

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

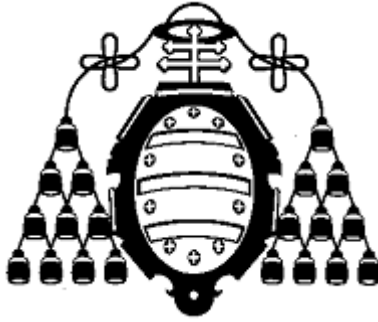
MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

**CARACTERIZACIÓN DE ERRORES DE FABRICACIÓN EN
IMPRESORA 3D DE BAJO COSTE Y REDISEÑO DE LA MISMA PARA
MINIMIZAR DICHS ERRORES**

JUNIO 2013

ALUMNO: MIGUEL MUÑIZ CALVENTE

**TUTOR: DAVID BLANCO FERNÁNDEZ
CO-TUTOR: MIGUEL ÁNGEL JOSÉ PRIETO**



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**CARACTERIZACIÓN DE ERRORES DE FABRICACIÓN EN
IMPRESORA 3D DE BAJO COSTE Y REDISEÑO DE LA MISMA PARA
MINIMIZAR DICHS ERRORES**

JUNIO 2013

**MIGUEL MUÑIZ
CALVENTE**

**DAVID BLANCO
FERNÁNDEZ**

**MIGUEL ÁNGEL
JOSÉ PRIETO**

Firma: Alumno

Firma: Tutor

Firma: Tutor

AGRADECIMIENTOS

Aunque son muchas las personas a las que le debo agradecer que este proyecto fin de máster se pudiera llevar a cabo, me gustaría mencionar especialmente a algunas de ellas por su influencia e implicación en el mismo.

En primer lugar a David Blanco Fernández y a Miguel Ángel José Prieto, tutores de este proyecto, por la dedicación, apoyo y ánimo prestados durante estos meses.

Al conjunto general de profesores del máster en ingeniería mecatrónica por bríndame la posibilidad de adquirir los conocimientos necesarios para desarrollar este trabajo.

Al conjunto de alumnos de la promoción 2011-2013 de los másteres EU4M y MUIM por su compañerismo y cercanía durante estos dos últimos años de duro pero agradable trabajo.

A Nataya, que con su ánimo, paciencia, insistencia y apoyo ha contribuido en gran medida a la finalización de este trabajo.

RESUMEN

Este trabajo fin de master se ha basado en primer lugar en la adquisición, montaje y calibración de una impresora 3D Open Source modelo Prusa I2 y posteriormente en el estudio de puntos críticos y mejorables de la misma. Adicionalmente, a través de este proyecto se pretende introducir al Master Universitario en Ingeniería Mecatrónica y a la Universidad de Oviedo en el entorno de las impresoras 3D en código abierto. Uno de los puntos más novedosos de este trabajo ha sido el diseño de una impresora 3D capaz de trabajar en coordenadas polares, lo cual abre las puertas a la investigación de calidades, tolerancias, resistencias estructurales... de estas piezas en comparación con las fabricadas por impresoras cartesianas.

PALABRAS CLAVE

Impresora 3D-Prusa I2-Impresora Polar-Open Source

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.	<i>Motivación</i>	9
1.2.	<i>Objetivos</i>	9
1.3.	<i>Estado del arte</i>	10
1.4.	<i>Metodología del proyecto</i>	12
1º	FASE.....	15
2.	MONTAJE DE LA IMPRESORA.....	17
2.1.	<i>Recepción del kit</i>	17
2.2.	<i>Montaje</i>	21
3.	EVALUACIÓN DE LA IMPRESORA.....	42
3.1.	<i>Enumeración de posibles mejoras realizables</i>	42
3.2.	<i>Selección de las mejoras a realizar</i>	45
4.	IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS SOBRE LA IMPRESORA	47
4.1.	<i>Sistema de extrusión</i>	47
4.2.	<i>Cambios de software</i>	58
4.3.	<i>Sistema de transmisión mecánica</i>	66
5.	CONCLUSIONES	71
2º	FASE:.....	73
6.	MEJORA DE LA IMPRESORA.....	75
6.1.	<i>Objetivo</i>	75
6.2.	<i>Alternativas</i>	75
6.3.	<i>Diseño</i>	76
6.4.	<i>Fabricación</i>	95
6.5.	<i>Montaje</i>	101
6.6.	<i>Evaluación de la nueva impresora</i>	112
7.	CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO.....	115
8.	LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	117
9.	PRESUPUESTO.....	118
10.	BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS		123
11.	ANEXO 1: PROGRAMACIÓN EN MATLAB	125
12.	ANEXO 2: RAMPS V1.4	132
13.	ANEXO 3: NEMA 17.....	135
14.	ANEXO 4: CABLEADO IMPRESORA MUIM.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primera impresora RepRap y ejemplo de autoreplicación de la misma	11
Figura 2: Ejemplos de impresoras 3D del proyecto Rep Rap	11
Figura 3: Impresora Prusa Iteration 2	12
Figura 4: Kit de piezas impresas en ABS de una Prusa I2	18
Figura 5: Imagen del Kit recibido para el montaje de la impresora Prusa I2	20
Figura 6: PCB Arduino Mega 2560	21
Figura 7: PCB RAMPs 1.4	21
Figura 8: Fuente alimentación	22
Figura 9: Motor Nema 17	22
Figura 10: Base Caliente o Hot Bed	22
Figura 11: Software Sprinter Super-estable cargado sobre Arduino	23
Figura 12: Software Pronterface	23
Figura 13: Software Cura	24
Figura 14: Diagrama ilustrativo de como programar la RAMPs v1.4	24
Figura 15: Diagrama ilustrativo de los pasos a seguir para imprimir una pieza	24
Figura 16: Esquema de cableado de la impresora Prusa I2 sobre una Ramps v1.4	25
Figura 17: Hot End o Punta Caliente	26
Figura 18: Estructuras laterales del bastidor	30
Figura 19: Unión de los triángulos laterales	31
Figura 20: Detalle de los elementos necesarios para el eje Y	31
Figura 21: Cierre superior del bastidor	31
Figura 22: Refuerzo inferior	32
Figura 23: Eje X	32
Figura 24: Eje Y	33
Figura 25: Impresora con los 3 ejes montados	33
Figura 26: Detalle de la solución adoptada para los acoplamientos del eje Z	34
Figura 27: Extrusor	35
Figura 28: Esquema representativo del funcionamiento del extrusor	35
Figura 29: Tornillo con hendiduras o Hobbed Bolt	35
Figura 30: Detalle de los muelles que regulan la presión ejercida sobre el ABS	35
Figura 31: Unión de la Base Caliente al patín del eje Y	38
Figura 32: Impresora RepRap Prusa I2	38
Figura 33: Sistema de extrusión	47
Figura 34: Ajuste del apriete en el sistema de extrusión	48
Figura 35: Detalle de las hendiduras del Hobbed Bolt	49
Figura 36: Ejemplo de moleteado recto	50
Figura 38: Hobbed Bolt tipo Hyena	50
Figura 39: Bobina de plástico ABS	56
Figura 40: Entorno de los programas Skeinforce y Cura (De izquierda a derecha)	60
Figura 41: Menús Básico y Avanzado de Cura (de izquierda a derecha)	61
Figura 42: Menús Configuración Experta de Cura	63
figura 43: Menú preferencias de Cura	64
Figura 44: A la izquierda poleas de ABS y correas T5. A la derecha poleas de aluminio y correas T2.5	66
Figura 45: Detalle de las correas y poleas cambiadas	66
Figura 46: Renvíos de las correas	69
Figura 47: Fabricación de las piezas necesarias para los nuevos renvíos en la Prusa I2	69
Figura 48: Nuevo renvío en funcionamiento	69
Figura 49: Bastidor de la impresora	77
Figura 50: Ejes X e Y	78

Figura 51: Eje Z.....	79
Figura 52: Movimiento Theta	80
Figura 53: Conectores tipo Jack utilizados	80
Figura 54: Funcionamiento del extrusor de la Prusa I2	81
Figura 55: Objetivo de diseño para el nuevo extrusor	81
Figura 56: Extrusor a partir de sistemas de tornillo sin fin	81
Figura 57: Extrusor a partir de engranajes pivotantes.....	82
Figura 58: Sistema de guiado del extrusión de engranajes pivotantes (Versión 01).....	83
Figura 59: Eje de transmisión y eje fijo del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01).....	83
Figura 60: Sistema de regulación de presión del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01)	83
Figura 61: Extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01).....	84
Figura 62: Ejes fijos y móviles del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02).....	84
Figura 63: Sistema de regulación de presión del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02)	85
Figura 64: Extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02).....	85
Figura 65: Piezas prototípicas de ambos extrusores y apariencia final tras su ensamblaje.	86
Figura 66: Problema de alineamiento en la versión 01	86
Figura 67: Despiece del Hot End diseñado	87
Figura 68: Primera Opción→modificación de los software de laminado y lectura de archivos G- Code	90
Figura 69: Segunda Opción→ modificación del archivo G-Code	90
Figura 70: Izquierda→ Piezas laminadas sin configuración tipo Joris y espesor de pared 300mm / Derecha→ Piesas impresas con configuración tipo Joris y espesor de pared 300mm.....	91
Figura 71: Puntos generados por Cura para imprimir un cilindro y un cubo.....	91
Figura 72: Modificación del archivo G-CODE.....	93
Figura 73: Representación de la translación del origen de coordenadas y las coordenadas polares del punto de origen (A) y de destino (B).....	94
Figura 74: Ensamblaje del bastidor.....	104
Figura 75: Ensamblaje de los rodamientos	104
Figura 76: Unión de los motores y los soportes al bastidor	105
Figura 77: Ensamblaje del sistema de guiado del patín del extrusor	105
Figura 78: Aspecto final de los ejes X e Y sin las correas	106
Figura 79: Vista superior de los ejes X e Y.....	106
Figura 80: Montaje del eje Z.....	107
Figura 81: Montaje coordenada Theta	107
Figura 82: Montaje "Ensamblaje Tractor"	108
Figura 83: Taladrado y roscado del Ensamblaje Tractor	108
Figura 84: Montaje del sistema de engranajes sobre sus soportes	108
Figura 85: Sistema de tensado Figura 86: Montaje de las piezas laterales del extrusor.....	109
Figura 88: Extrusor.....	109

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Este proyecto está motivado por el reciente aumento de la demanda de productos fabricados por prototipado rápido a bajo coste, ya que suponen un importante avance en el diseño y puesta en funcionamiento de prototipos.

En relación a esto, para la docencia del Máster en Universitario Ingeniería Mecatrónica se ha utilizado una impresora 3D de la marca Hewlett-Packard para el desarrollo de prototipos de las diferentes asignaturas y trabajos fin de máster (TFM). Esta impresora una gran carga de trabajo a pesar de elevado coste de utilización debido a su alto precio de adquisición (influyente en el coste de amortización) y al elevado precio del material de aporte (plástico ABS: $700 \text{ cm}^3 \sim 150\text{€}$). Este hecho llevó al autor de este trabajo fin de master a proponer a los coordinadores del mismo adquirir un kit de montaje de impresora Prusa Iteration 2 (Prusa I2) para fabricar piezas por prototipado rápido que requieran un acabado y precisión menor que las que pueden suministrar las impresoras Hewlett-Packard.

A raíz de esta propuesta se adquirieron los materiales comerciales que conforman la Prusa I2 y se estudiaron las ventajas e inconvenientes existentes en el diseño de la misma con el fin de optimizarla.

1.2. Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Introducir a la Universidad de Oviedo y en particular al Máster en Ingeniería Mecatrónica en el proyecto RepRap, vinculado a las impresoras 3D Open Source.
- Adquisición, montaje y calibración de una impresora 3D Open Source.
- Búsqueda de puntos débiles de la impresora 3D Open Source adquirida e implementación de mejoras para paliar los mismos.
- Impresión de piezas para los proyectos de las asignaturas del máster en ingeniería mecatrónica

1.3. Estado del arte

Este apartado se centra en el estado del arte de las impresoras 3D y el Proyecto RepRap.

1.3.1. IMPRESORAS 3D

Desde hace varios años se han empezado a desarrollar varios proyectos de desarrollo de tecnologías de prototipado rápido entre los que se encuentran las conocidas “impresoras 3D”. Estas pueden clasificarse según la tecnología utilizada para obtener el prototipo:

- Deposición de hilo fundido: Fabricación por superposición de capas de material fundido, el cual se solidifica sobre la capa anterior.
- Fabricación por corte y laminado: superposición de hojas de papel o similar unidas mediante algún tipo de adhesivo y prensadas.
- Sinterización Láser Selectiva: Sinterización de material en polvo mediante un láser CO₂ .
- Proyección aglutinante: deposición de material en polvo (composite) y adición de material aglutinante.
- Estereolitografía y Fotopolimerización: baño de resina fotosensible polimerizada por un láser UV o lámpara.

Este proyecto se centrará en las impresoras por deposición de hilo fundido ya que son las que más rápido han crecido en el mercado en los últimos años y las más establecidas en el mismo actualmente debido a su facilidad de fabricación y a su bajo coste.

Dentro de la amplia variedad de impresoras 3D por deposición de hilo fundido este trabajo se centrará en estudiar las relacionadas con el proyecto RepRap, el cual está formado por miles de personas de todo el mundo que aportan conocimientos e innovación en torno a este tipo de impresoras.

1.3.2. PROYECTO REPRAP

En 2005 Adrian Bowyer (Bath University U.K.) crea el proyecto Open Source Replicating Rapid Prototyper (RepRap) con el objetivo de diseñar una máquina de prototipado rápido capaz de autoreplicarse. Tres años después (febrero 2008) presenta el primer prototipo, “Darwin”, el cual prototipó las piezas necesarias para construir una nueva impresora sólo 3 meses más tarde (Mayo 2008). En septiembre de ese mismo año ya se habían distribuido más de 100 copias de la impresora por todo el mundo.

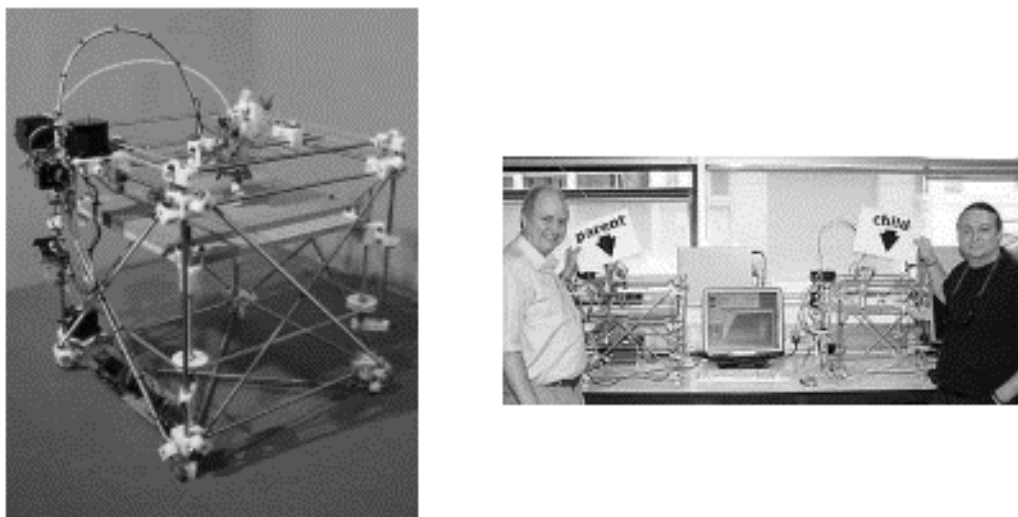


Figura 1. Primera impresora RepRap y ejemplo de autoreplicación de la misma

Desde el nacimiento del proyecto hasta la actualidad se han diseñado varios nuevos modelos de impresoras autoreplicables, entendiéndose por autoreplicable el hecho de que una impresora sea capaz de prototipar la mayoría de los elementos no comerciales necesarios para fabricar otra impresora igual. Algunos ejemplos de los más de 100 diseños desarrollados de estas impresoras pueden verse a continuación [3]:

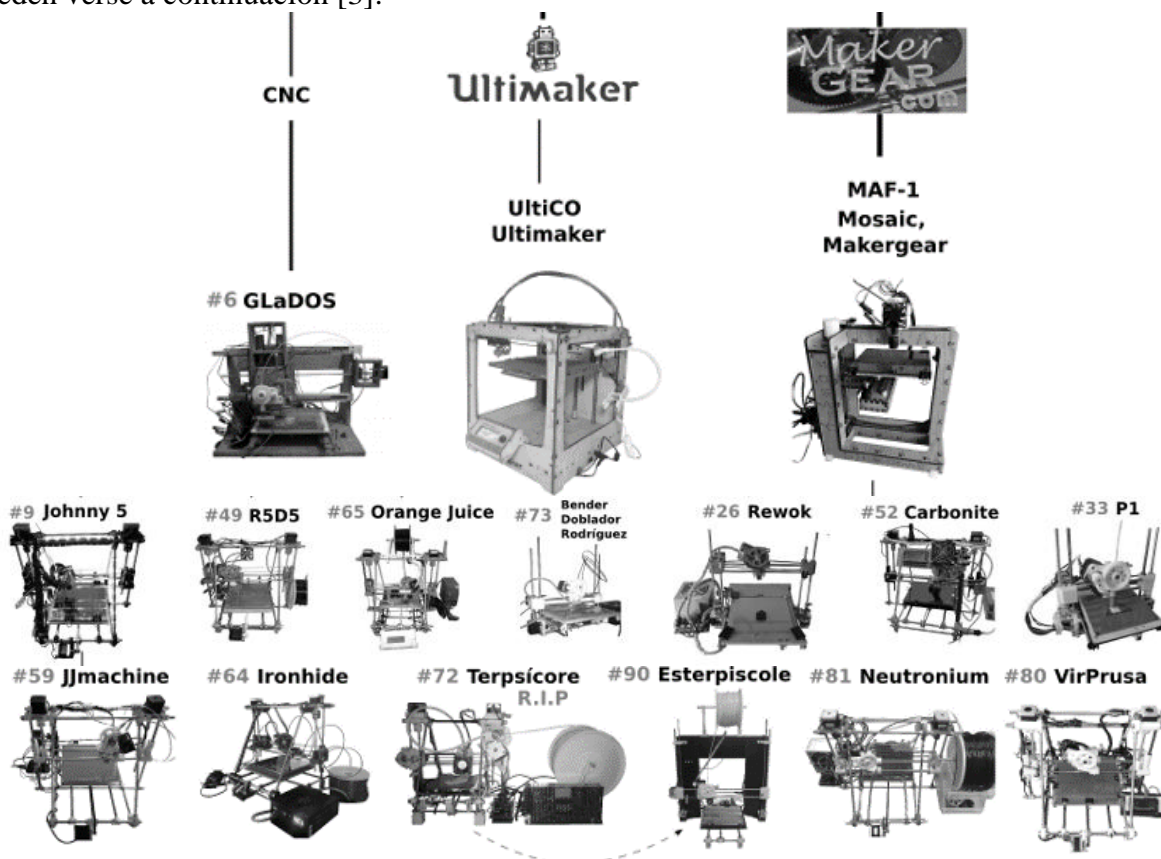


Figura 2: Ejemplos de impresoras 3D del proyecto Rep Rap

De entre todos los diseños desarrollados y compartidos en los últimos años el mejor documentado y el más probado es el de la Prusa Iteration 2 por lo que este proyecto se centrará en el montaje, puesta a punto y desarrollo de una impresora de este tipo.



Figura 3: Impresora Prusa Iteration 2

1.4. Metodología del proyecto

Este trabajo fin de master sigue la norma de metodología de proyectos mecatrónicos “*VDI 2206 Design methodology for mechatronic systems*”, la cual indica que el método de proceder aconsejado a la hora de abordar el diseño, fabricación, montaje, puesta a punto y/o industrialización de un artilugio mecatrónico debe ser el siguiente:

- El proyecto debe subdividirse en varias etapas según el alcance del mismo. Cada una de estas etapas podría abordar: diseño y la simulación por ordenador, implementación de un prototipo de laboratorio, fabricación de un prototipo funcional, diseño de un prototipo industrializable, fabricación de un prototipo industrializable, estudio de la industrialización...
- Cada etapa del proyecto debe a su vez subdividirse en varios submódulos, ya sean estos de carácter o no mecatrónico, y a la vez estos submódulos deben dividirse tantas veces como sea necesario para que el problema a solucionar en cada caso sea suficientemente sencillo y abordable.
- Tras el diseño de cada uno de los módulos y submódulos, estos deben ser evaluados mediante un protocolo de pruebas, en el que se determinará si están o no listos para ser ensamblados con el resto de componentes del artefacto, asegurando de este modo la detección de fallos en etapas tempranas del proyecto.
- Una vez cerrada cada una de las etapas del proyecto se debe proceder a realizar un protocolo de ensayos general, que evalúe los resultados obtenidos en dicha fase del proyecto.

En base a esto se ha subdividido el trabajo fin de master en 2 fases:

- A. Puesta en funcionamiento de una impresora Prusa I2
- B. Mejora de la impresora Prusa I2 o en su caso fabricación de una nueva impresora 3D con el objetivo de paliar los defectos encontrados durante la primera fase del proyecto.

La primera de ellas se ha dividido en 3 etapas:

1. Montaje de la impresora Prusa I2 (capítulo 2)
2. Identificación de problemas de la impresora Prusa I2 (capítulo 3)
3. Puesta a punto y evaluación de la impresora Prusa I2 (capítulo 4)

Dichas etapas se han subdividido a su vez en varios submódulos:

- Módulo de electrónica y software
- Módulo mecánico

Dentro de cada una de las etapas y dentro de cada uno de los submódulos se realizarán los protocolos de pruebas necesarios para garantizar el correcto funcionamiento de la máquina en cada fase del proyecto.

1º FASE

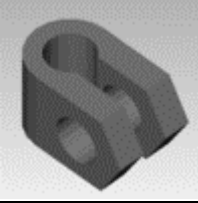




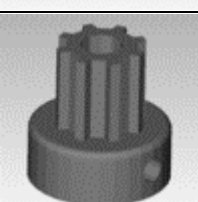
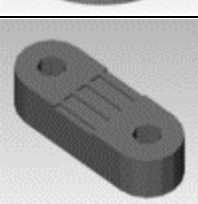
IMPRESORA PRUSA I2

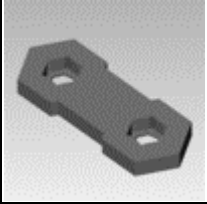

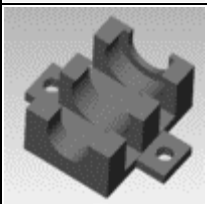
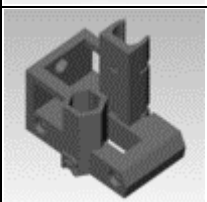
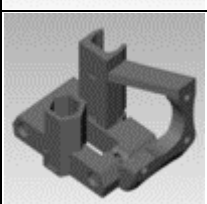

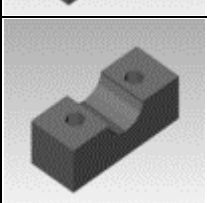
2. MONTAJE DE LA IMPRESORA




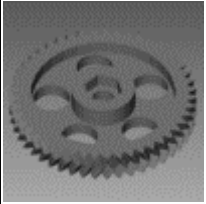
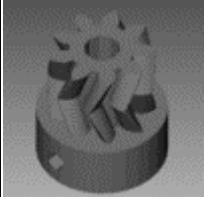
2.1. Recepción del kit


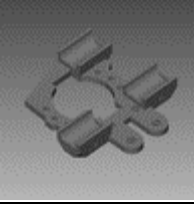

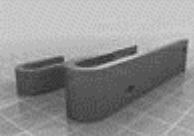
El Máster en Ingeniería Mecatrónica adquirió para la realización de este trabajo un kit completo para el montaje de una Prusa I2 al distribuidor *RECLONE 3D*. Dicho kit contenía las siguientes partes:

Piezas impresas en plástico ABS:

<u>Denominación</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Imagen</u>
Bar Clamp	8	
frame vertex with foot	4	
Frame vertex	2	
Y motor bracket	1	
z motor mount	2	
pulley	2	
belt clamp	4	

Belt clamp nut holder	2	
Bearing guide	3	
10-y-bushing-x4.stl	3	
11-x-end-idler-x1.stl	1	
12-x-end-motor.stl	1	
13-x-carriage-x1.stl	1	
14-rod-clamp-x2.stl	2	

coupling.stl	2	
endstop-holder.stl	3	
jonaskuehling_gregs-wade-v3_arcol_jhead	1	
biggearmod_fixed.stl	1	
smallgearmod_fixed.stl	1	

Sanguinololu holder	2	
x-carriage-RRWv5.stl	1	
Ramps-Holder	2	
RAMPS Prusa Mount Clips	2	

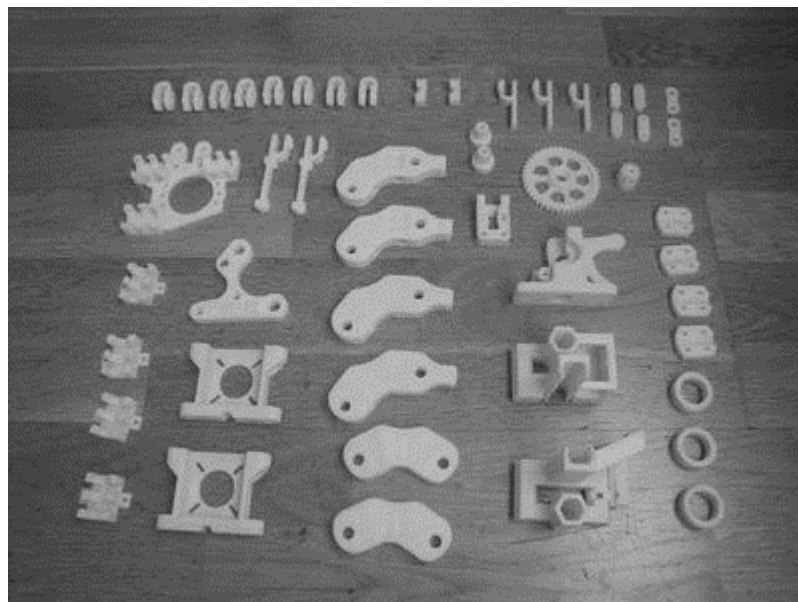


Figura 4: Kit de piezas impresas en ABS de una Prusa I2

Elementos comerciales:

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>
Motor paso a paso Nema 17	5 unidades
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo 840mm	1 unidad
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo 920mm	1 unidad
Rodamientos Lineales LM8UU	10 unidades
Rodamientos de bolas 608ZZ	6 unidades
Bridas de plástico ancho: 2.5mm largo: 120mm	14 unidades
Tornillos M3 x 10mm	20 unidades
Tornillos M3 x 12mm	3 unidades
Tornillos M3 x 16mm	8 unidades
Tornillos M3 x 20mm	4 unidades
Tornillos M3 x 25mm	8 unidades
Tornillo M3 x 40mm	20 unidades
Tornillo M4 x 20mm	20 unidades
Prisionero M3 cabeza allen	3 unidades
Tuercas hexagonal M3	23 unidades
Tuercas hexagonal M8	100 unidades
Tuercas hexagonal M4	20 unidades

Arandelas M4	20 unidades
Arandelas M3	35 unidades
Arandelas M8	100 unidades
Placa de contrachapado Dimensiones: 220x220x4 mm	1 unidad
Regletas	4 unidades
Pinzas de papelería	4 unidades
Cristal Dimensiones 200x200	1 unidad
Cinta Kaptom	1 unidad
Tubo de goma, de 5mm de diámetro interior y 2cm de largo	2 unidades
Punta Caliente (Hot End)	1 unidad
Plástico ABS 3mm Color Rojo	1 unidad
Finales de Carrera (micro switch)	3 unidades
Resistencia de alta potencia (5 ohm)	1 unidad
Sensor de temperatura (100K)	1 unidad
Sensor de temperatura (10K)	1 unidad
Base Caliente (Hot Bed)	1 unidad
RAMPS v1.4	1 unidad
Arduino Mega 25600	1 unidad
Fuente alimentación 12v -5A	1 unidad
Stepstick A4988 y disipador	5 unidades

Elementos mecanizados:

<u>Denominación de la pieza</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>
Hobbed Bolt	1 unidades	Perno M8 estriado para impulsar el plástico
Varilla roscada M8	3 unidades	Largo 440 mm
	6 unidades	Largo 370 mm
	4 unidades	Largo 294 mm
	2 unidades	Largo 210 mm
	1 unidades	Largo 50 mm
Varilla Lisa diámetro 8mm	2 unidades	Largo 390 mm
	2 unidades	Largo 420 mm
	2 unidades	Largo 350 mm

A continuación puede verse una foto del kit recibido:



Figura 5: Imagen del Kit recibido para el montaje de la impresora Prusa I2

Como puede observarse en la imagen anterior y en el detalle de los elementos que contenía el kit recibido, no existe ningún tipo de manual de instrucciones de montaje, por lo que el siguiente paso en el desarrollo de este proyecto fue la búsqueda de documentación realizar esta tarea.

2.2. Montaje

Para llevar a cabo el ensamblado y puesta en funcionamiento de la impresora se ha seguido la guía de montaje propuesta por el Doctor Juan González-Gómez de la Universidad Politécnica de Madrid [1]. A continuación se describen resumidamente los procesos llevados a cabo con el objetivo de mostrar al lector el funcionamiento de las diferentes partes que componen la impresora:

2.2.1. MÓDULO DE ELECTRÓNICA Y SOFTWARE

Descripción de la electrónica:

A continuación se detallan los componentes electrónicos que componen la impresora Prusa I2:

- Arduino Mega 2560: Placa de propósito general del fabricante Arduino que se encarga de la comunicación con el PC y las diferentes partes de la máquina a partir de un cable USB y una PCB denominada RAMPs v1.4 respectivamente. Las características principales de esta PCB son:
 - Microcontrolador ATmega2560.
 - Voltage de entrada de - 7-12V.
 - 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM).
 - 16 entradas análogas.
 - 256k de memoria flash.
 - Velocidad del reloj de 16Mhz

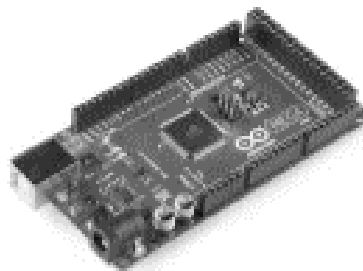


Figura 6: PCB Arduino Mega 2560

- RAMPS v1.4: Placa electrónica desarrollada específicamente para el control de impresoras 3D. Los componentes principales de esta PCB son (ver Anexo 2. RAMPS v1.4 para más información):
 - Entradas y salidas para la comunicación con la Arduino Mega 2560
 - 5 Stepsticks A4988 y disipadores para el control de los motores paso a paso
 - Entradas para la colocación de finales de carrera
 - Entradas para la colocación de sensores de temperatura
 - Salidas para aplicar tensión a la resistencia del extrusor
 - Salidas para aplicar tensión a la resistencia de la base caliente
 - Entradas de alimentación
 - Leds para comprobar el funcionamiento de los diferentes componentes

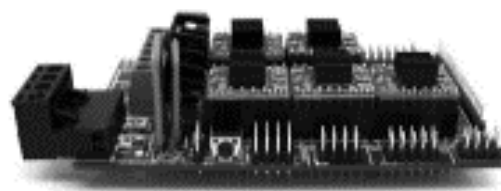


Figura 7: PCB RAMPS 1.4

- Fuente de alimentación 12 v y 15 A: Fuente de PC para alimentar la RAMPs v1.4



Figura 8: Fuente alimentación

- 5 Motores paso a paso Nema 17: 1 para el eje X, 1 para el eje Y, 1 para el extrusor y 2 para el eje Z. Las características de los motores son (ver Anexo 3. Nema 17 para más información):
 - Número de fases: 2
 - Diámetro del eje de salida: 5mm
 - Par nominal: 5.5 kg.cm
 - Voltaje: 4.2 V
 - Corriente: 1.5 A



Figura 9: Motor Nema 17

- 3 Finales de carrera: Los cuales sirven para fijar el origen de coordenadas de la máquina.
- 1 Base caliente (Hot Bed): Placa electrónica compuesta por una larga y continua pista de cobre (resistencia de 1 ohm), la cual se calienta para asegurar la adherencia de las primeras capas de la pieza a la superficie de la base de extrusión que será colocada sobre esta.



Figura 10: Base Caliente o Hot Bed

- 1 Resistencia de 5 ohm: para calentar el extrusor
- 1 Sensor de temperatura 100K : para hallar la temperatura del extrusor
- 1 Sensor de temperatura 200K: para hallar la temperatura de la base caliente
-

Descripción del software necesario para imprimir

El software necesario para realizar impresiones ya está desarrollado en código abierto, por lo que puede encontrarse con facilidad en la red. De entre las muchas opciones existentes se ha optado por la siguiente por motivos de robustez:

- **Arduino 22 o Arduino 1.1:** software necesario para programar la placa Arduino Mega 2560 encargada de la comunicación con el PC y con la placa Ramps v1.4, la cual a su vez controla los motores y las temperaturas del extrusor y de la base caliente.
- **Sprinter Super-estable:** Programa en C que es ejecutado por la placa Arduino Mega 2560 y realiza las siguientes funciones:
 - Transformar los comandos en código G recibidos por puerto serie en acciones sobre la impresora.
 - Realizar el control en lazo cerrado de las temperaturas de la máquina.

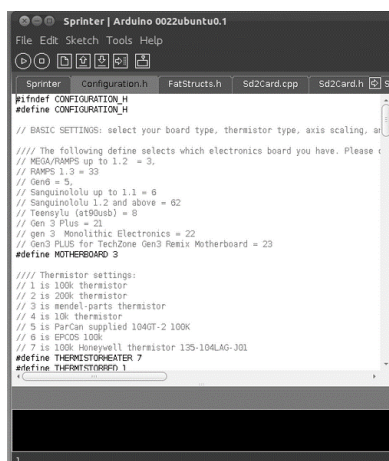


Figura 11: Software Sprinter Super-estable cargado sobre Arduino

- **Pronterface:** Programa para PC que realiza la comunicación con la placa Arduino Mega 2560, este programa es capaz de:
 - Laminar un archivo stl (con la extensión Skeinforce) y crear un archivo G-Code apto para ser ejecutado por el Sprinter super-estable.
 - Enviar comandos G-Code específicos a la impresora por teclado
 - Enviar una secuencia de comandos G-Code para imprimir un determinado sólido.
 - Servir de entorno gráfico para mover los diferentes ejes de la impresora y el extrusor, o para configurar un determinado valor de la temperatura del extrusor o la base caliente.

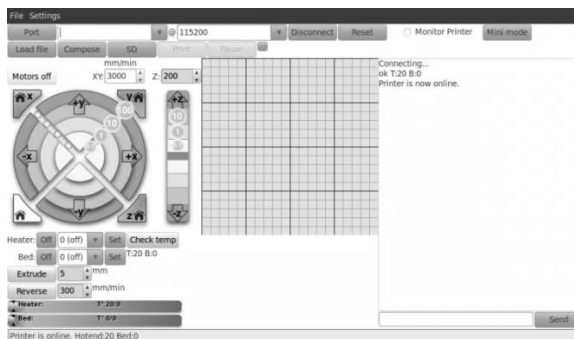


Figura 12: Software Pronterface

- **Cura:** Programa para PC similar al Pronterface pero con diferentes opciones de laminado y creación del archivo G-Code.

