

UNIVERSIDAD DE BURGOS

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA



**MEJORA Y OPTIMIZACIÓN HARDWARE Y SOFTWARE DE UN
PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D**

ALUMNO:
Javier Pérez Sáiz

TUTOR:
Pedro Luis Sánchez Ortega

JUNIO DE 2014

Agradecimientos

A mi tutor, Pedro Luis Sánchez Ortega, por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto. También a mis compañeros de laboratorio de impresión 3D de la EPS. Gracias a ellos la puesta en marcha de la impresora y el día a día en el laboratorio han resultado más amenos.

A mi familia y amigos por apoyarme durante el desarrollo de este proyecto.

○○○

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Objetivos	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Impresoras 3D	5
3.2. Sistemas de Impresión.....	12
3.3. Términos, acrónimos y definiciones	14
4. MATERIALES, TIPOLOGÍA DE PIEZAS Y METODOLOGÍA	17
4.1. Material Utilizado.....	17
4.2. Tipología de piezas.....	25
4.3. Metodología.....	29
5. PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN	31
5.1. Protocolo de calibración de la cama caliente o <i>heated bed</i>	31
5.2. Protocolo de calibración PID	34
5.3. Protocolo de calibración motor paso - paso	39
5.4. Protocolo de calibración driver motor	44
5.5. Protocolo de calibración del posicionamiento de los ejes	49
5.6. Protocolo de calibración/comprobación de la placa Arduino Mega 2560 ..	54
6. PROTOCOLOS DE PRUEBAS GENERALES	59
6.1. Protocolo de pruebas generales I.....	59
6.2. Protocolo de pruebas generales II	65
6.3. Protocolo de pruebas generales III	71
6.4. Protocolo de pruebas generales IV	77
6.5. Protocolo de pruebas generales V	81
6.6. Protocolo de pruebas generales VI.....	86
6.7. Protocolo de pruebas generales VII.....	89

7. ENSAYOS	93
7.1. Calibración de Presión/Temperatura en plástico - ABS.....	93
7.2. Calibración de Presión/Temperatura en plástico - PLA.....	96
7.3. Estudio de parámetros de impresión: velocidad y aceleración.....	98
7.4. Estudio de parámetros de impresión: velocidad y tiempo de impresión...	103
8. ESTUDIO DE MEJORAS APLICADAS A LA IMPRESORA 3D	108
8.1. Mejoras aplicadas al eje ‘z’	108
8.2. Mejoras aplicadas al eje ‘y’	119
8.3. Mejoras aplicadas al extrusor	125
8.4. Mejoras aplicadas a la electrónica de la placa Ramps.....	132
9. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS	149
9.1. Conclusiones	149
9.2. Líneas de trabajo futuras.	150
10. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	151
11. ANEXOS	153
11.1. Planificación	153
11.2. Estudio Económico.	161
12. PLANOS	168

Índice de Figura

Figura 1. Logotipo del Grupo de Investigación DINper (Diseño Inclusivo Personalizado – Diseño para todos y cada uno) de la Universidad de Burgos.	3
Figura 2. Prototipo de Impresora utilizado en el TFG (BCN-3D).....	4
Figura 3. Logotipo Open Hardware	10
Figura 4. Logotipo RepRap.....	11
Figura 5. Diagrama de flujo de una impresora 3D RepRap.....	12
Figura 6. Icono Software Cura.....	13
Figura 7. Impresora 3D – BCN 3D.....	17
Figura 8. Composición de las diferentes partes del extrusor – Hot end.....	18
Figura 9. Placa Arduino Mega 2560.....	20
Figura 10. Placa Ramps 1.4.....	20
Figura 11. Driver de control de los motores paso a paso Pololu A4988.....	21
Figura 12. Motor paso a paso Nema 17.....	21
Figura 13. Final de carrera utilizado en la Impresora 3D.....	22
Figura 14. Sensor térmico – Termistor NTC 100K.....	22
Figura 15. Resistencia calentadora con cartucho cerámico.....	22
Figura 16. Placa calefactora MK2A.....	23
Figura 17. Fuente de alimentación (12v – 20A 240w).....	23
Figura 18. Diferentes piezas de calibración para la comprobación de tolerancias dimensionales.....	26
Figura 19. Diferentes piezas con capas iguales.....	26
Figura 20. Diferentes piezas complejas.....	27
Figura 21. Diferentes piezas huecas imprimibles.....	27
Figura 22. Diferentes piezas imposibles.....	28
Figura 23. Diferentes piezas provistas de uniones móviles.....	28
Figura 24. Cama caliente. Detalle de la unión al eje ‘y’ mediante los tornillos tensores ajustables.....	32
Figura 25. Perpendicularidad entre ejes.....	32
Figura 26. Izq.: Distancia incorrecta entre hot end y heated bed. Dcha.: Distancia correcta.....	33
Figura 27. Menú modo manual Software Cura.....	33
Figura 28. Terminal de comandos del Software Cura.....	35
Figura 29. Pestaña Configuration.h del Firmware Marlin.....	36
Figura 30. Registro de temperaturas durante la impresión. Mallado escalado a 30 segundos.....	37
Figura 31. Pestaña Configuration.h del Firmware Marlin.....	40
Figura 32. Menú modo manual software Cura.....	40

Figura 33. Terminal de comandos del Software Cura	41
Figura 34. Piezas de calibración.	43
Figura 35. Disposición Drivers	45
Figura 36. Detalle del Driver con los dos potenciómetros y las instrucciones de calibración.	46
Figura 37. Detalle del conexionado del Driver	47
Figura 38. Izq.: Posicionamiento del punto home según manual de montaje de la impresora BCN – 3D.....	49
Figura 39. Diferencia del posicionamiento del punto home entre el Firmware y el Software Cura 14.01.....	50
Figura 40. Izqda.: Situación del punto home según el manual de montaje de la impresora BCN – 3D. Dcha.: Interpretación de la localización del punto home según la configuración original del firmware. Comparativa con la situación real del punto home.....	51
Figura 41. Pestaña Configuration.h de la controladora de Arduino Marlin v1.....	51
Figura 42. Conexionado de los finales de carrera en la placa Ramps 1.4.....	52
Figura 43. . Izqda.: Interpretación de la localización del punto home según la configuración original del firmware. Comparativa con la situación real del punto home. Dcha.: Configuración correcta. La localización del punto home según el firmware coincide con la situación real en el prototipo BCN – 3D de la UBU.....	53
Figura 44. Detalle de la placa Arduino Mega 2560. Se observan numeradas las entradas/salidas.	55
Figura 45. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de entradas digitales.	55
Figura 46. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de salidas digitales.	56
Figura 47. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de entradas analógicas.....	56
Figura 48. Conexionado eléctrico para comprobación de salidas PWM.	57
Figura 49. Menú de carga y transferencia de la controladora de Arduino Marlin v157	
Figura 50. Icono de la consola de lectura de pines en el menú de carga y transferencia de la controladora de Arduino Marlin v1.....	57
Figura 51. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	59
Figura 52. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño.	60
Figura 53. Montaje correspondiente al movimiento del eje ‘y’. Se observan las piezas de unión de los rodamientos lineales del eje ‘y’ con el soporte de la cama y los 4 tornillos de sujeción en cada uno de ellos.....	61

Figura 54. Pieza New Y rod mount with tensioner. Izqda.: diseño CAD. Dcha.: Pieza New Y en la impresora BCN – 3D prototipo de la UBU. Se observa el defecto indicado por la flecha.....	62
Figura 55. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño.	63
Figura 56. Diseño CAD de la pieza de soporte del eje ‘y’ New Y rod mount with tensioner.	64
Figura 57. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	65
Figura 58. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño	66
Figura 59. Falta de perpendicularidad entre eje ‘z’ y eje ‘y’	67
Figura 60. Driver de control de motor Paso a Paso - A4988 G3D Stepper Driver...	68
Figura 61. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño	69
Figura 62. Diferencia de temperatura de diferentes diseños de controlador Izq.: PCB Cuatro capas sin disipador Centro.: PCB Dos capas sin disipador Dcha.: PCB dos capas con disipador	70
Figura 63. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	71
Figura 64. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño	72
Figura 65. Composición de las diferentes partes del extrusor	73
Figura 66. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño	74
Figura 67. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	77
Figura 68. Comparación de resultados con respecto al diseño inicial de la pieza	78
Figura 69. Composición de los diferentes elementos de la cama caliente	79
Figura 70. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño	79
Figura 71. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	81
Figura 72. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño	82
Figura 73. Pantalla principal de impresión del software Cura con la configuración de los valores estudiados.....	85
Figura 74. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	86
Figura 75. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño	87
Figura 76. Menú de diseño del software Cura	88
Figura 77. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.....	89
Figura 78. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño	90

Figura 79. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño	91
Figura 80. Perfiles teóricos de velocidad nominal para distintos valores de aceleración.....	101
Figura 81. Parámetros avanzados que afectan de algún modo a la velocidad y al tiempo de impresión.....	104
Figura 82. Parámetro experto que realiza impresiones en espiral del contorno de la pieza	104
Figura 83. Parámetros configurados para el ensayo de velocidad.....	105
Figura 84. Pieza utilizada en el ensayo de velocidad.....	105
Figura 85. Diferentes pruebas realizadas para diferentes valores de velocidad y tiempo de secado de capa de 0 s.....	106
Figura 86. Diferentes pruebas realizadas para diferentes valores de velocidad y tiempo de secado de capa de 3 s.....	107
Figura 87. Diferencia entre Pieza 1, Pieza 7 y pieza impresa a 40 mm/s con la opción Spiralize.....	107
Figura 88. Piezas Unión Eje ‘z’ – Eje ‘x’	109
Figura 89. Diferentes tipos de roscados	111
Figura 90. Composición de Piezas de Eje ‘z’	112
Figura 91. Formas de tuerca (Hexagonal, Con Valona, Cilíndrica)	113
Figura 92. Izq.: Fuerzas en los filetes, al subir la carga dcha.: Fuerzas en los filetes, al bajar la carga	114
Figura 93. Gráficos de rendimientos para tornillos trapezoidales.	117
Figura 94. Métricas correspondientes a la norma DIN 975	118
Figura 95. Composición de las diferentes partes Eje ‘y’	119
Figura 96. Sistema industrial de guías pre-alineadas	120
Figura 97. Perfiles de Aluminio en diferentes configuraciones.....	121
Figura 98. Izq.: Riel lineal abierto. Dcha.: Instalación del riel en un perfil de aluminio	122
Figura 99. Pieza de unión a estructura (Lower ZT)	122
Figura 100. Diferentes configuraciones de Eje ‘y’	123
Figura 101. Diseño soporte inferior.	124
Figura 102. Composición de las diferentes partes del extrusor – Hot end.....	125
Figura 103. Hot end J-Head IV con calentador y termistor NTC	125
Figura 104. Perdida de guiado del plástico en la hendidura del tornillo Hobbed Bolt	126
Figura 105. Cuerpo de extrusor con guiado del plástico.....	127
Figura 106. Vista superior del extrusor. En rojo: pieza creada para realizar el centrado del plástico en la hendidura del tornillo Hobbed Bolt.	128
Figura 107. Diferentes partes del hot end J-Head IV	129

Figura 108. Problema en la colocación del ventilador debido a los orificios de los tornillos	130
Figura 109. Pieza de adaptación para refrigeración de la parte superior del hot end.	131
Figura 110. Conexión del ventilador a la placa Ramps 1.4	131
Figura 111. Lectura de temperaturas de la placa electrónica Ramps.....	133
Figura 112. Transistor STP55NF06L con encapsulado TO-220	135
Figura 113. Circuito de Simulación de la cama caliente en la placa electrónica Ramps	135
Figura 114. Situación de las sondas introducidas en el circuito para la simulación.	136
Figura 115. Comportamiento de la tensión VDS en el circuito de control de la cama caliente	137
Figura 116. Comportamiento de la corriente de drenador ID en el circuito de control de la cama caliente	138
Figura 117. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el circuito de control de la cama caliente	139
Figura 118. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación	139
Figura 119. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación	140
Figura 120. Gráfica de simulacion inicial de dos periodos.....	140
Figura 121. Gráfica de simulacion inicial del flanco de bajada.....	140
Figura 122. Gráfica de simulacion inicial del flanco de subida.....	140
Figura 123. Situación de las sondas introducidas en el circuito con diodo en antiparalelo.....	142
Figura 124. Comportamiento de la tensión VDS introducido un diodo en antiparalelo	142
Figura 125. Comportamiento de la corriente de drenador ID introducido un diodo en antiparalelo.....	143
Figura 126. Comportamiento de la corriente que circula por el ánodo del diodo conectado en antiparalelo.....	143
Figura 127. Comportamiento de la corriente de puerta IG introducido un diodo en antiparalelo.....	144
Figura 128. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación introducido un diodo en antiparalelo.....	144
Figura 129. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de subida de la conmutación introducido un diodo en antiparalelo.....	145
Figura 130. Gráfica de simulacion de dos periodos con diodo Schottky.....	146
Figura 131. Gráfica de simulacion del flanco de bajada con diodo Schottky.....	146

Figura 132. Gráfica de simulacion del flanco de subida con diodo Schottky.....	146
Figura 133. Composición de las 3 piezas realizadas para el soporte y la orientación del ventilador.....	148
Figura 134. Diagrama de Gantt de la planificación Inicial del Proyecto.....	154
Figura 135. Tareas planificadas inicialmente	155
Figura 136. Diagrama de Gantt de la planificación Final del Proyecto.....	158
Figura 137. Tareas de la planificación Final.....	159
Figura 138. Comparación de la planificación Inicial y la planificación final.....	160

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores obtenidos en el autotune del controlador PID. T inicial 18°C; plástico ABS.....	36
Tabla 2. Valores obtenidos en el autotune del controlador PID. T inicial 18°C; plástico PLA.....	38
Tabla 3. Comandos.....	42
Tabla 4. Valores obtenidos para los diferentes motores asociados a los ejes de la impresora.....	42
Tabla 5. Medidas obtenidas en las piezas de calibración impresas. Error de impresión (%).....	43
Tabla 6. Valores típicos aproximados de intensidad de corriente para los diferentes motores paso a paso.....	45
Tabla 7. Valores obtenidos aproximados de corriente.....	48
Tabla 8. Resultados obtenidos de Prueba General I.....	60
Tabla 9. Resultados obtenidos de Prueba General I después de adoptar las oportunas medidas correctoras.....	63
Tabla 10. Resultados obtenidos de Prueba General II.....	66
Tabla 11. Resultados obtenidos de Prueba General II después de adoptar las oportunas medidas correctoras.....	69
Tabla 12. Resultados obtenidos de Prueba General III.....	72
Tabla 13. Resultados obtenidos de Prueba General III después de adoptar las oportunas medidas correctoras.....	75
Tabla 14. Valores óptimos de cierre para un cubo de arista 5 cm.....	76
Tabla 15. Resultados obtenidos de Prueba General IV.....	78
Tabla 16. Resultados obtenidos de Prueba General IV después de adoptar las oportunas medidas correctoras.....	80
Tabla 17. Resultados obtenidos de Prueba General V.....	82
Tabla 18. Resultados obtenidos de Prueba General VI.....	87
Tabla 19. Resultados obtenidos de Prueba General VII.....	90
Tabla 20. Resultados obtenidos de Prueba General VII después de adoptar las oportunas medidas correctoras.....	92
Tabla 21. Valores obtenidos de Presión / Temperatura.....	94
Tabla 22. Valores obtenidos de Presión / Temperatura.....	97
Tabla 23. Descripción de las diferentes piezas realizadas en el ensayo de velocidad.....	106
Tabla 24. Tolerancias dimensionales según norma ISO 2901/2903 o DIN 103 para Husillo M8 y M10.....	111
Tabla 25. Coeficientes de rozamiento para diferentes materiales de unión.....	113
Tabla 26. Coeficientes de fricción de plásticos Iigus.....	114

Tabla 27. Significado de las variables de las Ecuaciones 3 - 8.....	114
Tabla 28. Valores obtenidos de par de torsión de bajada – subida.	116
Tabla 29. Valores obtenidos de eficiencia	117
Tabla 30. Diferentes elementos utilizados en la simulación de la cama caliente en la placa Ramps	136
Tabla 31. Tabla comparativa.....	141
Tabla 32. Inversión Inicial.	161
Tabla 33. Coste de personal.	161
Tabla 34. Coste del Hardware.	162
Tabla 35. Coste del Software.	163
Tabla 36. Coste Total.	164
Tabla 37. Coste de las Mejoras.	165



1. INTRODUCCIÓN

La Universidad de Burgos (UBU), siguiendo una política de capacitación al alumnado en la adquisición de competencias que favorezcan su posterior incorporación en el mercado laboral, desarrolla iniciativas que permiten integrar diferentes áreas de la Ingeniería en una colaboración multidisciplinar.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se enmarca dentro de una de estas iniciativas. En concreto en la relacionada con la introducción de la UBU en el campo de la impresión en tres dimensiones (impresión 3D) de bajo coste.

El desarrollo de la tecnología de impresión 3D ha tenido una importancia creciente en los últimos años. Esto ha sido en parte posible gracias al abaratamiento de los materiales de impresión y, sobre todo, gracias al auge de los denominados Software y Hardware libres.

Por su parte, la existencia de Hardware libre permite acceder libremente a multitud de planos de piezas alojados en la web, incluidos los de las piezas de la propia impresora. De esta forma, podemos abaratar los costes finales del equipamiento, mediante la impresión 3D de determinadas partes del mismo.

