basto y algunas pistas no están bien definidas, aunque esto se podría evitar aumentando desde el diseño su grosor. Pero con ello aumentaría también el tamaño de los circuitos y no es lo que se pretende.

También se observa que, aunque el motor de la Dremel dispone de suficiente fuerza, la fresa no es el modelo adecuado. Se debe reducir pues el tamaño de la fresa, y utilizar una en “V” de diámetro inferior a las disponibles, tal como se detalla en (78).

Ante este resultado no se prueba a taladrar los agujeros de los pads, pues directamente no se puede utilizar esta placa para albergar un circuito.

Se ha propuesto otra alternativa descrita en el siguiente apartado, dada la inviabilidad de generar una placa correcta mediante fresado con los materiales disponibles en el momento.

5.3.2. Elaboración por ataque de ácido

En este apartado se marcan las pistas en la placa de cobre por un método alternativo, pues el resultado del fresado no ha sido aceptable y no se dispone de fresas de tamaño más adecuado. Se opta por pintar las pistas en la placa mediante un rotulador indeleble de forma automatizada, acoplando éste al cabezal de la impresora 3D utilizando un soporte adaptador.

Este método se emplea normalmente de forma manual, dibujando a mano alzada las pistas con un rotulador (se puede encontrar un artículo sobre el proceso en (3)), o para reparar posibles errores del método del planchado. Depende en gran medida de la destreza que tenga cada uno, pero de lo que se pretende es que la impresora 3D haga este trabajo. Con ello se puede asegurar la replicabilidad exacta de las PCB, se pueden realizar diseños mucho más compactos que de forma manual, de forma más rápida e incluso se pueden realizar los taladros de forma automatizada.

En resumen, la impresora 3D dibujará las pistas y seguidamente (cambiándole el rotulador por el motor de 12 voltios) realizará los taladros todo de forma automatizada.

Una vez marcada se podrá retirar el cobre sobrante mediante un método químico permaneciendo solamente el metal en las zonas marcadas. De esta forma se quedaran grabadas las pistas.

El camino que se ha seguido es el siguiente:

Primero se ejecuta el Gcode del Grabado de las pistas. El rotulador se moverá al final de carrera para determinar su altura y luego dibujará el circuito con dos pasadas (Figura 5.19). Si se requiere depositar más tinta sobre la placa de cobre, se puede volver a ejecutar y realizar las pasadas necesarias. A continuación, al finalizar el programa, se hace ascender el rotulador desde el control de manual CNCControl para poder extraer el indeleble junto con su adaptador e introducir el motor de 12 voltios con la broca de 0.6 mm o 0.8 mm instalada.

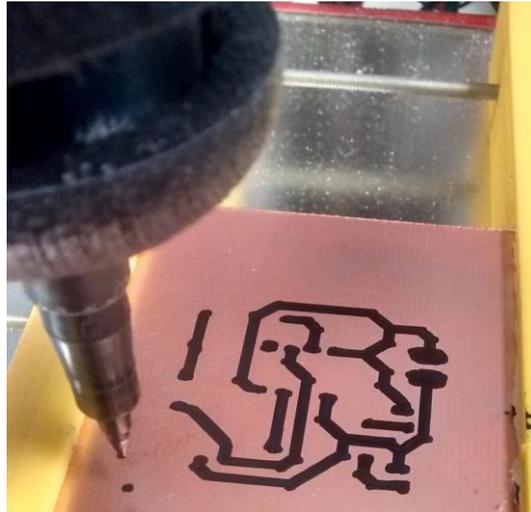


Figura 5.19 Realización del marcaje de pistas por rotulado. Fotografía del autor

En segundo lugar, se iniciará el código de los taladros. La broca se dirigirá al final de carrera, se determinará su altura, se moverá para situarse en la placa y empezará el taladrado. Es apropiado encender el motor desde el interruptor una vez realizado el contacto con el final de carrera para no dañar éste.

En la Figura 5.20 se ha perforado una placa sin antes rotularla para poder apreciar mejor los agujeros.

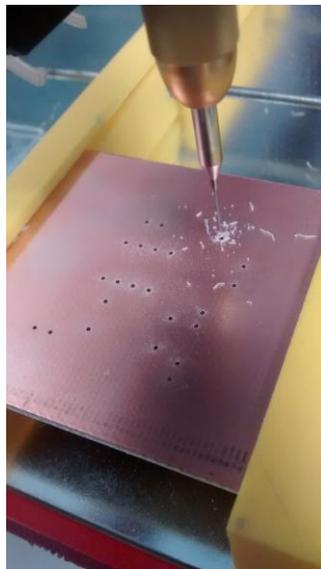


Figura 5.20 Ensayo de taladrado en placa sin realizar antes el marcaje de pistas. Fotografía del autor

Una vez terminado el proceso, tanto el rotulado como la perforación, la herramienta se dirigirá automáticamente al punto de partida de la placa.

El resultado de todo el proceso, marcaje de las pistas más el taladrado, se puede ver en la Figura 5.21.

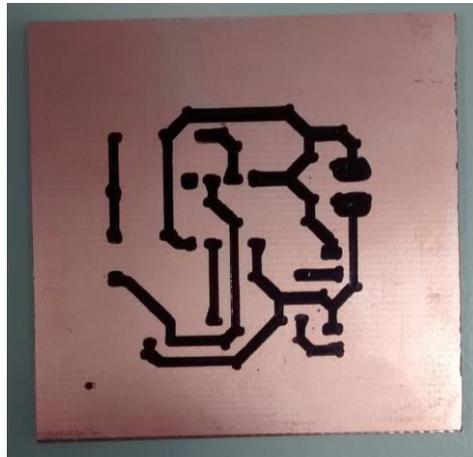


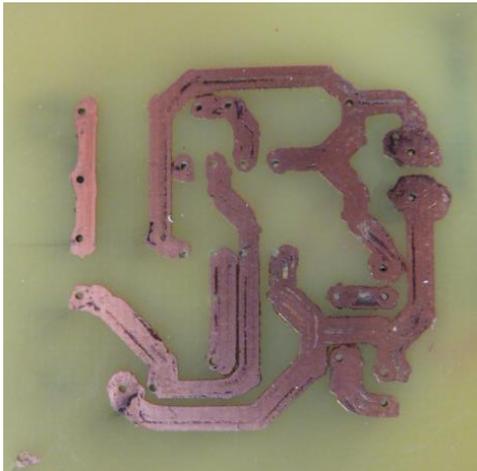
Figura 5.21 Resultado final del rotulado más taladrado. Fotografía del autor.