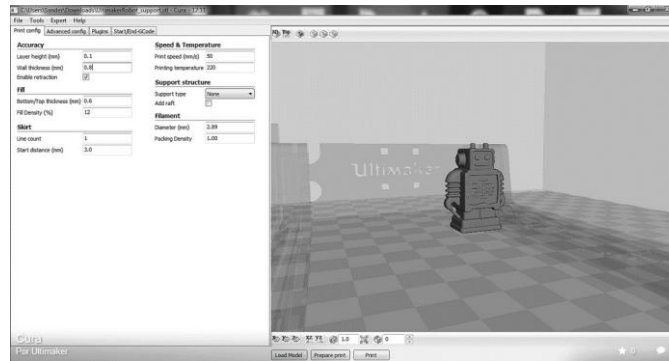


Figura 13: Software Cura

A continuación se presentan dos diagramas para ilustrar el funcionamiento del software de la impresora:



Figura 14: Diagrama ilustrativo de como programar la RAMPs v1.4

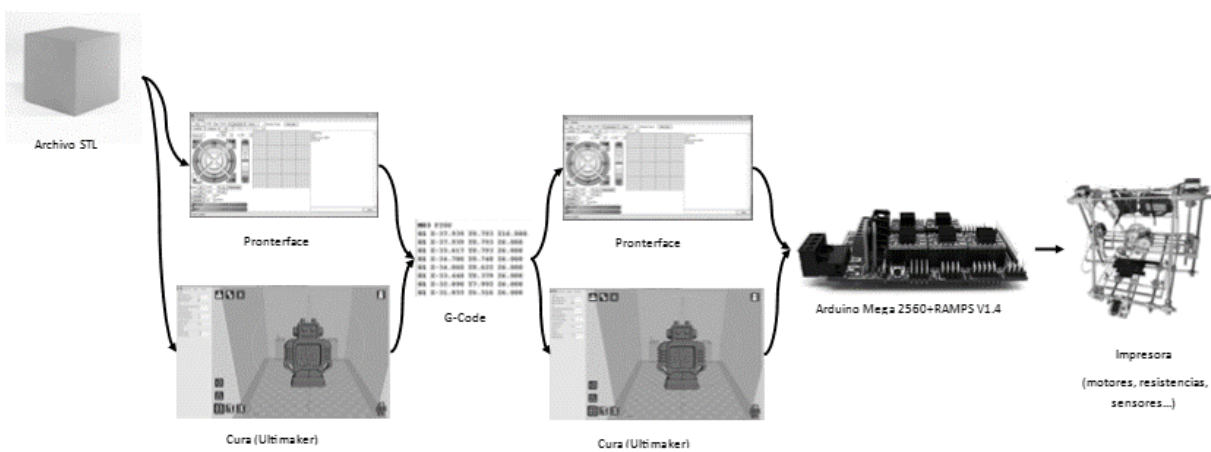


Figura 15: Diagrama ilustrativo de los pasos a seguir para imprimir una pieza

Montaje de la electrónica

Los pasos necesarios para el correcto montaje de la electrónica de la impresora Prusa I2 son:

1. Preparación de la fuente de alimentación de PC de 12V a 15A:
 - Es necesario cortar el conector de 4 cables (2 amarillos-alimentación y 2 negros-masa) para alimentar la PCB RAMPs 1.4.
 - Puentear el hilo de control (color verde) del conector de 40 pines a masa. Esto es necesario porque si no la fuente no funciona sin estar conectada a un PC.
2. Soldado de cables y conectores a las salidas de los motores
3. Soldado de cables y conectores a los finales de carrera
4. Soldado de cables y conectores a la resistencia del extrusor
5. Soldado de cables y conectores a los sensores de temperatura
6. Soldado de cables y conectores a la base caliente
7. Conexión de alimentación, motores, resistencias, finales de carrera y sensores de temperatura a la RAMPs 1.4. según el siguiente esquema:

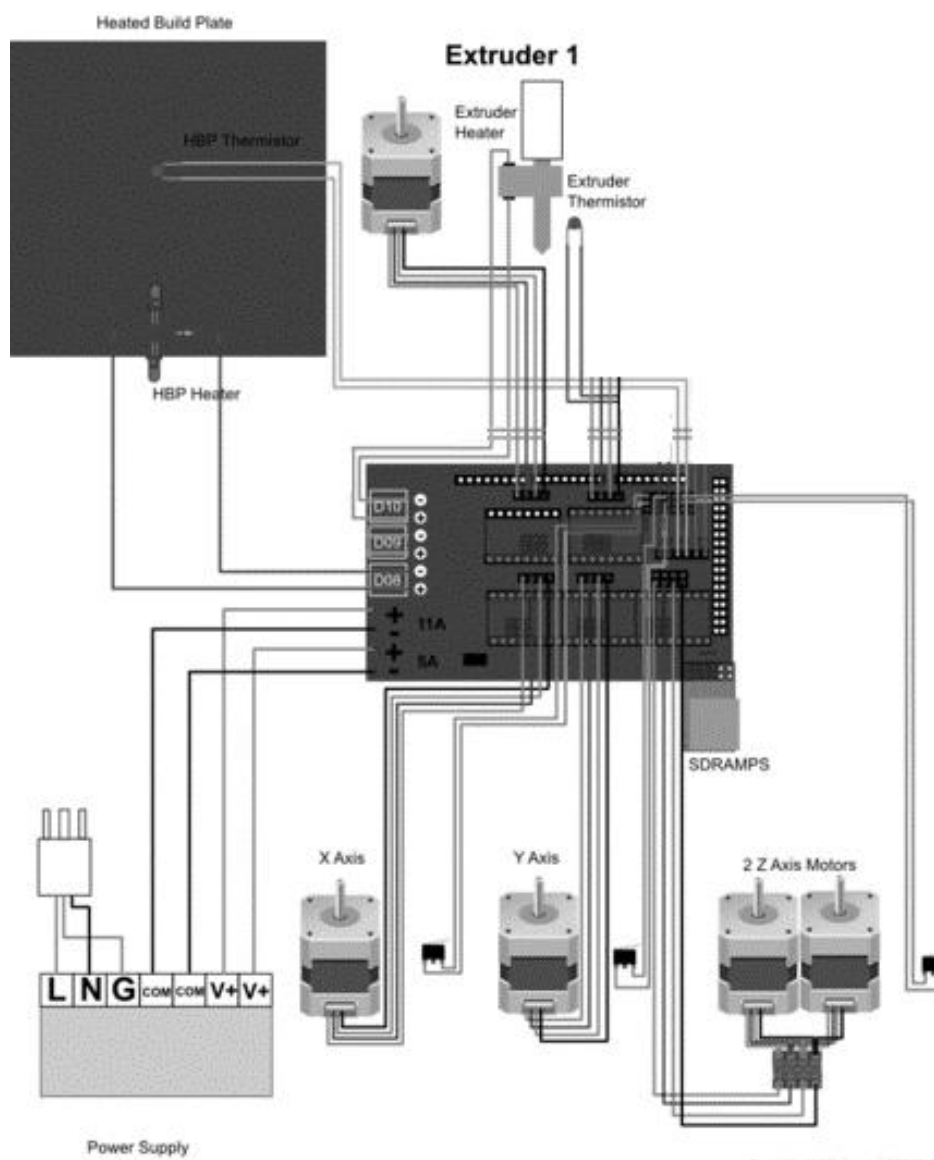


Figura 16: Esquema de cableado de la impresora Prusa I2 sobre una RAMPs v1.4

8. Calibración de la corriente de los motores paso a paso mediante amperímetro colocado en serie entre la RAMPs v1.4 y la fuente de alimentación.

Montaje de la Punta Caliente (Hot End)

La Punta Caliente o Hot End esté formada por un cuerpo rectangular de aluminio con 4 agujeros para las siguientes funciones:

- Entrada de plástico (3.2mm)
- Salida de plástico (0.5 mm)
- Colocación resistencia 50hm (6 mm)
- Colocación sensor de temperatura NTC 100K (1.5 mm)

Adicionalmente existe un tubo de material plástico aislante (PTFE tubing) recubierto a su vez de otro material aislante (Peek Nozzle) que guían el ABS o PLA hasta el interior de cuerpo mencionado anteriormente:

Su montaje se resume en la colocación y cableado de la resistencia y el sensor de temperatura.

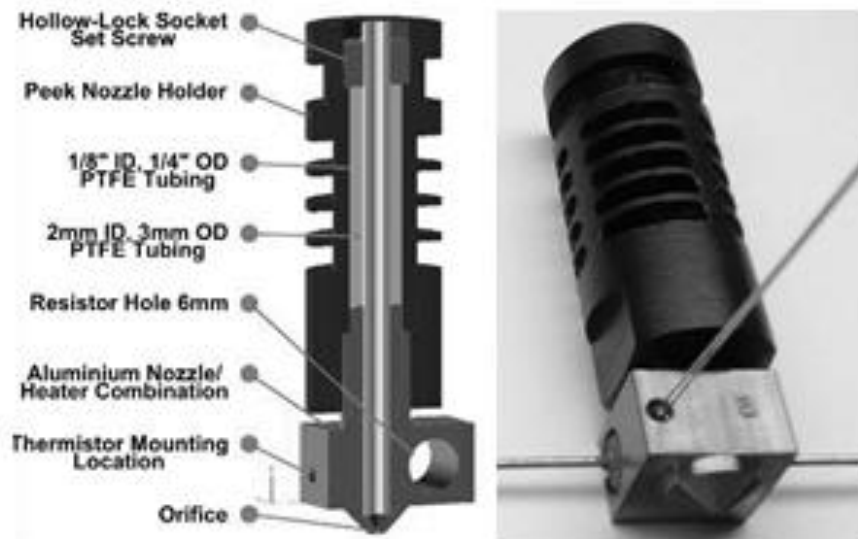


Figura 17: Hot End o Punta Caliente

PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL MÓDULO ELECTRÓNICO Y DE SOFTWARE

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes de módulo electrónico: motores, sensores, resistencias, PCBs, software...

Acciones a realizar:

Prueba de software Arduino y hardware Arduino MEGA 2560

1. Descargar Arduino 22 o superior
2. Ejecutar Arduino 22 o superior
3. Conectar la placa Arduino MEGA 2560 al PC y a la alimentación.
4. Seleccionar el puerto serie al que está conectada la placa.
 - a. Tools/Serial Port/...
5. Seleccionar la placa Arduino MEGA 2560 dentro de la barra de herramientas:
 - a. Tools/Board/Arduino MEGA 2560
6. Abrir ejemplo para encender un LED:
 - a. File/Examples/1.Basics/Blink
7. Descargar el ejemplo en la placa
8. Ejecutar el archivo
9. Comprobar que la frecuencia con la que parpadea el LED varía si variamos los parámetros del programa de ejemplo.

Prueba de software Arduino, RAMPs y Arduino MEGA 2560

1. Ensamblar Arduino MEGA 2560 y RAMPs 1.3.
2. Seguir los pasos de la prueba anterior a partir del 2.

Prueba de conexión Pronterface-Arduino MEGA 2560

1. Descargar el Sprinter SuperEstable en la placa mediante el entorno software Arduino
2. Abrir el Pronterface
3. Seleccionar puerto y velocidad de sincronización y conectarse a la placa.
4. Comprobar que el PC y la placa están conectados. Debe aparecer el mensaje:

```
Connecting...  
ok T:5 B:0  
Printer is now online.
```

5. Abrir un archivo .stl y comprobar que se carga
 - a. File/Open/ y seleccionar el archivo "Cube-20-20-10.stl"

Prueba de comunicación con los motores y los finales de carrera

1. Abrir el Pronterface
2. Conectar PC-Arduino MEGA
3. Mover eje X, eje Y, eje Z, extrusor.
4. Hacer una impresión en vacío para comprobar que los motores pueden funcionar conjuntamente
 - a. Cargar un archivo STL y pulsar PRINT
5. Pausar el movimiento de alguno de los ejes tocando con la mano los finales de carrera para comprobar el funcionamiento de los mismos

Prueba de temperatura del extrusor.

1. Ejecutar Arduino 22 o superior
2. Cargar el Sprinter Super Estable
3. Dirigirse al archivo “Configuration.h” y seleccionar el tipo de sensor de entre los disponibles en el mismo cambiando el valor de la variable THERMISTORHEATER:

```

//// Thermistor settings:
// 1 is 100k thermistor
// 2 is 200k thermistor
// 3 is mendel-parts thermistor
// 4 is 10k thermistor
// 5 is ParCan supplied 104GT-2 100K
// 6 is EPCOS 100k
// 7 is 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-J01
#define THERMISTORHEATER 7
    
```

4. Grabar de nuevo el Sprinter Super Estable en la placa Arduino Mega 2560.
5. Abrir el Pronterface
6. Conectar PC-Arduino MEGA
7. Mandar orden de calentar el extrusor hasta 200°C e ir aumentando la temperatura en intervalos de 5°C hasta alcanzar los 220°C.
8. Comprobar que la temperatura real (tomada con un termopar calibrado) y la adquirida por el sensor es la misma (se acepta un error del 5%).

Prueba de temperatura de la base caliente.

1. Ejecutar Arduino 22 o superior
2. Cargar el Sprinter Super Estable
3. Dirigirse al archivo “Configuration.h” y seleccionar el tipo de sensor de entre los disponibles en el mismo cambiando el valor de la variable THERMISTORBED
4. Grabar de nuevo el Sprinter Super Estable en la placa Arduino Mega 2560.
5. Abrir el Pronterface
6. Conectar PC-Arduino MEGA
7. Mandar orden de calentar la base hasta 60°C e ir aumentando la temperatura en intervalos de 5°C hasta alcanzar los 75°C.
8. Comprobar que la temperatura real (tomada con un termopar calibrado) y la adquirida por el sensor es la misma (se acepta un error del 5%).

Resultados:

Prueba	Resultado
Prueba de software Arduino y hardware Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de software Arduino, RAMPs y Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de conexión Pronterface-Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de comunicación con los motores y los finales de carrera	Satisfactorio
Prueba de temperatura del extrusor.	Satisfactorio
Prueba de temperatura de la base caliente.	Satisfactorio

Conclusiones:

Toda la electrónica de la impresora 3D funciona correctamente.

Acciones a realizar:

Continuar con el montaje de la parte mecánica.

2.2.2. MÓDULO MECÁNICO

En este apartado se resumen los procesos a seguir para el correcto montaje mecánico de la impresora (bastidor y mecanismos de translación) con el objetivo de que el lector pueda comprender el funcionamiento de la Prusa I2.

Gracias al desarrollo de esta parte del proyecto se ha adquirido experiencia en el diseño mecánico de este tipo de impresoras y se han evaluado las diferentes partes que componen la Prusa I2.

Montaje del bastidor de la impresora

El montaje del bastidor puede resumirse en las siguientes partes:

1. Ensamblado de las estructuras triangulares laterales:

Los triángulos laterales están compuestos de: 14 tuercas, 14 arandelas y 3 varillas roscadas M8 y 3 piezas impresas de ABS impresas en una impresora Prusa I2. Partiendo de estas piezas se procedió a montar las 2 estructuras triangulares que forman los laterales de la impresora tal y como puede verse en la figura:



Figura 18: Estructuras laterales del bastidor

El principal inconveniente de este sistema es su difícil ajuste, ya que la longitud de los 3 lados de los triángulos está condicionada por la distancia entre las tuercas introducidas en la varilla de M8, y el desajuste de cualquiera de ellas supone una pérdida de rigidez y un aumento de las vibraciones importante. Por otro lado la utilización de piezas de ABS como sistema de apoyo de la impresora no es conveniente ya que los errores en la fabricación de estas podrían inducir a un cabeceo de la impresora durante su funcionamiento.

2. Unión de las estructuras laterales y colocación de soportes para el eje Y.

Las estructuras triangulares ensambladas anteriormente se unieron por su parte inferior mediante 4 varillas roscadas M8 fijadas mediante tuercas y arandelas:

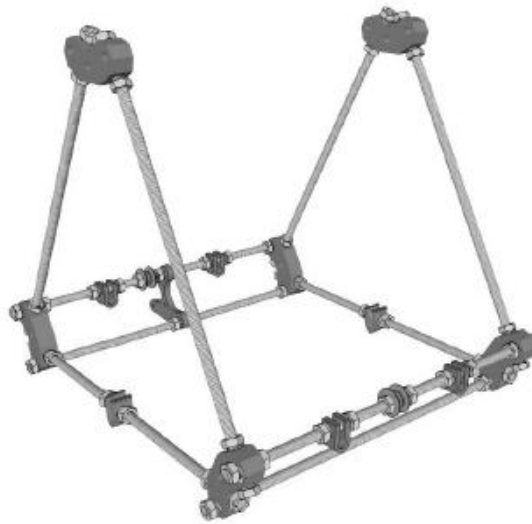


Figura 19: Unión de los triángulos laterales

En dichas varillas roscadas se introdujeron todas las piezas necesarias para soportar los componentes del eje Y (motor, reenvío de correa, soporte de guías lineales...)

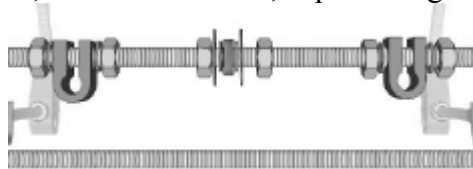


Figura 20: Detalle de los elementos necesarios para el eje Y

Durante este montaje el principal problema detectado fue el elevado número de piezas utilizado y su difícil sustitución en caso de necesidad.

3. Cierre superior de la estructura y colocación de soportes para el eje Z

A la estructura creada hasta el momento se le añadieron dos varillas adicionales en la parte superior. En los extremos de las mismas se insertaron los soportes para los motores del eje Z.



Figura 21: Cierre superior del bastidor

Por último se introdujo un refuerzo transversal en la parte inferior para fortalecer la estructura y servir de soporte para las varillas calibradas que servirán de patines del eje Z.



Figura 22: Refuerzo inferior

Como conclusión final de esta etapa de montaje puede afirmarse que el diseño del bastidor posee los siguientes defectos:

- Falta de rigidez lateral (triangulación en un único sentido)
- Excesivo número de piezas
- Difícil montaje y ajuste
- Alta sensibilidad a vibraciones
- Mantenimiento y sustitución de piezas extremadamente complejo

Montaje del Eje X

El movimiento de translación en la dirección del eje X se lleva a cabo mediante un motor paso a paso que mueve una correa dentada fija a un patín con 3 rodamientos lineales que se deslizan sobre 2 varillas calibradas de acero inoxidable:

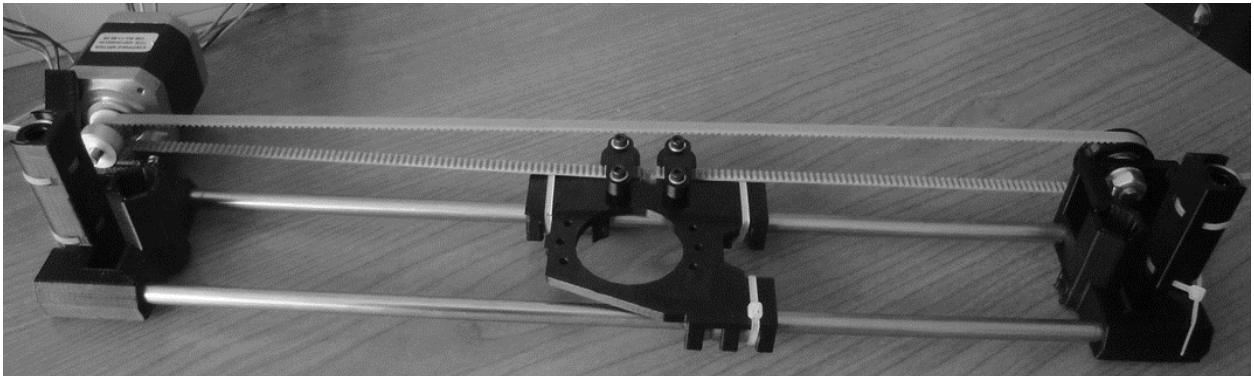


Figura 23: Eje X

Los principales problemas de este diseño son:

- Existencia de juego entre el patín y los rodamientos lineales (su ajuste se hace mediante una brida de plástico)
- Polea y reenvío aparentemente excéntricos debido a la baja calidad de la impresora que los prototipó.

Montaje del Eje Y

El movimiento de translación en la dirección del eje Y se lleva a cabo mediante un motor paso a paso que mueve una correa dentada fija a una placa de contrachapado que hace las veces de patín. Dicha placa se deslizará sobre 2 varillas calibradas de acero inoxidable mediante 3 rodamientos lineales:

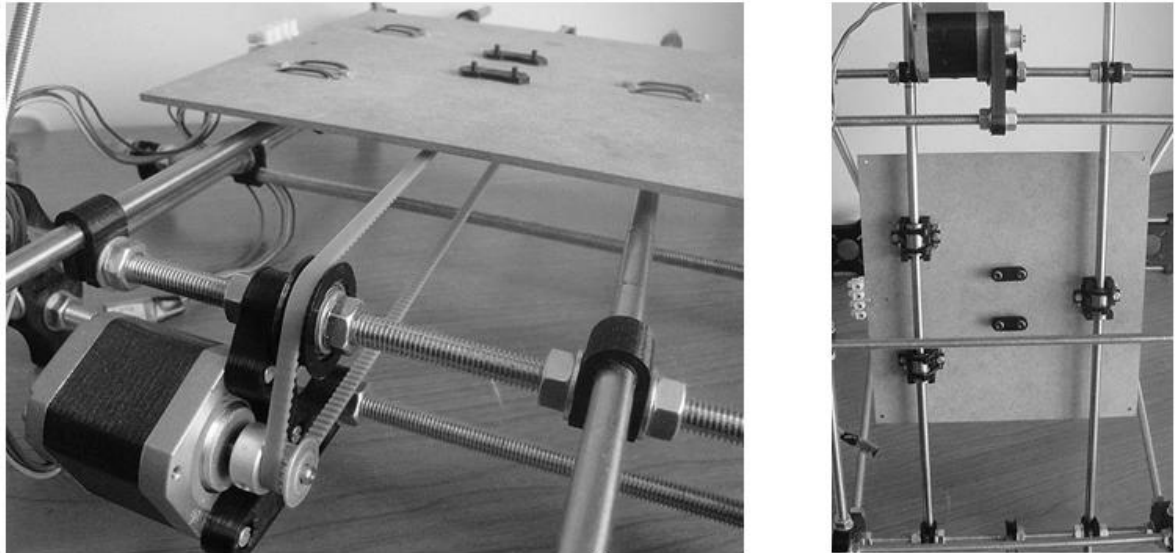


Figura 24: Eje Y

Como puede verse en la figura la unión entre los rodamientos lineales y el patín se realiza con bridas, al igual que el caso anterior, lo que conduce a los mismos problemas.

Montaje del Eje Z

El movimiento de translación en la dirección del eje Z se llevará a cabo mediante dos motores paso a paso que harán girar dos varillas roscadas M8, las cuales harán subir y bajar el eje X, sobre el que se empotran dos tuercas que tienen el giro impedido. Con el objetivo de mejorar el guiado de este eje, se han colocado 2 varillas roscadas por la parte exterior de la estructura sobre las que se deslizan rodamientos lineales:

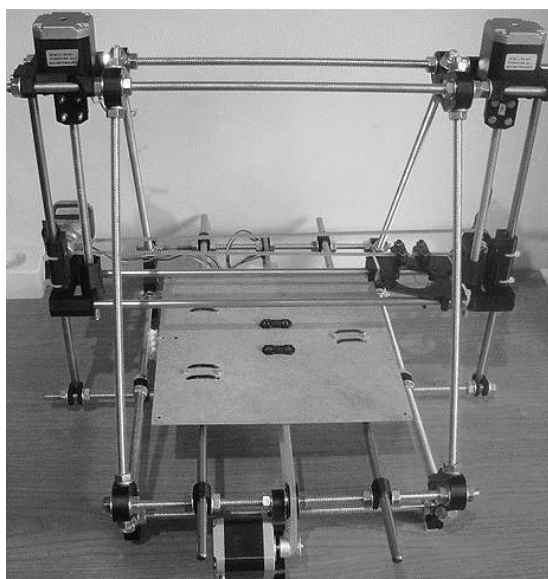


Figura 25: Impresora con los 3 ejes montados

La solución adoptada como acoplamiento entre los ejes de los motores (piezas denominadas “coupling”) y las varillas roscadas no es correcta. Estos acoplamientos están diseñados para apretar 2 ejes de diámetro 8, por lo que el eje del motor tiene una holgura radial de 1.5mm (diámetro de salida del motor Nema 17: 5mm).

La solución propuesta para salvar esa holgura en las guías de montaje de la comunidad RepRap es introducir un fragmento de tubo de goma de 5mm de diámetro interior y 2 mm de pared de tal forma que este quede deformado contra el eje del motor al apretar las dos piezas “coupling”.

Por otro lado existe el mismo problema que en el resto de los ejes, las uniones entre los patines y los rodamientos lineales están realizadas mediante bridas lo que puede producir fallos durante el funcionamiento de la impresora.

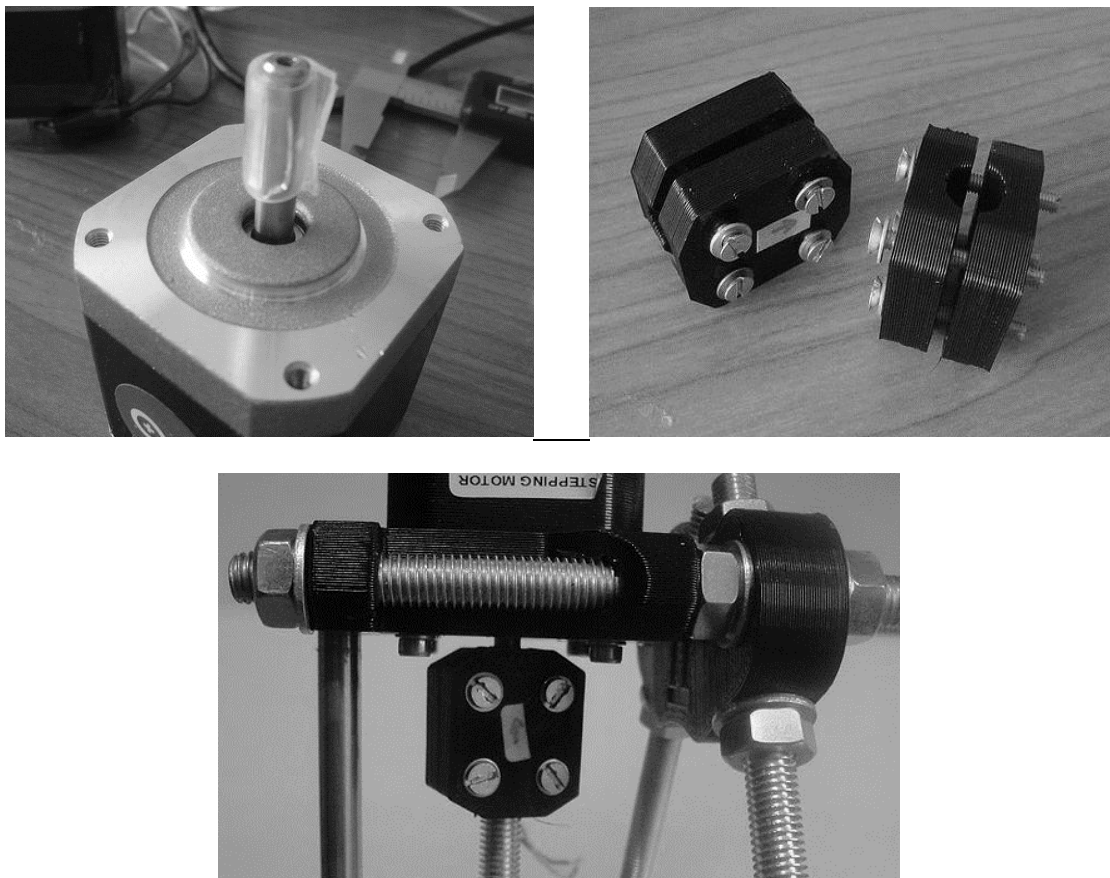


Figura 26: Detalle de la solución adoptada para los acoplamientos del eje Z

Montaje del Extrusor

El extrusor (también denominado Extruder) es el mecanismo encargado de mover el plástico hacia el interior de la punta caliente (Hot end). Este mecanismo está formado por una reducción de velocidad mediante 2 engranajes Chevron en cuyo eje de baja velocidad (Perno M8 mecanizado) están talladas unas hendiduras para transmitir el movimiento al plástico. El plástico es presionado contra dichas hendiduras mediante un rodamiento que gira loco sobre un eje móvil que permite regular la fuerza con la que el plástico es apretado contra el eje tallado.

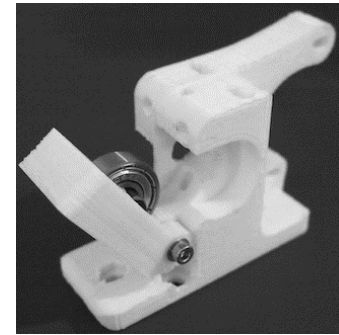


Figura 27: Extrusor

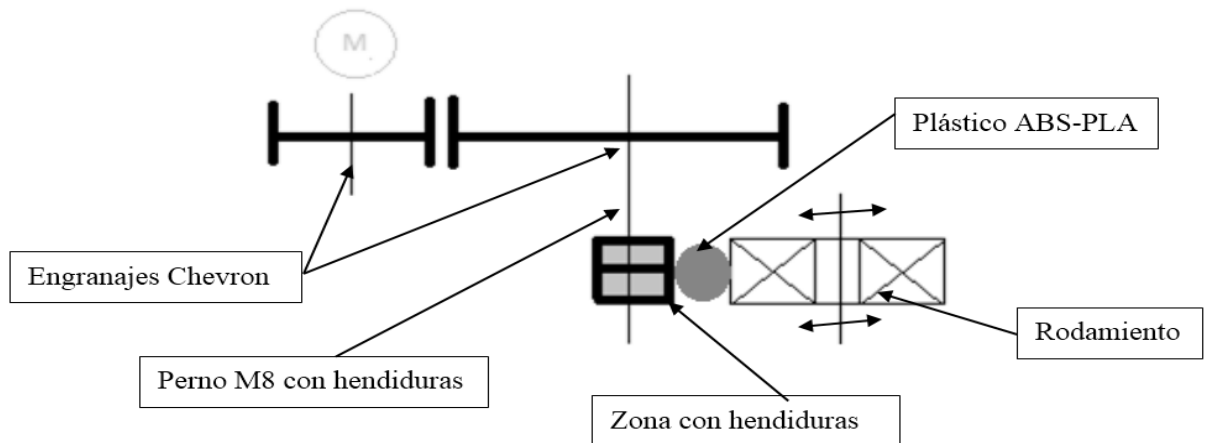


Figura 28: Esquema representativo del funcionamiento del extrusor

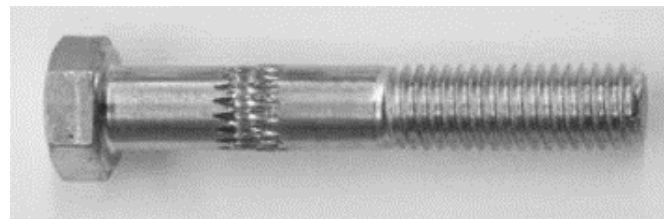


Figura 29: Tornillo con hendiduras o Hobbed Bolt

La posición del rodamiento permite ajustar la fuerza de rozamiento existente entre el perno M8 con hendiduras y el plástico ABS. Esta posición es regulada mediante 2 tornillos con 2 muelles que permiten absorber las irregularidades del diámetro del filamento.

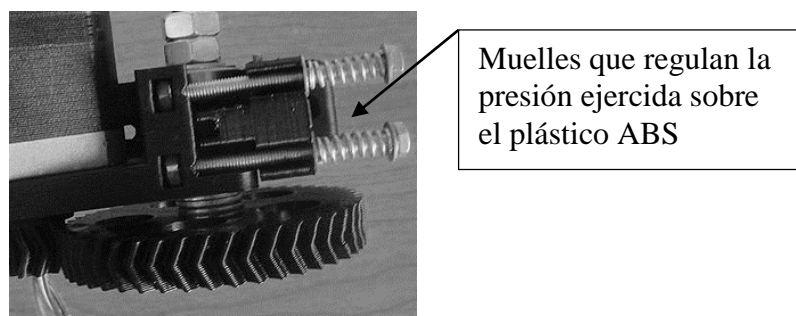


Figura 30: Detalle de los muelles que regulan la presión ejercida sobre el ABS

PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL MÓDULO MECÁNICO

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes mecánicas de la máquina: Bastidor, Ejes X, Y, Z, Extrusor.

Acciones a realizar:

Prueba de eje X:

1. Mover eje X en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje X sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje X pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de eje Y:

1. Mover eje Y en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje Y sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje Y pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de eje Z:

1. Mover eje Z en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje Z sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje Z pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de Extrusor:

1. Introducir plástico en el Extrusor
2. Girar el extrusor 180° en torno al eje Y (colocar entrada de filamento hacia abajo).
3. Colgar 2 kg del plástico introducido en el extrusor.
4. Comprobar si es capaz de levantar dicha carga.
5. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: El extrusor es capaz de levantar 2Kg.
 - b. Fallo: El extrusor no es capaz de levantar 2Kg

Prueba de Punta Caliente:

1. Calentar la punta caliente hasta 220°C
2. Introducir 5mm de plástico en la punta caliente de forma manual y comprobar si esta extruye sin saturarse.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: La punta caliente extruye con normalidad.
 - b. Fallo: la punta caliente no se calienta, no extruye o se satura

Nota: en el caso de que el resultado de la prueba sea “Regular” o “Fallo” deben indicarse los motivos de fallo en el apartado *Conclusiones* y las posibles soluciones a los mismos en el apartado *Acciones a realizar*

Resultados:

Prueba	Resultado
Prueba de eje X	Regular
Prueba de eje Y	Regular
Prueba de eje Z	Satisfactorio
Prueba de Extrusor	Satisfactorio
Prueba Punta Caliente	Satisfactorio

Conclusiones:

La impresora realizar bien los movimientos en los 3 ejes, pero en ciertas posiciones se observa un incremento de la distancia recorrida en los ejes X e Y. Este incremento es debido a la excentricidad de las poleas de ABS y a las irregularidades de los reenvíos de las correas, por lo que el error cometido es intrínseco a la máquina y no puede ser corregido sin cambiar estos componentes.

Acciones a realizar:

Proceder con el protocolo de pruebas general

2.2.3. INTEGRACIÓN DE LOS MÓDULOS

La integración de los módulos ha sido llevada a cabo en gran medida en la etapa anterior, en la cual han sido colocados los motores y los finales de carrera. En este apartado se detallan los pasos llevados a cabo para ensamblar el resto de componentes (Base Caliente, Extrusor y Punta Caliente) y calibrar electrónica para ajustar el movimiento de los motores.

Colocación de la Base Caliente

La Base Caliente se ha colocado sobre la tabla de contrachapado del eje Y mediante 4 tornillos M3 y 4 muelles de la siguiente manera:

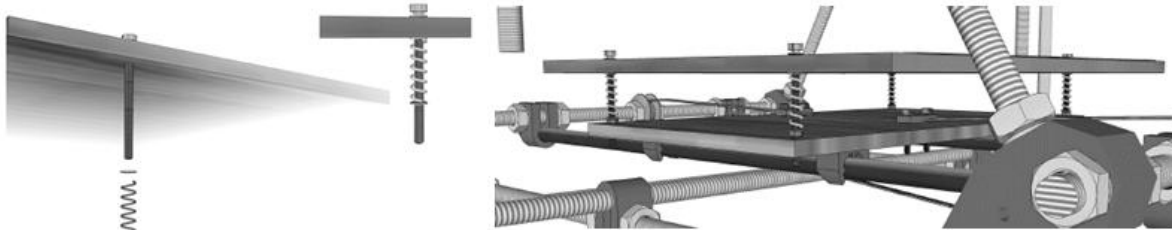


Figura 31: Unión de la Base Caliente al patín del eje Y

Este sistema tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Facilita el nivelado de la mesa de impresión
- Permite que la máquina tenga un recorrido mayor al fijado por el final de carrera en caso de que este falle.

Inconvenientes:

- La colocación de una unión flexible sobre uno de los ejes de la máquina reduce directamente la precisión en dicho eje.
- La mesa puede perder su nivelado por la falta de apriete de cualquiera de los 4 tornillos, lo cual es habitual debido a las vibraciones de la máquina trabajando a altas velocidades.

Extrusor y Punta Caliente

El último proceso de montaje fue el ensamblado de la punta caliente en el extrusor y la colocación de ambos sobre el patín del eje X.

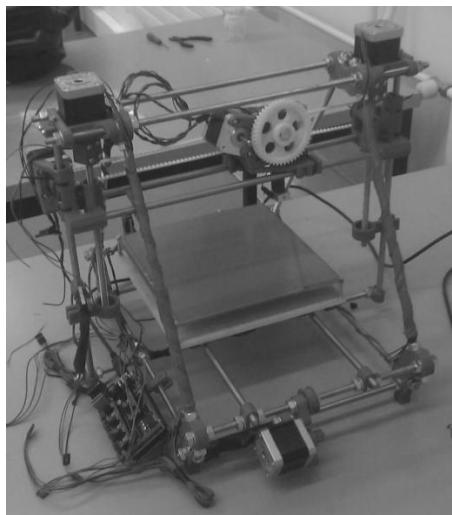


Figura 32: Impresora RepRap Prusa I2

Calibración del firmware

Por último se introdujo en el programa *Sprinter-SuperEstable* el número de pasos que debe dar cada motor para avanzar un milímetro en los diferentes ejes. Esto puede calcularse de forma sencilla en función de la precisión de los motores paso a paso y del diámetro de salida de las poleas según las siguientes fórmulas:

$$Pasos_{mm-XY} = \frac{Pr}{n \cdot e \cdot s}$$

$$Pasos_{mm-z} = \frac{Pr}{a \cdot s}$$

$$Pasos_{mm-e} = \frac{Pr}{i \cdot d \cdot \pi \cdot s}$$

Donde $Pasos_{mm}$ es el número de pasos que se debe enviar al microcontrolador Stepstick A4988 para que el motor haga avanzar la impresora un milímetro en los diferentes ejes o en extrusión, Pr es el número de pasos por revolución del motor, n es el número de dientes de las poleas, e es el espaciado entre los dientes de las correas, s es el factor de ajuste del microcontrolador, a es el avance por vuelta de un tornillo de métrica 8, d es el diámetro del tornillo de extrusión (Hobbed Bolt) e i es la reducción existente en la sistema de extrusión.