En Diciembre de 2013, el Grupo de Investigación *DINper* (Diseño Inclusivo Personalizado – Diseño para todos y cada uno) de la UBU adquirió un primer prototipo de impresora 3D. El objetivo principal pasa por incorporar las funcionalidades que ofrece este equipo a las diferentes líneas de investigación que el grupo tiene abiertas (<http://www2.ubu.es/.../dinper/>) :

- Proyectos dirigidos a personas con discapacidad auditiva, discapacidad visual, discapacidad motórica, discapacidad intelectual.
- Adaptaciones al control del entorno en el Ámbito laboral, Ámbito escolar, Ocio y tiempo libre. Autonomía personal y social.
- Orientación inclusiva y personalizada.
- Elaboración y adaptación de materiales educativos.

Una vez instalada la máquina, el siguiente paso lógico es la puesta en marcha y el estudio de posibles mejoras y la implementación de las mismas. Así, durante este primer año de andadura, varios profesionales y alumnos provenientes de diversas áreas de la Ingeniería (Ing. Electrónica, Informática y Mecánica), han colaborado interdisciplinariamente en su puesta en marcha y el inicio de su desarrollo.



En lo que respecta al presente Trabajo Fin de Grado, que se encuentra enmarcado en el área de la Ingeniería Electrónica, se ha llevado a cabo el estudio del proceso de mejora y optimización del prototipo de impresora 3D.

Este tipo de estudios suelen presentar, especialmente en sus inicios, limitaciones que requieren de un análisis y proceso de mejora continua que permita adaptarlo a las necesidades concretas de la iniciativa a desarrollar. Los detalles técnicos de este proceso son desarrollados en la presente Memoria.



2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

2.1. Antecedentes

El motivo de la realización del presente Trabajo Fin de Grado (TFG), surge en el Grupo de Investigación *DINper* de la UBU. Este Grupo realiza acciones de apoyo a la promoción de la autonomía dirigidas a personas con discapacidad y en el marco del envejecimiento activo, dentro de las diferentes líneas de investigación que tiene abiertas (<http://www2.ubu.es/ingelec/tecelec/ps/dinper/>)sis:

- Proyectos dirigidos a personas con discapacidad auditiva, discapacidad visual, discapacidad motórica, discapacidad intelectual.
- Adaptaciones al control del entorno en el Ámbito laboral, Ámbito escolar, Ocio y tiempo libre. Autonomía personal y social: domótica.
- Orientación inclusiva y personalizada.
- Elaboración y adaptación de materiales educativos.



Figura 1. Logotipo del Grupo de Investigación *DINper* (Diseño Inclusivo Personalizado – Diseño para todos y cada uno) de la Universidad de Burgos.

Dentro del Grupo *DINper* y durante el presente curso 2013/2014 se han realizado varios TFG, resultando en una colaboración en paralelo (multidisciplinar) de varias ramas de la Ingeniería (Electrónica, Mecánica e Informática). En el caso del presente TFG se estudia el proceso de mejora y optimización de un prototipo de impresora 3D, resaltando los cambios más significativos en la implementación de esta tecnología dentro de distintos ámbitos, (laboral, escolar, ocio y tiempo libre, etc.) de la vida de las personas con discapacidad.



2.2. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Grado es acreditar, por parte del alumno Javier Pérez Sáiz, la adquisición de las Competencias Generales y Específicas conducentes a la obtención del Título de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática por la Universidad de Burgos.

Objetivos específicos

El principal objetivo planteado en el presente TFG es realizar un estudio del proceso de puesta a punto, optimización y mejora de un prototipo de impresora 3D.

Se realizará un incremento de la funcionalidad, adaptándola y mejorándola en los diferentes niveles en los que se pretende aplicar la tecnología, con la intención de satisfacer las necesidades que el usuario demanda de este tipo de máquinas.

Para poder llevar a cabo la correcta optimización del equipo se realizarán varios ensayos los cuales se contrastarán en términos de rendimientos, velocidades y calidades de impresión.

Por otro lado, se plantearán y se realizarán dentro de lo estrictamente posible diferentes mejoras al prototipo actual de impresora 3D, teniendo en cuenta las diferentes aplicaciones de la impresora 3D en los proyectos planteados para un futuro cercano. Este tipo de mejoras se basarán en la adaptación, modificación o sustitución de los componentes del prototipo (hardware y software), previo estudio sistemático de los elementos de fallo.

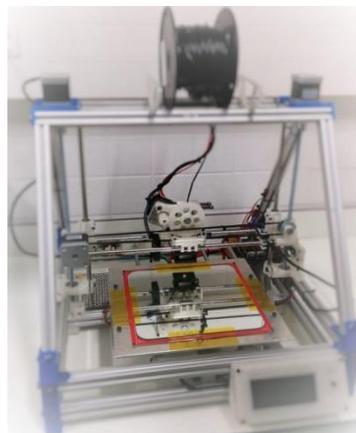


Figura 2. Prototipo de Impresora utilizado en el TFG (BCN-3D)



3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Impresoras 3D

Desde hace varios años se han empezado a desarrollar varios proyectos de desarrollo de tecnologías de prototipado rápido entre los que se encuentran las conocidas “impresoras 3D”. Estas pueden clasificarse según la tecnología utilizada para obtener el prototipo [1]:

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

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

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

3.1.1. Historias de las Impresoras 3D

El inicio de la impresión 3D se remonta a 1976, cuando se inventó la impresora de inyección de tinta. En 1984, algunas adaptaciones y avances sobre el concepto de la inyección de tinta transformaron la tecnología de impresión con tinta a impresión con materiales. A lo largo de las últimas décadas, ha habido una gran variedad de



aplicaciones de la tecnología de impresión 3D que se han desarrollado a través de varias industrias.

Las impresoras 3D funcionan como las impresoras de chorro de tinta, en vez de tinta, las impresoras 3D depositan el material deseado en una serie de capas sucesivas para crear un objeto procedente de un formato digital.

Lo siguiente es una breve historia de los principales hitos que han quedado marcados en el camino [2]:

➤ **1992** – Fabricación de prototipos capa por capa

La primera máquina de impresión 3D del tipo SLA (estereolitográfico) en el mercado, fue desarrollada por la empresa 3D Systems. El funcionamiento básico de esta máquina consiste en que un láser UV va solidificando un fotopolímero, un líquido con la viscosidad y color parecido al de la miel, el cual va fabricando partes tridimensionales capa por capa. A pesar de la imperfección, de sobra se demuestra que piezas altamente complejas podían ser fabricadas.

➤ **1999** – Órganos de ingeniería traen nuevos avances en medicina

El primer órgano criado en laboratorio que se implementó en humanos fue un aumento de la vejiga urinaria utilizando recubrimiento sintético con sus propias células.

La tecnología utilizada por los científicos del Instituto de Wake Forest de Medicina Regenerativa, abrió las puertas al desarrollo de otras estrategias para los órganos de la ingeniería, el cual pasaba por la impresión de los mismos. Debido a que están fabricadas con células propias del paciente, el riesgo de rechazo es prácticamente nulo.

➤ **2002** – Un riñón 3D en funcionamiento

Los científicos diseñan un riñón en miniatura completamente funcional y con la capacidad de filtrar sangre y producir orina diluida en un animal.

El desarrollo llevó a la investigación en el Instituto de Wake Forest de Medicina Regenerativa el objetivo de imprimir los órganos y tejidos con tecnología de impresión 3D.



➤ **2005** – Open-Source colabora con la impresión 3D

El Dr. Adrian Bowyer funda RepRap, en la Universidad de Bath, una iniciativa de código abierto para construir una impresora 3D que puede imprimir la mayoría de sus propios componentes. La visión de este proyecto es el de democratizar la fabricación de unidades de distribución de bajo coste RepRap a las personas de todo el mundo, lo que les permite crear productos a diario por su cuenta.

➤ **2006** – El SLS y la personalización en la fabricación en masa

Este año se construye la primera máquina del tipo SLS (Sintetización de laser selectivo) viable.

Básicamente, este tipo de máquina utiliza un láser para fundir materiales en el proceso de impresión 3D. Este descubrimiento abre las puertas a la personalización masiva y a la demanda de fabricación de piezas industriales, y más tarde, prótesis.

Ese mismo año, Object, un proveedor de materiales e impresoras 3D, crea una máquina con la capacidad de imprimir en múltiples materiales, incluyendo polímeros y elastómeros. La máquina permite que una parte sea fabricada con una gran variedad de densidades y propiedades de material.

➤ **2008** – La primera impresora con capacidad de auto replica.

Tras su lanzamiento en 2005, el proyecto RepRap saca a la luz Darwin, la primera impresora 3D con capacidad de imprimir la mayoría de sus propios componentes, permitiendo a los usuarios que ya tienen una, hacer más impresoras para sus amigos o incluso reparar componentes de la suya.

➤ **2008** – Lanzan servicios de co-creación.

Shapeways lanza una página web beta privada para ofrecer un nuevo servicio de co-creación entre la comunidad permitiendo que artistas, arquitectos y diseñadores presenten sus diseños en 3D como objetos físicos baratos.



- **2008** – Gran avance en la prótesis.

La primera persona que camina sobre una pierna de prótesis impresa en 3D, con todas las partes, rodilla, pie, etc, impresa en una misma compleja estructura sin ningún tipo de montaje. Este tipo de avances permiten que los fabricantes de prótesis realicen desarrollos a medida en el sector de las prótesis.

- **2009** – Kits de impresoras 3D DIY entran en el mercado.

Industrias MakerBot, una compañía de hardware de código abierto para las impresoras 3D, comienza la venta de kits de montaje que permiten a los compradores fabricar sus propias impresoras 3D y productos.

- **2009** – De células a vasos sanguíneos.

Llega la bio-impresión, con la tecnología del Dr. Gabor Forgacs, que utiliza una bio-impresora 3D para imprimir el primer vaso sanguíneo.

- **2011** – Primer avión impreso en 3D.

Los ingenieros de la Universidad de Southampton diseñaron y planearon el primer avión impreso en 3D. Este avión no tripulado se construye en siete días, con un presupuesto de 7.000€. La impresión 3D permite que sus alas tengan forma elíptica, una característica normalmente cara que ayuda a mejorar la eficiencia aerodinámica y reduce al mínimo la resistencia inducida.

- **2011** – Primer coche impreso en 3D.

Kor Ecologic nos presenta Urbee, un prototipo de coche que trata de ser lo más eficiente posible con el medio ambiente, siendo toda su carrocería diseñada e impresa en 3D. Trata de ser un coche eficiente en cuanto a consumo de gasolina y en cuanto a su coste de producción. Su precio oscilará entre los 12.000€ y 60.000€ siempre y cuando sea comercialmente rentable.



- **2011** – Impresión 3D en oro y plata.

La empresa Materialise ha sido la primera empresa en ofrecer un servicio de impresión 3D de oro de 14 Kilates y plata de ley. Esta opción va a permitir abrir un nuevo mercado a los joyeros con diseños más económicos utilizando este material.

- **2013** – Primer implante de prótesis de mandíbula impresa en 3D.

Doctores e ingenieros holandeses trabajan con una impresora 3D especialmente diseñada por la empresa LayerWise, la cual permite imprimir prótesis de mandíbulas personalizadas. Este grupo ha podido implantar una mandíbula a una mujer de 83 años de edad que sufría una infección de hueso crónica. Esta tecnología se está estudiando más profundamente con el objetivo de poder promover el crecimiento de nuevo tejido óseo.

- **2014** – Crean la tecnología para realizar impresiones 3D metálicas.

La impresora 3D es el futuro. Sus grandes posibilidades, infinitas, todavía se están explorando. Su revolución no ha hecho más que comenzar. Siemens ha dado un salto en esta tecnología desarrollando una nueva evolución en la impresión 3D a partir de materiales metálicos de alta resistencia. La compañía alemana ha aplicado esta tecnología a la fabricación de componentes de repuesto de turbinas de gas con una reducción del tiempo del 90%.

- **2014** – NASA empieza a trabajar en el prototipo de un dispositivo para imprimir comida.

El objetivo a largo plazo de la empresa encargada del proyecto de la NASA, Systems and Materials Research, es proveer a la institución de la tecnología necesaria para que los astronautas creen su propia comida en las misiones espaciales, permitiendo conservar los alimentos hasta un total de 30 años.



3.1.2. Proyecto RepRap

Es un acrónimo que significa **Replicating Rapid Prototyper**, esto es, prototipador replicante rápido. Es un conjunto de impresoras 3D cuyas piezas en principio se pueden imprimir utilizando otra impresora 3D. Es una iniciativa Open Hardware para la creación de máquinas manufacturadas libres y que se pueden construir en casa. Por lo general cuando nos referimos a una RepRap nos referimos a una impresora RepRap.

Los primeros experimentos con el prototipado rápido en 1997-2000 no estuvo expresamente orientado hacia la reproducción de sistemas de prototipo rápido propiamente tales, sino más bien extendidos para simular técnicas de "robótica evolucionaría" en el mundo físico. Desarrollos posteriores del prototipo rápido le han dado al proceso la habilidad para producir una amplia variedad de componentes electrónicos y mecánicos, convirtiéndola en una frontera de rápido desarrollo en la investigación de sistemas autorreplicantes.

En el 2005, Adrian Bowyer de la Universidad de Bath comenzó el Proyecto RepRap para desarrollar una máquina de prototipado rápido que sería capaz de fabricar algunas o la mayor parte de sus propios componentes, haciendo de tales máquinas lo suficientemente baratas como para que las personas pudieran comprarlas y usarlas en sus casas. En el año 2006 el proyecto produjo un prototipo básico funcional y en mayo de 2008 la máquina logró producir todas las partes plásticas que requería para fabricar una máquina 'hijo'.

El proyecto RepRap utiliza Open Hardware y Open Software.

Open Hardware Se refiere a hardware libre (al igual que Open Software se refiere a software libre). Se refieren a piezas de maquinaria, electrónica, mecánica que no están sujetas por un copyright, patente, o registro de cualquier tipo sino por una licencia de uso, distribución y modificación libre. Esto implica que los productos Open Hardware tendrán planos, diagramas a disposición del usuario, y que se podrán replicar sin violar ninguna ley, al igual que modificar o mejorar.



Figura 3. Logotipo Open Hardware



RepRap tiene la forma de una impresora 3D libre capaz de imprimir objetos plásticos. Como muchas de las partes de están hechas de plástico y RepRap imprime esas partes, RepRap puede auto-replicarse haciendo un kit de sí misma, un kit que cualquier persona puede ensamblar si cuenta con el tiempo y los materiales.

Una máquina de este tipo puede fabricar objetos físicos a partir de modelos generados por ordenador: de la misma manera que la impresora de un ordenador permite imprimir imágenes en dos dimensiones en papel, RepRap imprime objetos en 3D a base de plástico, permitiendo la fabricación de objetos.

El proyecto RepRap fue iniciado en febrero del 2004 por Andrian Bowyer en Inglaterra, pero actualmente hay personas colaborando en otras partes del mundo, RepRap está disponible bajo la licencia GNU GPL. Esta licencia permite que podamos copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente. Tomando como una analogía la Teoría de Evolución de Darwin, la comunidad que trabaja alrededor del proyecto puede mejorar los diseños actuales permitiendo que la máquina evolucione con el tiempo [3].



Figura 4. Logotipo RepRap



3.2. Sistemas de Impresión

La visión global del conjunto de herramientas CAM RepRap (toolchain RepRap CAM) consiste en todos los elementos de software necesarios para crear modelos 3D impresos desde el modelo CAD al firmware.

Consideremos el siguiente diagrama de flujo:



Figura 5. Diagrama de flujo de una impresora 3D RepRap

3.2.1. Sistemas CAD

Es el Sistema de diseño asistido por computadora. Nos permite la creación de piezas para posteriormente exportar dicha pieza en un formato compatible con nuestro sistema de impresión. La extensión de fichero más comúnmente empleada es .STL (del inglés 'STereo Lithography'), aunque los programas aceptan generalmente muchos más formatos (p.ej: .OBJ, .AMF, etc...).

Hay gran variedad de programas de este tipo, tanto de pago (AutoCAD, CATIA, SolidWorks, etc...), como libre (Blender, FreeCAD, etc...).

Por otra parte, las piezas para impresión se pueden obtener también mediante el proceso de escaneo 3D, esto nos serviría para replicar piezas de la realidad como puedan ser empuñaduras ergonómicas, adaptándolas mediante un sistema CAD y posteriormente imprimiéndolas para así tener una pieza adaptable.

En un sistema de impresión esta parte del sistema no siempre va a ser obligatoria. Ya que se podrá reutilizar ficheros generados anteriormente o proporcionados por otras personas.



3.2.2. Sistemas de laminado

Es el encargado de recibir el fichero con la pieza a imprimir y transformar la pieza en una serie de capas. A partir de estas capas este sistema generará unas rutas de movimiento en un lenguaje interpretable por el Firmware de la controladora.

Este sistema basándose en los parámetros de configuración de la impresora (ancho extrusor, velocidad impresión, relleno de la pieza, etc...), generará un .gcode donde línea por línea se detalla el movimiento a realizar por la impresora.

Programas que se encargan de esta tarea como por ejemplo: Skeinforge, Slic3r.

3.2.3. Driver de comunicación

También conocido como sistema Host. Sistema responsable de la comunicación entre el sistema de laminado y el Firmware de la controladora. Crea una comunicación serie entre ambos y va mandando la información línea a línea.