Si alguna pista no se encuentra perfectamente marcada siempre se puede realizar otra pasada para remarcarla o hacerlo a mano. No obstante el procedimiento ha sido en gran medida automatizado.

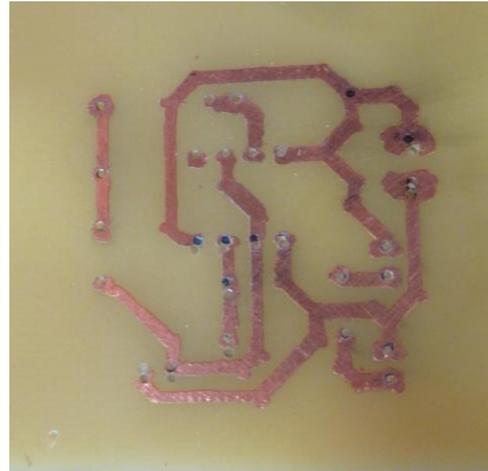
El siguiente paso se trata del ataque químico. Para la mezcla atacante, se ha elegido utilizar el la descrita en (3), así como su procedimiento. Ésta está formada en un 50% de agua destilada, un 25% de ácido clorhídrico (al 20%, agua fuerte tipo sulfamant doméstico) y un 25% de agua oxigenada (peróxido de hidrógeno de 110 volúmenes, al 30%) mezclados en este orden. Para trabajar con esta mezcla, se deben utilizar pinzas de plástico, además de tomar las medidas de seguridad pertinentes, pues los vapores emanados cuando se ataca el cobre son irritantes.

Se prepara un tupper con la mezcla y otro con agua para su posterior lavado. Se sumerge la placa en el ácido y tras poco más de un minuto de contacto el cobre no protegido ya se ha consumido quedando solamente las marcas de rotulador. Rápidamente se lava la placa con abundante agua y se frota con un cepillo. Después se puede eliminar la tinta con alcohol, quedando al descubierto las pistas.

En la Figura 5.22 se observa el resultado tras el ataque con ácido para una placa elaborada con un rotulador de punta gruesa y en la Figura 5.23 para uno de punta fina. Para tener un orden de escala, el circuito forma un cuadrado de 40 x 40mm.



*Figura 5.22 Resultado con rotulador punta gruesa.
Fotografía del autor*



*Figura 5.23 Resultado con rotulador de punta fina.
Fotografía del autor*

Para próximos diseños se propone marcar también la superficie no utilizada, de forma que el ácido no la elimine. De esta forma se ataca la placa de forma más rápida y con la misma cantidad de ácido se pueden realizar mayor cantidad de placas, por lo que puede ser interesante con un criterio económico o ambiental. No obstante, se puede también rellenar manualmente, pues la geometría de las pistas ya ha sido definida.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

1. Se ha conseguido el objetivo de poner en marcha las tres impresoras 3D, se ha marcado el procedimiento para tal fin y se han ofrecido algunas recomendaciones para sacarles el máximo partido. Además se ha documentado todo el proceso.

2. Se han realizado unos diseños propios que permiten adaptar una impresora 3D Prusa i3 en la elaboración de PCB. Se han impreso éstos para los posteriores ensayos y se han compartido los modelos 3D en la red a través de [Youmagine](#) (68).

3. El procedimiento de fresado puede ser viable pero debe ser sometido a más ensayos con fresas de tamaño más pequeño no disponibles durante la realización del trabajo.

Para solventar éste percance se ha propuesto la automatización del procedimiento de ataque por ácido.

4. El procedimiento por ataque de ácido ha sido automatizado en gran medida. Para circuitos mucho más grandes y complejos resulta de gran utilidad particularmente el taladrado automatizado. Esto se podría realizar incluso si se eligiera elaborar el PCB mediante una insoladora, procedimiento más ampliamente utilizado. Se han conseguido taladros perfectamente alineados con los que se pueden colocar componentes de muchas patas sin dificultad. No obstante para circuitos de menor complejidad (que permitan pistas relativamente anchas) se puede utilizar asimismo la aplicación del rotulado automatizado.

5. Desde una perspectiva no industrial dirigida profesionales o particulares se ha presentado un método automatizado efectivo de realizar PCB para prototipos de hasta 170 x 170 mm (tamaño del soporte de placas). Además se ha documentado todo el procedimiento.

6. A partir de las ideas y técnicas presentadas en este trabajo se pueden asimismo elaborar nuevas aplicaciones como grabados en madera (utilizando un procedimiento similar con Inkscape junto con la multiherramienta Dremel), realizar dibujos y pinturas bien en papel o para decorar superficies como vidrio o plástico con el marcador indeleble etc.

Estas son algunas aplicaciones con los diseños de este trabajo, pero se pueden diseñar cabezales o adaptadores diferentes que permitan utilizar el software Inkscape para elaborar dibujos y trabajos con multitud de herramientas. Algunos ejemplos pueden ser: elaborar un adaptador para un láser que permita grabados y cortes, elaborar un adaptador para albergar un tubo inyector de material comestible para decorar platos de cocina, acoplar una pintura de camisetas para realizar diseños propios etc.

ANEXO I: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS IMPRESORAS

En este anexo se detallan las características técnicas de las tres impresoras utilizadas, que por su amplio contenido no se ha incorporado al capítulo de Materiales y Métodos empleados. Son las ofrecidas por el fabricante.

Impresora Prusa i2 (79):

Fabricante: RepRap

Tecnología: FDM - FFF

Materiales: PLA, ABS

Tamaño máximo de impresión: 200x200x120 mm

Extrusor: Simple

Tipo de extrusor: Wade's Geared Extruder

Tipo de 'hot end': J-Head

Tamaño de filamento: 3,00 mm

Diámetro de boquilla: 0,40mm

Espesor de capa: 300 - 500 micras

Base calefactable: No

Movimiento eje X: Extrusor

Movimiento eje Y: Bandeja

Movimiento eje Z: Extrusor

Tipos de archivo: .stl

Conectividad: USB

Open source: Sí

Impresora Prusa i3 de Cooking Hacks (42):

Input voltage: 220V (Europe) / 110V (US)