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$Pasos_{mm-XY} = \frac{200}{8 \cdot 5 \cdot \frac{1}{16}} = 80$$

$$Pasos_{mm-z} = \frac{200}{1.25 \cdot \frac{1}{16}} = 2560$$

$$Pasos_{mm-e} = \frac{200}{\frac{9}{47} \cdot 6.5 \cdot \pi \cdot \frac{1}{16}} = 818.77$$

Una vez realizados los cálculos se han introducido estos valores en el *Sprinter SuperEstable* y la configuración se ha terminado:

```

//// Calibration variables
// X, Y, Z, E steps per unit - Metric Prusa Mendel with Wade extruder:
float axis_steps_per_unit[] = {80, 80, 2560,818.77};
    
```

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora

Acciones a realizar:

Pruebas a realizar:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 220°C
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube.gcode”, el cual contiene los comandos necesarios para imprimir un cubo de 20x20x10mm
6. Imprimir el archivo “Cube.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Geometría (medir el error cometido en los 3 ejes)
8. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es aceptable)
 - b. Regular (se llevó a cabo la prueba pero el resultado presenta algunos errores)
 - c. Fallo (no se pudo terminar la prueba o el resultado dista mucho del esperado)
9. Indicar las posibles causas de fallo y/o los factores que hicieron que el resultado no fuera “Satisfactorio” dentro del apartado conclusiones.
10. Enumerar las acciones a realizar para solucionar los errores encontrados.

Resultados:

Prueba	Resultado
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio
Calentamiento Base	Satisfactorio
Extruir	Regular
Cargar Archivo STL	Satisfactorio
Imprimir	Fallo
Acabado Superficial	--
Geometría	--

Conclusiones:

Tanto el extrusor como la punta caliente parecen funcionar correctamente por separado pero el hacerlo de forma conjunta fallan. Se ha repetido este ensayo varias veces y no se ha conseguido extruir de forma continuada, detectándose que las posibilidades de fallo son principalmente:

- Fuerza ejercida por el rodamiento sobre el plástico ABS inadecuada
- Temperatura de la punta caliente inadecuada

- Sistema de impulsión del hilo inadecuado (el tornillo estriado se satura con ABS y posteriormente no es capaz de desempeñar su función)
- Posible obstrucción de la Punta Caliente (en algunos momentos la fuerza necesaria para que el plástico salga fundido por la Punta Caliente parece aumentar)
- La temperatura de la Punta Caliente no permanece perfectamente constante en el tiempo.

Acciones a realizar:

Hacer un estudio sobre la presión y temperaturas óptimas para la impresión e intentar solucionar el resto de posibles causas de fallo.

3. EVALUACIÓN DE LA IMPRESORA

En este apartado del proyecto se proponen una serie de mejoras para paliar algunos de los defectos encontrados durante la etapa de montaje y puesta en funcionamiento descritos hasta el momento. Posteriormente se seleccionarán algunas de estas mejoras y se implementarán sobre la impresora con el fin de evaluar su efectividad.

3.1. Enumeración de posibles mejoras realizables

3.1.1. MÓDULO ELECTRÓNICA Y SOFTWARE

Dentro del módulo de electrónica y software se proponen las siguientes mejoras:

<u>Nº</u>	<u>Mejora</u>	<u>Objetivo</u>
1	Rediseñar las PCBs	Reducir costes en una fabricación en serie
2	Realizar control en bucle cerrado	Mejorar la precisión de la impresora
3	Sustituir motores paso a paso por motores DC	Mejorar la precisión de la impresora
4	Realizar el control desde un PC con salidas GPIO	Reducción de costes e integración de software
5	Cambios en programa de laminado/control	Hacer más robustos y sencillos estos programas

A continuación se describen las propuestas anteriores:

1. Se propone sustituir la electrónica actual por una realizada específicamente para la impresora, con los siguientes elementos:
 - 5 Controladores para motores paso a paso
 - 1 Fuente de alimentación
 - 2 Entradas para sensor de temperatura
 - 1 Puerto USB para comunicación con PC
 - LEDs para depurar errores
 - 6 entradas para finales de carrera
 - 2 salidas para calentar la base caliente y le punta caliente.

Con esto es probable conseguir un coste de fabricación menor, sin embargo, el tiempo de desarrollo del diseño de la PCB, fabricación del circuito impreso, soldado de componentes, comprobación de pistas, programación... conducirían a un coste muy elevado que no aportaría una mejora significativa de cara a la fabricación de un prototipo, pero podría conducir a una alta reducción de costes para una fabricación en serie.

2. Con el propósito de mejorar la precisión de la impresora podría insertarse un control en bucle cerrado realimentando la posición de los motores mediante encoders o mejor aún, la posición de la punta caliente mediante sensores lineales (LVDT o similar). La utilidad de este cambio sería importante si los motores paso a paso tuvieran una resolución muy baja o perdieran pasos durante su funcionamiento, pero este no es el caso, ya que el par ejercido por los motores es superior al par necesario para mover cualquier eje de la impresora y la resolución es elevada.

3. La sustitución de motores paso a paso por motores DC supondría el cambio de digital a analógico, lo que conllevaría un aumento de la resolución de la impresora. Si bien, esta resolución solo podría traducirse en un aumento de la precisión en el caso de disponer de un control en bucle cerrado (muy complejo de implementar).
4. Realizar el control directamente desde un PC con salidas GPIO (Raspberry Pi) que sustituya la RAMPs v1.4, la Arduino Mega2560 y el PC de sobremesa. Esto permitiría trabajar a la impresora de forma autónoma y realizar un sistema operativo con todos los diferentes software de la impresora (laminado, control de motores, temperaturas...). Esta mejora ya ha sido implementada en parte por algún miembro de la comunidad RepRap, el cual ha sustituido su PC de sobremesa por una Raspberry Pi y ha comprobado que los tiempos de laminado aumentan excesivamente debido a las limitaciones de los procesadores existentes en este tipo de placas electrónicas.
5. El número de parámetros configurable en los software de laminado Open Source es muy elevado en comparación con los software de las impresoras comerciales, lo que hace que para encontrar los parámetros adecuados de impresión se necesiten estudios en profundidad de dicho software. Una posible mejora sería optimizar estos y crear un software más restringido y robusto que garantice una impresión de calidad. Por otra parte, el software utilizado en esta primera fase del proyecto para laminar es uno de los más complejos de calibrar. Esto se debe a que está programado para controlar cualquier tipo de máquina-herramienta con 3 ejes cartesianos (fresadoras, impresoras, corte laser...) lo que conlleva un elevado número de parámetros externos a los procesos de impresión que podrían influir sobre el mismo de forma negativa. Como solución a este problema se propone buscar otro software realizado específicamente para operaciones de laminado para impresoras 3D.

3.1.2. MÓDULO MECÁNICO

Dentro del apartado mecánico se proponen las siguientes mejoras:

<u>Nº</u>	<u>Mejora</u>	<u>Objetivo</u>
1	Refuerzo de la estructura general de la máquina	Aumentar la rigidez del bastidor
2	Sustitución de las correas T5 por correas T2.5	Mejorar la precisión de la impresora
3	Sustitución de las poleas de ABS por poleas metálicas	Evitar la excentricidad existente en dichas poleas
4	Rediseño de la arquitectura de la máquina	Estudio de otros métodos de fabricación
5	Estudio del sistema de extrusión	Búsqueda de los parámetros de extrusión óptimos
6	Modificación del cabezal de extrusión (Hot End)	Poder desmontar el cabezal de extrusión
7	Cambio de los acoplamientos del eje Z	Mejorar la transmisión de movimiento del eje del motor a las varillas roscadas
8	Cambio del sistema de sujeción de los rodamientos lineales	Evitar holguras entre los patines y dichos rodamientos

A continuación se describen las propuestas anteriores:

1. La estructura del bastidor de la Prusa I2 es poco rígida en la dirección del eje X, posee demasiadas piezas y es muy sensible a las vibraciones propias del funcionamiento de la impresora. Se propone diseñar un bastidor que mejore estas deficiencias.
2. Con el objetivo de mejorar la precisión de la impresora se propone sustituir las correas con espaciado 5mm por correas con espaciado 2.5mm, lo que supondría tener el doble de dientes engranados para el mismo diámetro de polea.
3. Dado que las poleas de ABS montadas actualmente sobre la impresora poseen una excentricidad que afecta directamente a la precisión se propone sustituir estas por otras prototipadas en una impresora 3D con mayor precisión o sustituirlas por poleas de aluminio comerciales
4. Actualmente la arquitectura de la máquina es la de una mesa cartesiana, pero desde el punto de vista de la innovación podría ser interesante el estudio de otros tipos de arquitecturas como la Scara o la Polar.
5. Debido al problema encontrado durante el protocolo de pruebas general se considera conveniente realizar un estudio para encontrar los parámetros óptimos de extrusión.
6. El cabezal de extrusión (Hot End) existente actualmente en la Prusa I2 está compuesto por varias piezas pegadas que no pueden ser desmontadas con facilidad, lo que imposibilita la detección de defectos y obstrucciones en su interior. Una posible mejora podría ser el diseño de una extrusor desmontable con un número reducido de piezas.
7. Como se ha detallado en el proceso de montaje los acoplamientos existentes en el eje Z no son adecuados, por lo que se sería conveniente sustituirlos por unos comerciales o prototipar unas piezas que realicen este acoplamiento de forma adecuada.
8. Con el objetivo de evitar las holguras existentes en los patines X e Y podrían diseñarse unos en los que los rodamientos lineales estén fijos por interferencia o mediante uniones con prisioneros y no por bridas como actualmente.

3.1.3. OTROS

Por último podría realizarse un estudio de la influencia del tipo de plástico (ABS o PLA), su composición y su diámetro en el proceso de impresión.

3.2. Selección de las mejoras a realizar

Esta sección del trabajo fin de máster pretende seleccionar de entre las 13 posibles mejoras propuestas en los apartados anteriores, aquellas que tengan un mayor impacto sobre la impresora con un mínimo coste.

Dado que durante el protocolo de pruebas general existieron fallos relacionados con el proceso de extrusión, se optó por comenzar la mejora de la impresora Prusa I2 con la búsqueda de los parámetros óptimos de este proceso (Estudio del sistema de extrusión). Una vez finalizada esta tarea se realizaron aquellas mejoras que suponen una mejora sobre la impresora sin realizar sobre ella grandes modificaciones:

- Cambios en programa de laminado/control
- Sustitución de las poleas de ABS por poleas metálicas
- Sustitución de las correas T5 por correas T2.5

Tras la realización de estas mejoras se valorarán los resultados obtenidos y se planteará la posibilidad de continuar con mejoras que intervengan más directamente sobre la estructura de la máquina o su funcionamiento:

- Refuerzo de la estructura general de la máquina
- Rediseño de la arquitectura de la máquina
- Modificación del cabezal de extrusión (Hot End)
- Cambio de los acoplamientos del eje Z
- Cambio del sistema de sujeción de los rodamientos lineales

En las siguientes tablas puede observarse los principales motivos de la selección de mejoras a implementar:

<u>Nº</u>	<u>Mejora</u>	<u>Seleccionada/desestimada</u>
1	Rediseñar las PCBs	<u>Desestimada</u> : puede ser interesante para una fabricación en serie pero para el desarrollo de un prototipo no aporta nada.
2	Realizar control en bucle cerrado	<u>Desestimada</u> : El control mediante encoders no aportaría nada y el control por LVDT es excesivamente caro y difícil de integrar
3	Sustituir motores paso a paso por motores DC	<u>Desestimada</u> : El control en bucle cerrado de estos motores es difícil de ajustar, y de esto dependería la precisión de la impresora.
4	Realizar el control desde un PC con salidas GPIO	<u>Desestimada</u> : Los programas de laminado requieren un procesador potente, que difícilmente se puede encontrar en un PC de este tipo
5	Cambios en programa de laminado/control	<u>Seleccionada</u> : Con el objetivo de mejorar la impresión se profundizará en los programas de laminado

<u>Nº</u>	<u>Mejora</u>	<u>Objetivo</u>
1	Refuerzo de la estructura general de la máquina	<u>Seleccionada:</u> Es necesario integrar un refuerzo lateral al bastidor de la impresora.
2	Sustitución de las correas T5 por correas T2.5	<u>Seleccionada:</u> Es sencilla , barata y puede mejorar la precisión apreciablemente
3	Sustitución de las poleas de ABS por poleas metálicas	<u>Seleccionada:</u> Es sencilla , barata y puede mejorar la precisión apreciablemente
4	Rediseño de la arquitectura de la máquina	<u>Seleccionada:</u> Se considera importante valorar las ventajas e inconvenientes de realizar la impresión con otro tipo de arquitecturas de funcionamiento.
5	Estudio del sistema de extrusión	<u>Seleccionada:</u> Fue la primera mejora a realizar, ya que fue el motivo de fallo del protocolo de pruebas general
6	Modificación del cabezal de extrusión (Hot End)	<u>Seleccionada:</u> Es importante conocer el funcionamiento de esta pieza crítica de la impresora
7	Cambio de los acoplamientos del eje Z	<u>Seleccionada:</u> La solución que hay actualmente no es correcta y puede producir excentricidades
8	Cambio del sistema de sujeción de los rodamientos lineales	<u>Seleccionada:</u> supone cambiar gran parte de las piezas de la impresora

4. IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS SOBRE LA IMPRESORA

4.1. Sistema de extrusión

4.1.1. ANÁLISIS DE FALLOS

El principal problema encontrado durante el “Protocolo de Pruebas Generales (ver 2.2.5)” está relacionado con el proceso de extrusión, lo cual nos ha llevado a analizar los factores que pueden afectar a dicho proceso:

- Fallo en el dispositivo de calentamiento de plástico (Hot end o Punta Caliente)
- Fallo en el mecanismo de introducción de plástico en la Hot end (Extrusor o Extruder).
 - En el extruder se puede calibrar la fuerza con la que es apretado el plástico hacia el interior del Hot end regulando la longitud de 2 muelles que sirven para cerrar el mecanismo de tracción. Es posible que esta fuerza no sea la adecuada.
 - Fallo en el tornillo estriado que transmite la fuerza de tracción al filamento para introducirlo en el Hot end (en adelante Hobbed bolt)
- Temperatura de calentamiento inadecuada
- Plástico en mal estado
- Velocidad de avance del plástico inadecuada
- Parámetros configurados en el software de laminado incorrectos.

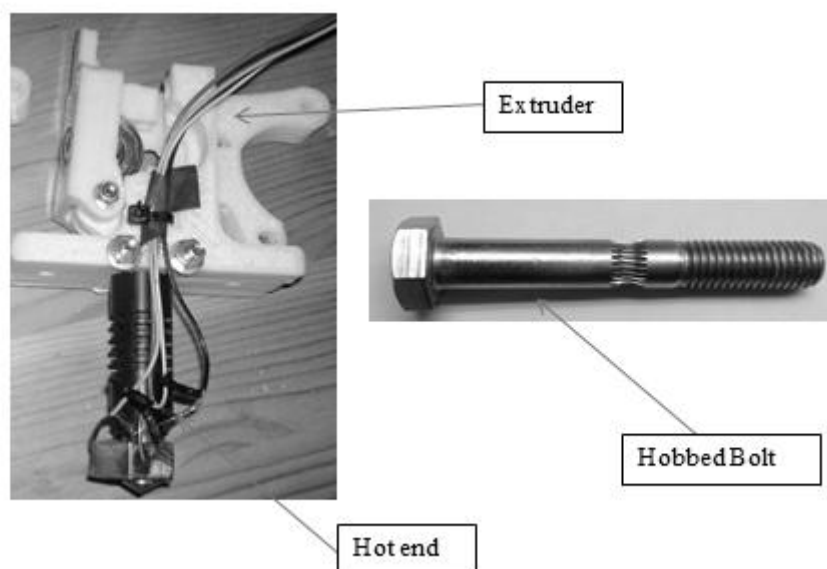


Figura 33: Sistema de extrusión

Con el objetivo de encontrar las variables que optimicen el proceso se fijaron varias de las opciones de fallo mencionadas anteriormente y se analizó la variación del proceso con respecto a otras. En primer lugar se realizará un ensayo con el objetivo de obtener la presión y temperaturas óptimas de extrusión fijando el resto de los parámetros:

ENSAYO NÚMERO 1

Motivación del ensayo:

Obtener la presión y temperaturas óptimas de extrusión

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
Hobbed Bolt: Reclone 3D
Hot end: J Head MKV-B
Software de control: Pronterface y Sprinter-Superstable
Plástico: RECLONE 3D

Variables:

Fuerza ejercida sobre el plástico ABS mediante el hobbed bolt y el rodamiento loco durante la extrusión (medida en función de la longitud de los muelles de cierre (desde 18 hasta 10 mm)).

Temperatura de extrusión (variable entre 200 y 240 °C) ya que la temperatura aproximada de fusión para este tipo de plástico son 190°C

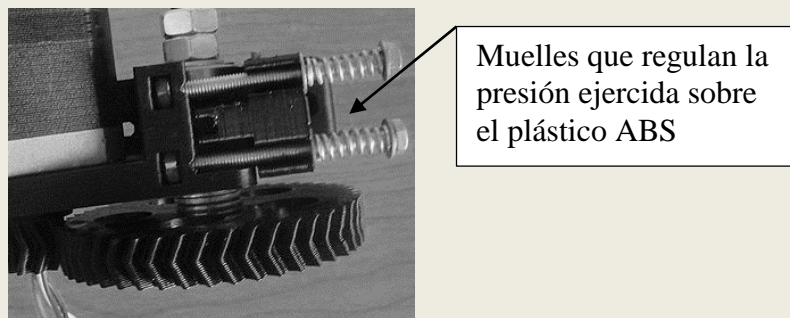


Figura 34: Ajuste del apriete en el sistema de extrusión

Descripción del ensayo:

Se llevaron a cabo una serie de ensayos variando la temperatura del hot end de 200 a 240°C y la presión que se ejercía sobre el ABS al ser extruido (Longitud de los muelles variando de 18 a 10 mm).

Los resultados se catalogarán de la siguiente forma:

- Fallo: La extrusión no es correcta, el fallo se produce en los primeros instantes del ensayo → en el apartado de conclusiones se debe indicar cuál puede ser el motivo de fallo.
- Regular: Hay extrusión continuada durante parte del ensayo pero la velocidad de extrusión no permanece constante.
- Bien: El resultado es correcto, la extrusión se produce de forma continuada y a una velocidad que permanece prácticamente constante durante todo el ensayo.

Resultados:

El resultado de todos los ensayos puede catalogarse como: FALLO. En el siguiente apartado se detallan las posibles causas y las conclusiones generales del ensayo.

Conclusiones:

La extrusión no es continuada para ninguna combinación de presión y temperatura. El motivo principal de fallo de todos los ensayos ha sido la saturación de las hendiduras del hobbed bolt:



Figura 35: Detalle de las hendiduras del Hobbed Bolt

No se ha podido determinar la presión y temperatura adecuadas para la extrusión.

Acciones a realizar:

Rediseñar el Hobbed Bolt para aumentar la superficie de contacto con el plástico ABS y evitar el arranque de material y la posterior obstrucción de este.

4.1.2. REDISEÑO DEL HOBBED BOLT

El hobbed bolt suministrado por Reclone 3D estaba fabricado de forma manual realizando hendiduras con un disco de corte accionado por un taladro de mano (Dremel o similar) en dirección axial a lo largo del perímetro del tornillo de métrica 8. Este método de fabricación no puede garantizar una profundidad y equidistancia de las hendiduras constante, lo cual puede desencadenar una tracción desigual, arranque de material y otros fallos.

Por este motivo se plantean 3 alternativas para solucionar el problema de arrastre de material:

- Realizar un moleteado de profundidad 0.5 mm, paso 1mm y ancho 5 mm a un perno de M8 (Hobbed Bolt denominado MIM_moleteado)



Figura 36: Ejemplo de moleteado recto

- Realizar el arrastre mediante el contacto con 2 juntas tóricas de goma situadas en una posición fija del tornillo (Hobbed Bolt denominado MIM_tóricas)



Figura 37: MIM_tóricas

- Adquirir un Hobbed Bolt tipo Hyena, el cual se vende específicamente para este tipo de impresoras 3D y sus resultados están probados por otros usuarios de estos tipos de impresoras.

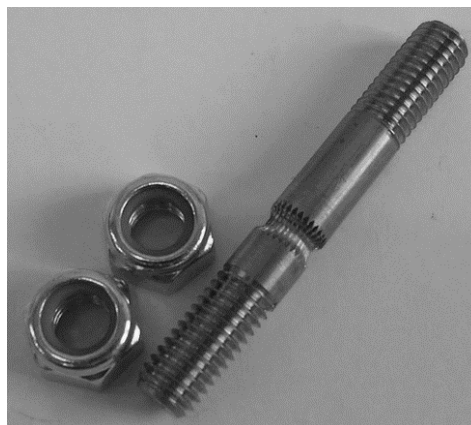


Figura 38: Hobbed Bolt tipo Hyena

A continuación se detallan los resultados obtenidos al repetir en Ensayo Número 1 con estos nuevos Hobbed Bolt:

ENSAYO NÚMERO 2

Motivación del ensayo:

Obtener la presión y temperaturas óptimas de extrusión

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
Hobbed Bolt: MIM_moleteado
Hot end: J Head MKV-B
Software de control : Pronterface y Sprinter-Superstable
Plástico: RECLONE 3D

Variables:

Fuerza ejercida sobre el plástico ABS mediante el hobbed bolt y el rodamiento loco durante la extrusión (medida en función de la longitud de los muelles de cierre (desde 18 hasta 10 mm)).

Temperatura de extrusión (variable entre 200 y 240 °C) ya que la temperatura aproximada de fusión para este tipo de plástico son 190°C

Descripción del ensayo:

Se llevaron a cabo una serie de ensayos variando la temperatura del hot end de 200 a 240°C y la presión que se ejercía sobre el ABS al ser extruido (Longitud de los muelles variando de 18 a 10 mm).

Los resultados se catalogaron de la siguiente forma:

- Fallo: La extrusión no es correcta, el fallo se produce en los primeros instantes del ensayo → en el apartado de conclusiones se debe indicar cuál puede ser el motivo de fallo.
- Regular: Hay extrusión continuada durante parte del ensayo pero la velocidad de extrusión no permanece constante.
- Bien: El resultado es correcto, la extrusión se produce de forma continuada y a una velocidad que permanece prácticamente constante durante todo el ensayo.

Resultados:

El resultado de todos los ensayos puede catalogarse como: FALLO. En el siguiente apartado se detallan las posibles causas y las conclusiones generales del ensayo

Conclusiones:

La extrusión no es continuada para ninguna combinación de presión y temperatura. El motivo principal de fallo de todos los ensayos ha sido la saturación de las hendiduras del hobbed bolt.

ENSAYO NÚMERO 3

Motivación del ensayo:

Obtener la presión y temperaturas óptimas de extrusión

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
Hobbed Bolt: MIM_tóricas
Hot end: J Head MKV-B
Software de control : Pronterface y Sprinter-Superstable
Plástico: RECLONE 3D

Variables:

Fuerza ejercida sobre el plástico ABS mediante el hobbed bolt y el rodamiento loco durante la extrusión (medida en función de la longitud de los muelles de cierre (desde 18 hasta 10 mm)).

Temperatura de extrusión (variable entre 200 y 240 °C) ya que la temperatura aproximada de fusión para este tipo de plástico son 190°C

Descripción del ensayo:

Se llevaron a cabo una serie de ensayos variando la temperatura del hot end de 200 a 240°C y la presión que se ejercía sobre el ABS al ser extruido (Longitud de los muelles variando de 18 a 10 mm).

Los resultados se catalogaron de la siguiente forma:

- Fallo: La extrusión no es correcta, el fallo se produce en los primeros instantes del ensayo → en el apartado de conclusiones se debe indicar cuál puede ser el motivo de fallo.
- Regular: Hay extrusión continuada durante parte del ensayo pero la velocidad de extrusión no permanece constante.
- Bien: El resultado es correcto, la extrusión se produce de forma continuada y a una velocidad que permanece prácticamente constante durante todo el ensayo.

Resultados:

El resultado de todos los ensayos puede catalogarse como: FALLO. En el siguiente apartado se detallan las posibles causas y las conclusiones generales del ensayo

Conclusiones:

Como puede observarse la extrusión no es continuada para ninguna combinación de presión y temperatura. El motivo principal de fallo de todos los ensayos ha sido el deslizamiento de las tóricas con respecto al tornillo y/o con respecto al ABS en los momentos en los que se requiere un par más elevado.

ENSAYO NÚMERO 4

Motivación del ensayo:

Obtener la presión y temperaturas óptimas de extrusión

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
 Hobbed Bolt: Hyena
 Hot end: J Head MKV-B
 Software de control : Pronterface y Sprinter-Superstable
 Plástico: RECLONE 3D

Variables:

Fuerza ejercida sobre el plástico ABS mediante el hobbed bolt y el rodamiento loco durante la extrusión (medida en función de la longitud de los muelles de cierre (desde 18 hasta 10 mm)).

Temperatura de extrusión (variable entre 200 y 240 °C) ya que la temperatura aproximada de fusión para este tipo de plástico son 190°C

Descripción del ensayo:

Se llevaron a cabo una serie de ensayos variando la temperatura del hot end de 200 a 240°C y la presión que se ejercía sobre el ABS al ser extruido (Longitud de los muelles variando de 18 a 10 mm).

Los resultados se catalogaron de la siguiente forma:

- Fallo: La extrusión no es correcta, el fallo se produce en los primeros instantes del ensayo → en el apartado de conclusiones se debe indicar cuál puede ser el motivo de fallo.
- Regular: Hay extrusión continuada durante parte del ensayo pero la velocidad de extrusión no permanece constante.
- Bien: El resultado es correcto, la extrusión se produce de forma continuada y a una velocidad que permanece prácticamente constante durante todo el ensayo.

Resultados:

En la siguiente tabla pueden observarse los diferentes resultados para las combinaciones de presión y temperatura:

T°/Presión	18	17	16	15	14	13	12	11	10
200	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
205	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
210	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
215	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
220	Fallo	Fallo	Fallo	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.
225	Fallo	Fallo	Fallo	Reglr.	Bien	Bien	Bien	Bien	Reglr.
230	Fallo	Fallo	Fallo	Reglr.	Bien	Bien	Bien	Bien	Reglr.
235	Fallo	Fallo	Fallo	Reglr.	Bien	Bien	Bien	Bien	Reglr.
240	Fallo	Fallo	Fallo	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.	Reglr.

Conclusiones:

Como puede observarse la extrusión parece ser continuada para ciertas combinaciones de temperatura y presión, por lo que se tomará como valores óptimos: 230°C y 12 mm.

Acciones a realizar:

Repetir el protocolo de pruebas general con una temperatura de 230°C, 12 mm de longitud de los muelles y el tornillo de extrusión tipo Hyena.

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL (2)

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora

Acciones a realizar:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube.gcode”, el cual contiene los comandos necesarios para imprimir un cubo de 20x20x10mm
6. Imprimir el archivo “Cube.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (medir el error cometido en los 3 ejes)

Resultados:

Prueba	Resultado	Mejora con respecto al anterior
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio	Igual
Calentamiento Base	Satisfactorio	Igual
Extruir	Regular	Mejor
Cargar Archivo STL	Satisfactorio	Igual
Imprimir	Fallo	Igual
Acabado Superficial	No se llevó a cabo	--
Tolerancias dimensionales	No se llevó a cabo	--

Conclusiones:

Al igual que la primera vez que se realizó este protocolo la impresión ha sido fallida ya que la velocidad de salida del plástico no era constante y tras varios intentos se convirtió en intermitente debido a la saturación de las hendiduras del Hobbed Bolt y otros posibles errores que deben ser analizados.

Acciones a realizar:

Buscar otros motivos de fallo:

- Obstrucción del hot end en ciertos momentos, lo que implica el aumento del par requerido en el hobbed bolt, el deslizamiento del mismo y la posterior obstrucción
- Temperatura inestable debido a una mala implementación del control de temperatura
- Plástico en mal estado o inadecuado.
- Cambio de programa de laminado (mala calibración del mismo)

4.1.3. ADQUISICIÓN DE NUEVO MATERIAL ABS

Dado que la validez del perno tipo Hyena y del Hot End adquiridos para la extrusión ha sido comprobada por cientos de personas en todo el mundo se acepta que el fallo debe estar en otra de las variables del proceso, recurriéndose en este caso a la sustitución del material ABS por otro procedente de un fabricante distinto.

Con el objetivo de comprobar la calidad del nuevo material se repetirá el protocolo de pruebas general por tercera vez.



Figura 39: Bobina de plástico ABS

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL (3)

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora

Acciones a realizar:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube.gcode”, el cual contiene los comandos necesarios para imprimir un cubo de 20x20x10mm
6. Imprimir el archivo “Cube.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (medir el error cometido en los 3 ejes)

Resultados:

Prueba	Resultado	Mejora con respecto al anterior
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio	Igual
Calentamiento Base	Satisfactorio	Igual
Extruir	Satisfactorio	Igual
Cargar Archivo STL	Satisfactorio	Igual
Imprimir	Regular	Mejor
Acabado Superficial	Regular	Mejor
Tolerancias dimensionales	Regular	Mejor

Conclusiones

La extrusión ha sido mucho más constante que en los apartados anteriores y se ha logrado imprimir un cubo, aunque a simple vista se observa que no se está extruyendo la cantidad de material necesario, ya que la separación entre los hilos de plástico es demasiado grande y la pieza no forma un sólido rígido completo.

Adicionalmente se ha observado que la temperatura oscila $\pm 5^{\circ}\text{C}$ sobre la de referencia constantemente, lo que hace que en ocasiones la cantidad de plástico extruido sea mayor que en otras.

Acciones a realizar:

- Implementar un control de temperatura PID o similar
- Cambio de programa de laminado (y posterior calibración del mismo)

4.2. Cambios de software

4.2.1. INTEGRACIÓN DE CONTROL DE TEMPERATURA PID

El control de temperatura llevado implementado hasta este punto del proyecto se basaba en un control tipo “TODO o NADA”, es decir, cada vez que se hace una lectura del sensor de temperatura esta se compara con la referencia y se le aplica o no tensión a la resistencia, lo cual hace que la variación de la temperatura sea muy rápida y esté oscilando constantemente respecto a la de referencia pero nunca se mantenga constante en la misma.

Con el objetivo de conseguir una mayor estabilidad de la temperatura se propone introducir un control PID que actúe sobre la tensión aplicada en la resistencia en función del error cometido en cada instante.

Para ello se ha actualizado la versión Sprinter Super-Estable a la versión Sprinter 1.3.22, la cual ya dispone de un control de temperatura PID autorregulable, es decir, un control de temperatura que ofrece al usuario las constantes proporcional, integral y diferencial óptimas para el control de su planta.

Las acciones llevadas a cabo para actualizar el Sprinter han sido:

1. Abrir el entorno Arduino
2. Cargar el Sprinter 1.3.22
3. Configurar el archivo “Configuration.h” con los valores correctos para los movimientos de los motores de los ejes X,Y, Z y el extrusor, los sensores de temperatura y la versión de RAMPs utilizada.
4. Cargar el Sprinter 1.3.22 en la PCB Arduino Mega 2560.
5. Arracar el Pronterface
6. Conectar con la PCB Arduino Mega 2560
7. Ejecutar el comando M303 (PID Autotune start)

```
SENDING:M303
PID Autotune start
```

8. Esperar hasta que se muestre el resultado:

```
PID Autotune finished!
Place the Kp, Ki and Kd constants in the configuration.h
```

```
Classic PID
CFG Kp: 3569
CFG Ki: 61
CFG Kd: 12848
```

9. Sustituir estos valores en el archivo Configuration.h:

```
#define PID_PGAIN 3569
#define PID_IGAIN 61
#define PID_DGAIN 12848
```

10. Cargar de nuevo el Sprinter 1.3.22 en la PCB Arduino Mega 2560.
11. Repetir los pasos 6-10 3 veces para garantizar que se encuentran los valores óptimos
12. Comprobar que al aumentar la temperatura hasta 230°C esta permanece constante o al menos con unas variaciones inferiores a las obtenidas antes de implementar el control.
13. Repetir el protocolo de pruebas general

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL (4)

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora

Acciones a realizar:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube.gcode”, el cual contiene los comandos necesarios para imprimir un cubo de 20x20x10mm
6. Imprimir el archivo “Cube.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (medir el error cometido en los 3 ejes)

Resultados:

Prueba	Resultado	Mejora con respecto al anterior
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio	Mejor
Calentamiento Base	Satisfactorio	Mejor
Extruir	Satisfactorio	Mejor
Cargar Archivo STL	Satisfactorio	Igual
Imprimir	Regular	Mejor
Acabado Superficial	Regular	Mejor
Tolerancias dimensionales	Regular	Mejor

Conclusiones

La extrusión parece constante en todo momento pero la cantidad de plástico, o la separación entre capas no parece correcta.

Acciones a realizar:

- Calibración del software de laminado o cambio de programa de laminado

4.2.2. SOFTWARE DE LAMINADO

Hasta el momento el software utilizado para laminar era Skeinforce, tal y como recomienda la guía de montaje de J. González-Gómez [1]. Dicho software posee multitud de opciones relacionadas con la impresión 3D y otros tipos de máquinas herramienta (más de 260 opciones de configuración), lo cual lo hace extremadamente complejo de configurar y conocer en profundidad, ya que no existe una documentación adecuada. En base a esto se ha decidido realizar una comparativa entre Skeinforce y CURA, un software realizado por la empresa Ultimaker específicamente para impresoras 3D, con el objetivo de evaluar la posibilidad de cambiar el software de impresión para obtener mejores resultados.

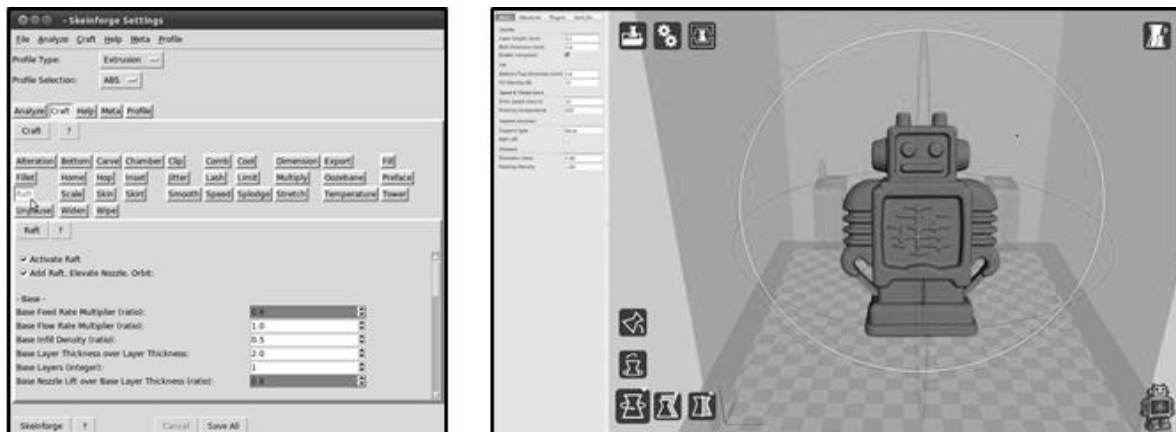


Figura 40: Entorno de los programas Skeinforce y Cura (De izquierda a derecha)

Ventajas del cambio de Software (Skeinforce → Cura)

- CURA dispone de un manual de usuario y un asistente de ayuda integrado en el programa que hace que su configuración sea más sencilla
- CURA está diseñado específicamente para hacer laminados para impresoras 3D, por lo que no dispone de parámetros de configuración innecesarios que puedan afectar al programa de laminado o a la generación del G-CODE.
- CURA está implementado en código Python, lo que lo hace más rápido que Skeinforce.
- CURA dispone de una interface gráfica más sencilla e intuitiva.
- CURA permite generar laminados de varias piezas al mismo tiempo, con el fin de hacer impresiones en paralelo.

Inconvenientes del cambio de Software (Skeinforce → Cura)

- CURA posee menos opciones que Skeinforce, por lo que el usuario pierde en algunos casos opciones de configuración que podrían resultar interesantes.
- Aunque CURA dispone de un módulo para la comunicación con la impresora este no está tan desarrollado como el Pronterface, por lo que será necesario utilizar 2 software para llevar a cabo una impresión: CURA y Pronterface.

Como puede observarse existen muchas ventajas en el cambio de software, por lo que se decidió instalar CURA 13.03 y proceder a la configuración del mismo. A continuación se detallan los parámetros de configuración escogidos para la impresión.