En muchos casos estos programas suelen incluir diferentes sistemas de lectura para los datos enviados por el firmware de la controladora como puedan ser temperaturas del extrusor, temperatura de la cama, por lo que pueden ser mostrados al usuario para que este disponga de información sobre el proceso en tiempo real.

En este apartado encontramos programas como Printron [4], replicatorG [5], Repetier-Host [6].

3.2.4. Ambos sistemas integrados

Como hemos visto anteriormente, es posible encontrar programas que a la vez te generen el fichero .gcode laminado y se puedan comunicar con el controlador. Estos programas son programas englobados en el campo de “Driver de comunicación”, pero que a su vez integran un sistema de laminado que se encarga de generar las rutas de movimiento mientras que el programa es el encargado de enviarlo a la impresora.

En nuestro caso el software elegido es Cura 14.01 [7].



Figura 6. Icono Software Cura



3.2.5. Firmware de la controladora

Se encarga de recibir el .gcode e interpretar las rutas de movimiento. Ha de ser configurado con los componentes instalados en la impresora para un correcto funcionamiento.

Estos pueden ser Marlin v1 [8] (empleado como firmware en nuestro proyecto), Sprinter, Teacup.

3.3. Términos, acrónimos y definiciones

Arduino

Arduino [9] es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada, de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores.

Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 [10] se trata de una placa expansión del Arduino Uno tradicional basado en el microcontrolador ATmega2560. A diferencia del Arduino Uno tradicional de 14 pines de entrada/salida digital éste dispone de 54 pines, de los cuales 15 pueden ser usados como PWM, lo cual permite tener muchas más conexiones.

Ramps 1.4

También conocida como RepRap Arduino Mega Pololu Shield [11], se trata de la placa (o Shield) conectada a un Arduino Mega, quienes trabajando en conjunto forman la parte principal del Hardware y controlan todas las señales de entrada y salida para lograr la impresión 3D.

En esta placa se conectan los Pololus (reciben este nombre por la empresa fabricante) o Drivers encargados de controlar los motores, los finales de carrera, los PID de extrusor y cama caliente y diversos transistores.



Extrusor

Pieza con forma de boquilla con un orificio de una forma y un diámetro determinado por la cual sale un material a presión para obtener una pieza o material de una sección específica.

En el caso de este proyecto se trata de una pieza cilíndrica con un orificio circular por el cual sale plástico caliente a presión.

Extruir: Proceso por el que saca plástico a presión a través del extrusor.

Retraer: Se trata de tirar del plástico que se encuentra en el extrusor para sacarlo de este. Esto permite cambiar el plástico que se está usando para la impresión.

Heated bed o Cama caliente

Superficie plana generalmente de cristal calentada mediante una resistencia donde el extrusor va depositando el plástico que sale. Estas camas son empleadas para mejorar la calidad de la impresión además de prevenir un enfriamiento excesivamente rápido del plástico evitando una retracción que deformaría la pieza.

G-Code

El G-code [12] es un lenguaje mediante el cual las personas pueden decir a máquinas-herramienta controladas por ordenador, qué hacer y cómo hacerlo. Esos "qué" y "cómo" están definidos mayormente por instrucciones sobre adonde moverse, cuán rápido moverse y que trayectoria seguir. Las máquinas típicas que son controladas con G-code son fresadoras, cortadoras, tornos e impresoras 3D.

Hobbed bolt

Hobbed Bolt es un tornillo M8 que tiene una muesca en el centro que presenta unos dientes paralelos al eje del tornillo. Este tornillo sirve para empujar el filamento hacia el mecanismo del extrusor.



Hot end

Se refiere a la pieza que sobresale hacia abajo del extrusor y cuya finalidad es fundir el filamento y terminar de extruirlo.

El *hot end* se compone de un tubo de latón hueco recubierto de un tubo de aislante térmico (PEEK por lo general), un bloque de latón o aluminio con dos agujeros, uno para la resistencia que calentará el sistema, y el otro para poner un termistor para medir la temperatura. El bloque de material almacena el calor generado por la resistencia para fundir el plástico.

PEEK

EL plástico PEEK o poliéter éter cetona es un polímero orgánico termoplástico utilizados en aplicaciones de ingeniería, que ofrece una combinación única de altas propiedades mecánicas, resistencia a la temperatura y excelente resistencia química.

El rango de temperaturas recomendable de este plástico es aproximadamente de -50°C a 275°C .

ABS

Acrilonitrilo Butadieno Estireno es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un termoplástico amorfo.

El rasgo más importante del ABS es su gran firmeza, incluso a baja temperatura. Además es duro y rígido; baja absorción de agua, por lo tanto buena estabilidad dimensional; alta resistencia a la abrasión; se recubre con una capa metálica con facilidad.

PLA

El poliácido láctico (PLA o ácido poliláctico) es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable. Se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono.



4. MATERIALES, TIPOLOGÍA DE PIEZAS Y METODOLOGÍA

4.1. Material Utilizado

El material utilizado para la realización del Trabajo Fin de Grado corresponde a la propia impresora 3D – BCN·3D, herramientas informáticas para la impresión 3D, herramientas de software adicionales y herramientas de calibración.

También se consideran medios materiales los plásticos fundidos y depositados en el proceso de impresión (ABS y PLA, principalmente).

4.1.1. Impresora 3D - BCN·3D

El prototipo de impresora 3D con el que se va a trabajar está basado en el modelo BCN 3D versión v1.2. Este modelo de impresora fue proporcionado por Abadía Tecnológica S.L. (Burgos, España) y consta de varios elementos:

- **Elementos mecánicos:**

Estructuralmente la impresora 3D se compone de una serie de perfiles comerciales de aluminio de 20x20 mm unidos por diferentes piezas impresas en plástico. La estructura está formada por una base cuadrada sobre la que se sitúa la cama caliente. En los laterales de la base se disponen unas estructuras triangulares que soportan todos los elementos del eje z. Estos triángulos están unidos por su vértice superior por 2 perfiles de aluminio que a su vez sirven de apoyo para colocar las bobinas con el material de impresión (ver Figura 7).

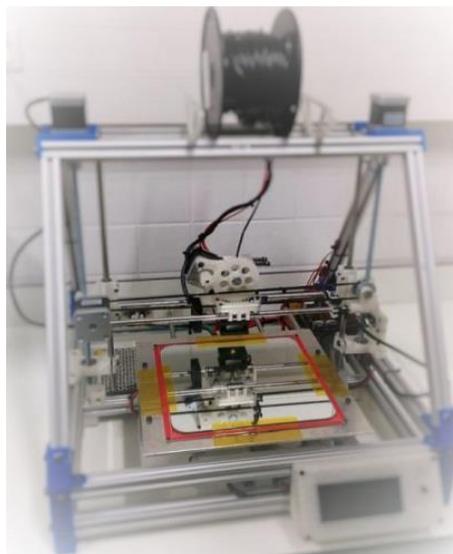


Figura 7. Impresora 3D – BCN 3D



Para la realización de las uniones entre los elementos plásticos y el perfil de la estructura se utilizan tornillos y tuercas de diferentes métricas y longitudes.

Si desglosamos por ejes:

El eje 'z' consta de dos varillas roscadas de métrica 8, así como 2 varillas lisas, dispuestas verticalmente y paralelas entre sí, 2 rodamientos lineales, 2 rodamientos angulares uno en cada varilla lisa y 2 amortiguadores que realizan la unión de cada uno de los ejes de los dos motores a las varillas roscadas.

El eje 'y' consta de 2 varillas lisas dispuestas horizontalmente, 4 rodamientos lineales y 1 rodamiento angular que hacen posible el movimiento lineal del eje mediante una correa. También encontramos 2 planchas de aluminio que sostienen la cama caliente.

El eje 'x' al igual que el eje 'y' consta de 2 varillas lisas horizontales, 3 rodamientos lineales y 1 rodamiento angular que mediante una correa dentada hacen posible el movimiento lineal de este eje.

Además de los ejes x, y, z, el elemento mecánico más importante de la impresora 3D es el extrusor. Se trata de una pieza con forma de boquilla con un orificio de una forma y un diámetro determinado por la cual se bombea un material a presión para obtener una pieza o material de sección específica, en un proceso denominado extrusión.

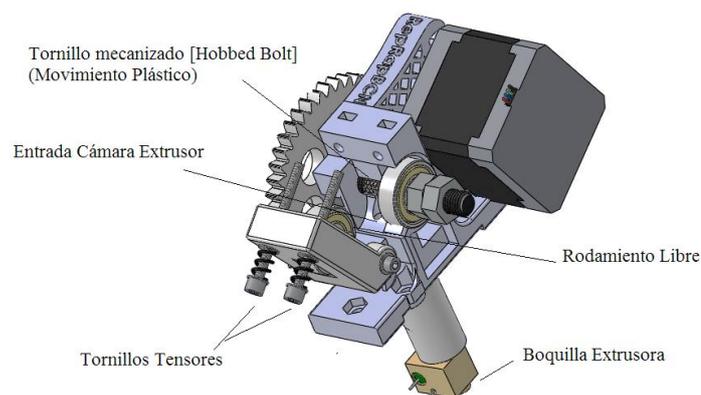


Figura 8. Composición de las diferentes partes del extrusor – *Hot end*

En la mayoría de impresoras 3D, la pieza con forma de boquilla es también la encargada de fundir el plástico y generalmente se denomina *hot end*.



El *hot end* se compone de un tubo de latón hueco recubierto de un tubo de aislante térmico (PEEK *Polyether ether ketone*) y un bloque de latón o aluminio con dos orificios; uno para la resistencia que calentará el sistema y el otro para colocar un termistor para medir la temperatura. El bloque de material almacena el calor generado por la resistencia para fundir el plástico.

El extrusor también se compone de una serie de elementos que dirigen el hilo de plástico hacia el *hot end* y proporcionan la presión necesaria para extruir el plástico fundido. Así, tenemos un tornillo mecanizado o *hobbed bolt*, un tornillo M8 que presenta una muesca dentada en el cuello y se encuentra accionado por un rodamiento angular. Los dientes de la muesca del *hobbed bolt* empujan y proporcionan movimiento al hilo de plástico, que es introducido hacia la entrada del *hot end*.

Al igual que en la estructura de la impresora, las piezas del extrusor que no precisan alta resistencia térmica están impresas en plástico.

El último elemento mecánico de la impresora 3D es la cama caliente o *heated bed*. Se trata de una superficie de cristal o espejo, totalmente plana donde el extrusor va depositando el plástico extruido. Estas camas se calientan mediante una resistencia y son empleadas para mejorar la calidad de la impresión, ya que previenen el enfriamiento excesivamente rápido del material impreso, evitando así una retracción que deformaría la pieza.

- **Elementos eléctricos – electrónicos:**

- **Arduino Mega 2560:**

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada, de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores.

Arduino Mega 2560 se trata de una placa expansión del Arduino Uno tradicional basado en el microcontrolador de 16Mhz ATmega2560. Su tensión de funcionamiento es de 5v, con lo que puede ser alimentada mediante una conexión USB. a diferencia del Arduino Uno tradicional de 14 pines de entrada/salida digital éste dispone de 54 pines, de los cuales 15 pueden ser usados como PWM (Modulación de ancho de pulsos) y 16 entradas analógicas, lo cual permite tener muchas más conexiones.



Figura 9. Placa Arduino Mega 2560

En el microcontrolador de esta placa Arduino se encuentra programado el Firmware de la impresora, por decirlo de otra manera, es el cerebro de la impresora.

➤ Ramps 1.4:

Siglas de RepRap Arduino Mega Pololu Shield, se trata de la placa (o Shield) que se conecta a Arduino Mega 2560. Estos dos elementos en conjunto forman la parte principal del Hardware y controlan todas las señales de entrada y salida para lograr la impresión 3D.

En esta placa se conectan los Pololus (reciben este nombre por la empresa fabricante) o drivers encargados de controlar los motores, los finales de carrera, los PID de extrusor y cama caliente y diversos transistores que controlan otros elementos electrónicos adicionales (ventiladores, pantalla LCD, etc.).

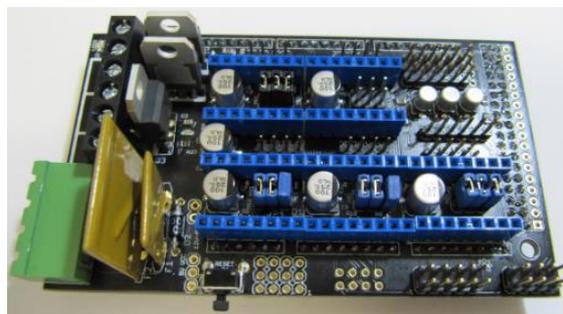


Figura 10. Placa Ramps 1.4

Podríamos decir que mientras que la placa Arduino es el cerebro de la impresora 3D, la placa Ramps es el sistema nervioso.



➤ Pololu A4988:

Pololu es el encargado de controlar, mediante el suministro de corriente, los distintos motores paso a paso bipolares de hasta 2A de corriente de salida por bobina.

El control de la corriente se realiza mediante un potenciómetro incorporado en la propia placa.

El controlador A4988 permite el control de diferentes pasos: pasos completos, medios pasos, cuartos de pasos, octavos de paso y decimosextos de paso.

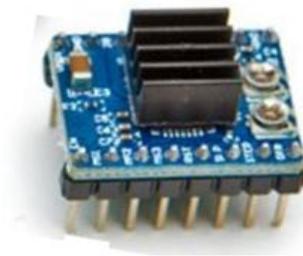


Figura 11. Driver de control de los motores paso a paso Pololu A4988.

La utilización de estos drivers es necesaria, ya que Arduino Mega 2560 por sí solo no es capaz de suministrar al motor la corriente necesaria.

➤ Motor Paso-Paso Nema 17:

El motor Nema 17 es un dispositivo electromecánico bipolar que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados, en nuestro caso 1.8° (pasos), teniendo una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.



Figura 12. Motor paso a paso Nema 17

Este tipo de motores es idóneo para el control de movimiento de los diferentes ejes de la impresora 3D.



➤ End stops - final de carrera:

Los sensores de contacto o finales de carrera son pequeños interruptores que se sitúan al final o al principio del recorrido de un elemento móvil, con el fin de enviar una señal que pueda modificar el estado de un circuito. Están colocados en los diferentes ejes marcando el límite de trabajo de la impresora.



Figura 13. Final de carrera utilizado en la Impresora 3D

➤ Termistor NTC 100k:

Sensor resistivo de temperatura, con valor máximo de lectura de 260°C. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad (en nuestro caso variación negativa - NTC), que presenta un semiconductor con la temperatura. Están colocados tanto en la cama caliente como en el *hot end* del extrusor para poder controlar la variación de temperatura a la hora de imprimir.



Figura 14. Sensor térmico – Termistor NTC 100K

➤ Resistencia calentadora de cartucho cerámico:

Las resistencias calentadoras son elementos que convierten la energía eléctrica (12v - 40w) en calor. Viene colocada en el *hot end* con la finalidad de fundir el filamento de plástico introducido por el extrusor.



Figura 15. Resistencia calentadora con cartucho cerámico



➤ Placa calefactora MK2A:

Es una placa PCB que lleva una pista de cobre de 35 μm que se calienta por efecto de su propia resistencia al paso de la corriente. Se coloca en la parte inferior de la cama caliente y se usa para calentar de manera uniforme la base de impresión.



Figura 16. Placa calefactora MK2A

➤ Fuente de alimentación:

Permite transformar la corriente alterna doméstica, en corriente continua para alimentar todos los componentes electrónicos de la impresora 3D.



Figura 17. Fuente de alimentación (12v – 20A 240w)

4.1.2. Herramientas informáticas para la impresión 3D

➤ Software Cura 14.01:

Cura es un software que proporciona un entorno de trabajo capaz de convertir en elementos físicos los archivos .STL que contienen el diseño de las piezas 3D. Este software también realiza el laminado de las piezas en capas (slicer), generando el código *G-code* (.gcode). Este código es un lenguaje mediante el cual las personas pueden decir a máquinas-herramienta controladas por ordenador, qué hacer y cómo hacerlo. Esos "qué" y "cómo" están generalmente definidos por instrucciones sobre adonde moverse, cuán rápido moverse y que trayectoria seguir. Las máquinas típicas que son controladas con G-code son fresadoras, cortadoras, tornos e impresoras 3D.



El archivo .gcode será interpretado por el resto de elementos de software programados en la impresora para realizar la serie de movimientos necesarios para imprimir una (o varias) piezas completas.

➤ Software Arduino 1.0.5:

Arduino es un entorno de código abierto que se encarga de facilitar la escritura del código y de cargarlo a las placas E/S. En nuestro caso se encargará de facilitar la escritura del código y la carga del programa del firmware Marlin.

➤ Firmware Marlin v1:

Se encarga de recibir el .gcode e interpretar las rutas de movimiento y ha de estar instalado y configurado en el microcontrolador de la impresora para un correcto funcionamiento.

4.1.3. Herramientas Software adicionales

- OrCAD 16.5: Conjunto de herramientas que se utilizan principalmente para la automatización de diseño electrónico.
- CadSoft EAGLE PCB design 6.1.0: Conjunto de herramientas disponibles para el diseño de placas de circuito impreso.
- SolidWorks 2013: Programa CAD para modelado mecánico. Modelador de sólidos paramétricos en 3D.
- GanttProject: Software gratuito empleado para realizar diagramas de Gantt.
- Microsoft Office: Conjunto de herramientas ofimáticas.

