



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Implementación y configuración de la funcionalidad de
impresión 3D en una estructura CNC

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR/A: Ruiz Moraza, Itziar

Tutor/a: Serrano Martín, Juan José

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE IMPRESIÓN 3D EN UNA ESTRUCTURA CNC

TRABAJO FINAL DEL

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica



REALIZADO POR

Itziar Ruiz Moraza

DIRIGIDO POR

Juan José Serrano Martín

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad convertir, una estructura de una máquina CNC ya existente en una impresora 3D de modelado por deposición fundida o FDM *Fused deposition modeling* en Inglés.

Para ello, además de la estructura junto con los componentes electromecánicos ya disponibles, se hará uso de una placa electrónica especialmente diseñada para esta aplicación, como es la STEVAL-3DP001V1. En ella, se implementará y configurará, adaptando a las necesidades, el firmware Marlin (Código en C para STM32), el cual se emplea en múltiples modelos de impresoras 3D disponibles en el mercado en la actualidad.

Asimismo, será necesario diseñar y/o adquirir los elementos restantes para poder realizar la deposición de filamento, como son un extrusor, una cama caliente distintos sensores etc. Para ello, se analizarán las distintas opciones disponibles y se empleará la más apropiada.

Puesto que Marlin es un Firmware libre adaptable a distintos modelos de impresora con distintas funciones, se analizarán las características físicas de la estructura y los componentes disponibles, adaptando los parámetros críticos para obtener un correcto funcionamiento de la impresora.

Por último, a fin de mantener un seguimiento del estado y el correcto funcionamiento de la impresora, se conectará la placa Steval a una RPI con la aplicación Octoprint instalada, donde se podrá realizar un control y monitorización de la impresión así como de distintos parámetros.

PALABRAS CLAVE

Sistemas embebidos con STM32; Diseño impresoras 3D; Firmware Marlin; Programación en C; G-code; Octoprint

ABSTRACT

This project aims to convert an existing CNC machine structure into a FDM or fused deposition modeling 3D printer.

To do so, in addition to the structure and the electromechanical components already available, an electronic board specially designed for this application, as it is the STEVAL-3DP001V1, will be used. On this motherboard, the Marlin firmware (C code for STM32), which is used in multiple 3D printer models available on the market nowadays, will be configured and implemented, adjusting it to the specific needs.

It also will be necessary to design and/or acquire the remaining elements to be able to carry out the filament deposition, such as an extruder, a hot bed, different sensors, etc. For this, the different available options will be analyzed, thereafter selecting the most suitable ones.

Since Marlin is a free firmware adaptable to different printer models with different functions, the physical characteristics of the structure and the components will be analyzed, adapting the critical parameters to obtain the proper operation of the printer.

Finally, in order to keep track of the status and correct operation of the printer, the Steval board will be connected to an RPI with the Octo rprint application installed, where the printing as well as different parameters can be controlled and monitored.

KEYWORDS

Embedded systems with STM32; 3D printer design; Marlin firmware; C programming; G-code; Octoprint

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	IMPRESIÓN 3D	1
1.2.	IMPRESORAS FDM	2
1.2.1.	Tipos de impresoras	4
1.1.1.	Componentes principales.....	9
1.3.	ANTECEDENTES.....	20
2.	OBJETIVOS	21
3.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	22
3.1.	MATERIAL Y RECURSOS.....	22
3.1.1.	Estructura Mecánica.....	23
3.1.2.	Elementos de transmisión.....	25
3.1.3.	Motores PAP híbridos.....	27
3.1.4.	Sensores de final de carrera.....	29
3.1.5.	Fuente de alimentación.....	30
3.1.6.	Placa de impresora 3D.....	31
3.1.6.1.	Hardware.....	33
3.1.6.2.	Firmware	36
3.2.	HERRAMIENTAS DE TRABAJO	36
3.3.	FUNCIONALIDADES NECESARIAS	37
4.	PLAN DE TRABAJO	39
5.	DESARROLLO DEL PROYECTO	40
5.1.	ANÁLISIS DEL FIRMWARE	40
5.1.1.	Entorno de trabajo IDE.....	40
5.1.2.	Marlin para STM.....	40
5.1.2.1.	Versiones del Firmware.....	43
5.1.2.2.	G-code Marlin 1.1.0.....	43
5.1.3.	Fichero de configuración.....	44
5.1.3.1.	Ajustes avanzados	50
5.1.4.	Implementación de las características de la impresora.....	51
5.1.5.	Modificaciones en ficheros adicionales	57

5.2.	SELECCIÓN DE COMPONENTES	59
5.2.1.	Sistema de extrusión	59
5.2.1.1.	Alimentador de filamento Titan E3D.....	60
5.2.1.2.	Motor PAP NEMA17 – 17HS3401.....	61
5.2.1.3.	Fusor All metal Hot–end V6	62
5.2.1.4.	Boquilla de latón Ø 0,4 mm.....	63
5.2.2.	Base de impresión	64
5.2.2.1.	Cama calefactable MK3 ALU 12 V 220 x 220 x 3 mm	65
5.2.3.	Sensor de proximidad.....	67
5.2.3.1.	Sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.....	67
5.3.	CONTROL DE LA IMPRESORA.....	68
5.3.1.	Conexión Serie.....	70
5.3.2.	Software de control.....	73
5.3.2.1.	Octoprint	75
5.4.	DISEÑO DE PIEZAS NECESARIAS.....	76
5.4.1.	Sujeción del extrusor al carro.....	76
5.4.2.	Sujeción del sensor al carro.....	78
5.4.3.	Apoyo de la cama a la mesa de trabajo	79
5.5.	MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA.....	80
5.5.1.	Instalación del firmware en la placa.....	80
5.5.2.	Verificación de comunicaciones.....	81
5.5.3.	Cableado de los motores de 8 hilos	81
5.5.4.	Conexionado de elementos.....	82
5.5.5.	Ensamblaje de componentes	85
5.5.6.	Ajustes de la configuración y calibrado.....	88
5.5.6.1.	Parámetros dimensionales.....	88
5.5.6.2.	Ejes	91
5.5.6.3.	Extrusor	91
5.5.6.4.	Ajuste de velocidades máximas	91
5.5.6.5.	Ajuste PID para el control de temperatura	92
5.5.6.6.	Nivelado de la cama	93
5.6.	PRUEBAS DE IMPRESIÓN	94
5.6.1.	Resultados	98

5.7. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y RESOLUCIÓN	99
6. MEMORIA ECONÓMICA	102
7. CONCLUSIONES	104
8. LÍNEAS FUTURAS.....	105
9. BIBLIOGRAFÍA	106
10. ANEXOS.....	107
Anexo A	107
Anexo B	116
Anexo C	119
Anexo D.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema gráfico del proceso de extrusión de filamento.....	2
Figura 2. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XZ.....	5
Figura 3. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XY.....	5
Figura 4. Disposiciones de las correas para el movimiento en plano XY en los casos de cinemática H-BOT y COREXY	6
Figura 5. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XYZ.....	6
Figura 6. Ejemplo de una impresora 3D con cinemática Delta.....	7
Figura 7. Ejemplo de una impresora 3D con cinemática polar.....	7
Figura 8. Ejemplo de un robot antropomórfico con funcionalidad de FDM.....	8
Figura 9. Ejemplo de un robot SCARA con funcionalidad de FDM.....	9
Figura 10. Ejemplo de la estructura correspondiente a una impresora 3D.....	10
Figura 11. Ejemplo de motores híbridos bipolares de diferentes tamaños.....	11
Figura 12. Representación gráfica del comportamiento <i>Full-step</i> y <i>Half-step</i> de un motor PAP de dos fases.....	11
Figura 13. Representación gráfica del comportamiento de un motor PAP de dos fases con <i>microstepping</i>	12
Figura 14. Ejemplo de correa y polea dentada (1) y husillo (2).....	13
Figura 15. Ejemplo de guía cilíndrica con rodamiento.....	13
Figura 16. Ejemplos de elementos de adhesión: Cinta azul, cinta Kapton y lámina de PEI.....	14
Figura 17. Ejemplos de camas calefactables, cuadrada de aluminio (1) y circular de PCB (2). ..	14
Figura 18. Esquema gráfico de las partes principales del fusor.....	15
Figura 19. Ejemplos de boquillas de diferentes materiales: latón , acero endurecido, acero inoxidable y latón con punta de rubí.	16
Figura 20. Ejemplos de extrusores multi-material: Cyclops (1) y Diamond hot-end (2).....	17
Figura 21. Ejemplos de placas bases: Placa específica de impresión 3D (1) y placa Arduino Mega con el complemento y drivers necesarios para impresión 3D (2).....	18
Figura 22. Ejemplo de fuente de alimentación de 24 V.....	19
Figura 23. Ejemplo de un panel táctil empleado en impresoras 3D FDM.....	19
Figura 24. Máquina de CNC ensamblada de la UPV.....	22
Figura 25. Estructura metálica de la máquina.....	23
Figura 26. Carro metálico de la máquina CNC.....	23
Figura 27. Conjunto correspondiente al eje Z.....	24
Figura 28. Conjunto correspondiente al eje X.....	24

Figura 29. Guías de desplazamiento correspondientes al eje Y.....	24
Figura 30. Base de trabajo.....	25
Figura 31. Husillo correspondiente al eje Z.....	25
Figura 32. Poleas y correa de transmisión del eje X y del eje Y respectivamente.	26
Figura 33. Poleas y correa de transmisión del eje Y.....	26
Figura 34. Tipo de motor PAP empleado para el movimiento de los ejes.	27
Figura 35. Gráfica con la curva característica de los motores HY200-2232-190A8 [3].....	28
Figura 36. Esquemas eléctricos de las conexiones paralelo y serie de los motores PAP bipolares híbridos.....	29
Figura 37. Final de carrera utilizado en la máquina CNC.	29
Figura 38. Esquema de conmutación y dimensiones del final de carrera.....	30
Figura 39. Fuente de alimentación empleada para el funcionamiento de la placa STEVAL-3DP001V1.....	31
Figura 40. Fuente de alimentación disponible para la alimentación de la cama calefactable. ..	31
Figura 41. Placa STEVAL-3DP001V1.....	32
Figura 42. Componentes electrónicos principales que forman la placa STEVAL-3DP001V1.	32
Figura 43. Estructura del firmware Marlin4ST.	41
Figura 44. Montaje interior del extrusor Titan E3D.	60
Figura 45. Alimentador Titan E3D desmontado.....	61
Figura 46. Motor NEMA17-17HS3401.	61
Figura 47. Fusor All metal Hot-end V6.	63
Figura 48. Boquilla de latón con \varnothing 0,4 mm de extrusión.....	63
Figura 49. Sistema de extrusión de la impresora ensamblado al completo.	64
Figura 50. Frontal y reverso de la placa de aluminio MK3 ALU 12 V.	65
Figura 51. Vidrio de borosilicato de 220 mm x 220 mm.	66
Figura 52. Componentes principales de la cama calefactable.....	66
Figura 53. Sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.....	68
Figura 54. Ejemplo de LCD empleado en Impresoras 3D.....	69
Figura 55. Modulo FT232 Convertidor USB a serie TTL UART conectado al aislador de bus.....	70
Figura 56. Aislador de canal digital dual STISO621 con direccionalidad 1-1.....	71
Figura 57. Conexión realizada entre el módulo FT 232 y el aislador STISO621.	71
Figura 58. Conexión UART realizada en los pines de la placa STEVAL-3DP001V1.	72
Figura 59. Módulo para comunicación Serie preparado con el cable miniUSB.....	72
Figura 60. Interfaz del software Pronterface.	74
Figura 61. Interfaz del software Repeater Host.....	74

Figura 62. Interfaz del software Octoprint.....	75
Figura 63. Modelo CAD y pieza final impresa del soporte del extrusor.....	77
Figura 64. Modelo CAD y pieza final impresa del soporte del sensor.....	79
Figura 65. Modelo CAD y pieza final impresa del apoyo de la cama de impresión.	80
Figura 66. Interfaz de conexión serie de Octoprint.....	81
Figura 67. Conjunto ensamblado de un soporte de la base de impresión.	86
Figura 68. Base de impresión completamente ensamblada.	86
Figura 69. Amarre del sensor de final de carrera Zmax.	86
Figura 70. Amarre del extrusor al soporte.	87
Figura 71. Amarre del soporte extrusor junto con el extrusor al carro de la máquina.	87
Figura 72. Amarre del soporte del sensor de nivelado al carro.	88
Figura 73. Todos los componentes (conjunto extrusor, sensor y respectivos soportes) ensamblados en el carro.	88
Figura 74. Diferentes áreas y límites con los que cuenta la máquina.....	89
Figura 75. Esquema de la matriz generada para la nivelación junto con el orden de detección de los puntos.....	94
Figura 76. Valores obtenidos de la matriz de corrección tras ejecutar <i>Auto Bed Leveling</i>	94
Figura 77. Sistema de impresión 3D resultante.	95
Figura 78. Pieza cubo XYZ impresa sobre la cama calefactable.	97
Figura 79. Piezas obtenidas de las pruebas de impresión, cubo XYZ y cilindro.	98
Figura 80. Sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX-5V.	100
Figura 81. Componentes y zonas térmicas correspondientes a un <i>Hot-end</i> V6.	101
Figura 82. Filamento en correcto estado (arriba) frente al filamento retirado de un atasco (abajo).	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los motores PAP híbridos bipolares de la máquina.	28
Tabla 2. Datos de transmisión de movimiento entre motor y husillo.	53
Tabla 3. Valores de los parámetros de aceleración.	54
Tabla 4. Valores de los parámetros de <i>Jerk</i>	54
Tabla 5. Características de los motores PAP NEMA17 del extrusor.....	62
Tabla 6. Características del sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.....	67
Tabla 7. Conexiones del sensor de detección.	68
Tabla 8. Conexiones entre el módulo de conexión serie y la placa STEVAL-3DP001V1.....	71
Tabla 9. Conexiones de cables realizadas en los motores híbridos bipolares de 8 hilos.	82
Tabla 10. Conexión de los pines de alimentación.	82
Tabla 11. Conexión de los pines correspondientes a los ejes.	83
Tabla 12. Conexión de los pines correspondientes al extrusor.	83
Tabla 13. Conexión de los pines correspondientes a la cama calefactable.	84
Tabla 14. Conexión de los pines correspondientes a los finales de carrera mínimos.....	84
Tabla 15. Conexión de los pines correspondientes a los límites máximos y el sensor de nivelado.....	84
Tabla 16. Elementos que componen los soportes de la cama de impresión.....	85
Tabla 17. Posiciones máximas alcanzables por el carro.....	89
Tabla 18. Posiciones mínimas alcanzables por el carro.	90
Tabla 19. Desplazamiento del sensor de detección de nivel respecto a la boquilla.....	90
Tabla 20. Límites de recorrido programados.	90
Tabla 21. Velocidades máximas para cada eje.....	92
Tabla 22. Valores de las constantes PID para el control de T ^a del extrusor.....	93
Tabla 23. Valores de las constantes PID para el control de T ^a de la cama caliente.	93
Tabla 24. parámetros de impresión definidos para las impresiones.	96
Tabla 25. Características del sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX-5V.	100
Tabla 26. Resumen de costes del proyecto.....	103

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Acrilonitrilo butadieno estireno
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate	Acrilonitrilo Estireno Acrilato
BSP	Board Support Package	Paquete de Soporte de Placa
CAD	Computer aided design	Diseño asistido por ordenador
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard	Interfaz Estándar del Software de Microcontrolador Cortex
CNC	Computer Numerical Control	Control Numérico por Computadora
FDM	Fused Deposition Modelling	Modelado por deposición fundida
FFF	Fused Filament Fabrication	Fabricación por Filamento Fundido
GND	Ground	Tierra
GPIO	General Purpose Input/Output	Entrada/Salida de Propósito General
GUI	Graphical User Interface	Interfaz Gráfica de Usuario
HAL	Hardware Abstraction Layer	Capa de Abstracción Hardware
I2C	Inter-Integrated Circuit	Circuito Inter-Integrado
IDE	Integrated Development Environment	Entorno de Desarrollo Integrado
LCD	Liquid Cristal Display	Pantalla de Cristal Líquido
NA-NC	Normalmente Abierto- Normalmente Cerrado	
NTC	Negative Temperature Coefficient (Thermistor)	Coficiente de Temperatura Negativo (Termistor)
R_{DS(ON)}	Drain-Source Resistance	Resistencia entre Drenaje - Fuente
OTG (USB)	On The Go	
PAP	Paso a Paso	
PC	Policarbonato	
PCB	Printed Circuit Board	Placa de Circuito Impreso
PEEK	Polyetheretherketone	Poliéter éter cetona
PEI	Polyetherimide	Polieterimida
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Poliéster de glicol
PLA	Polylactic acid	Ácido poliláctico
PTFE	Politetrafluoroetileno (Teflón)	
PWM	Pulse Width Modulation	Modulación de Ancho de Pulso
RPI	Raspberry PI	
SCARA	Selective Compliance Articulated Robot Arm	Brazo robótico articulado de cumplimiento selectivo
SLA	Stereolithography	Estereolitografía
SPI	Serial Peripheral Interface	Interfaz Periférica Serie
TPU	Thermoplastic polyurethane	Poliuretano termoplástico
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	Receptor/Transmisor Universal Asíncrono

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es un proceso de fabricación que ha ido ganando cada vez más importancia en las últimas décadas hasta convertirse en uno de los factores principales de la industria 4.0.

Este cambio se debe principalmente al pasar de unos procesos de fabricación mayoritariamente basados en la retirada de material (mecanizado, troquelado, etc.) a un proceso de adición, lo que ha supuesto un giro en la forma de producir, implementando la individualización y una mayor flexibilidad en procesos de fabricación a nivel industrial.

Sin embargo, no ha sido solo a nivel profesional sino que dada la sencillez de algunos métodos de impresión (como FDM o fotopolimerización), movimientos como *Maker* y la accesibilidad a las impresoras, así como a las piezas y componentes de las mismas, que ha supuesto que un gran número de personas a nivel usuario dispongan, e incluso se hayan fabricado, una de estas máquinas.

En esta ocasión, con el fin de renovar la aplicación de una máquina CNC previamente empleada para taladrado o mecanizado, se ha decidido implementar la funcionalidad 3D en dicho sistema.

1.1. IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva, muchas veces también conocida como impresión 3D, es un proceso de fabricación que consiste en fabricar piezas a partir de un modelo digital mediante la adición de material, depositando para ello capas de forma sucesiva.

Este proceso tiene su origen en 1986 cuando de la empresa 3D System desarrolló las primeras piezas de prototipado fabricadas mediante SLA (estereolitografía). Poco después, en 1992 la empresa Stratasys creó una máquina de prototipado rápido mediante FDM. En 2006 al expirar la patente sobre la tecnología FDM, esta tecnología cogió fuerza, surgiendo movimientos como RepRap un proyecto libre con la finalidad de crear máquinas de impresión 3D autorreplicables, y haciendo que a día de hoy sea una de las tecnologías más empleadas a nivel de usuario. De forma paralela, el continuo avance tecnológico junto con nuevas necesidades de mercado ha dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías.

Existen diferentes procesos de fabricación aditiva, dependiendo de la tecnología de aporte, el tipo de material empleado, la fuente de energía, etc. Estos procesos se pueden dividir en siete grupos principales dependiendo de la tecnología empleada.

- Fotopolimerización
- Extrusión
- Inyección de material
- Inyección de aglutinante
- Fusión en cama de polvo
- Deposición de energía directa
- Laminación de hojas

La amplia variedad de procesos permite también emplear, dependiendo el caso, materiales que van desde polímeros, fotopolímeros y ceras hasta materiales metálicos, cerámicos e incluso se han desarrollado aplicaciones donde es hormigón el material depositado.

1.2. IMPRESORAS FDM

La impresión de modelado por deposición fundida o FDM (*Fused deposition modelling*) también conocida como fabricación por filamento fundido o FFF (*Fused filament fabrication*) es una tecnología de impresión 3D mediante extrusión que consiste en la fundición y deposición de un material termoplástico capa a capa. Para ello el filamento, recogido en bobinas, es calentado, extruido y depositado en cordones en el plano XY mientras que las capas se van incrementando en el eje Z, Figura 1.

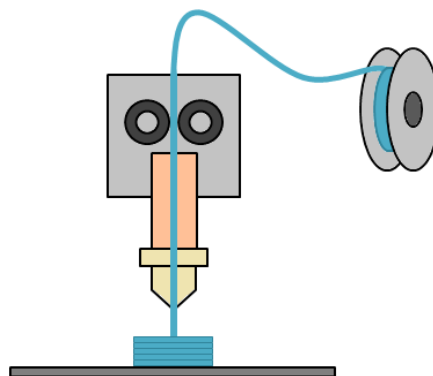


Figura 1. Esquema gráfico del proceso de extrusión de filamento.

Puesto que durante el proceso el material es fundido y extruido, es necesario que este sea un material termoplástico. A partir de ahí dependiendo de la aplicación y los requerimientos de la pieza final se pueden emplear materiales como el PLA, ABS, PETG, TPU (termoflexible), ASA, Nylon (poliamida), PC... o en el caso de piezas industriales, materiales técnicos como PEEK o PEI. También se pueden obtener piezas compuestas, añadiendo al filamento partículas (de madera, metálicas), o composites con mejores propiedades mecánicas, añadiendo fibras de carbono, de vidrio o Kevlar.

En este proceso de FDM se parte de un modelo digital, ya sea generado mediante alguna herramienta CAD, descargado de alguna plataforma o escaneado y digitalizado. El archivo es exportado al formato .stl, y posteriormente es importado en un programa de segmentación o *slicer*. En estos programas como Cura, Simplify 3D, Slic3er etc. se configuran los parámetros de impresión, y con la geometría y las condiciones especificadas se genera el archivo de impresión, que consiste en comandos que indican las ordenes que tiene que seguir la impresora para aportar material y generar la pieza física. Estos comandos generalmente suelen estar escritos en el lenguaje G-code, una variación del lenguaje empleado en la programación de máquinas CNC, sin embargo, dependiendo de la maquina y de forma menos frecuente también pueden estar escritos en formato binario .x3g.

Dentro de la tecnología de FDM, dependiendo de las prestaciones, el precio y los derechos de patente de las máquinas, se pueden diferenciar los equipos de entorno cerrado y los equipos libres o de código abierto. Los primeros son los empleados en entornos profesionales, cuentan con equipos de coste elevado, un mantenimiento exhaustivo y materiales propios con mayores prestaciones. Por otro lado, los equipos libres son los mayoritariamente empleados en entornos de aprendizaje, desarrollo o a nivel de usuario, debido a su bajo coste (en comparación) a la facilidad de obtener recambios y la gran flexibilidad que presentan para realizar personalizaciones. Esta libertad también permite emplear materiales de fabricación de distintos fabricantes (siempre y cuando el sistema sea compatible), sin embargo no resultan en equipos lo suficientemente robustos y fiables como para aplicaciones de fabricación a nivel profesional.

Dentro de las aplicaciones más relevantes para las que se emplea esta tecnología podemos encontrar:

- Creación de prototipos, tanto para la comprobación ergonómica y dimensional de diseños como para la comprobación funcional de piezas.
- Creación de maquetas y modelos conceptuales, facilitando la visualización y creación de ideas de forma tangible.
- Fabricación personalizada de utillajes, ya sea para emplear durante el proceso de producción o para la verificación de piezas correctas durante el control de calidad.
- Fabricación de producto final. A veces por el acabado obtenido se emplea como un componente oculto, no obstante, si el acabado superficial es adecuado se puede emplear como componente visible.

1.2.1. Tipos de impresoras

Respecto a los tipos de máquinas existentes, es en el ámbito de los equipos libres donde se encuentra una mayor variedad de máquinas dependiendo del tipo de movimiento que estas realizan. Es por ello que se pueden diferenciar los siguientes grupos principales.

IMPRESORAS CARTESIANAS

Son el tipo de impresora más frecuente, debido a su sencillez. Están basadas en las coordenadas X, Y y Z de forma similar a las máquinas de control numérico. Cada eje cuenta con un motor para realizar el movimiento y dependiendo de la configuración de estos se pueden clasificar de la siguiente manera.

Cartesianas XZ. Estas impresoras desplazan el cabezal a lo largo del eje X que a su vez se desplaza verticalmente en el Z. La base por lo contrario se desplaza en el eje Y, Figura 2.



Figura 2. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XZ.

Fuente: www.robotopia.es/kits-educativos/197-13-impresora-3d-anycubic-i3-mega-s.html

Cartesiana XY. En este caso el cabezal se desplaza por el plano XY, mientras que la base es la que se desplaza en Z.



Figura 3. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XY.

Fuente: www.in3dp.com/venta/impresoras3d/ultimaker-2/

Dentro de este tipo de impresoras también se pueden encontrar las de tipo CoreXY y las H-Bot. Estos dos tipos de máquinas utilizan dos motores con ayuda de largas correas para desplazar el cabezal en el plano XY en vez de un motor para el movimiento individual de cada eje y se diferencian en el sistema de transmisión ya que la primera utiliza dos correas mientras que la segunda únicamente una, Figura 4.

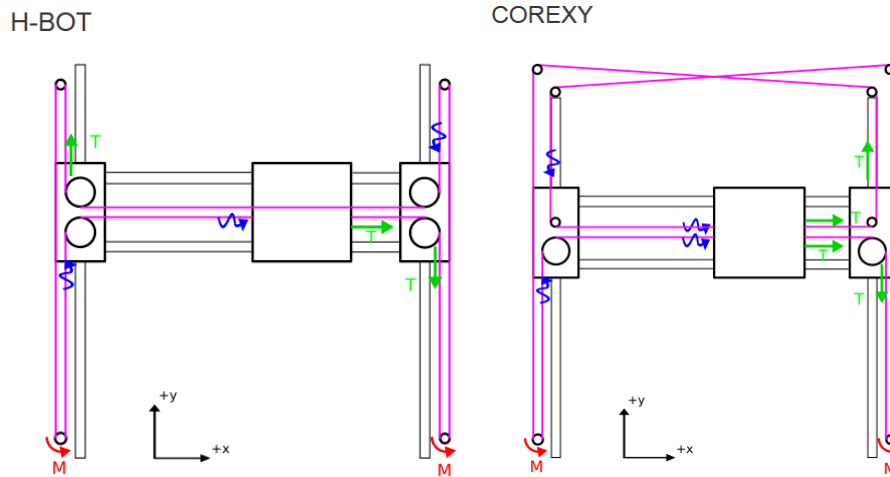


Figura 4. Disposiciones de las correas para el movimiento en plano XY en los casos de cinemática H-BOT y COREXY
Fuente: www.smoothieware.org/hbot

Cartesiana XYZ. En estas impresoras se mueve el cabezal y los ejes que lo soportan mientras que la base se mantiene fija, Figura 5.

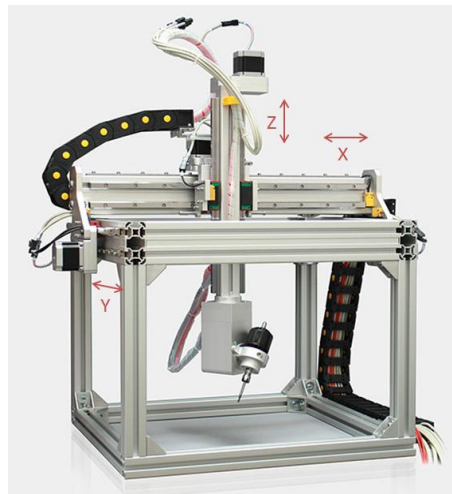


Figura 5. Ejemplo de una impresora 3D cartesiana con cinemática XYZ.
Fuente: www.5axismaker.com/5axis/

IMPRESORAS DELTA

Son impresoras que siguen el mismo principio que los robots Delta, Figura 6. En este caso las máquinas tienen una base fija circular y tres guías verticales por donde se desplazan arriba y abajo las sujeciones de los tres brazos a los que está sujeto el extrusor en una configuración triangular. De esta forma, con el movimiento vertical de los soportes y la combinación de los ángulos que generan, el extrusor puede desplazarse a cualquier posición en tres dimensiones.



Figura 6. Ejemplo de una impresora 3D con cinemática Delta.

Fuente: www.es.dhgate.com/product/high-precision-he3d-reprap-k200-delta-diy/648425910.html

Este tipo de impresoras destacan por que dada su configuración pueden alcanzar mayores velocidades de impresión con una calidad de impresión similar a las cartesianas y debido a su forma estructural, permiten imprimir piezas más altas. Sin embargo, es más complicado ajustar su precisión debido a la simultaneidad del movimiento de los motores para el posicionamiento.

IMPRESORAS POLARES

Las impresoras polares, Figura 7, a diferencia de las cartesianas y las delta, emplean el sistema polar para el posicionamiento en plano, es decir, obtienen la longitud o radio y el ángulo de cada punto. La coordenada Z, sin embargo, sigue manteniéndose de forma lineal.

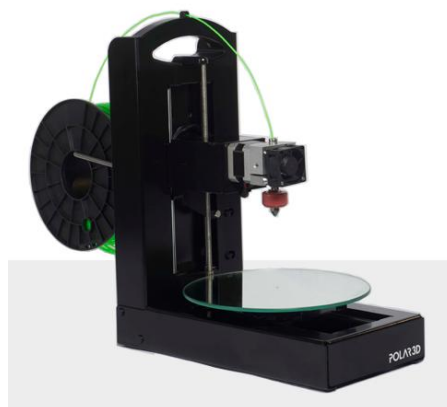


Figura 7. Ejemplo de una impresora 3D con cinemática polar.

Fuente: www.3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/

En este caso la base, de forma circular, gira para alcanzar el ángulo mientras que el cabezal se desplaza alejándose y acercándose al centro y subiendo la altura en Z. Aunque también existen máquinas que mantienen el cabezal fijo y solo lo mueven en Z mientras que es la cama la que gira y se desplaza de forma lineal para modificar la distancia de la longitud.

Dada esta configuración, es una máquina que como mínimo necesita dos motores para el desplazamiento y otro para la extrusión, lo que implica un menor consumo energético. Además, debido al diseño compacto, en comparación con los otros tipos de impresora, obtiene volúmenes de impresión mayores en un espacio menor.

Una de las desventajas del sistema polar, es que se genera una pérdida de precisión al alejarse de las posiciones más cercanas al centro, sin embargo, es un sistema con buenos resultados a la hora de hacer piezas con forma cilíndrica.

ROBOTS

El último tipo de impresión FDM, es la llevada a cabo por robots mayormente de tipo antropomórfico o SCARA. En este caso, a un manipulador mecánico programable ya existente se le implementa la función de adición de material añadiendo un extrusor como herramienta, Figura 8.



Figura 8. Ejemplo de un robot antropomórfico con funcionalidad de FDM.

Fuente: www.archdaily.com/867696/atropos-this-6-axis-robot-arm-can-3d-print-fiberglass-composites

Dada la estructura del sistema se obtiene una gran flexibilidad, al no requerir de una cama fija. Esto supone una mayor movilidad, pudiendo realizar trayectorias complejas lo que sumado un mayor movimiento del extrusor permite conseguir diseños más complicados. Sin embargo, no se obtiene ni la precisión ni la repetitividad de otras máquinas más especializadas y se obtienen resultados de menor calidad.