Menú configuración de impresión (Basic)

Submenú	Opción	Concepto a configurar	Valor
Quality	Layer height	Altura de cada capa	0.35
	Wall thickness	Espesor de paredes laterales	--
	Enable retraction	Habilitar retracción de material	Ok
Fill	Bottom/Top thickness	Espesor de la capa inferior y superior	1
	Fill density	Densidad de relleno interior	--
Speed & temperature	Print speed	Velocidad del cabezal durante la impresión	30mm/s
	Printing temperature	Temperatura de impresión	230°C
	Bed temperature	Temperatura de la mesa de impresión	70°C
Support	Support type	Selección del tipo de soporte para la pieza y las zonas en voladizo: None, Exterior only, Everywhere, Empty layers only	None
	Add raft	Soporte postizo sobre el que se imprime la pieza	No
Filament	Diameter	Diámetro del filamento	3.1
	Packing density	Densidad del filamento	0.85

Quality

Layer height (mm)

Wall thickness (mm)

Enable retraction

Fill

Bottom/Top thickness (mm)

Fill Density (%)

Speed & Temperature

Print speed (mm/s)

Printing temperature

Bed temperature

Support structure

Support type

Add raft

Filament

Diameter (mm)

Packing Density

Machine size

Nozzle size (mm)

Skirt

Line count

Start distance (mm)

Retraction

Minimum travel (mm)

Speed (mm/s)

Distance (mm)

Extra length on start (mm)

Speed

Travel speed (mm/s)

Max Z speed (mm/s)

Bottom layer speed (mm/s)

Cool

Minimal layer time (sec)

Enable cooling fan

Quality

Initial layer thickness (mm)

Cut off object bottom (mm)

Duplicate outlines

Figura 41: Menús Básico y Avanzado de Cura (de izquierda a derecha)

Menú Configuración Avanzada (Advanced config)

Submenú	Opción	Concepto a configurar	Valor
Machine size	Nozzle size	Tamaño de la boquilla de extrusión	0.5
Retraction	Minimal travel	Distancia mínima que debe recorrer el cabezal sin extruir para que se considere necesaria la retracción	1
	Speed	Velocidad de retracción	45
	Distance	Cantidad de plástico a retraer	3
	Extra length on start	Cantidad de plástico extra tras la retracción	0
Speed	Travel speed	Velocidad del cabezal cuando no se imprime	30
	Max Z speed	Velocidad en dirección Z	3.0
	Bottom layer speed	Velocidad de impresión de la primera capa	20
Cool	Minimal layer time	Tiempo que debe transcurrir entre la impresión de una capa y la siguiente (solidificación)	5
	Enable cooling fan	Activar ventilador de enfriado	No
Quality	Initial layer thickness	Tamaño de la primera capa	0.3
	Duplicate outlines	Permite realizar las capas de la periferia con la mitad de grosor y el doble de pasadas.	No
Skirt	Line count	Nº de líneas de contorno de pieza	1
	Skirt distance	Distancia de las líneas de contorno a la pieza	3

Menú Inicio y fin de programa (Start/End- G CODE)

Submenú	Concepto a configurar
start.gcode	Cabecera del código G: Lugar indicado para introducir manualmente parámetros de configuración de la impresora mediante líneas de código que se insertarán como cabecera de todas las piezas que sean laminadas
end.gcode	Final del código G: Lugar indicado para introducir manualmente parámetros de configuración que serán ejecutados al finalizar la impresión (enfriar Hot End y Base Caliente, mandar la impresora al origen de coordenadas...)

Menú Opciones de Experto (Expert settings → Expert Config)

<i>Submenú</i>	<i>Opción</i>	<i>Concepto a configurar</i>	<i>Valor</i>
Accuracy	Extra wall thickness for bottom	Contorno extra para las capas superior e inferior	0
Cool	Minimum feedrate	Parámetros para configurar un ventilador para enfriar la punta caliente	--
	Fan on layer number		
	Fan speed min		
	Fan speed max		
Raft	Extra margin	Distancia desde el borde de la pieza al contorneado inicial	5
	Base material amount	Cantidad de material para la base	100
	Interface material amount	Superficie de contacto entre el soporte y la pieza	100
Support	Material amount	Cantidad de material de soporte	50
	Distance from object	Espacio entre la pieza y el material de soporte	0.5
Infill	Infill pattern	Line, Grid circular, Grid hexagonal, Grid rectangular	Line
	Solid infill top	Generar una capa sólida en la parte superior de la pieza	ok
	Infill overlap	porcentaje que queremos que el relleno se solape con los muros	15
Bridge	Bridge speed	Velocidad da avance a la hora de hacer partes en voladizo	100
Sequence	Print order sequence	Configure la secuencia de impresión de los perímetros exteriores	L>P>I
Joris	Joris the outer edge	Permite trazar la periferia de la pieza en forma de hélice	No
Retraction	Retraction on jumps only	Habilitar retracción	ok

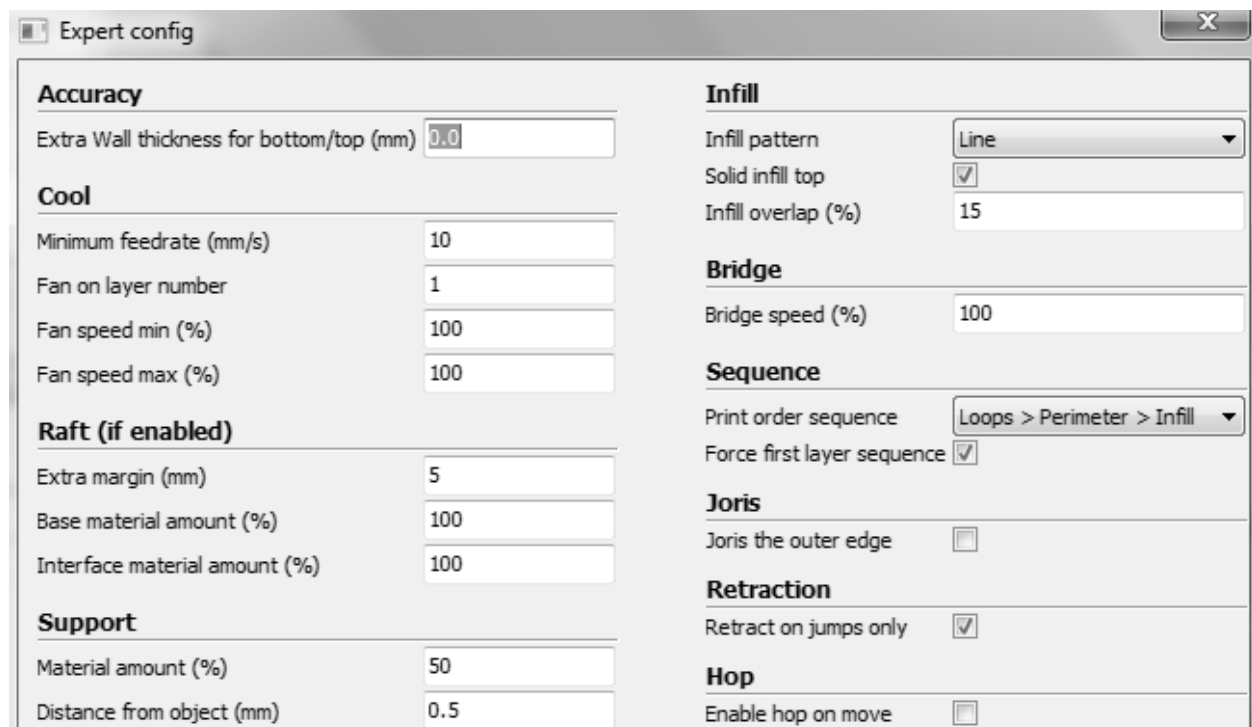


Figura 42: Menús Configuración Experta de Cura

Menú Preferencias (Expert settings → Expert Config)

<i>Submenú</i>	<i>Opción</i>	<i>Concepto a configurar</i>	<i>Valor</i>
<i>Machine Settings</i>	<i>Steps per E</i>	<i>Numero de pasos por mm de extrusión</i>	850
	<i>Maximum width (mm)</i>	<i>Ancho de la zona de trabajo</i>	200
	<i>Maximum depth (mm)</i>	<i>Largo de la zona de trabajo</i>	200
	<i>Maximum height (mm)</i>	<i>Alto de la zona de trabajo</i>	200
	<i>Extruder count</i>	<i>Numero de extrusores disponibles</i>	1
	<i>Heated bed</i>	<i>Opción de mesa de extrusión caliente</i>	Ok
<i>Colours</i>	<i>Model Colour</i>	<i>Color del filamento</i>	--
<i>Filament Settings</i>	<i>Density</i>	<i>Densidad del filamento</i>	1300
	<i>Cost</i>	<i>Coste del filamento</i>	25€/kg
<i>Communication settings</i>	<i>Serial port</i>	<i>Puerto serie para la comunicación</i>	Line
	<i>Baudrate</i>	<i>Velocidad de transmisión</i>	ok
<i>Slicer setting</i>	<i>Save profile on slice</i>	<i>Salvar el perfil en "slice"</i>	No
<i>SD card Settings</i>	<i>No se utilizará tarjeta de memoria</i>		
<i>Cura Settings</i>	<i>Check for updates</i>	<i>Busca actualizaciones</i>	Ok
	<i>Send usage statistics</i>	<i>Manda datos estadísticos</i>	Ok



figura 43: Menú preferencias de Cura

Como podemos observar el número de parámetros configurables en este software es igualmente elevado (aquí solo se muestran algunas de ellas), por lo que la correcta configuración del mismo es aún compleja. En el siguiente protocolo de pruebas pueden observarse los resultados obtenidos con los parámetros indicados anteriormente, los cuales han sido seleccionados en base a la experiencia del autor de este trabajo fin de máster.

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL (5)

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora

Acciones a realizar:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube-CURA.gcode” generado por CURA con los parámetros indicados anteriormente.
6. Imprimir el archivo “Cube-CURA.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (medir el error cometido en los 3 ejes)

Resultados:

Prueba	Resultado
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio
Calentamiento Base	Satisfactorio
Extruir	Satisfactorio
Cargar Archivo STL	Satisfactorio
Imprimir	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancias dimensionales	Regular

Conclusiones

Se ha conseguido imprimir un cubo correctamente y el acabado superficial y tolerancias geométricas son aceptables, aunque se observa que en algunos casos existen errores en los movimientos en los ejes X e Y debidos a las poleas y reenvíos utilizados.

Acciones a realizar:

El resultado de los cambios realizados ha producido las mejoras esperadas por lo que se debe continuar con las mejoras propuestas en el apartado 3.2 relativa a los procesos de transmisión:

- Cambio de las poleas y correas
- Cambio de los reenvíos de las correas

4.3. Sistema de transmisión mecánica

En este apartado se propone sustituir las poleas de plástico y espaciado T5 existentes por poleas metálicas con espaciado T2.5mm, lo cual supone cambiar también las correas.

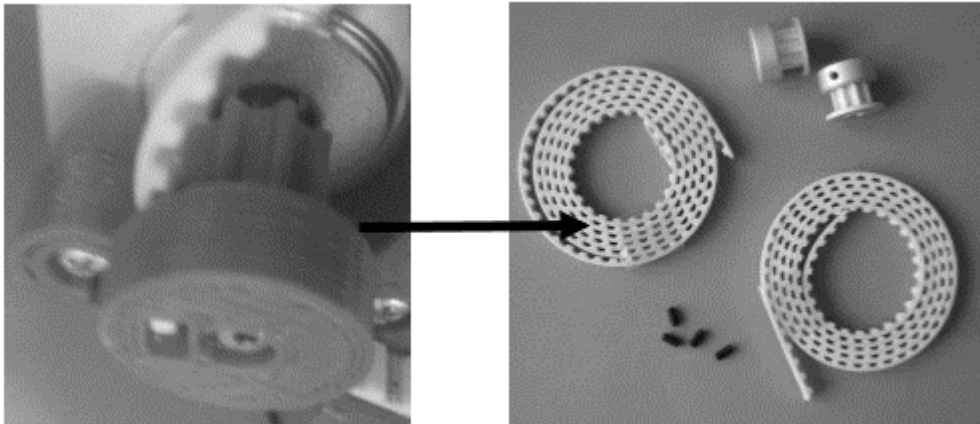


Figura 44: A la izquierda poleas de ABS y correas T5. A la derecha poleas de aluminio y correas T2.5

Se realizará esta acción tanto en el eje X como en el Y con el objetivo de verificar si la calidad dimensional mejora con dicho cambio.

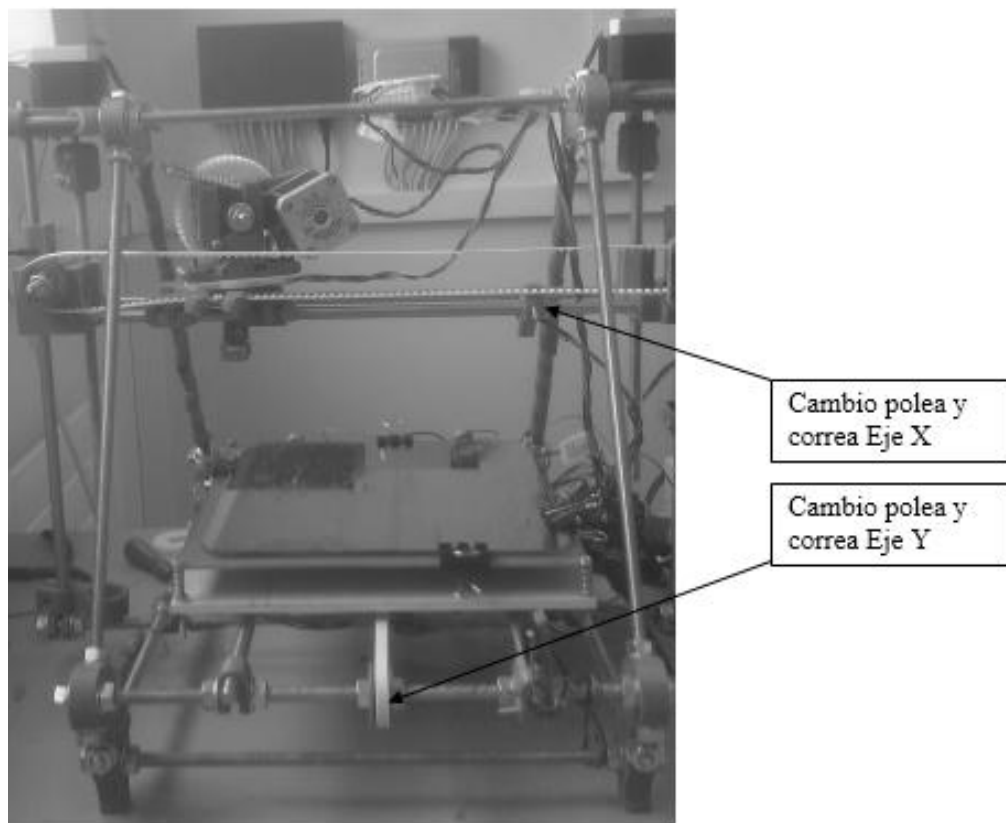


Figura 45: Detalle de las correas y poleas cambiadas

Con el objetivo de cuantificar la mejora obtenida al realizar este cambio se ha llevado a cabo un ensayo que compara los errores cometidos antes y después de realizar la mejora.

ENSAYO PARA CUANTIFICAR LAS MEJORAS OBTENIDAS POR EL CAMBIO EN LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MECÁNICA

Motivación del ensayo:

Evaluar la mejora obtenida al sustituir las poleas de ABS T5 por poleas metálicas T2.5

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
Hobbed Bolt: Hyena
Hot end: J Head MKV-B
Software de control: Pronterface y Sprinter-Superstable+CURA
Plástico: MAR-CAST
Temperatura de funcionamiento: 230°C

Descripción del ensayo:

Se imprimirán 3 cubos (20x20x10) con cada uno de los dos sistemas de transmisión (poleas de ABS T5 y poleas de aluminio T2.5) y se comprobarán los resultados obtenidos. Las medidas se realizarán mediante un calibre digital con una división de escala de 0.01 mm.

Resultados:

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los diferentes cubos en las diferentes direcciones. Indicando el error cometido:

$$Error = |medida_nominal - medida_real|$$

$$Error \% = \frac{Error}{medida_nominal} * 100$$

Correas T5

Error %	X	Y	Z
Cubo 1	5	4.2	0.5
Cubo 2	5.1	4.5	0.4
Cubo 3	4.9	1.5	0.5
Error medio	5	3.4	0.5

Correas T2.5

Error %	X	Y	Z
Cubo 1	1.2	1.4	0.4
Cubo 2	0.8	0.6	0.5
Cubo 3	0.9	0.5	0.4
Error medio	1	0.8	0.4

Conclusiones:

Como puede verse existe un error en los ejes X e Y de aproximadamente un 5% y un 3.4% del valor nominal respectivamente en el caso de las correas T5 y un error de en torno al 1% en el caso de las correas T2.5, lo cual indica que se ha producido una mejora sustancial de la precisión de la máquina con este cambio.

Adicionalmente se ha observado que el renvío de las correas no forma una circunferencia perfecta, lo que supone que la correa no engrane bien en algunas ocasiones, se propone cambiar este tipo de renvío por otro que haga que la correa se deslice directamente sobre los rodamientos.

4.3.1. CAMBIO DEL RENVÍO DE LAS CORREAS

Tal y como se ha indicado anteriormente los reenvíos de las correas parecen no funcionar correctamente debido a fallos en los procesos de fabricación de los mismos:

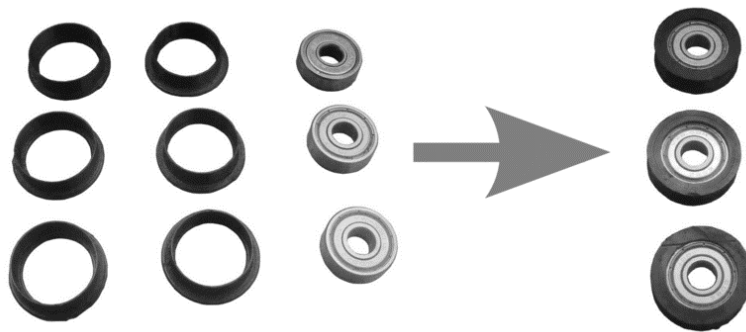


Figura 46: Renvíos de las correas

Se propone cambiar este sistema por otro que guíe la correa sobre un rodamiento que gire loco tal y como puede observarse en la figura:

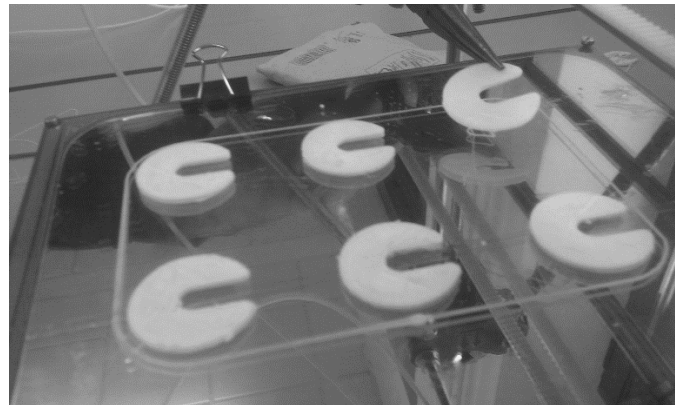


Figura 47: Fabricación de las piezas necesarias para los nuevos reenvíos en la Prusa I2

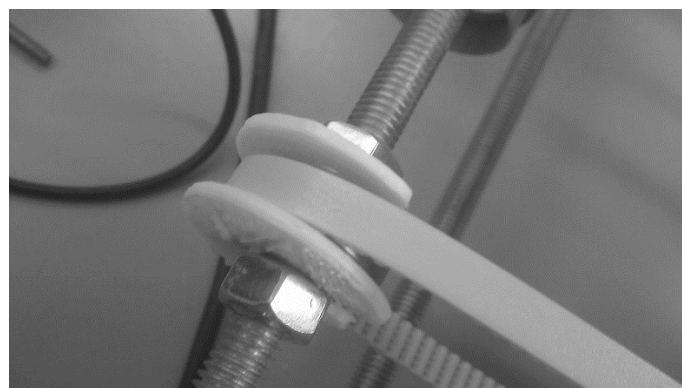


Figura 48: Nuevo reenvío en funcionamiento

Con el objetivo de comprobar la repercusión de este cambio se ha decidido repetir el protocolo de ensayo llevado a cabo en los ensayos anteriores. A continuación pueden verse los detalles del mismo:

ENSAYO PARA CUANTIFICAR LAS MEJORAS OBTENIDAS POR EL CAMBIO EN LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MECÁNICA

Motivación del ensayo:

Evaluar la mejora obtenida al sustituir los renvíos de las correas por placas de plástico que guíen la correa sobre un rodamiento que gira loco.

Parámetros fijados:

Velocidad de avance de material: 20 mm/min
Hobbed Bolt: Hyena
Hot end: J Head MKV-B
Software de control: Pronterface y Cura
Plástico: MAR-CAST
Transmisión: Metálica T2.5
Temperatura de funcionamiento: 230°C

Descripción del ensayo:

Se imprimirán 3 cubos (20x20x10) con cada uno de los dos sistemas de transmisión (poleas de ABS T5 y poleas de aluminio T2.5) y se comprobarán los resultados obtenidos. Las medidas se realizarán mediante un calibre digital con una división de escala de 0.01 mm.

Resultados:

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los diferentes cubos en las diferentes direcciones. Indicando el error cometido:

$$Error = |medida_nominal - medida_real|$$

$$Error \% = \frac{Error}{medida_nominal} * 100$$

Nuevos renvíos

Error %	X	Y	Z
Cubo 1	0.7	0.5	0.4
Cubo 2	0.6	0.4	0.5
Cubo 3	0.5	0.5	0.4
Error medio	0.6	0.5	0.4

Conclusiones:

Si bien la mejora obtenida no es tan significativa como en el apartado anterior se decide mantener este cambio ya que el nuevo diseño supone un montaje más cómodo y rápido a la par que la fabricación de las piezas es más barata, rápida y sencilla.

5. CONCLUSIONES

La impresora Prusa I2 posee un diseño sencillo en el que la mayoría de sus componentes son comerciales y pueden adquirirse a bajo coste y con facilidad, lo cual, unido a la cantidad de documentación existente en la web con respecto a su montaje, la han convertido en la impresora RepRap más replicada en todo el mundo. Sin embargo durante la realización de esta fase del proyecto se ha montado y calibrado una impresora de este tipo y se han detectado un gran número de fallos de diseño e inconvenientes que han dificultado poner a punto la impresora.

Algunos de estos inconvenientes han sido:

- Alta sensibilidad al tipo de plástico a utilizar.
- Poca información sobre los parámetros óptimos de extrusión
- Poca rigidez del bastidor
- Errores de fabricación en componentes mecánicos
- Errores de diseño en el sistema de extrusión

Gracias a la realización de ensayos y protocolos de pruebas se han podido aislar las causas de fallo y se han realizado cambios que permiten obtener impresiones con una calidad mayor. Sin embargo, aún son varias las mejoras que se podrían implementar sobre la impresora :rigidizar el bastidor, utilizar sistemas de acoplamiento mejores, reducir las inercias de la máquina, implementar nuevas arquitecturas de funcionamiento (Polar o Scara), diseñar mejores sistemas de ajuste de los rodamientos lineales (mejor guiado), diseñar un nuevo sistema de extrusión y una nueva punta caliente...: Dado que llevar a cabo todas estas mejoras supone modificar prácticamente todos componentes de la impresora actual (bastidor, acoplamientos, patines, extrusor, punta caliente...) se considera conveniente realizar un rediseño completo de la misma, lo que permitirá abordar Todas estas mejoras de manera más sencilla y eficiente.

Por último se puede afirmar que este tipo de impresoras están destinadas a dos tipos de usuarios:

- Particulares que no requieren una precisión tan alta como la que pueden proporcionar otras impresoras comerciales (como la Hewlett-Packard) y prefieren desembolsar una cantidad inferior de dinero para amortizar antes su inversión.
- Grupos de investigación de carácter mecatrónico o de fabricación que necesitan controlar todos los parámetros del proceso de prototipado, desde la laminación hasta la extrusión, para optimizar dichos procesos en todos sus aspectos (acabado, resistencia mecánica, tolerancias dimensionales...)

En base a esto se comenzará una nueva fase del proyecto en la que se diseñará, fabricará, montará y calibrará una nueva impresora 3D denominada “Impresora MUIM”.

2º FASE

IMPRESORA MUIM

6. MEJORA DE LA IMPRESORA

6.1. Objetivo

El objetivo de esta segunda fase del proyecto es diseñar una impresora 3D (denominada impresora MUIIM) que consiga paliar los defectos encontrados en la Prusa I2 a la vez que aporte algún punto de innovación que permita en el futuro continuar con líneas de investigación relativas a las impresoras 3D.

En base a esto se plantearon varias alternativas para el diseño de la impresora.

6.2. Alternativas

En cuanto a la arquitectura de la impresora se barajaron 3 alternativas principalmente:

- Estructura basada en robot SCARA
- Estructura basada en robot CARTESIANO
- Estructura basada en robot POLAR

La primera de ellas fue desestimada porque poseía los siguientes inconvenientes:

- Es un mecanismo abierto por lo que, en comparación con los otros 2, es menos preciso en el posicionamiento.
- No presenta ventajas para realizar ningún tipo de piezas, mientras que las otras dos opciones son óptimas para hacer piezas con caras planas o piezas de revolución

Entre las dos estructuras restantes (Cartesiana y Polar) se ha decidido llevar a cabo un diseño que aborde las dos, de tal modo que la misma máquina pueda imprimir en ambos sistemas de coordenadas. Para conseguir esto existen varias posibilidades teniendo en cuenta que es posible trasladar la mesa o el extrusor en los diferentes ejes:

<i>Opción</i>	<i>Mesa</i>	<i>Extrusor</i>
1	Movimiento en X-Y-Z-Theta	Fijo
2	Fija	Movimiento en X-Y-Z-Theta
3	Movimiento en X-Y-Z	Movimiento en Theta
4	Movimiento en Theta	Movimiento en X-Y-Z
5	Movimiento en X-Y	Movimiento en Theta-Z
6	Movimiento en Theta-Z	Movimiento en X-Y
7	Movimiento en X	Movimiento en Theta-Z-Y
8	Movimiento en Theta-Z-Y	Movimiento en X

A continuación se comentan las ventajas e inconvenientes de cada una de las opciones:

- 1 y 2 son extremadamente complejas mecánicamente en comparación con el resto ya que todos los movimientos los realiza una de las partes.
- 3, 5 y 7 no son soluciones válidas para el sistema de coordenadas polar ya que el giro del extrusor sobre sí mismo no conlleva trazar la coordenada theta.
- 4 es una opción válida para ambos sistemas, aunque supone la elevación de todas los ejes X e Y además del extrusor, lo que conlleva que los motores necesarios para el eje Z deberán ser recalculados.
- 6 es la opción óptima, ya que permite fijar los ejes X e Y al bastidor de la máquina y carga el eje Z únicamente con el peso de los mecanismos necesarios para hacer girar la mesa.

- 8 es una opción viable para dar solución a ambos sistemas de coordenadas siempre que se utilice el eje X como la coordenada radial del sistema polar, pero implica montar el eje Y sobre el Z, lo que supone mayores esfuerzos para el motor encargado de mover dicho eje.

En base a esto el diseño a realizar tendrá los siguientes requerimientos y deseos:

<i>Descripción</i>	<i>Requerimiento Deseo</i>
Capacidad para trabajar en coordenadas polares (R-theta-Z)	Requerimiento
Capacidad para trabajar en coordenadas cartesianas (X-Y-Z)	Requerimiento
Fijar motores y mecanismos de traslación de los ejes X-Y-Z al bastidor	Requerimiento
Movimiento en X e Y realizado por el extrusor	Requerimiento
Movimiento en Z y Theta realizado por la mesa de extrusión	Requerimiento
Reducir la inercia las partes en movimiento para poder alcanzar mayores velocidades de impresión	Deseo
Número de piezas reducido (en comparación con la Prusa I2)	Deseo
Fácil montaje y calibración (en comparación con la Prusa I2)	Deseo
Alta rigidez (en comparación con la Prusa I2)	Deseo
Precio reducido (en comparación con la Prusa I2)	Deseo

6.3. Diseño

Una vez seleccionada la alternativa a desarrollar se procedió a realizar el diseño mecánico, electrónico y de control de la misma:

6.3.1. MÓDULO MECÁNICO

Bastidor

Los principales problemas encontrados durante el montaje y puesta a punto del módulo mecánico de la Prusa I2 fueron:

- Gran cantidad de piezas
- Difícil calibración de la máquina
- Habitual disminución de la precisión por pérdida de apriete en las tuercas que conforman la estructura de la máquina
- Poca rigidez del bastidor
- Alta sensibilidad a las vibraciones
- Tiempo de montaje elevado
- Máquina difícilmente escalable (espacio de trabajo limitado)

Con el objetivo de paliar estos defectos se diseñó una estructura portante para los diferentes elementos de la impresora a partir de elementos modulares de estantería comerciales.

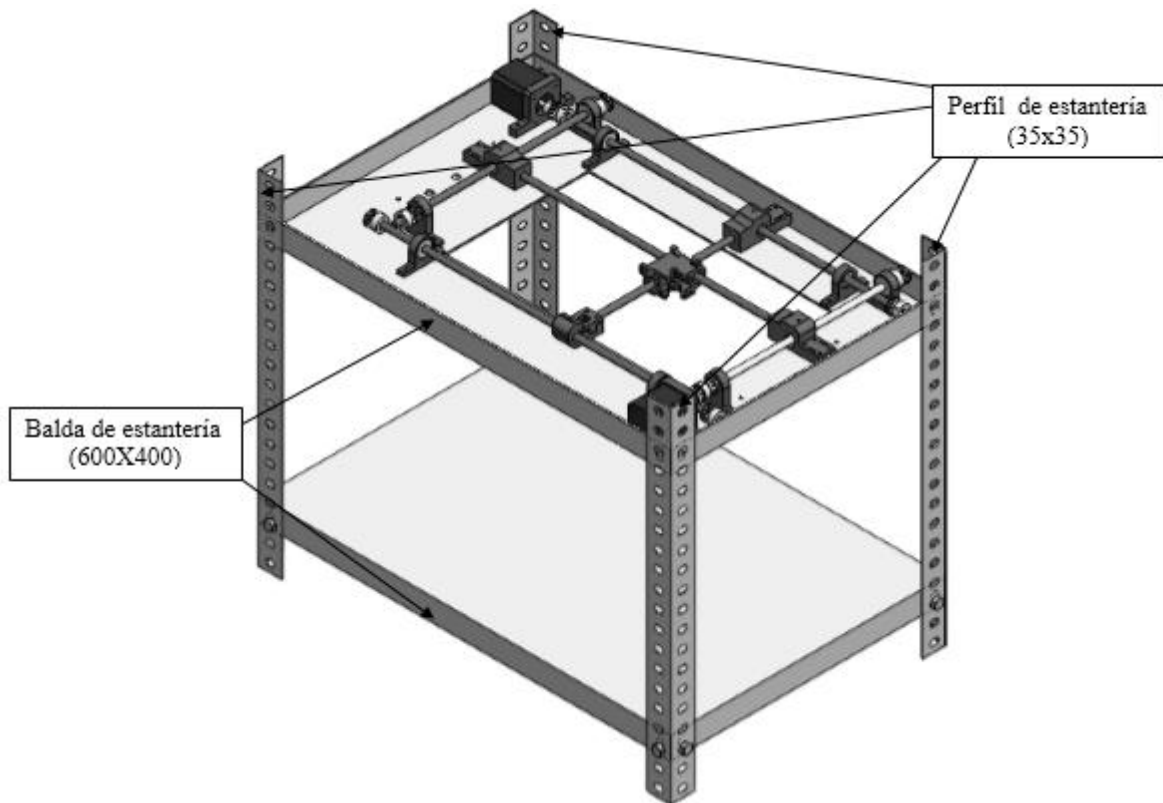


Figura 49: Bastidor de la impresora

Este diseño permite a futuros desarrolladores conseguir impresoras con un espacio de trabajo mayor con facilidad (es fácilmente escalable), a la par que garantiza una estabilidad y resistencia mayores que la anterior por un coste similar.

Adicionalmente cabe destacar que este tipo de bastidor es mucho más sencillo de fabricar, ensamblar y calibrar.

Diseño Eje X e Y (Radio)

Para transmitir el movimiento a través del plano XY es necesario convertir el movimiento giratorio suministrado por los motores en un movimiento lineal. Para ello se propusieron las siguientes alternativas:

<u>Transmisión</u>	<u>Ventajas</u>	<u>Inconvenientes</u>
Mecanismo biela-manivela	Es muy sencillo y su coste sería muy reducido	Tiene poca precisión y ventaja mecánica
Transmisión por rodillos de bolas	Es muy preciso y su montaje sería sencillo	Elevadísimo precio en comparación con el resto de la máquina
Transmisión por correa dentada	Es barato, preciso y sencillo de montar y calibrar	-
Transmisión por varilla roscada y tuerca de métrica estándar (o tuerca trapezoidal)	Es el más barato y sencillo de fabricar y montar.	Las holguras entre los filetes de la tuerca y el tornillo pueden ocasionar pérdidas de precisión en los cambios de sentido.

La tabla anterior deja de manifiesto que la opción más conveniente para conseguir el movimiento en dirección X e Y es mediante poleas y correas dentadas. Adicionalmente, con el objetivo de reducir las inercias de la impresora y de este modo poder alcanzar mayores velocidades de impresión sin afectar a la precisión obtenida se impone que los motores estén anclados al bastidor de la máquina, y no se desplacen a la par que lo hace el cabezal extrusor. Teniendo este criterio en cuenta se ha diseñado el siguiente sistema de guiado para los ejes X e Y mediante rodamientos lineales de recirculación de bolas LM8UU y varilla calibrada de diámetro 8mm:

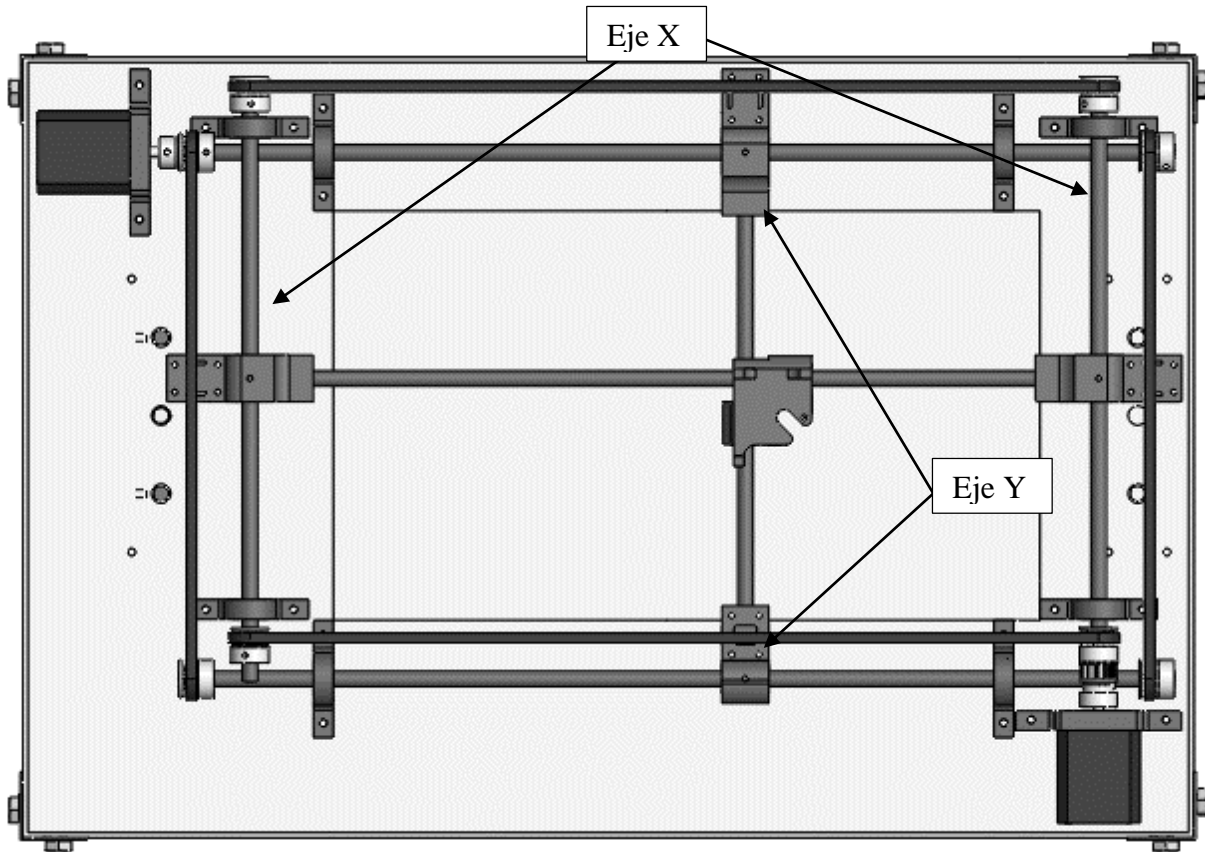


Figura 50: Ejes X e Y

Como puede observarse en la figura anterior el movimiento en cualquiera de los 2 ejes se realiza a través de un motor que mueve 2 patines, uno a cada lado del patín del extrusor. La transmisión de movimiento a estos patines se hace a través de 2 correas dentadas, las cuales se mueven gracias 4 poleas empotradas en las varillas calibradas, que sirven a la vez de guía para los patines y de eje de transmisión de giro para las poleas.