4.1.4. Herramientas y materiales utilizados en la calibración

- Llaves Allen
- Multímetro digital
- Calibre digital
- Grasa de litio
- Medidor de nivel digital



4.1.5. Materiales de impresión

➤ ABS

Acrilonitrilo Butadieno Estireno es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un termoplástico amorfo.

El rasgo más importante del ABS es su gran firmeza, incluso a baja temperatura. Además es duro y rígido; baja absorción de agua, por lo tanto buena estabilidad dimensional; alta resistencia a la abrasión; se recubre con una capa metálica con facilidad.

➤ PLA

El poliácido láctico (PLA o ácido poliláctico) es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable. Se degrada fácilmente en presencia de agua y dióxido de carbono.

4.2. Tipología de piezas

La combinación de los materiales y herramientas descritos en el apartado anterior tiene como resultado la obtención de piezas impresas en plástico de diferentes tipologías. Esta clasificación se tendrá en cuenta a la hora de estudiar una correcta solución en los ensayos realizados.

4.2.1. Piezas de calibración

Se denominan piezas de calibración a impresiones de figuras geométricas simples, las cuales tienen unas unidades dimensionales fácilmente medibles una vez impresas, tales como cilindros, cubo, pirámides etc.

Se utiliza este tipo de piezas para comprobar la correcta calibración de la impresora 3D mediante la comparación de medidas.

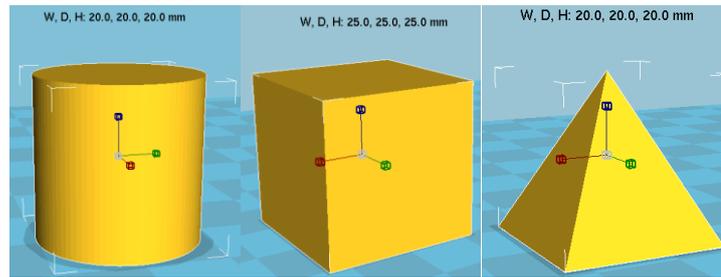


Figura 18. Diferentes piezas de calibración para la comprobación de tolerancias dimensionales

4.2.2. Piezas básicas o alineadas

Se denominan piezas básicas a todo tipo de piezas, simétricas o no, las cuales tienen una sucesión de capas iguales, constantes y alineadas generalmente, en el eje 'z' además de contener un relleno en su interior.



Figura 19. Diferentes piezas con capas iguales



4.2.3. Piezas complejas o desalineadas

Se denominan piezas Complejas a todo tipo de piezas, simétricas o no, las cuales tienen una sucesión de capas desiguales en cualquiera de los ejes además de contener un relleno en su interior.

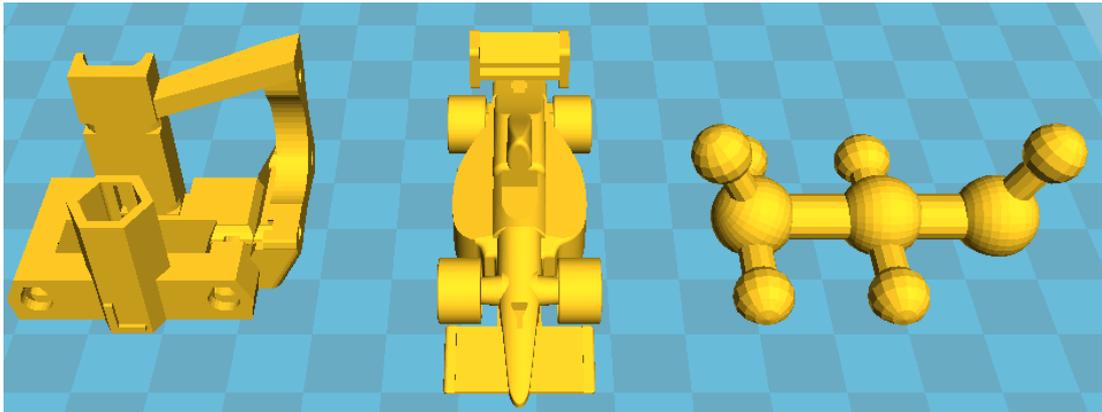


Figura 20. Diferentes piezas complejas.

4.2.4. Piezas huecas

Se denominan piezas huecas a todo tipo de piezas, simétricas o no, pero que dispongan de mínimo una abertura en alguna de sus caras y no contengan ningún tipo de relleno en su interior.

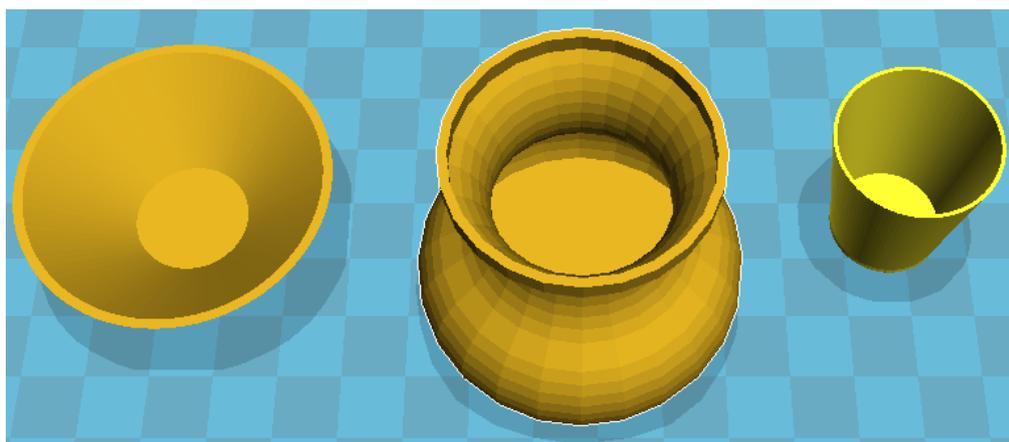


Figura 21. Diferentes piezas huecas imprimibles.



4.2.5. Piezas “imposibles”

Se denominan piezas imposibles a todo tipo de piezas, simétricas o no, que por su morfología especial presentan serias dificultades para ser producidas mediante las tecnologías convencionales (ej.: moldeo, extrusión etc.)

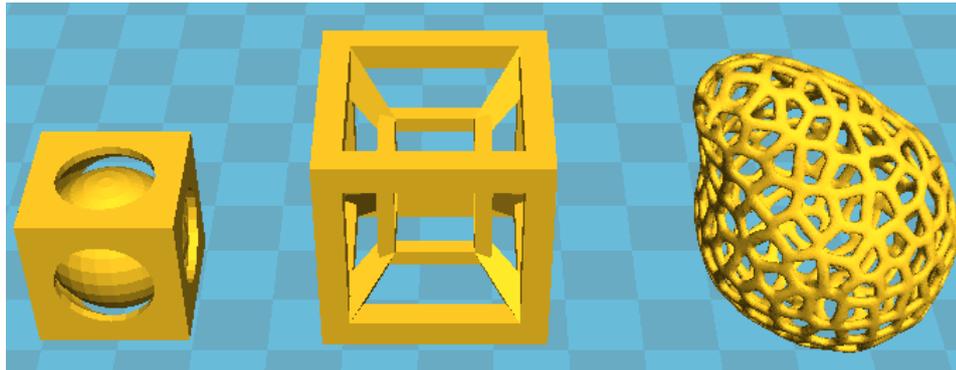


Figura 22. Diferentes piezas imposibles

4.2.6. Piezas provistas de uniones móviles

Se denominan piezas provistas de uniones móvil, a todo tipo de piezas, simétricas o no y obtenidas en una única impresión, que realizan algún tipo de movimiento al ser accionadas mecánicamente. Este tipo de piezas dispone de relleno.

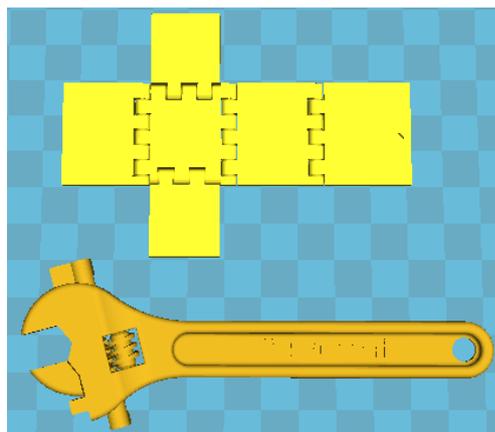


Figura 23. Diferentes piezas provistas de uniones móviles

Estos dos últimos tipos de piezas (imposibles y provistas de uniones móviles) son las que presentan el mayor interés y las perspectivas de futuro más prometedoras en el campo de la impresión 3D.



4.3. Metodología.

4.3.1. Técnica experimental.

La impresora 3D utilizada es un prototipo de máquina con una escasa bibliografía, debido al gran número de variables existente en este tipo de máquinas y al gran número de modelos y elementos para su adaptación, la técnica implementada en la experimentación es ensayo mediante prueba y error.

Ensayo mediante Prueba y Error.

El tipo de ensayo de prueba y error es un método heurístico para la obtención de conocimiento, tanto proposicional como procedural. Consiste en probar una alternativa y verificar si funciona. Si es así, se tiene una solución. En caso contrario, resultado erróneo, se realizarán más intentos variando los diferentes parámetros hasta adquirir una solución.

Este tipo de ensayo no es el más óptimo en términos de esfuerzo, ni a nivel temporal, ni a nivel material, pero es el más acertado en este tipo de maquinaria, ya que para un variable, existen infinitas soluciones, de las cuales solo un pequeño rango de ellas son las correctas o viables.

Este tipo de ensayo se enfoca a encontrar una única solución de entre todas las posibles. No se asegura el óptimo valor y ni siquiera es seguro llegar a un resultado positivo.



4.3.2. Protocolos de Ensayo.

El protocolo a seguir para la búsqueda de la configuración de los valores en el Firmware mediante el ensayo de prueba – error, consiste en primera instancia en la búsqueda de un rango de trabajo, ya que los valores introducidos en el Firmware son valores numéricos existiendo infinitas posibilidades.

Este rango de trabajo está limitado por dos extremos, siendo el valor numérico actual uno de los extremos, normalmente el valor superior.

Para la búsqueda del extremo inferior, se variará el valor superior o actual de la configuración un 50% y se procederá a realizar las siguientes tareas:

1. Se realizará una correcta calibración de todos los elementos de la impresora 3D, ya que una mala calibración puede proporcionar un falseamiento en las muestras impresas.
2. Se realizarán varias impresiones de los posibles tipos de piezas que la impresora 3D puede imprimir, ya que no se desea la especialización de la máquina a un solo tipo de pieza.
3. Se realizarán varias impresiones variando el parámetro crítico de la configuración básica del software Cura, de esta manera se obtendrá el estado de la impresión en función del valor configurado.
4. Se realizará una valoración cuantitativa con el fin de comprobar las tolerancias dimensionales de la pieza, así como una valoración cualitativa de la calidad de la pieza impresa (defectos estéticos, rugosidades, movimientos entre capas etc.)
5. Si el resultado es erróneo, pero se aprecia una mejoría, se reajustarán los parámetros del ensayo, disminuyendo aproximadamente un 25% el valor y se procederá a la repetición del protocolo.

En caso de que el resultado sea correcto se aumentara el valor de la variable aproximadamente un 25% y se repetirá el protocolo hasta el punto de ajuste óptimo.



5. PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN

5.1. Protocolo de calibración de la cama caliente o *heated bed*

Objetivo

Ajuste de horizontalidad-planitud de la cama caliente. Ajuste de la altura y perpendicularidad de la boquilla extrusora con respecto a la cama caliente.

Descripción

La cama caliente o *heated bed* es una superficie plana que sirve de base al plástico extruido. Consiste en un espejo con forma rectangular y una placa calefactora MK2 colocada en su cara inferior. El calentamiento mejora la adhesión del plástico, evitando que la pieza se levante o se mueva durante el proceso de impresión.

La distancia existente entre la boquilla extrusora (*hot end*) y el espejo de la cama caliente es una variable crítica en el proceso de impresión. Si resulta excesiva el plástico extruido puede llegar a enfriarse y solidificar antes de entrar en contacto con la cama caliente o la pieza que se está imprimiendo, resultando en pérdida de calidad y fallos de impresión.

De igual modo, la horizontalidad – planitud de la cama caliente es una variable importante, ya que condiciona que la distancia entre la boquilla extrusora y el espejo de la cama caliente sea la misma en todos los puntos del plano ‘xy’.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. Cama caliente o *heated bed*
2. Boquilla extrusora o *hot end*: *J Head* [Entrada: 3 mm / Salida: 0,4 mm]
3. Software: Cura 14.01 – Firmware: Marlin v1
4. Plástico: ABS y PLA
5. Nivel de burbuja

Variables

Horizontalidad – planitud de la cama caliente.

Altura y perpendicularidad de la boquilla extrusora con respecto a la cama caliente.



Estas variables se regulan mediante la fuerza ejercida por los muelles insertados en el interior de los 4 tornillos tensores que unen la cama caliente con el eje 'y' (ver Figura 24).

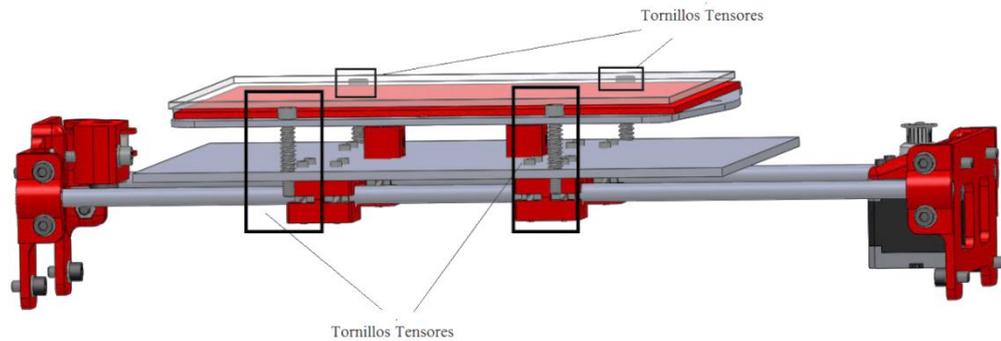


Figura 24. Cama caliente. Detalle de la unión al eje 'y' mediante los tornillos tensores ajustables.

Calibración

El primer paso es comprobar que el carro que sostiene al extrusor en el eje 'x' se encuentre totalmente horizontal. Es decir, que ninguno de los lados tenga mayor altura, existiendo un ángulo de 90° en ambos extremos entre el eje 'x' y el eje 'z' (ver Figura 25).

Esta medición se realizará con un nivel de burbuja, o en su defecto un medidor digital de nivel.

Si se precisa orientar el eje 'x', se desconectará la alimentación y se girarán las varillas roscadas del eje 'z' hasta obtener un ángulo de 180° .

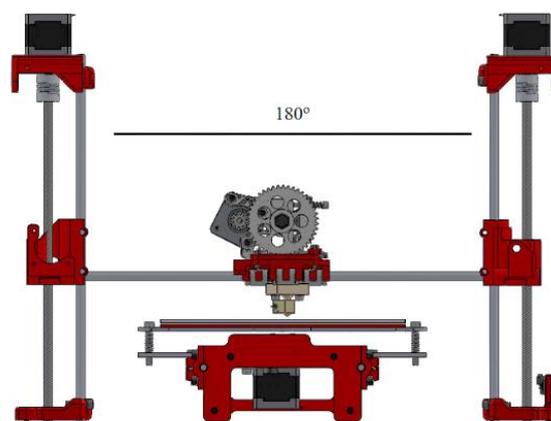


Figura 25. Perpendicularidad entre ejes



La boquilla extrusora o *hot end* estará situada de forma que el plástico sea extruido de forma perpendicular a la superficie de la cama caliente, tocando pero no presionando (ver Figura 26).

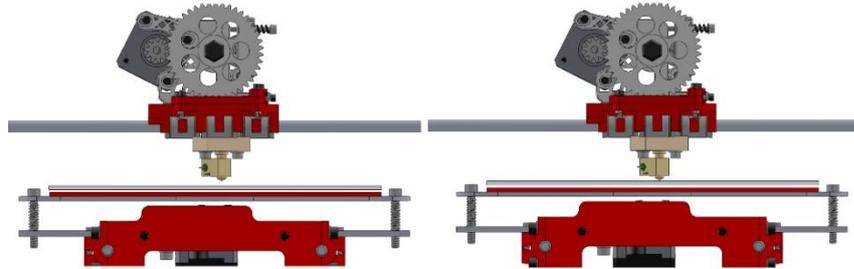


Figura 26. Izq.: Distancia incorrecta entre *hot end* y *heated bed*. Dcha.: Distancia correcta.

El siguiente paso es conseguir que la boquilla quede a la misma distancia en toda la superficie del espejo. Para ello desplazaremos el extrusor a lo largo de los ejes ‘x’ e ‘y’, manteniendo la posición en el eje ‘z’ constante, utilizando el software Cura en su modo manual (ver Figura 27).

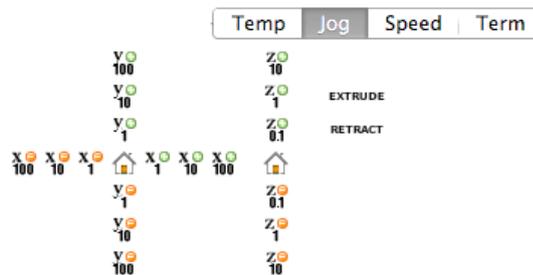


Figura 27. Menú modo manual Software Cura

Al realizar cualquier movimiento en el plano ‘xy’, la boquilla del extrusor debe quedar a una distancia aproximada de 0,1 mm de la cama caliente. Si esto no ocurriera, se procederá al ajuste fino mediante los 4 tornillos tensores.