Material: 3mm ABS (recommended) and 3 mm PLA

Approximately assembly time: 12 hours

Printing area: 20x20x20 cm

Printer dimensions: 34x44x37 cm

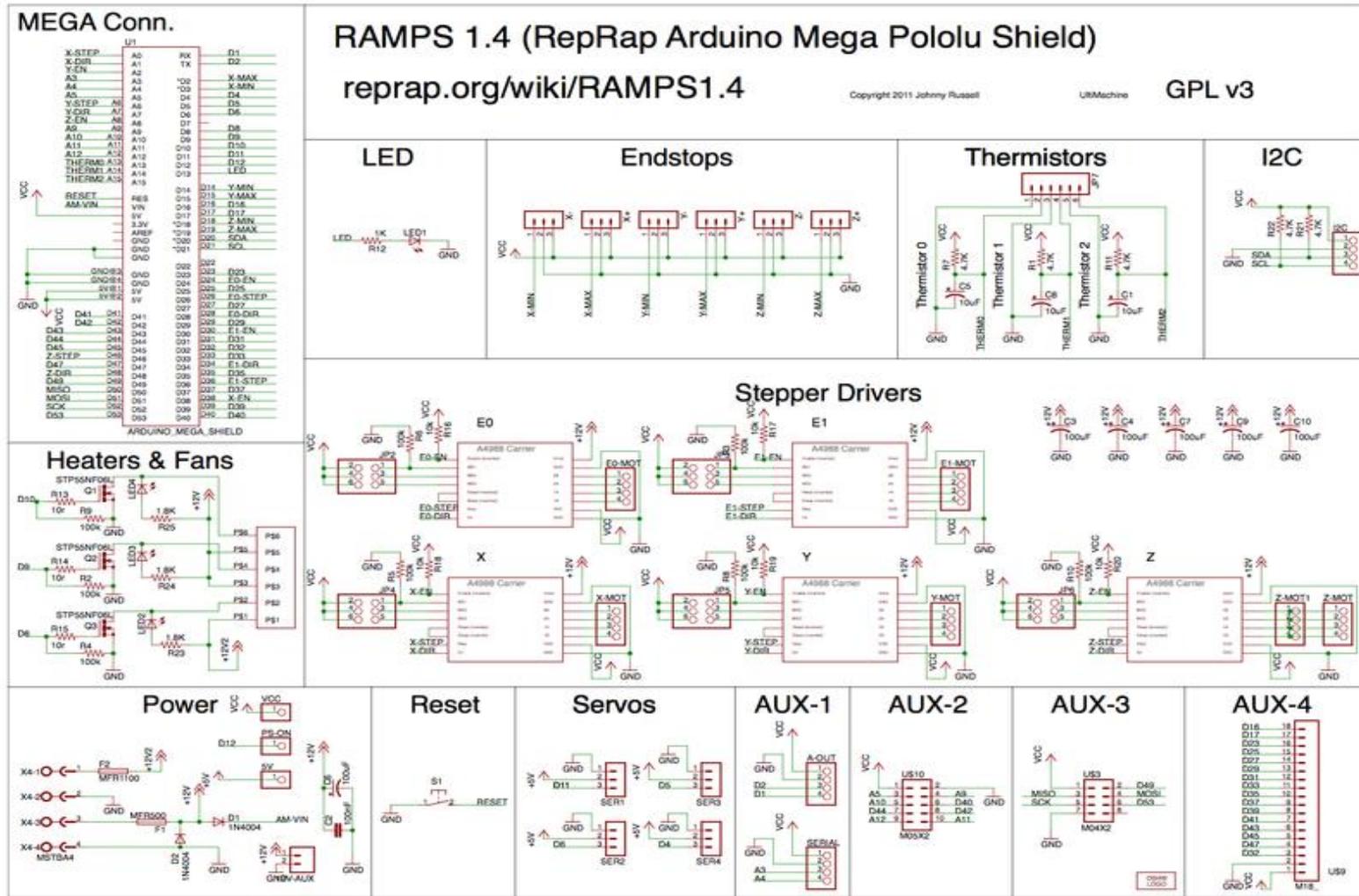
Based on the PRUSA ITERATION 3 - IT3

Impresora Prusa i3 Hephestos de BQ (9):

Tabla I.1: Especificaciones técnicas de la Impresora Prusa i3 Hephestos. (9)

Colores disponibles	Azul Rojo Amarillo
Electrónica	Ramps 1.4 Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación Termistores 100k en extrusor Mega 2560 Base fría de cristal tamaño 220 x 220 x 3 mm Fuente de alimentación de 220 AC 12 DC 100W Cartucho calefactor 40W 12V
Resolución	Muy Alta 60 micras Alta 100 micras Media 200 micras Baja 300 micras
Velocidad de impresión	Velocidad recomendada 40-60 mm/s Velocidad máxima recomendada 80-100 mm/s
Dimensiones	Impresora sin bobina PLA (X x Y x Z): 460 x 383 x 430 mm Impresora con bobina PLA (X x Y x Z): 460 x 383 x 580 mm Volumen de impresión: 215 x 210 x 180 mm Caja: 408 x 425 x 233 mm
Materiales	PLA, HIPS, FilaFlex entre otros
Mecánica General	Marco y base de aluminio pintado al polvo Rodamiento lineal de bolas LM8UU para X, Y, Z Cadenas portacables Igu Sistema de nivelado de base de impresión con 4 puntos y amortiguación Ventiladores brushless axiales con rodamientos de bolas Barras de cromo duro para los carros X,Y,Z Rodamiento axial de bolas B623ZZ para las poleas X, Y Acoplamientos flexibles para las varillas roscadas del eje Z Sistema de cambio rápido de base de impresión con Clips Piezas impresas en PLA
Mecánica extrusor	Extrusor de diseño propio Disipador de aletas con ventilador axial Boquilla de 0.4 mm para filamento de 1.75 mm Tobera de refrigeración de pieza
Seguridad	Extrusor protegido con pieza de diseño propio
Software	Firmware derivado de Marlin Archivos admitidos: .gcode Entorno recomendado: Cura Software, Slic3r, Repetier, Kisslicer Sistemas operativos compatibles: Windows XP y superiores, Mac OS X y superiores y Linux
Comunicaciones	Lector de tarjetas SD Puerto USB tipo B
Contenido de la caja	6 guías de montaje Garantía Certificado de calidad
Peso	Peso de la caja: 9,7 Kg

ANEXO II: CONEXIONES Y PINES DE LA RAMPS 1.4:



(80)