Todas las varillas calibradas están bi-apoyadas sobre rodamientos de bolas sellados (608-ZZ) en posiciones cercanas a sus extremos.

Diseño Eje Z

Al igual que para los otros 2 ejes es necesario transformar el movimiento de los motores en un movimiento lineal, por lo que se consideraron las mismas opciones mencionadas anteriormente. En este caso se optó por realizar el movimiento mediante varilla roscada y tuercas de métrica 8, ya que el principal inconveniente de este tipo de transmisión (las holguras entre los filetes de la tuerca y el tornillo pueden ocasionar pérdidas de precisión en los cambios de sentido) queda solucionada porque en este eje el movimiento se realiza en un único sentido.

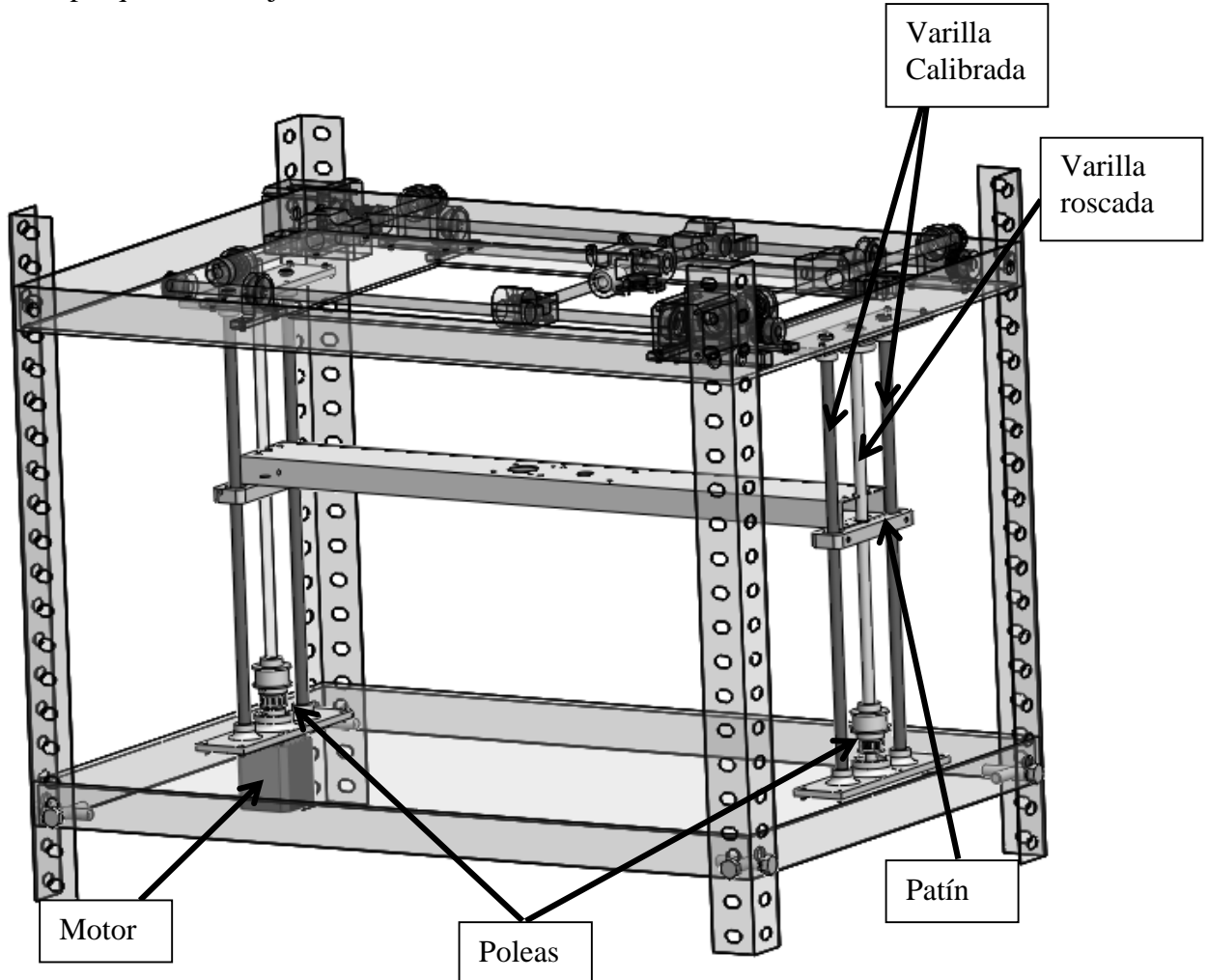


Figura 51: Eje Z

En la figura puede observarse que el movimiento en dirección Z se realiza mediante un único motor, a diferencia de en la Prusa I2, donde eran utilizados dos motores. La transmisión de movimiento entre las dos varillas roscadas se hará mediante una correa dentada, lo que evitará pérdidas de sincronismo como las que podía ocasionar el uso de dos motores.

Por otro lado cabe destacar que el guiado de este eje se realiza a través de 2 patines que se deslizan cada uno de ellos sobre 2 varillas calibradas de diámetro 8mm mediante 2 rodamientos lineales de recirculación de bolas LM8UU. Dichos rodamientos, a diferencia de en la Prusa I2, van unidos a los patines por interferencia y fijados mediante 2 prisioneros de métrica 3.

Diseño Coordenada Theta (giro)

La coordenada Theta necesaria para que la impresora pueda trabajar en coordenadas polares será introducida mediante el giro de la mesa de extrusión, por lo que sobre el eje Z se deberán colocar los mecanismos oportunos para lograr hacer girar dicha mesa. Las alternativas barajadas fueron:

- Colocación del motor en el eje de giro de la mesa y unión de ambas partes mediante un acoplamiento rígido.
- Colocación de un mecanismo que transmita el giro del motor a la mesa: poleas y correa dentada o engranajes.

Se seleccionó la segunda alternativa, y más concretamente las poleas y la correa, por los siguientes motivos:

- Dado que es necesario calentar la mesa de impresión es conveniente tener el eje de giro de la misma libre, para poder guiar los cables por este espacio y evitar la torsión de los mismos.
- Puede conseguirse una desmultiplicación de par y velocidad con este mecanismo, lo que conduce además a un aumento de la resolución de la máquina en esta coordenada.
- En comparación con los engranajes se puede conseguir más precisión, ya que se evita el juego existente entre los dientes en los cambios de dirección (Backlash).

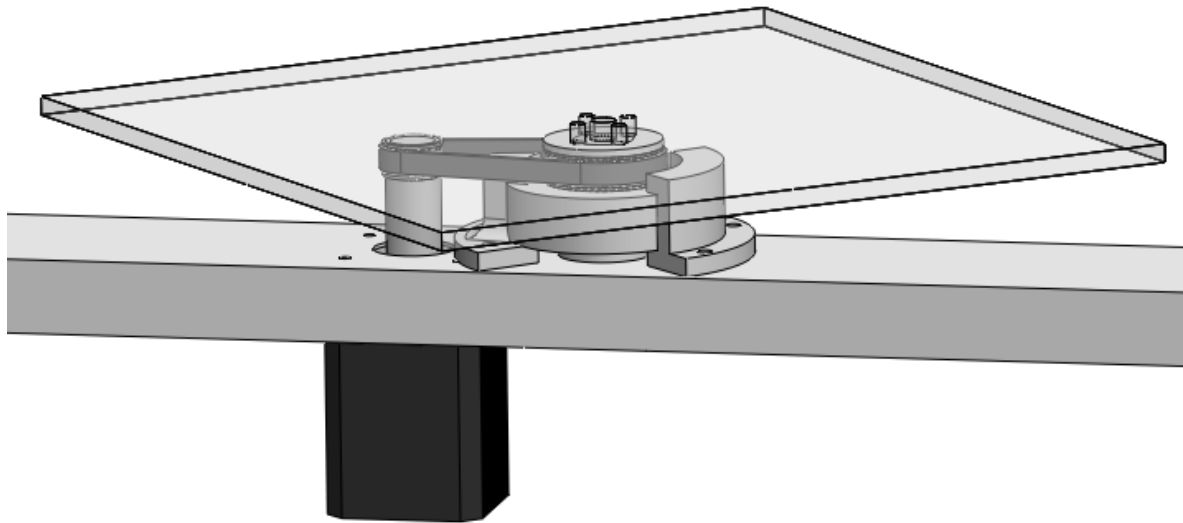


Figura 52: Movimiento Theta

Por último cabe destacar que para evitar la torsión de los cables se ha utilizado una conexión tipo Jack que permite el giro mientras continua transmitiendo potencia.

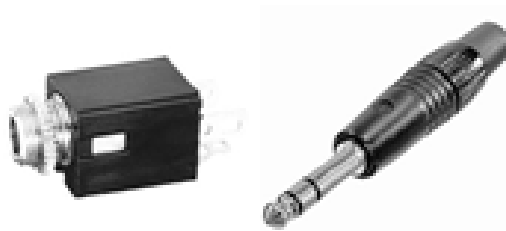


Figura 53: Conectores tipo Jack utilizados

Diseño Extrusor

Con el objetivo de paliar los defectos de arrastre existentes en el extrusor de la Prusa I2 se ha diseñado un sistema que permita transmitir el movimiento al ABS por 2 puntos diametralmente opuestos del mismo, y no como ocurre en el extrusor de la Prusa I2, donde el movimiento es transmitido por un contacto puntual con un eje giratorio y en la posición opuesta diametralmente del ABS se encuentra un rodamiento que tiene el giro libre:

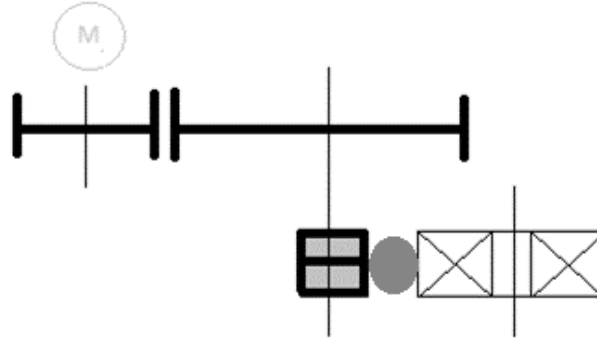


Figura 54: Funcionamiento del extrusor de la Prusa I2

Por otro lado el sistema de extrusión deberá tener algún sistema que permita regular la distancia entre los 2 puntos en contacto con el ABS, de tal forma que se pueda regular la presión que se ejerce sobre el plástico, y evitar de este modo deslizamientos.

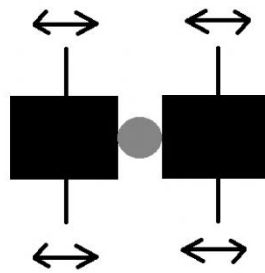


Figura 55: Objetivo de diseño para el nuevo extrusor

Con el objetivo de cumplir ambos requerimientos se plantearon las siguientes alternativas:

1. Tornillos Sin Fin-Corona

Esta alternativa se basa en transmitir el giro del motor de a otro eje paralelo con una relación de transmisión 1:1 y sobre ambos ejes montar un mecanismo de tornillo sin fin que transmita el movimiento a 2 coronas que tienen el desplazamiento axial con respecto a los ejes anteriores permitido y portan 2 ruedas moleteadas que transmitirán el movimiento al plástico:

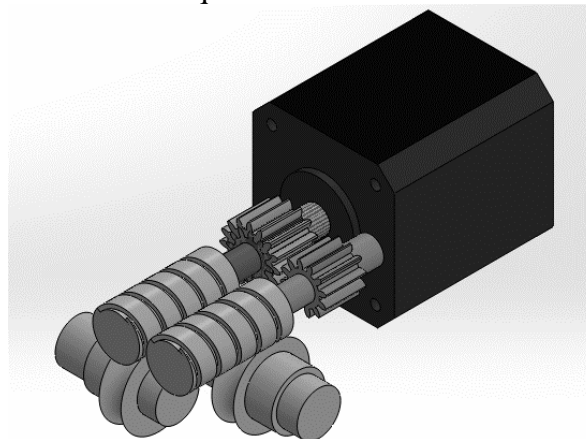


Figura 56: Extrusor a partir de sistemas de tornillo sin fin

2. Engranajes Pivotantes

Esta alternativa se basa en transmitir el giro del motor a otro eje mediante 2 engranajes con relación de transmisión 1:1 y sobre el eje de estos engranajes hacer pivotar otros 2 engranajes que porten un sistema de impulsión de plástico, como ruedas moleteadas:

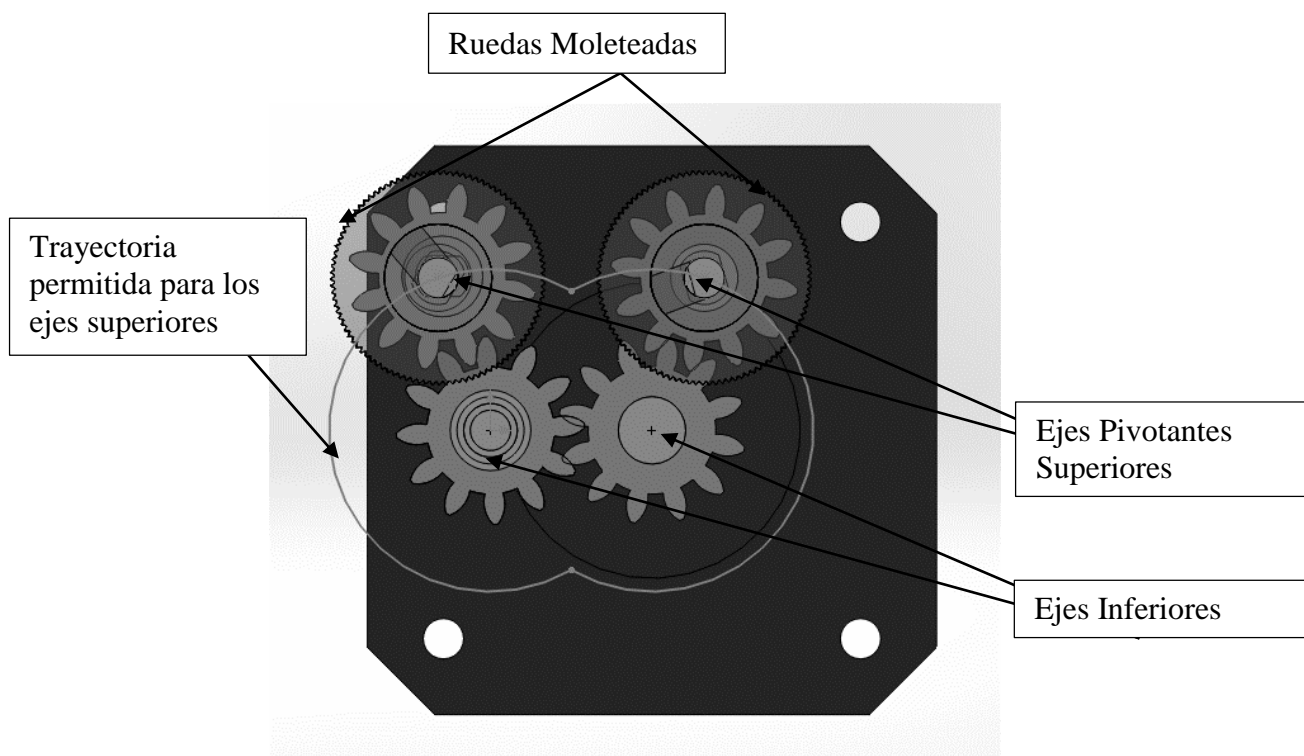


Figura 57: Extrusor a partir de engranajes pivotantes

Los dos ejes de los engranajes inferiores de la imagen anterior tienen impedidos todos los movimientos a excepción del giro, mientras que los ejes de los engranajes superiores deben poder desplazarse a través de los arcos que pueden verse en la figura.

En la siguiente tabla pueden verse resumidas las ventajas e inconvenientes de utilizar cada uno de los sistemas:

<i>Alternativa</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Tornillos Sin Fin-Corona	Muy compacto y con aumento de par muy alto gracias al tipo de transmisión.	Muy caro en relación al resto de la máquina. Necesidad de un motor que permita girar a muy altas rpm para conseguir velocidades de impresión altas.
Engranajes Pivotantes	Sencillo y barato	Es posible que requiera una etapa previa de reducción de velocidad para alcanzar el par necesario para arrastrar el plástico

El sistema seleccionado es el de engranajes pivotantes. A continuación se presentan dos soluciones para esta alternativa:

Versión 01

Con el objetivo de guiar los dos ejes superiores estos se montan sobre 2 que tienen el movimiento impedido sobre dos guías de plástico con la forma adecuada:

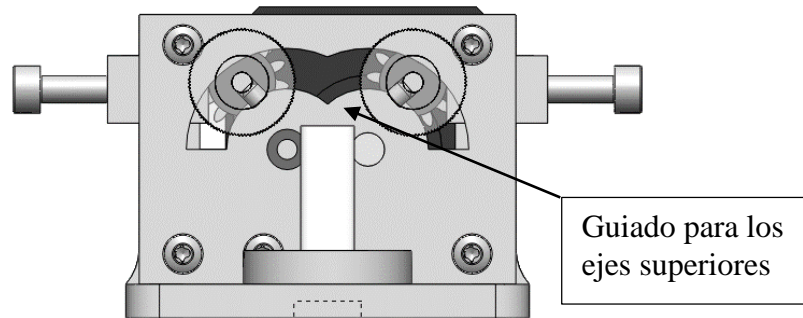


Figura 58: Sistema de guiado del extrusión de engranajes pivotantes (Versión 01)

Posteriormente los engranajes inferiores fueron colocados sobre el eje del motor y un eje fijo a la estructura del extrusor, quedando el extrusor como puede verse en la siguiente figura:

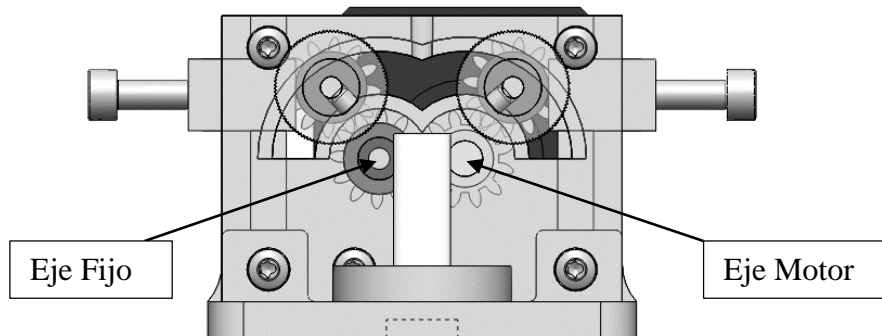


Figura 59: Eje de transmisión y eje fijo del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01)

Finalmente se introdujeron 2 piezas en forma de “U” que regulan la distancia entre los engranajes superiores, permitiendo variar la presión ejercida sobre el plástico ABS al pasar entre las dos ruedas moleteadas:

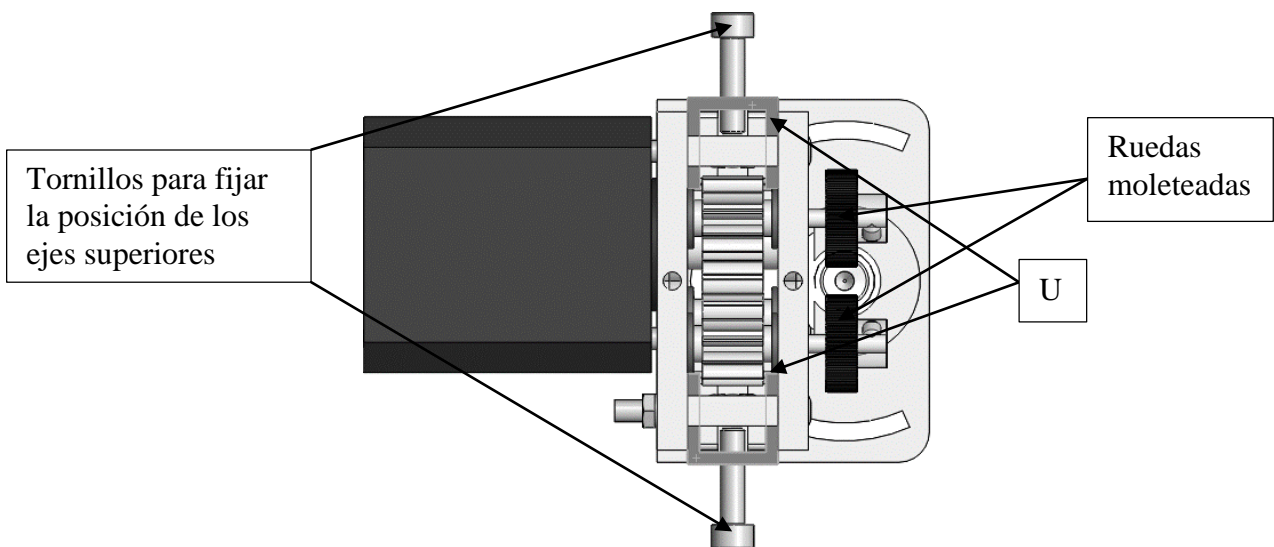


Figura 60: Sistema de regulación de presión del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01)

Como puede verse este sistema es muy compacto y, aunque no dispone de una reductora de velocidad como en el extrusor original, la tracción por ambas caras del plástico debería hacer que la extrusión fuera más continua y que el plástico no patinara sobre las ruedas moleteadas.

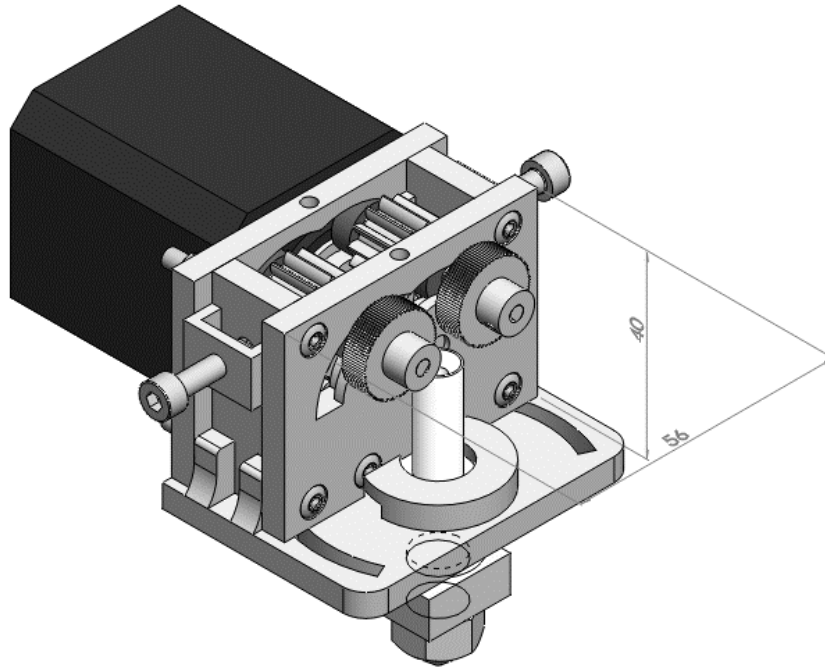


Figura 61: Extrusor de engranajes pivotantes (Versión 01)

Versión 02

En esta versión se ha optado por restringir el movimiento de los ejes superiores mediante 2 piezas que pivoten sobre los ejes inferiores y abracen el conjunto engranaje-rueda moleteada.

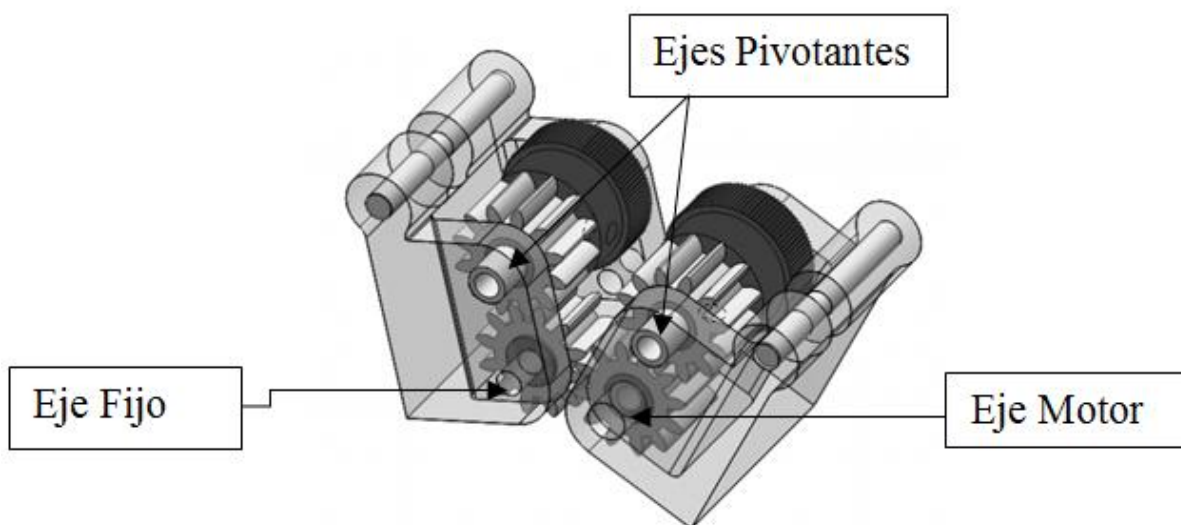


Figura 62: Ejes fijos y móviles del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02)

El mecanismo de regulación de la fuerza aplicada sobre el plástico está diseñado para realizarse mediante 2 eslabones que en uno de sus extremos están unidos a los soportes de los engranajes y en el otro a una pieza roscada que tiene impedido el giro y el movimiento horizontal, mientras que el vertical está regulado mediante un tornillo. En la siguiente imagen puede observarse el funcionamiento de este mecanismo:

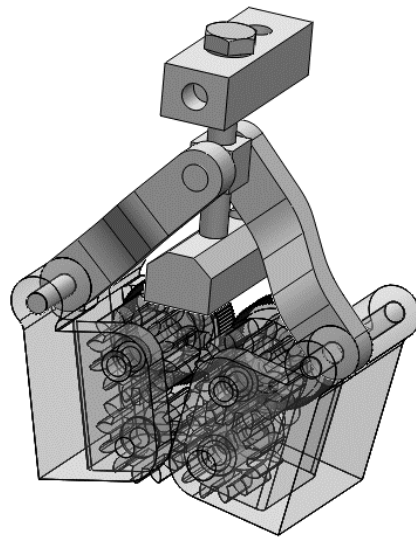


Figura 63: Sistema de regulación de presión del extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02)

Por último se colocaron 2 piezas en los extremos de los mecanismos antes mencionados con el objetivo de servir de soporte para los mismos, a la vez que fijan el motor y una reducción 1:16 en dos etapas.

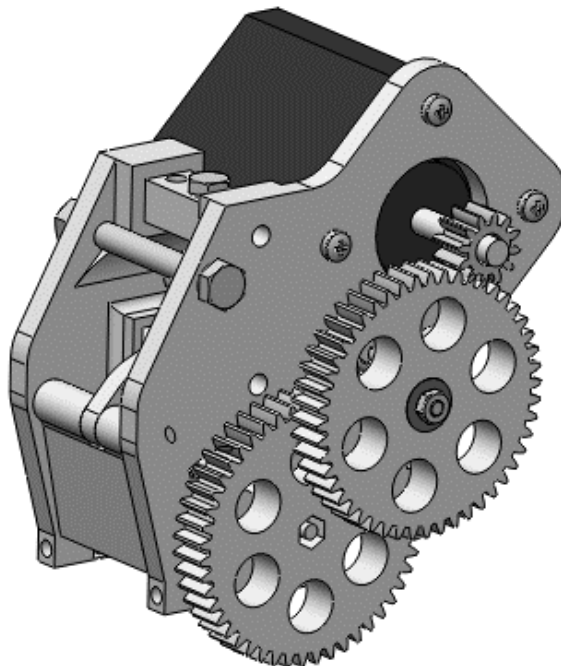


Figura 64: Extrusor de engranajes pivotantes (Versión 02)

Versión seleccionada

Con el objetivo de evaluar cuál de las dos opciones era la más apropiada se fabricó un prototipo de cada una de ellas:

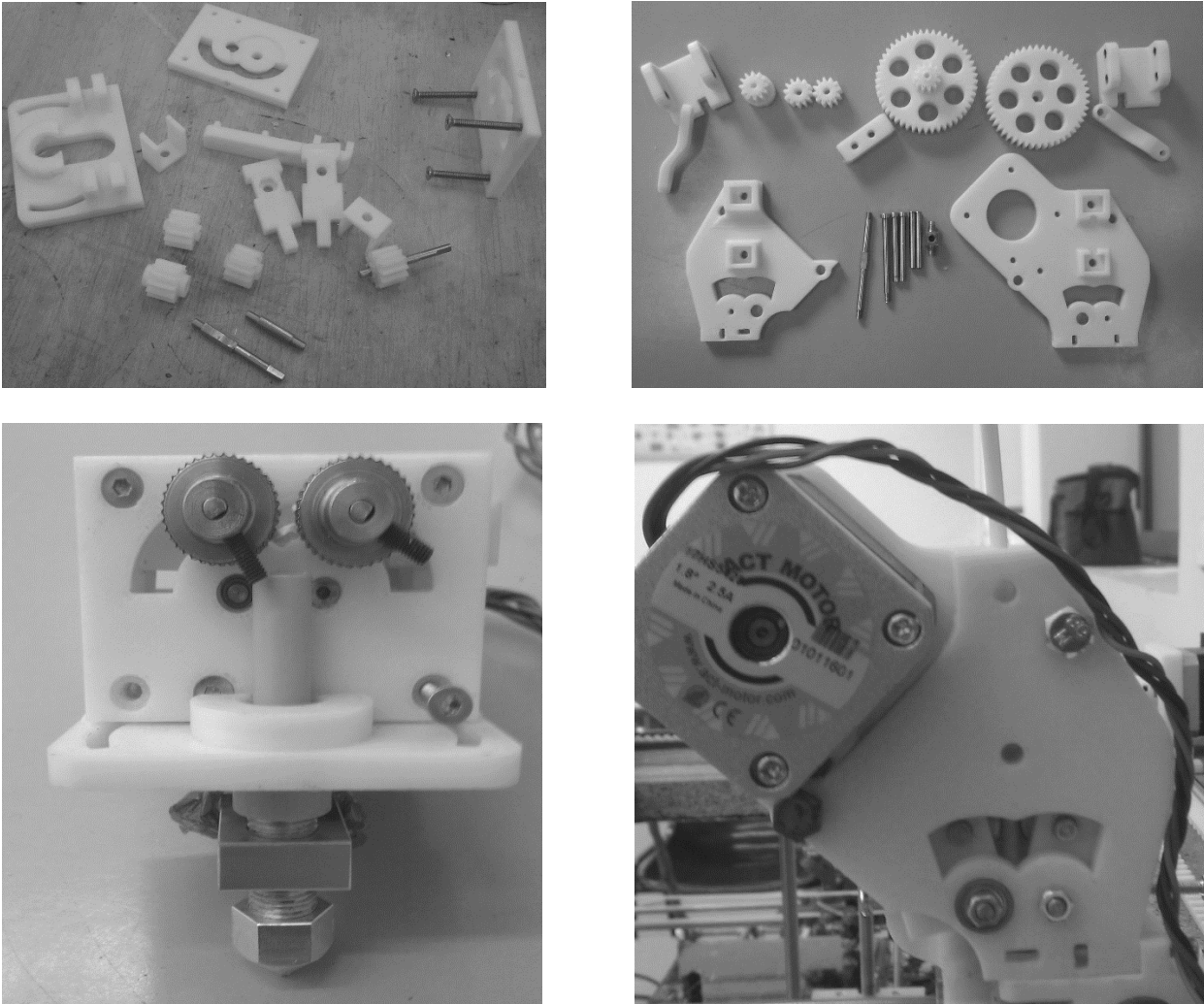


Figura 65: Piezas prototípicas de ambos extrusores y apariencia final tras su ensamblaje.

Tras llevar a cabo ambas versiones se comprobó que en la primera de ellas era muy difícil garantizar que los engranajes superiores permanecieran paralelos, produciéndose un acuña miento entre ellos y los engranajes inferiores ocasionado por la reacción existente en las ruedas maleteadas. Esta desviación conlleva la necesidad de un mayor par para mover los engranajes, ya que el engrane no es perfecto y el rozamiento entre los dientes es sensiblemente mayor, a lo que hay que sumar que el desgaste de los mismos se producirá de forma más rápida y desigual.

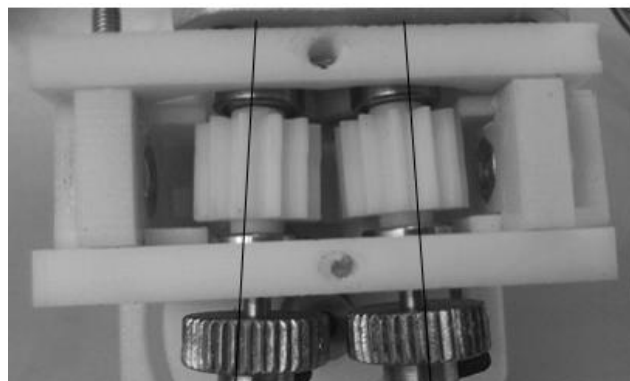


Figura 66: Problema de alineamiento en la versión 01

Sin embargo el guiado y tensado propuesto en la Versión 02 ha proporcionado muy buenos resultados, a lo que hay que sumar que el aumento de par llevado a cabo por las 2 etapas de reducción consigue que sobre el plástico se pueda ejercer una elevada y constante fuerza de impulsión hacia el interior de la punta caliente.

Por ello la alternativa seleccionada ha sido la Versión 02.

Diseño Punta Caliente

Como se indicó en la primera fase de este Trabajo Fin de Máster el Hot End o Punta Caliente poseía 3 defectos fundamentales:

1. No es posible desmontarlo para analizar fallos en su interior.
2. No es posible cambiar el diámetro de la boquilla de extrusión.
3. Falta de guiado del plástico en la parte superior.

Con el objetivo de mejorar el Hot End anterior se diseñó uno partiendo de los planos liberados del Hot End Budaschnozzle [2]:

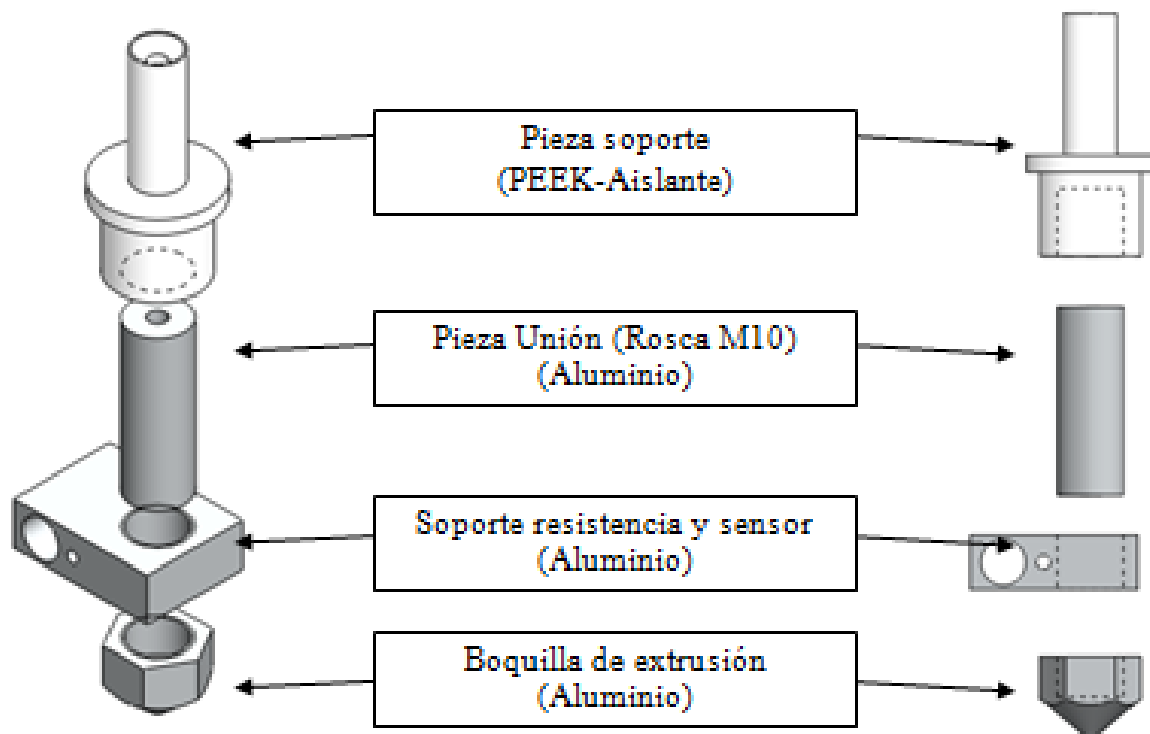


Figura 67: Despiece del Hot End diseñado

Como puede observarse el nuevo Hot End está compuesto únicamente por 4 piezas, las cuales son fácilmente desmontables para su mantenimiento. La pieza superior dispone de un chaflán para guiar al ABS hacia el interior del Hot End con facilidad.