En el caso de los SCARA, Figura 9, sí se puede lograr una mayor precisión y repetitividad, sin embargo, este tipo de robots cuentan con un movimiento de los ejes XY y un área de construcción más limitada.

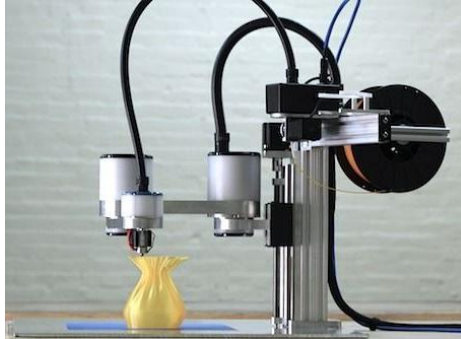


Figura 9. Ejemplo de un robot SCARA con funcionalidad de FDM.
Fuente: www.ibzstore.com/?product_id=107462004_44

Esta última es una tecnología más desarrollada a nivel industrial, dados los equipos necesarios, es por ello que a pequeña escala solamente se ha empleado de forma experimental y a gran escala aún se encuentra en desarrollo.

1.1.1. Componentes principales

Como se ha podido ver, existen varios tipos de impresoras y entre ellas también se pueden diferenciar distintos modelos, no obstante, la gran mayoría, a excepción de los robots, cuentan con los siguientes componentes principales.

ESTRUCTURA

La estructura la forman todos los elementos que forman la base de apoyo junto con el marco y donde se fijan todos los componentes, Figura 10. Es la parte encargada de aportar rigidez y estabilidad al sistema, ya que esta debe mantenerse fija durante el funcionamiento, recibiendo y disipando las aceleraciones y cargas de los de los elementos móviles.



Figura 10. Ejemplo de la estructura correspondiente a una impresora 3D.

Fuente: www.moviltronics.com/tienda/marco-impresora-3d-prusa-p3steel-acero-3mm-200x200x200mm/

La solidez de dicha estructura es uno de los factores que influyen en el resultado de impresión, ya que las vibraciones influyen negativamente. Es por ello que se emplean para su fabricación materiales rígidos como varillas y piezas de chapa metálica o perfiles de aluminio, aunque también es posible encontrar otros materiales, como en el caso de proyectos RepRap donde también se han empleado estructuras de contrachapado de madera.

MOTORES

En la gran mayoría de máquinas de impresión 3D mediante FDM, son los motores paso a paso o *steppers* los empleados para generar el movimiento. Esto se debe a que son motores asequibles, con un control sencillo y adecuados para los requerimientos de desplazamiento dentro de las impresoras. No obstante, dicho comportamiento encuentra limitaciones a velocidades demasiado elevadas, por lo que en máquinas preparadas para trabajar a un nivel industrial y no de escritorio, es posible encontrar servomotores en lugar de motores PAP, como en las máquinas de CNC.

Los motores paso a paso se pueden clasificar en tres tipos dependiendo su construcción interna. En primer lugar están los de reluctancia variable. Estos cuentan con un rotor de láminas ferromagnéticas no imantadas con dientes (formados por ranuras longitudinales) y un estator también de material magnético no imantado que tiene los bobinados que forman las fases en ranuras longitudinales. En segundo lugar están los de imán permanente, estos tienen un núcleo de imán permanente cilíndrico magnetizado radialmente en el rotor y un estator de un material ferromagnético con los bobinados correspondientes al número de polos del rotor. Finalmente están los híbridos, que son una combinación de los dos tipos anteriores, de forma que cuentan con un estator similar mientras que el rotor en este

caso tiene un imán cilíndrico imantado longitudinalmente con dos piezas cilíndricas de material ferromagnético dentadas acopladas en cada polo del rotor, para guiar las líneas magnéticas.

Además de la clasificación anterior, en el caso de los motores de imanes permanentes y los híbridos también se pueden diferenciar entre unipolares y bipolares. Los unipolares tienen dos bobinados por fase y la corriente únicamente puede ir en una dirección mientras que los bipolares tienen un bobinado por fase y la corriente puede ser bidireccional.

Estos últimos motores, los híbridos bipolares, Figura 11, son los más comercializados y los que se suelen emplear en las impresoras y demás aplicaciones.



Figura 11. Ejemplo de motores híbridos bipolares de diferentes tamaños.
Fuente: www.en.nanotec.com/products/2749-nema-23-stepper-motor-sca5618

Estos motores pueden controlarse de tres formas diferentes, mediante *full-step*, *half-step* o *microstepping*. En el caso del primero (para un motor PAP de dos fases), siempre se activan dos fases de forma que el motor se posiciona entre los dos polos alimentados obteniendo así cuatro posiciones. En *half-step* se emplea la misma dinámica pero en este caso se van alternando la alimentación de una y dos fases, por lo que se obtienen ocho posiciones, Figura 12.

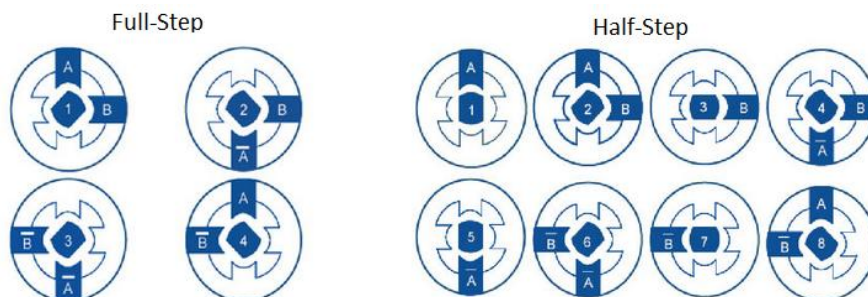


Figura 12. Representación gráfica del comportamiento *Full-step* y *Half-step* de un motor PAP de dos fases.
Fuente: www.robotpark.com/Stepper-Motor-Working

Por último en *microstepping*, Figura 13, se emplea un control con una mayor resolución, ya que para regular la corriente con la que son alimentadas las bobinas, se emplea la modulación PWM de la tensión, pudiendo dividir cada paso en 1/8, 1/16 e incluso a 1/32 dependiendo de la capacidad del controlador disponible para el motor. De esta manera, en cada micro-paso se avanza una posición, que debido al desfase de 90° entre fases, viene determinada por la corriente recibida en cada una de ellas. A medida que la corriente aumenta en B se reduce en A, alcanzando esta última un valor de cero cuando la B alcanza el máximo y repitiendo el proceso con el resto de fases. Asimismo, es importante no fijarse solo en la resolución ya que el aumento de esta influye negativamente en el par que es capaz de ejercer el motor.

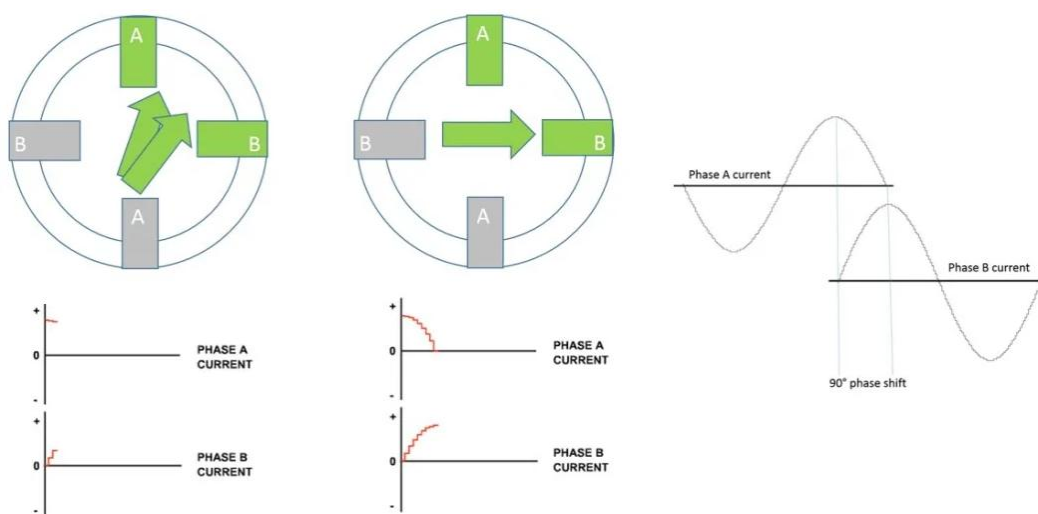


Figura 13. Representación gráfica del comportamiento de un motor PAP de dos fases con *microstepping*.
Fuente: www.rs-online.com/designspark/stepper-motors-and-drives-what-is-full-step-half-step-and-microstepping

Para poder obtener una mayor movimiento uniforme y una alta resolución, las placas de las impresoras cuentan con controladores de motores que emplean el control mediante *microstepping*.

TRANSMISION DE MOVIMIENTO

Para transformar el movimiento de rotatorio a lineal y poder transmitirlo al cabezal o extrusor, las máquinas cuentan con distintos mecanismos de transmisión donde los más empleados suelen ser poleas junto con correas dentadas y husillos, Figura 14.



Figura 14. Ejemplo de correa y polea dentada (1) y husillo (2).

Fuente (1): www.es.aliexpress.com/i/32971310418.html?gatewayAdapt=glo2esp

Fuente (2): www.orballoprinting.com/es/home/94-husillo-de-rosca-trapezoidal.html

De igual manera, para garantizar los movimientos lineales de las piezas móviles, las maquinas cuentan con guías de deslizamiento, las que se encuentran fijas en la estructura y por donde se deslizan los componentes con ayuda de rodamientos, Figura 15.



Figura 15. Ejemplo de guía cilíndrica con rodamiento.

Fuente: www.es.aliexpress.com/i/1005002448966726.html?gatewayAdapt=glo2esp

CAMA O BASE DE IMPRESIÓN

Existen dos tipos de bases de impresión principales, las simples y las calefactables. Las primeras son una base de un material lo más liso posible, frecuentemente vidrios templados, espejos o planchas de un material rígido que mantenga su planitud, al que es necesario añadir una capa o película intermedia de algún material adherente, Figura 16, (cintas adhesivas, hojas de PEI o laminas de materiales como Kapton (poliimida) o "Cinta Azul") para que la pieza no se mueva durante la impresión y luego sea posible retirarla sin dañar la base.



Figura 16. Ejemplos de elementos de adhesión: Cinta azul, cinta Kapton y lámina de PEI.

Las camas calefactables por lo contrario, emplean el calor para mantener esta adhesión. Aunque existen distintos tipos de camas calefactables (Figura 17), PCB de baquelita, PCB de aluminio, de silicona, de aluminio con resistencias... su funcionamiento es fundamentalmente el mismo. Este consiste en calentar la base por medio de un circuito de conductores o resistencias conectados de tal forma que repartan el calor por toda la base. Sobre las camas es necesario emplear una capa intermedia, que de igual manera que en el caso anterior permita retirar las piezas sin dañar la base. En esos casos además de los vidrios y los espejos también se emplean planchas magnéticas flexibles con una lámina de PEI o aerosoles adhesivos o pegajosos.



Figura 17. Ejemplos de camas calefactables, cuadrada de aluminio (1) y circular de PCB (2).

Fuente (1): www.createc3d.com/en/electronics/824-mk2a-30030030mm-reprap-ramps-14-pcb-aluminum-heatbed-heated-bed-mk3-for-3d-printer.html

Fuente (2): www.createc3d.com/en/electronics/473-buy-3d-printer-pcb-heated-bed-mk3-aluminium-price-offer.html

Se emplea este mecanismo debido a que es una de las maneras más efectivas de obtener una mejor adhesión de las piezas, ya que de lo contrario, el filamento depositado reduce la temperatura más rápido perdiendo la adhesión al contraerse.

Además de ser calefactables o no, se pueden encontrar bases de distintas formas, adecuándose a la geometría y al espacio disponible en la máquina. Las más utilizadas son las camas cuadradas o rectangulares y las de forma circular, Figura 17.

EXTRUSOR

El extrusor, es el conjunto encargado de la alimentación y deposición de filamento. Este componente puede dividirse en dos partes dependiendo de la función. Por una parte está el *Cold-end* o alimentador de filamento y por otra el *Hot-end* o fusor.

El alimentador es el encargado de traccionar o empujar el filamento hacia el fusor. Existen distintos modelos y diseños de extrusores, pero el principio de funcionamiento consiste en emplear un motor y una rueda con pequeñas muescas, de forma directa o con una pequeña reductora, tire del filamento si se trata de un alimentador de tipo directo o lo empuje si es uno de tipo *Bowden*.

El fusor, Figura 18, es la parte donde el filamento es calentado, fundido y finalmente depositado. De igual manera que los otros componentes, existen diferentes modelos dependiendo del fabricante o la marca pero todos cuentan con las partes principales que el bloque calefactor, garganta /barrera térmica, el dissipador de calor y la boquilla o *nozzle*.

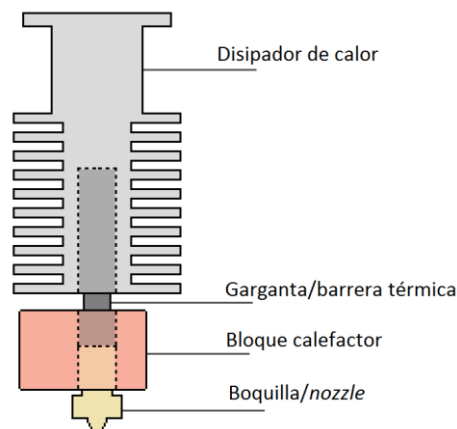


Figura 18. Esquema gráfico de las partes principales del fusor.

Al final del *hot-end* se encuentra la boquilla o *nozzle*. Este es el elemento a través del cual se deposita el material. Se pueden clasificar en base al diámetro de salida de filamento y al material del que están fabricadas.

El uso de una u otra viene determinado por la aplicación para la que se van a emplear. Dependiendo del acabado deseado en la pieza, o el tamaño de la misma, se emplean boquillas con un diámetro de salida u otro. En caso de imprimir piezas pequeñas que requieran de un alto nivel de detalle o un mejor acabado, se emplean boquillas con un diámetro de salida más pequeño ($0,1 < 0,4$ mm). Por lo contrario, si se van a fabricar piezas más grandes, el acabado no es tan importante o se requiere obtener antes la pieza, se utilizan boquillas con un diámetro mayor ($0,4 > 2$ mm).

Por otro lado, también influye el material que se va a imprimir, ya que este determinará el material de la boquilla, Figura 19. Se pueden encontrar boquillas de latón, las más empleadas para materiales plásticos simples, ya que son baratas, duraderas y tienen una buena conductividad térmica. También se emplean boquillas de acero endurecido y acero inoxidable. Las primeras se utilizan en aplicaciones donde el material a extruir es mas abrasivo porque contiene partículas/fibras y se necesita una mayor resistencia al desgaste. Sin embargo, no conducen tan bien el calor y contienen Plomo, un material peligroso. Las boquillas de inoxidable por lo contrario, presentan una mayor dureza que el latón y permiten imprimir materiales para el contacto con la piel y con alimentos. Finalmente también existen las boquillas de latón con punta de rubí, que combinan una gran resistencia al desgaste con una elevada conductividad térmica, sin embargo debido al coste elevado son las menos empleadas.



Figura 19. Ejemplos de boquillas de diferentes materiales: latón , acero endurecido, acero inoxidable y latón con punta de rubí.

Como mínimo es necesario que las impresoras cuenten con un extrusor, pero existen modelos que cuentan con dos o más empleando para cada uno un filamento diferente, y estos pueden moverse en el mismo cabezal o de forma independiente. De igual manera, aunque se han mencionado los *Hot-end* simples y frecuentemente más utilizados, existen variaciones más complejas, que son capaces de extruir simultáneamente varios colores a través de un mismo *Hot-end* como pasa con el E3D-Cyclops o el *Diamond Hot-end*, Figura 20Figura 21.



Figura 20. Ejemplos de extrusores multi-material: Cyclops (1) y Diamond hot-end (2).

Fuente (1): www.amazon.com/Geetech-2-in-1out-hotend/dp/B06XJ1WCDF

Fuente (2): www.reprapworld.es/extruder/hot-ends/multi-extrusion/diamond-hotend/

PLACA BASE DE IMPRESORA 3D

El elemento más importante dentro de una impresora 3D es la placa base, ya que sin ella el resto de componentes no pueden cumplir su propósito. En la placa se encuentra el microcontrolador, encargado de controlar todos los elementos eléctricos conectados en ella. El procesador es el encargado de generar las ordenes de accionamiento de los distintos elementos a partir de los comandos G-code, así como de recibir la respuesta de los distintos sensores y variables dentro del proceso.

Se pueden encontrar placas específicas para impresión 3D, o placas de desarrollo, como por ejemplo Arduino Mega, al que añadiendo módulos específicos pueden convertirse en una placa para impresora 3D. De la misma manera, se pueden encontrar placas que vengan con los controladores de motores ya integrados, o no, y por lo tanto sea necesario añadir dicho módulo de forma adicional. Cada motor que tenga que ser controlado de forma independiente necesita uno de estos controladores, ya que son los encargados de enviar la corriente necesaria a cada fase del motor para que este avance en base a las señales recibidas desde el microprocesador.

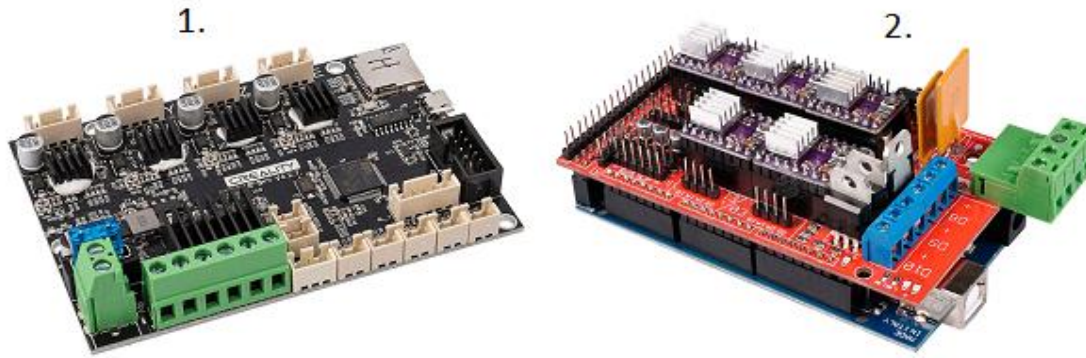


Figura 21. Ejemplos de placas bases: Placa específica de impresión 3D (1) y placa Arduino Mega con el complemento y drivers necesarios para impresión 3D (2)

Fuente (1): www.brildor.com/es/placa-base-v427-impresora-3d-creality

Fuente (2): www.electrocomponentes.es/shield/695-shield-ramps-14-impresora-3d-arduino-mega-reprap.html

Existen varios aspectos principales que determinan la placa que se puede utilizar en cada impresora. Un factor determinante es que la placa cuente con los puertos de conexión necesarios para poder conectar todos los componentes (numero de extrusores, motores, sensores ...) así como la compatibilidad con los elementos para su control. Otro de los aspectos más importantes es el firmware compatible con la placa. En algunos casos es posible cambiar el firmware del microcontrolador, pero habitualmente los firmwares están diseñados para funcionar en placas con una estructura y microcontrolador concretos. Dependiendo del tipo de impresora, el firmware junto con el microprocesador pueden ser determinantes. En el caso de las Delta, el control requiere una mayor capacidad de procesamiento debido a los cálculos que debe realizar para obtener la posición.

Dependiendo de las características adicionales (conexión via Wi-Fi, pines IO adicionales, lector de tarjeta microSD ...) y de la gama tanto de la placa como de sus componentes (procesadores de 8bit o 32bit, controladores de motor de mejor o más baja calidad, alimentación de 12 V o 24 V) se pueden encontrar diferentes placas. No obstante, en términos generales los componentes con un mayor coste/calidad permiten obtener mejores resultados de resolución así como un proceso de impresión más estable.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Como toda máquina, las impresoras 3D también necesitan una fuente de alimentación de donde obtener electricidad para su funcionamiento, Figura 22. en este caso la fuente es la encargada de transformar la corriente alterna de la red eléctrica a corriente continua. Se pueden encontrar máquinas que funcionen con 12 V o 24 V. Generalmente los 12 V son

empleados en maquinas pequeñas y medianas mientras que 24 V se emplean en máquinas más grandes.



Figura 22. Ejemplo de fuente de alimentación de 24 V.

Fuente: www.createc3d.com/es/comprar-electronica-impresora-3d/924-fuente-de-alimentacion-24v-500w.html

Es por ello que la fuente se debe adaptar del consumo del sistema debido a sus componentes (motores, cama, extrusor....) y a la tensión de alimentación para la que esté dimensionada la placa base.

PANTALLA DE CONTROL

Aunque no es un elemento fundamental, la mayoría de las impresoras 3D que se pueden encontrar en el mercado cuentan con un panel LCD o alguna pantalla táctil, Figura 23, para controlar impresora. De esta manera se pueden realizar diferentes tareas de limpieza calibración... así como ejecutar impresiones.



Figura 23. Ejemplo de un panel táctil empleado en impresoras 3D FDM.

Fuente: www.roboteer-bausatz.de/media/pdf/1f/7b/e2/MKS-TFT-3-5-V1-0Manual.pdf

En el caso de las impresoras que no cuentan con dicha pantalla, para controlarlas se hace uso de algún software de control compatible desde el que se pueden realizar las mismas acciones y a su vez también permite observar y monitorizar tanto el estado de la impresora

como los valores de distintos parámetros como puede ser el valor de la temperatura del extrusor o la cama en tiempo real.

1.3. ANTECEDENTES

En proyectos previos de la UPV se ha empleado la estructura junto con los componentes electromecánicos para desarrollar la función de máquina de control numérico por computador o CNC. En un primer proyecto [1] se llevo a cabo el rediseño y control del movimiento de los ejes mientras que en un segundo trabajo [2] se implementó la función de taladrado, añadiendo y programando el funcionamiento de la herramienta.

En ambos casos anteriores se utilizó la misma electrónica, la placa con los microcontroladores y los drivers para los motores PAP, para implementar el control del sistema. Sin embargo, en esta ocasión, aunque la placa sea del mismo fabricante, STMicroelectronics, y por consiguiente los controladores de los motores son el mismo o de la misma familia, en este caso la placa junto con el firmware, vienen enfocados más específicamente a la aplicación de impresión 3D.

2. OBJETIVOS

En este apartado se encuentran explicados los objetivos del proyecto.

El objetivo principal de este proyecto consiste en transformar una estructura de CNC ya existente junto con los componentes electromecánicos que incluye, en una impresora 3D de modelado por deposición fundida mediante la placa STEVAL-3DP00101 y el firmware Marlin.

Asimismo, para poder alcanzar el objetivo principal, será necesario cumplir los siguientes objetivos específicos:

Conseguir una correcta configuración del firmware adaptando todos los parámetros a las características físicas y propiedades de los elementos electromecánicos del sistema.

Implementar la funcionalidad de impresión de filamento a la máquina de forma correcta.

Obtener un diseño sencillo y eficaz de las piezas necesarias para la sujeción de distintos componentes como por ejemplo la base y el extrusor.

Adaptar el diseño de forma que sea posible llevar a cabo un ajuste/calibrado de la impresión para obtener el mejor resultado de impresión posible.

Implementar un control en la impresora, para poder realizar diferentes acciones como mandar ordenes, gestionar la impresión, analizar el estado etc.

Lograr un funcionamiento correcto de la impresora a la hora de ejecutar la orden de impresión de geometrías simples.

3. PLIEGO DE CONDICIONES

En el siguiente apartado se encuentra desarrollada la información acerca de los recursos, requisitos y condiciones específicas sobre el proyecto llevado a cabo en el departamento DISCA de la UPV durante el periodo mayo–octubre de 2021 y que consiste en el diseño y montaje de una impresora 3D de filamento plástico fundido a partir de una máquina de CNC previamente empleada en otros proyectos de la UPV.

3.1. MATERIAL Y RECURSOS

Dentro de los elementos necesarios para poder llevar a cabo el proyecto, se encuentran los que están disponibles en la Universidad. En primer lugar, está el grupo correspondiente a la máquina CNC, que se encuentra ya ensamblada, Figura 24, y está formada por los componentes que se describen a continuación.



Figura 24. Máquina de CNC ensamblada de la UPV.

3.1.1. Estructura Mecánica

La estructura en la que se basa la máquina, está formada por cuatro perfiles rectangulares de acero de dimensiones 40 x 60 mm situados en las cuatro esquinas en posición vertical respecto al suelo, limitando un área de trabajo rectangular. Estas cuatro barras se encuentran unidas en la parte inferior por una serie de perfiles y barras de hierro cuadrados y rectangulares en distintas disposiciones (horizontal, diagonal) para aportar rigidez, estabilidad y robustez a la estructura, Figura 25.



Figura 25. Estructura metálica de la máquina.

En los cuatro extremos superiores de las barras verticales se encuentran fijados los apoyos, fabricados en aluminio mecanizado, de las guías cilíndricas por las que se desliza el carro en los ejes X e Y, con ayuda de unos rodamientos lineales. Estas varillas de acero inoxidable templadas y rectificadas tienen un diámetro de 30 mm y dependiendo del eje de desplazamiento se encuentran en distintas disposiciones.

El carro de la máquina, Figura 26, donde se acopla la herramienta dependiendo de la aplicación, se encuentra en la parte inferior del conjunto de husillo con 2 guías verticales como se ve en la Figura 27, limitando así el desplazamiento en el eje Z.



Figura 26. Carro metálico de la máquina CNC.



Figura 27. Conjunto correspondiente al eje Z.

Todo este conjunto se encuentra unido a otro grupo de dos guías paralelas, una sobre otra, junto con otro husillo que permite únicamente el movimiento a lo largo del eje X, como se ve en la Figura 28.



Figura 28. Conjunto correspondiente al eje X.

Finalmente, para conseguir el desplazamiento en el eje Y, todo el conjunto anterior se desliza por las guías situadas en ambos laterales de la máquina. Puesto que este eje es el que soporta la mayor carga, el husillo empleado tiene un tamaño de diámetro mayor y el movimiento del motor se reparte en los dos husillos situados en ambos laterales para obtener un movimiento más uniforme, como se ve en la Figura 29.



Figura 29. Guías de desplazamiento correspondientes al eje Y.

La mesa o base de trabajo de la máquina, Figura 30, consiste en un tablero de madera de en la que se pueden ajustar las diferentes herramientas o utillajes necesarios en función de la aplicación para la que se prepare la máquina CNC. Esta base de 670 mm x 590 mm, está fijada por el contorno a un rectángulo formado por perfiles huecos de hierro de 40 mm x 40 mm. De igual manera, este perfil esta soldado a otro con forma de L en los dos contornos longitudinales. Estos últimos fijan la mesa a la estructura mediante tornillos, y se pueden ajustar a distintas posiciones de altura, lo que permite aumentar o reducir el espacio de trabajo disponible en el eje Z.



Figura 30. Base de trabajo.

3.1.2. Elementos de transmisión.

Para poder transformar el movimiento rotatorio de los motores en un movimiento lineal, la máquina dispone de husillos, Figura 31. Dependiendo de los ejes, se emplean dos tamaños diferentes. En el caso de los ejes X y Z el husillo empleado es un NSK 1006 lo que significa que tiene un diámetro de 10 mm y un paso de 6mm por revolución. En el caso del eje Y, se trata de un husillo NSK 1808, por lo que su diámetro es de 18 mm y tiene un paso de 8 mm por revolución.



Figura 31. Husillo correspondiente al eje Z.

Al no estar el motor directamente acoplado al husillo, se emplean un conjunto de correa y ruedas dentadas, Figura 32, para la transmisión motor–husillo. Al ser las ruedas de distinto calibre a la entrada y la salida, se obtiene una reductora, es decir se reduce la velocidad de entrada pero se obtiene un mayor par de salida.

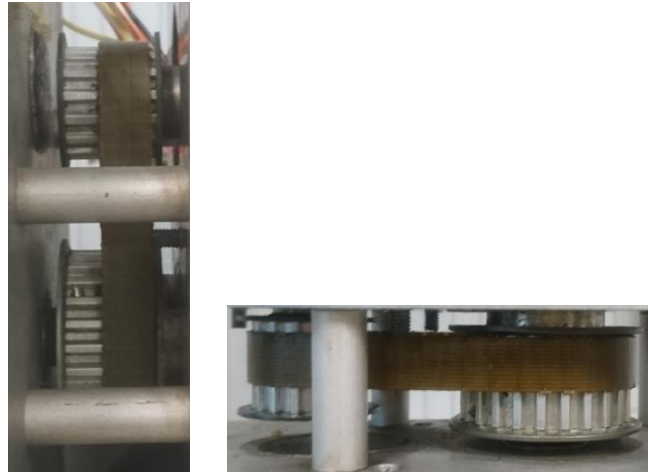


Figura 32. Poleas y correa de transmisión del eje X y del eje Y respectivamente.

Como se puede apreciar en la Figura 33, el sistema de transmisión del eje Y cuenta con varias poleas, sin embargo, solo la de entrada y la de salida son las que influyen en la velocidad, el resto sirven para mantener tensa la correa dentada.



Figura 33. Poleas y correa de transmisión del eje Y.

A continuación se muestran las características de las ruedas de transmisión respecto a cada eje. En el caso de las ruedas de entrada, todas cuentan con 15 dientes por lo que $Z_{eX,Y,Z} = 15$.

En el caso de salida se diferencian 2 grupos. Por un lado están los ejes X y Z cuyas ruedas de salida tienen 25 dientes por lo tanto $Z_{sX,Z} = 25$. Y por otro lado está el eje Y, que tiene 30 dientes en la rueda de salida por lo cual $Z_{sY} = 30$.

Teniendo esto en cuenta, se obtienen dos factores de reducción, uno para cada caso, aplicando la formula que se puede ver a continuación.

$$\frac{Z_e}{Z_s} = n$$

Para los ejes X y Z,

$$\frac{Z_{eX,Z}}{Z_{sX,Z}} = \frac{15}{25} = 0,6$$

Para el eje Y,

$$\frac{Z_{eY}}{Z_{sY}} = \frac{15}{30} = 0,5$$

De esa forma el factor de reducción correspondiente a los ejes X y Z es igual a $n_{X,Z} = 0,6$ y el correspondiente al eje Y tiene el valor de $n_Y = 0,5$.

3.1.3. Motores PAP híbridos

A fin de obtener el movimiento necesario para desplazar el carro, se emplean motores eléctricos. En este caso se disponen de motores paso a paso, más concretamente de motores paso a paso híbridos y bipolares, del calibre NEMA 23, Figura 34, y con la siguiente referencia del fabricante, MAE HY200-2232-190A8 [3].



Figura 34. Tipo de motor PAP empleado para el movimiento de los ejes.

En la Tabla 1 se muestran las características con las que cuentan los motores que controlan los ejes de la máquina.

Tabla 1. Características de los motores PAP híbridos bipolares de la máquina.