Una forma de comprobar empíricamente la altura entre la cabeza del extrusor y el espejo de la cama caliente es introducir una hoja de papel entre ellos. El ajuste será correcto si existe un pequeño rozamiento entre el papel y la punta del extrusor, no existiendo ningún impedimento al deslizamiento del papel entre los dos elementos.

Pequeñas desviaciones en la altura de los cuatro vértices de la cama caliente son hasta cierto punto tolerables. El punto crítico se encuentra en el centro de la cama, ya que la mayoría de piezas se imprimirán en esta zona.



5.2. Protocolo de calibración PID

Objetivo

Control de la temperatura en la boquilla extrusora y en la cama caliente mediante el auto calibrado (*autotune*) de un controlador PID.

Descripción

Un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por retroalimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, aplicando una acción correctora que ajuste el sistema.

El algoritmo de cálculo del controlador PID se obtiene con respecto a tres variables:

- Una variable proporcional que determina la reacción del error actual.
- Una variable integral que genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero.
- Por último, una variable derivativa que determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

Durante el proceso de impresión, es necesario controlar la temperatura tanto de la boquilla extrusora como de la cama caliente, ya que si se produce una variación brusca de temperatura ($\pm 5^{\circ}\text{C}$), la impresión puede fallar por varios motivos (levantamiento de la pieza impresa en la cama caliente, fusión del plástico a temperaturas elevadas provocando burbujas de aire, etc.).

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

6. Cama caliente o *heated bed*
7. Boquilla extrusora o *hot end: J Head* [Entrada: 3 mm / Salida: 0,4 mm]
8. Software: Cura 14.01 – Firmware: Marlin v1
9. Plástico: ABS

Variables

Las constantes de control a obtener para el PID son 3: constante de proporcionalidad (K_p), constante de integración (K_i) y constante de derivación (K_d).



Estas variables se obtendrán tanto para el control de la boquilla extrusora como para la cama caliente, ya que cada elemento requiere de su propia calibración de temperatura.

Calibración

En primer lugar, para poder comenzar el proceso, es muy importante que tanto la boquilla extrusora como la cama caliente se encuentren a temperatura ambiente.

Los parámetros de calibración del PID se obtienen mediante la realización de un *'autotune'*. En la calibración se usará el G-Code

[M303 E-x S<temperatura> C<nº de ciclos>].

Donde:

- E-x: Sustituiremos el valor de 'x' con un '0' ó '1', siendo: 0 la boquilla extrusora y 1 la cama caliente.
- S<temperatura>: Introduciremos el valor de la temperatura máxima a calibrar.
- C<nº de ciclos>: Introduciremos el número de ciclos de aproximación a la temperatura.

Estos G-codes los introduciremos en el terminal de comandos del software Cura. (ver Figura 28)



Figura 28. Terminal de comandos del Software Cura.

Para la boquilla extrusora: [M303 E-0 S240 C8].

Para la cama caliente: [M303 E-1 S70 C8].



Una vez introducido el comando se observa un mensaje (*PID Autotune start*) y cómo los valores de temperatura van aumentando a medida que el proceso va corriendo.

Terminada la calibración, se obtendrán tres valores numéricos (K_p , K_i y K_d), el valor máximo y mínimo de oscilación de la temperatura y un mensaje (*PID Autotune finished! Put the K_p , K_i and K_d constants into Configuration.h*).

Resultados

Los valores obtenidos en el *autotune* realizado desde temperatura ambiente (18°C) y plástico ABS son:

Tabla 1. Valores obtenidos en el *autotune* del controlador PID. T inicial 18°C; plástico ABS.

	<i>Hot end</i>	<i>Heated bed</i>
G-Code	[M303 E-0 S240 C8]	[M303 E-1 S70 C8]
Rango T	min: 238.81 max: 241.58	min: 69.95 max: 70.09
K_p	22,76	1309,53
K_i	1,58	252,93
K_d	82,05	1695,03

Obtenidas las constantes de calibración del PID, abriremos el firmware de la controladora Marlin e iremos a la sección *Configuration.h*.



Figura 29. Pestaña *Configuration.h* del Firmware Marlin

Buscamos las líneas de código correspondientes e introducimos los valores obtenidos. Para la boquilla extrusora:

```
#define DEFAULT_Kp 22.76  
#define DEFAULT_Kp 1.58  
#define DEFAULT_Kp 82.05
```

Para la cama caliente:

```
#define DEFAULT_bedKp 1309.53  
#define DEFAULT_bedKp 252.93  
#define DEFAULT_bedKp 1695.03
```



En la gráfica de la Figura 30 se muestra el registro de temperaturas una vez realizada la calibración del PID. Se observa que la boquilla extrusora adquiere la temperatura configurada en un periodo de tiempo relativamente corto ($< 1,5$ min). Sin embargo, el tiempo que requiere la cama caliente para alcanzar la temperatura prefijada es mucho mayor (> 10 min). Esto es debido a la forma en que se aporta el calor (resistencia cerámica en la boquilla extrusora frente a placa calefactora de cobre de $35 \mu\text{m}$ en la cama caliente), al distinto tamaño y material de los elementos a calentar y, sobre todo, a las pérdidas térmicas que se producen en la cama caliente.

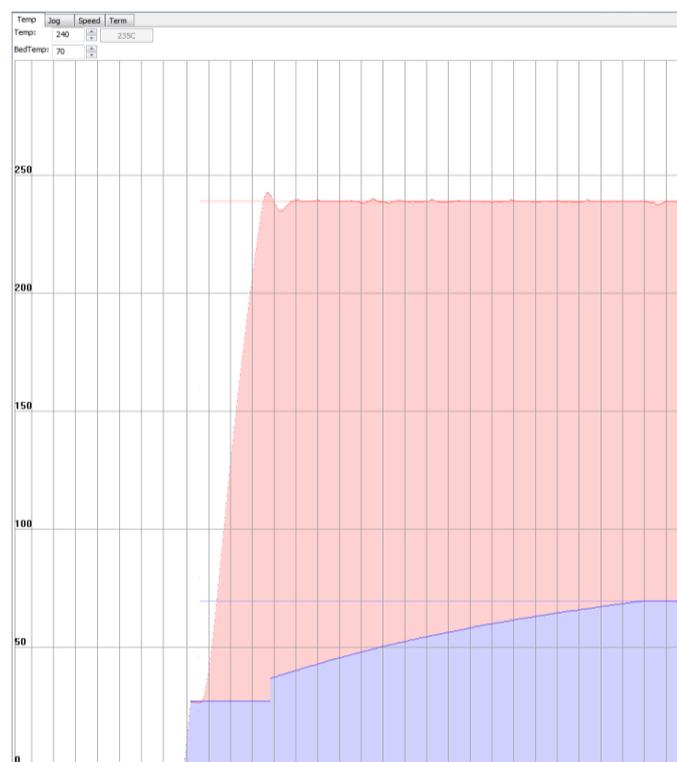


Figura 30. Registro de temperaturas durante la impresión. Mallado escalado a 30 segundos.
Rojo: T boquilla extrusora (valor de consigna $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$); violeta: T cama caliente (valor de consigna $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Una vez la boquilla extrusora y la cama caliente han alcanzado los respectivos valores de consigna, la temperatura medida en ambos elementos se mantiene estable en el tiempo. Por tanto, el calibrado del PID mediante *autotune* se da por bueno.

La calibración deberá repetirse de forma análoga para la impresión con plástico PLA, ya que los valores de consigna son totalmente diferentes.



Los valores obtenidos en el *autotune* realizado desde temperatura ambiente (18°C) y plástico PLA son:

Tabla 2. Valores obtenidos en el *autotune* del controlador PID. T inicial 18°C; plástico PLA.

<i>Hot end</i>	
G-Code	[M303 E-0 S190 C8]
Rango T	min: 189.32 max: 190.93
Kp	18,32
Ki	3,45
Kd	57,33

El control PID de temperatura de la cama caliente no es necesario repetirlo, ya que las constantes calculadas anteriormente pueden servir perfectamente, debido a la baja temperatura necesaria para la adhesión del plástico PLA con la cama caliente.

Las constantes calculadas en la realización del *autotune* para el plástico PLA, al igual que en la explicación del plástico ABS, deberán de introducirse en el Firmware de la controladora Marlin.



5.3. Protocolo de calibración motor paso - paso

Objetivo

Obtener la relación entre los pasos del motor y el movimiento longitudinal en cualquiera de los ejes ('x', 'y', 'z').

Descripción

Los motores instalados en la impresora 3D son motores Nema 17 paso a paso bipolares con desplazamientos angulares de 1.8° (pasos), requiriendo de 200 desplazamientos para realizar una vuelta completa (360°).

Estos motores Nema 17 sirven para el posicionamiento preciso y repetitivo de los diferentes ejes de la impresora, convirtiendo mediante engranajes y rodamientos un movimiento angular en lineal (eje 'x', eje 'y', extrusor). Por su parte, el posicionamiento en el eje 'z' se realiza mediante el movimiento de una varilla roscada sujeta al eje del motor y una tuerca que convierte el movimiento angular en lineal.

El prototipo de impresora BCN – 3D consta de 5 motores paso a paso, un motor para cada uno de los ejes 'x' e 'y', un motor para el extrusor y 2 motores para el eje 'z'.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. Motores paso – paso Nema 17
2. Ramps 1.4 - Arduino Mega 2560
3. Software Cura 14.01 – Firmware Marlin v1
4. A4988 G3D stepper driver
5. Calibre digital

Variables

Las variables a obtener son el número de pasos a introducir en el Firmware para cada uno de los diferentes motores que controlan los ejes, 'x', 'y', 'z', en relación a un desplazamiento longitudinal predeterminado.

En el caso del motor que controla la entrada de plástico al extrusor, el número de pasos se relaciona con el desplazamiento del hilo.



Calibración

Antes de comenzar el procedimiento de calibración, es necesario comprobar la ortogonalidad de los ejes y que todas las guías se encuentran correctamente alineadas y paralelas entre sí. También es importante asegurar la horizontalidad – planitud de la cama caliente (ver apartado 5.1.).

Una vez comprobados y ajustados todos los ejes, abriremos el firmware de la controladora, Marlin v1 e iremos a la sección Configuration.h (ver Figura 31).



Figura 31. Pestaña Configuration.h del Firmware Marlin

Buscamos la siguiente línea de código.

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {78.7402, 78.7402, 1340, 782}
```

Encontramos 4 valores numéricos separados por comas, correspondientes al número de pasos por defecto del motor o motores que controlan al eje ‘x’, al eje ‘y’, al eje ‘z’ y a la entrada de hilo de plástico al extrusor, respectivamente. Este valor numérico por defecto se corresponde con un desplazamiento ideal de 100 mm en los ejes ‘x’ e ‘y’, de 10 mm en el eje ‘z’ y de 2 mm de hilo en el caso del motor del extrusor.

Si abrimos el control manual del software Cura podemos observar estos valores de desplazamiento en los diferentes botones para cada uno de los ejes (Figura 32).

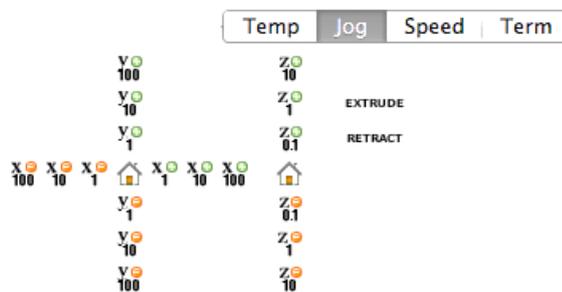


Figura 32. Menú modo manual software Cura

Mediante los botones del control manual de Cura, introducimos un desplazamiento longitudinal ideal de 100 mm en cualquiera de los ejes, ‘x’, ‘y’, o ‘z’. Para el movimiento de 100 mm en el eje ‘z’, se requieren 10 pulsaciones de 10mm.



Una vez realizado el movimiento, se mide la distancia real recorrida con el calibre digital. Teniendo en cuenta el número de pasos por defecto ($n_{default}$) y la relación entre las distancias ideal (d_{ideal}) y real (d_{real}), obtendremos el número de pasos reales (n_{real}) a introducir en el Firmware para el desplazamiento requerido (Ec. 1).

$$n_{real} = \frac{d_{ideal}}{d_{real}} \cdot n_{default} \quad (1)$$

Por ejemplo, para el desplazamiento ideal de 100 mm en el eje 'x' se ha obtenido una distancia real de 85,04 mm. Introduciendo estos valores en la Ec. 1 obtenemos un valor $n_{real} = 92,5919$ pasos. Este nuevo valor se introduce en la línea de código sustituyendo al correspondiente valor antiguo y se transfiere a la controladora. A continuación se itera el procedimiento descrito hasta adquirir el valor de desplazamiento correcto según las tolerancias establecidas.

Este proceso se realiza para todos los ejes. Cabe destacar que el número de pasos obtenido para el eje 'x' suele ser igual al número de pasos del motor del eje 'y', ya que los elementos y las distancias son idénticas.

La calibración de los pasos del motor del extrusor se realiza de forma similar, salvo que en este caso la longitud a medir es la del hilo de plástico en la entrada. Para realizar la medición, se marca el hilo antes y después de proceder al movimiento del extrusor. Esta marca ha de situarse justo en la entrada de la cámara de fundición del extrusor.

En el control manual del software Cura, cada pulsación del botón Extrude (ver Figura 32) proporciona un movimiento de 2 mm al hilo de plástico. Para una correcta calibración son necesarios desplazamientos grandes que resulten fácilmente medibles, por lo que este botón resulta poco práctico.

La calibración se realizará por tanto mediante una serie de comandos que simplifican el proceso, ya que se introducen una sola vez y no requieren de la pulsación de ningún botón un número determinado de veces. Esta serie de comandos se introducirán en el terminal del software Cura (ver Figura 33).

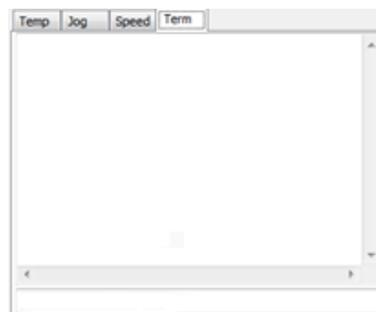


Figura 33. Terminal de comandos del Software Cura



Las series de comandos descritas se recogen en la Tabla X. Como se observa, también son válidos para desplazamientos en los ejes 'x', 'y', 'z'.

Tabla 3. Comandos

Comando	Descripción
G1 X<n>	Introducir en <n> los mm a desplazar Según el signo el desplazamiento variará (Izquierda - Derecha)
G1 Y<n>	Introducir en <n> los mm a desplazar Según el signo el desplazamiento variará (Delante - Detrás)
G1 Z<n>	Introducir en <n> los mm a desplazar Según el signo el desplazamiento variará (Arriba - Abajo)
G1 E<n>	Introducir en <n> los mm a desplazar Según el signo el desplazamiento variará (Extrusión - Retracción)

Análogamente al procedimiento de calibración de los ejes 'x', 'y', 'z', el valor de desplazamiento real obtenido se introduce en la Ecuación 1 para obtener el número real de pasos. Este valor se introduce en el Firmware y se itera el procedimiento tantas veces como sea necesario, hasta adquirir el valor correcto.

Resultados

Los valores obtenidos en las calibraciones realizadas para los diferentes motores se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores obtenidos para los diferentes motores asociados a los ejes de la impresora.

Ejes	Nº de pasos
Eje 'x'	80,04
Eje 'y'	80,04
Eje 'z'	2560
Extrusor	657

Que introducidos en la línea de código de Marlin v1 quedan:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80.04, 80.04, 2560, 657}
```

Como se observa en la Tabla 4, los ejes 'x' e 'y', tienen el mismo número de pasos, ya que como se ha comentado anteriormente la transmisión de movimiento de estos ejes, se realiza del mismo modo y con los mismos elementos, motor, correa, pulea con el mismo número de dientes etc.



En ocasiones se observa que una vez realizada la calibración de los motores las piezas redondas quedan impresas con forma elíptica. Esto se debe a:

1. La calibración del eje 'x' o en su defecto del eje 'y' no es la adecuada.
2. La correa de alguno de los ejes se encuentra destensada.

Por otro lado, una vez realizada la calibración de los motores es recomendable realizar la impresión de piezas de calibración, por ejemplo cubos y elementos redondos o cilíndricos (ver Figura 34). De esta manera se obtiene el error de impresión y se puede comprobar el éxito de la calibración.

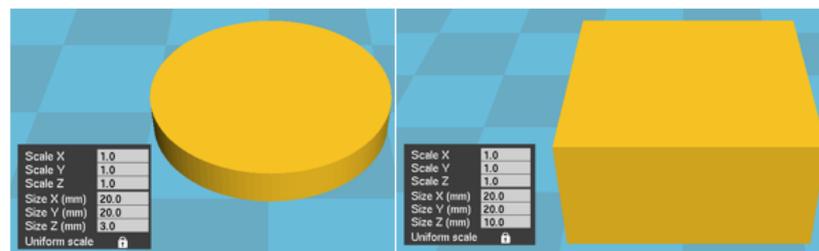


Figura 34. Piezas de calibración.

Las medidas de las piezas impresas se recogen en la Tabla 5. Como vemos, en ningún caso se sobrepasa el $\pm 0,5$ % de error de impresión, valor que entra dentro de las tolerancias establecidas. También vemos que, en el caso de la pieza cilíndrica, las dimensiones Size 'X' y Size 'Y' son idénticas, por lo que no hay elipticidad.