Referencias

1. **Ducas, Charles.** *Electrical apparatus and method of manufacturing the same.* US 1563731 A Estados Unidos, 1925.
2. **4pcb.** The History of the PCB. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://www.4pcb.com/pcb/>.
3. **Manuel, Jose.** 100ciaencasa. *Tutorial Electrónica Básica. 15. Circuitos impresos (I).* [En línea] 18 de Abril de 2015. [Citado el: 4 de Julio de 2015.] http://100ciaencasa.blogspot.com.es/2015_04_01_archive.html.
4. **Maturana, Jesús.** Xataka. *Éstas son las tecnologías de impresión 3D que hay sobre la mesa y lo que puedes esperar de ellas.* [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>.
5. **Crump, S. Scott.** *Apparatus and method for creating three-dimensional objects.* 5,121,329 Estados Unidos, 9 de Junio de 1992.
6. **Sánchez, Miguel.** Evolución de la impresión 3D. [En línea]
7. **RepRap.** [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] [http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_\(iteration_2\)](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_2)).
8. **Cooking Hacks.** Impresora prusa i3 Libelium. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <https://www.cooking-hacks.com/3d-printer-complete-kit-with-tools-prusa-it3>.
9. **BQ.** Prusa i3 Hephestos. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.bq.com/es/prusa>.
10. **RepRap.** [En línea] [Citado el: 2015 de Junio de 27.] http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephestos/es.
11. **Banggood.** WLXY Mini Electric Hand Drill DIY Electric Drill Drilling Tool Set. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.banggood.com/WLXY-Mini-Electric-Hand-Drill-DIY-Electric-Drill-Drilling-Tool-Set-p-952213.html>.
12. **Dremel Europe.** DREMEL® 200 Series. [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <http://www.dremeurope.com/es/es/dremel%C2%AE200series-6010-ocs-c/>.
13. —. Eje flexible (225). [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <http://www.dremeurope.com/es/es/ejeflexible-223-ocs-p/>.
14. —. Fresa para grabar 0,8 mm (105). [En línea] [Citado el: 2 de Julio de 2015.] <http://www.dremeurope.com/es/es/fresaparagrabar0-8mm-104-ocs-p/>.
15. **RS.** Broca de Perforación para PCB, DU66, Carburo, 0.6mm. [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <http://es.rs-online.com/web/p/brocas-de-perforacion-para-pcb/7538593/?searchTerm=753-8593&relevancy-data=636F3D3126696E3D4931384E525353746F636B4E756D6265724D504E266C753D656E266D6D3D6D61746368616C6C26706D3D5E5C647B337D5B5C732D2F255C2E2C5D5C647B332C347D2426>.

16. —. Broca de Perforación para PCB, DU68, Carburo, 0.8mm. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <http://es.rs-online.com/web/p/brocas-de-perforacion-para-pcb/7538606/>.
17. —. Placa de Cobre para PCB, AD20, Simple Cara, FR4, Grosor 35µm, 200 x 300 x 1.6mm. [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <http://es.rs-online.com/web/p/placas-resistentes-a-tinta-de-cobre/2192123/?searchTerm=219-2123&relevancy-data=636F3D3126696E3D4931384E525353746F636B4E756D6265724D504E266C753D656E266D6D3D6D61746368616C6C26706D3D5E5C647B337D5B5C732D2F255C2E2C5D5C647B332C347>.
18. **BQ**. Store. [En línea] <http://store.bq.com/es/bobina-pla-bq>.
19. **Arduino**. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://www.arduino.cc/>.
20. **MarlinFirmware**. GitHub. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>.
21. **Diosdado, Raúl**. ZonaMaker. *Firmware Marlin*. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora/14-crea-imp-firmware-marlin>.
22. —. ZonaMaker. *Manual de Cura*. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>.
23. **Ultimaker**. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://software.ultimaker.com/>.
24. **Autodesk**. Inventor. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.autodesk.es/products/inventor/overview>.
25. **SolidWorks**. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.solidworks.es/>.
26. **OpenSCAD**. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.openscad.org/>.
27. **Sourceforge**. Meshlab. [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <http://meshlab.sourceforge.net/>.
28. **CadSoftUSA**. EAGLE. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.cadsoftusa.com/>.
29. **KiCad-pcb**. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.kicad-pcb.org/display/KICAD/KiCad+EDA+Software+Suite>.
30. **FlatCam**. [En línea] [Citado el: 2015 de Junio de 27.] <http://flatcam.org/>.
31. **Díaz, Luis**. Diwo Bq. *Como crear G-code para fresar PCBs en Cyclone*. [En línea] [Citado el: 2015 de Junio de 27.] <http://diwo.bq.com/como-crear-gcode-para-fresar-pcb-s-en-cyclone/>.
32. **CNCControl**. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://cnccontrol.byethost13.com/>.
33. **CNCCodeController**. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <https://github.com/pknoe3lh/cncgcodecontroller/releases>.
34. **Díaz, Luis**. Diwo Bq. *CNC G-code Controller: Instalación y uso*. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://diwo.bq.com/cnc-gcode-controller-instalacion-y-uso/>.
35. **INKSCAPE**. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://inkscape.org/es/>.

-
36. **Wikipedia**. G-code. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>.
 37. **RepRap**. G-Code. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://reprap.org/wiki/G-code>.
 38. **Gómez, Juan González**. iearobotics. [En línea] [Citado el: 2015 de Junio de 27.] http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Guia_de_montaje_de_la_Prusa_2.
 39. **Laita, Antonio Domínguez**. impresoras3dblog. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://impresoras3dblog.wordpress.com/2013/10/25/como-fabricar-mi-propia-impresora-3d/#cuatro>.
 40. **ZonaMaker**. Crea impresora. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora>.
 41. **Sánchez, Miguel**. Youtube. [En línea] 24 de Junio de 2013. [Citado el: 2015 de Junio de 27.] <https://www.youtube.com/watch?t=101&v=cWUKTEI3bZE>.
 42. **Cooking Hacks**. How to Assemble Your Own 3D Printer. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/3d-printer-step-by-step-tutorial-guide-prusa-it3>.
 43. —. **Cooking Hacks**. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <https://www.cooking-hacks.com/forum/viewforum.php?f=40&sid=786c13b35daa9612d6a9f3126841dd4f>.
 44. **BQ**. Mibqyyo. [En línea] [Citado el: 27 de Junio de 2015.] <http://www.mibqyyo.com/comunidad/categories/impresi%C3%B3n-3d>.
 45. **Cooking Hacks**. A4988 Stepper Driver for 3D Printer. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <https://www.cooking-hacks.com/a4988-stepper-driver-cooking-hacks-3d-printer>.
 46. **PrusaPrinters**. Calculator. [En línea] [Citado el: 2 de Julio de 2015.] <http://prusaprinters.org/calculator/>.
 47. **Pope, Kevin**. MatterHackers. *3D Printer Firmware Settings - Stepper Motor Configuration*. [En línea] [Citado el: 2 de Julio de 2015.] <http://www.matterhackers.com/news/3d-printer-firmware-settings-stepper-motor-configuration>.
 48. **Diosdado, Raúl**. ZonaMaker. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora/10-ajuste-extrusor-crea-imp>.
 49. **Zona Maker**. Youtube. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] https://www.youtube.com/watch?v=SZIj_6TCmkQ.
 50. **thingster**. Thingiverse. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <http://www.thingiverse.com/thing:56671/#instructions>.
 51. **Diosdado, Raúl**. ZonaMaker. *Manual de Cura*. [En línea] [Citado el: 2 de Julio de 2015.] <http://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>.
 52. **BQ**. Youtube. *Prusa i3 Hephestos - Ajuste del eje Z*. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=gDcAXN6jsOc>.
 53. **Ivars, Toni**. Youtube. *Calibrando Motores y Extrusor en el firmware Marlin*. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=AwEEzx3hfd4>.