6.3.2. MÓDULO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL IMPRESORA

La electrónica y el software utilizados para esta impresora serán los mismos que los empleados por la Prusa I2 y muchas otras impresoras del grupo REPRAP. A continuación se enumera el Hardware y Software que será utilizado:

Hardware:

- RAMPS v1.4
- Stepsticks A4988 y disipadores
- Arduino Mega 2560
- Fuente de alimentación 12 v y 5 A.
- 5 Motores paso a paso Nema 17
- 3 Finales de carrera
- 1 Base caliente (Hot end)
- 1 Resistencia de 5 ohm
- 1 Sensor de temperatura 100K para extrusor
- 1 Sensor de temperatura 200K para base caliente

Software:

- Arduino 1.1
- Sprinter Super-estable
- Pronterface
- Cura

A continuación se detallan los cambios a tener en cuenta para adaptar este hardware y software a nuestro prototipo:

Cableado

El cableado se realizará igual que en la Prusa I2, pero con la excepción de que en el caso de trabajar en coordenadas polares el motor encargado de transmitir el giro a la mesa de impresión se colocará sustituyendo al motor del eje Y (Ver Anexo 4. Cableado Impresora MUIM)

Una vez cableada la electrónica y cargado el Sprinter en la RAMPs mediante el Arduino 1.1 nos dirigimos al archivo Configuration.h donde se deberán modificar los siguientes parámetros:

Configuración

Tipo de RAMPs utilizada

Es necesario cambiar al valor de la variable MOTHERBOARD y asignarle el valor 33 que correspondiente al tipo de RAMPs que se va a utilizar

```
// MEGA/RAMPS up to 1.2 = 3,  
// RAMPS 1.3, 1.4 = 33  
// Gen6 = 5,  
// Sanguinololu up to 1.1 = 6  
// Sanguinololu 1.2 and above = 62  
// Teensylu (at90usb) = 8  
// Gen 3 Plus = 21  
// gen 3 Monolithic Electronics = 22  
// Gen3 PLUS for TechZone Gen3 Remix Motherboard = 23  
#define MOTHERBOARD 33
```

Sensores de temperatura

Para la adquisición de la temperatura se utilizarán 2 sensores: 100k Honeywell y 200k. Las variables THERMISTORHEATHER Y THERMISTORBOD tomarán los valores 7 y 2 respectivamente. De este modo queda definida la relación entre la señal adquirida por el sensor y la temperatura real.

```

//// Thermistor settings:
// 1 is 100k thermistor
// 2 is 200k thermistor
// 3 is mendel-parts thermistor
// 4 is 10k thermistor
// 5 is ParCan supplied 104GT-2 100K
// 6 is EPCOS 100k
// 7 is 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-J01
#define THERMISTORHEATER 7
#define THERMISTORBOD 2
    
```

Control PID

Dado que la resistencia y el sensor utilizados son los mismos que en el caso anterior se suponen como correctos los valores de las constantes del controlador calculadas anteriormente:

```

#ifndef PIDTEMP
#define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 80
#define PID_PGAIN 2560
#define PID_IGAIN 64
#define PID_DGAIN 4096
    
```

Motores paso a paso

Al igual que durante el montaje de la Prusa I2 se debe configurar el número de pasos que es necesario enviarle a los Stepstick A4988 para avanzar un milímetro en los diferentes ejes. Las ecuaciones serán las mismas que las utilizadas en la Prusa I2, siendo el resultado de estas:

$$Pasos_{mm-XY} = \frac{Pr}{n \cdot e \cdot s} = \frac{200}{12 \cdot 5 \cdot \frac{1}{16}} = 53.33 \text{ pasos/mm}$$

$$Pasos_{mm-z} = \frac{Pr}{a \cdot s} = \frac{200}{1.25 \cdot \frac{1}{16}} = 2560 \text{ pasos/mm}$$

$$Pasos_{mm-e} = \frac{Pr}{i \cdot d \cdot \pi \cdot s} = \frac{200}{\frac{1}{16} \cdot 15 \cdot \pi \cdot \frac{1}{16}} = 1086.5 \text{ pasos/mm}$$

$$Pasos_{Theta} = \frac{Pr}{i \cdot s} = \frac{200}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{16}} \cdot \frac{1 \text{ Rev}}{360 \text{ grados}} = 17.77 \text{ pasos/grado}$$

Una vez realizados los cálculos se han introducido los valores en el Sprinter, con lo que la configuración estaría terminada.

6.3.3. MÓDULO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL IMPRESORA POLAR

Aunque todas las anotaciones del apartado 6.3.2 son válidas para la Impresora Polar aún es necesario realizar una modificación adicional sobre el software de la impresora para conseguir imprimir mediante 2 translaciones lineales y un giro, y no sobre 3 translaciones lineales. Para conseguir esto se barajaron las siguientes opciones:

1. Modificar el Sprinter para incluir ordenes especiales tipo arco creadas en el software de laminado (lo cual supone modificar también el software de laminado)
2. Modificar el archivo G-CODE para convertir una de las coordenadas enviadas al Sprinter en la componente circunferencial (lo cual supone no modificar ni el Sprinter ni el software de laminado)

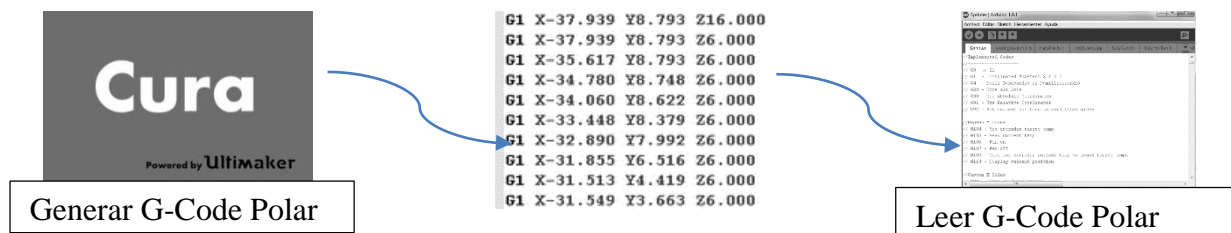


Figura 68: Primera Opción → modificación de los software de laminado y lectura de archivos G-Code

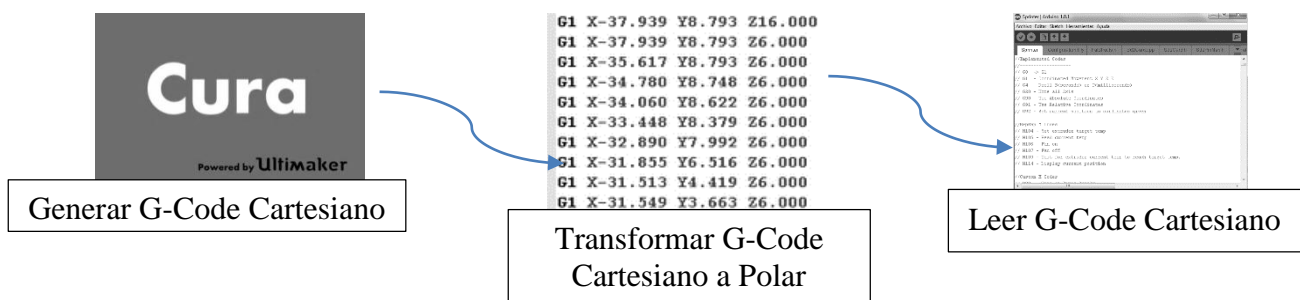


Figura 69: Segunda Opción → modificación del archivo G-Code

Se ha seleccionado la segunda opción ya que permite imprimir en coordenadas polares sin modificar los software de laminado ni de impresión, simplemente actuando sobre el mensaje (G-CODE) que se transmite entre ellos.

Modificación del archivo G-CODE

El archivo G-CODE está compuesto por una serie de ordenes en código G que se encargan de ejecutar instrucciones sobre las diferentes partes de la impresora. Este archivo será generado mediante el software CURA, seleccionando la opción de laminado de capas exteriores tipo Joris y espesor de pared de 300mm (superior al espesor de cualquier pieza imprimible). Esto nos permite generar trayectorias paralelas al perfil exterior del archivo STL con centro en el origen de coordenadas del sistema polar, lo cual se considera la forma óptima de imprimir en coordenadas polares. Si no se utilizan estos parámetros de configuración CURA realizará el laminado con la intención de que sea trazado por una impresora cartesiana, por lo que la parte interna de las piezas estará compuesta por trazos rectos difícilmente realizables por una impresora polar.

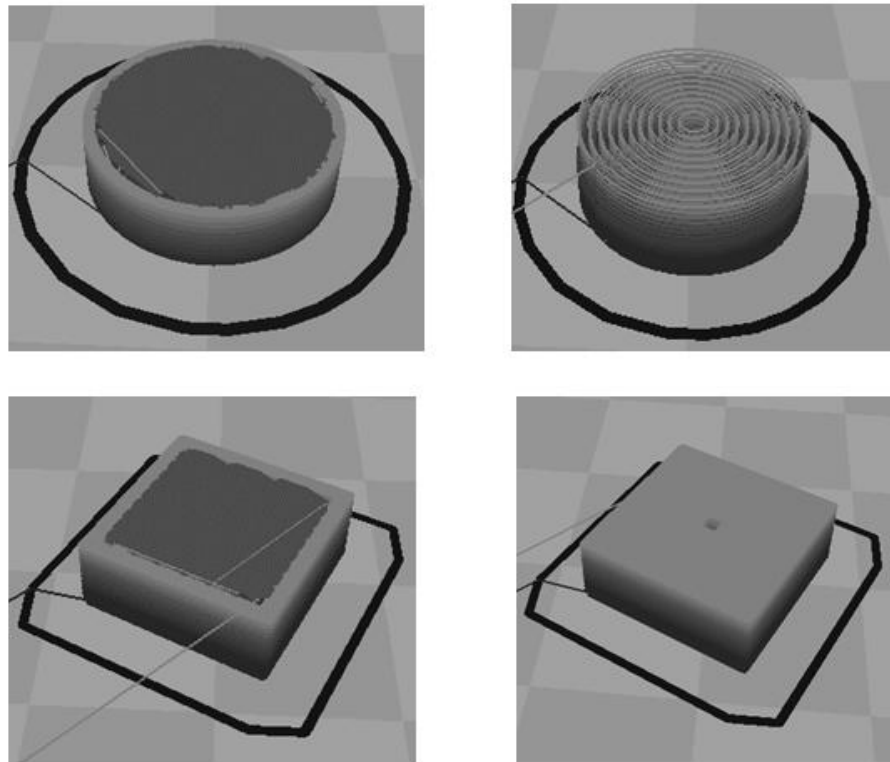


Figura 70: Izquierda → Piezas laminadas sin configuración tipo Joris y espesor de pared 300mm / Derecha → Piezas impresas con configuración tipo Joris y espesor de pared 300mm

La generación del G-CODE a través de CURA posee 2 inconvenientes asociados a que el software está diseñado para trabajar en coordenadas cartesianas:

1. El número de puntos definidos por CURA para trazar una circunferencia es elevadísimo, ya que cuanto mayor sea dicho número mayor será la aproximación del sólido poligonal creado por la impresora cartesiana a la circunferencia. Sin embargo, esto en coordenadas polares podría ser definido por 2 puntos: inicial y final.
2. CURA solo necesita 2 puntos para trazar una recta entre ambos, mientras que en coordenadas polares esto solo ocurre si la recta pasa por el origen de coordenadas del sistema, mientras que en el resto de los casos la recta se realizará mediante la aproximación de tantos arcos como sea posible.

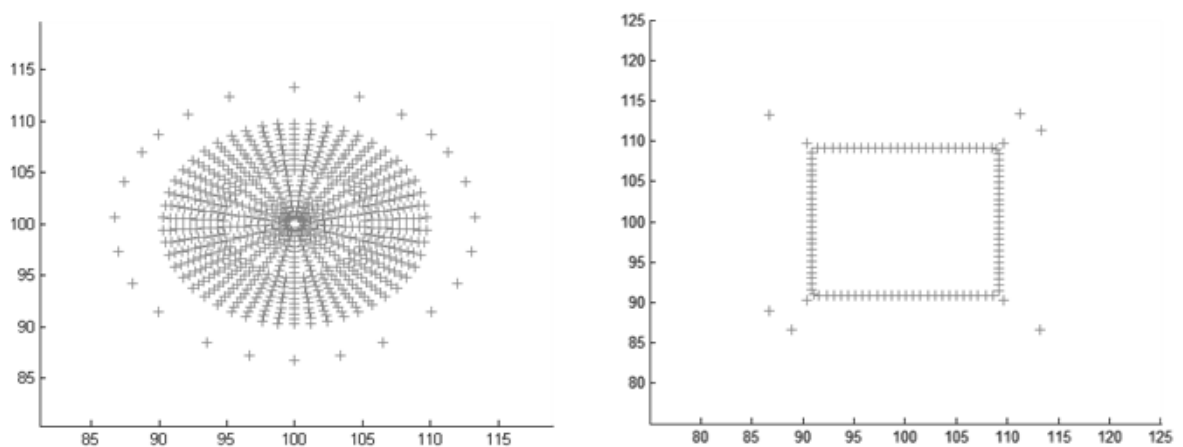


Figura 71: Puntos generados por Cura para imprimir un cilindro y un cubo

Para solucionar este problema es importante detectar durante el procesamiento del archivo G-CODE que cantidad de puntos es necesario definir en coordenadas polares para trazar una trayectoria definida originalmente para coordenadas cartesianas. Esto se ha realizado teniendo en cuenta que si no existe variación de radio o de ángulo entre varias coordenadas de destino consecutivas del archivo G-CODE se puede suponer que se está trazando una circunferencia o una línea radial, por lo que será suficiente indicar el punto inicial y final de dicha trayectoria. Por otro lado se ha tenido en cuenta el caso contrario: ante una variación de ángulo y radio entre 2 puntos (que definen una recta entre ellos) se ha calculado el número de puntos a introducir entre ambos con el objetivo de trazar el mayor número de arcos posible para aproximarse a la recta que se debería trazar idealmente.

Con el objetivo de implementar lo indicado hasta el momento se ha realizado una aplicación en MATLAB que realiza las siguientes funciones:

1. Pide al usuario que seleccione un archivo con extensión .gcode
2. Abre dicho archivo y guarda en una variable el número de líneas que contiene
3. Posteriormente se recorre el archivo línea a línea de principio a fin y se procesa cada una de las líneas.
 - a. En el caso de que la línea no corresponda a un desplazamiento (líneas distintas a G1) esta se graba sin realizar ninguna modificación en el archivo de salida dado que el resto de configuraciones de la máquina se mantienen constantes para ambos sistemas de coordenadas.
 - b. En el caso de que la línea comience con el comando G1 se extraen los valores de la misma. A continuación se muestra un ejemplo de línea G1:

G1 X100 Y100 Z100 E1,5 F30 → Se extraen los valores de la posición de destino en X, Y y Z así como la velocidad de avance (F) y la cantidad de material a extruir de un punto a otro (E).

Con los valores de la posición de destino se calcula la trayectoria que debe seguir la impresora polar (ángulo y radio) para ajustar al máximo la trayectoria que seguiría la impresora cartesiana (Discretiza una recta definida por dos puntos en coordenadas cartesianas en tantos arcos como sea posible trazar con la impresora polar para garantizar el mayor ajuste posible)

Una vez calculados los valores de ángulo y radio necesarios se genera para cada uno de ellos una línea de código con la misma estructura que la original (G1 X... Y... Z... E... F...). Donde X corresponderá a la coordenada radio e Y a la coordenada theta (será necesario conectar el motor de giro de la mesa a la salida de control del motor Y)

4. Grabar en el archivo de salida las líneas generadas para la impresora polar

En la figura 72 puede verse un diagrama que representa simplificada los pasos llevados a cabo para la programación de este código.

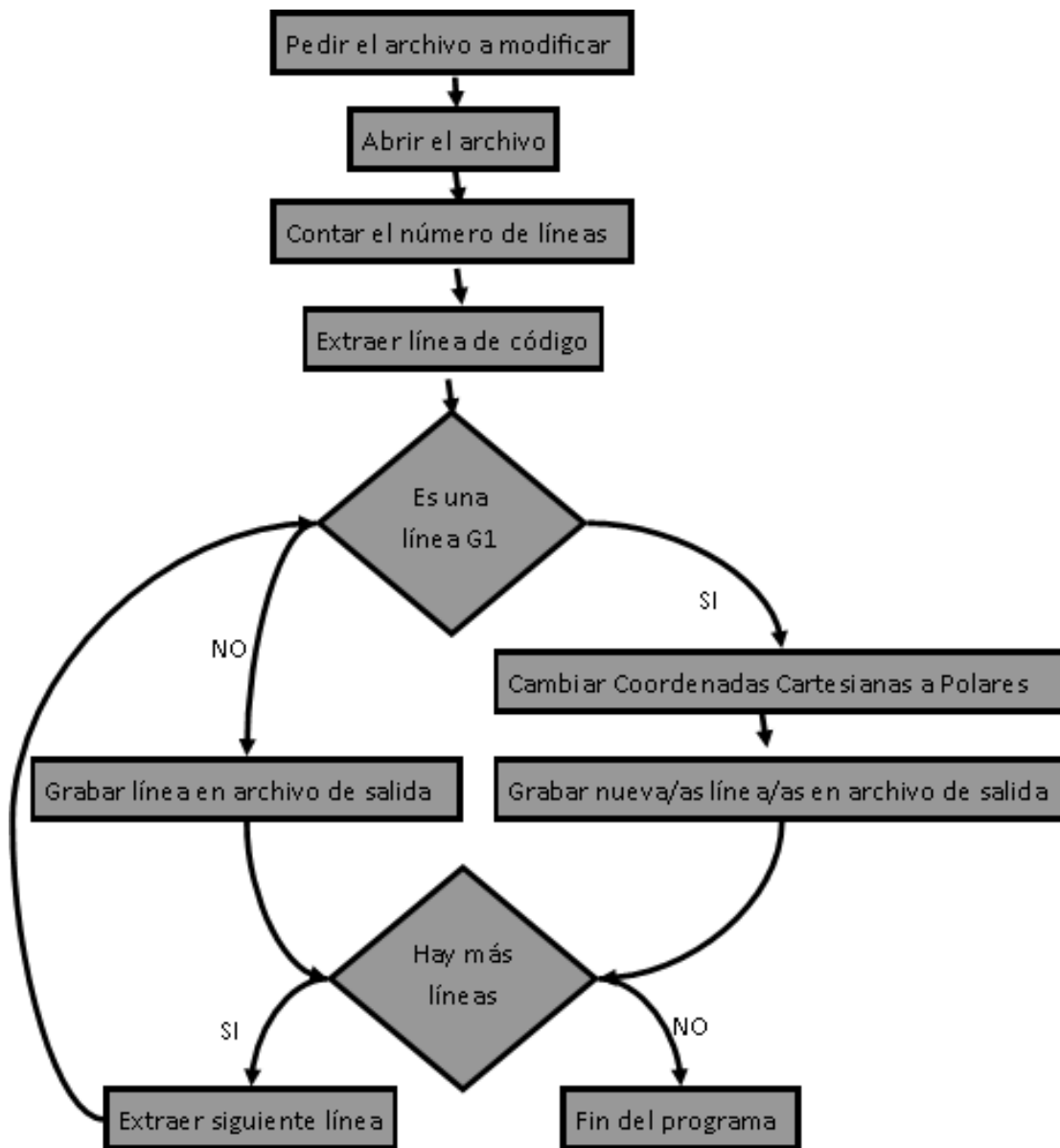


Figura 72: Modificación del archivo G-CODE

La función principal de este programa es la indicada como “Cambiar Coordenadas Cartesianas a Polares”. En ella se realizan las siguientes tareas para ir del punto de partida “A” al de llegada “B”:

1. Trasladar el origen de coordenadas de la impresora cartesiana (extremo de la mesa de impresión) al origen de coordenadas de la impresora polar (centro de la mesa de impresión)
2. Calcular los valores de ángulo y radio del punto actual y del punto de destino.
3. Averiguar cuál es el sentido de giro necesario para llegar a la posición final. Este punto requiere especial atención ya que existen ciertas particularidades que complican la determinación del sentido adecuado.
 - a. $\text{Ángulo de A} > \text{Ángulo de B} \rightarrow$ Sentido de Giro horario
 - b. $\text{Ángulo de B} > \text{Ángulo de A} \rightarrow$ Sentido de Giro antihorario
 - c. Caso particular 1: $\text{Ángulo AB} > \text{Ángulo BA} \rightarrow$ Invertir el sentido de giro calculado anteriormente
 - d. Caso Particular 2: $\text{Ángulo AB} < \text{Ángulo BA} \rightarrow$ No invertir el sentido de giro calculado anteriormente

4. Calcular el número de puntos a insertar entre el punto inicial y final para garantizar la máxima resolución en función del mínimo incremento de ángulo permitido por la máquina.
5. Cálculo de ángulo y radio necesario para alcanzar cada punto de los anteriores.
6. Para cada punto se construye una nueva línea G-CODE con los valores de radio y ángulo calculados y se graba en el archivo de salida.

El código correspondiente a esta programación puede verse en el Anexo 1. Programación en Matlab y en la carpeta denominada “Matlab” adjunta a este documento

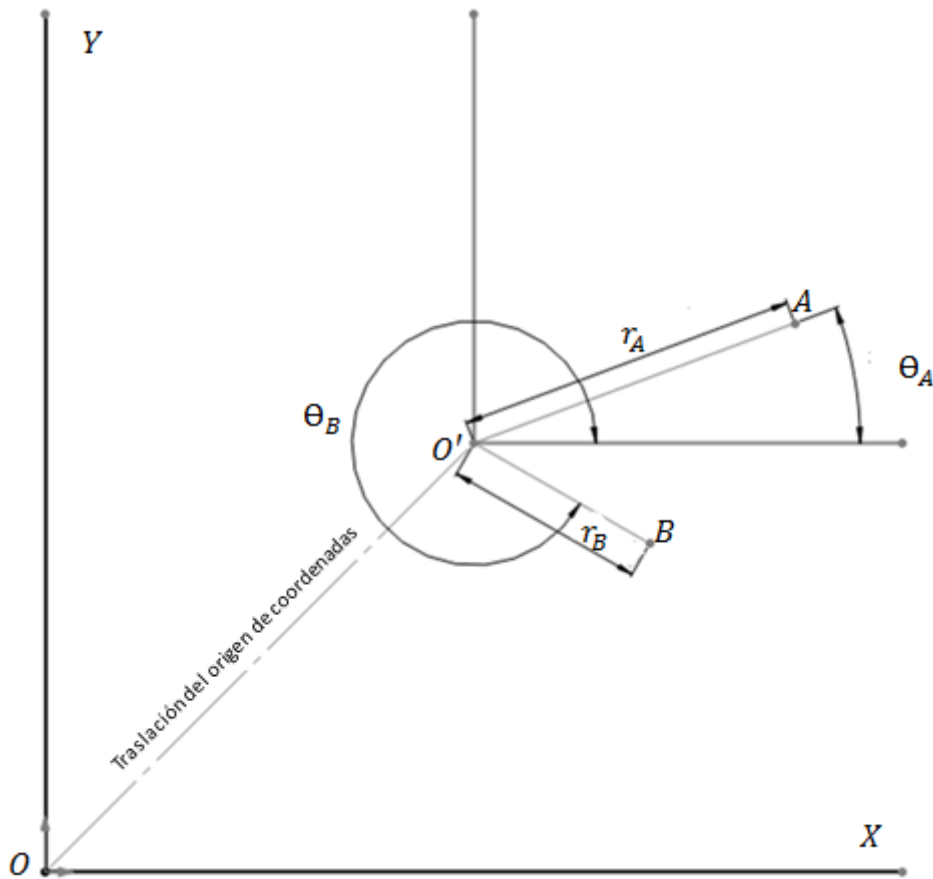


Figura 73: Representación de la translación del origen de coordenadas y las coordenadas polares del punto de origen (A) y de destino (B)

6.4. Fabricación

A continuación se enumeran todos los componentes de la impresora, catalogándolos según su tipo (mecánico o electrónico) y su método de obtención (mecanizado, prototipado, adquisición de piezas comerciales).

6.4.1. MÓDULO MECÁNICO Piezas Comerciales

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo: 610mm	2 unidades
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo 940mm	2 unidades
Correa T2.5 Ancho: 6mm Largo: 180 mm	1 unidad
Rodamientos Lineales LM8UU	10 unidades
Rodamientos de bolas 608ZZ	11 unidades
Tornillos M3 x 10mm	20 unidades
Tornillo M3 x 40mm	20 unidades
Tornillo M4 x 25mm	40 unidades
Tornillos M8x25mm	8 unidades
Prisionero M3 cabeza allen	24 unidades
Tuercas hexagonal M3	44 unidades
Tuercas hexagonal M4	40 unidades

Tuerca hexagonal M8	8 unidades
Arandelas M4	40 unidades
Arandelas M3	40 unidades
Arandela M8	8 unidades
Placa de contrachapado Dimensiones: 220x220x4 mm	1 unidad
Regletas	4 unidades
Pinzas de papelería	4 unidades
Cristal Dimensiones 200x200	1 unidad
Cinta Kaptom	1 unidad
Perfil estantería modular 35X35 mm Largo 500mm	4 unidades
Estante (estantería modular) 400X600 mm	2 unidades
Engranajes módulo 1-12 dientes (RS)	4 unidades
Rodamientos RS 623-ZZ	2 unidades
Casquillos 3x4x5mm	4 unidades

Piezas Mecanizadas

1. Para el bastidor

<u>Denominación de la pieza</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Plano</u>
Unión Patines eje z	1 Unidad	Unión Patines eje z	00.Unión patines eje Z
Patín Eje Z	2 unidades	Patines para deslizar el eje Z	01.Patin Eje Z
Estante Superior	1 Unidad	Preparación de los agujeros para insertar los soportes	02.Estante Superior
Plancha de contrachapado	1 Unidad	Sirve de refuerzo para el estante superior (tiene los mismos agujeros pasantes) y es opcional	03.Plancha contrachapado
Estante Inferior	1 Unidad	Preparación de los agujeros para insertar los soportes	04.Estante Inferior
Varilla roscada M8	2 unidades	Largo 440 mm	--
Varilla Calibrada diámetro 8mm	2 unidades	Largo 510 mm	--
	2 unidades	Largo 310 mm	--
	1 unidad	Largo 390 mm	--
	1 unidad	Largo 220 mm	--
	4 unidades	Largo 440 mm	--

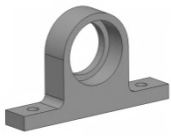
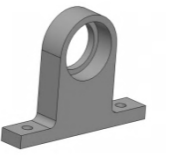
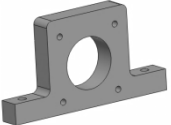
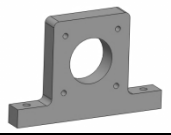
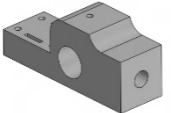
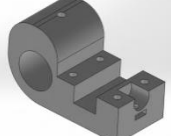
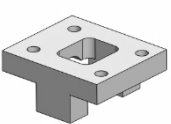


2. Para el extrusor y la punta caliente




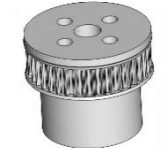
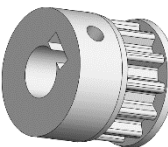



<u>Denominación de la pieza</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Plano</u>
Engranaje Superior	2 unidades	Engranajes solidarios a las ruedas moleteadas	05.Engranaje Superior
Engranaje Inferior	1 unidades	Engranaje inferior	06.Engranaje Inferior
Engranaje Inferior tractor	1 unidades	Engranaje que transmite el movimiento al mecanismo	07.Engranaje Inferior tractor
Eje Inferior	1 Unidad	Eje soporte engranaje inferior	08.Eje Inferior
Eje motriz	1 Unidad	Eje soporte engranaje inferior tractor	09.Eje motriz
Eje superior	2 unidades	Eje soporte conjuntos de tracción	10.Eje superior
Soporte tensores	1 Unidad	Guía para los tensores	11.Soporte tensores
Eje balancines	2 unidades	Eje que soporta los tensores	12.Eje balancines
Rueda Moleteada	2 unidades	Rueda que está en contacto con el plástico	12.Rueda Moleteada
Casquillos 6-3-18	3 unidades	Casquillos para los engranajes	13.Casquillos 6-3-18
Casquillos 6-3-8	1 unidad	Casquillos para los engranajes	14.Casquillos 6-3-8
Casquillos 6-3-13	1 unidad	Casquillos para los engranajes	15.Casquillos 6-3-13
Nozzle	1 unidad	Boquilla de extrusión	16.Nozzle
Heater block	1 unidad	Bloque caliente que contiene la resistencia y el sensor	17.Heater block
Peek isolator	1 unidad	Extensión aislante que permite soportar la punta caliente	18.Peek isolator
Threaded extension	1 unidad	Pieza de unión	19.Threaded extension

NOTA: PARA MÁS INFORMACIÓN CONSULTE LOS PLANOS INDICADOS EN LAS TABLAS ANTERIORES (ver carpeta planos adjunta a este documento)

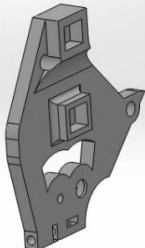
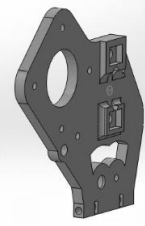
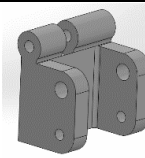
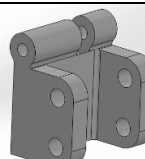

Piezas Impresas

1. Para el bastidor

<u>Denominación</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Imagen</u>
Soporte Rodamiento 608ZZ	4	
Soporte Rodamiento 608ZZ-2	4	
Soporte Motor	1	
Soporte Motor-2	1	
Patín XY	3	
Patín XY-2	1	
Cierre correas	8	
Soporte Guías eje Z	4	
Polea Motor X	1	

Polea Motor Y	1	
Polea Motor Z	1	
Polea Motor Theta	1	
Polea renvío Theta	1	
Polea renvío Z	1	
Polea renvío	6	
Soporte Rodamiento Giro Theta	1	
Soporte Rodamiento Giro Theta-2	1	
Patín Extrusor	1	

2. Para el extrusor y la punta caliente

<u>Denominación</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Imagen</u>
Soporte delantero	1	
Soporte trasero	1	
Soporte engranajes derecho	1	
Soporte engranajes izquierdo	1	
Tensor	2	

Soporte tornillo superior	1	
Soporte tornillo inferior	1	
Juego de engranajes intermedio	1	
Engranaje reducción	1	
Engranaje motor	1	

NOTA: PARA MÁS INFORMACIÓN CONSULTE LA CAPETA (STL) ADJUNTA A ESTE DOCUMENTO, EN ELLA SE ENCUENTRAN LOS ARCHIVOS NECESARIOS PARA REALIZAR ESTAS IMPRESIONES.

6.4.2. MÓDULO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

Piezas Comerciales

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>
Motor paso a paso Nema 17	5 unidades
Regletas	4 unidades
Finales de Carrera (micro switch)	3 unidades
Resistencia de alta potencia (5 ohm)	1 unidad

Sensor de temperatura (100K)	1 unidad
Sensor de temperatura (10K)	1 unidad
Base Caliente (Hot Bed)	1 unidad
RAMPS v1.4	1 unidad
Arduino Mega 25600	1 unidad
Fuente alimentación 12v -5A	1 unidad
Stepstick A4988 y disipador	5 unidades

Software libre

<u>Nombre</u>	<u>Utilidad</u>
Arduino 1.1	Programación Arduino Mega 2560
Sprinter	Control motores, sensores temperatura, comunicación con PC..
Pronterface	Comunicación con Arduino Mega 2560
Cura	Laminado de piezas

6.5. Montaje

Una vez adquiridas todas las piezas comerciales y mecanizadas e impresas todas las piezas no comerciales se procedió al ensamblaje de la impresora. A continuación se resumen los principales pasos de montaje de la impresora:

6.5.1. MÓDULO ELECTRÓNICA Y SOFTWARE

Al igual que el montaje de la Prusa I2 los pasos a seguir para el montaje del módulo de electrónica y software fueron:

1. Fuente de alimentación de PC de 12V a 5A:
 - Cortar el conector de 4 cables (2 amarillos-alimentación y 2 negros-masa) para alimentar la PCB RAMPs 1.4.
 - Puentear el hilo de control (color verde) del conector de 40 pines a masa. Esto es necesario porque si no la fuente no funciona sin estar conectada a un PC.
2. Soldado de cables y conectores a las salidas de los motores, finales de carrera, resistencias de extrusor y base caliente y sensores de temperatura.
3. Conexión de alimentación, motores, resistencias, finales de carrera y sensores de temperatura a la RAMPs 1.4. (ver Anexo 4. Cableado Impresora MUIIM)
4. Calibración de la corriente de los motores paso a paso mediante amperímetro colocado en serie entre la RAMPs v1.4 y la fuente de alimentación.

Montaje de la Punta Caliente (Hot End)

Para el montaje de la punta caliente deben seguirse los siguientes pasos:

1. Ensamblaje de las 4 piezas que componen el extrusor.
2. Colocación de la resistencia y el sensor de temperatura en sus respectivos alojamientos

PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL MODULO ELECTRÓNICO

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes de módulo electrónico: motores, sensores, resistencias, PCBs, software...

Acciones a realizar:

Prueba de software Arduino y hardware Arduino MEGA 2560

1. Descargar Arduino 1.1
2. Ejecutar Arduino 1.1
3. Conectar la placa Arduino MEGA 2560 al PC y a la alimentación.
4. Seleccionar el puerto serie al que está conectada la placa.
 - a. Tools/Serial Port/...
5. Seleccionar la placa Arduino MEGA 2560 dentro de la barra de herramientas:
 - a. Tools/Board/Arduino MEGA 2560
6. Abrir ejemplo para encender un LED:
 - a. File/Examples/1.Basics/Blink
7. Descargar el ejemplo en la placa
8. Ejecutar el archivo
9. Comprobar que la frecuencia con la que parpadea el LED varía si variamos los parámetros del programa de ejemplo.

Prueba de software Arduino, RAMPs y Arduino MEGA 2560

1. Ensamblar Arduino MEGA 2560 y RAMPs 1.3.
2. Seguir los pasos de la prueba anterior a partir del 2.

Prueba de conexión Pronterface-Arduino MEGA 2560

1. Descargar el Sprinter SuperEstable en la placa mediante el entorno Arduino
2. Abrir el Pronterface
3. Seleccionar puerto y velocidad de sincronización y conectarse a la placa.
4. Comprobar que el PC y la placa están conectados. Debe aparecer el mensaje:

```
Connecting...  
ok T:5 B:0  
Printer is now online.
```

5. Abrir un archivo .stl y comprobar que se carga
 - a. File/Open/ y seleccionar el archivo "Cube-20-20-10.stl"

Prueba de comunicación con los motores y los finales de carrera

1. Abrir el Pronterface
2. Conectar PC-Arduino MEGA
3. Mover eje X, eje Y, eje Z, extrusor.
4. Hacer una impresión en vacío para comprobar que los motores pueden funcionar conjuntamente
 - a. Cargar un archivo STL y pulsar PRINT
5. Pausar el movimiento de alguno de los ejes tocando con la mano los finales de carrera para comprobar el funcionamiento de los mismos

Prueba de temperatura del extrusor.

1. Abrir el Pronterface
2. Conectar PC-Arduino MEGA
3. Mandar orden de calentar el extrusor hasta 200°C e ir aumentando la temperatura en intervalos de 5°C hasta alcanzar los 220°C.
4. Comprobar que la temperatura real (tomada con un termopar calibrado) y la adquirida por el sensor es la misma (se acepta un error del 5%).