Con estos resultados podemos dar por bueno el calibrado de los motores paso – paso.

Tabla 5. Medidas obtenidas en las piezas de calibración impresas. Error de impresión (%).

Figura	Dimensiones (mm)								
	Size 'X'			Size 'Y'			Size 'Z'		
	ideal	real	error (%)	ideal	real	error (%)	ideal	real	error (%)
Cilindro	20,00	19,94	0,30%	20,00	19,94	0,30%	3,00	3,01	-0,33%
Cubo	20,00	19,97	0,15%	20,00	19,96	0,20%	10,00	9,99	0,10%



5.4. Protocolo de calibración driver motor

Objetivo

Ajuste de la intensidad de corriente de los drivers de control de los motores paso a paso Nema 17.

Descripción

La impresora 3D BCN – 3D lleva instalados una serie de controladores A4988 G3D stepper. Este driver está diseñado para un control mediante ajuste fino de los motores paso a paso (potenciómetro *Ref*). Adicionalmente, un segundo potenciómetro (potenciómetro *Osc*) proporciona un mejor control evitando en cierta manera las vibraciones y la pérdida de pasos del motor.

A diferencia de otros controladores disponibles en el mercado, A4988 G3D stepper puede llegar a trabajar a intensidades de corriente de hasta 2A, ya que contiene 2oz de cobre en su PCB que permiten disipar el calor de forma más eficiente.

Nota: Se necesita un disipador y refrigeración de aire adicional para el funcionamiento a más de 1A.

La impresora BCN – 3D consta de 5 motores paso a paso, un motor para cada uno de los ejes 'x' e 'y', un motor para el extrusor y 2 motores para el eje 'z'. Estos últimos, se encuentran conectados en paralelo, por lo que requieren un único driver de control trabajando al doble de intensidad de corriente. Cabe destacar que si se le añade a esta configuración un segundo extrusor este requerirá de un motor y de un driver adicional. (Ver Figura 35)

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. Motores paso a paso Nema 17
2. Ramps 1.4 - Arduino Mega 2560
3. A4988 G3D stepper driver
4. Multímetro

Variables

Potencia entregada a cada motor paso a paso, ajustable mediante los 2 potenciómetros o trimpots que se encuentran en los respectivos controladores.



Calibración

La corriente óptima a proporcionar a cada uno de los motores mediante el driver, depende de ciertas variables tales como lubricación/rozamiento, elementos móviles instalados, motores etc. Los valores típicos aproximados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores típicos aproximados de intensidad de corriente para los diferentes motores paso a paso.

Motor	Corriente nominal (mA)
Eje 'x'	250
Eje 'y'	250
Eje 'z'	500
Extrusor	350

Como ya se ha comentado anteriormente, el Eje 'z' requiere de una intensidad de corriente mayor por tener conectado en paralelo dos motores a un único controlador o Driver.

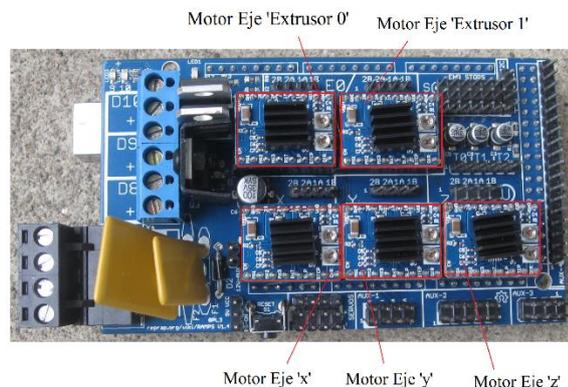


Figura 35. Disposición Drivers

A continuación vamos a cubrir los pasos necesarios para ajustar correctamente el controlador A4988 G3D stepper [13]. Como se ha comentado anteriormente nuestro controlador dispone de dos potenciómetros o trimpots (*Ref* y *Osc*) (ver Figura 36).

- El potenciómetro *Osc*, se encarga de proporcionar una corriente constante a los motores, evitando el comportamiento errático e impidiendo así la pérdida de pasos.
- El potenciómetro *Ref*, nos proporcionara el valor de corriente que alimentará a los motores mediante el giro horario del potenciómetro.

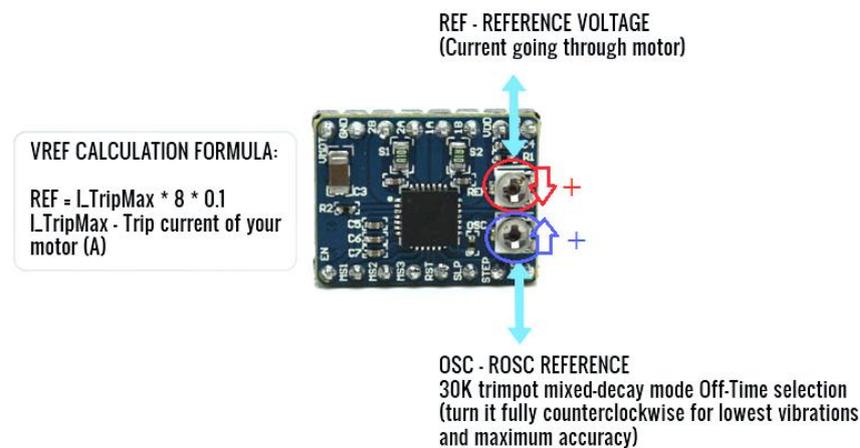


Figura 36. Detalle del Driver con los dos potenciómetros y las instrucciones de calibración.

El ajuste de estos potenciómetros es el siguiente:

Para evitar el comportamiento errático del motor con la consiguiente pérdida de pasos, se girará en sentido antihorario el potenciómetro *Osc*. Si no se requiere este ajuste, el driver trabajará con el seleccionado automático (valor introducido en fábrica) reduciendo las corrientes de rizado.

El ajuste de corriente se realizará con el potenciómetro *Ref* y un multímetro conectado para la lectura de tensión continua en rango de 2v. Se medirá la caída de tensión entre el potenciómetro y masa. Mediante una fórmula de cálculo proporcionada por el fabricante (Ecuación 2), obtendremos la corriente que se está suministrando a cada motor.

$$V_{ref} = I_{TripMax} \cdot 8 \cdot 0,1 \quad (2)$$

Siendo:

V_{ref} : El valor medido con un voltímetro entre la parte superior metálica del potenciómetro y masa.

$I_{TripMax}$: Corriente de pico en uno de los devanados del motor. Hay que tener en cuenta que la corriente nominal que figura en el motor Nema 17 es en ambas bobinas. El pico de corriente a través de ambos devanados (simultáneamente), equivale aproximadamente al 70% de $I_{TripMax}$. (Datasheet A4988 G3D stepper Driver.)



Por tanto, para un valor de pico de 250 mA, el valor de I_{TripMax} será aproximadamente de:

$$I_{\text{TripMax}} = 250\text{mA} \cdot 1,7 = 425 \text{ mA}$$

Para un valor nominal de 250 mA, el valor de I_{TripMax} será mayor a 425 mA.

Estos valores no son exactos y sirven de referencia a la hora de calibrar, facilitando llegar al rango de trabajo de los diferentes motores.

Para realizar el giro del potenciómetro se requerirá de un destornillador con punta de cerámica, ya que si utilizamos un destornillador normal introduciremos interferencias y obtendremos una lectura errática y falseada en el voltímetro.

La conexión al voltímetro es simple, se conectará la punta de color negro (com) a alguno de los dos pines GND mientras que la punta de color rojo (v/ Ω) se conectara al propio potenciómetro metálico. Esta conexión se realizará para mediciones en continua de tensión en rango aproximado de 2v.

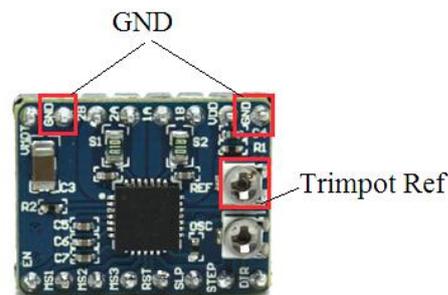


Figura 37. Detalle del conexionado del Driver

A la hora de realizar el ajuste de corriente es posible que se den dos posibles situaciones.

- Si el valor del potenciómetro *Ref* es demasiado alto entonces el controlador o driver del motor tiende a sobrecalentarse y realizar un apagado térmico por exceso de temperatura (para evitar daños en sus componentes).

El primer signo de sobrecalentamiento es el comportamiento del motor paso a paso de manera errática. Típicamente, esto puede ser reconocido por los sonidos del motor paso a paso debido a pérdidas repentinas de potencia.



- Por el contrario, si el valor es demasiado bajo, el motor paso a paso puede entrar en un estado de baja potencia. Esto puede ser reconocido por una falta de par de retención, ya que el motor pierde pasos debido a una demanda de energía mayor en el movimiento.

Existe un segundo método de calibración más sencillo, consistente en el giro controlado del potenciómetro, comprobando a la vez que la corriente suministrada a los motores es la suficiente para producir un correcto desplazamiento por los ejes.

Este método de calibración es de tipo prueba y error, por lo que exige mayor cuidado en la regulación del potenciómetro. Una excesiva entrega de potencia puede llegar a quemar el driver de control.

Resultados

Los resultados medidos por el voltímetro en los diferentes drivers de control de los motores paso a paso, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores obtenidos aproximados de corriente

Motor	V_{ref} (v)	$I_{TripMax}$ (mA)
Eje 'x'	0,485	610
Eje 'y'	0,539	680
Eje 'z'	0,658	820
Extrusor	0,561	700

Como ya se ha comentado, estos valores dependen de ciertas variables tales como lubricación/rozamiento, elementos móviles instalados, motores etc. Por este motivo se consideran orientativos, pudiendo servir de referencia para posteriores calibraciones.



5.5. Protocolo de calibración del posicionamiento de los ejes

Objetivo

Ajuste del posicionamiento del *home* o punto de referencia de los ejes en Firmware con respecto al Software.

Descripción

Las impresoras 3D utilizan un punto de referencia o punto *home* para realizar la alineación del extrusor con la cama caliente. Este punto de referencia es el punto correspondiente a las coordenadas $(x, y, z ; 0, 0, 0)$ en los tres ejes. Generalmente este punto *home* se encuentra físicamente situado en uno de los vértices de la cama caliente, ya que se relaciona con el posicionamiento de los tres finales de carrera situados cada uno de ellos en su eje.

En el montaje del prototipo de la impresora BCN – 3D de la UBU, los finales de carrera de los tres ejes x, y, z se encuentran montados en el lado contrario al que indica el manual de montaje original, por lo que se modifica el punto de referencia o *home* de inicio de la impresión. (Figura 38).

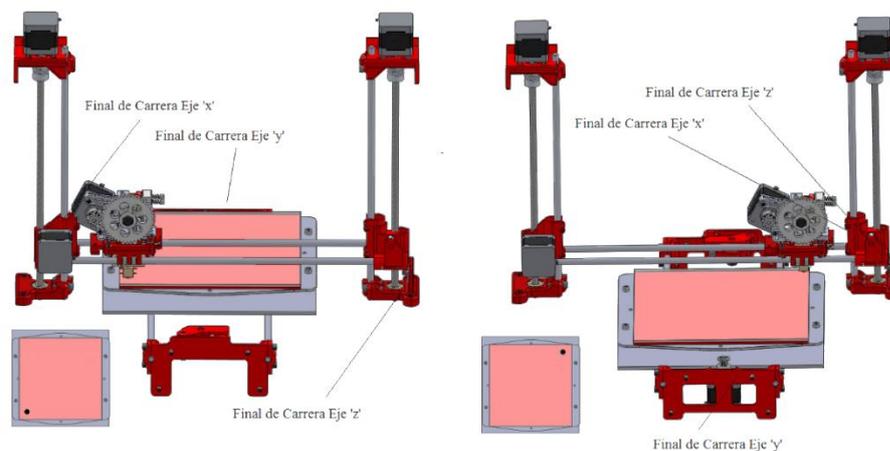


Figura 38. Izq.: Posicionamiento del punto *home* según manual de montaje de la impresora BCN – 3D.
Dcha.: Posicionamiento del punto *home* en el prototipo de impresora BCN – 3D de la UBU.

La localización real del punto *home* no tiene demasiada importancia, siempre y cuando el software de impresión tenga configurado el posicionamiento exacto de los ejes para situarse en este punto. Esto se consigue mediante la debida configuración del firmware.



En el caso del prototipo de impresora BCN – 3D de la UBU, las primeras impresiones de piezas se realizaron con una configuración del punto *home* errónea (ver Figura 39). El resultado era que se producía un volteo o efecto espejo en las piezas impresas dando error al posicionamiento de la referencia o *home*.

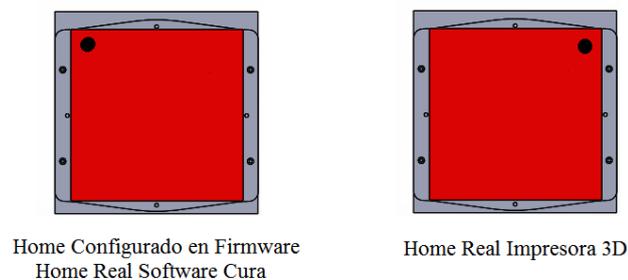


Figura 39. Diferencia del posicionamiento del punto *home* entre el Firmware y el Software Cura 14.01.

Como se observa en la Fig. 39, la configuración errónea producía un efecto espejo en el eje ‘x’ con respecto al eje ‘y’. El error de configuración corresponde al eje ‘x’, el cual está invertido. La solución a este problema recae en la modificación de los parámetros de configuración del firmware.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. Cama caliente o *heated bed*
2. Boquilla extrusora o *hot end: J Head* [Entrada: 3 mm / Salida: 0,4 mm]
3. Software: controladora de Arduino Marlin v1
4. Motores paso a paso Nema 17
5. Sensores final de carrera
6. Ramps 1.4

Variables

Las variables utilizadas en esta calibración corresponden a la dirección, rotación y localización de los elementos que afectan al posicionamiento de los ejes. Estos son: motores paso a paso y finales de carrera.

Para cada uno de estos elementos, las variables en estudio se encuentran configuradas en el firmware Marlin v1.



Calibración

Las diferencias de interpretación de la localización del punto *home* entre manual de montaje y firmware, así como la localización real, se detallan en la Figura 40.

En la Fig. 40 (izqda.) se muestra la configuración de los ejes 'x' e 'y' que recoge el manual de montaje de la propia impresora [14] y para los que estaba configurado el firmware. Se observa que el signo del desplazamiento está definido para que el posicionamiento del extrusor en el punto *home* se equipare al origen de coordenadas cartesianas en el primer cuadrante matemático.

Sin embargo, la interpretación que obtiene el firmware así configurado de la situación de los elementos de nuestra impresora es la que aparece en la Fig. 40 (dcha.). La interpretación de la localización del punto *home* y del final de carrera del eje 'x' no coincide con la situación real. Para llegar desde el punto *home* real hasta el final de carrera del eje 'x' el desplazamiento es en sentido negativo, lo que nos remite al segundo cuadrante matemático. Como el firmware está configurado para trabajar en el primer cuadrante, se introduce un componente especular en el eje 'x'.

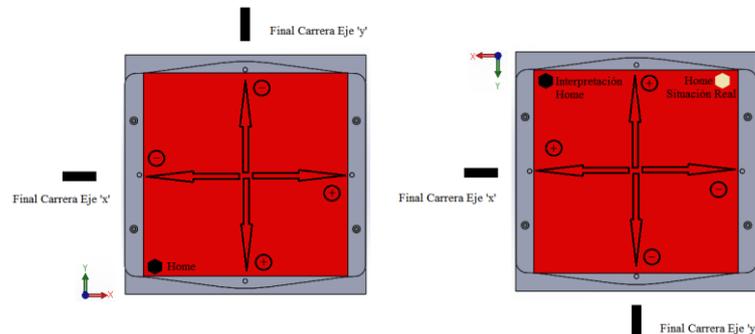


Figura 40. Izqda.: Situación del punto *home* según el manual de montaje de la impresora BCN – 3D.
Dcha.: Interpretación de la localización del punto *home* según la configuración original del firmware.
Comparativa con la situación real del punto *home*.

Es necesario por tanto reajustar la configuración [15] y que el punto *home* real coincida con el interpretado por el firmware, invirtiendo el sentido de rotación del motor 'x' y el sentido del desplazamiento para llegar al final de carrera. Para ello hemos de modificar el firmware para el eje 'x'. Abriremos la sección Configuration.h dentro de la controladora de Arduino – Marlin v1 (Figura 40).



Figura 41. Pestaña Configuration.h de la controladora de Arduino Marlin v1.



Dentro de este apartado, buscaremos las líneas de código correspondientes a la dirección de rotación de los motores. Se indica mediante true o false el sentido de giro.

```
#define INVERT_X_DIR true  
#define INVERT_Y_DIR false  
#define INVERT_Z_DIR true  
#define INVERT_E0_DIR true
```

En nuestro caso daremos el valor de true al eje 'x', para realizar la inversión, ya que el software interpretaba una situación inversa del sentido de giro del motor y de la situación del final de carrera 'x', debido al montaje inverso de la impresora.