Motor	HY200-2232-190A8
Ángulo de paso (°)	1,8
Corriente nominal (A)	
- Unipolar	1,9
- Bipolar	2,7
Resistencia de fase (Ω)	2,2
Inductancia de fase (mH)	5,7
Par de aguante (N·m)	0,8
Par de detención ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot 10^{-3}$)	80
Inercia rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot 10^{-3}$)	0,023
Nº de cables	8
Longitud del motor (mm)	81,3
Peso (kg)	0,95

Una de las características más importantes del motor es la curva par-frecuencia de pasos que se muestra en la siguiente Figura 35. En ella se puede apreciar que a mayor número de pasos/s (o velocidad), el par se ve reducido. Por ello es importante no superar unos 800-1000 pasos/s para poder obtener una respuesta adecuada y no sufrir una caída del par en los motores.

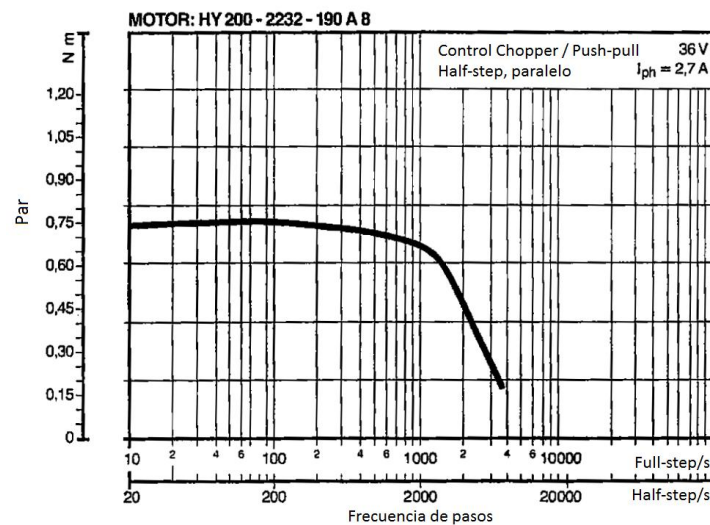


Figura 35. Gráfica con la curva característica de los motores HY200-2232-190A8 [3].

Por otro lado, también hay que tener en cuenta la forma en la que se conecta el motor, en serie o en paralelo, Figura 36. El tipo de conexión viene determinado por las necesidades de par y velocidad con las que cuente el sistema. En los motores bipolares se obtiene una mejor respuesta de par a velocidades bajas, ya que si se aumenta la velocidad en exceso, el par se ve reducido considerablemente.

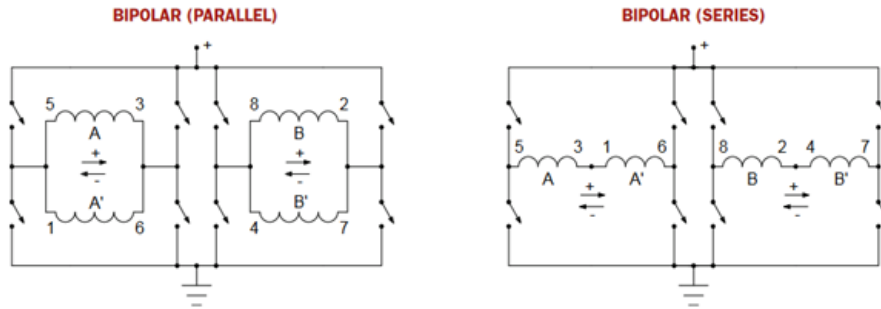


Figura 36. Esquemas eléctricos de las conexiones paralelo y serie de los motores PAP bipolares híbridos.

Fuente: www.ahs-antriebstechnik.de/images/PDFDateien/Service/Ametek_MAE.pdf

Este efecto se ve aumentado si los motores se encuentran conectados en serie, donde se pueden obtener pares elevados pero el aumento de velocidad afecta enseguida en la caída del par. En la conexión en paralelo sin embargo, se obtiene un par más estable para una mayor rango de velocidades, no obstante, esto requiere una corriente mayor, por lo que implica un aumento del consumo.

3.1.4. Sensores de final de carrera

Para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de la máquina, en los límites físicos de la misma, se encuentran ubicados sensores de final de carrera como los que se muestran en la siguiente Figura 37. En el caso de los ejes X e Y se encuentran instalados para la distancia mínima y máxima alcanzable por el carro, mientras que en el caso del eje Z, solamente para la distancia máxima.



Figura 37. Final de carrera utilizado en la máquina CNC.

Estos, son sensores mecánicos en los que hay que ejercer un contacto físico para accionarlos. De esta forma al ejercer el contacto, se conmuta el circuito interno, y por

consiguiente, se manda una señal eléctrica al controlador que en base a la programación interna, deberá mandar parar el movimiento en el eje correspondiente.

Los finales de carrera son del fabricante Cherry de la serie D4. Estos cuentan con 3 terminales, el número 1 es el conmutado mientras que el 2 es el normalmente cerrado y el 4 es el normalmente abierto, como se ve en la Figura 38.

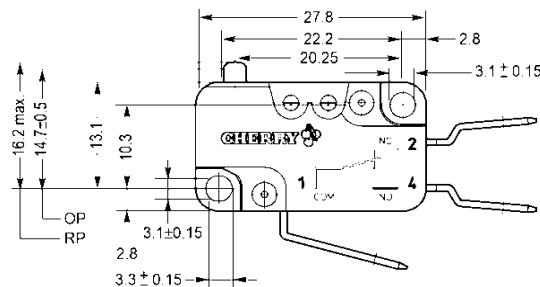


Figura 38. Esquema de conmutación y dimensiones del final de carrera.

Fuente: www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/482901.pdf

Por otro lado, se encuentran los componentes eléctricos y electrónicos que son:

3.1.5. Fuente de alimentación

Para el completo funcionamiento de la impresora, es necesario emplear dos fuentes de alimentación. Por un lado, la encargada de alimentar la electrónica de la placa junto con sus principales características, motores extrusor etc. y por otro lado, la fuente necesaria para la cama calefactable (en caso de emplearla), ya que es necesario proporcionarle una alimentación adicional. Es por ello, que las fuentes disponibles para emplear en el proyecto son las siguientes.

En primer lugar, la fuente para la placa es la que se puede observar en la Figura 39. Según el manual de la placa STEVAL-3DP001V1, la fuente de alimentación recomendada por el fabricante, es una de propia de ST que proporciona 12 V y 400 W de potencia. En este caso, se dispone de una fuente AC-DC que de una entrada de 230 V y 50 Hz puede proporcionar distintas tensiones DC de salida, entre ellas los 12 V necesarios, y 500 W de potencia, lo que sería más que suficiente para poder hacer funcionar la impresora.



Figura 39. Fuente de alimentación empleada para el funcionamiento de la placa STEVAL-3DP001V1.

Por otro lado, para la alimentación de la cama calefactable las características de la fuente necesarias dependerán de esta primera. Sin embargo, dado que la mayoría de camas se alimentan a 12 V o 24 V y requieren de una potencia no mayor de 200 W, con una de las fuentes de alimentación disponibles, Figura 40, es suficiente dado que estas cuentan con una potencia de 400 W y la capacidad de proporcionar distintos voltajes. No obstante, aunque la cama o la placa misma permita que la alimentación sea de 24 V, al ser la tensión máxima de salida de la fuente de 12 V se emplearía una cama adaptada a esta alimentación.



Figura 40. Fuente de alimentación disponible para la alimentación de la cama calefactable.

3.1.6. Placa de impresora 3D

La placa disponible para el proyecto es la STEVAL-3DP001V1, Figura 41. Esta es una placa de evaluación producida por STMicroelectronics donde todos los componentes principales de la PCB pertenecen a este fabricante, como se puede apreciar en la Figura 42.

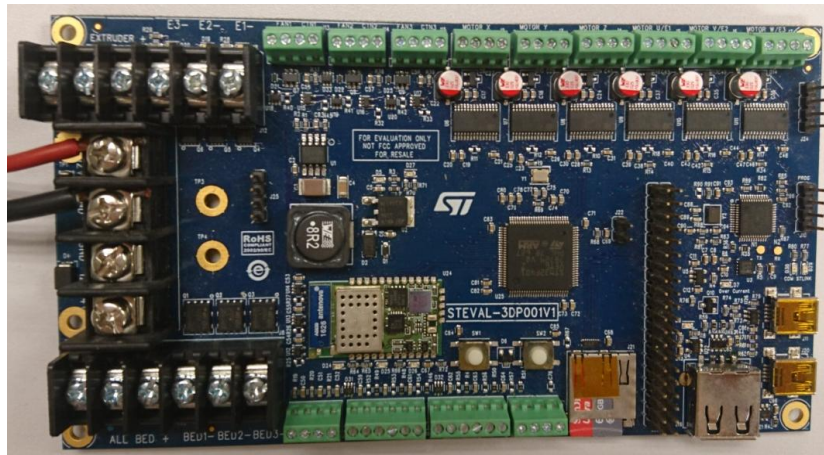


Figura 41. Placa STEVAL-3DP001V1.

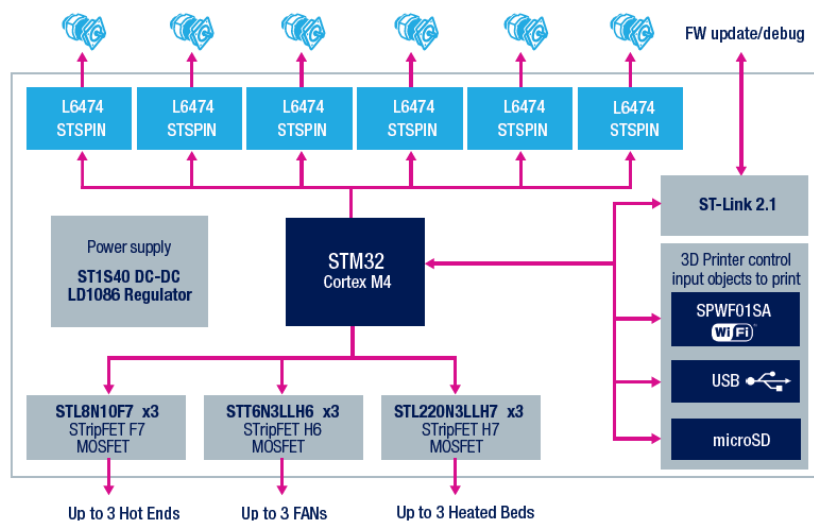


Figura 42. Componentes electrónicos principales que forman la placa STEVAL-3DP001V1.

Fuente: www.st.com/resource/en/flyer/flsteval3dp001v1.pdf

Esta, ha sido diseñada para la ser adaptable a todo tipo de impresoras 3D FDM, incluso las de tipo Delta que requieren de cálculos más complejos. Está preparada para que funcione de forma sencilla y autónoma con el firmware libre Marlin basado en ST. Para ello cuenta con el microcontrolador integrado STM32 basado en el núcleo ARM Cortex M4 de 32 bits STM32F401.

Dispone de una amplia capacidad de conectividad mediante distintos medios (Wi-Fi, microSD, USB...) así como la capacidad de conectar diferentes elementos periféricos como sensores (mecánicos, magnéticos, ópticos....) o paneles/teclados LCD externos. Estos últimos permiten un control directo de la impresora, mientras que mediante un PC también se puede controlar de forma remota.

La placa STEVAL-3DP001V1 también permite realizar conexiones a otras placas (como por ejemplo una Raspberry). Siendo para ello necesario una conexión de alimentación y otra de comunicación digital.

3.1.6.1. Hardware

A continuación se encuentran explicadas las características principales del hardware de la placa.

ALIMENTACIÓN

Para el correcto funcionamiento del sistema, la placa dispone de dos entradas de alimentación. La conexión principal se ha de conectar a 12 V DC, desde donde se alimentan los siguientes componentes de la placa, los motores que mueven los ejes, el motor que acciona el extrusor, el cartucho calefactor que calienta el *hot-end* y los pines de alimentación de 3,3 V y 5 V.

Por otro lado, para alimentar las camas calefactables, o incluso una cámara caliente, se dispone de otra toma de alimentación a la que se pueden conectar 24 o 12 V DC adicionales dependiendo de las características del componente a instalar.

CAMAS CALEFACTABLES

La placa puede controlar hasta tres camas calefactables (o cámaras calientes) de forma independiente con una corriente máxima de 20 A. De esta forma se pueden obtener amplias superficies de impresión en multi-zona. Para cada una dispone de un LED de estado y de conexiones para recibir la respuesta del NTC y realizar el control de la temperatura.

Para las camas utiliza drivers de calefacción de alta corriente, en este caso los MOSFETs de potencia STL220N3LLH7 con los que adapta la temperatura de las camas a las necesidades configuradas.

CONTROL DE MOTORES

La placa cuenta con la capacidad de controlar seis motores paso a paso, tres correspondientes al posicionamiento de los ejes principales, X, Y y Z y otros tres correspondientes a los extrusores. De esta forma se pueden controlar los motores de tres ejes de posición y de uno a tres extrusores distintos. Sin embargo, también existe la opción de

emplear todos controladores para el movimiento de ejes de posición, obteniendo de esta forma una máquina con seis ejes de posicionamiento (X, Y, Z, U, V y W) pero ningún extrusor.

Para controlar los *stepper* o motores PAP la placa tiene los controladores L6474 de la gama STSPIN del fabricante ST, el cual es específico para este tipo de motor eléctrico. Las principales características de este controlador, por las que destaca en términos de control y protección de corriente son las siguientes.

Gracias a control avanzado de corriente se obtiene una gran precisión y un nivel bajo de ruido. Dispone de un sensor integrado de la corriente, evitando la necesidad de otros elementos. Tiene un conjunto completo de funciones de protección y diagnóstico avanzado para una mayor fiabilidad frente a sobrecorrientes, sobrecalentamientos etc. Puede alimentarse hasta 45 V y alcanzar corrientes de 3 A_{RMS}. El controlador puede generar hasta 16 micro-pasos para el control del motor, así como detectar las señales digitales que limitan el recorrido.

Para controlar los límites físicos de los ejes, dispone de conectores de entrada para una señal digital generada por algún sensor que este situado en uno de los extremos del recorrido del eje. Para poder limitar ambos extremos, dispone de otros conectores en la ranura de expansión que se describirá más adelante.

CONTROL DE EXTRUSORES

En lo que a la parte del extrusor respecta, además del control de los motores que alimentan el material, la placa también es capaz de controlar hasta tres *hot-end* distintos con una corriente máxima de 8 A para cada uno. Para ello utiliza MOSFETS de potencia específicos de ST que calientan el fusor y controlan los ventiladores que disipan el exceso de calor.

Al igual que en el caso de las camas calefactables, los MOSFET son de una alta eficiencia y minimizan las pérdidas energéticas gracias a la baja R_{DS(on)} que tienen.

También cuenta con LEDs de estado y un control de temperatura mediante NTC para poder realizar el control de temperatura del fusor.

INTERFACES DE CONECTIVIDAD

La placa cuenta con distintos interfaces de conexión, y puede realizar las impresiones por distintos medios como son UART, micro SD o mediante conexión Wi-Fi.

Por un lado cuenta con un conector microSD mediante el que se pueden realizar transmisión y almacenamientos de datos en una tarjeta microSD.

Por otra parte, también cuenta con dos tipos de conexiones USB. Este se puede emplear como USB OTG y emplearlo para la transferencia de datos o como USB Dongle y añadir más características de comunicación.

Por último, también cuenta con conectividad Wi-Fi integrada gracias a el módulo Wi-Fi compacto SPWF01SA. Este cuenta con una antena embebida, y mediante el protocolo TCP/IP que lleva integrado es capaz de conectarse a un servidor web desde el que se puede controlar la impresora mediante dispositivos portátiles y con programas de impresión 3D.

DEPURACIÓN

La placa incluye una solución de depuración completa (STLINK-V2), una herramienta muy útil para la depuración y actualización del Firmware dentro del entorno OpenSTM32. ST-LINK permite distintos modos de conexión USB, en forma de puerto COM virtual o en forma de almacenamiento masivo.

INTERRUPTORES Y RANURA DE EXPANSIÓN

La placa cuenta con dos interruptores S1 y S2. El primero sirve para resetear todas las CPUs de la placa y los periféricos. El segundo por lo contrario es configurable y se puede adaptar para que el usuario interactúe por medio de él en el programa.

Para ampliar las funcionalidades con las que ya cuenta la placa mediante la conexión de más elementos hardware, esta dispone de una ranura de expansión con 40 pines que permiten implementar las siguientes conexiones.

- Señales de límite de los ejes (X, Y ,Z ,U ,V ,W)
- Señales de respuesta del NTC de las camas calefactables
- Señales PWM de las camas calefactables
- Señales PWM de los ventiladores
- Interfaz de tarjeta SD

- Interfaz SPI
- Interfaz UART
- Interfaz I2C
- Interfaz USB (compartida en USB Dongle y OTG)
- 4 pines GPIO
- Alimentación de 3,3 V 5 V y GND.

La disposición de los pines junto con cada función específica se encuentra detallada en la tabla 10 del manual de usuario de la placa STEVAL-3DP001V1 [3].

3.1.6.2. Firmware

La placa STEVAL-3DP001V1 viene preparada para funcionar con el firmware Marlin4ST, es decir, el firmware de código abierto Marlin [4] pero adaptado al entorno de OpenSTM32.

Es un controlador de impresora adaptable a diversos tipos de máquinas de impresión ya que permite configurar las características físicas propias de cada máquina de una forma sencilla mediante los ficheros de definición (.h).

Marlin se ejecuta en la placa principal de la impresora 3D, y es el encargado de gestionar todas las actividades de la máquina en tiempo real. Coordina los calentadores, *steppers*, sensores, pantalla LCD, botones y demás componentes involucrados en el proceso de impresión 3D.

3.2. HERRAMIENTAS DE TRABAJO

Para poder llevar a cabo el proyecto, además de los recursos ya descritos también se dispone de los siguientes medios y herramientas.

Para la búsqueda y recopilación de información así como para la resolución de dudas que puedan surgir durante el desarrollo del trabajo, se cuenta con un ordenador con acceso a internet. Este PC es igualmente necesario para poder trabajar con los distintos programas de software así como para controlar la impresora 3D.

Entre los programas informáticos más relevantes que se emplearán para las distintas tareas, se encuentran, el IDE de OpenStm32, un software libre para poder trabajar con los

ficheros que forman el firmware; Solidworks, para poder diseñar las piezas necesarias; Cura para configurar y adaptar las piezas para la impresión 3D y Octoprint o similar, para poder realizar el control remoto de la impresora. Al mismo tiempo, se disponen de distintos programas de office para llevar a cabo la documentación y presentaciones requeridas sobre el proyecto.

Por último, en el laboratorio donde se encuentra la máquina hay disponibles una gran variedad de herramientas (calibre, destornilladores, alicates etc.) así como de materiales (cableado, componentes electrónicos etc.) para poder realizar el montaje de los elementos. Asimismo, tanto en el laboratorio como en la ETSID existe la posibilidad de imprimir en 3D piezas o componentes si fueran necesarios.

3.3.FUNCIONALIDADES NECESARIAS

Como ya se ha mencionado previamente, para poder conseguir la capacidad de imprimir en 3D es necesario adquirir los componentes que permitan realizar las siguientes funciones.

EXTRUSIÓN DE FILAMENTO

Para poder dispensar el material plástico fundido que forme las geometrías o piezas a imprimir, es necesario emplear un extrusor. Como ya se ha explicado anteriormente, ese se divide en dos partes, la parte *hot-end* que se encarga de fundir y dispensar el material a través de la boquilla o *nozzle* y la parte de *cold-end* encargada de tirar del material para empujarlo hacia el fusor del *hot-end*.

SUPERFICIE DE IMPRESIÓN

A la hora de realizar la impresión es necesario tener una superficie adecuada sobre la que depositar el material. Esta debe tener una buena adherencia para que el material se mantenga en contacto al ser depositado, así como mantener una superficie regular para que el resultado sea uniforme.

CONTROL DE IMPRESIÓN

A fin de poder operar con la impresora, es necesario emplear una interfaz desde la que el usuario pueda realizar distintas operaciones como seleccionar las piezas para la impresión, controlar el estado de la impresora, realizar movimientos personalizados de forma manual etc.

ELEMENTOS ADICIONALES

De forma adicional, y para poder conseguir mejores resultados con la impresora, se ha decidido emplear un sensor para detectar la distancia entre la boquilla y la superficie de impresión y así poder calibrar la máquina y poder ajustar de una forma más precisa la distancia.

Más adelante, dentro del desarrollo del proyecto se analizarán las diferentes opciones disponibles para cada caso y se escogerá la alternativa más adecuada.

4. PLAN DE TRABAJO

Este proyecto consta de tres fases principales que son el análisis de los elementos de entrada (estructura CNC placa de impresión y firmware), la elaboración e implementación de un diseño específico de impresora 3D y finalmente el montaje (de los componentes) y puesta en marcha de la máquina. Al mismo tiempo, estas tres fases están divididas en diferentes pasos como se explica a continuación.

En primer lugar se llevará a cabo un análisis de la parte de programa, comprendiendo los ficheros y la estructura que forman el firmware Marlin y principalmente estudiando la parte de la configuración, la cual es necesaria modificar para adaptar a nuestras necesidades. Al mismo tiempo se analizará la máquina disponible, tomando las características de los componentes y propiedades físicas de los elementos para más adelante implementarlas en la configuración.

En segundo lugar se seleccionarán los componentes necesarios, para poder completar la función de impresión 3D. Se valorarán las diferentes opciones disponibles seleccionando la más adecuada en base a los requisitos del proyecto. A su vez se comprobará el correcto funcionamiento de los componentes a emplear.

En un tercer lugar se diseñarán las partes necesarias para poder ensamblar los componentes. En este caso un soporte para poder sujetar el extrusor al carro en el eje z y unos soportes para poder fijar la cama a la base de la máquina CNC, permitiendo la regulación de la misma. Con el diseño definitivo se ajustarán los parámetros de la configuración para que correspondan con las dimensiones del espacio de trabajo.

Finalmente, se llevará a cabo el montaje y puesta a punto de todos los elementos de la máquina. A fin de conseguir un correcto comportamiento, se realizarán los ajustes necesarios tanto en la configuración como en los componentes, para por último realizar las pruebas de impresión y comprobar el resultado.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO

En el siguiente apartado se encuentran explicadas las distintas tareas y trabajos llevados a cabo durante el desarrollo del proyecto.

5.1. ANÁLISIS DEL FIRMWARE

La primera labor ha sido el análisis del firmware a utilizar en la impresora, cuya descripción más detallada se encuentra en a continuación.

5.1.1. Entorno de trabajo IDE

Para poder trabajar con el firmware, consultando ficheros, realizando las modificaciones necesarias, compilando y depurando el programa, etc. en primer lugar ha sido necesario instalar el IDE de OpenStm32, siguiendo para ello los pasos indicados en el Apéndice A *OpenSTM32 installation* del manual de instrucciones [5].

Una vez instalado el entorno de trabajo, siguiendo las instrucciones del apartado *3.3.1 Building the firmware with the OpenSTM32 IDE*, se ha importado el proyecto previamente descargado de GitHub [6], obteniendo así los ficheros del firmware. Por último, se ha configurado el depurador para que este funcione adecuadamente.

5.1.2. Marlin para STM

Como ya se ha mencionado previamente, el Firmware a emplear en la placa de impresión STEVAL-3DP001V1 3D es por defecto Marlin4ST, una versión de Marlin cuyo código fuente al completo está adaptado al entorno de desarrollo de OpenSTM32.

El firmware tiene implementadas las siguientes características principales:

- Algoritmos de control de movimiento.
- Configuración digital de los controladores de motor paso a paso L6474.
- Monitorización de la temperatura de la cama y los extrusores.
- Tablas de asignación de archivos para el tratamiento de archivos en una tarjeta SD.

- Análisis de los G-code.
- Interfaces SD, UART y Wi-Fi.

Estas funciones están organizadas en tres capas diferentes dentro del firmware, Figura 43, la capa de *drivers* o controladores, la capa de los agentes intermedios o *middlewares* y la capa de aplicación (*application*).

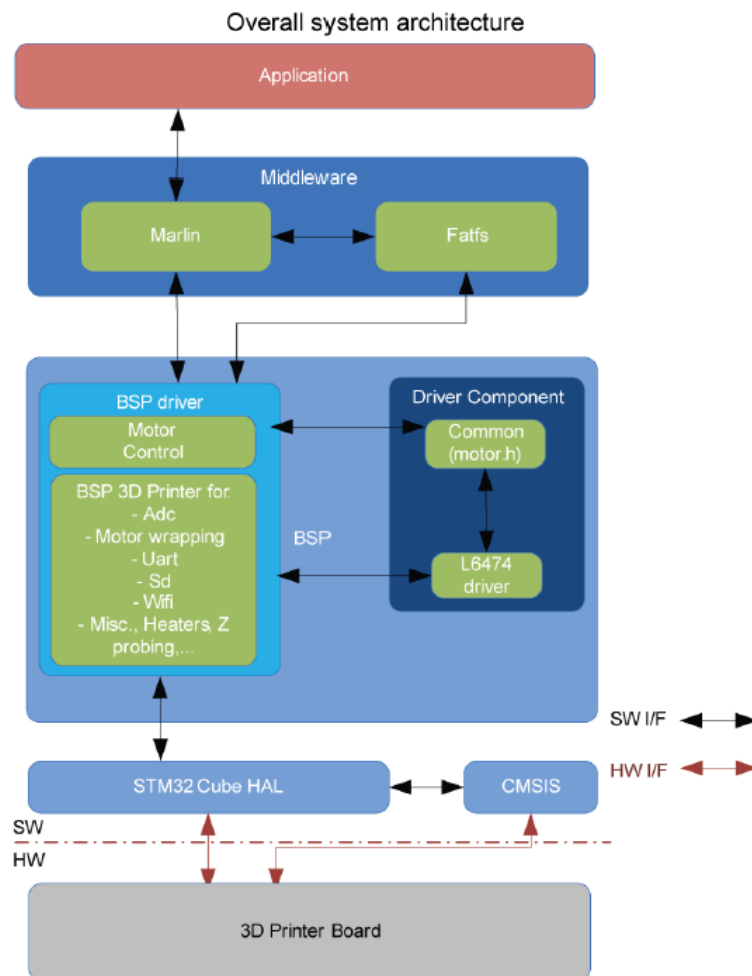


Figura 43. Estructura del firmware Marlin4ST.

Fuente: https://www.st.com/resource/en/data_brief/stsw-3dp001.pdf

En la primera sección se encuentran todos los drivers necesarios para el microcontrolador y los periféricos, directamente del entorno de STM32Cube. En la segunda están los agentes intermedios encargados de integrar los FATFs de STM32Cube con el firmware Marlin y los correspondientes algoritmos de impresión 3D (movimiento, control de temperatura, etc.). Y finalmente, la tercera sección que corresponde a la aplicación, es el punto de entrada principal del firmware, donde por un lado, el apartado de configuración

inicializa los componentes, y por otro lado el bucle infinito reacciona a los comandos de usuario enviados mediante alguna de las interfaces.

De igual forma que la estructura del Firmware se encuentra dividida en tres secciones, las carpetas principales que recogen todos los archivos que forman el código de Marlin también son tres, la carpeta de "Drivers", la de "Middlewares" y la de "Project".

La carpeta con mayor cantidad de elementos es la de Drivers, ya que esta cuenta con tres subdivisiones. Por un lado se encuentra la carpeta STM32F4xx_HAL_Driver donde se recogen todos los ficheros HAL de STM32Cube necesarios para cumplir con las funciones de impresión 3D. En segundo lugar, esta la carpeta de CMSIS, una carpeta propia del marco de STM32Cube correspondiente a los ficheros HAL de los procesadores cortex-M y finalmente está la carpeta BSP, que recoge los ficheros de soporte necesarios por la placa. Estos últimos se dividen en las siguientes tres subcarpetas.

- Impresión 3D. Recoge los ficheros para la configuración y empleo de la placa y los periféricos, proporcionando para ello una interfaz.

- Control de motor. Esta carpeta contiene la interfaz necesaria para poder acceder a las diferentes funciones de varios controladores de la familia L64XX. En los ficheros "motorcontrol.c/h" se recogen las funciones para configurar y controlar los drivers.

- Componente de controlador L6474. En esta carpeta se encuentran las funciones fundamentales así como los parámetros predefinidos para los drivers L6474 que se encuentran instalados en la placa.

En la carpeta de Middlewares se encuentran por un lado los FATFs correspondientes al entorno de STM32 sin modificar y por otro las carpetas que forman Marlin adaptadas al entorno de ST.

El contenido de la carpeta Project se encuentra dividido a su vez en dos partes. Por un lado, están los ficheros necesarios para poder compilar el firmware en alguno de los entornos de IDEs, OpenSTM32 o IAR, en este caso se empleará el correspondiente a ST, y por otro lado se encuentran varios ficheros de configuración junto con los archivos correspondientes al punto de entrada de la aplicación (main.c/h).

5.1.2.1. Versiones del Firmware

En el sitio web de STMelectronics, se encuentra disponible el firmware en la versión inicial 1.0.0. Sin embargo, en la plataforma GitHub se puede encontrar una versión más actualizada, la 1.1.0, donde se han añadido nuevas funciones y/o se han modificado las ya existentes.

Igualmente, al tratarse de una placa que salió al mercado en 2017 y cuya producción no se ha continuado, tampoco se ha continuado adaptando el firmware. Por lo que mientras que para otras placas y controladores se ha continuado actualizando Marlin estando a día de hoy en la versión 2.0.0, la versión más moderna para la STEVAL-3DP001V1 es la ya mencionada 1.1.0.

Es por ello que se ha decidido emplear la última versión disponible. Esta tiene implementados cambios y mejoras respecto a una versión inicial, ha sido empleada durante un largo periodo de tiempo y al comparar las configuraciones de las versiones, es la que mas similitudes guarda con la versión más moderna. Ya que, aunque se hayan realizado modificaciones en el código de algunas de las funciones, se siguen manteniendo mayoritariamente las mismas (dentro de las que existían en la versión 1.1.0) sin contar las nuevas que se hayan podido añadir.

En la versión empleada en este caso, aunque la ubicación u orden de las carpetas es diferente, la estructura es equivalente.

5.1.2.2. G-code Marlin 1.1.0.

Para realizar las impresiones, el Firmware Marlin emplea un derivado del lenguaje G-code [7], por lo que es necesario emplear dicho formato para que pueda funcionar correctamente.

En este lenguaje se pueden diferenciar dos tipos de comandos, por un lado los de tipo G, comandos geométricos relacionados con el movimiento del cabezal y por otro los de tipo M, comandos de instrucciones encargados de iniciar distintos tipos de acciones como de encendido/apagado, inicio/pausa, etc. En cuanto a las comunicaciones, Marlin tiene incorporados los comandos N para identificar el número de línea en caso de fallo de comunicación, al igual que el *Checksum*.

Por otro lado, también existen distintos argumentos empleados dentro de los comandos para identificar los distintos parámetros o factores a modificar. Entre los más importantes se encuentran:

- X/Y/Z, que hacen referencia a las coordenadas de cada eje.
- E, que hace referencia a la longitud de filamento extruido/retirado.
- F, o *feedrate*, que es la velocidad en mm/min.
- T, que hace referencia a la herramienta, en este caso extrusor, a emplear.

Otros como S, P, R, I, J, D, H o Q, representan diferentes parámetros dependiendo del comando empleado.

En el fichero Marlin_Main.cpp se encuentran los comandos G-code implementados en la versión de Marlin 1.0.1 empleada en el proyecto. De igual manera, los comandos se encuentran explicados con más detalle en la página web de Marlin [8].