Prueba de temperatura de la base caliente.

1. Abrir el Pronterface
2. Conectar PC-Arduino MEGA
3. Mandar orden de calentar la base hasta 60°C e ir aumentando la temperatura en intervalos de 5°C hasta alcanzar los 75°C.
4. Comprobar que la temperatura real (tomada con un termopar calibrado) y la adquirida por el sensor es la misma (se acepta un error del 5%).

Resultados:

Prueba	Resultado
Prueba de software Arduino y hardware Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de software Arduino, RAMPs y Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de conexión Pronterface-Arduino MEGA 2560	Satisfactorio
Prueba de comunicación con los motores y los finales de carrera	Satisfactorio
Prueba de temperatura del extrusor.	Satisfactorio
Prueba de temperatura de la base caliente.	Satisfactorio

Conclusiones:

Toda la electrónica de la impresora 3D funciona correctamente.

Acciones a realizar:

Continuar con el montaje de la parte mecánica.

6.5.2. MÓDULO MECÁNICO

Bastidor

El ensamblaje del bastidor es una de las etapas más sencillas del proceso de montaje, ya que tan solo requiere apretar 16 tornillos M8 tal y como se muestra en la figura

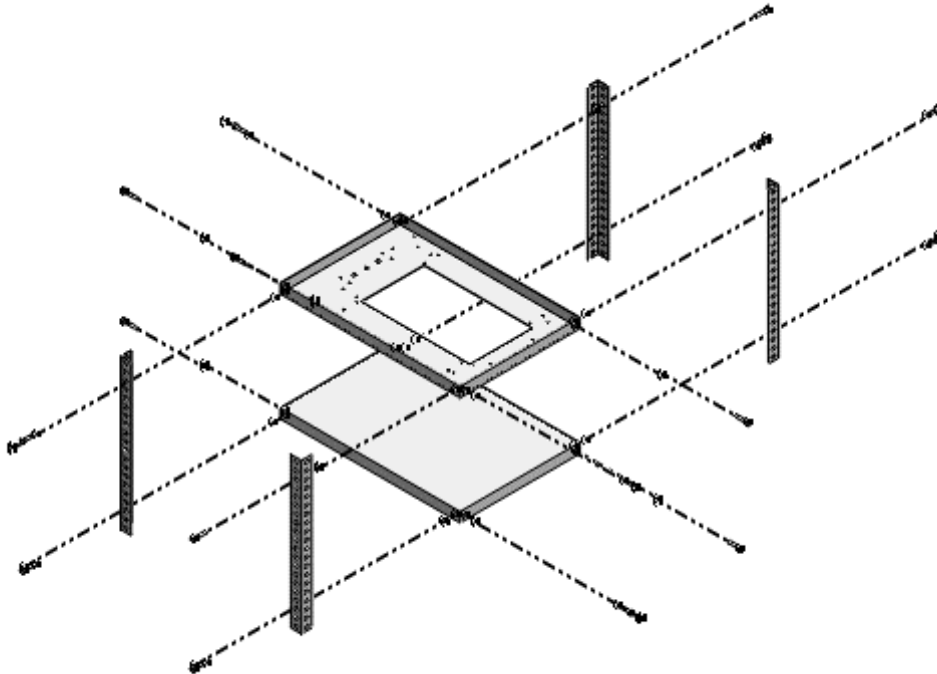


Figura 74: Ensamblaje del bastidor

:

Montaje Eje X e Y (Radio)

Los pasos a seguir para el correcto montaje de los ejes X e Y de la impresora serán:

1. Calado de los rodamientos lineales y de bolas en los “Patines XY”, “Patín XY-2” y “Patín Extrusor” y en los “Soportes Rodamiento 608ZZ” y “Soporte Rodamiento 608ZZ-2”:

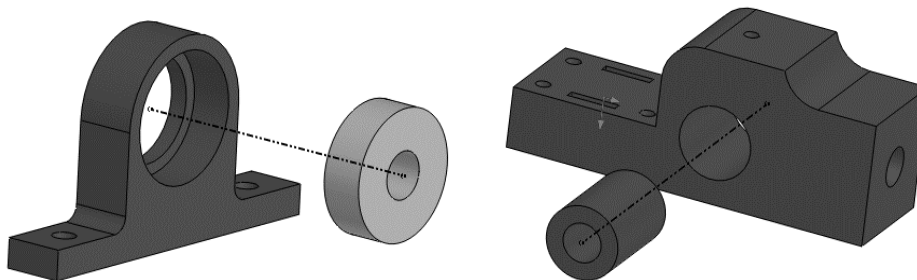


Figura 75: Ensamblaje de los rodamientos

2. Colocación de la plancha de contrachapado sobre el estante superior del bastidor de la impresora (opcional pero muy aconsejable).

3. Fijación de los motores Nema 17 a los soportes “Soporte Motor” y “Soporte Motor-2”
4. Fijación de los estos soportes “Soporte Motor”, “Soporte Motor-2”, “Soportes Rodamiento 608ZZ” y “Soportes Rodamiento 608ZZ-2” al estante superior del bastidor de la impresora mediante tornillos, arandelas y tuercas M4:

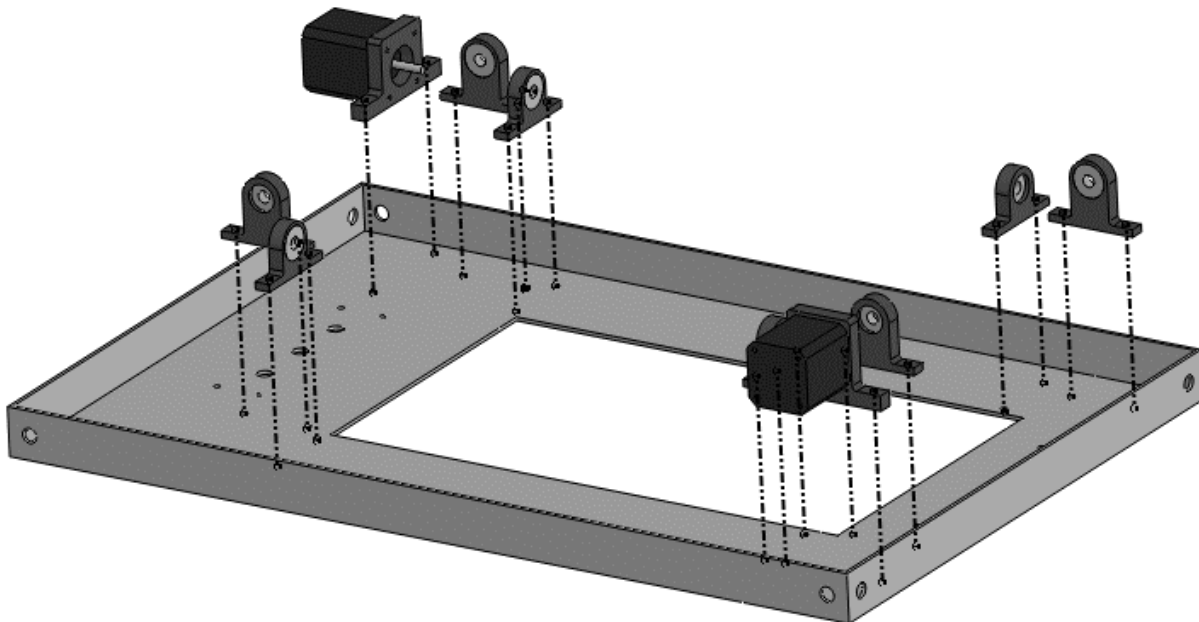


Figura 76: Unión de los motores y los soportes al bastidor

5. Montaje del “Patín Extrusor” sobre las dos varillas calibradas de 390 y 220 mm de largo y colocación en los extremos de estas de los “Patines XY” y del “Patín XY-2”. El conjunto debe quedar como en la siguiente figura:

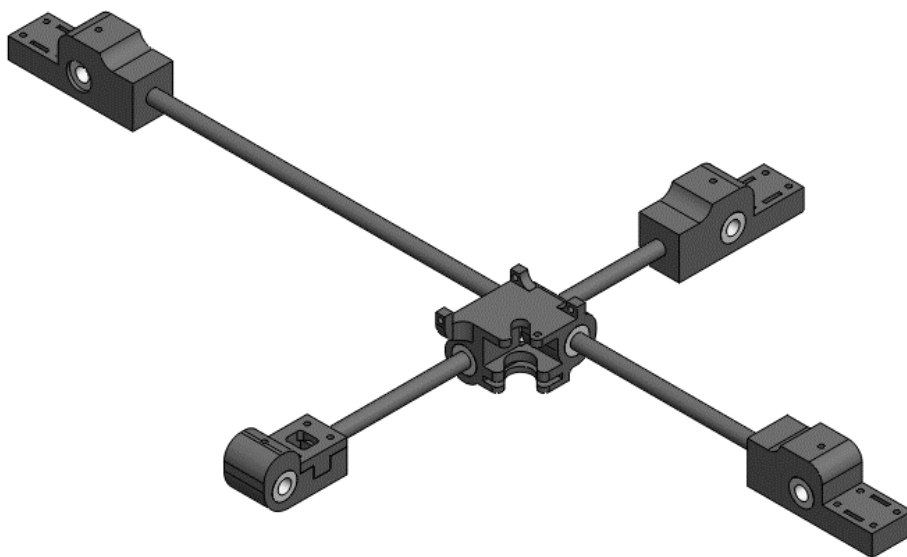


Figura 77: Ensamblaje del sistema de guiado del patín del extrusor

6. Calado de la “Polea Motor X” y “Polea Motor Y” sobre los correspondientes motores

7. Calado de las Poleas de renvío sobre los extremos de las varillas calibradas de 510 y 310 mm de largo.
8. Montaje de los varillas calibradas de 510 y 310 mm a través de los rodamientos 608zz y los patines correspondientes a cada eje. El conjunto debe quedar como en la siguiente figura.

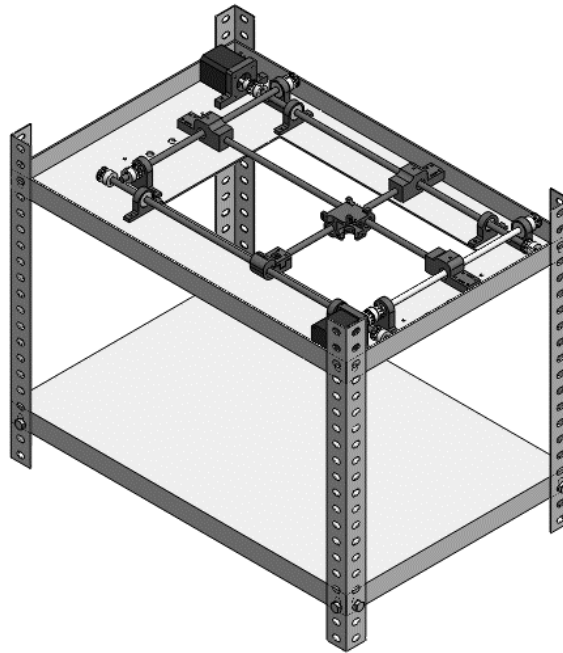


Figura 78: Aspecto final de los ejes X e Y sin las correas

9. Colocación, tensado de las correas y fijación de las correas a los patines de los ejes X e Y.

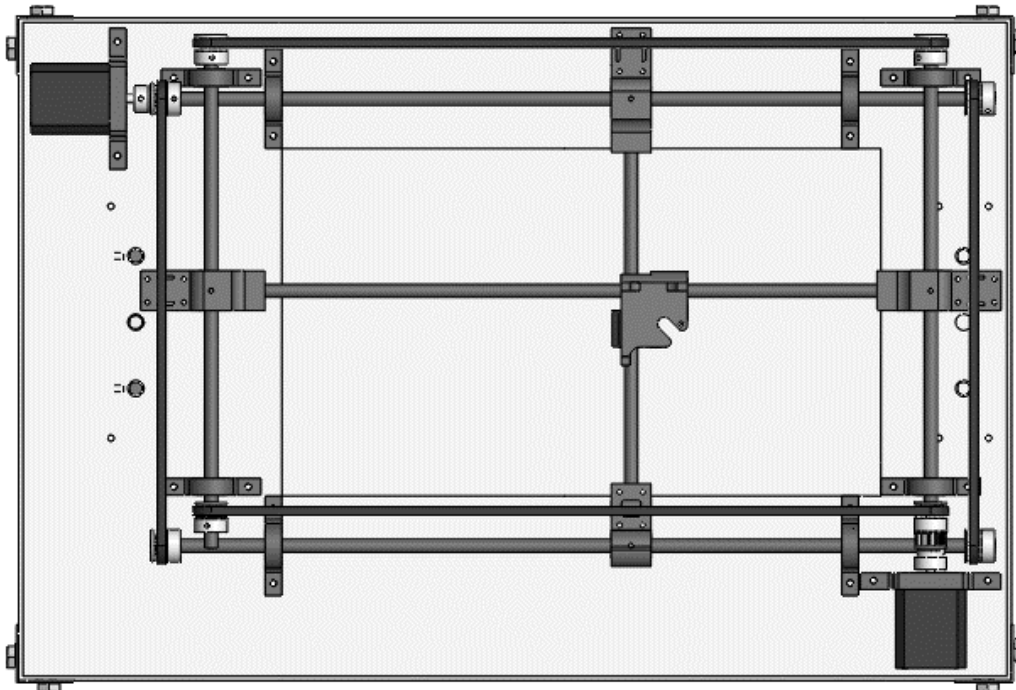


Figura 79: Vista superior de los ejes X e Y

Montaje Eje Z

El montaje del eje Z es muy sencillo. A continuación se especifican los pasos principales de montaje del mismo:

1. Colocación de los 4 “Soportes Guías eje Z” sobre los estantes inferior y superior.
2. Introducción de las varillas calibradas y roscadas sobre dichos soportes, teniendo en cuenta que las varillas calibradas deben atravesar los rodamientos lineales de los patines del eje Z y que las varillas roscadas deben atravesar las roscas de los mismos e introducirse las poleas que transmitirán el movimiento entre ellas. Por último se fijará el motor en el extremo inferior izquierdo de la máquina y se tensará la correa mediante un tensor que se introducirá posteriormente:

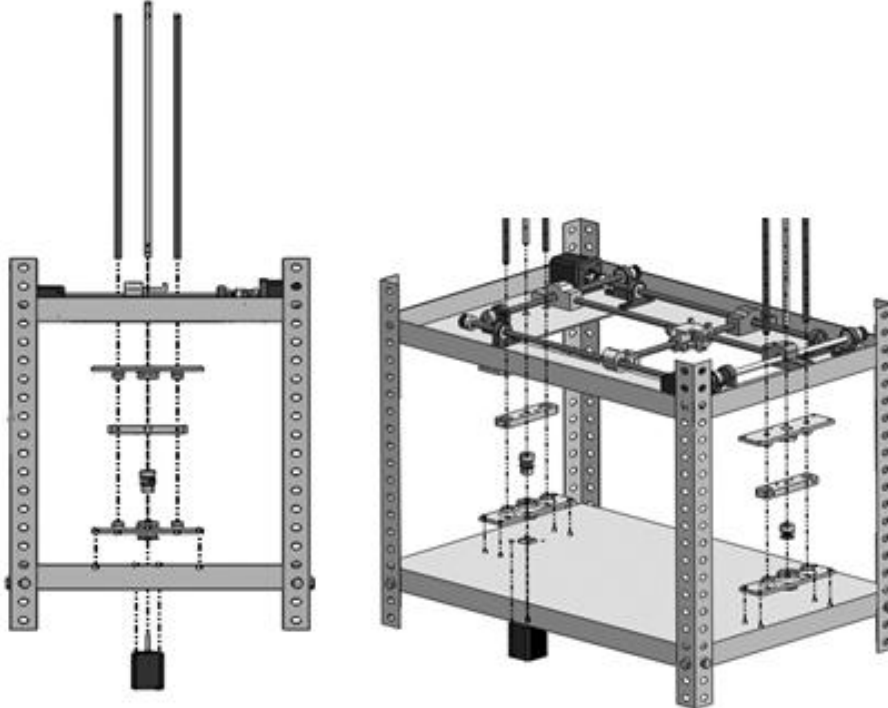


Figura 80: Montaje del eje Z

Montaje Coordenada Theta (giro)

La coordenada Theta de la impresora polar se montará según la siguiente figura:

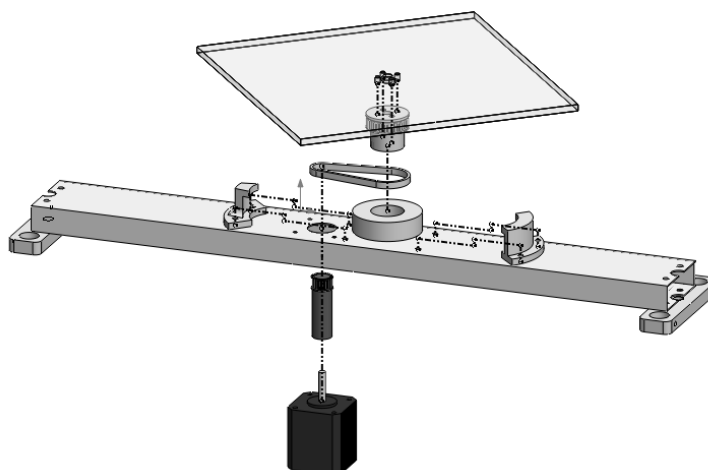


Figura 81: Montaje coordenada Theta

Montaje Extrusor

El montaje del extrusor puede resultar complejo si no se siguen una secuencia lógica y ordenada. A continuación se expone la secuencia de montaje de todas las piezas del extrusor y del mismo sobre el patín de extrusión:

1. Ensamblado de los conjuntos “Rueda moleteada-Engranaje-Casquillo”, que se denominarán “Ensamblajes tractores”:
 - a. Se realizará el ensamblaje por interferencia según se muestra en la siguiente figura:

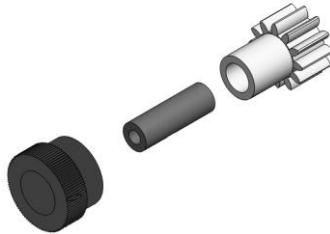


Figura 82: Montaje "Ensamblaje Tractor"

- b. Posteriormente se perforarán y roscarán las 3 piezas a la vez, no debiendo ser desmontadas tras este roscado.

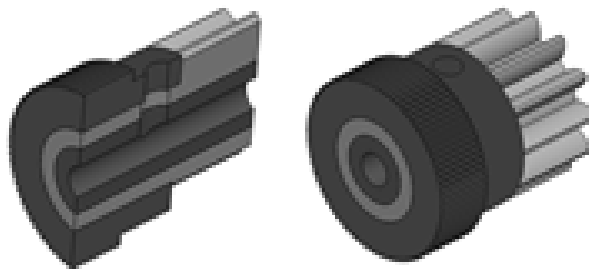


Figura 83: Taladrado y roscado del Ensamblaje Tractor

2. Montaje de los sistemas de los engranajes, casquillos y ensamblajes tractores sobre sus correspondientes ejes y sobre los “Soporte engranajes derecho” y “Soporte engranajes izquierdo”:

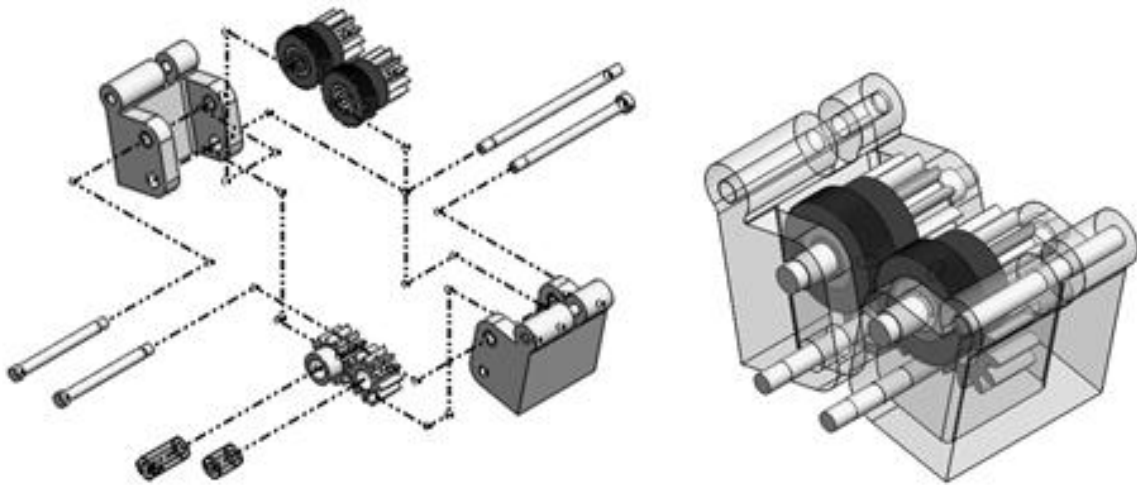


Figura 84: Montaje del sistema de engranajes sobre sus soportes

3. Colocación de los “tensores”, unión de ambos y colocación del tornillo encargado de regular la presión y los soportes del mismo.
4. Colocación del “Soporte delantero” y “Soporte trasero”

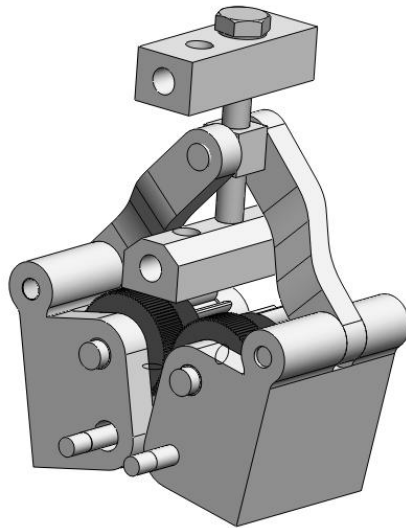


Figura 85: Sistema de tensado

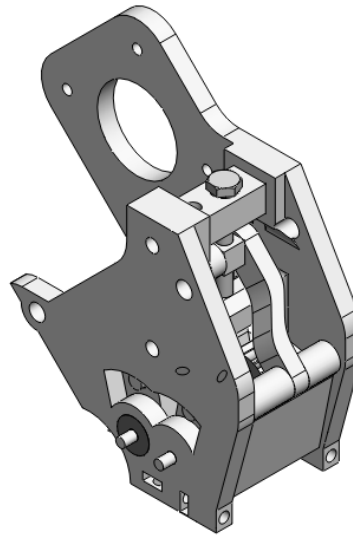


Figura 86: Montaje de las piezas laterales del extrusor

5. Colocación de los engranajes de plástico que componen la reducción de velocidad

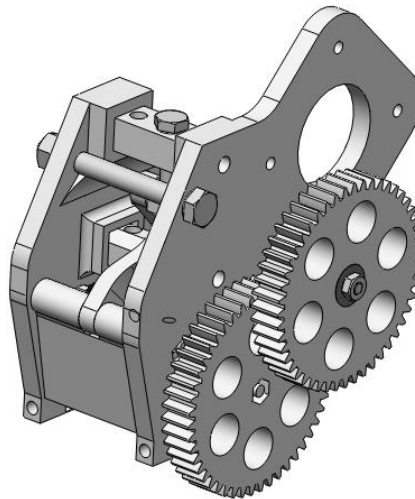


Figura 87: Montaje de la reductora de velocidad del extrusor

6. Colocación del motor y el engranaje que va calado a él.

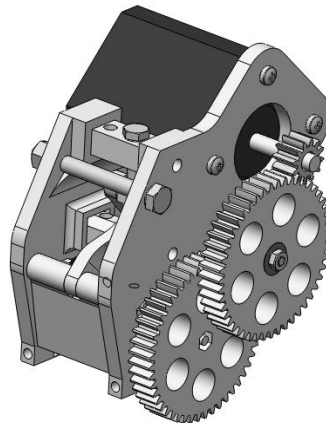


Figura 88: Extrusor

PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA EL MÓDULO MECÁNICO

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes mecánicas de la máquina: Bastidor, Ejes X, Y, Z, Extrusor.

Acciones a realizar:

Prueba de eje X:

1. Mover eje X en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje X sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje X pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de eje Y:

1. Mover eje Y en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje Y sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje Y pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de eje Z:

1. Mover eje Z en intervalos de 10mm a lo largo de todo su recorrido en ambos sentidos.
2. Hacer llegar el patín hasta el final de carrera y comprobar que se detiene.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible recorrer todo el eje Z sin inconvenientes mecánicos y el movimiento se detiene al accionar el final de carrera.
 - b. Regular: Es posible recorrer el eje Z pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: El motor no se mueve o no se detiene al llegar al final de carrera

Prueba de Giro Mesa:

1. Hacer girar la mesa intervalos de 10° hasta dar una vuelta completa.
2. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: Es posible girar la mesa una revolución completa sin inconvenientes mecánicos.
 - b. Regular: Es posible hacer girar la mesa pero se detecta algún fallo mecánico que afecta a dicho movimiento
 - c. Fallo: La mesa no gira.

Prueba de Extrusor:

1. Introducir plástico en el Extrusor
2. Girar el extrusor 180° en torno al eje Y (colocar entrada de filamento hacia abajo).
3. Colgar 2 kg del plástico introducido en el extrusor.
4. Comprobar si es capaz de levantar dicha carga.
5. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: El extrusor es capaz de levantar 2Kg.
 - b. Fallo: El extrusor no es capaz de levantar 2Kg

Prueba de Punta Caliente:

1. Calentar la punta caliente hasta 220°C
2. Introducir 5mm de plástico en la punta caliente de forma manual y comprobar si esta extruye sin saturarse.
3. Catalogar el resultado como:
 - a. Satisfactorio: La punta caliente extruye con normalidad.
 - b. Fallo: la punta caliente no se calienta, no extruye o se satura

Nota: en el caso de que el resultado de la prueba sea “Regular” o “Fallo” deben indicarse los motivos de fallo en el apartado *Conclusiones* y las posibles soluciones a los mismos en el apartado *Acciones a realizar*

Resultados:

Prueba	Resultado
Prueba de eje X	Satisfactorio
Prueba de eje Y	Satisfactorio
Prueba de eje Z	Satisfactorio
Prueba Giro Mesa	
Prueba de Extrusor	Satisfactorio
Prueba Punta Caliente	Satisfactorio

Conclusiones:

La impresora ha superado todas las pruebas satisfactoriamente.

Acciones a realizar:

Proceder con el protocolo de pruebas general

6.6. Evaluación de la nueva impresora

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes de la impresora y de poder realizar una comparación objetiva sobre los resultados obtenidos por las impresora Prusa I2 y MUIM se han realizado dos protocolos de pruebas idénticos a los detallados en la primera fase de este proyecto.

El primero de estos protocolos valora el funcionamiento de la impresora trabajando en coordenadas cartesianas y el segundo de ellos en coordenadas polares.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL IMPRESORA CARTESIANA

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la nueva impresora en coordenadas cartesianas.

Descripción del ensayo:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar Pronterface
2. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
3. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
4. Ejecutar la orden “Extrude” en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
5. Cargar el archivo “Cube-CURA.gcode”.
6. Imprimir el archivo “Cube-CURA.gcode”
7. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (indicar el error cometido)

Resultados:

Prueba	Resultado
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio
Calentamiento Base	Satisfactorio
Extruir	Satisfactorio
Cargar Archivo STL	Satisfactorio
Imprimir	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancias dimensionales	Satisfactorio

Conclusiones

La impresora realiza el movimiento en los 3 ejes de forma suave y el extrusor trabaja de forma continuada.

Los acabados dimensional y superficial parecen mejores que los obtenidos por la Prusa I2 sin requerir ningún tipo de calibración adicional.

PROTOCOLO DE PRUEBAS GENERAL IMPRESORA POLAR

Objetivo:

Comprobar el correcto funcionamiento de la nueva impresora en coordenadas polares.

Descripción del ensayo:

Prueba Impresión:

1. Ejecutar CartesianasPolares en Matlab
2. Seleccionar el archivo "Coin.gcode"
3. Obtener el archivo "Coin-Polar-.gcode"
4. Ejecutar Pronterface
5. Calentar la Punta Caliente hasta 230°C y regular la fuerza de los tornillos.
6. Calentar la Base Caliente hasta 70°C
7. Ejecutar la orden "Extrude" en Pronterface con una velocidad de avance de 20mm/min y 5mm de extrusión.
8. Cargar el archivo "Coin-Polar-.gcode".
9. Imprimir el archivo "Coin-Polar-.gcode"
10. Valorar los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar observación visual para comprobar si en ciertos puntos la impresora no ha imprimido de forma constante y se ven imperfecciones en la superficie de la pieza)
 - b. Tolerancias dimensionales (indicar el error cometido)

Resultados:

Prueba	Resultado
Calentamiento Punta Caliente	Satisfactorio
Calentamiento Base	Satisfactorio
Extruir	Satisfactorio
Cargar Archivo STL	Satisfactorio
Imprimir	Fallo
Acabado Superficial	--
Tolerancias dimensionales	--

Conclusiones

El proceso de impresión ha fallado por un error aparente de programación. Futuros desarrolladores de esta arquitectura de impresoras deben trabajar sobre la generación del código 3D y otros aspectos de la impresora.

7. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO

Durante la realización de este trabajo fin de máster se han realizado diversos estudios que han conducido a la obtención de diversos resultados. A continuación se presentan los más relevantes:

- a) Adquisición de la impresora Prusa I2: Se ha realizado un estudio del arte sobre las impresoras 3D y se ha seleccionado la Prusa I2 para ser montada, calibrada y estudiada en profundidad con el objetivo de conocer el proyecto RepRap y las impresoras 3D Open Source.
- b) Montaje de la impresora Prusa I2: Se ha llevado a cabo el montaje de la Prusa I2 y durante el mismo se han enumerado los fallos de diseño detectados. Tras cada fase de montaje se ha realizado un protocolo de pruebas con el objetivo de evaluar el funcionamiento de cada módulo de la impresora.
- c) Implementación de mejoras sobre la impresora Prusa I2: Sobre el prototipo montado a partir del kit suministrado por Reclone 3D y la guía de montaje del Dr Juan González-Gómez se han realizado las siguientes mejoras:
 - a. Cambio del tornillo de extrusión por otro tipo Hyena
 - b. Estudio de los parámetros óptimos de extrusión (Temperatura: 230°C y longitud de muelles: 12mm)
 - c. Cambio del tipo de ABS a extruir: Se ha comprobado que el tipo de ABS es un parámetro importante.
 - d. Cambio de las correas y poleas del kit de Reclone 3D
 - e. Cambio del reenvío de las correas del kit de Reclone 3D
 - f. Actualización del software Sprinter para integrar un control PID de la temperatura
 - g. Cambio del software de laminado (Skeinforce→Cura) con el objetivo de poder controlar todos los parámetros de configuración del mismo.

Tras la realización de todas estas mejoras se ha comprobado que tanto el acabado superficial como las tolerancias dimensionales han mejorado, pero aún existen problemas con el proceso de extrusión y otros factores. Por ello se ha diseñado por completo una impresora 3D con el objetivo de mejorar las deficiencias del diseño de la Prusa I2 (baja rigidez del bastidor, patines inadecuados, mal diseño del extrusor) a la par que se ha dotado a la nueva impresora (denominada Impresora MUIM) de un sistema de giro para la mesa de impresión que le permite llevar a cabo impresiones en coordenadas de polares, lo cual debería optimizar el acabado de las piezas de revolución. Durante esta segunda fase del proyecto se han llevado a cabo las siguientes tareas:

- a) Diseño de la impresora MUIM: se han evaluado las diferentes alternativas en cuanto a la arquitectura de la nueva impresora y se ha justificado la selección de las arquitecturas cartesiana y polar. Posteriormente se ha diseñado un bastidor y se ha propuesto una solución para el movimiento de cada uno de los ejes cartesianos y polares. Finalmente se han diseñado 2 extrusores, se han probado y se ha seleccionado uno de ellos.
- b) Fabricación y montaje de la impresora MUIM: se han detallado los procesos de fabricación y montaje necesarios para realizar una impresora MUIM y se ha evaluado el funcionamiento de los diferentes módulos por separado para detectar fallos aislados en la impresora.
- c) Evaluación de la impresora MUIM: se han llevado a cabo dos protocolos de pruebas sobre la impresora MUIM con el objetivo de evaluar las mejoras obtenidas al realizar un cubo y

un cilindro con respecto a la Prusa I2. En el caso de la impresora cartesiana los resultados obtenidos son mejores sin necesidad de realizar cambios sobre el diseño, pero los resultados obtenidos con la impresora polar no han sido satisfactorios debido a errores en la programación, por lo que se deberán seguir estudiando los parámetros que afectan a este proceso y optimizando dicha programación.

Como conclusión final se puede afirmar que el proceso de fabricación mediante prototipado rápido por deposición de hilo fundido es extremadamente complejo de calibrar debido al alto número de variables que influyen en el proceso. Esto conduce a que tanto la puesta a punto como el diseño de una impresora 3D sea una tarea mucho más compleja de lo que aparenta y que requiere un proceso de aprendizaje complejo, debido a la rapidísima evolución que está experimentando esta tecnología en los últimos años.



Figura 89: Evolución de los resultados de impresión durante el proyecto

8. LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Este trabajo fin de máster deja la puerta abierta el estudio de las siguientes líneas de investigación relativas al prototipado 3D:

- Estudio de la influencia del tipo de arquitectura de impresión (polar o cartesiana) sobre las piezas realizadas (estudios dimensionales, de acabado superficial, de resistencia a tracción...)
- Estudio de la influencia del espesor de las paredes y el tipo de mallado interior en la resistencia final de las piezas (optimización de la cantidad de plástico a imprimir para obtener una pieza con una determinada rigidez estructural)
- Estudio del mínimo diámetro de la boquilla de impresión (búsqueda de la máxima resolución)
- Estudio de la velocidad máxima de impresión (la impresión a altas velocidades podría llevar a permitir la fabricación en serie de piezas en un futuro no muy lejano)
- Estudio de la influencia de la composición material a extruir (ABS, PLA..) sobre el proceso de extrusión.
- Estudio de la viabilidad de imprimir utilizando como material de aporte pellets de ABS o algún otro plástico con el objetivo de reducir aún más los costes de impresión.
- Estudio de optimización de este tipo de impresoras para su fabricación en serie a precios más reducidos.

9. PRESUPUESTO

A continuación se detalla el coste de los materiales necesarios para la realización de este proyecto, excluyendo del mismo los costes de diseño y mano de obra, ya que lo que pretende este apartado es ser una comparativa entre los costes de adquisición de la impresora Prusa I2 y la impresora MUIM.

1º Fase del Proyecto:

En primer lugar se detallan los costes relativos a la primera fase del proyecto:

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Coste unitario</u>	<u>Total</u>
Kit Prusa I2	1	469€	469€
Tornillo hyena	1	8€	8€
Tornillo MIM_tóricas	1	0,5€	0,5€
Tornillo MIM_moleteado	1	0,5€	0,5€
Bobina de plástico ABS blanco	1	25€	25€
Juego de correas y poleas T2.5	1	22,85€	22,85€
Piezas para los reenvíos de las correas	4	0,12€	0,48€
TOTAL			526,33 €

El coste total de adquisición de todos los componentes necesarios para desarrollar la primera fase del proyecto ha sido de:

QUINIENTOS VEINTISEIS EUROS CON TREINTA Y TRES CENTIMOS DE EURO..... (526,33€)

Dicha cantidad se corresponde al coste de adquisición de todos los materiales necesarios para montar una impresora Prusa I2 y posteriormente realizarle las mejoras descritas en este documento.