Por otro lado, también es necesario configurar el sentido en el que han de moverse los ejes para encontrar el final de carrera. Las líneas de código correspondientes también se encuentran en Configuration.h

```
#define X_HOME_DIR -1  
#define Y_HOME_DIR -1  
#define Z_HOME_DIR -1
```

En este caso introduciremos el valor de '-1' en el eje 'x', que indica un valor de dirección hacia el mínimo, de más a menos (de +190 mm a 0 mm).

Al realizar el cambio en el sentido de desplazamiento para llegar al final de carrera es también necesario modificar la conexión eléctrica de ese final de carrera, ya que la interfaz Ramps 1.4 posee tanto entradas positivas como negativas. Como se muestra en la Fig. 42, los conectores han de estar posicionados en los pines impares, correspondientes a la conexión negativa configurada en el Firmware anteriormente.

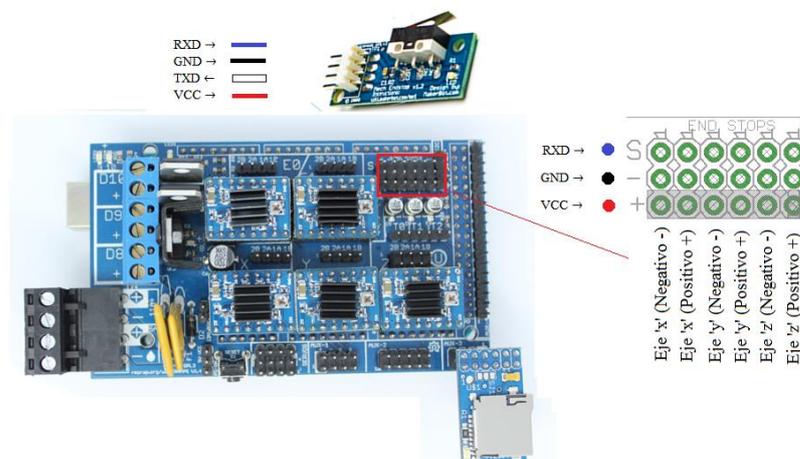


Figura 42. Conexión de los finales de carrera en la placa Ramps 1.4.



Resultados

Realizando los cambios mencionados en el apartado anterior, (inversión del sentido de giro del motor del eje 'x', inversión del sentido de movimiento para llegar al final de carrera y cambio del conexionado del sensor final de carrera en la placa Ramps), se obtiene la coincidencia de la interpretación del firmware para la localización del punto *home* con su situación real (Figura 43).

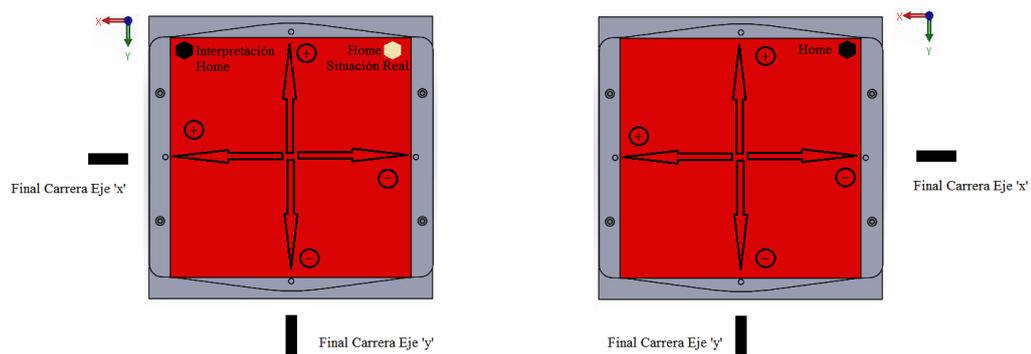


Figura 43. . Izqda.: Interpretación de la localización del punto *home* según la configuración original del firmware. Comparativa con la situación real del punto *home*. **Dcha.:** Configuración correcta. La localización del punto *home* según el firmware coincide con la situación real en el prototipo BCN – 3D de la UBU.

Mediante esta calibración se produce el reajuste del punto *home* a la orientación relativa al primer cuadrante matemático o plano positivo.



5.6. Protocolo de calibración/comprobación de la placa Arduino Mega 2560

Objetivo

Comprobación de las entradas/salidas digitales de la placa Arduino Mega 2560, las entradas analógicas y las salidas de PWM.

Descripción

La placa Arduino Mega 2560, se encarga del controlar la electrónica de la impresora 3D, mediante un microcontrolador basado en ATmega1280. Posee 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTs, un cristal oscilador de 16 MHz y conexión USB.

Arduino Mega 2560 contiene todos los elementos necesarios para el funcionamiento del microcontrolador. Únicamente necesita de alimentación mediante conexión a un transformador de corriente o a un ordenador por conexión USB.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. Arduino Mega 2560
2. PC con conexión USB – cable de conexión USB
3. Software: controladora de Arduino Marlin v1
4. Elementos electrónicos
 - a. LEDs + Resistencias 270Ω
 - b. Pulsador
 - c. Potenciómetro

Variables

El funcionamiento de las entradas digitales se comprobará mediante el cambio de estado lógico de 1 a 0. Este cambio se realizará mediante un pulsador y se visualizará en la pantalla del PC.

El funcionamiento de las salidas digitales y de las salidas de PWM se comprobará visualmente mediante el encendido de LEDs (protegidos por resistencias de 270Ω).



El funcionamiento de las entradas analógicas se realizará mediante el conexionado de un potenciómetro. La lectura analógica se observará en la pantalla del PC.

Calibración/Comprobación

En la Fig. 44 se muestra un detalle de la placa Arduino Mega 2560 con todos sus elementos. Para comprobar el correcto funcionamiento de los pines de entrada/salida, se realizará el conexionado eléctrico que se muestra en las Figuras 45 - 48.



Figura 44. Detalle de la placa Arduino Mega 2560. Se observan numeradas las entradas/salidas.

Para las entradas digitales: mediante programa, se activan las resistencias *pull-up* internas de la placa Arduino Mega 2560. La comprobación se basa en el cambio lógico de '1' a '0' mediante un pulsador o interruptor. El estado de las entradas se observa en el PC mediante el monitor serial.

En el conexionado eléctrico, se conectarán todos los pines a la entrada de un interruptor (Figura 45). Los pines pertenecientes a PWM también pueden ser utilizados como entradas/salidas Digitales.



Figura 45. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de entradas digitales.

Si la alimentación de la placa Arduino Mega 2560 se realiza mediante alimentación externa y no mediante USB, los pines destinados a comunicación solo funcionarán como entradas/salidas digitales.



Para las salidas digitales: la comprobación se realizará mediante un barrido de todos los pines.

En el conexionado eléctrico, cada pin tendrá conectado su propio LED encendiéndose secuencialmente (Figura 46). Los pines pertenecientes a PWM también pueden ser utilizados como entradas/salidas Digitales.

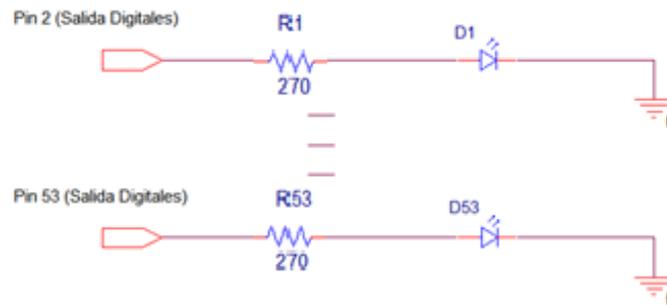


Figura 46. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de salidas digitales.

Al igual que en la comprobación de entradas digitales, si la alimentación de la placa Arduino Mega 2560 se realiza mediante alimentación externa y no mediante USB, los pines destinados a comunicación solo funcionarán como entradas/salidas digitales.

Para las entradas analógicas: la comprobación se realizará mediante la variación de resistencia de un potenciómetro (Figura 47). La tensión Vcc nos la proporciona la propia placa Arduino Mega 2560 al igual que las masas utilizadas en el conexionado (pines *Power*).

Todas las entradas analógicas se conectaran al potenciómetro y se visualizará la lectura del valor en el PC.

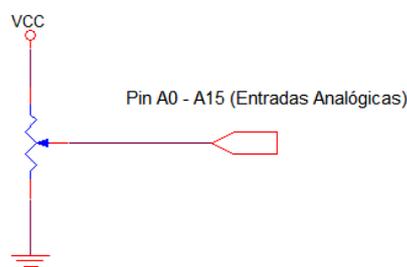


Figura 47. Esquema del conexionado eléctrico para comprobación de entradas analógicas.



Para las salidas de PWM: la comprobación se realizará mediante un barrido de todos los pines cubriendo los 8 bits de resolución de 0 - 255.

Cada pin tendrá conectado su propio LED (Figura 48). Se observará el incremento y decremento de la intensidad de emisión luminosa de los LEDs mediante la variación de la resolución de cada pin.

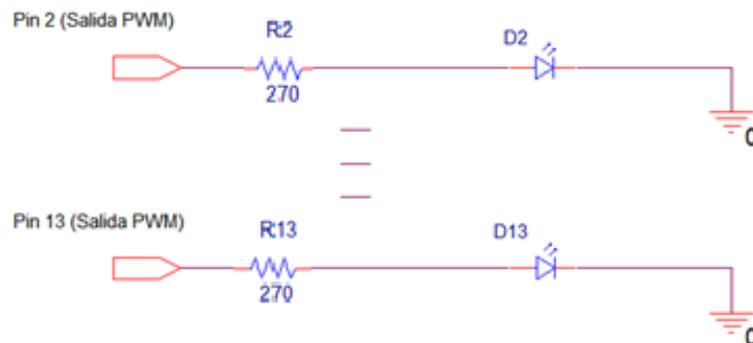


Figura 48. Conexión eléctrica para comprobación de salidas PWM.

Resultados

El resultado de esta calibración/comprobación es un programa que se transferirá mediante el software controlador de Arduino Marlin v1 al microcontrolador. De esta forma se podrá realizar la calibración/comprobación de forma automática siempre que sea necesario.

Para transferir el programa, vamos al menú de la controladora de Arduino – Marlin v1 y pulsamos el icono circular con una flecha en su interior (Figura 49).



Figura 49. Menú de carga y transferencia de la controladora de Arduino Marlin v1

Una vez en el menú de carga, para abrir la consola de visualización de mensajes de lectura del programa, se pulsa el icono “*Monitor Serial*”



Figura 50. Icono de la consola de lectura de pines en el menú de carga y transferencia de la controladora de Arduino Marlin v1.

Las líneas de código del programa se detallan en la página siguiente.



Código de programa

```
int velocidad=200;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.println("Lectura analogica");
  Serial.println("10 segundos para comprobacion");
  for(int t=0;t<10;t++){
    for(int x=0;x<15;x++){

      Serial.print(analogRead(x));
      Serial.print("/");
    }
    Serial.println("/");
    delay(1000);
  }
  Serial.println("Comprobacion salidas Digitales");
  Serial.println("Espere...");
  for(int x=2;x<53;x++){
    pinMode(x,OUTPUT);
    digitalWrite(x,HIGH);
    delay(velocidad);
  }
  for(int x=2;x<53;x++){
    digitalWrite(x,LOW);
    delay(velocidad);
  }
  Serial.println("Comprobacion salidas PWM");
  Serial.println("Espere...");
  for(int x=2;x<13;x++){
    for(int y=0;y<255;y++){
      analogWrite(x,y);
      delay(velocidad/50);
    }
    for(int y=255;y>=0;y--){
      analogWrite(x,y);
      delay(velocidad/50);
    }
  }
  Serial.println("Entradas digitales");
  Serial.println("10 segundos para comprobacion");

  for(int t=0;t<10;t++){
    for(int x=2;x<53;x++){
      pinMode(x,INPUT);
      digitalWrite(x,HIGH); // Si el puerto esta como entrada escribir HIGH activa pull-up
      Serial.print(digitalRead(x));
      Serial.print("/");
      //delay(velocidad);
    }
    Serial.println("/");
    delay(1000);
  }
}
```



6. PROTOCOLOS DE PRUEBAS GENERALES

6.1. Protocolo de pruebas generales I

Objetivo

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora, mediante la impresión de la pieza [UltimakerRobot_support.stl] [16].

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 51)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	<input type="text" value="0.2"/>	Print speed (mm/s)	<input type="text" value="80"/>
Shell thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>	Printing temperature (C)	<input type="text" value="235"/>
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	<input type="text" value="65"/>
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>	Support type	<input type="text" value="None"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="40"/>	Platform adhesion type	<input type="text" value="None"/>
		Filament	
		Diameter (mm)	<input type="text" value="3"/>
		Flow (%)	<input type="text" value="100.0"/>

Figura 51. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01.

3. Cargar el archivo de la pieza [UltimakerRobot_support.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)



8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)
9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)
10. Conclusiones

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general I se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos de Prueba General I

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Fallo
Acabado Superficial	-
Tolerancia Dimensional.	-

Como se observa en la figura 52, la calidad de la pieza dista mucho de lo esperado.



Figura 52. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño.

Comentarios

Como se puede observar en la Figura 52, el fallo se debe a que no existe posicionamiento entre capas.

Al no observarse ningún tipo de error o fallo antes o durante la impresión de la pieza, se repitió varias veces la impresión, sin conseguir en ningún momento una respuesta satisfactoria.



Las posibles causas de fallo son:

- i. Pérdida de pasos en alguno de los motores.
- ii. Alto rozamiento – Falta de lubricación.
- iii. Apriete de la tornillería.

Acciones correctoras

i. Se realiza una nueva medición de los desplazamientos de cada eje, para calcular nuevamente los pasos de cada motor [ver apartado 5.3 calibración de los Motor Paso a Paso]

Los pasos obtenidos para los diferentes ejes son muy similares a los de calibraciones anteriores.

ii. Se procede a la lubricación de las diferentes varillas, sin obtención de ninguna mejoría en la repetición del ensayo.

iii. Se realiza un apriete de toda la tornillería de la máquina y se observa que la mayoría de los tornillos de las 4 piezas de sujeción de los rodamientos lineales del eje 'y' con el soporte de la cama (ver imagen 53), han perdido su apriete y se han desenroscado.

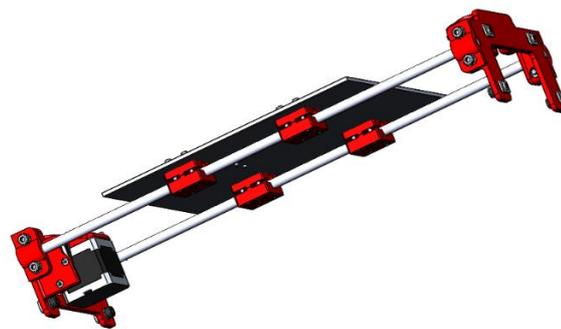


Figura 53. Montaje correspondiente al movimiento del eje 'y'. Se observan las piezas de unión de los rodamientos lineales del eje 'y' con el soporte de la cama y los 4 tornillos de sujeción en cada uno de ellos.

Se comprueban, volviendo a apretar cuando es necesario, todos los tornillos de la impresora 3D. Los citados tornillos del soporte de la cama son los únicos en tener holguras.

Esta acción, conlleva una nueva calibración de la cama o *heated bed*. [Ver apartado 5.1 calibración de la cama caliente]



La repetición de una nueva impresión comprueba que esta acción tampoco produce un resultado satisfactorio. La pieza obtenida sigue siendo considerada como fallo, no denota diferencia con las anteriores.

Tras un reconocimiento visual detallado de la impresora, se observa que la pieza utilizada en la estructura de la impresora llamada *New Y rod mount with tensioner* está inclinada y tiende a caer.

Se averigua por tanto una causa de fallo adicional:

iv. Defecto en la pieza *New Y rod mount with tensioner*

La función principal de la pieza *New Y* (Figura 54) es la de proporcionar soporte a las varillas guías del eje 'y', obteniendo el paralelismo y la linealidad necesarias para el correcto desplazamiento de la cama.

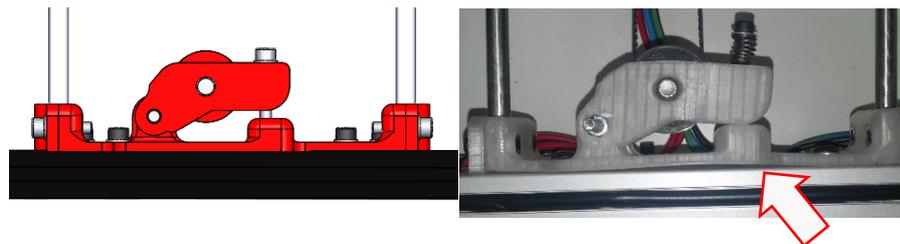


Figura 54. Pieza *New Y rod mount with tensioner*. **Izqda.:** diseño CAD. **Dcha.:** Pieza *New Y* en la impresora BCN – 3D prototipo de la UBU. Se observa el defecto indicado por la flecha.

Como también se observa en la Fig. 54, una segunda función de la pieza *New Y* es la de sujetar la polea que se encarga de transformar el movimiento angular del motor en un movimiento lineal, transmitido por una correa dentada. La correa está insertada en una pieza móvil sujeta por un tornillo y un muelle. El conjunto actúa como tensor de la correa, mejorando la transmisión del movimiento.

La inclinación de esta pieza produce una elevación de la correa en la polea siendo el posible causante del mal posicionamiento de las capas de la pieza impresa.

Solución

La solución adoptada es reducir la velocidad de impresión a 15 mm/s. Con ello, conseguimos minimizar la brusquedad de los movimientos del extrusor y las vibraciones del eje 'y' durante la impresión, obteniendo precisión y linealidad en los movimientos de los ejes. Esto se traduce en un correcto posicionamiento de las capas de la pieza impresa.