5.1.3. Fichero de configuración

Dentro de todos los ficheros que forman el programa, el más relevante en este caso es el de ***configuration.h*** [9], pues es donde se han de realizar los cambios necesarios. Es en él donde se deben plasmar todas las características físicas y funciones con las que debe contar la impresora, por consiguiente, se ha realizado un análisis más exhaustivo del mismo. A continuación, se encuentran detallados los aspectos más relevantes del fichero.

INTRODUCCIÓN

Recoge varias páginas web de referencia, notas a tener en cuenta (dependiendo del tipo de impresora), y la versión del firmware que se está empleando.

INICIO

Aquí se puede personalizar la información presente en el arranque de la impresora, configurar el nombre de la máquina, la pantalla de inicio y diferentes detalles como la versión de compilación o un enlace a la web.

HARDWARE O PLACA

En esta sección se configura el puerto serie para la comunicación así como el *baudrate* correspondiente. Aquí se tiene que especificar el modelo de placa en el que se está ejecutando el firmware, para que esta funcione correctamente. También se puede asignar un nombre a la impresora así como un código identificador.

EXTRUSOR

En este apartado se especifican distintos aspectos a cerca del extrusor. Los principales, son el número de extrusores (4 max) y el diámetro de filamento empleado (1,75 mm o 3 mm). Sin embargo, dada la gran variedad de alternativas existentes, es aquí donde se especifican las variaciones, como puede ser el uso de extrusores mezcladores o de varios extrusores de forma alternativa. Y por consiguiente, los aspectos físicos a los que afecta, como desplazamientos o distancias entre sí.

ALIMENTACIÓN

En esta sección se especifica el tipo de fuente de alimentación con la que cuenta, así como el encendido directo de varios componentes.

AJUSTES TÉRMICOS

Esta es una de las secciones más amplias, por lo que se puede dividir en varias partes. Por un lado, en lo referente al hardware es necesario especificar (entre las opciones disponibles) el tipo de sensor de temperatura empleado, o el que mejor se ajuste, para así poder tener una lectura lo más precisa posible. En este caso permite un sensor por cada extrusor (4 max.) y uno para una cama calefactable.

Existe también la posibilidad de dejar fijas unas temperaturas constantes, para poder probar el funcionamiento de ciertos elementos, pero en ningún caso se tiene que emplear durante las impresiones ya que podría resultar muy peligroso.

También permite, en caso de disponer de otro sensor, emplearlo como redundante para así obtener un proceso más fiable a la hora de medir de la temperatura del extrusor, pudiendo ajustar también la diferencia admisible entre ambas mediciones.

Por otro lado se tienen que configurar diferentes parámetros de temperatura tanto para la cama como para el extrusor. Entre ellos están las temperaturas mínimas y máximas que puede detectar el sensor, de forma que el superar estos valores implicaría un fallo en el sensor

(en el caso del mínimo) o una situación de riesgo por sobrecalentamiento (en el caso del máximo).

Para asegurar la estabilidad de la medición de la temperatura, se pueden ajustar distintos parámetros como la histéresis, el margen el aceptable y el tiempo que debe mantenerse para considerarse estable.

En este apartado se pueden ajustar los parámetros del control de la temperatura tanto del extrusor como de la cama. Es posible escoger entre un control ON-OFF que enciende y apaga la alimentación dependiendo de si se ha alcanzado la temperatura, o un control mediante PID, que resulta en un control más complejo. Para ajustar los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa que se ajustan al sistema, se emplea el comando de *Autotuning* implementado en el firmware una vez ha sido ensamblado todo el sistema.

Finalmente, como parámetros de seguridad permite configurar la temperatura mínima a la que va a permitir extruir material, para evitar problemas en el extrusor al igual que la longitud máxima de extrusión continua que pudiera surgir debido a algún fallo en la impresión.

CINEMÁTICA DE LA IMPRESORA

En caso de emplear una impresora con una estructura específica de *H-Bot*, será necesario activar las funciones de este apartado para poder adaptar el comportamiento de los motores a la disposición específica de correas que tienen este tipo de impresoras.

FINALES DE CARRERA

En esta sección se configuran los finales de carrera (físicos) con los que cuenta la impresora. Permite activar hasta dos finales de carrera (máximo y mínimo) por eje (X, Y y Z) y uno adicional en caso de emplear un sensor para detectar la base de impresión en el eje Z. De igual manera permite configurarlo como *pullup* e invertir la lógica de la respuesta para obtener el comportamiento requerido.

DESPLAZAMIENTOS

Para configurar el movimiento que realiza la impresora, se deben ajustar los parámetros de este apartado. Estos son los Pasos por mm, la velocidad máxima que es capaz de alcanzar (mm/s) y la aceleración máxima que puede darse, para cada eje (XYZ) y el extrusor. Estos determinarán por un lado la exactitud de las distancias recorridas y por otro la velocidad de los diferentes movimientos.

De igual manera, se deben especificar diferentes valores de aceleración dependiendo si son movimientos de impresión o solo de desplazamiento y en el caso del extrusor, la aceleración máxima correspondiente a la retracción del filamento.

El último parámetro configurable correspondiente al movimiento es el *jerk* (mm/s). Este hace referencia al mínimo cambio de velocidad que requiere de aceleración, y se puede ajustar para los ejes XY, para el eje Z y por último para el extrusor.

Es importante emplear unos valores adecuados, adaptados a las características físicas de la impresora para poder obtener un correcto comportamiento. Valores de velocidades demasiado elevados, pueden suponer pérdida de pasos, un sobrecalentamiento o un par demasiado débil para accionar el sistema, mientras que velocidades muy bajas pueden ser inviables para la impresión en de material.

SENSOR DEL EJE Z

En esta sección se ajusta, el tipo de sensor (en caso de tenerlo) o el método utilizado para realizar el ajuste/ nivelación de la base.

En primer lugar, se especifica si se emplea el pin reservado para el final de carrera mínimo del Eje Z o un pin alternativo. De igual forma, se tiene que escoger el tipo de sensor/mecanismo empleado para la detección configurando las características/ajustes correspondientes en cada caso. Si no se emplea ningún sensor, suele utilizarse la punta de la boquilla como referencia para el nivelado.

Para más adelante poder realizar todas las mediciones correctamente, es importante ajustar las medidas de desplazamiento que hay entre la posición del sensor y la punta de la boquilla. Y de igual manera se deben configurar otros parámetros como la velocidad a la que se realizara el sondeo/detección, si se desea duplicar la detección y la altura a la que va a desplazarse el cabezal durante las detecciones. Por último, también permite activar una prueba de repetitividad para probar la precisión del sensor.

CONTROL DE MOTORES PAP

Dentro de la configuración, en la sección relacionada con los motores paso a paso tanto de los ejes de desplazamiento como el del extrusor, se pueden determinar el tipo de activación, si se quiere que se desconecten de la alimentación al mantenerse inactivos y si se desea invertir el sentido de giro.

POSICIÓN INICIAL Y RESTRICCIONES

Este es el apartado en el que se configuran distintas condiciones y restricciones respecto al espacio de trabajo de la impresora. Puesto que a la hora de regresar el inicio, en primer lugar se posiciona el eje Z y posteriormente los ejes X e Y, es necesario fijar una altura de Z adecuada para que no colisione con ninguno de los elementos de la cama o alrededor. De igual manera se puede configurar la ubicación de la posición inicial, indicando si esta se encuentra en el extremo máximo o mínimo de cada eje. Habitualmente, se emplean los límites mínimos pero dependiendo del diseño permite adaptar la impresora a otras disposiciones.

En caso de tener un espacio más amplio que el de la cama de impresión, se tienen que fijar las dimensiones completas a las que puede llegar, así como las diferencias u *offsets* existentes entre las posiciones y el origen, empleando para ello distancias en negativo.

Dentro de este apartado se encuentra también la posibilidad de configurar unos finales de carrera "programados" o *software endstops*. De esta forma se puede limitar el recorrido del cabezal en caso de no contar con finales de carrera físicos o si se desea reducir el recorrido de la impresora. Así pues, no superará el límite establecido una vez alcance dicha posición.

SENSOR DE AUSENCIA DE FILAMENTO

Este apartado permite activar la función de detección de presencia de filamento en caso de contar con un sensor para ello.

NIVELADO DE LA BASE DE IMPRESIÓN

Para poder obtener una base de impresión lo más nivelada posible, en este apartado se encuentran las funciones que permiten configurar los diferentes métodos existentes. Estos son el *Mesh bed leveling* o el *Auto bed leveling*. El primero está pensado para cuando no se dispone de un sensor de detección en el eje Z mientras que el segundo para cuando sí. A su vez este último permite emplear una malla de puntos de forma automática o un ajuste manual empleando para ello tres puntos especificados por coordenadas. Con el método definido, se tienen que especificar los parámetros relacionados como márgenes o posiciones.

CONFIGURACIÓN DEL HOMING

En esta sección se encuentran las funciones o características relevantes a la hora de realizar el regreso a *home* o la posición de inicio. Se puede configurar el origen en el centro de la cama así como establecer de forma manual la posición inicial.

También incluye una función *Z safe homing* que tiene el objetivo de evitar cualquier colisión del cabezal si este se encuentra fuera del área de impresión.

Por último, permite ajustar las velocidades de vuelta a inicio tras haber realizado el nivelado.

FUNCIONES ADICIONALES

En esta sección se encuentran recogidas diferentes elementos correspondientes a dispositivos y funciones adicionales y elementos personalizables.

Es en este apartado donde se puede habilitar y configurar el uso de la memoria EEPROM con la que cuenta la placa. Este es un factor importante ya que es el espacio de memoria donde se almacenan los valores por defecto y se actualizan los cambios realizados desde la terminal.

Permite personalizar las unidades de distancia y temperatura, permitiendo el cambio a pulgadas y a grados kelvin o Fahrenheit. También permite definir valores de precalentamiento (de extrusor y cama) y velocidad de ventilación para dos tipos distintos de materiales.

De igual forma incluye varias funciones el aparcado del cabezal, la limpieza de la boquilla, cronometraje del tiempo de impresión o conteo de impresiones llevadas a cabo.

En caso de contar con un panel LCD, es aquí donde se ajusta el idioma de la interfaz, así como los símbolos disponibles. De igual manera, en caso de emplear una placa con lector de tarjeta SD, será necesario habilitarlo.

Cuenta con una amplia gama de funciones para poder configurar diferentes tipos de LCD dependiendo del fabricante/modelo y el uso de elementos como pantallas altavoces y *buzzers* o encoders.

Por último tiene funciones *extra* como la configuración de la velocidad de los ventiladores o la implementación de la medición del espesor del filamento, en caso de contar con el hardware para tal función.

5.1.3.1. Ajustes avanzados

Para poder realizar cambios más complejos, llevar a cabo personalizaciones más detalladas, añadir características adicionales o implementar funciones experimentales, existe el fichero ***configuration_ADV.h***.

Este fichero de configuración avanzada, cuenta con unos apartados y secciones parecidos al primer fichero de configuración, pero permite realizar cambios a un mayor nivel. Entre ellos se encuentran por ejemplo los siguientes:

- Entre los ajustes térmicos y de seguridad, permite configurar los valores del control de temperatura ON-OFF y PID (para extrusor y cama), así como habilitar funciones de seguridad adicionales (evitar el goteo del filamento, por ejemplo) o configurar sensores para temperaturas elevadas.

- En la sección de ventilación, existe la opción de configurar ventiladores para evitar el sobrecalentamiento de los drives encargados del control de motores así como adaptar el funcionamiento de los ventiladores del extrusor.

- Permite configurar diferentes aspectos como activar el funcionamiento continuo de los finales de carrera o habilitar el eje Z en el último momento si este se sobrecalienta. También se puede configurar la máquina en caso de que esta cuente con doble-motor en los ejes o un cabezal doble, adaptando para ello también la detección de los límites.

- Cuenta con ajustes avanzados para el apartado de *homing* donde se puede configurar el margen que deja el cabezal una vez ha activado el final de carrera durante el posicionamiento en el inicio, o si se desea llevar al inicio los ejes X e Y a la vez, (agilizándolo el proceso) o de forma consecutiva.

- En el apartado de ajustes avanzados de movimiento permite configurar varios parámetros relacionados con el desplazamiento y los motores. Entre ellos estarían por ejemplo el uso de medidas relativas, desactivación de los motores cuando llevan tiempo sin funcionar, valores de *feedrate* mínimos o velocidad planar mínima. En cuanto a parámetros más específicos de los motores, se puede definir el valor de *microstepping* o micropasos que va emplear el controlador del motor y también la corriente que este recibe.

- Por último cuenta con varias características adicionales entre las que se encuentran ajustes adicionales para LCD y tarjeta SD, la función de *watchdog* (reinicio del firmware por seguridad, si este se queda congelado), *babystepping* (modificaciones minúsculas de la

posición física, manteniendo los valores), ajustes avanzados de extrusión y nivelado, la configuración de arcos y curvas de Benzier, control de camas calefactables en paralelo, ajustes del buffer de la comunicación serie/tarjeta SD, la funcionalidad experimental de retracción firmware y soporte para controladores específicos o e bus I2C, también experimental.

5.1.4. Implementación de las características de la impresora

En el fichero de configuración principal, *configuration.h*, se han realizado los cambios necesarios para conseguir una respuesta adecuada de la impresora, implementando para ello en el firmware tanto las características físicas como las de la placa. A continuación se encuentran descritas las principales modificaciones llevadas a cabo.

Tras realizar una rápida comparación entre la versión empleada y una más actual, se ha decidido reordenar las distintas secciones o apartados siguiendo como referencia la versión nueva, ya que esta guarda más similitudes con la guía de información disponible en el sitio web de Marlin, de forma que facilita su manejo y comprensión.

Dada la forma en la que está desarrollada la configuración, muchas de las características de funcionamiento o funciones que incorpora, se habilitan o deshabilitan transformando a comentario la definición de la variable correspondiente a esa función. De esta forma, realizar cambios resulta más sencillo.

Siguiendo la estructura de la configuración, en primer lugar se han adaptado los parámetros correspondientes a la electrónica. Se ha modificado el puerto serie estableciendo el 1 (en vez del 0, valor por defecto) ya que se obtenía una respuesta más estable. En cuanto al *baudrate* se ha dejado el valor de 115200 baudios al venir por defecto con los valores de la placa. También se ha definido el tipo de placa madre empleado, `BOARD_STM_3DPRINT`, es importante asignar el modelo de placa correcto y que de lo contrario, no funcionará al producirse un error en la compilación.

A continuación se han configurado los parámetros correspondientes al extrusor. En este caso se trata de una impresora simple que cuenta con un único extrusor, y cuyo diámetro de filamento es de 1,75 mm. Como ya se ha mencionado previamente, existen más características para distintos tipos de extrusores, y en este caso, al no emplearlos, no es necesario modificar nada adicional.

En cuanto a la alimentación de la placa, entre las dos opciones existentes, se ha dejado la primera opción, correspondiente a la fuente de 12 V DC.

Dentro del apartado de las características térmicas, en primer lugar se han asignado al sensor del extrusor (TEMP_SENSOR_0) y de la cama (TEMP_SENSOR_BED) el valor del termistor correspondiente. En este caso, para obtener un correcto funcionamiento con la placa, es necesario emplear el número 23 que se encuentra en el fichero *thermistortables.h*, y dejar a 0 el resto.

Para los valores correspondientes al control de la estabilidad de la temperatura (tiempos e histéresis) se han dejado los valores por defecto, ya que se han considerado adecuados. En cuanto a las temperaturas, se han definido en todos los sensores (extrusores y cama) como temperatura mínima el valor de 5 °C mientras que para las temperaturas máximas se ha definido 270 °C para los extrusores y 100 °C para la cama, por razones de seguridad. Aunque se han definido los valores para todos los extrusores, en este caso, solo es relevante el valor del primero.

Los valores de las constantes proporcional integral y derivativa del control PID de temperatura tanto del extrusor como de la cama, se han obtenido más adelante como se explica en el apartado 5.5.6.5 Ajuste PID para el control de temperatura.

En los parámetros correspondientes a la seguridad, se ha definido como temperatura mínima de extrusión 180 °C, para así evitar extrusión de material si este no está a una temperatura adecuada. De igual forma, también se ha limitado la extrusión continua de longitudes demasiado largas. Para evitar fallos debido a una desconexión de los sensores, o sobrecalentamientos se han activado las protecciones térmicas correspondientes, tanto para el extrusor como la cama.

A continuación se han definido las entradas de los finales de carrera físicos a utilizar. Se han activado los límites máximos y mínimos para cada eje (XYZ) aunque después solamente se hayan empleado los mínimos para X e Y y el máximo para Z. Para el resto de límites se han empleado limitaciones programadas como se explicara más adelante.

Con los límites habilitados, se han configurado como *pullup* todos los sensores y de forma adicional el pin empleado por el sensor de nivelado para el eje Z. Se ha comprobado la correcta respuesta de los límites de carrera, por lo que se ha mantenido la lógica correspondiente a excepción del sensor para el nivelado cuya lógica ha sido invertida para obtener una respuesta acorde.

Dentro de los ajustes de movimiento, en primer lugar se han calculado los valores teóricos correspondientes a los pasos por milímetro que deben hacer los ejes. Para ello se han empleado los datos de los elementos de transmisión, de los motores y el controlador que se muestran en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Datos de transmisión de movimiento entre motor y husillo.

Eje	Pasos/rev	Stepping	Paso husillo (mm/rev)	Reductora
X	200	1/16	6	3:5 (n = 0,6)
Y	200	1/16	8	1:2 (n = 0,5)
Z	200	1/16	6	3:5 (n = 0,6)

Teniendo en cuenta los datos de la tabla y la fórmula que se muestra a continuación:

$$\frac{\frac{\text{pasos por revolución}}{(\mu)\text{pasos por paso}}}{n \cdot \text{paso husillo}} = \frac{(\mu)\text{pasos por revolución}}{n \cdot \text{paso husillo}}$$

Se han calculado para los ejes X y Z:

$$\frac{\frac{200}{\frac{1}{16}}}{0,6 \cdot 6} = \frac{3200}{3,6} = 889 \text{ pasos/mm}$$

Y para el caso del eje Y:

$$\frac{\frac{200}{\frac{1}{16}}}{0,5 \cdot 8} = \frac{3200}{4} = 800 \text{ pasos/mm}$$

De forma que inicialmente se han empleado 889 pasos/mm en los ejes X y Z y 800 pasos/mm en el eje Y.

En el caso del extrusor, se ha empleado el valor por defecto y directamente se ha ajustado el valor en la puesta a punto, como se explica más adelante.

Las velocidades de movimiento o *feedrate* máximas de los ejes y el extrusor, se han definido posteriormente, como se encuentra detallado en el apartado 5.5.6.4 Ajuste de velocidades máximas.

Otros parámetros relativos al desplazamiento o movimiento son la aceleración y el *jerk*. Los valores para estos se han obtenido de forma aproximada a partir de los valores por defecto y teniendo en cuenta las características y limitaciones de la impresora. Es por ello que se han estimado unos valores más bajos que los habituales, dado que las velocidades que puede alcanzar son bastante lentas. Para los valores de aceleración de los ejes, se han empleado los valores más reducidos dentro de los habitualmente empleados, Tabla 3.

Tabla 3. Valores de los parámetros de aceleración.

Parámetro	mm/s ²
Aceleración máxima (X, Y, Z, E) DEFAULT_MAX_ACCELERATION	(1000, 1000, 100, 2000)
Aceleración (ejes y extrusor) DEFAULT_ACCELERATION	500
Aceleración de retracción (extrusor) DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION	1000
Aceleración de desplazamiento DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION	800

En el caso del *jerk* se han empleado valores más bajos en base a los observados en las configuraciones de varios modelos de impresoras, obteniendo como resultado los siguientes valores de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de los parámetros de *Jerk*.

Parámetro	mm/s
JERK XY	8,0
JERK Z	0,3
JERK E	5,0

Para poder realizar el nivelado con el sensor, se ha habilitado esta función con Z_MIN_PROBE_ENDSTOP. Al emplear un pin propio en vez del correspondiente al sensor de Zmin no ha sido necesario definir la variable de Z_MIN_PROBE_USES_Z_MIN_ENDSTOP_PIN.

Al tratarse de un sensor de tipo inductivo/capacitivo, como se determina más adelante, este se considera un sensor de tipo fijo, por lo que se ha definido como tal habilitando FIX_MOUNTED_PROBE. Los parámetros relativos a la distancia entre la boquilla y la velocidad máxima para la toma de mediciones se han definido más adelante, y el resto de variables al estar definidos de forma paramétrica, no se han realizado modificaciones.

Para la toma de pruebas se ha activado la doble detección, por lo que en cada punto de medición se aproxima dos veces para mayor fiabilidad. También se ha determinado una altura de 10 mm desde donde ir aproximando el sensor para la detección, al igual que se ha

definido de 10 mm la altura en la que se sitúa el cabezal para ir de un punto de medición a otro. De igual manera, se ha determinado un rango de entre - 10 y 10 mm para el ajuste del margen de el sensor en Z.

En los parámetros correspondientes a los ajustes de los motores, se han dejado los valores por defecto, manteniendo el pin en modo *Active Low* para habilitar los motores, y dejando en *false* la desconexión inmediata de los motores una vez dejan de estar en movimiento, tanto en los ejes como en el extrusor. En el caso de la dirección de los ejes, para un avance positivo y obtener una respuesta adecuada, conectando todos los motores de igual manera, al estar la posición de referencia en el lado inferior izquierdo (del plano XY) se han mantenido las direcciones de los ejes X y Z mientras que el de Y ha sido invertido. De igual manera, no ha sido necesario modificar tampoco la dirección de giro del extrusor.

En cuanto a las características geométricas o dimensionales de la impresora, en primer lugar se ha definido la altura mínima antes de realizar el retorno al inicio o *homing*. Se ha establecido un valor de 10 mm para de esta forma asegurar que no colisiona con ningún elemento del entorno.

Dadas las características físicas de la impresora, se ha configurado de forma que la ubicación de *Home* (o referencia) se encuentre situada en la esquina anterior (Ymin) izquierda (Xmin) del plano XY y en vez de en la parte inferior, como suele ser habitual, se ha situado en la parte superior (Zmax) para tener una mayor facilidad de manipular el extrusor en caso de que sea necesario.

En lo respectivo a las dimensiones del espacio, estas se han definido una vez han sido ensamblados todos los componentes, por ello, dichos valores están recogidos en el apartado 5.5.6.1 Parámetros dimensionales.

Como se ha mencionado anteriormente, para poder limitar el recorrido de la impresora a distancias donde no se encuentran instalados los finales de carrera, se ha empleado la opción con la que cuenta de hacer uso de límites programables. Para poder personalizarlas se han definido unas nuevas variables (*i_END_MIN* y *i_END_MAX*) para cada eje (i). De esta forma se ha empleado este sistema para el límite mínimo del eje Z y el límite máximo de los ejes X e Y.

Dentro de la sección de nivelado, en primer lugar se ha activado la depuración del proceso de nivelado (*DEBUG_LEVELING_FEATURE*) para así poder tener un mayor acceso los detalles del proceso. Al disponer de un sensor capacitivo/inductivo se ha activado el nivelado

automático (AUTO_BED_LEVELING_FEATURE), y dentro de este se ha escogido la opción de "malla" (AUTO_BED_LEVELING_GRID) en vez de "3 puntos" para obtener un resultado más detallado, ya que de esta manera realiza las mediciones en base a una malla de puntos definidos sobre la base en vez de solo en tres puntos determinados por el usuario.

Se han determinado dimensiones que va a tener la malla dentro de la cama calefactable, dejando un pequeño margen en todo el contorno de la base. Estas medidas se encuentran detalladas en el punto 5.5.6.6 Nivelado de la cama. De igual manera se ha definido el margen mínimo que tendrá el sensor respecto a los bordes de la base y el número de puntos (al cuadrado) en los que se va a dividir el mallado.

Finalmente, entre las características principales, se han definido las velocidades empleadas para regresar al inicio o *homing*. Para ello, a partir de las velocidades estimadas en el apartado desarrollado más adelante, se han adaptado las unidades de mm/s a mm/min.

Entre los extras con los que cuenta la impresora, se han activado o definido varias opciones. Para poder almacenar los valores correspondientes a los ajustes de la impresora, así como poder consultarlos y/o modificarlos desde la terminal, se ha habilitado EEPROM_SETTINGS.

Para tener una percepción más adecuada del proceso, y poder indicar comandos desde la terminal en un momento indicado, se ha habilitado la característica HOST_KEEPALIVE_FEATURE, que envía un mensaje de "busy" (ocupado) mientras la impresora esté procesando una tarea y no pueda aceptar otra.

De igual manera se han definido dos casos de constantes de precalentamiento, en primer lugar una con los valores cercanos correspondientes al PLA, ($T_{\text{EXTRUSOR}} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{CAMA}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{VENTILADOR}} = 255$) y para el segundo caso se han definido unos valores más bajos, para realizar tareas de limpieza o mantenimiento ($T_{\text{EXTRUSOR}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{CAMA}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{VENTILADOR}} = 255$). El valor correspondiente a $S_{\text{VENTILADOR}}$ corresponde a la velocidad del ventilador, siendo 0 el valor que mantiene el ventilador parado y 225 el valor que emplea el 100% de la velocidad aplicable.

Aunque en este caso no se lleguen a utilizar, se han dejado habilitadas las funciones de aparcado de cabezal (NOZZLE_PARK_FEATURE), limpieza de boquilla (NOZZLE_CLEAN_FEATURE) y en el caso del cronómetro automático, se ha habilitado (PRINTJOB_TIMER_AUTOSTART) de forma que cuando reciba el G-code indicado, inicie y pare de forma automática la medición del tiempo de impresión.

Puesto que la placa STEVAL-3DP001V1, cuenta con una entrada para tarjetas micorSD, para que esta funcione correctamente, es necesario además de activar la función de SDSUPPORT, insertar en ella una tarjeta microSD.

Como se ha descrito en el análisis de la configuración, existen más elementos que se pueden modificar, aunque al no contar con un LCD u otro elemento, dentro de la configuración no ha sido necesario añadir ningún aspecto adicional.

Como ya se ha mencionado, los parámetros de carácter dimensional, así como las velocidades y otros valores se han completado o reajustado más adelante en el proyecto, como se explica en el apartado 5.5.6 Ajustes de la configuración y calibrado, ya que para poder obtenerlos es necesario tener todos los componentes ensamblados y conectados.

En el caso del fichero con los aspectos avanzados de la configuración (*configuration_ADV.h*), no se han realizado cambios en el mismo en cuanto a la estructura, ya que en este caso se mantenía bastante similar. Se han revisado los diferentes apartados y al comprobar que no es necesaria una modificación de los valores, se han dejado los empleados por defecto, a excepción de que por una razón de seguridad, se han activado los sensores de final de carrera durante todo el funcionamiento y no solo durante la función de regreso al origen o *homing*.

En el Anexo A se encuentran todos los fragmentos con los cambios más relevantes realizados en la configuración.

5.1.5. Modificaciones en ficheros adicionales

Además de las modificaciones realizadas en los ficheros de configuración, también ha sido necesario realizar algunos cambios dentro de los ficheros que componen Marlin, para así poder implementar adecuadamente algunas características en la impresora.

Por un lado, ha sido necesario modificar el fichero *stm32f4xx_3dprinter_misc.c*. En él, se encuentran dos matrices, que recogen los puertos y los pines, respectivamente, de los que dispone la placa para ser utilizados. De esta forma, a cada cual le corresponde el número de la posición en que se encuentra dentro de la matriz.

En ellas, se han añadido en posiciones anteriormente nulas, las variables correspondientes a los pines/puertos configurables por el usuario para poder emplearlos como

detectores de final de carrera en los límites máximos en X, Y y Z. A fin de asignar un pin exclusivo para el sensor del eje Z, se ha añadido una celda adicional a la matriz, al no existir un espacio correspondiente a esa función, y para ello se ha empleado el último de los cuatro pines configurables por el usuario de los que dispone la placa.

Con los pines asignados, el siguiente paso ha sido configurar o inicializar dichos pines, y para ello la solución empleada ha sido modificar la función encargada de configurar los pines correspondientes a los finales de carrera mínimos. Para ello, al tratarse de una función que emplea un *switch-case*, se han añadido tres casos más a los ya existentes, empleando el mismo código para obtener un comportamiento igual en todos los casos.

En el caso del sensor para el eje Z sin embargo, se ha generado una nueva función para su configuración. Esta, cuenta con dos variables de entrada que permiten configurar el pin como *input/output* y también como *pullup/pulldown*. Estos dos parámetros, se han configurado en el fichero *main* de Marlin, como se explica más adelante.

Al realizar los cambios en el fichero de tipo *.c*, de igual forma, ha sido necesario adaptar *stm32f4xx_3dprinter_misc.h* donde se han realizado dos actualizaciones. Por un lado, se ha modificado el parámetro correspondiente al número máximo de pines, anteriormente de valor 53 y actualmente de 54, al haber añadido un espacio adicional en la matriz.

Por otro lado, al haber creado una nueva función para inicializar el pin correspondiente al sensor de nivel en el eje Z (*Z probe*), se ha añadido la declaración de dicha función para el correcto funcionamiento del programa.

Una vez definidos los puertos y pines de usuario en las respectivas matrices, en el fichero *pins_STM_3DPRINT.h* se han asignado los números de dichos pines (correspondientes a las posiciones en la matriz) a las variables de las posiciones máximas en los tres ejes, así como en la correspondiente al detector de nivelación. Esto se ha realizado de la misma forma en la que estaban definidas las variables ya existentes para las posiciones mínimas.

Por último, se han realizado dos pequeñas modificaciones en el archivo *Marlin_main.cpp*. En este caso, los cambios vienen relacionados por una parte con unos cambios realizados en *configuration.h* y por otro, con los cambios previamente mencionados en este punto.

En el primero de los casos, dentro de la función encargada de activar los *software endstosp* se han reemplazado las variables existentes por unas nuevas, creadas para poder

diferenciar entre el recorrido límite de la impresora, y el delimitado por los finales de carrera (programados, no físicos), ya que en este caso no son los mismos.

En segundo lugar, ha sido necesario añadir la inicialización correspondiente a los límites de carrera máximos de los tres ejes. Para ello, se ha empleado la función modificada para así poderla emplear con los *cases* correspondientes (6, Xmax; 7, Ymax; 8, Zmax). De igual manera, se ha inicializado el pin correspondiente a la *Z probe*, configurándolo como *input* y *pullup* con la función previamente creada.

De igual forma que con la configuración, en el Anexo A, se encuentran todos los fragmentos con los cambios más relevantes realizados en los ficheros adicionales.

5.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES

Una de los aspectos clave del proyecto consiste en seleccionar los componentes adecuados para la impresora con el fin de implementar las características propias de una impresora 3D de FFF.

5.2.1. Sistema de extrusión

Hoy en día existen una gran variedad de extrusores disponibles en el mercado, tanto ya ensamblados como separados por componentes e incluso existe la posibilidad de fabricar directamente las piezas necesarias para la parte mecánica del extrusor (carcasa, engranajes etc.) con la ayuda de una impresora 3D como sucede en los proyectos Rep-Rap.