-
54. **Bq.** Youtube. *Nivelado de la base de impresión.* [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=UyZDEy34tNY>.
55. —. Youtube. *Prusa i3 Hephestos - Primera impresión.* [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=s-7whacfyl4&feature=youtu.be>.
56. **RepRap.** Cinta Kapton. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] http://reprap.org/wiki/Cinta_Kapton.
57. **Createc 3D.** ABS vs PLA. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://www.createc3d.com/abs-vs-pla-que-material-utilizamos/>.
58. **Kahnke, Griffin.** MatterHackers. *How to succeed when printing with ABS.* [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-with-abs>.
59. **Formizable.** Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://formizable.com/2014/09/02/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>.
60. **3DVerkstan.** Getting better prints. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://support.3dverkstan.se/article/30-getting-better-prints>.
61. **3DVerkstan.** Designing for 3D printing. [En línea] [Citado el: 3 de Julio de 2015.] <http://support.3dverkstan.se/article/38-designing-for-3d-printing>.
62. **Thingiverse.** [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <http://www.thingiverse.com/>.
63. **Youmagine.** [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <https://www.youmagine.com/>.
64. **RepRap.** Clone wars: Prusa iteración 3 single frame. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] http://www.reprap.org/wiki/Clone_wars:_Prusa_iteraci%C3%B3n_3_single_frame.
65. —. Prusa i3 Hephestos. [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] http://www.reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephestos/es.
66. **Autodesk.** Autodesk Exchange Apps. *Mesh Enabler.* [En línea] [Citado el: 28 de Junio de 2015.] <https://apps.exchange.autodesk.com/INVNTOR/en/Detail/Index?id=appstore.exchange.autodesk.com%3ameshenabler%3aen>.
67. **Bq.** bq 1.75mm PLA coil. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://store.bq.com/en/bobina-pla-bq>.
68. **Magraner, Roger Marco.** Youmagine. *Prusa i3 modification to make PCB.* [En línea] 6 de 7 de 2015. <https://www.youmagine.com/designs/prusa-i3-modification-to-make-pcb>.
69. **Hein, Arielle.** coloringchaos. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://www.coloringchaos.cc/>.
70. **Wikipedia.** Gerber Format. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Gerber_format#cite_note-thespec-1.
71. **MrCanelec.** Youtube. *Eagle - generar los archivos gerber y excellon.* [En línea] [Citado el: 30 de Junio de 2015.] <https://www.youtube.com/watch?v=waPMQUPFImY>.

72. **FlatCAM.** FAQ. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://flatcam.org/faq>.
73. —. discussion. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://flatcam.org/discussion>.
74. **Geda-Project.** Gerbv. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://gerbv.geda-project.org/>.
75. **Rapid-pcb.** [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://rapid-pcb.com/>.
76. **Galaad.** CopperCAM. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] <http://www.galaad.net/coppercam-eng.html>.
77. **Dring Engineering Services.** Excellon GCode. [En línea] [Citado el: 29 de Junio de 2015.] http://eng-serve.com/cnc/excellon_gcode.html.
78. **Díaz, Luis.** Diwo Bq. *Parámetros de fresado para Cyclone*. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <http://diwo.bq.com/parametros-de-fresado-para-cyclone-2/>.
79. **Imprimalia3D.** Prusa Iteración 2. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2015.] <http://www.imprimalia3d.com/services/prusa-iteracion-2>.
80. **RepRap.** File:RAMPS1.4schematic.png. [En línea] <http://www.reprap.org/wiki/File:RAMPS1.4schematic.png>.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

DOCUMENTO N°2: PRESUPUESTO

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

	Descripción de las unidades de obra	Unidades	Medición	Precio _(sin IVA)	Importe
1	Estudio, diseños y ensayos realizados				
	Sueldo Ing. Tecnologías Industriales (IRPF i SS incluido)	Horas	300	20,00	6.000,00
	Total partida 1				6.000,00
2	Aplicaciones informáticas				
	Licencia de estudiante de Autodesk Inventor	Ud	1	0,00	0,00
	Licencia gratuita de Eagle	Ud	1	0,00	0,00
	Total partida 2				0,00
3	Piezas impresas				
3.1	Cabezales				
	Libelium versión 1	Ud	1	0,25	0,25
	Hephestos versión 1	Ud	1	0,33	0,33
	Libelium versión 2	Ud	1	0,26	0,26
	Hephestos versión 2	Ud	1	0,33	0,33
3.2	Soporte placa				
	Modelo 1	Ud	1	0,44	0,44
	Modelo 2	Ud	1	1,36	1,36
3.3	Adaptadores				
	Eje flexible Dremel	Ud	1	0,26	0,26
	Rotulador	Ud	1	0,08	0,08
	Total partida 3				3,31
4	Elaboración de los ensayos				
4.1	Materiales para los ensayos				
	Final de carrera	Ud	1	0,87	0,87
	Pinza metal negro	Ud	4	0,33	1,32
	Varilla roscada M3	Ud	1	0,30	0,30
	Roscas M3	Ud	30	0,02	0,74
	Placa Pcb 200x300x1.6mm	Ud	1	7,98	7,98
4.2	Herramientas para los ensayos				
	Dremel 200	Ud	1	32,98	32,98
	Eje flexible Dremel	Ud	1	25,08	25,08
	Pack Motor 12 V	Ud	1	5,08	5,08
	Broca de Perforación 0.6mm	Ud	1	4,55	4,55
	Broca de Perforación 0.8mm	Ud	1	4,55	4,55
	Fresa 0,8mm	Ud	1	5,14	5,14