2º Fase del Proyecto:

A continuación puede verse el precio de todos los componentes de la impresora MUIIM. Se distinguirá entre elementos comerciales, elementos mecanizados y elementos prototipados:

Elementos comerciales

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Coste unitario</u>	<u>Total</u>
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo: 610mm	2 unidades	1,5€/m	1,83€
Correa T5 abierta, Ancho : 5mm Largo 940mm	2 unidades	1,5€/m	2,82€
Correa T2.5 Ancho: 6mm Largo: 180 mm	1 unidad	3,62€	3,62€
Rodamientos Lineales LM8UU	10 unidades	1,45€	14,5€
Rodamientos de bolas 608ZZ	11 unidades	0,44€	4,84€
Tornillería M3, M4, M8	--	10€	10€
Placa de contrachapado Dimensiones: 220x220x4 mm	1 unidad	5€	5€
Regletas	4 unidades	1€	4€
Pinzas de papelería	4 unidades	1€	4€
Cristal Dimensiones 200x200	1 unidad	1,25€	1,25€
Cinta Kaptom	1 unidad	10€	10€
Perfil estantería modular 35X35 mm Largo 2000 mm	1 unidad	3,65€	3,65€
Estante (estantería modular) 400X600 mm	2 unidades	5,40€	10,80€
Engranajes módulo 1-12 dientes	4 unidades	4,44€	8,88€
Rodamientos RS 623-ZZ	2 unidades	1,67€	3,34€
Motor paso a paso Nema 17	5 unidades	15€	75€
Finales de Carrera (micro switch)	3 unidades	3€	9€
Resistencia de alta potencia (5 ohm)	1 unidad	4,2€	4,2€
Sensor de temperatura (100K)	1 unidad	5€	5€
Sensor de temperatura (200K)	1 unidad	4,20€	4,20€

Base Caliente (Hot Bed)	1 unidad	30€	30€
RAMPS v1.4	1 unidad	62,92€	62,92€
Arduino Mega 25600	1 unidad	48,40€	48,40€
Fuente alimentación 12v -5A	1 unidad	20€	20€
Stepstick A4988 y disipador	4 unidades	11,31€	11,31€
Varilla roscada M8	880 mm	1€/m	0,88€
Varilla Calibrada diámetro 8mm	3800mm	5€/m	19€
Plancha de contrachapado	1 Unidad	12€	12€
TOTAL			390,44€

Elementos prototipados

Cabe destacar que aunque las piezas de este prototipo se han realizado con la impresora HP disponible para la realización de los trabajos fin de máster del MIUM el presupuesto que se detalla a continuación está calculado simulando la impresión de las piezas en la propia impresora MIUM, lo cual reduce considerablemente los costes:

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad de material</u>	<u>Precio del material</u>	<u>Total</u>
Piezas de plástico	590 cm ³	25€/750 cm ³	19,66€

Elementos mecanizados

El coste de las siguientes piezas ha sido estimado por el área de ingeniería de fabricación del DCIF, que fue quien mecanizó las mismas:

<u>Descripción</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Coste unitario</u>	<u>Total</u>
Unión Patines eje z	1 Unidad	4	4
Patín Eje Z	2 unidades	8	16
Estante Superior	1 Unidad	16	16
Plancha de contrachapado	1 Unidad	6	6
Estante Inferior	1 Unidad	16	16
Engranaje Superior	2 unidades	6	12
Engranaje Inferior	1 unidades	4	4
Engranaje Inferior tractor	1 unidades	6	6
Eje Inferior	1 Unidad	12	12
Eje motriz	1 Unidad	6	6

Eje superior	2 unidades	12	24
Soporte tensores	1 Unidad	16	16
Rueda Moleteada	2 unidades	16	32
Casquillos 6-3-18	2 unidades	6	18
Casquillos 6-3-8	1 unidad	6	6
Casquillos 6-3-13	1 unidad	6	6
Nozzle	1 unidad	16	16
Heater block	1 unidad	16	16
Peek isolator	1 unidad	16	16
Threaded extension	1 unidad	20	20
			268€

Total

<u>Descripción</u>	<u>Total</u>
Elementos comerciales	390,44€
Elementos prototipados	19,66€
Elementos mecanizados	268€
TOTAL	678,10€

El coste total de adquisición de todos los componentes necesarios para desarrollar la segunda fase del proyecto ha sido de:

SEISCIENTOS SETENTA Y OCHO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS DE EURO..... (678,10€)

Dicha cantidad se corresponde al coste de adquisición de todos los materiales necesarios para montar la impresora MUIM.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Gonzalez-Gomez. *Guia_de_montaje_de_la_Prusa_2*
(http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Guia_de_montaje_de_la_Prusa_2).
- [2] Planos Budaschnozzle
(<http://www.alephobjects.com/hardware/budaschnozzle/1.1/>).
- [3] Impresoras desarrolladas en el proyecto RepRap
(<http://www.reprap.org/mediawiki/images/b/b8/2012-12-20-clone-wars-genealogy-100-clones.png>)

ANEXOS

11. ANEXO 1: PROGRAMACIÓN EN MATLAB

A continuación pueden verse las diferentes funciones programadas en Matlab para llevar a cabo la transformación del archivo G-CODE y poder imprimir en coordenadas polares (ver carpeta “Matlab” adjunta a esta memoria para más información)

Archivo “Castesianas Polares”

Este archivo es el bucle principal de programa de transformación del archivo G-CODE de coordenadas cartesianas a polares. Al ejecutarlo se abre una ventana que permite seleccionar al usuario un archivo con extensión .gcode y automáticamente devuelve en la misma carpeta en la que está contenido dicho archivo otro con el mismo nombre y el sufijo –Polar-.

```
%% Cargar el archivo que queremos modificar
[lif fid PathName FileName Input_file] = Open_file();

t1=clock;% Comenzamos a medir el tiempo de ejecución del código

%% Abrir un archivo nuevo para la salida
[Salida Exit_file]=Create_file(FileName);

%% Comienza la lectura del archivo
fid = fopen(Input_file,'r');%% Abrir el archivo a modificar

% Tomamos el punto de partida como el 200,0,0 e inicializamos el resto de valores
old_values=[200,100,0,0,0,100,0]; theta_ant=0;

%% Recorrer el archivo de principio a fin
for i=1:lif
tline = fgetl(fid); %% Obtener una línea del archivo

    if strfind(tline,'G1')==1 %% Comprobar si es una orden de desplazamiento
    [ valores flag ] = Extract_values( tline );%% Extraer números de una fila

    % Operar con los valores x,y,z,f,e--Montar la cadena de caracteres y grabar en el txt la salida
    [old_values]=Cart2Polar(old_values, valores, Salida, flag);

    else
    %% Si no es una línea G1 se graba directamente en el archive de salida sin ser modificada
    fprintf(Salida,'%s \r\n',tline);
    end

end

%% Cerrar archivos
fclose(fid);
fclose('all');

t2=clock;%% fin del cálculo del tiempo de procesamiento del archivo
t=etime(t2,t1);
fprintf('El tiempo de ejecución de Cartesianas_Polares ha sido: %f segundos \r\n',t)
```

Función “Car2Polar”

Esta función es la más importante del programa, en ella se realiza la conversión de coordenadas cartesianas a polares y se graban los datos en el archivo de salida.

```
function [old_values ] = Cart2Polar(old_values, values, Salida, flag)
%Esta función pasa de coordenadas cartesianas a polares y discretiza las
%rectas al máximo para que el error por aproximación mediante curvas sea
%mínimo
axis([-100 100 -100 100])
r_new=old_values(6);
theta_new=old_values(7);

%desfase entre el eje de coordenadas de la mesa polar y el de la mesa cartesiana
desf_x=100; desf_y=100;

if (flag(1)==1 || flag(2)==1)
res_max=1.8*(2*pi)/360;
theta_ant=old_values(7);
%Variables en coordenadas de la mesa polar
xa1=old_values(1)-desf_x; ya1=old_values(2)-desf_y;
xb1=values(1)-desf_x; yb1=values(2)-desf_y;

%Valores de ángulo y radio del punto inicial y el final
ra=old_values(6);
rb=sqrt(xb1^2+yb1^2);

if ra>0
thetaa=acos(xa1/ra);
if ya1<=0
thetaa=2*pi-thetaa;
end
end

if rb>0
thetab=acos(xb1/rb);
if yb1<=0
thetab=2*pi-thetab;
end
end

if ra==0
thetaa=thetab;
end
if rb==0
thetab=thetaa;
end

%Búsqueda de la máxima resolución
res_act_1=abs(thetaa-thetab);
res_act_2=2*pi-abs(thetaa-thetab);
```

```
if res_act_1<res_act_2
    res_act=res_act_1;
    sign=1;
else
    res_act=res_act_2;%Giro Inverso
    res_max=-res_max;%Giro Inverso
    sign=-1;
end

if thetaa>thetab
    sign_2=-1;
else
    sign_2=1;
end

%Cálculo del número de puntos a insertar entre dos líneas de código G1
n_puntos=abs(fix(res_act/res_max));
ultimo_giro=sign*(res_act-n_puntos*(abs(res_max)));

% Valores anteriores de radio y ángulo

if n_puntos~=0
    if xb1~=xa1
        %Cálculo de pendiente y ordenada en el origen
        m=(yb1-ya1)/(xb1-xa1);
        n=yb1-m*xb1;
        for i=1:n_puntos
            theta_new=theta_ant+res_max*(i)*sign_2;
            r_new=n/(sin(theta_new)-cos(theta_new)*m);
            %Guardar en el formato requerido para los motores
            value2save(1)=r_new; value2save(2)=theta_new;value2save(3)=values(3);
value2save(4)=values(4); value2save(5)=values(5);
            % Volver a Montar las cadenas de caracteres
            [ exit ] = new_string(value2save, flag, Salida);
        end

    else
        for i=1:n_puntos
            theta_new=theta_ant+res_max*(i)*sign_2;
            r_new=abs(xa1/(cos(theta_new)));
            %Guardar en el formato requerido para los motores
            value2save(1)=r_new; value2save(2)=theta_new;value2save(3)=values(3);
value2save(4)=values(4); value2save(5)=values(5);
            % Volver a Montar las cadenas de caracteres
            [ exit ] = new_string(value2save, flag, Salida);
        end

    end
end
```

```
old_values(1)=desf_x+r_new*cos(theta_new);
old_values(2)=desf_y+r_new*sin(theta_new);
old_values(3)=values(3);
old_values(4)=values(4);
old_values(5)=values(5);
old_values(6)=r_new;
old_values(7)=theta_new;

%      % Guardar en el formato requerido para los motores
%      value2save(1)=r_new; value2save(2)=theta_new;value2save(3)=values(3);
value2save(4)=values(4); value2save(5)=values(5);
%      % Volver a Montar las cadenas de caracteres
%      [ exit ] = new_string(value2save, flag, Salida);

else
    % Guardar en el formato requerido para los motores
    value2save(1)=r_new; value2save(2)=theta_new;value2save(3)=values(3);
value2save(4)=values(4); value2save(5)=values(5);
    % Volver a Montar las cadenas de caracteres
    [ exit ] = new_string(value2save, flag, Salida);

    old_values(1)=r_new*cos(theta_new)+desf_x;
    old_values(2)=r_new*sin(theta_new)+desf_y;
    old_values(3)=values(3);
    old_values(4)=values(4);
    old_values(5)=values(5);
    old_values(6)=r_new;
    old_values(7)=theta_new;

end
```

Función Create file

Esta función crea un archivo en la misma carpeta que el archivo a modificar, pero con el sufijo – Polar-. La ruta de dicho archivo será la utilizada para grabar los datos de salida.

```
function [ Salida Exit_file ] = Create_file(FileName)

% Creamos archivo de escritura
Exit_file=strcat('_Polar_',FileName)
Salida = fopen(Exit_file,'w');
End
```

Función Length txt

Esta función devuelve el número de líneas de un archivo de texto o de un archivo .gcode. Este dato nos servirá para saber cuándo acabamos de procesar el archivo.

```
function [ linefin ] = Length_txt( Salida )
%Length_txt Devuelve el número de líneas de un fichero

% Pasar el archivo a caracteres, detecta cambio de línea como delimitador checkbox_y
% si encuentra una línea en blanco la sustituye por comillas
file=textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
%fclose(fid);
% Para que quede en una columna del tipo Cell Array
flines=(file{ 1 });
linefin=length(flines); % última línea del fichero

end
```

Función Open file

Función que permite al usuario seleccionar un archivo mediante el explorador de Windows y guarda el nombre y la ruta de dicho archivo.

```
function [ length_file fid PathName FileName NAME] = Open_file()
%Open_file Esta función abre el archivo que seleccionemos y devuelve su
% número de líneas y su identificador para poder abrirlo posteriormente
% Leer Archivo
[FileName,PathName] = uigetfile('*.gcode','Selecciona el archivo de cabecera');
NAME = [PathName,FileName];
%handles.NAME = NAME;
% Abrir el fichero checkbox_y su identificador fid
fid = fopen(NAME);

% Pasar el archivo a caracteres, detecta cambio de línea como delimitador checkbox_y
% si encuentra una línea en blanco la sustituye por comillas
file=textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
%fclose(fid);
% Para que quede en una columna del tipo Cell Array
flines=(file{ 1 });
% Donde acabamos de leer
length_file=length(flines); % última línea del fichero

fclose(fid);
end
```

Función Extract values

Función que permite extraer los valores X, Y, Z, E y F de una línea de código.

```
function [ values flag ] = Extract_values( tline )
values(1:5)=0;
flag(1:5)=0;
K = textscan(tline,'%s');
K_length=length(K{1}); % número de elementos de K

for i=2:K_length

    if strcmp(K{1}{i}(1),'X')==1
        K{1}{i}(1)=0;
        values(1)=str2num(K{1}{i});
        flag(1)=1;
    end
    if strcmp(K{1}{i}(1),'Y')==1
        K{1}{i}(1)=0;
        values(2)=str2num(K{1}{i});
        flag(2)=1;
    end
    if strcmp(K{1}{i}(1),'Z')==1
        K{1}{i}(1)=0;
        values(3)=str2num(K{1}{i});
        flag(3)=1;
    end
    if strcmp(K{1}{i}(1),'F')==1
        K{1}{i}(1)=0;
        values(4)=str2num(K{1}{i});
        flag(4)=1;
    end
    if strcmp(K{1}{i}(1),'E')==1
        K{1}{i}(1)=0;
        values(5)=str2num(K{1}{i});
        flag(5)=1;
    end
end

end
```

Función new_string

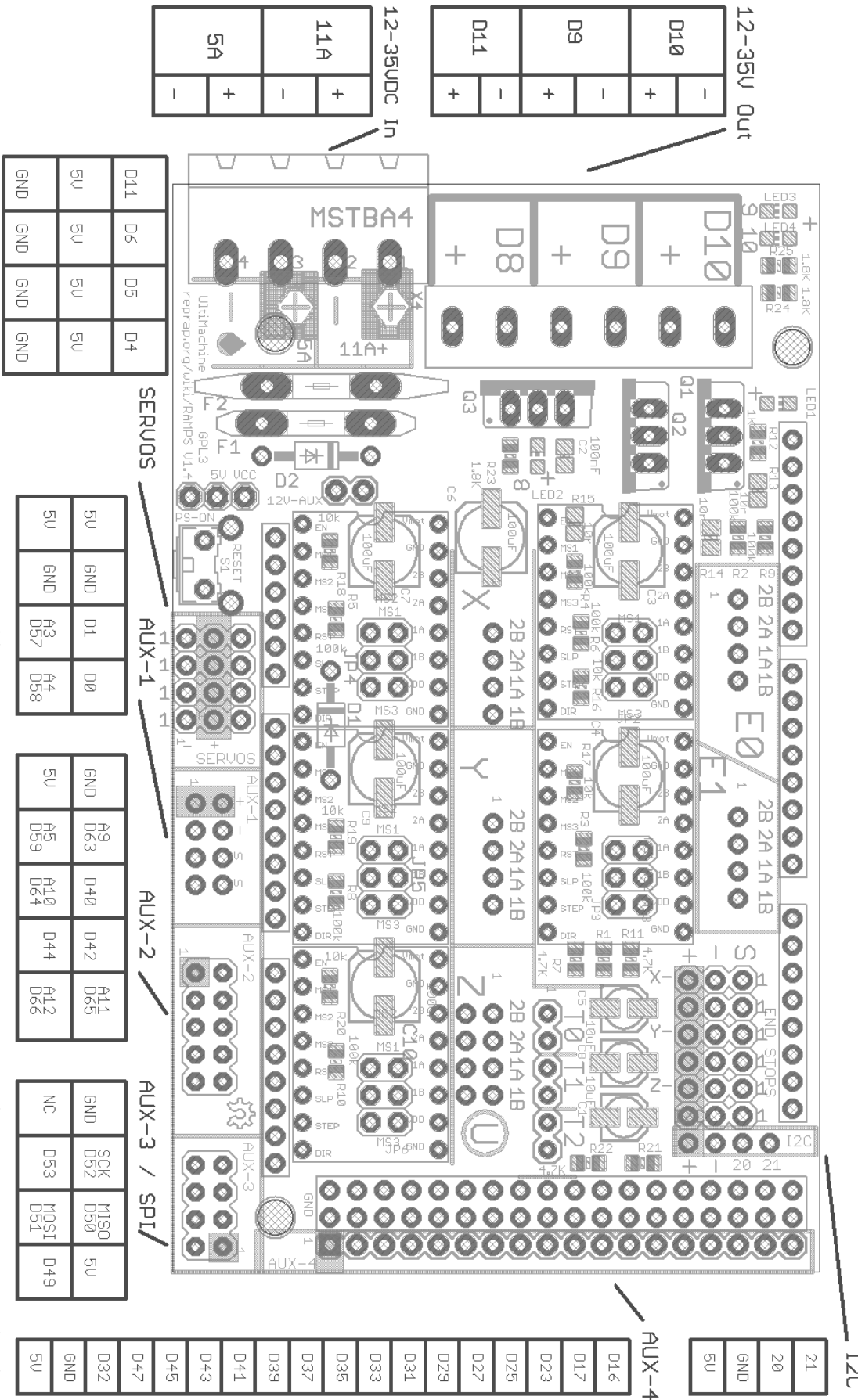
Función que permie generar una línea de código G con los valores X, Y, Z, E y F (o los correspondientes en coordenadas polares).

```
function [ exit ] = new_string(value2save, flag, Salida)
%UNTITLED11 Está función monta un nuevo string con las mismas componentes
%que había inicialmente
exit='G1';
    if flag(1)==1
        x1_new_ = strcat(' X',num2str(value2save(1)));
        exit=[exit, x1_new_];
    end
    if flag(2)==1
        y1_new_ = strcat(' Y',num2str(value2save(2)));
        exit=[exit, y1_new_];
    end
    if flag(3)==1
        z1_new_ = strcat(' Z',num2str(value2save(3)));
        exit=[exit, z1_new_];
    end
    if flag(4)==1
        f1_new_ = strcat(' F',num2str(value2save(4)));
        exit=[exit, f1_new_];
    end
    if flag(5)==1
        e1_new_ = strcat(' E',num2str(value2save(5)));
        exit=[exit,e1_new_];
    end

    %Grabar en archivo de salida
    fprintf(Salida,'%s \r\n',exit);
    x1_new=value2save(1)*cos(value2save(2));
    y1_new=value2save(1)*sin(value2save(2));
%    %Imprimir X Y del archivo
    hold on
    plot(x1_new,y1_new,'r+:')
end
```

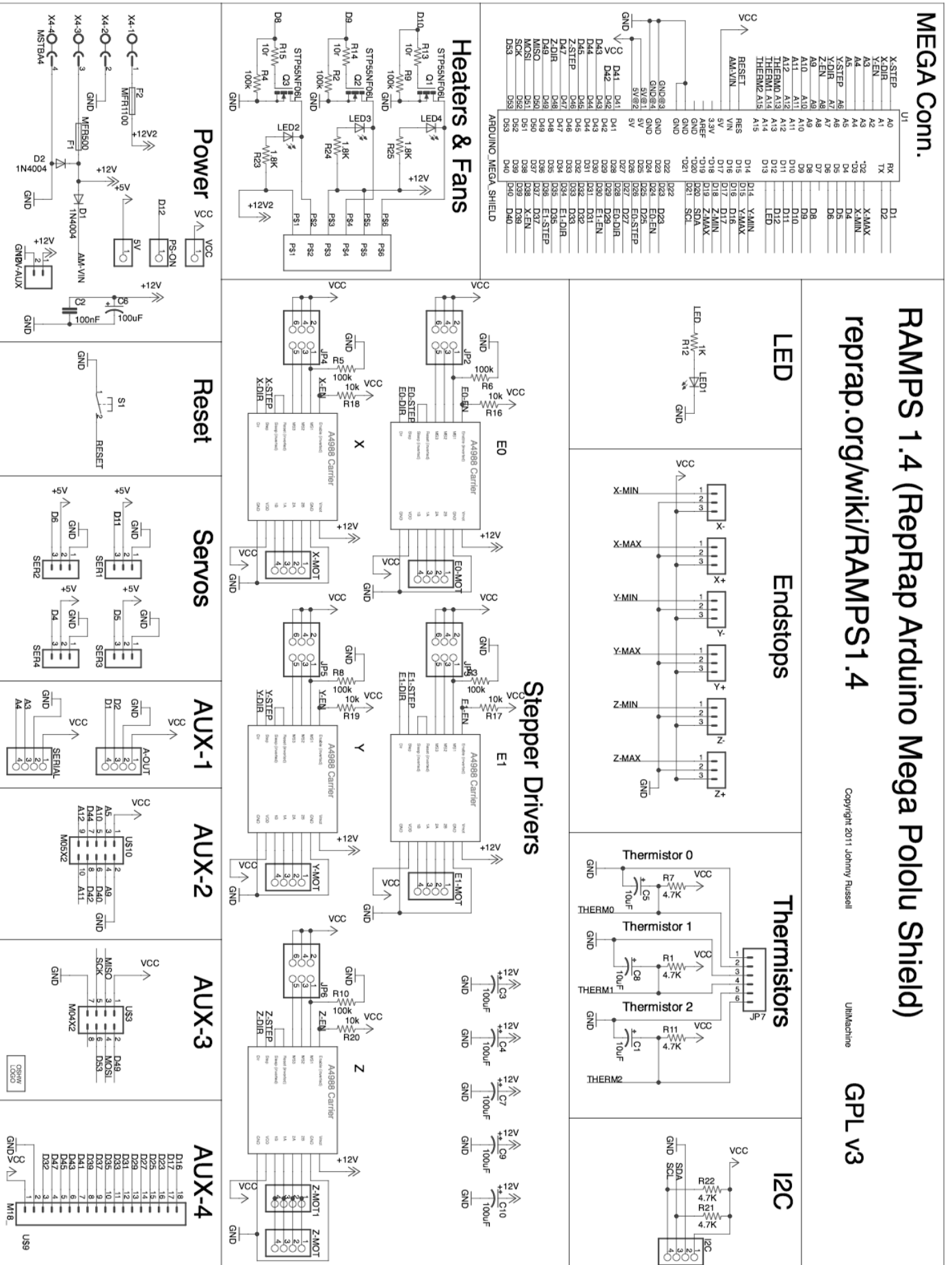
12. ANEXO 2: RAMPS V1.4

RAMPS 1.4 (Reprap Arduino MEGA Pololu Shield) GPL v3
reprap.org/wiki/RAMPS1.4
 Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.



Document revision 2

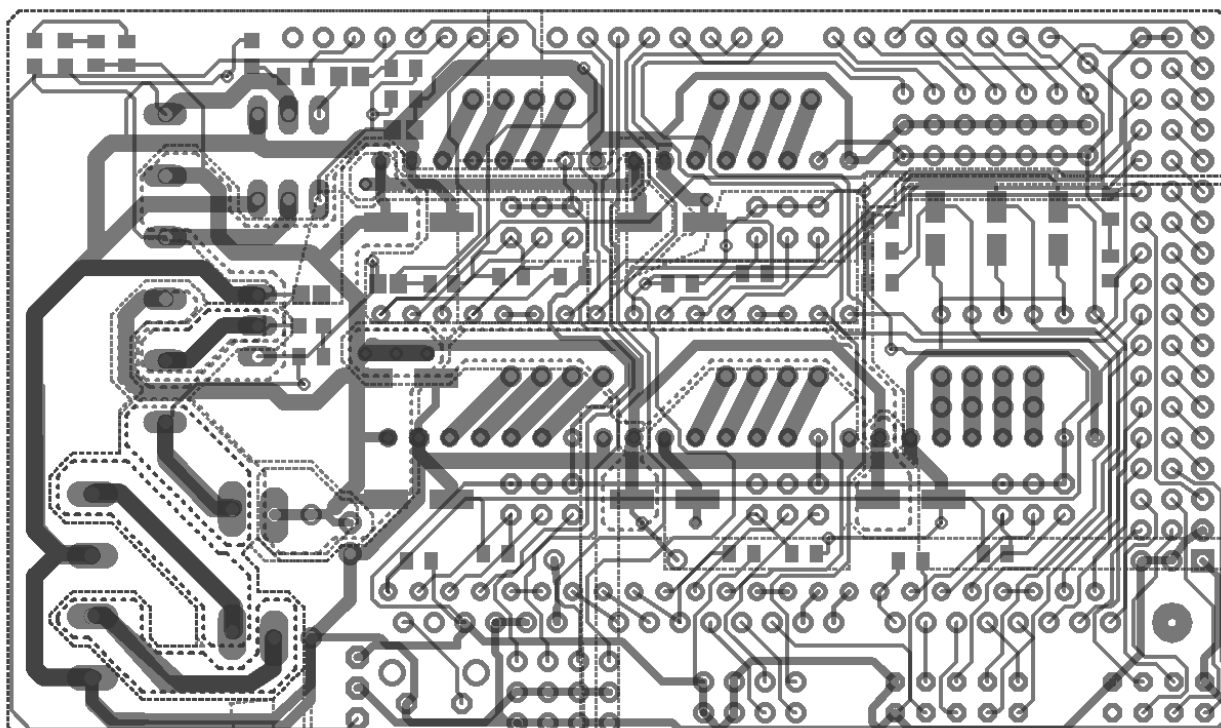
Copyright 2011 Johnny Russell - Uttrhatchine



RAMPS 1.4 (Reprap Arduino Mega Pololu Shield)
reprap.org/wiki/RAMPS1.4
 Copyright 2011 Johnny Russell

UlmMachine

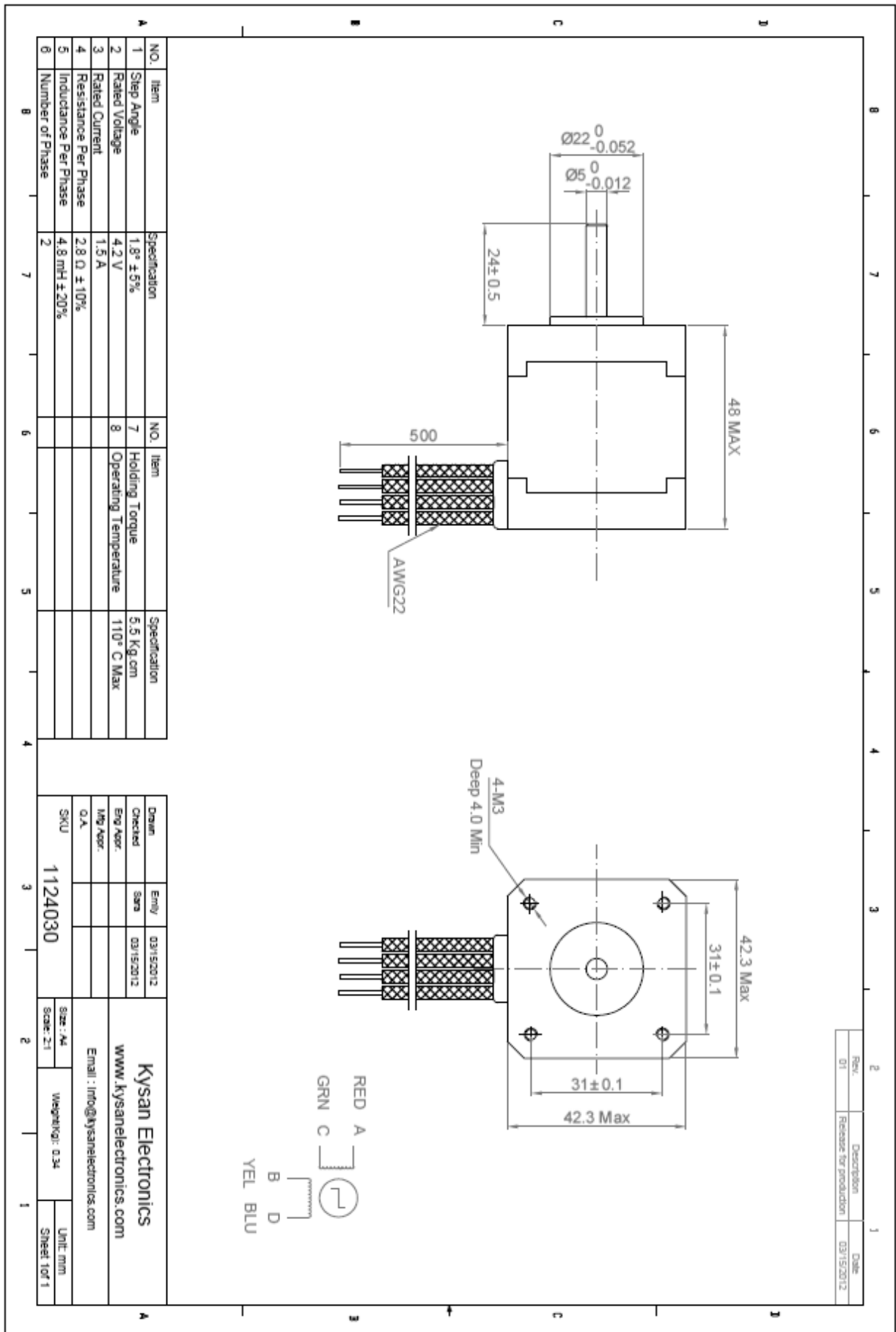
GPL v3



Para más información consultar:

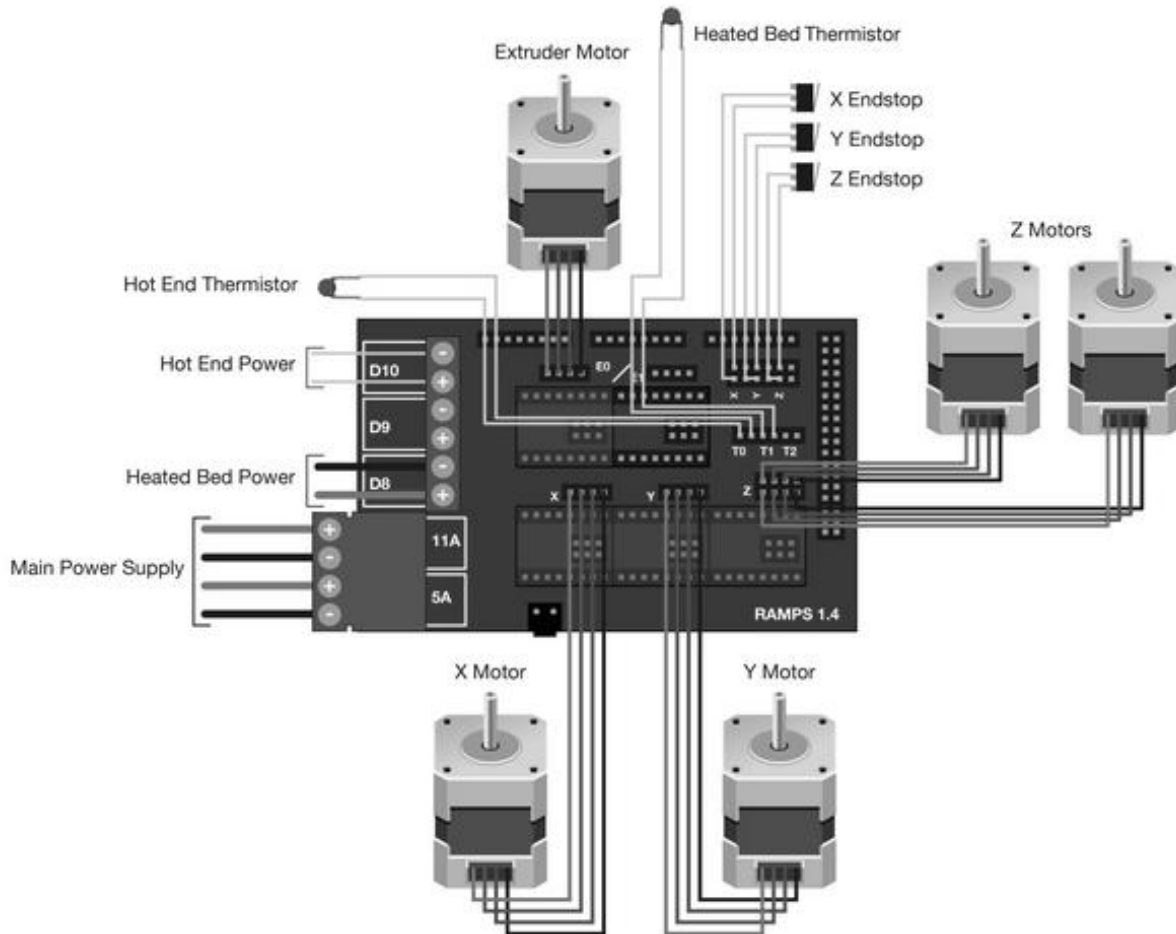
http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4

13. ANEXO 3: NEMA 17

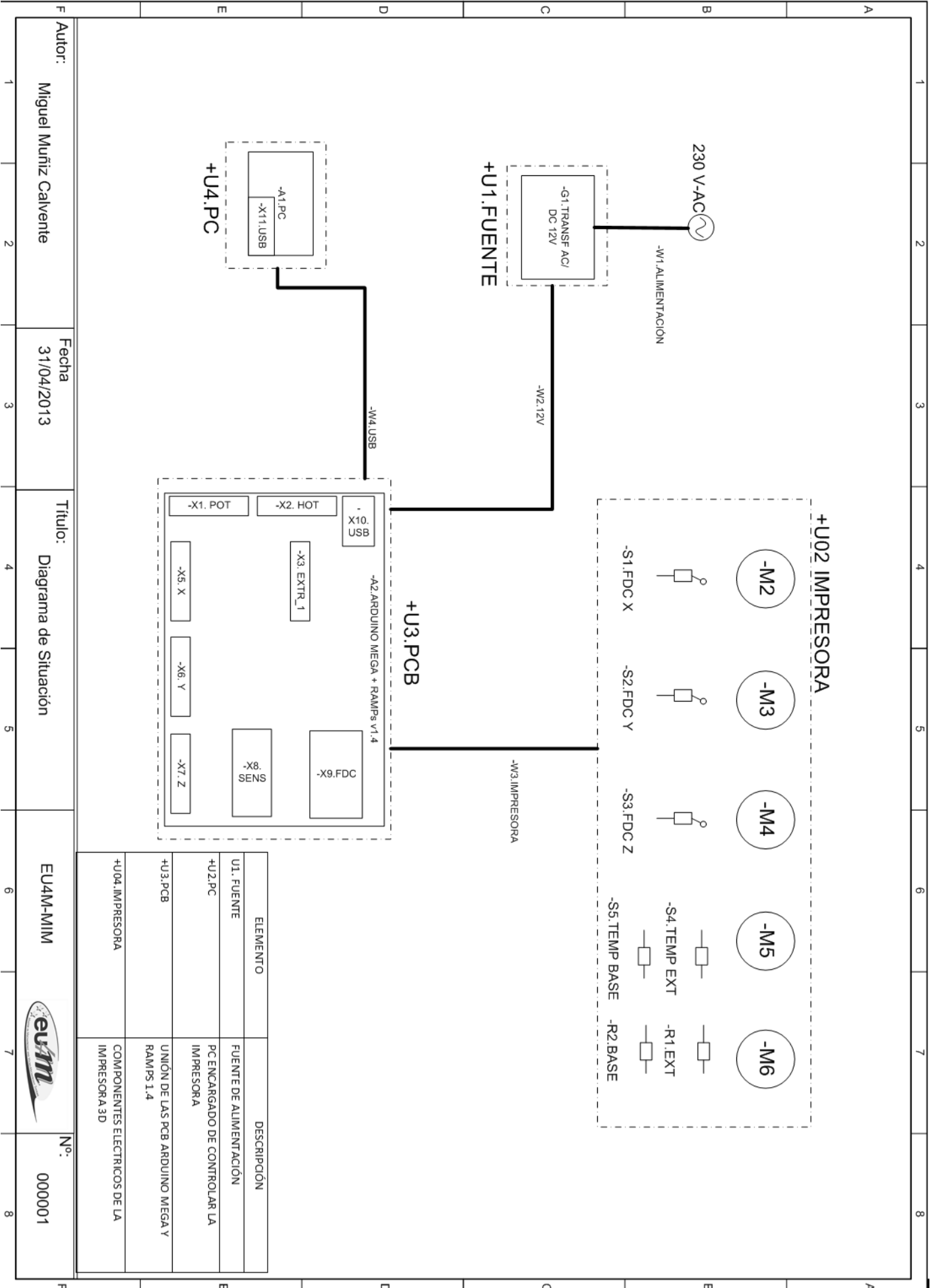


14. ANEXO 4: CABLEADO IMPRESORA MUIM

A continuación se presenta un diagrama simplificado de conexiones para la impresora MUIM:



En las siguientes páginas se encuentran los diagramas de situación y las conexiones para esta impresora.



ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
+U1.FUENTE	FUENTE DE ALIMENTACIÓN
+U2.PC	PC ENCARGADO DE CONTROLAR LA IMPRESORA
+U3.PCB	UNIÓN DE LAS PCB ARDUINO MEGA Y RAMPS 1.4
+U04.IMPRESORA	COMPONENTES ELECTRICOS DE LA IMPRESORA 3D

Autor: Miguel Muñiz Calvente

Fecha: 31/04/2013

Título: Diagrama de Situación

EU4M-MIM

Nº: 000001