En este caso, se ha visto conveniente adquirir por separado los componentes del sistema de extrusión, puesto que los conjuntos ya ensamblados, además de tener un precio más elevado, la mayoría de las veces vienen preparados para modelos específicos de impresoras y pueden resultar más complejos de implementar.

Igualmente, teniendo en cuenta la aplicación académica y experimental de la máquina, no se ha considerado necesario el uso de extrusores muy sofisticados puesto que estos suponen un coste elevado y vienen preparados para ser empleados en impresoras profesionales más específicas y enfocadas a una continua fabricación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el extrusor está formado por un mecanismo accionado mediante un motor que se encarga de empujar el filamento hacia el fusor. Para esta aplicación y dada la robustez de la máquina se ha considerado emplear la extrusión directa en vez de *Bowden*, puesto que en este caso el peso del sistema de extrusión no supone un problema a la hora de situarlo en el carro.

En caso de emplear el extrusor *Bowden*, situar el alimentador resultaría más complejo dado el desplazamiento de los ejes que realiza la máquina, además del constante movimiento del cabezal respecto al alimentador, lo que podría resultar en problemas con el filamento en el tubo de unión entre el alimentador y el fusor, dadas las amplias dimensiones de la máquina.

5.2.1.1. Alimentador de filamento Titan E3D

Es por ello que el alimentador escogido ha sido el Extrusor Titan E3D. Este cuenta con la posibilidad de emplearlo tanto de forma directa como en *Bowden*, aunque como ya se ha mencionado en este caso se empleará de forma directa.

Este extrusor es uno de los más empleados. Puede ser utilizado para filamentos tanto de 1,75 mm de diámetro como de 2,85 mm, ya que cuenta con un sistema de regulación del agarre del filamento. También cuenta con una reductora 1:3 conectada al motor, en vez de emplearlo para empujar el material directamente, Figura 44, por lo que de esta forma se consigue aumentar el par de arrastre obteniendo un flujo constante.

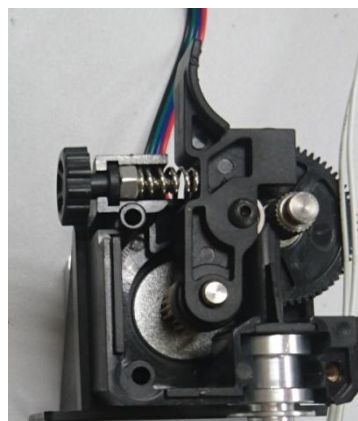


Figura 44. Montaje interior del extrusor Titan E3D.

Gracias a su diseño, se puede realizar el cambio de filamento de forma sencilla, al igual que su desmontaje en caso de necesitar realizar tareas de mantenimiento, Figura 45. De igual

modo, gracias también a su geometría y disposición, cuenta con un soporte adecuado para unirlo al carro de la estructura CNC.



Figura 45. Alimentador Titan E3D desmontado.

5.2.1.2. Motor PAP NEMA17 – 17HS3401

El motor que se va a utilizar para accionar el extrusor viene condicionado por el alimentador Titan ya seleccionado, puesto que este viene preparado para motores paso a paso NEMA 17. Es por ello que se ha escogido un motor adecuado para la aplicación de extrusión, con la suficiente fuerza y un tamaño ligeramente más compacto para poder adaptarlo mejor a su posición en el carro de la máquina.

De esta forma el motor escogido ha sido el NEMA17 – HS3401, que se puede ver en la Figura 46 y sus características se encuentran recogidas en la Tabla 5. Este es un motor PAP híbrido bipolar, con dos devanados y 4 hilos, y es apto para ser controlado con la Placa STEVAL-3DP001V1.



Figura 46. Motor NEMA17-17HS3401.

Tabla 5. Características de los motores PAP NEMA17 del extrusor.

Motor	17HS3401
Ángulo de paso (°)	1,8
Corriente nominal (A)	1,3
Resistencia de fase (Ω)	2,4
Inductancia de fase (mH)	2,8
Par de aguante (N·cm min)	28
Par de detención (N·cm max)	1,6
Inercia rotor ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)	34
Nº de cables	4
Longitud del motor (mm)	34
Peso (g)	220

5.2.1.3. Fusor All metal Hot–end V6

El fusor o *hot–end* seleccionado para el proyecto es el fusor All metal Hot–end V6. Este es compatible con el alimentador Titan, y al igual que este, puede ser montado para una alimentación directa o *Bowden*. Es un extrusor resistente hecho completamente de metal y que puede alcanzar temperaturas elevadas de hasta 300 °C, condicionado por un conducto de teflón que tiene y la temperatura máxima que acepta el termistor. Puede imprimir una gran variedad de materiales, aunque en este caso se empleará solamente PLA. De igual manera, en caso de algún atasco se puede retirar fácilmente del alimentador así como desensamblarlo para hacer un buen mantenimiento, lo que en este caso resulta una característica interesante.

Como se puede ver en Figura 47, el fusor All metal Hot–end V6 está compuesto por los siguientes elementos:

- Bloque calefactor
- Termistor de 100 k Ω
- Calentador cerámico cubierto con acero inoxidable
- Barrera térmica (garganta) de acero inoxidable
- Disipador de aluminio
- Ventilador de 12 V con sujeción
- Conector de aluminio
- Boquilla

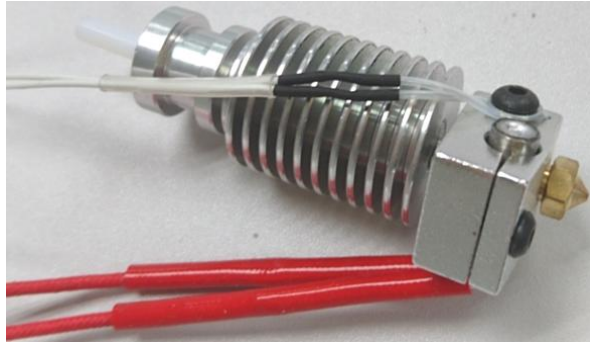


Figura 47. Fusor All metal Hot-end V6.

Aunque se ha incluido la boquilla en el conjunto del *hot-end* en el siguiente apartado se encuentra explicada con más detalle.

5.2.1.4. Boquilla de latón Ø 0,4 mm

Las boquillas por las que se deposita el filamento se escogen principalmente en base a la finalidad de la impresión de la pieza y el material que se va a extruir. Dado el carácter académico de la máquina disponible, no se tiene como objetivo realizar una gran cantidad de impresiones, ni tampoco utilizar diversos materiales, lo que sería un condicionante a la hora de escoger la boquilla.

Es por ello que se ha decidido emplear una boquilla de latón con un diámetro de orificio de extrusión de 0,4 mm, Figura 48. Este tipo es una de las boquillas más empleadas dada su versatilidad, y puesto que se van a realizar pequeñas pruebas de impresión utilizando para ello PLA como material, se ha considerado suficiente para la aplicación en el proyecto.



Figura 48. Boquilla de latón con Ø 0,4 mm de extrusión.

En la siguiente Figura 49 se muestra el extrusor ensamblado al completo con todos los componentes descritos.

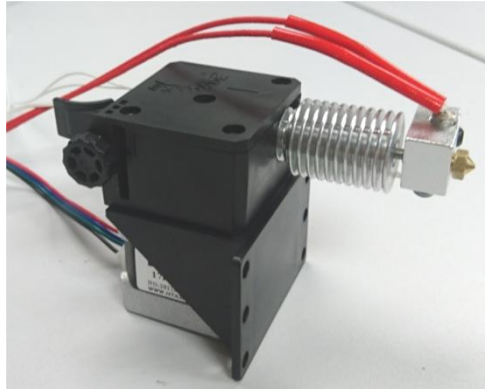


Figura 49. Sistema de extrusión de la impresora ensamblado al completo.

Cabe mencionar que los componentes se han considerado para un filamento de \varnothing 1,75 mm, al ser este el utilizado de forma habitual. Sin embargo, adquiriendo ciertas piezas podría obtenerse un sistema compatible para otro diámetro de filamento, pero en este caso no se ha visto necesario.

5.2.2. Base de impresión

A la hora de escoger la base de impresión para la impresora 3D, se han valorado distintas posibilidades. Utilizar la misma base de madera que dispone la máquina simplemente colocando un material con una superficie adherente para poder fijar el material depositado, emplear como cama o base de fabricación una plancha lisa rectangular o emplear una cama calefactable.

Aunque existe la posibilidad de imprimir directamente sobre la superficie de las camas, ya sean calefactables o no, no es recomendable, ya que al depositar el material directamente sobre ellas, podrían dañarse tanto la boquilla como la cama, de no estar esta bien nivelada. Al mismo tiempo, a la hora de retirar las piezas impresas, el no tener esta superficie intermedia complica la extracción de las mismas, lo que podría dañar el conjunto de la cama durante la manipulación. Para ello, dependiendo de la función de la impresora o del material a imprimir, se emplean distintos tipos de superficies de adhesión, como diferentes cintas adhesivas; "cinta de pintor azul", cinta Kapton (poliamida), planchas metálicas o de PEI flexibles o placas de rígidas de vidrio de borosilicato o vidrio templado.

Para poder regular la nivelación de la base y poder obtener un mayor control sobre el resultado de impresión, se ha decidido emplear una base o cama de impresión en vez de emplear directamente la base de madera. De esta forma, es posible ajustar la distancia entre la

boquilla y la superficie de impresión de una manera más precisa, permitiendo ajustar y resolver de una manera más sencilla los defectos de impresión que puedan surgir.

Al emplear una base de impresión, en este caso, el tamaño de las piezas a fabricar se va a ver limitado, puesto que no se va a emplear una cama de impresión que abarque todo el recorrido que puede realizar la estructura CNC, ya que esto implicaría incremento del coste, al intentar fabricar o conseguir una cama de dimensiones tan elevadas, que dado el carácter experimental de la impresora, no se considera necesario.

Puesto que se dispone de una placa que cuenta con controladores para emplear una cama caliente, se ha decidido optar por esta alternativa, ya que además de ser una de las más empleadas, es fácil de implementar, y es una de las opciones más interesantes y con mejores resultados para la extrusión de piezas de PLA, material que va a ser empleado en ese caso.

5.2.2.1. Cama calefactable MK3 ALU 12 V 220 x 220 x 3 mm

La cama escogida para emplear en la impresora es la MK3 ALU 12 V, Figura 50, con una superficie de 220 x 220 y 3mm de espesor. Esta consiste en una plancha rectangular de aluminio en la que se ha adherido una capa de 35 μm de cobre que con el paso de la corriente aporta y reparte el calor por la plancha, que al ser de aluminio reparte el calor de forma homogénea. Puede alcanzar una temperatura máxima de 180 °C aunque de normal se emplean en una temperatura de 50-60 °C.



Figura 50. Frontal y reverso de la placa de aluminio MK3 ALU 12 V.

Puesto que se alimenta con 12 V, es totalmente compatible con la Placa de impresión, a la que se conecta por un lado a la alimentación y por otro al termistor, que le proporcionará la respuesta de la temperatura a la que se encuentra. Para la parte de alimentación es

necesario aportar 12 V de una fuente de alimentación adicional, y así conseguir los 96 W de potencia que requiere la cama.

Pese a que se puede imprimir directamente sobre el aluminio como ya se ha mencionado previamente, en este caso se ha decidido utilizar una placa de vidrio de borosilicato, Figura 51. De todas las alternativas esta resulta la más duradera, al no tener que reemplazarla cada pocos usos. Permite retirar los trabajos de impresión fácilmente sin tener que desmontar la base completamente, además de proporcionar un buen acabado liso en la base de las piezas. Es fácil de retirar y limpiar, en caso de necesitar aplicar algún producto de adhesión adicional.



Figura 51. Vidrio de borosilicato de 220 mm x 220 mm.

Al contar con orificios en las esquinas, se puede sujetar mediante tronillos a la base de trabajo y regular su altura para conseguir una superficie libre de inclinaciones. En la siguiente Figura 52, se pueden ver en conjunto los componentes correspondientes a la cama caliente.



Figura 52. Componentes principales de la cama calefactable.

5.2.3. Sensor de proximidad

Con el fin de obtener una mejor calidad de impresión, se ha decidido emplear un sensor de proximidad. De esta forma se puede ajustar la distancia a la que se encuentra la boquilla de la cama, y así poder nivelarla. La alternativa de no utilizar ningún sensor, es usar directamente la boquilla como sonda y ajustar la distancia de forma manual en base al contacto que realiza con la cama de impresión.

Entre los dispositivos o métodos para ajustar esta distancia se pueden diferenciar dos grupos principales, los sensores con contacto y sin contacto. Entre los primeros se encuentran por ejemplo los finales de carrera, BLTouch, un servo final de carrera o un solenoide y entre los segundos estarían los sensores inductivos, los capacitivos o los infrarrojos.

Puesto que la placa cuenta con la capacidad de conectar sensores y en el carro de la maquina hay espacio suficiente, se ha decidido emplear un sensor sin contacto, con el fin de evitar problemas o fallos mecánicos en los dispositivos de detección que puedan dar lugar a un mal comportamiento de la impresora. Por último, también se ha tenido en cuenta que la versión disponible de Marlin tenga incluido el código para el uso de ese tipo de detector, puesto que aunque en las versiones más actuales tiene implementados varios tipos de detectores, en las más antiguas estas características se ven más limitadas.




5.2.3.1. Sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX

Para esta impresora se ha decidido emplear un sensor de distancia capacitivo del tipo LJC18A3-H-Z/BX, cuyas características se muestran la siguiente Tabla 6. Por otro lado, en la Tabla 7 se indica la forma en la que se tiene que conectar el sensor.

Tabla 6. Características del sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.

Sensor	LJC18A3-H-Z/BX
Polaridad	NPN
Voltaje	6 - 36 V DC
Corriente	0,2 A
Distancia de detección	Hasta 10 mm
Tipo interruptor	NA
Temperatura funcionamiento	-25 °C - 70 °C
Dimensiones	M18 x 61 mm
Longitud cable	180 cm

Tabla 7. Conexiones del sensor de detección.

Conexiones	Cables
V +	
GND	
Señal	

Se ha decidido emplear este sensor, Figura 53, puesto que es capaz de detectar tanto materiales metálicos o férricos como no metálicos, y en el caso estos últimos, tienen que tener una constante dieléctrica elevada para ser detectados, lo que permite detectar materiales hasta a 10 mm de distancia.



Figura 53. Sensor capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.

En el caso del vidrio de borosilicato que se encuentra en la cama de impresión, es capaz de detectarlo a distancias cortas (hasta 1 mm), a diferencia de un sensor inductivo que no lo podría detectar. Es por ello que es un tipo de sensor muy utilizado en la impresión 3D para la nivelación de la cama con el eje Z.

5.3.CONTROL DE LA IMPRESORA

Una de las partes más importantes que necesita la impresora es el medio para controlarla. Generalmente, en la impresoras comerciales viene instalado un panel LCD, Figura 54, (que incluye algún pulsador e incluso un encoder) desde el que se pueden controlar y configurar distintos parámetros, así como mandar ejecutar distintas órdenes. Estas pueden ir desde la impresión de una pieza a un cambio de filamento o de boquilla, por ejemplo.



Figura 54. Ejemplo de LCD empleado en Impresoras 3D.

Fuente: www.es.aliexpress.com/item/32810042831.html?gatewayAdapt=glo2esp

Por otro lado, también existe la opción de controlar la impresora desde un PC. En este caso, dependiendo de la aplicación empleada, la interfaz puede variar, pero generalmente se puede realizar las mismas funciones que con un LCD e incluso más. Ya que este permite el acceso y control de la impresora con un manejo más cómodo y de una forma visualmente más intuitiva.

También se ha considerado la opción de instalar ambos elementos, sin embargo se ha visto innecesario tenerlo de forma redundante puesto que por comodidad y facilidad el uso del PC será mayoritario, y el empleo del teclado/panel LCD se vería relegado a un segundo plano.

Al mismo tiempo, al ser una máquina de prueba con un objetivo académico, y no una máquina enfocada a la fabricación industrial, se ha considerado de mayor interés emplear la opción de control desde un PC. Dado que de otra forma, sería necesario tener que seleccionar, activar y configurar un componente adicional compatible cuya necesidad no es imprescindible. Es por ello, que se ha decidido emplear únicamente el control desde el ordenador.

Como ya se ha mencionado en anteriormente, desde un ordenador se pueden realizar las impresiones desde las distintas interfaces que dispone la impresora como son, puerto serie vía UART, desde una tarjeta microSD o desde el módulo Wi-Fi.

Para poder imprimir desde la tarjeta microSD es necesario cargar los ficheros G-code en la misma y acceder desde una interfaz física (como un panel LCD) o digital (desde una terminal de puerto serie o una GUI) para poder iniciar la impresión. Es por ello que la comunicación y control de la impresora se reduce a dos alternativas, mediante el puerto serie o el módulo Wi-Fi y servidor web.

En el caso del módulo Wi-Fi, es necesario llevar a cabo un proceso de actualización del firmware propio del complemento de la placa y también adaptar la configuración de la impresora para poder acceder al servidor web. De esta forma se puede acceder al control de la impresora mediante el GUI que ofrece la placa. Se ha podido comprobar que la interfaz por defecto es bastante limitada y la navegación resulta poco cómoda debido al diseño. Es posible realizar cambios en la interfaz, sin embargo requiere de programación web y las modificaciones están muy condicionadas.

Por otro lado, si se usa el puerto Serie, aunque en principio se podría controlar simplemente mediante una terminal de puerto serie y programando directamente en código G, es más sencillo y cómodo emplear alguna de las distintas plataformas disponibles como por ejemplo Pronterface, Repetier, Octoprint etc. De esta forma, simplemente conectando un cable y configurando los parámetros de comunicación del puerto COM se puede conseguir una comunicación fiable entre la placa y el PC.

Es por ello que se ha decidido emplear la comunicación vía puerto Serie. Este resulta el método más sencillo de implementar a la vez que permite escoger entre distintos programas con función de host desde donde controlar la impresora. De esta forma se puede seleccionar el más adecuado en base a la manejabilidad, la interfaz o a las funciones que ofrece tanto de control como de monitorización.

5.3.1. Conexión Serie

Con el objetivo de comunicar la impresora vía puerto serie, se ha empleado un Modulo FT232 Convertidor USB a serie TTL UART (parte izquierda de la Figura 55). Para conectarlo al ordenador se ha utilizado un cable miniUSB-USB, siendo el extremo de miniUSB el que va conectado al adaptador. Por otro lado, para conectarlo a la placa STEVAL-3DP001V1 en vez de conectar directamente los pines de RX, TX, alimentación 5V y GND del adaptador a los correspondientes de la placa, se ha añadido un aislador de bus (parte derecha de la Figura 55).

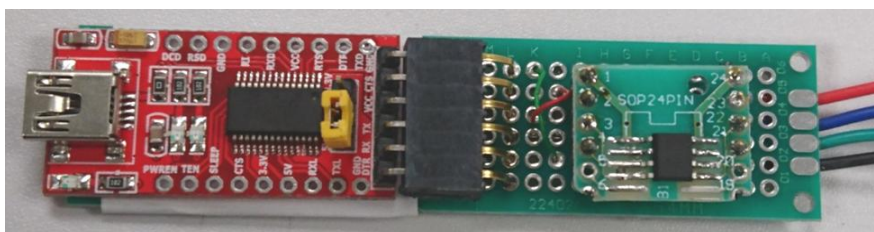


Figura 55. Modulo FT232 Convertidor USB a serie TTL UART conectado al aislador de bus.

El objetivo de este, es aislar la alimentación y la masa de ambas partes (el Pc y la placa) de forma que no se generen diferencias de tensión en las conexiones a masa que puedan generar un mal funcionamiento de la impresora. Para ello se emplea el aislador STISO621 como se muestra en la Figura 56, conectándolo de la forma indicada en la Figura 57.



Figura 56. Aislador de canal digital dual STISO621 con direccionalidad 1-1.

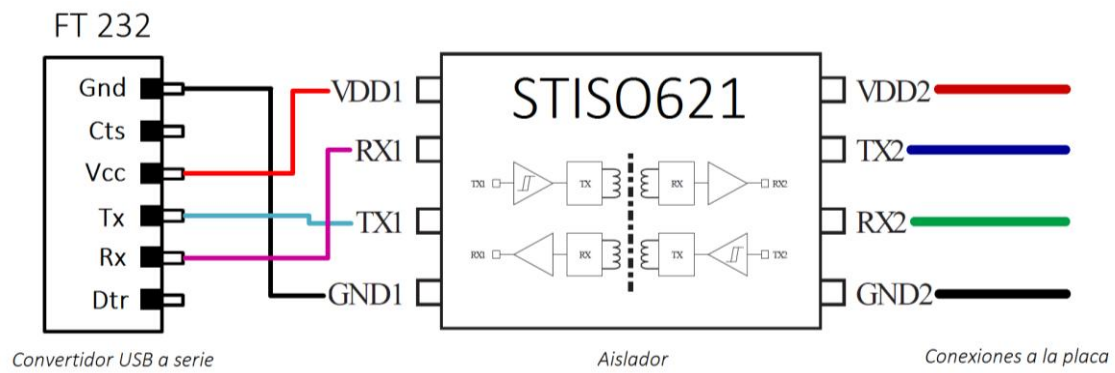






Figura 57. Conexión realizada entre el módulo FT 232 y el aislador STISO621.

De esta forma a la salida del aislador se encuentran los cuatro cables que se tienen que conectar a los pines de la placa, siendo las conexiones correspondientes las que se indican en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Conexiones entre el módulo de conexión serie y la placa STEVAL-3DP001V1.

Señal salida adaptador	Color cable	Señal placa	Pin Placa
UART TX		UART TX	23
UART RX		UART RX	25
5 V		5 V	38
GND		GND	39

En la siguiente Figura 58 se muestra de forma más visual la conexión realizada entre los cables salientes del módulo y la placa.

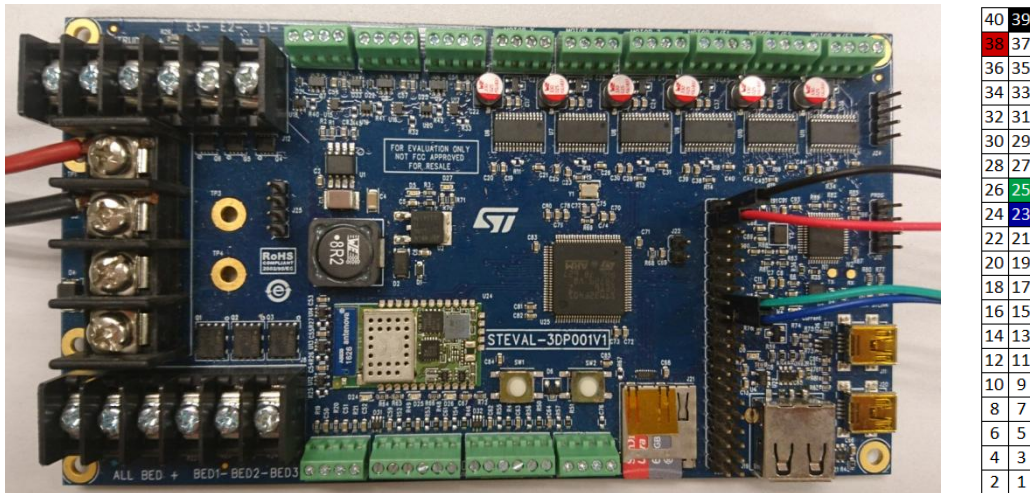


Figura 58. Conexión UART realizada en los pines de la placa STEVAL-3DP001V1.

Por último, en la siguiente Figura 59 se ve el módulo montado y preparado para conectar, por una parte a la placa y por otra al PC.

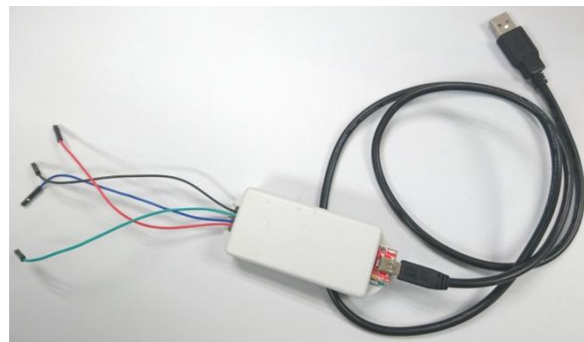


Figura 59. Módulo para comunicación Serie preparado con el cable miniUSB.

Para que la conexión serie se produzca de forma correcta, es imprescindible que los parámetros de la conexión coincidan en ambas partes. Por ello, en caso de emplear una terminal se deben cumplir las siguientes características:

- Baudios: 115200
(Este valor se ha definido en la configuración de la impresora (fichero *configuration.h*) al ser el empleado por defecto en la plantilla de ST, pero se puede modificar, y en tal caso hay que asegurar que sea el mismo en ambas partes)
- Datos: 8 bit
- Paridad: Ninguna
- Parada: 1bit
- Control de flujo: Ninguno

- Transmisión: CR + LF
- Recepción: CR
- Eco local: On

Sin embargo, a la hora de utilizar el software de control, no se han podido modificar muchas de estas características, por lo que principalmente se han determinado que el número de baudios y el puerto COM del ordenador al que se ha conectado el USB han sido los correctos.

Esos dos parámetros junto con la correcta conexión de los cables en los pines de la placa, han sido los factores primordiales para una correcta comunicación.

5.3.2. Software de control

Para escoger el software a emplear con el objetivo de controlar la impresora, se han barajado distintas opciones como Pronterface, Repetier u Octoprint. Aunque existen más alternativas, entre los programas libres disponibles estas tres han resultado más interesantes para cubrir las necesidades del proyecto.

En una primera comprobación, al disponer de una Raspberry PI (3 B+) se probó a instalar en ella Octoprint para probar su funcionamiento. A esta se conecta el cable de comunicación serie y actúa de servidor, donde después se accede desde el PC mediante un navegador. Tras configurar los parámetros, se pudo conseguir una comunicación correcta observando las respuestas mediante la terminal.

Sin embargo, al implicar el empleo de elementos externos como la RPI, se decidió probar también con los otros programas que se instalan y conectan directamente en el PC. Tras configurar los parámetros de comunicación en el caso de Pronterface, Figura 60, la comunicación no ha resultado ser del todo estable, ya que aunque en la terminal mostraba el estado de conectado, al intentar mover un motor en forma de prueba este no ha llegado a responder.

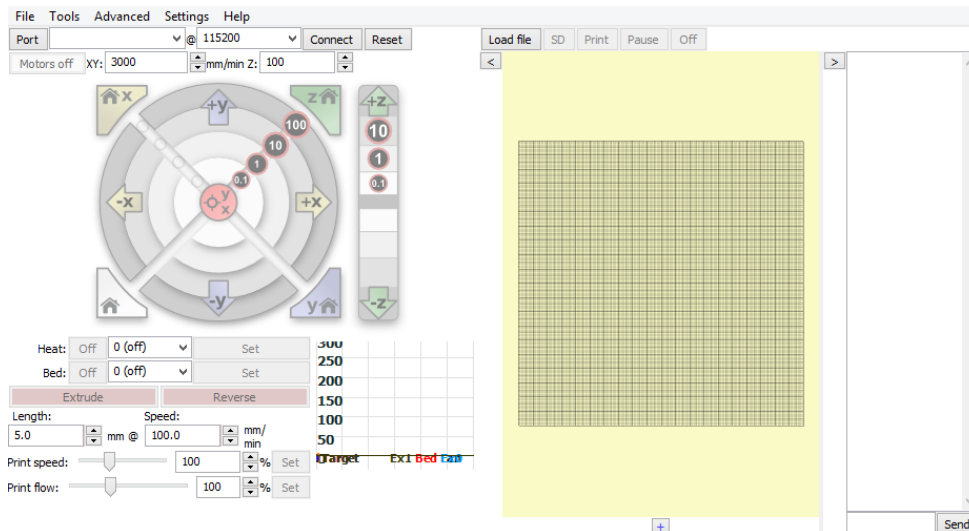


Figura 60. Interfaz del software Pronterface.

Por otra parte, en el caso del programa Repetier (host), Figura 61, tras ajustar los parámetros de comunicación se pudo conseguir también establecer la conexión y realizar el control del motor correctamente. En este caso, también ofrece las herramientas para situar las piezas de impresión en el espacio de trabajo e incluso actuar como *Slicer* donde se configuran los parámetros de impresión y se traduce la geometría al lenguaje G-code, aunque esto requiere de una configuración adicional.

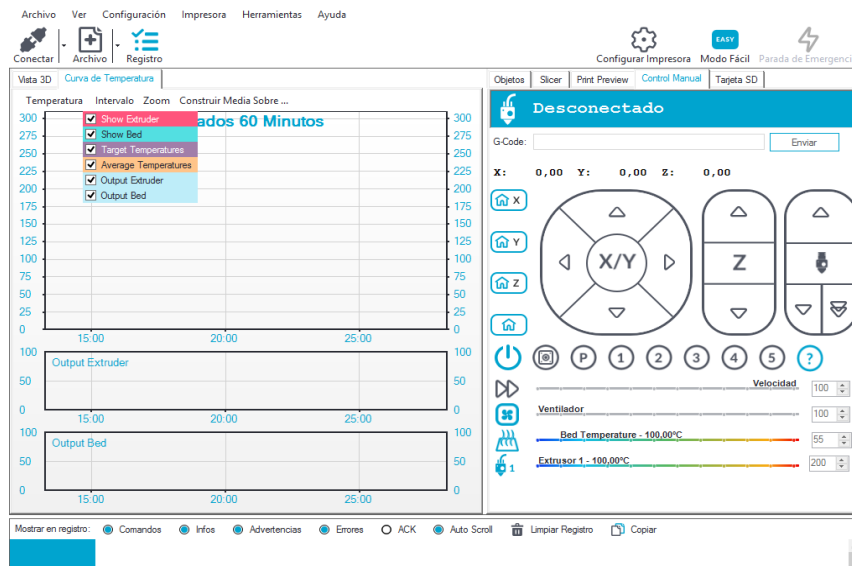


Figura 61. Interfaz del software Repetier Host.

Ante estas dos alternativas, se ha decidido escoger Octoprint, Figura 62. Esto se debe principalmente al diseño de la interfaz, la manejabilidad del control manual, las gráficas de estado y al control desde la terminal (mediante comandos G-code). No obstante, mientras se

consiga establecer una conexión adecuada, cualquiera de las alternativas puede ser válida. Ya sea de las anteriormente presentadas como de las distintas alternativas disponibles en internet, tanto de software libre como de pago.

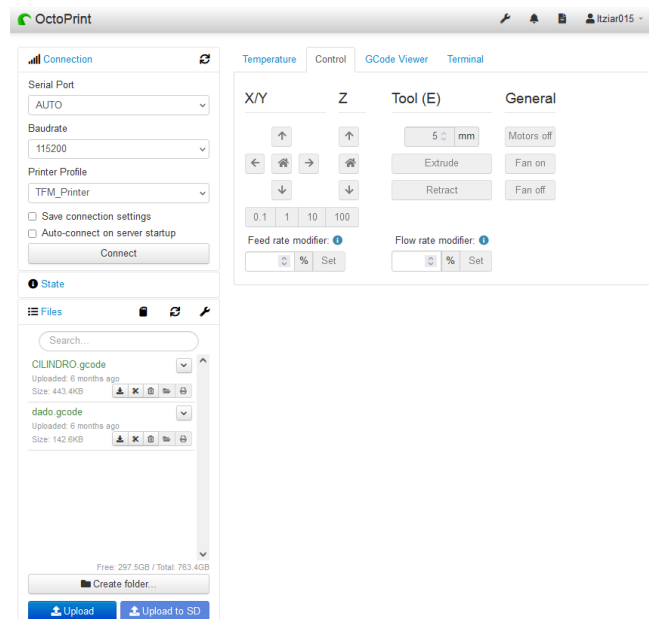


Figura 62. Interfaz del software Octoprint.