Rediseño de una impresora 3D para elaboración de PCB

4.3 Procedimiento de ataque por ácido					
	Agua Oxigenada 110 vols	Ud	1	3,14	3,14
	Salfumant	Ud	1	0,66	0,66
	Agua destilada	Ud	1	0,64	0,64
	Total partida 4				93,03

Total presupuesto no material	6.000,00
Total presupuesto material	96,35
Total Presupuesto	6.096,35
21% I.V.A.	1.280,23
TOTAL PRESUPUESTO con IVA	7.376,58

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:

SIETE MIL TRESCIENTOS SETENTA Y SEIS EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CÉNTIMOS

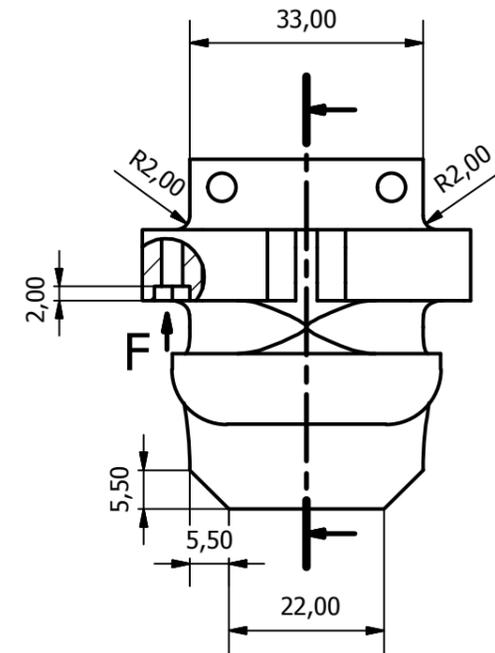
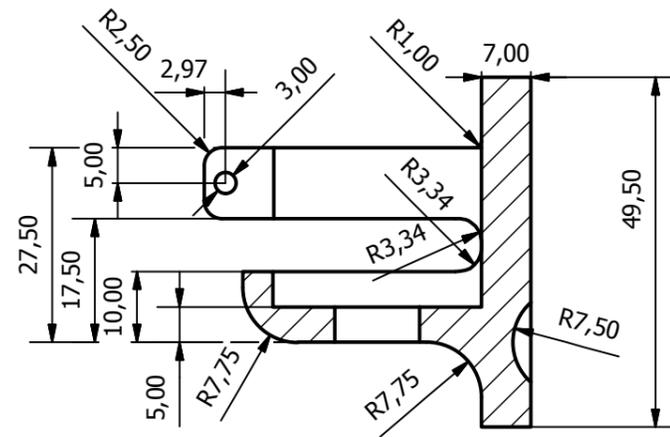
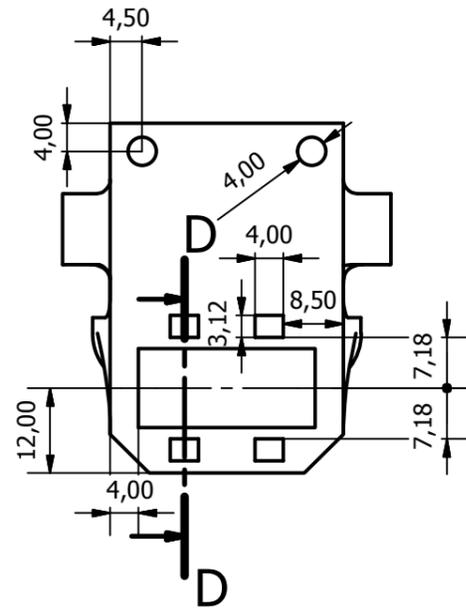


UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



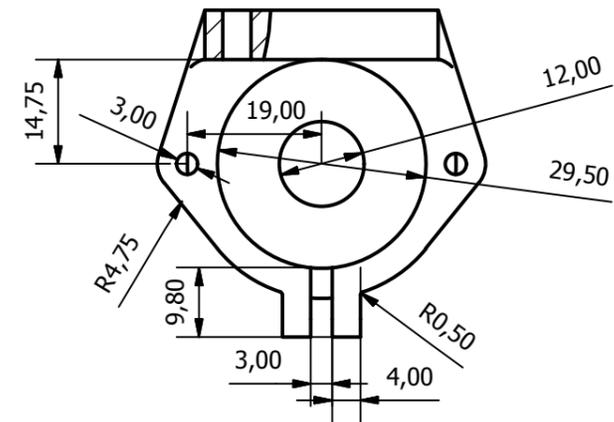
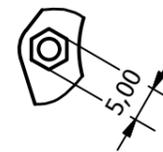
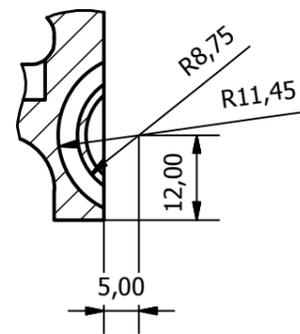
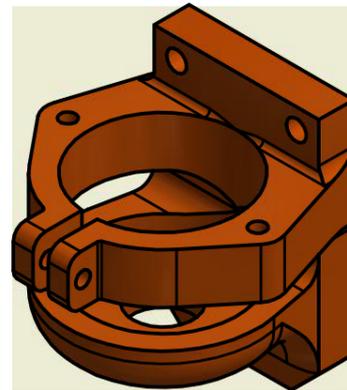
ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