Al mismo tiempo, para evitar depender de la RPI, se ha decidido instalar Octoprint directamente en Windows siguiendo el siguiente proceso [10]. Se ha creado un servidor virtual en Python e instalando ahí el programa. De esta forma, cuando se ejecuta el servidor en el PC, se puede acceder desde navegador al igual que cuando se emplea una Raspberry.

5.3.2.1. Octoprint

Octoprint es un software 100 % libre y gratuito creado por Gina Häußge, disponible en el repositorio de GitHub para que cada usuario pueda modificarlo y adaptarlo a sus necesidades [11].

Ofrece el control remoto y monitorización tanto de la impresora como de los trabajos de impresión que esta esté llevando a cabo desde el navegador web. Desde ahí se pueden realizar distintas operaciones como por ejemplo:

- Mantener una vigilancia de las temperaturas del extrusor y la cama caliente en de forma visual en la gráfica.
- Visualizar de forma gráfica el recorrido formado por el G-code que se está ejecutando.

- Realizar un control manual del posicionamiento de los ejes controlando su avance o del extrusor empujando o retrayendo el filamento.
- Controlar el trabajo de impresión iniciando, parando o pausando el proceso.

Es un programa compatible con una gran cantidad de impresoras 3D, y que además cuenta con un potente sistema de *plugins* que le permiten ampliar sus funcionalidades. Entre estas se encuentra emplear una cámara embebida para seguir el proceso de impresión, crear un *timelapse* del mismo o visualizar el nivelado de la cama.

5.4. DISEÑO DE PIEZAS NECESARIAS

A diferencia de los elementos explicados en el apartado anterior, los cuales han sido posible adquirir ya fabricados a distintos proveedores, para poder adaptarlos y montarlos a la estructura ha sido necesario diseñar distintas piezas. Por un lado las piezas encargadas de fijar el extrusor y el sensor de distancia al carro de la máquina y por otro, el conjunto encargado de soportar la cama caliente en la mesa de trabajo de la estructura. Para ello, se han tenido en cuenta diferentes aspectos en lo referente al diseño, al mismo tiempo que han sido diseñadas para ser fabricadas con PLA mediante impresión FDM.

5.4.1. Sujeción del extrusor al carro

A fin de poder sujetar el conjunto correspondiente al extrusor en el carro de la estructura, se realizó el diseño en Solidworks de una sujeción capaz de mantener unido de forma adecuada el extrusor a la base metálica del carro.

Para ello, se han tenido en cuenta la geometría y las dimensiones de ambas partes, así como distintos elementos cercanos que pudiesen influir en el resultado. De esta forma, dependiendo de la disposición del extrusor, el recorrido disponible del eje Y o del eje Z se ven reducidos en mayor medida, por lo que en este caso, los rodamientos lineales que se deslizan a lo largo de las guías del eje Z han sido los más condicionantes.

Estos rodamientos se mueven a lo largo del eje Z, y aunque al alcanzar la posición de Z cercana al mínimo no influyen en el entorno, al alcanzar la posición máxima, la pieza empleada para fijarlos a la estructura ocupa parte del espacio disponible sobre el que amarrar el extrusor, y en caso de no considerarlo, implicaría una colisión.

Por lo tanto, cuanto menos sobresale el extrusor, se produce una mayor reducción del recorrido vertical. En consecuencia, se ha diseñado una pieza que deja totalmente libre el recorrido necesario para las guías verticales. Esto ha supuesto una ligera reducción del recorrido en el eje Y, sin embargo, dado que las dimensiones del espacio de trabajo de la máquina son superiores a la cama de impresión, no ha resultado tan restrictivo como en el caso del movimiento vertical.

Por otro lado, se ha procurado emplear un espesor de pieza no demasiado grueso, ya que esto implica la reducción del margen entre la boquilla y la base del carro. Este margen es necesario para poder situar la pieza encargada de amarrar el sensor, y debe mantenerse la boquilla por debajo del saliente mínimo del carro, para así poder realizar la impresión correctamente, como se explica en el siguiente apartado.

Para el amarre del soporte a la base del carro, se ha adaptado el diseño para ser fijado mediante tornillos a los orificios roscados ya existentes en el soporte metálico de este. De los seis orificios disponibles, se ha decidido emplear tres para el amarre del extrusor por la parte superior y tres para el sensor por la parte inferior. Estos orificios tienen un tamaño de Métrica 6 por lo que se ha adaptado el diseño a las dimensiones correspondientes.

De igual manera, la pieza para unir el extrusor al soporte también cuenta con orificios para poder fijarlo mediante tornillos, en esta ocasión de Métrica 4. De esta forma, para obtener los puntos de unión se han tenido en cuenta tanto la disposición como las dimensiones de los agujeros, y se ha adaptado el espesor de la pieza a los tornillos y/o las restricciones de altura ya mencionadas.

Por ello, teniendo en cuenta las condiciones de diseño mencionadas, la pieza resultante para el amarre del extrusor al carro ha sido la que se muestra en la siguiente Figura 63. Como se puede observar, es una pieza de un diseño sencillo que fácilmente puede ser fabricada mediante impresión 3D.

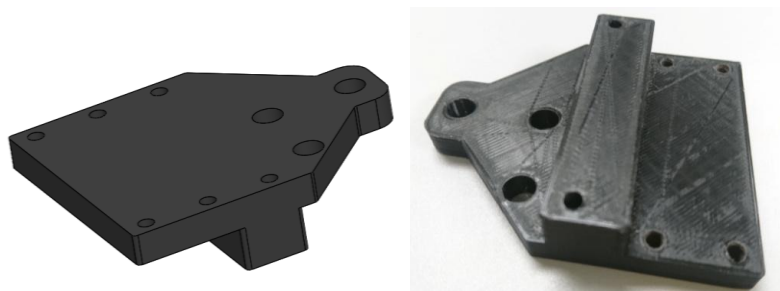


Figura 63. Modelo CAD y pieza final impresa del soporte del extrusor.

5.4.2. Sujeción del sensor al carro

Para realizar el nivelado de la cama con el sensor de distancia, es necesario sujetarlo al carro junto con el extrusor y es por ello que se ha requerido generar una pieza adicional. Puesto que en la parte superior se encuentra alojado el extrusor, esta pieza se ha diseñado para ser amarrada mediante tornillos en la parte inferior del carro, ya que como se ha mencionado anteriormente, este cuenta con orificios roscados.

Dado que el sensor cuenta con dos tuercas con las que poder fijar su posición verticalmente, el diseño se ha basado en realizar un apoyo con un orificio circular en el que situarlo, limitando el desplazamiento en el plano XY y pudiendo regular la altura de detección variando la posición de las tuercas. En este caso, se ha diseñado una geometría que también actúa como apoyo para la parte saliente que tiene la pieza de amarre del extrusor.

De esta forma, se han tenido que considerar dos limitaciones principales a la hora hacer el diseño del soporte. Por un lado, la ubicación del sensor, a un lado u otro del extrusor, y por otro, el espesor sobresaliente de la pieza por la parte inferior del carro.

En el caso del primero, dado que el extrusor no tiene la boquilla totalmente centrada ya que esta ligeramente desplazada a la derecha, para evitar que el fusor y el sensor queden demasiado juntos y que el calor de este pueda influir negativamente en la detección del sensor, se ha colocado al lado izquierdo del extrusor, quedando más alejado de la fuente de calor.

Del mismo modo, esta posición resulta la más adecuada para que el cable del sensor no interfiera en el espacio de trabajo, de forma que finalmente el sensor se queda ubicado en la parte posterior izquierda respecto de la boquilla. Este desfase entre la posición de la boquilla y el sensor no supone ningún problema ya que es una característica configurable dentro del firmware Marlin.

En este caso, la segunda limitación de diseño ha resultado ser un factor crucial, ya que se ha tenido que vigilar que el espesor de la pieza, hacia la parte inferior, no sobrepase la altura de la boquilla. El no cumplir esta condición, implicaría una colisión entre el soporte y la cama, impidiendo que el material se pueda depositar correctamente, obteniendo como resultando una impresora con un mal funcionamiento.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el resultado del diseño final se puede ver en la Figura 64. De igual manera que la pieza de soporte para el extrusor, el resultado es una pieza que fácilmente puede ser fabricada mediante impresión 3D.

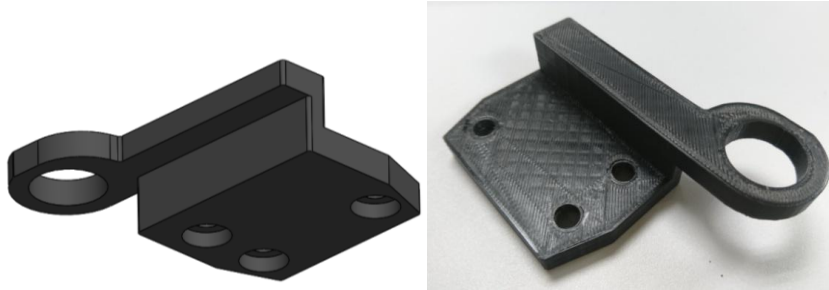


Figura 64. Modelo CAD y pieza final impresa del soporte del sensor.

5.4.3. Apoyo de la cama a la mesa de trabajo

Para poder situar la cama calefactable sobre la mesa de trabajo de madera con la que cuenta la máquina, se han empleado cuatro soportes con un mismo diseño, fabricados mediante impresión 3D.

Estos han sido diseñados para conseguir un apoyo de impresión estable y a su vez cuentan con un mecanismo de regulación que permite nivelar la cama y conseguir una superficie de impresión lo más equilibrada posible.

Dicho grupo está formado por el soporte de PLA, y un conjunto de tornillo-muelle-tuerca, junto con 2 arandelas, que permiten regular la altura de la cama. De esta forma desde las cuatro esquinas se puede reducir la altura (apretando el tornillo, giro antihorario) o por lo contrario aumentarla (aflojando el tornillo, giro sentido horario). El muelle (de compresión) es el encargado de evitar el tambaleo de la cama al ejercer fuerza de empuje respecto a las superficies de contacto inferior (soporte) y superior (cama caliente).

Tras un primer prototipado de prueba, la pieza final ha sido la siguiente, Figura 65. En ella se han ajustado ligeramente las dimensiones respecto al diseño inicial para poder facilitar el montaje y el nivelado.

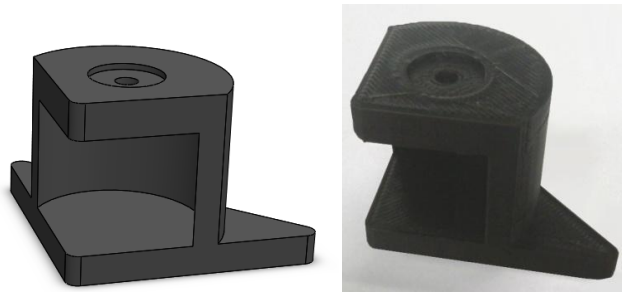


Figura 65. Modelo CAD y pieza final impresa del apoyo de la cama de impresión.

Por último, al ser las dos superficies que están en contacto, la base y el soporte, totalmente lisas, se ha empleado una capa de goma EVA, para reducir el efecto de las vibraciones debido al movimiento de los ejes y cinta adhesiva de doble cara, para fijarlas y evitar el deslizamiento entre sí.

En el Anexo B se encuentran los planos de las tres piezas diseñadas.

5.5. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA

Con todos los componentes y piezas necesarias ya preparados, se ha realizado el montaje y conexionado de todos ellos, para así poder probar el funcionamiento del sistema de impresión 3D.

5.5.1. Instalación del firmware en la placa

Para poder hacer funcionar y comprobar el correcto funcionamiento tanto de la placa como de sus componentes, en primer lugar, ha sido necesario cargar el firmware. Se ha insertado una tarjeta microSD en la ranura correspondiente, ya que es necesaria para el correcto funcionamiento del mismo. Tras ello, se ha conectado la placa a los 12 V de la fuente de alimentación, y al PC mediante el puerto de depuración ST-LINK.

A continuación se han seguido los pasos indicados en el apartado 3.3.4 Loading firmware [3] del manual. De esta forma con la placa conectada al PC y el jumper conectado en el pin J22 se ha arrastrado el fichero BIN desde el IDE al puerto del PC conectado. Una vez

cargado y sin ningún error, se ha desconectado la placa y retirado el Jumper, de esta forma al volver a conectar la placa estará preparada para ejecutar Marlin.

5.5.2. Verificación de comunicaciones

Con el firmware listo en la placa, esta se ha conectado mediante USB al PC para poder establecer la comunicación serie. Dicha conexión se encuentra explicada en el apartado 5.3.1 Conexión Serie, previamente desarrollado.

De esta forma, en primer lugar se ha ejecutado el firmware en el IDE, y tras comprobar que no se ha producido ningún error en la depuración, se ha procedido a establecer la conexión desde Octoprint, en el cual tras indicar los baudios y el puerto de comunicación correspondientes, Figura 66, se ha podido comprobar que la comunicación se ha establecido correctamente, tras recibir los mensajes iniciales y quedarse a la espera de recibir algún comando.

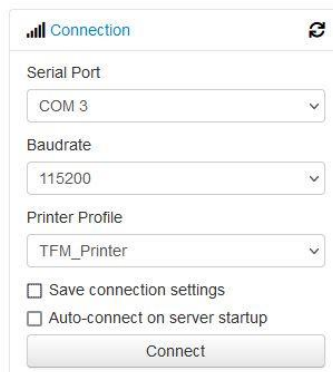


Figura 66. Interfaz de conexión serie de Octoprint.

Para poder llevar a cabo todas las pruebas y comprobar el funcionamiento de los distintos elementos, se han realizado las conexiones de todos los elementos de la forma en que se explican en los siguientes apartados.









5.5.3. Cableado de los motores de 8 hilos

Puesto que los motores híbridos bipolares encargados del movimiento de los ejes X, Y y Z por sus características cuentan con 4 devanados, u 8 cables de salida, es necesario unirlos entre sí en serie o en paralelo para poder conectarlos a las cuatro entradas, dos por fase, con las que cuenta la placa.

En este caso, para obtener el comportamiento más apropiado para la aplicación de impresora 3D, una mayor velocidad es más relevante frente al par, no obstante, este último tiene que ser suficiente como para poder mover el sistema. Así pues, la configuración empleada ha sido la conexión en paralelo, ya que como se ha explicado en el apartado 3.1.3 Motores PAP híbridos, se puede alcanzar una mayor velocidad sin sufrir una reducción crítica del par.

Es por ello que para conseguir la conexión en paralelo, se ha realizado la unión de cables que se muestra en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9. Conexiones de cables realizadas en los motores híbridos bipolares de 8 hilos.

Fases	Cables	Colores
A +		Naranja
		Negro/Blanco
A -		Negro
		Naranja/Blanco
B -		Rojo
		Amarillo/Blanco
B +		Amarillo
		Rojo/Blanco

5.5.4. Conexión de elementos

En las siguientes tablas se encuentran recogidas las conexiones realizadas entre los distintos componentes y los pines de la placa STEVAL-3DP001V1.

ALIMENTACIÓN

En la Tabla 10 se encuentran recogidos las conexiones para la alimentación de la placa y la cama calefactable.

Tabla 10. Conexión de los pines de alimentación.

Conector	Pin	Señal	Función
J1	1	12 V	Alimentación principal placa (max 20 A)
	2	GND	
	3	12 V	Alimentación cama (max 30 A)
	4	GND	

EJES

La Tabla 11 recoge los pines correspondientes a los ejes de desplazamiento. Para ello se emplean las fases obtenidas en el apartado anterior.

Tabla 11. Conexión de los pines correspondientes a los ejes.

Conector	Pin	Señal	Función
J2	1	Fase B +	Accionamiento del motor PAP del eje X
	2	Fase B -	
	3	Fase A -	
	4	Fase A +	
J3	1	Fase B +	Accionamiento del motor PAP del eje Y
	2	Fase B -	
	3	Fase A -	
	4	Fase A +	
J4	1	Fase B +	Accionamiento del motor PAP del eje Z
	2	Fase B -	
	3	Fase A -	
	4	Fase A +	

EXTRUSOR

En la siguiente Tabla 12 se encuentran todas las conexiones correspondientes al extrusor, que incluyen las del motor, de la alimentación del *hot-end*, la detección de la temperatura y la ventilación.

Tabla 12. Conexión de los pines correspondientes al extrusor.

Conector	Pin	Señal	Función
J12	1	V+	Alimentación del calentador del <i>hot-end</i>
	6	GND (-)	
J13	1	V+	Accionamiento del ventilador del <i>hot-end</i>
	2	GND (-)	
	3	GND (-)	Respuesta de temperatura del NTC del <i>hot-end</i>
	4	V+	
J5	1	Fase B +	Accionamiento del motor PAP del Extrusor
	2	Fase B -	
	3	Fase A -	
	4	Fase A +	

En este caso, el motor cuenta directamente con 4 cables de salida, los correspondientes a cada una de las fases, a diferencia de los motores encargados del desplazamiento en los ejes.

CAMA

La Tabla 13 recoge las conexiones de alimentación y de medición de temperatura correspondientes a la cama calefactable.

Tabla 13. Conexión de los pines correspondientes a la cama calefactable.

Conector	Pin	Señal	Función
J8	1	V+	Alimentación de la cama calefactable
	4	GND (-)	
J9	1	V+	Respuesta de temperatura NTC de la cama calefactable
	4	GND (-)	

SENSORES

Las conexiones de los sensores empleados tanto para la detección de los límites de la impresora como para el nivelado de la base, se encuentran divididos en dos partes. Por un lado las conexiones de los límites mínimos, que cuentan con conectores específicos, Tabla 14, y por otro lado los correspondientes a los límites máximos y la detección del eje Z para el nivelado, cuyos pines se han configurado en los conectores disponibles de la ranura de expansión, Tabla 15.

Tabla 14. Conexión de los pines correspondientes a los finales de carrera mínimos.

Conector	Pin	Señal	Función
J16	1	V _{SALIDA}	Detección límite mínimo del eje X
	2	V+	
	3	V _{SALIDA}	Detección límite mínimo del eje Y
	4	V+	
	5	V _{SALIDA}	Detección límite mínimo del eje Z
	6	V+	

Tabla 15. Conexión de los pines correspondientes a los límites máximos y el sensor de nivelado.

Conector	Pin	Señal	Función
J23	27	V _{SALIDA}	Detección límite máximo del eje Z
	29	V _{SALIDA}	Detección de la cama de impresión (eje Z)
	36	V _{SALIDA}	Detección límite máximo del eje X
	37	V _{SALIDA}	Detección límite máximo del eje Y
	38	5 VCC	Alimentación de señal a 1
	39	GND	Alimentación de señal a 0

Aunque se han configurado los finales de carrera máximos para todos los ejes, solamente se han empleado la conexión para el eje Z, ya que como se ha mencionado anteriormente, debido a las dimensiones se han empleado límites programables.

Estos finales de carrera, al ser NA, se han conectado de forma que al ser accionados y cerrar el contacto reciban la señal de 5 V. En el caso del sensor de detección de la cama, se ha conectado en base a las indicaciones para su conexión (Tabla 7).

El Anexo C corresponde al esquema de las conexiones representadas de forma gráfica.

5.5.5. Ensamblaje de componentes

Una vez todas las piezas han sido imprimidas, estas se han retocado, retirando con ayuda de papel de lija y diferentes limas los remanentes de soportes y pequeños restos de filamento que se han quedado en la superficie durante la impresión, para así obtener el acabado final. En el caso de la pieza en la que se amarra el extrusor, también se han roscado los orificios que van atornillados, y dada la dureza del PLA, con atornillar y retirar los mismos tornillos empleados para el amarre, ha sido suficiente para generar la rosca.

En primer lugar se han ensamblado los componentes correspondientes a la cama calefactable. Para ello, en cada una de las esquinas, donde se encuentran los orificios de la base de aluminio, se han armado los apoyos (descritos en el apartado 5.4.3 Apoyo de la cama a la mesa de trabajo). Empleando los componentes que se muestran en la siguiente Tabla 16. Se ha introducido el tornillo, a continuación una de las arandelas, el muelle, la arandela restante, la pieza de apoyo y finalmente se ha fijado todo con la tuerca, obteniendo el ensamblaje que se ve a continuación en la Figura 67.

Tabla 16. Elementos que componen los soportes de la cama de impresión.

Elemento	Cant. por soporte	Cant. total
Tornillo avellanado M3 x 30 DIN 7991	1	4
Arandela plana ancha 4,3 DIN 9021	2	8
Muelle de compresión de acero, l = 10 mm; d = 0,8 mm; De = 8 mm; carga max. 2kg	1	4
Pieza soporte	1	4
Tuerca mariposa M3 DIN 315	1	4

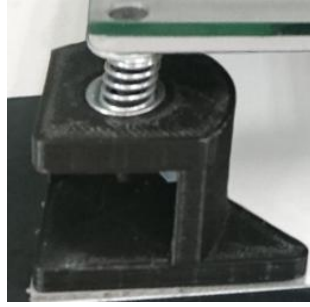


Figura 67. Conjunto ensamblado de un soporte de la base de impresión.

Con todos los apoyos ensamblados, mediante unas pinzas se ha fijado el cristal donde se adhieren las impresiones, y se han conectado los cables obteniendo la siguiente cama de impresión, Figura 68.

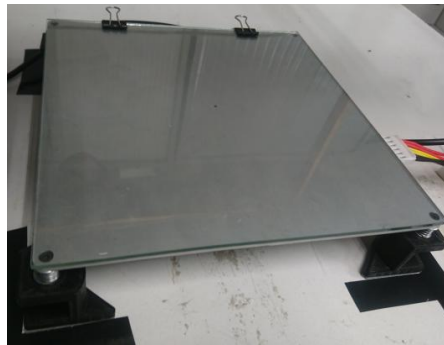


Figura 68. Base de impresión completamente ensamblada.

La base de impresión se ha situado en el espacio de trabajo dejando cierto margen en la parte anterior e izquierda, para poder observar mejor los desplazamientos. De esta forma, con cinta adhesiva se han marcado las posiciones para comprobar su correcta ubicación y corregirla en caso de que se desplace.

Antes de amarrar el extrusor, en la cara posterior del carro, se ha fijado el final de carrera correspondiente al límite Z_{max} con ayuda de cinta adhesiva, como se puede ver en la Figura 69, ya que este se encontraba suelto.

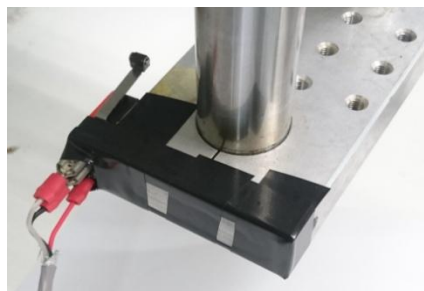


Figura 69. Amarre del sensor de final de carrera Z_{max} .

En segundo lugar, se ha realizado el acople del extrusor al soporte y después a la base metálica del carro. Para amarrar el extrusor, se han empleado cuatro tornillos M4 x12 DIN 912 en cuatro de los seis orificios con los que cuenta, ya que en la pieza resultante se ha producido una variación de las dimensiones que no ha permitido la concentricidad en todos los orificios. Sin embargo, esto no ha supuesto un problema, ya que con los cuatro tornillos ha sido suficiente para obtener una fijación firme, Figura 70.

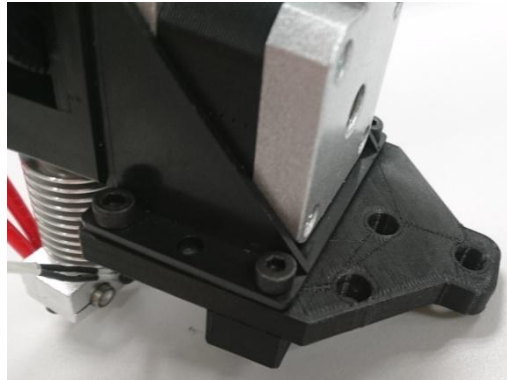


Figura 70. Amarre del extrusor al soporte.

A continuación con tres tornillos M6 x 12 DIN 912 se ha fijado todo el conjunto anterior por la parte superior del carro, Figura 71.

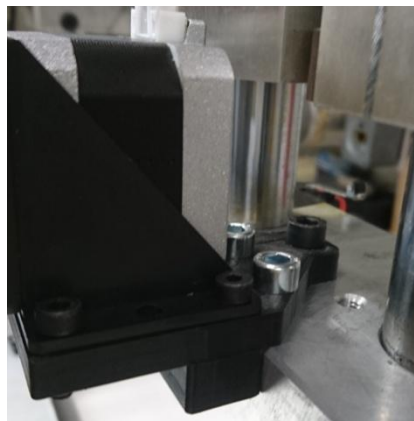


Figura 71. Amarre del soporte extrusor junto con el extrusor al carro de la máquina.

Por último, se ha amarrado en la parte inferior del carro metálico el soporte para el sensor, Figura 72, con ayuda de tres tornillos M6 x 12 DIN 912. Una vez este ha sido fijado, se ha acoplado el sensor, al cual se le ha ajustado la altura correcta durante al calibración.

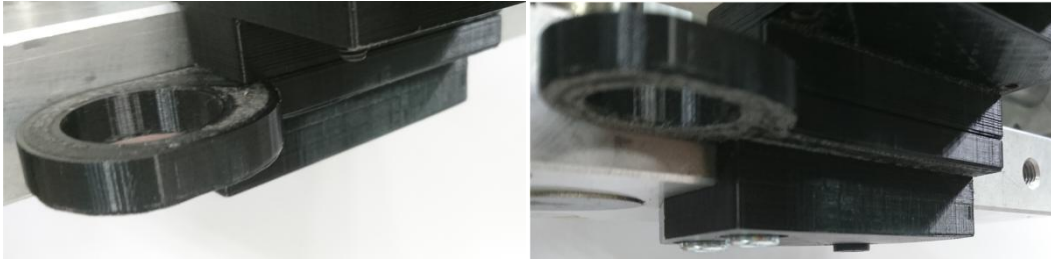


Figura 72. Amarre del soporte del sensor de nivelado al carro.

En la siguiente Figura 73 se muestra el ensamblaje al completo del conjunto del extrusor junto con el soporte y el sensor en el carro.



Figura 73. Todos los componentes (conjunto extrusor, sensor y respectivos soportes) ensamblados en el carro.

5.5.6. Ajustes de la configuración y calibrado

Tras realizar la conexión y el ensamblaje de todos los elementos, se ha comprobado el funcionamiento con los parámetros anteriormente definidos y se han completado aquellos que faltaban por determinar.

5.5.6.1. Parámetros dimensionales

Con todas las piezas ensambladas y posicionadas en su lugar correspondiente, se han tomado las medidas necesarias para completar la configuración, y delimitar tanto el espacio de trabajo de la impresora como el área de impresión.

En primer lugar hay que diferenciar dentro del espacio con el que cuenta la impresora (650 x 570 mm) el área de impresión, que está condicionada por el tamaño de la cama

calefactable, y el espacio total que puede recorrer el extrusor. En la siguiente Figura 74 se pueden ver las distintas zonas mencionadas, así como las limitaciones.

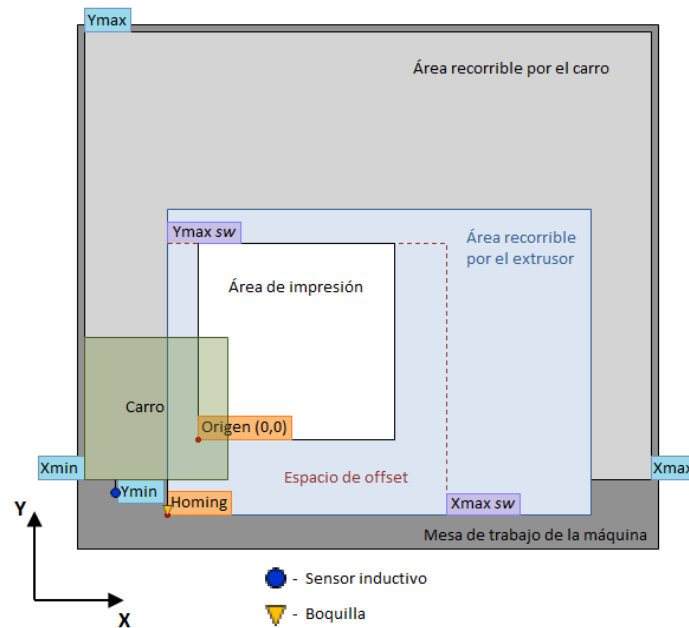


Figura 74. Diferentes áreas y límites con los que cuenta la máquina.

Teniendo en cuenta el montaje del extrusor, el recorrido máximo que puede realizar la punta de la boquilla, es el limitado por las dimensiones del carro y los finales de carrera, que en este caso es de 474 mm en el eje X y de 344 mm en el eje Y, como se puede ver en la figura anterior. Sin embargo, a la hora de delimitar dicho recorrido en la configuración, se considera como punto de origen (0,0) la esquina anterior izquierda de la cama de impresión. De esta forma, las posiciones máximas que puede alcanzar son las indicadas en la Tabla 17.

Tabla 17. Posiciones máximas alcanzadas por el carro.

Eje	Posición max. (mm)
X	438
Y	260
Z	128,8

La distancia del eje Z se ha obtenido tomando como referencia la base de impresión y consultando la posición mediante Octorpint una vez se ha alcanzado la posición máxima de forma manual.

Por otro lado, se encuentran las posiciones mínimas que puede alcanzar la punta de la boquilla. Ya que la impresora cuenta con un amplio espacio de desplazamiento, entre la posición de inicio o *home* y el origen del área de impresión, se ha dejado un pequeño margen.

Al no coincidir dicho punto inicial con el origen del área de impresión, ha sido necesario ajustar dichos parámetros en la configuración. Para ello se han tomado las medidas considerando como referencia la punta de la boquilla y el origen de la zona de impresión, obteniendo las posiciones mínimas que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Posiciones mínimas alcanzables por el carro.

Eje	Posición min. (mm)
X	-36
Y	-84
Z	0

En el caso del eje Z, la distancia mínima corresponde al punto de contacto con la cama por lo que no puede ser inferior a 0.

Por otro lado, también se han tomado las medidas de la distancia entre la punta de la boquilla y el sensor inductivo ya que estas son necesarias para posteriormente realizar el nivelado automático. En este caso, el sensor se encuentra ubicado en la parte posterior izquierda respecto de la boquilla, y para la correcta detección e impresión, está ligeramente más elevado. De esta forma, las medidas obtenidas son las que se muestran en la siguiente Tabla 19.

Tabla 19. Desplazamiento del sensor de detección de nivel respecto a la boquilla.