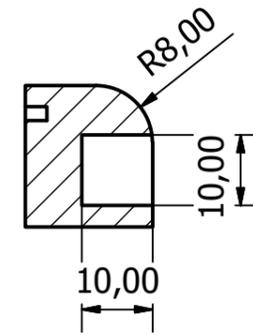
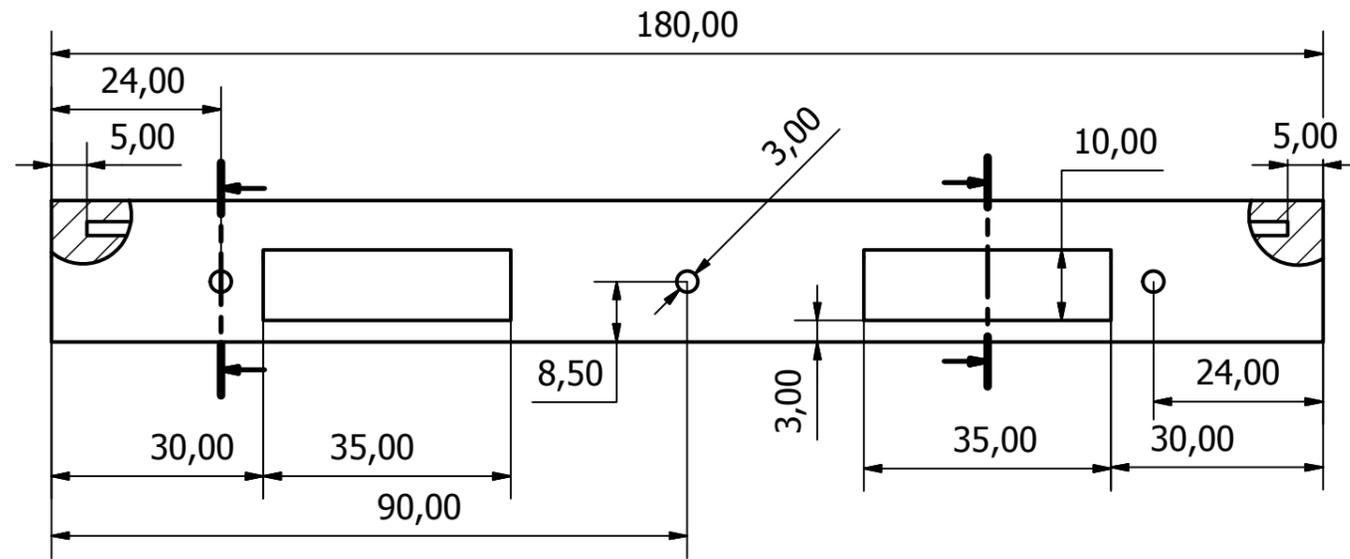
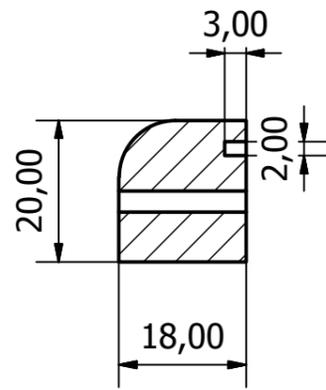
DOCUMENTO N°3: PLANOS



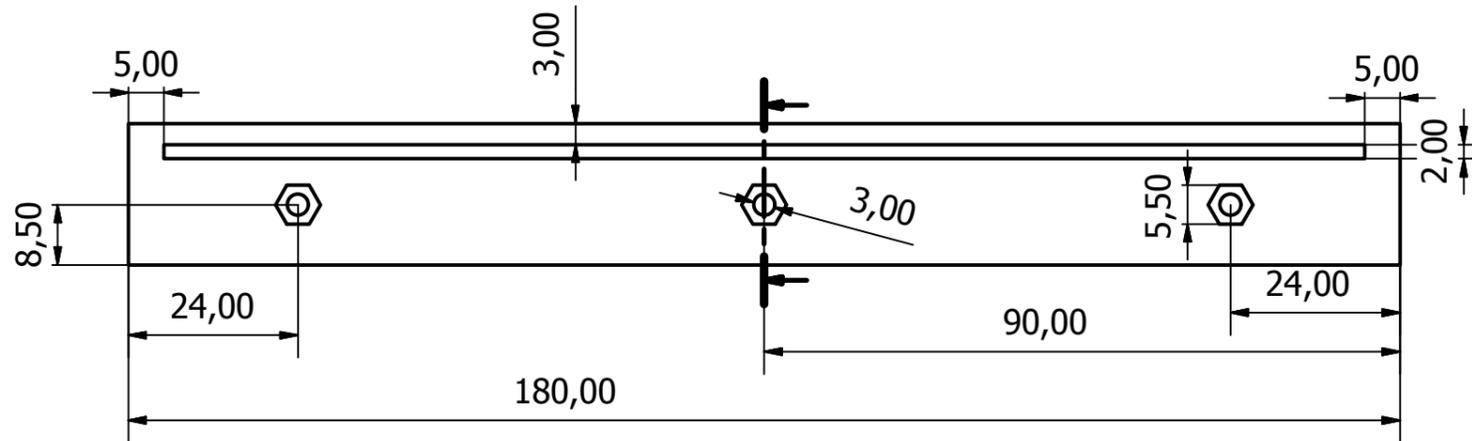
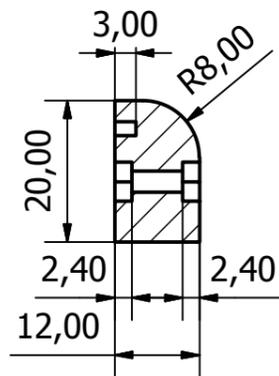
D-D (1:1)

F (1:1)

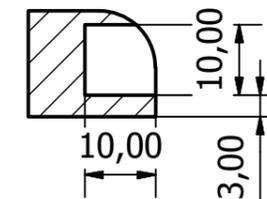
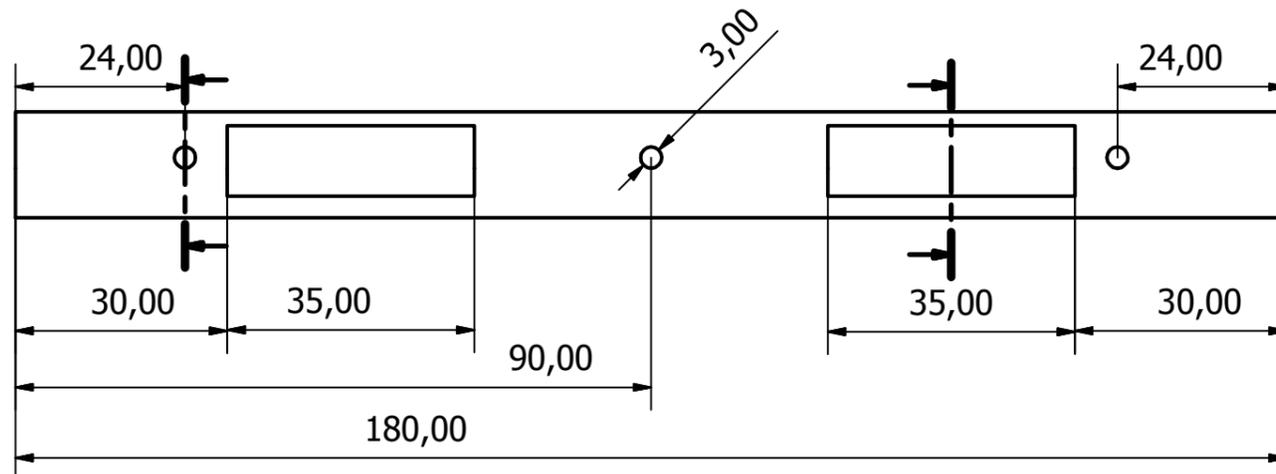
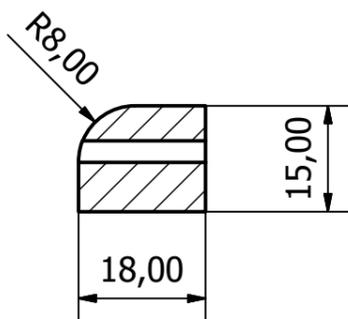
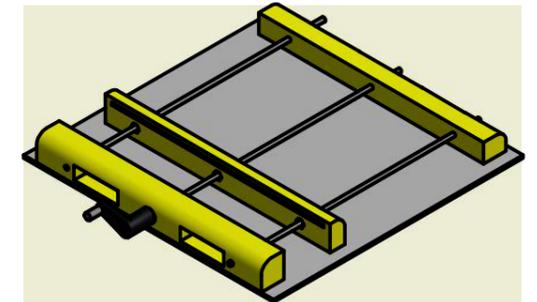




1

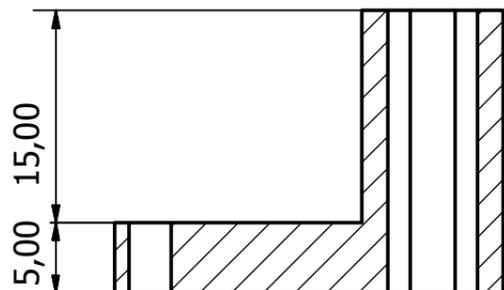


2



3

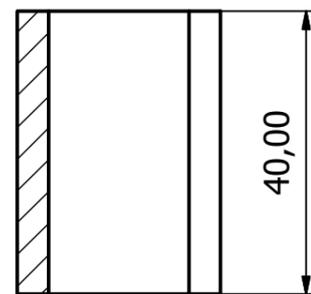
(2:1)



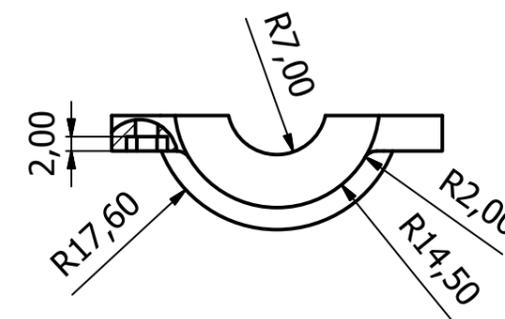
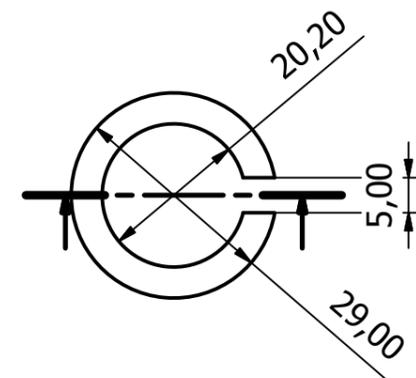
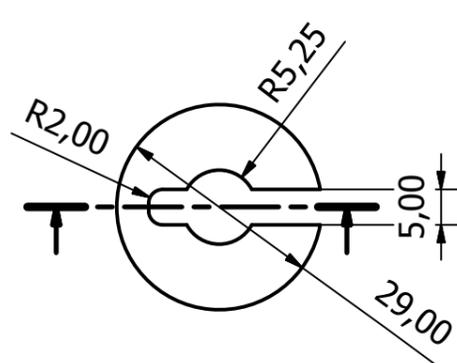
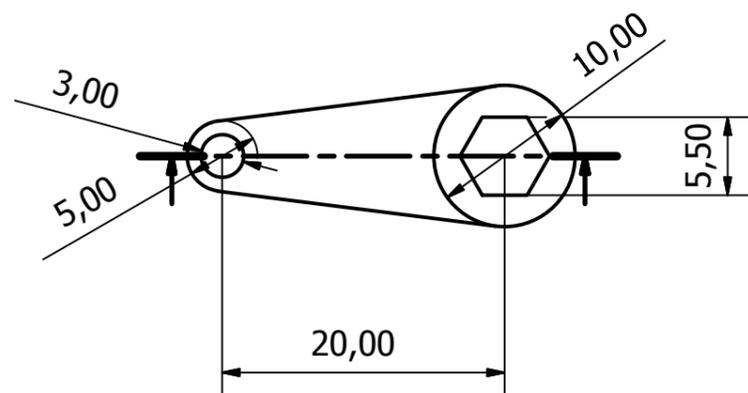
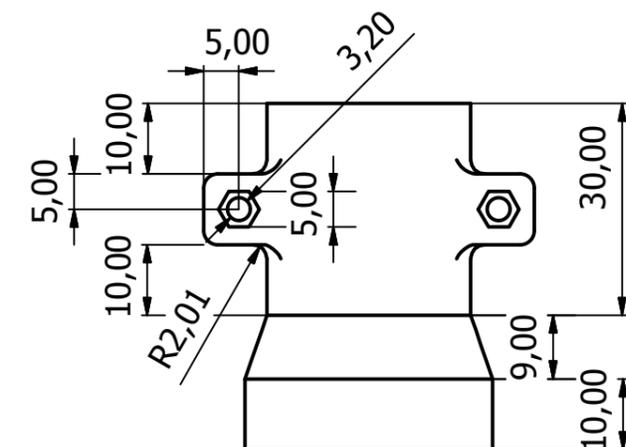
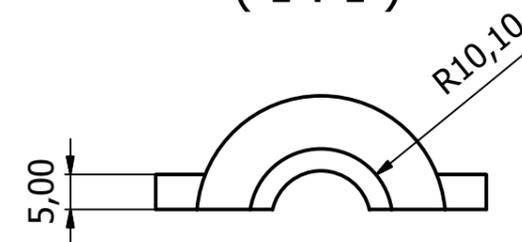
(1:1)



(1:1)



(1:1)



1

2

3

4

N° de pieza	Pieza
1	Manivela
2	Adaptador rotulador
3	Adaptador Dremel
4	Adaptador Dremel 2