Eje	Offset (mm)
X	-58
Y	40
Z	-1,1

Finalmente, para delimitar el área de impresión, se han configurado unos *software endstops* o límites de recorrido dentro de la configuración de Marlin. Esto se ha aplicado para las distancias máximas de X e Y ya que los límites físicos se encuentran más alejados, y también para la distancia mínima de Z ya que en este caso no se cuenta con un sensor físico de final de carrera. De esta forma, las distancias límite establecidas son las de la siguiente Tabla 20.

Tabla 20. Límites de recorrido programados.

Límite	Posición (mm)
X max.	278
Y max.	220
Z min.	0

En el caso del eje X, se ha dejado un margen mayor, ya que dada la disposición del sensor respecto a la boquilla, esta necesita sobrepasar el límite del área de impresión para poder alcanzar las posiciones de las mediciones durante el nivelado automático.

5.5.6.2. Ejes

EJE X y EJE Z

En el caso de los ejes X y Z, el valor de pasos definido inicialmente ha sido de 889 pasos por mm. Para cada eje se he realizado una prueba de desplazamiento de 20 mm, en las cuales se ha apreciado un error de desplazamiento. Es por ello que se ha realizado la calibración de ambos ejes calculando de forma proporcional el valor adecuado. De esta forma se ha obtenido que el valor correspondiente a los pasos por mm del eje X es de 847 y del eje Z es de 882. Al realizar de nuevo la prueba de desplazamiento con los parámetros recalibrados, se ha podido comprobar que la distancia recorrida ha sido la adecuada.

EJE Y

En el caso del eje Y, el valor de pasos/mm definido ha sido de 800. Esta vez por lo contrario, tras realizar una prueba de desplazamiento de 20 mm, la distancia recorrida por la máquina ha resultado ser de igual valor, por lo que el valor definido ha resultado adecuado.

5.5.6.3. Extrusor

En el caso del extrusor, la calibración se ha realizado con ayuda del filamento. En este se ha realizado una marca y se ha ejecutado una retracción de 20 mm. Al medir la distancia avanzada por el filamento, esta ha resultado ser de 4 mm. Es por ello que el número de pasos por mm ha tenido que ser ajustado del valor inicial de 80 pasos/mm, que se había definido a partir de los valores por defecto, a 387 pasos/mm calculado de forma proporcional. De esta forma, al ordenar de nuevo la retracción de un tramo de 20 mm, esta vez se ha obtenido una respuesta del valor indicado.

5.5.6.4. Ajuste de velocidades máximas

Para obtener la velocidad máxima a la que pueden girar los motores sin que se produzcan pérdidas de pasos o deslizamientos indeseados entre los elementos de transmisión,

se ha probado de forma manual, realizando pequeñas variaciones hasta encontrar el valor con mejor comportamiento del sistema.

Esto se ha realizado de esta forma ya que al estar los motores alimentados por una tensión tres veces inferior del voltaje para el que están preparados, se reduce de forma importante tanto la velocidad de giro como el par que son capaces de ejercer los motores. De esta forma, las velocidades máximas empleadas son los que se muestran en la siguiente Tabla 21.

Tabla 21. Velocidades máximas para cada eje.

Eje	Velocidad (mm/s)
X	12
Y	6
Z	8

Como se puede observar, la velocidad más restrictiva es la correspondiente al eje Y, ya que este está más condicionado por la carga que debe desplazar, todo el conjunto correspondiente al movimiento del eje X junto con el carro y el conjunto de desplazamiento del eje Z.

En el caso del extrusor, el motor recibe el voltaje para el que está diseñado, y la velocidad máxima de extrusión, al ser un valor tan elevado, solamente es empleada a la hora de retirar el filamento, por lo que se ha empleado el valor de 30 mm/s, valor dentro del rango habitualmente empleado en este parámetro en impresoras 3D.

5.5.6.5. Ajuste PID para el control de temperatura

Para ajustar los parámetros correspondientes al PID para el control de la temperatura tanto del extrusor como de la cama calefactable, se ha empleado una función ya integrada en el firmware Marlin.

EXTRUSOR

En el caso del extrusor se ha empleado el siguiente comando en la terminal.

```
M303 E0 C10 S180
```

En dicha línea de comando, el M303 hace referencia a la función de *Autotuning*, el valor 0 de E corresponde al Extrusor, el número 10 de C al número de ciclos empleados para el ajuste y el valor de S a la temperatura respecto a la que se va a ajustar, en este caso 180 °C. De esta forma los valores para el PID del extrusor obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 22.

Tabla 22. Valores de las constantes PID para el control de Tª del extrusor.

Parámetro	Valor
Kp	26,04
Ki	1,78
Kd	95,01

CAMA CALEFACTABLE

Por otro lado, en el caso de la cama calefactable, la instrucción empleada ha sido la siguiente.

M303 E-1 C10 S60

Aunque sean distintos elementos (Extrusor y cama) el comando de *Autotuning* empleado es el mismo, M303. En este caso, para hacer referencia a la cama, al primer elemento E le corresponde el valor de -1, el número de ciclos empleado también ha sido de 10, y en este caso la temperatura de referencia ha sido de 60 °C. De esta forma los valores obtenidos para el PID de la cama son los que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores de las constantes PID para el control de Tª de la cama caliente.

Parámetro	Valor
Kp	233,19
Ki	45,83
Kd	296,62

De esta forma, han quedado configurados los controles PID del extrusor y la cama para su funcionamiento durante las impresiones.

5.5.6.6. Nivelado de la cama

El nivelado de la cama se ha realizado en dos partes. En primer lugar, se ha ajustado la inclinación de la cama de forma manual, girando los tornillos de las esquinas y tomando como referencia un nivel para poder conseguir una base lo más plana posible.

En segundo lugar, se ha empleado una función disponible en Marlin, *Automatic bed leveling*. Esta funcionalidad no nivela la cama como tal, lo que hace es aplicar una compensación para contrarrestar la inclinación existente. Para ello, después de ejecutar el orden G29 y de acuerdo con los parámetros implementados, realiza una medición en disposición de de malla o rejilla, y en base a las detecciones, genera una matriz de

compensación, basada en el ajuste de mínimos cuadrados, para contrapesar la inclinación general de la cama.

En este caso se ha empleado una malla de 3x3, con nueve puntos de medición y un margen respecto al borde de la cama de 25 mm en todo el contorno, dando lugar a una malla como la que se muestra en al siguiente Figura 75, con unas dimensiones de 170 x 170 mm.

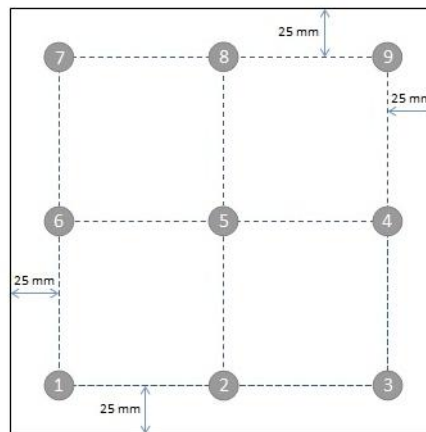


Figura 75. Esquema de la matriz generada para la nivelación junto con el orden de detección de los puntos.

Al finalizar la secuencia, tras las detecciones genera la matriz de corrección como se ve en la siguiente Figura 76. De esta forma, tras guardarla en la memoria EEPROM con el comando M500, la tendrá en consideración al realizar las impresiones.

```
Recv: Bed Level Correction Matrix:
Recv: +0.999998 +0.000000 +0.001896
Recv: +0.000001 +1.000000 -0.000780
Recv: -0.001896 +0.000780 +0.999998
Recv: X:253.02 Y:154.99 Z:10.60 E:0.00 Count X: 214291 Y:124000 Z:9665
Recv: ok
```

Figura 76. Valores obtenidos de la matriz de corrección tras ejecutar *Auto Bed Leveling*.

5.6. PRUEBAS DE IMPRESIÓN

Con todo el sistema ensamblado y conectado, Figura 77, y antes de realizar las impresiones, con los valores obtenidos después del reajuste de la configuración, se han actualizado también dentro de la configuración de Octoprint, como se muestra en el Anexo D, para obtener un comportamiento adecuado entre el firmware y el software de control.

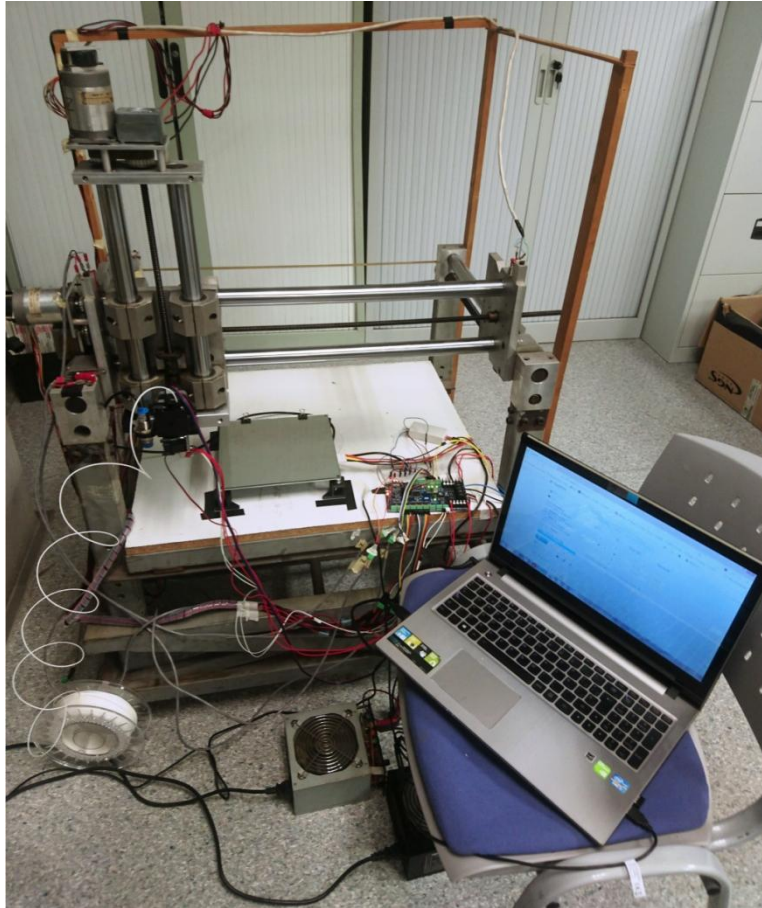


Figura 77. Sistema de impresión 3D resultante.

Una vez actualizado, se ha procedido a comprobar el funcionamiento de los distintos elementos. En primer lugar se ha comprobado el movimiento de los motores junto con el desplazamiento de los ejes. Se han comprobado también la correcta respuesta de los sensores de final de carrera al ser accionados, así como la detección de la cama calefactable por parte del sensor inductivo. Por último se ha comprobado el correcto funcionamiento del extrusor y la cama calefactable. Se ha verificado que ambos son capaces de alcanzar la temperatura requerida y que el motor del extrusor es capaz de empujar y retraer el filamento.

Ya con la máquina puesta a punto, para poder comprobar la validez del comportamiento de la máquina como impresora 3D, se han realizado dos pruebas de impresión y para ello se han imprimido dos figuras sencillas. Por un lado, se ha escogido un cubo de calibración, muy empleado en la impresión 3D, y por otro un cilindro, para comprobar la respuesta del sistema con arcos o formas circulares.

Para obtener tanto el cuerpo geométrico de estas figuras, como la "transformación" de las mismas a comandos G-code, se ha empleado el conocido programa Cura Ultimaker. Este es un software libre muy avanzado y utilizado en impresión 3D para las funciones de corte o *slicing*.

En dicho programa, tras configurar el perfil de la impresora (dimensiones y propiedades del extrusor), desde una biblioteca de la que dispone, se han importado el cubo y el cilindro por separado para obtener dos impresiones distintas. Posteriormente se han configurado los parámetros de impresión, ajustando las velocidades temperaturas etc. al sistema, empleando los valores que se encuentran resumidos en la siguiente Tabla 24. Finalmente y tras comprobar la vista preliminar, se han generado los ficheros G-code.

Tabla 24. parámetros de impresión definidos para las impresiones.

Parámetro	Valor	Grupo
Printing temperature	195 °C	Material
Initial printing temperature	195 °C	
Final printing temperature	195 °C	
Print speed	6,0 mm/s	Speed
Infill speed	8,0 mm/s	
Wall speed	4,0 mm/s	
Top/bottom speed	4,0 mm/s	
Travel speed	8,0 mm/s	
Initial layer speed	4,0 mm/s	
Enable retraction	Off	Travel
Initial fan speed	100 %	Cooling
Regular fan speed at height	0	
Minimum speed	4,0 mm/s	

Tras comprobar de forma manual que el filamento se extruye correctamente, que los parámetros de temperatura son correctos y la maquina esta lista, se ha cargado el fichero (.gcode) al programa de control Octoprint, y se ha ejecutado la orden de impresión de la primera figura, en este caso el cubo XYZ. Una vez ha finalizado la impresión, se ha retirado con cuidado del cristal de la cama calefactable donde se ha adherido, Figura 78, y tras comprobar que la impresora está preparada de nuevo, se ha procedido a ejecutar la segunda impresión, el cilindro.



Figura 78. Pieza cubo XYZ impresa sobre la cama calefactable.

Cabe mencionar que además de los parámetros recogidos en la tabla anterior, también se han configurado otros parámetros que influyen en mayor medida en la calidad de impresión de la pieza que en el comportamiento de la impresora. Estos, son los siguientes:

- Layer Height 0,2 mm
- Infill density 20 %
- Build plate adhesion type brim
- Brim width 3 mm
- Top layers 4 (primera impresión), 6 (segunda impresión)

Se han escogido dichos valores ya que se han considerado adecuados para poder obtener unas piezas con una impresión aceptable. El resto se han dejado con la configuración por defecto que ofrece el software al escoger la altura de capa, o se han actualizado automáticamente al estar relacionados con alguno de las características modificadas.

Finalmente, añadir que se han empleado piezas de tamaño reducido, no más de 15 mm, ya que dada la lenta velocidad a la que se produce la impresión, debido a las características físicas de la impresora, se dispara el tiempo de impresión.

5.6.1. Resultados

Las figuras resultantes de la impresión se pueden ver en la siguiente Figura 79.

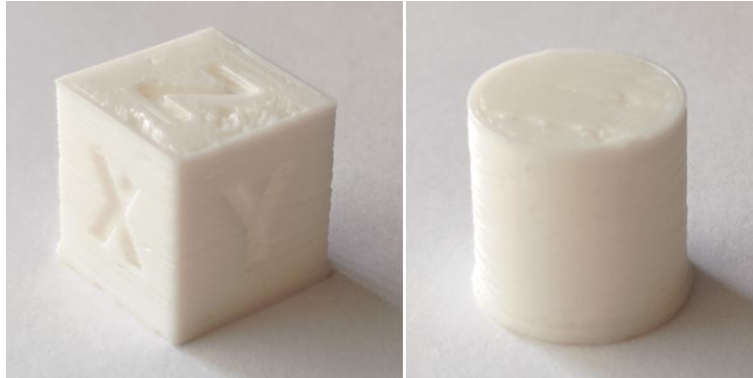


Figura 79. Piezas obtenidas de las pruebas de impresión, cubo XYZ y cilindro.

Como se puede ver, en ambos casos las piezas se han podido imprimir de principio a final, sin surgir ningún error intermedio que haya paralizado la impresión e interrumpido el proceso. De esta forma, han sido empleados 0,565 m de filamento en el caso de la primera pieza y algo menos, 0,517 m en la segunda.

En cuanto a la calidad de las piezas, se pueden diferenciar dos aspectos, por un lado la parte dimensional, y por otro la superficial. En cuanto a las dimensiones, la impresora ha cumplido perfectamente su función, ya que las dos piezas cumplen con las características del modelo digital en 3D, 15 x 15 x 15 mm en caso del cubo y un \varnothing 15 x 15 mm de altura en el caso del cilindro.

Sin embargo, en cuanto al acabado superficial, los resultados no son tan buenos. En ambos casos se aprecian pequeñas irregularidades tanto las capas superior e inferior como en el contorno. Los defectos surgidos se deben principalmente a la falta puntual de material, así como a minúsculos desplazamientos en las capas que afectan la alineación vertical de las mismas, que impiden la obtención de un contorno uniforme. Con todo ello, se han considerado como piezas válidas para la demostración del funcionamiento de la impresora, ya que son aspectos de calidad que dependen de los parámetros de impresión definidos en el *licer*.

Por último, como ya se ha mencionado, el tiempo de impresión ha sido bastante extenso para el tamaño de pieza. En el caso del cubo, de una estimación de 1h y 3 min realizada por cura, ha tardado 1h y 10 min y en cuanto al cilindro, de 48 min estimados ha

tardado 53 min. De forma que, en caso de haber utilizado una impresora con una velocidad de impresión normal, que puede ser entre 5 y 10 veces superior a la empleada en este caso, el tiempo empleado podría haber sido de 10 minutos en el primer caso y de unos 7 minutos en el segundo, para las mismas condiciones de calidad.

5.7. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y RESOLUCIÓN

Durante el desarrollo del proyecto han surgido contratiempos que han tenido que ser resueltos para poder continuar con el progreso del trabajo. En este apartado se encuentran explicadas las dificultades encontradas, junto con la soluciones llevadas a cabo.

Uno de los problemas encontrados a la hora de establecer la comunicación serie con alguno de los programas de control, ha sido que a diferencia de Octoprint donde la conexión se ha realizado prácticamente sin problemas desde un inicio, en el resto de interfaces de control, no se llegaba a producir una conexión correcta. Finalmente, tras realizar varias pruebas, se ha podido comprobar que modificando el puerto de conexión de la placa STEVAL de 0 a 1, dentro de la configuración, se puede establecer la comunicación con el resto de softwares e incluso se han eliminado los fallos de comunicación que ocasionalmente se daban en Octoprint. Esta ha sido una de las razones por las que se ha escogido Octoprint para el control, ya que desde el principio ha dado una mejor respuesta que el resto de programas.

Otro de los problemas encontrados ha sido a la hora de configurar los finales de carrera o *endstops* de la impresora. Esto se ha debido a que la placa viene preparada para conectar directamente los *endstops* correspondientes a los extremos mínimos (X,Y y Z min) y en este caso, al emplear también los límites máximos, ha sido necesario configurar tanto nuevas variables como funciones en los ficheros internos del firmware, así como utilizar los pines configurables por el usuario con los que cuenta la placa, tarea que ha sido necesaria realizar también para poder utilizar el sensor de distancia para el nivelado de la cama.

Uno de los fallos que ha surgido durante el montaje, ha sido respecto al sensor capacitivo adquirido para el nivelado, ya que tras realizar las pruebas para comprobar su correcto funcionamiento, se comprobó que se trataba de un sensor inductivo en su lugar. Afortunadamente, se ha podido emplear el sensor sin problema para el nivelado de la cama, aunque como se ha explicado previamente, puesto que se emplea un cristal en la cama calefactable, era preferible emplear un sensor capacitivo.

En la siguiente Figura 80 se muestra el sensor inductivo realmente empleado junto con sus características principales en la Tabla 25.



Figura 80. Sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX-5V.

Tabla 25. Características del sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX-5V.

Sensor	LJ18A3-8-Z/BX-5V
Polaridad	NPN
Voltaje	5 V DC
Corriente	0,3 A
Distancia de detección	8 mm
Tipo interruptor	NA
Temperatura funcionamiento	-25 °C - 70 °C
Dimensiones	M18 x 60 mm
Longitud cable	120 cm

Por último, uno de los problemas que más trabajo ha dado han sido los atascos del filamento en el fusor del extrusor. Estos taponamientos se han dado durante las pruebas manuales de extrusión que se han realizado durante la puesta a punto y antes de realizar las impresiones. Se ha observado que en un principio se extruía el filamento sin problema hasta que en un momento dado, el alimentador no era capaz de empujar el filamento y no salía nada de material a través de la boquilla. Tras varias pruebas y después de desmontar el extrusor para limpiar los restos de material atascado, se ha comprobado que el atasco se producía en la garganta del *hot-end*, más concretamente, desde el tramo de transición de calor hacia la zona fría, Figura 81.

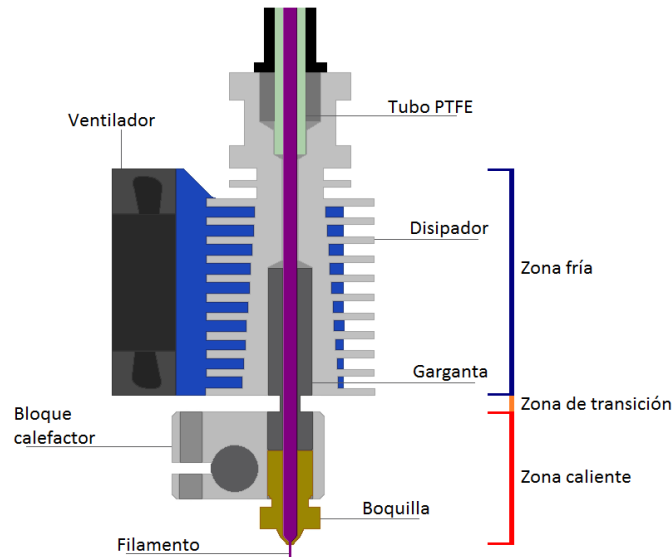


Figura 81. Componentes y zonas térmicas correspondientes a un *Hot-end* V6.

A partir de ahí, y recopilando algo de información, se ha comprobado que el problema es algo recurrente en el modelo de fusor All metal Hot-end V6, y para evitar dicho problema, es muy importante mantener a baja temperatura todo el tramo desde la barrera térmica hacia la zona de disipación, por lo que se ha resuelto el problema reduciendo la temperatura del fusor de unos 210 °C a 190 °C y manteniendo en todo momento que el fusor alcance temperaturas elevadas el ventilador encendido, de forma que se produzca una correcta disipación del exceso de calor. De esta forma, se evita que el filamento se ablande y se deforme (sin llegar a fundir) antes de llegar al bloque calefactor, generando el atasco en la parte fría.

En la siguiente Figura 82 se muestra por un lado el filamento en estado normal, y por otro el filamento retirado de un atasco. En este segundo se puede apreciar cómo debido al calor mal disipado y al empuje de material, se ha formado un incremento de diámetro que ha bloqueado la extrusión, lo que ha causado a su vez un engrosamiento del filamento a lo largo de la garganta debido a la compresión y el calor.

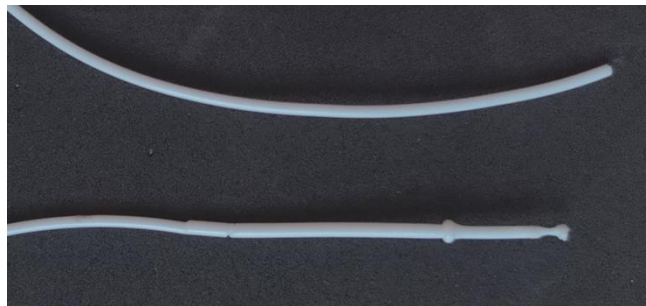


Figura 82. Filamento en correcto estado (arriba) frente al filamento retirado de un atasco (abajo).

6. MEMORIA ECONÓMICA

En el siguiente apartado se encuentran resumidos los costes correspondientes al proyecto. Se han dividido en dos grupos principales, que abarcan por un lado los materiales y por otro los costes de mano de obra.

En cuanto a los materiales, se ha decidido considerar únicamente los elementos específicos del proyecto, sin contar la estructura de la máquina CNC ni la fuente de alimentación, al tratarse de sistemas ya empleados en proyectos anteriores y estar disponibles en la Universidad. En el caso de la placa STEVAL-3DP001V1 también está disponible en la universidad, sin embargo no ha sido empleada previamente y al tratarse de la base del proyecto sí que se ha considerado necesario incluirla. Para tener en cuenta los costes indirectos generados por el uso de herramientas, del ordenador etc. se ha añadido un 16% al coste que suponen los materiales.

Por otro lado, todas las tareas y el trabajo realizado para llevar a cabo el proyecto se ha cuantificado en horas y se ha considerado el valor correspondiente a un trabajo de ingeniería.

Finalmente, se ha considerado un 21% de IVA al coste resultante. Cabe mencionar que esta estimación de costes es teórica puesto que, la mano de obra forma parte del trabajo de fin de titulación del máster de ingeniería mecatrónica y la impresión de las piezas en 3D es un servicio disponible para la realización de trabajos de alumnos de la ETSID de forma gratuita.

En la siguiente Tabla 26 se muestran resumidos los costes y el importe final del proyecto que corresponde a 3558 €.

Tabla 26. Resumen de costes del proyecto.

Nº	Componente	Coste (€/ud.)	cantidad	Importe
Elementos materiales				
1	Placa STEVAL-3DP001V1	98	1	98 €
2	Conjunto EXTRUSOR		1	38,22 €
	All metal Hot-end V6 (filamento 1,75) (Nozzle 0,4 mm)	13,4	1	
	Extrusor Titan E3D	18,74	1	
	Motor PAP NEMA17 - 17hs3401 Eje Ø 5 mm en D	6,08	1	
3	Conjunto CAMA CALEFACTABLE		1	13,42 €
	Placa MK3 ALU 12 V 220 x 220 x 3 mm	8,26	1	
	Cableado alimentación	0,82	1	
	Vidrio de borosilicato 220 x 220 x 3 mm	4,34	1	
4	Sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX-5V	7,87	1	7,87 €
5	Conector Serie		1	4,88 €
	Modulo FT232 Convertidor USB a serie TTL UART 5 V 3,3 V	2,39	1	
	Aislador bus STISO621	1,33	1	
	Cable USB/serie	1,16	2	2,32
6	Tarjeta Sandisk Ultra Micro SDHC 16GB	11,2	1	11,2 €
7	Materiales eléctricos (conectores ,cables ...)	3,17	1	3,17 €
8	Materiales mecánicos (tuercas, tornillos ...)	7,6	1	7,6 €
9	Bobina de PLA Blanco Ø 1,75 mm 750 g	15,48	1	15,48 €
10	Impresión piezas 3D			5,23 €
	Material	0,014 (€/g)	218 g	
	Energía	0,085 (€/h)	20 h	
	Servicio		10 %	
	Total materiales:			207,39 €
	16% Gastos indirectos			33,18 €
	Subtotal:			240,57 €
Mano de obra				
1	Horas de trabajo	9 (€/h)	300 h	
	Subtotal:			2700 €
	BASE IMPONIBLE:			2940,57 €
	IVA 21 %			617,52 €
IMPORTE TOTAL:		3558,09 €		

7. CONCLUSIONES

Tras haber llevado a cabo el proyecto de implementación de la funcionalidad e impresión 3D en la estructura CNC existente, se han llegado a las siguientes conclusiones.

En primer lugar se puede decir que se ha cumplido satisfactoriamente el objetivo del proyecto, al conseguir implementar adecuadamente la función de impresión FDM en la estructura CNC ya existente, obteniendo una impresora 3D cartesiana XYZ de base fija con un correcto funcionamiento, como se ha podido probar gracias a las figuras impresas. Y, aunque la calidad de estas no haya sido óptima, al tratarse de una máquina con un fin experimental y no enfocado a una producción industrial, se ha considerado suficientemente buena para validar el funcionamiento.

Para ello se han cumplido con todos los objetivos secundarios planteados, cumpliendo con las diferentes tareas. Se ha generado una configuración adecuada, se han obtenido los componentes y diseños de piezas necesarios, al igual que se ha establecido una correcta comunicación entre la placa y el PC para poder realizar el control.

Se ha conseguido obtener un proceso de impresión estable, sin interrupciones, y continuamente monitorizado a través del software de control Octorprint. Donde se ha podido observar en tiempo real las temperaturas de la cama como la del extrusor y el recorrido realizado por la impresora (G-code viewer) así como el procesamiento, en el terminal, del G-code implementado.

Por otro lado, se ha ampliado el conocimiento a cerca de los aspectos principales relacionados con la impresión FDM (componentes, materiales, softwares, características ...) y fundamentalmente a cerca del Firmware Marlin que se ha tenido que analizar en profundidad para conocer su funcionamiento, y adaptar la configuración a una máquina con un diseño totalmente personalizado.

Finalmente, al llevar a cabo un proyecto multidisciplinar, se han combinado tareas relacionadas con diferentes campos, donde se han aplicado los conocimientos adquiridos en el máster así como otros nuevos adquiridos durante el proyecto, y donde también ha sido necesario identificar y resolver los distintos problemas surgidos durante el desarrollo del proyecto.

8. LÍNEAS FUTURAS

A continuación, se presentan diferentes ampliaciones o mejoras que se podrían llevar a cabo a partir del proyecto desarrollado.

Por un lado, en vista del sistema resultante, podrían aplicarse pequeñas mejoras, como analizar los parámetros de impresión para poder obtener una mejor calidad superficial; cambiar el sensor inductivo por un capacitivo, de forma que permita una detección de la base más fiable al tener en cuenta también el cristal, o incluso realizar alguna mejora de diseño, por ejemplo, de los apoyos de la base, para mejorar el equilibrio/estabilidad o respecto a la bobina de filamento, añadir un soporte que facilite así la alimentación de material.

Dado que el punto fuerte de la impresora es el amplio espacio de trabajo con el que cuenta, podría plantearse otro tipo de base, aprovechando todo el espacio y permitiendo realizar impresiones de mayor dimensión, empleando para ello una base de impresión diferente a la cama calefactable actual.

Por otro lado, puesto que las velocidades de impresión son unas 5-10 veces inferiores a las empleadas en este tipo de impresoras, una posible mejora sería implementar de alguna forma una mayor tensión en los motores paso a paso encargados de mover los ejes X, Y y Z. Ya que, es debido al bajo voltaje de alimentación que reciben (12 V) que se genera una velocidad tan reducida, pues estos motores están preparados para funcionar a una tensión tres veces superior.

Para ello, se podría buscar una solución manteniendo la placa, STEVAL-3DP001V1, o por lo contrario, emplear como alternativa otra placa de impresión 3D con los controladores necesarios (motores, extrusores etc.). Dentro de esta alternativa, y empleando una placa compatible con Marlin, se podría emplear la versión más actual de este, lo que incluiría una mejora de las funciones y las capacidades de la impresora, pero requeriría también un cambio del entorno de trabajo al tener que utilizar el IDE de Arduino.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] LÁZARO ARCÓN, A (2015). *Diseño y construcción de una máquina CNC*. TFM. Universidad Politécnica de Valencia - ETSID.

[2] PIQUER MORA, I (2016). *Diseño e implementación de una máquina CNC con funcionalidad de taladradora*. TFM. Universidad Politécnica de Valencia - ETSID.

[3] Catalogo de motores híbridos paso a paso bipolares serie HY200.

<<https://www.ahs-antriebstechnik.de/images/PDFDateien/Service/HY200.pdf>> [Última consulta: 01/05/2022]

[4] Firmware Marlin. <<https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>> [Última consulta: 01/05/2022]

[5] Manual de usuario de la placa STEVAL-3DP001V1.

<https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2067-getting-started-with-the-3d-printer-board-stmicroelectronics.pdf> [Última consulta: 01/05/2022]

[6] Firmware Marlin para ST disponible en GitHub.

<<https://github.com/St3dPrinter/Marlin4ST>> [Última consulta: 01/05/2022]

[7] Sitio web Rep-Rap, G-code. <<https://reprap.org/wiki/G-code>> [Última consulta: 01/05/2022]

[8] G-codes disponibles en Marlin. . < <https://marlinfw.org/meta/gcode/>> [Última consulta: 01/05/2022]

[9] Sitio web firmware Marlin, Fichero de configuración.

<<https://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html>> [Última consulta: 01/05/2022]

[10] Instalación de Octoprint en Windows.

<<https://community.octoprint.org/t/setting-up-octoprint-on-windows/383>> [Última consulta: 01/05/2022]

[11] Sitio web de Octoprint. <<https://octoprint.org/>> [Última consulta: 01/05/2022]

10.ANEXOS

Anexo A

configuration.h

```
#define SERIAL_PORT 1

#define BAUDRATE (115200)

#ifndef MOTHERBOARD
  #define MOTHERBOARD BOARD_STM_3DPRINT
#endif

***

#define EXTRUDERS 1

#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75

***

#define POWER_SUPPLY 1

***

//===== Thermal Settings

#define TEMP_SENSOR_0 23
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_3 0
#define TEMP_SENSOR_BED 23

***

#define HEATER_0_MAXTEMP 270
#define HEATER_1_MAXTEMP 270
#define HEATER_2_MAXTEMP 270
#define HEATER_3_MAXTEMP 270
#define BED_MAXTEMP 100
```

```
//===== PID Settings

***

#define PIDTEMP
***
// Parametros PID Extrusor
// Fusor All metal Hot-End V6 a 12 V calculado con M303 E0 C10 S180
(Autotuning)
#define DEFAULT_Kp 26.04
#define DEFAULT_Ki 1.78
#define DEFAULT_Kd 95.01

#define PIDTEMPBED
***
// Parametros PID cama calefactable
// Cama a 12V de ~96 W calculado con M303 E-1 C10 S60
(Autotuning)
#define DEFAULT_bedKp 233.19
#define DEFAULT_bedKi 45.83
#define DEFAULT_bedKd 296.62

#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
#define EXTRUDE_MINTEMP 180

#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE
#define EXTRUDE_MAXLENGTH (X_MAX_LENGTH+Y_MAX_LENGTH)

//===== Thermal Runaway Protection

#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS
// Enable thermal protection for all extruders
#define THERMAL_PROTECTION_BED
// Enable thermal protection for the heated bed

***

//===== Endstop Settings

#define USE_XMIN_PLUG
#define USE_YMIN_PLUG
#define USE_ZMIN_PLUG
#define USE_XMAX_PLUG
#define USE_YMAX_PLUG
#define USE_ZMAX_PLUG

#define ENDSTOPPULLUPS

// Mechanical endstop // set to true to invert the logic of the endstop
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING false
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING false
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING false
#define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING false
#define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING false
#define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING false
#define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING true
```



```

//===== Movement Settings

// Default Axis Steps Per Unit (steps/mm) X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 847, 800, 882, 387 }

// Default Max Feed Rate (mm/s) X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 12, 6, 8, 30 }

// Default Max Acceleration (change/s) change = mm/s // ( mm/s^2 )
// X, Y, Z, E0
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1000, 1000, 100, 2000 }

// Default Acceleration (change/s) change = mm/s // ( mm/s^2 )
#define DEFAULT_ACCELERATION 500
// X, Y, Z and E acceleration for printing moves

#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 1000
// E acceleration for retracts

#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 800
// X, Y, Z acceleration for travel (non printing) moves

// Default Jerk (mm/s)
#define DEFAULT_XYJERK 8.0
#define DEFAULT_ZJERK 0.3
#define DEFAULT_EJERK 5.0

//===== Z Probe Options

***

#define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP

// Probe Type
#define FIX_MOUNTED_PROBE

***

// Z Probe to nozzle (X,Y) offset
#define X_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -58
// X offset: -left +right [of the nozzle]
#define Y_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER 40
// Y offset: -front +behind [the nozzle]
#define Z_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -1.1
// Z offset: -below +above [the nozzle]

// X and Y axis travel speed (mm/min) between probes
#define XY_PROBE_SPEED 360
// Feedrate (mm/m) for the first approach when double-probing
#define Z_PROBE_SPEED_FAST HOMING_FEEDRATE_Z
// Feedrate (mm/m) for the "accurate" probe of each point
#define Z_PROBE_SPEED_SLOW (Z_PROBE_SPEED_FAST / 2)
// Use double touch for probing
#define PROBE_DOUBLE_TOUCH

#define Z_RAISE_PROBE_DEPLOY_STOW 10
// Raise to make room for the probe to deploy / stow

```

```

#define Z_RAISE_BETWEEN_PROBINGS 10
// Raise between probing points.

// For M851 give a range for adjusting the Z probe offset
#define Z_PROBE_OFFSET_RANGE_MIN -10
#define Z_PROBE_OFFSET_RANGE_MAX 10
    ***

//===== Motor settings

    ***

// Invert the stepper direction. Change (or reverse the motor
connector) if an axis goes the wrong way.
#define INVERT_X_DIR false
#define INVERT_Y_DIR true
#define INVERT_Z_DIR false

// For direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set
to false.
#define INVERT_E0_DIR false
    ***

//===== Geometry settings

#define MIN_Z_HEIGHT_FOR_HOMING 10
// (in mm) Minimal z height before homing (G28)

// Direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR 1

// Travel limits (mm) after homing, corresponding to endstop positions.
#define X_MIN_POS -36
#define Y_MIN_POS -84
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_POS 438 //279
#define Y_MAX_POS 260 //221
#define Z_MAX_POS 128.8

// Software Endstops
#define min_software_endstops true
// If true, axis won't move to coordinates less than HOME_POS.

#if(min_software_endstops)
#define X_END_MIN X_MIN_POS
#define Y_END_MIN Y_MIN_POS
#define Z_END_MIN 0
#else
#define X_END_MIN X_MIN_POS
#define Y_END_MIN Y_MIN_POS
#define Z_END_MIN Z_MIN_POS
#endif

#define max_software_endstops true
// If true, axis won't move to coordinates greater than the defined
lengths below.

#if(max_software_endstops)
#define X_END_MAX 278
#define Y_END_MAX 220

```

```

#define Z_END_MAX Z_MAX_POS
#else
#define X_END_MAX X_MAX_POS
#define Y_END_MAX Y_MAX_POS
#define Z_END_MAX Z_MAX_POS
#endif

***

//===== Bed Leveling

#define DEBUG_LEVELING_FEATURE

***

//===== Bed Auto Leveling

#define AUTO_BED_LEVELING_FEATURE

#if ENABLED(AUTO_BED_LEVELING_FEATURE)
#define AUTO_BED_LEVELING_GRID

#if ENABLED(AUTO_BED_LEVELING_GRID)
  #define LEFT_PROBE_BED_POSITION 25
  #define RIGHT_PROBE_BED_POSITION 195
  #define FRONT_PROBE_BED_POSITION 25
  #define BACK_PROBE_BED_POSITION 195

  #define MIN_PROBE_EDGE 20
  // The Z probe minimum square sides can be no smaller than this.

  // Set the number of grid points per dimension.
  #define AUTO_BED_LEVELING_GRID_POINTS 3

  #else // !AUTO_BED_LEVELING_GRID
    ***
  #endif
#endif // AUTO_BED_LEVELING_FEATURE

***

// Homing speeds (mm/m)
#define HOMING_FEEDRATE_XY (6*60) // set the homing speeds (mm/min)
#define HOMING_FEEDRATE_Z (6*60) // set the homing speeds (mm/min)

//===== Additional Features

//define this to enable EEPROM support
#define EEPROM_SETTINGS // Enable for M500 and M501 commands

#if ENABLED(EEPROM_SETTINGS)
  // To disable EEPROM Serial responses and decrease program space by
  ~1700 byte: comment this out:
  #define EEPROM_CHITCHAT // Please keep turned on if you can.
#endif

// Host Keepalive
#define HOST_KEEPALIVE_FEATURE
#define DEFAULT_KEEPALIVE_INTERVAL 2
// Number of seconds between "busy" messages.

***

```

```

// Preheat Constants
#define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 180
#define PREHEAT_1_TEMP_BED     60
#define PREHEAT_1_FAN_SPEED   255 // Value from 0 to 255

#define PREHEAT_2_TEMP_HOTEND 150
#define PREHEAT_2_TEMP_BED     30
#define PREHEAT_2_FAN_SPEED   255 // Value from 0 to 255

***

//===== LCD and SD support

***

// SD CARD
//If your controller has an SD slot, you must uncomment the following
option or it won't work.
#define SDSUPPORT
#if ENABLED(SDSUPPORT)
  #define SD_SETTINGS
  #define CONFIG_FILE_NAME "sys/m_cfg.g"
#endif

***

```

configuration_ADV.h

```

***

/ If you want endstops to stay on (by default) even when not homing
#define ENDSTOPS_ALWAYS_ON_DEFAULT

***

```

stm32f4xx_3dPrinter_misc.c

```

***

GPIO_TypeDef* gArrayGpioPort[BSP_MISC_MAX_PIN_NUMBER] = {
***
BSP_USER_1_PORT,           //X_MAX_PIN (4)
***
BSP_USER_2_PORT,           //Y_MAX_PIN (9)
***
BSP_USER_3_PORT,           //Z_MAX_PIN (14)
***
BSP_USER_4_PORT            //Z_MIN_PROBE_PIN (53)
};

uint16_t gArrayGpioPin[BSP_MISC_MAX_PIN_NUMBER] = {
***
BSP_USER_1_PIN              //X_MAX_PIN (4)
***

```

```

BSP_USER_2_PIN, //Y_MAX_PIN (9)
***
BSP_USER_3_PIN, //Z_MAX_PIN (14)
***
BSP_USER_4_PIN //Z_MIN_PROBE_PIN (53)
};

```

```

void BSP_MiscStopInit(uint8_t id)
***
    case 6:
        /* Configure Xmax_STOP pin */
        gpioPin = BSP_USER_1_PIN;
        gpioPort = BSP_USER_1_PORT;
        #if defined(STOP_X_PULL_UP)
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLUP;
        #else
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
        #endif
        break;
    case 7:
        /* Configure Ymax_STOP pin */
        gpioPin = BSP_USER_2_PIN;
        gpioPort = BSP_USER_2_PORT;
        #if defined(STOP_Y_PULL_UP)
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLUP;
        #else
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
        #endif
        break;
    case 8:
        /* Configure Zmax_STOP pin */
        gpioPin = BSP_USER_3_PIN;
        gpioPort = BSP_USER_3_PORT;
        #if defined(STOP_Z_PULL_UP)
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLUP;
        #else
            GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_PULLDOWN;
        #endif
        break;
    default:
        return;
}
GPIO_InitStruct.Pin = gpioPin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_MEDIUM;
HAL_GPIO_Init(gpioPort, &GPIO_InitStruct);
}

```

```

void BSP_MiscZprobeInit( uint32_t mode, uint32_t pull)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;
    uint32_t gpioPin;
    GPIO_TypeDef* gpioPort;

    /* Configure user 4 pin */
    gpioPin = BSP_USER_4_PIN;
    gpioPort = BSP_USER_4_PORT;

```

```

GPIO_InitStruct.Pin = gpioPin;
GPIO_InitStruct.Mode = mode;
GPIO_InitStruct.Pull = pull;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_MEDIUM;
HAL_GPIO_Init(gpioPort, &GPIO_InitStruct);
}

```

stm32f4xx_3dprinter_misc.h

```

***

#define BSP_MISC_MAX_PIN_NUMBER (54)

***

void BSP_MiscZprobeInit(uint32_t mode, uint32_t pull);

```

pins_STM_3DPRINT.h

```

***

#define X_MAX_PIN      4
***

#define Y_MAX_PIN      9
***

#define Z_MAX_PIN      14
***

#define Z_MIN_PROBE_PIN 53

```

Marlin_main.cpp

```

***

// Software Endstops.
float sw_endstop_min[3] = { X_END_MIN, Y_END_MIN, Z_END_MIN };
float sw_endstop_max[3] = { X_END_MAX, Y_END_MAX, Z_END_MAX };

***

```

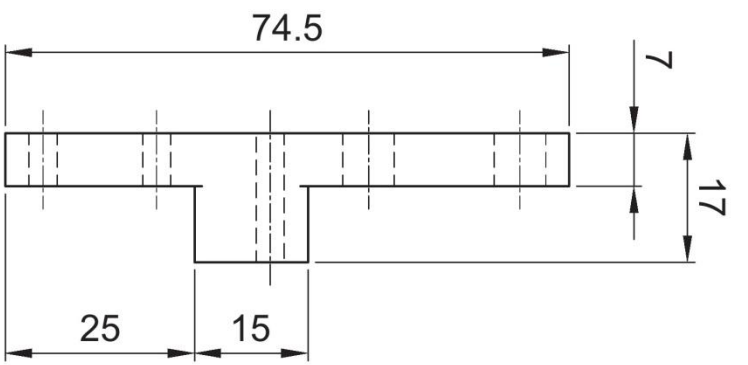
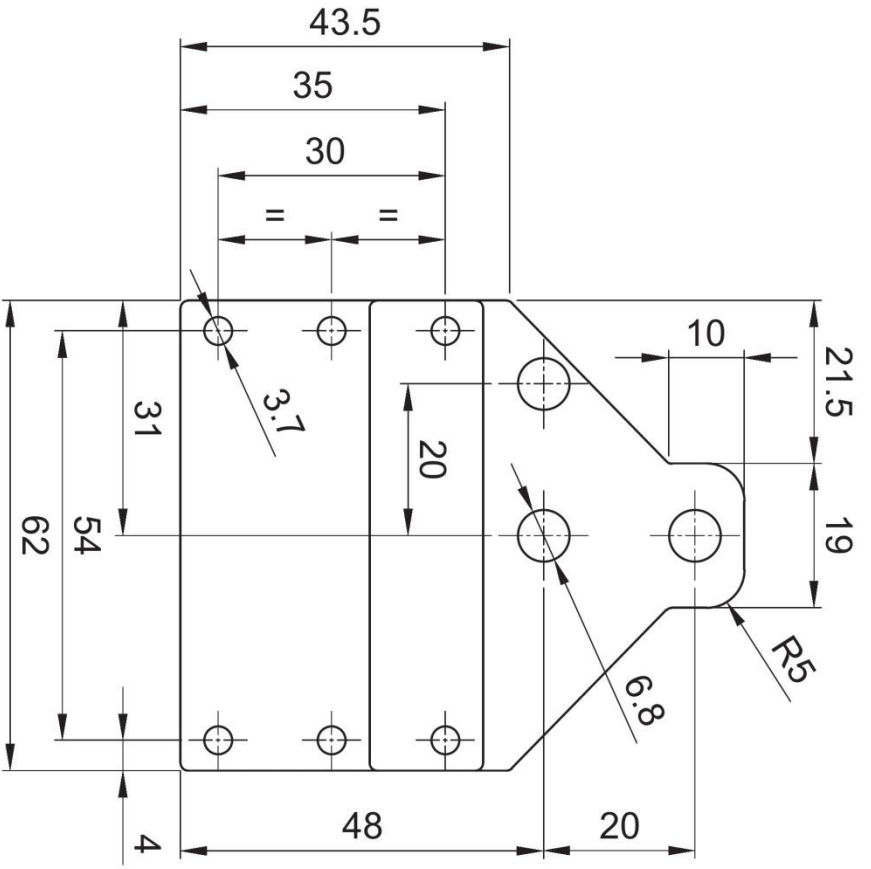
```
//----- Endstop Init
***
BSP_MiscStopInit(6);
BSP_MiscStopInit(7);
BSP_MiscStopInit(8);

//----- Zprobe Init
BSP_MiscZprobeInit(GPIO_MODE_INPUT,GPIO_PULLUP);

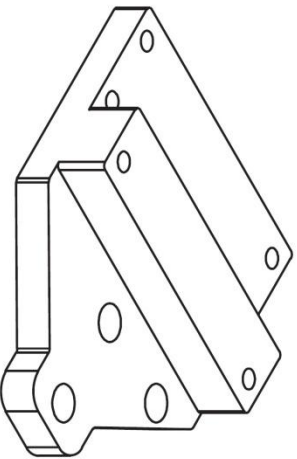
***
```

Anexo B

TFM:
 IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD
 DE IMPRESIÓN 3D EN UNA ESTRUCTURA CNC



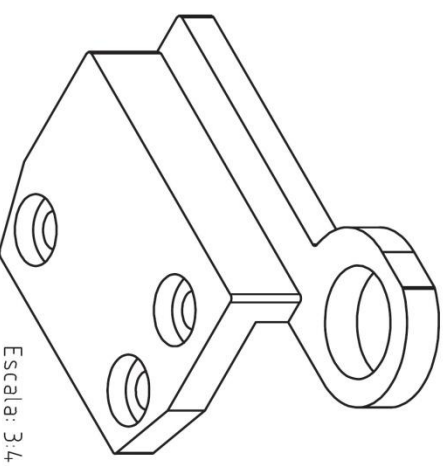
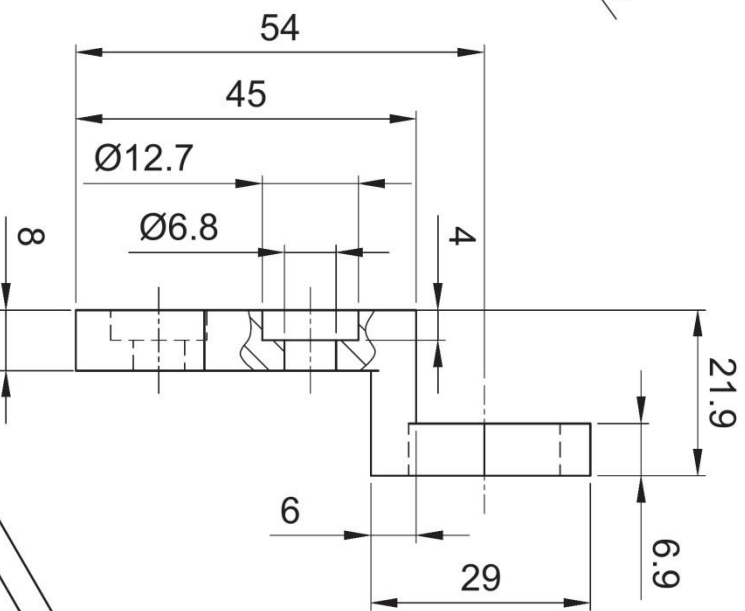
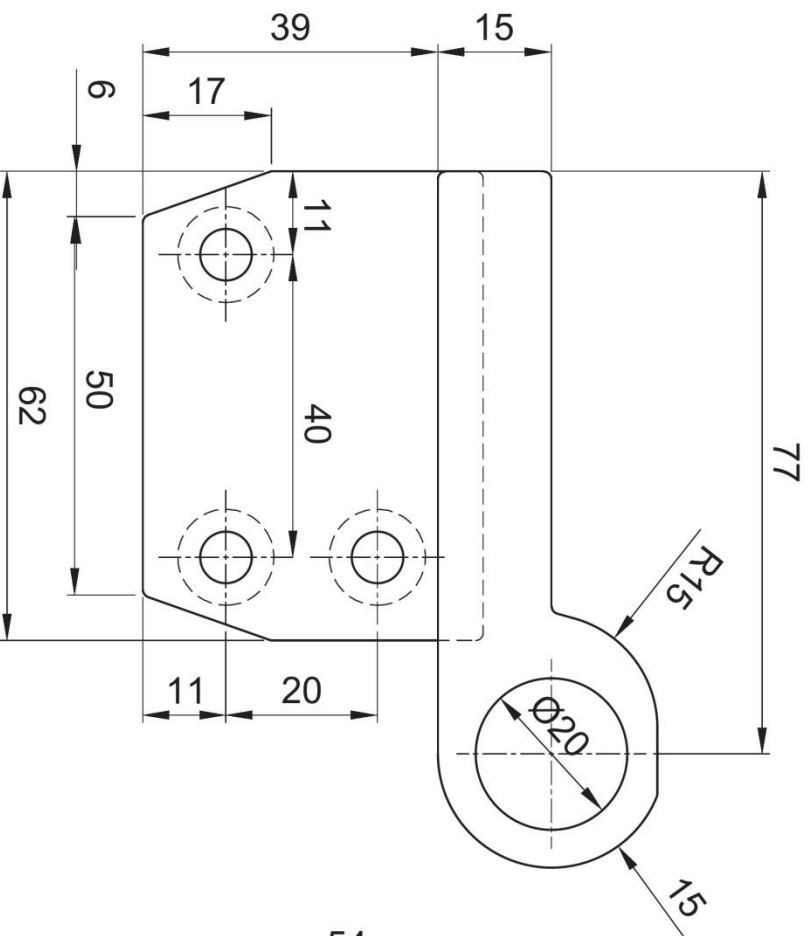
NOTA: En las aristas se han aplicado redondeos con radio 1 mm.



Escala: 3:4

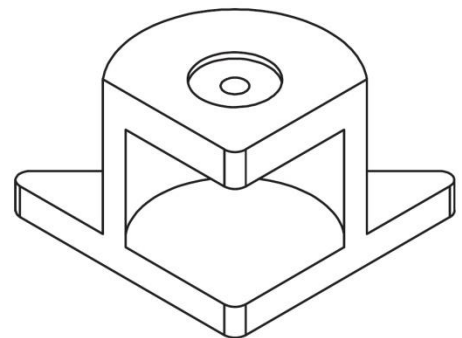
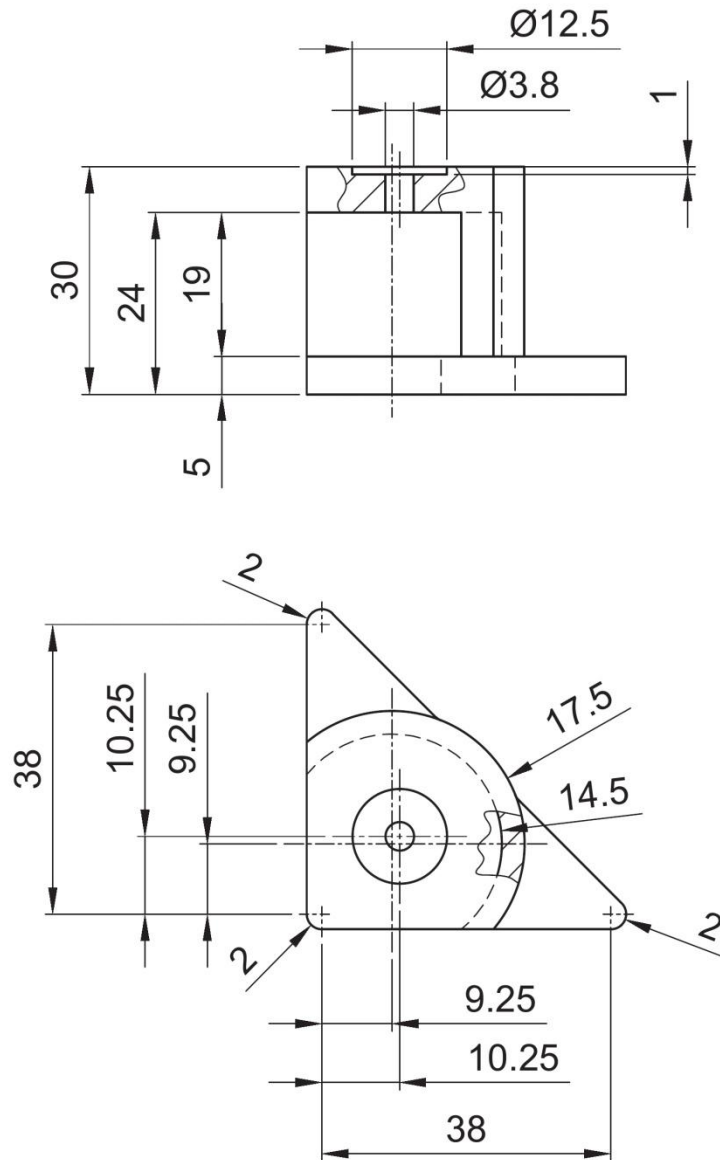
Nº Pieza: 1		PIEZA SOPORTE PARA EXTRUSOR 1		
Fabricado: Impresión FDM		Realizado por:	Itziar Ruiz Moraza	Escala: 1:1
Material: PLA		Fecha:	01/2022	

NOTA: En las aristas se han aplicado redondeos con radio 1 mm.



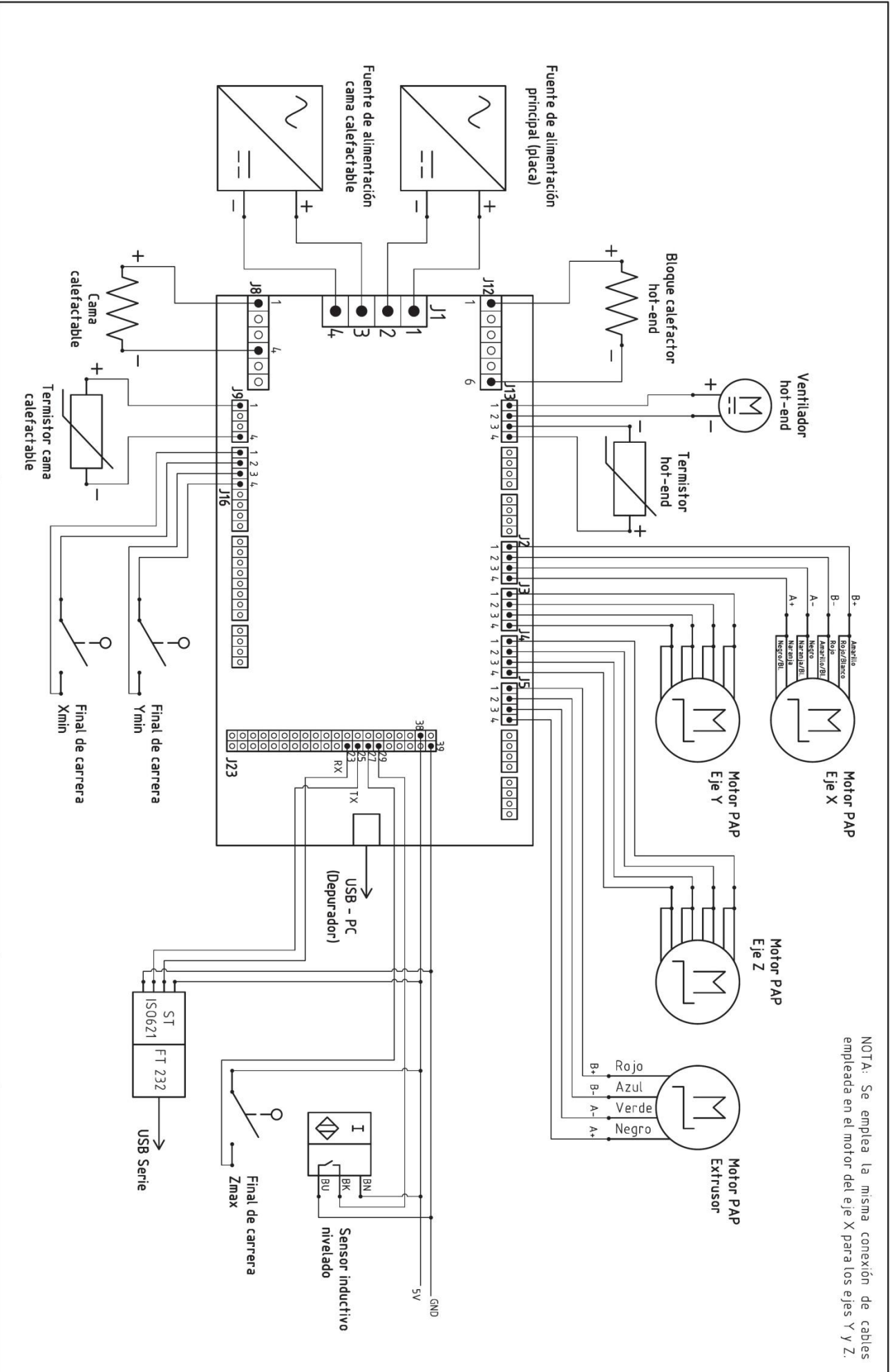
Escala: 3:4

TFM: IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE IMPRESIÓN 3D EN UNA ESTRUCTURA CNC		Nº Pieza: 2		PIEZA SOPORTE PARA EXTRUSOR 2		Realizado por: Itziar Ruiz Moraza		Escala: 1:1	
Fabricado: Impresión FDM		Material: PLA		Fecha: 01/2022					



Nº Pieza:	3	PIEZA SOPORTE PARA CAMA CALEFACTABLE	Escala:
Fabricado:	Impresión FDM	Material:	PLA
TFM: IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE IMPRESIÓN 3D EN UNA ESTRUCTURA CNC			Realizado por: Itziar Ruiz Moraza
			Fecha: 01/2022

Anexo C



NOTA: Se emplea la misma conexión de cables empleada en el motor del eje X para los ejes Y y Z.

TFM:
IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD
DE IMPRESIÓN 3D EN UNA ESTRUCTURA CNC

ESQUEMA DE LAS CONEXIONES DE LA IMPRESORA 3D

Realizado por: Itziar Ruiz Moraza

Fecha: 01/2022

Anexo D

Para configurar Octoprint de forma acorde a las características fijadas dentro de la configuración de Marlin, se han modificado los siguientes aspectos. Por un lado para obtener una buena respuesta en la comunicación con el firmware se ha activado la función que se puede ver a continuación.

Enable automatic firmware detection

If enabled, OctoPrint will try to figure out your printer's firmware automatically and adjust some communication parameters based on that. If that doesn't work out, or you want more granular control, uncheck this and the parameters in question will become visible for you to adjust.

Para ello dentro de *Octoprint settings* en la sección de *Serial connection* en el subapartado de *Firmware & protocol* se ha habilitado la funcionalidad dentro de *Firmware specific settings*.

Por otro lado, para el correcto control de la impresora ha sido necesario definir las características físicas dentro del perfil de impresora creado en Octoprint. Para en *Octoprint settings* y *Printer profiles* se ha modificado el previamente creado "TFM_Printer".

En la pestaña de *Print bed & build volume*, se han adaptado los valores del espacio de trabajo con el que cuenta la impresora, empleando los valores que se muestran en las siguientes figuras.

Form Factor Rectangular
 Circular

Origin

Heated Bed

Heated Chamber

Please define the print volume.

Width (X) mm

Depth (Y) mm

Height (Z) mm

If your printer's print head may move slightly outside the print volume (e.g. for nozzle cleaning routines) you can define a custom safe bounding box for its movements below.

Custom bounding box

X Coordinates	Min	-36	Max	278
Y Coordinates	Min	-84	Max	220
Z Coordinates	Min	0	Max	128,8

En la pestaña de *Axes*, se han adaptado los valores de *Feedrate* o velocidad configurada para cada eje y extrusor en (mm/min).

X	720	mm/min	<input type="checkbox"/> Invert control
Y	360	mm/min	<input type="checkbox"/> Invert control
Z	480	mm/min	<input type="checkbox"/> Invert control
E	1800	mm/min	

Por último, en la pestaña *Hotend & extruder* se ha configurado el número de extrusores y el diámetro de la boquilla empleada.

Nozzle Diameter	0,4	mm
Number of Extruders	1	