La pieza obtenida tras realizar el cambio de velocidad cumple satisfactoriamente todos los resultados (Figura 55, Tabla 9).



Figura 55. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño.

Tabla 9. Resultados obtenidos de Prueba General I después de adoptar las oportunas medidas correctoras.

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Conclusiones

Se ha realizado una prueba de ensayo general (impresión de la pieza *UltimakerRobot_support.stl*) para comprobar el correcto funcionamiento de la impresora. Se ha detectado un fallo menor que aparentemente no afectaba a la calidad de impresión (apriete de tornillos) y un fallo mayor que afectaba notablemente a la calidad de impresión (pieza *New Y rod mount with tensioner* defectuosa).

La modificación del parámetro de impresión velocidad no se considera una solución definitiva. Se trata de una solución provisional ya que la disminución drástica de la velocidad de impresión presenta el gran inconveniente de aumentar notablemente el tiempo de impresión.

Como acción futura a realizar, se imprimirá la pieza *New Y rod mount with tensioner*, (Figura 56) para sustituir la pieza defectuosa que se encuentra actualmente montada.

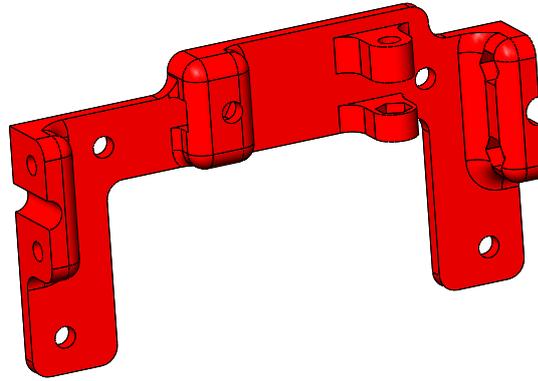


Figura 56. Diseño CAD de la pieza de soporte del eje 'y' *New Y rod mount with tensioner*.



6.2. Protocolo de pruebas generales II

Objetivo

Ajuste de parámetros básicos (*Print Speed*) del software debido al problema con la pieza (*New Y rod mount with tensioner*). La comprobación se realiza mediante la impresión de varias piezas exponiendo el caso de la pieza [space_invader_1.stl]

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 57)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	0.2	Print speed (mm/s)	80
Shell thickness (mm)	0.6	Printing temperature (C)	235
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	65
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6	Support type	None
Fill Density (%)	40	Platform adhesion type	None
		Filament	
		Diameter (mm)	3
		Flow (%)	100.0

Figura 57. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [space_invader_1.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)



8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)
9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)
10. Conclusiones

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general II se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos de Prueba General II

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Fallo
Acabado Superficial
Tolerancia Dimensional.

Como se observa en la figura 58, la pieza se ha detenido a los pocos minutos debido al apelmazamiento del plástico.

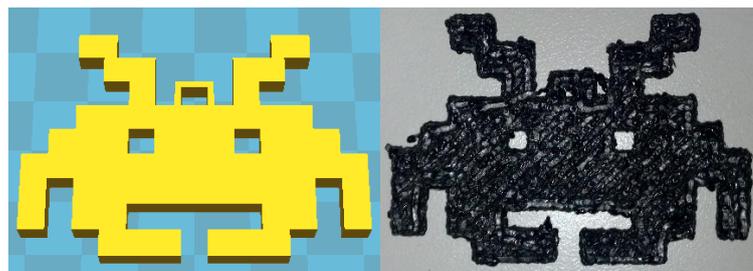


Figura 58. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño

Comentarios

Como se puede observar en la Figura 58, El posicionamiento entre capas es bueno, pero se denota un problema a la hora de realizar el relleno dentro de la pieza.

Se observa que el eje 'z' no responde, a la hora de posicionarse en Home.

Nota: Se advierte pequeños desplazamientos (tirones) en el arranque.



Las posibles causas de fallo están limitadas al eje 'z', ya que este no funciona con normalidad:

- i. Pérdida de pasos en los motores del eje 'z'.
- ii. Alto rozamiento – Falta de lubricación en las varillas roscadas.
- iii. Falta de linealidad y paralelismo eje 'z' – eje 'x'.
- iv. Falta de ajuste de corriente en el driver de los motores.

Acciones correctoras

i. En este caso al no tener el eje 'z' movimiento continuo, no se puede realizar la calibración mediante la medición de longitud, con lo que se modifica el número de pasos del eje de manera aleatoria incrementando y decrementando el número de referencia del firmware.

Las modificaciones realizadas al número de pasos, no obtienen ninguna mejoría en el movimiento del eje.

ii. Se procede a la lubricación de las diferentes varillas, sin obtención de ninguna mejoría en el movimiento.

iii. Se comprueba con la ayuda de un calibre digital y un nivel, el paralelismo, la linealidad y la perpendicularidad de los ejes 'z' y 'x'.

De las mediciones realizadas se observa una falta de perpendicularidad entre ejes, ya que la pieza de unión de uno de los lados está posicionada de manera más elevada que el otro. Ver imagen 59

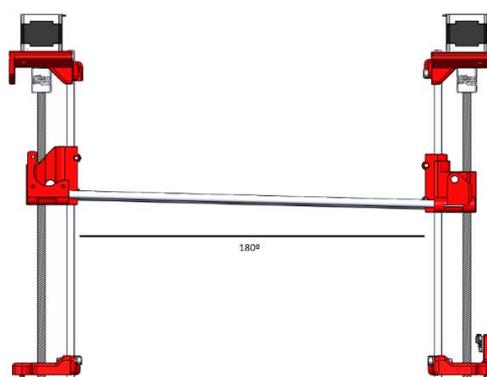


Figura 59. Falta de perpendicularidad entre eje 'z' y eje 'y'



Este problema tiene fácil solución, con la alimentación desconectada, girar las varillas roscadas hasta obtener una alineación de 180° en el eje 'x'.

Se comprueba tras el alineamiento que el movimiento del eje sigue sin producirse. Tras esta alineación suele ser necesario realizar ajustes en la calibración de la cama caliente o *heated bed* [Capítulo 5.1 calibración de la cama caliente].

Se realiza una comprobación de la corriente proporcionada por driver al motor mediante un polímetro.



Figura 60. Driver de control de motor Paso a Paso - A4988 G3D Stepper Driver

Se observa que el valor de corriente suministrado es mucho menor al adecuado y tiende a cero. Al aumentar la corriente mediante el giro trimpot del no se observa ningún tipo de variación en la corriente suministrada.

Aunque no se observa signos de daños en el driver, con los datos obtenidos de las mediciones se procede al cambio, ya que la respuesta es nula.

Solución

La solución adoptada es sustituir el driver de control por otro nuevo.

Esta sustitución requiere de una nueva calibración del driver. [Capítulo 5.4 calibración driver motor]

Tras realizar estos cambios se observa una respuesta optima del eje 'z'.

De las diversas pruebas realizadas en diferentes modelos de piezas y con diferentes velocidades de impresión (10mm/s – 80mm/s), se ha observado que la tasa de error en el alineamiento de capas es de entorno al 95% para velocidades mayores a 20mm/s, aunque la geometría de la pieza es un factor a tener en cuenta a la hora de imprimir.

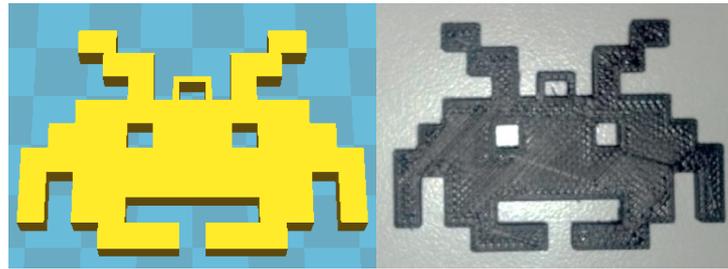


Figura 61. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño

Tabla 11. Resultados obtenidos de Prueba General II después de adoptar las oportunas medidas correctoras.

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Conclusiones

Como conclusión, para velocidades de impresión menores a 20mm/s el alineamiento de capas es correcto, descendiendo las vibraciones considerablemente y obteniendo un buen acabado.

El driver del eje 'z', tiene que estar calibrado al doble de corriente, ya que el control se realiza en dos motores conectados en paralelo, este incremento de la corriente es directamente proporcional a la temperatura adquirida por el driver.

Se piensa que la rotura del driver se debe a la elevada temperatura que adquieren, aun disponiendo de un pequeño disipador.

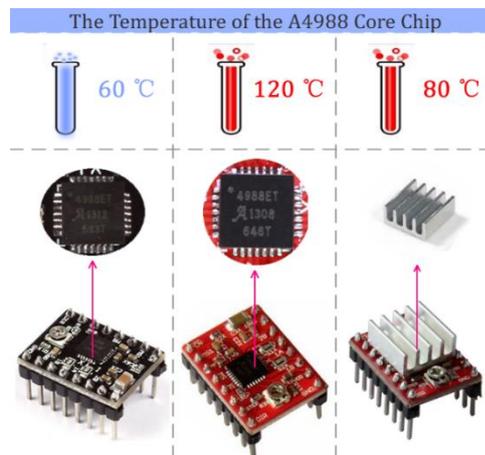


Figura 62. Diferencia de temperatura de diferentes diseños de controlador **Izq.:** PCB Cuatro capas sin disipador
Centro.: PCB Dos capas sin disipador **Dcha.:** PCB dos capas con disipador

Nuestro driver de control correspondería al diseño derecho de la figura anterior, placa PCB de 2 capas con disipador.



6.3. Protocolo de pruebas generales III

Objetivo

Ajuste de parámetros básicos (*Bottom/Top Thickness - Fill Density*) del software Cura 14.01.

La comprobación se realiza mediante la impresión de la pieza [robot_keychain.stl]

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 61)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	<input type="text" value="0.2"/>	Print speed (mm/s)	<input type="text" value="20"/>
Shell thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>	Printing temperature (C)	<input type="text" value="235"/>
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	<input type="text" value="65"/>
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>	Support type	<input type="text" value="None"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="40"/>	Platform adhesion type	<input type="text" value="None"/>
		Filament	
		Diameter (mm)	<input type="text" value="3"/>
		Flow (%)	<input type="text" value="100.0"/>

Figura 63. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [robot_keychain.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)



8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)
9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)
10. Conclusiones

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general III se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados obtenidos de Prueba General III

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Fallo
Acabado Superficial
Tolerancia Dimensional.

Como se observa en la figura 64, la pieza ha tenido que detenerse a la mitad de la impresión, debido a la rotura del hilo de plástico.

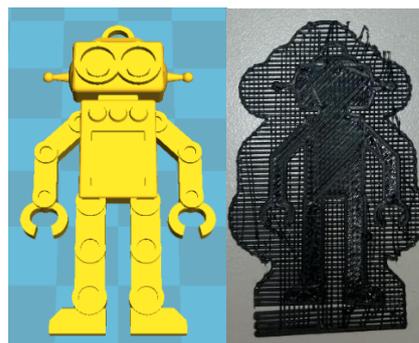


Figura 64. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño

Comentarios

Rotura del hilo de plástico en la entrada de la cámara de fundición del extrusor.

Las posibles causas de fallo están limitadas tanto al extrusor como al hilo de plástico:



- i. Ajuste de los sensores de entrada del extrusor.
- ii. Calidad del hilo de plástico ABS.

Acciones correctoras

i. La entrada del hilo al extrusor es controlada mediante presión por dos muelles introducidos en el interior de dos tornillos, si esta presión es insuficiente el tornillo encargado de arrastrar el hilo de plástico, no será capaz de realizar un agarre correcto y desplazarlo hacia el interior de la cámara de fundición del extrusor.

Para realizar un óptimo movimiento del plástico hacia la cámara de fundición, se le ha mecanizado al tornillo unas pequeñas hendiduras.

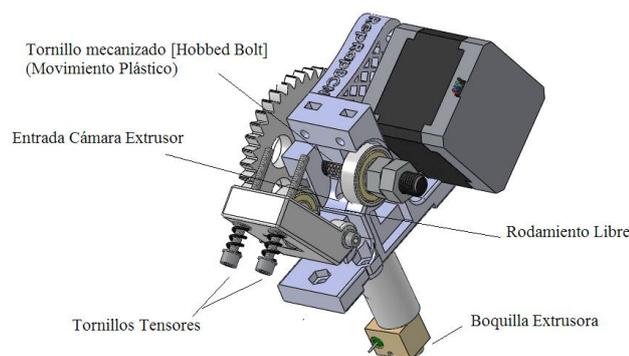


Figura 65. Composición de las diferentes partes del extrusor

Debido a la importancia de los sensores de entrada del hilo hacia el interior del extrusor, se ha realizado un ensayo para el mejor calibrado y obtención de los parámetros óptimos de presión / temperatura, tanto para el plástico PLA como para ABS (Ver Ensayo 7.1 y 7.2).

ii. La calidad del plástico es un factor muy importante a tener en cuenta, ya que es la materia prima de nuestra impresora.

En nuestro caso el tipo de plástico utilizado es plástico ABS – color negro.

La calidad de nuestro plástico es mala debido a:

- Variación de diámetro en las diferentes secciones (± 0.05 mm).
- El plástico se presenta hueco en su interior.



- Extremada rigidez.
- Higroscópico.
- Variación en el tinte.

Debido al problema de la rigidez del plástico, se nos ha presentado un inconveniente a la hora de imprimir, ya que se ha observado que el plástico tiende a salirse de la hendidura del tornillo *Hobbed Bolt* encargado del movimiento de éste hacia la cámara de fundición.

Este problema provoca la cancelación de la pieza debido a una entrada insuficiente de plástico, debido al escaso agarre que tiene los extremos lisos del tornillo con el plástico.

Para realizar un correcto centrado del plástico hacia la hendidura del tornillo, se ha optado por la creación de una pieza de plástico que realice el correcto guiado del hilo de plástico hacia su posición en la hendidura del tornillo. (Ver capítulo 8.3 Mejora aplicada al Extrusor)

Solución

La solución adoptada es calibrar los muelles en los tornillos de entrada del extrusor.

Tras realizar la calibración y tener un control manual sobre el correcto centrado del plástico sobre la hendidura del tornillo, las nuevas impresiones realizadas a diferentes modelos de piezas, cumplen de manera satisfactoria todos los resultados de la tabla 13.

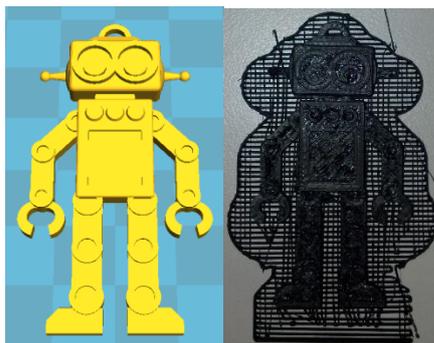


Figura 66. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño



Tabla 13. Resultados obtenidos de Prueba General III después de adoptar las oportunas medidas correctoras.

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Conclusiones

De las diversas pruebas realizadas con diferentes porcentajes de relleno (0% - 100%), se ha llegado a la siguiente conclusión:

Sabiendo que la opción *Botton/Top Thickness* determina la anchura de las paredes superior e inferior y que este valor viene determinado como múltiplo de la altura de capa o *Layer Height*, cabe pensar que para valores mayores de *Botton/Top Thickness* y menores de *Layer Height* se producirá un cierre completo de la pieza con un acabado superficial aceptable.

La modificación de los parámetros mencionados anteriormente, vienen determinados por un tercer parámetro, *Fill Density* o densidad de relleno el cual proporciona un porcentaje de relleno a las capas, sin un valor aceptable de este parámetro aun estipulando una fina altura de capa y una anchura de cierre muy grande, no existirá superficie de asentamiento para el plástico a la hora de realizar el cierre de la pieza.

Debido a este problema es muy importante elegir cuidadosamente la disposición de las caras o superficies de la pieza a la hora de realizar la impresión.

Para porcentajes de relleno menores al 20%, siendo la altura de la capa de 0,2 mm y la anchura de las paredes *Botton/Top Thickness* de 0,8 mm el cierre de la pieza o el cierre de las capas superiores de la pieza son insuficientes, dejando huecos sin cerrar debido a la falta de superficie de adherencia.

De las diferentes pruebas realizadas con plástico ABS, en un cubo hueco de 5 cm de arista se obtuvo una óptima impresión para la configuración de los siguientes valores, (ver tabla 14), ya que para valores geométricos menores, o valores de densidad de



relleno mayores, la impresión se realizará correctamente por ser la prueba el peor caso posible.

El punto crítico de esta impresión es el punto central de la cara superior, ya que cabe recordar que para la impresión de un cubo con aristas paralelas al eje 'x' e 'y', la impresión de las capas tanto de relleno como de cierre se realizan con una inclinación de 45° y en alternancia la capa superior de la inferior.

De esta manera la distancia máxima y crítica será el punto central

Tabla 14. Valores óptimos de cierre para un cubo de arista 5 cm

Layer Height	0.2	mm
Botton/Top Thickness	1.2	mm
Fill Density	0	%



6.4. Protocolo de pruebas generales IV

Objetivo

Ajuste de parámetros básicos (*Layer height – Shell thickness*) del software Cura 14.01

La comprobación se realiza mediante la impresión de la pieza [whistle.stl]

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 67)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	0.2	Print speed (mm/s)	20
Shell thickness (mm)	1	Printing temperature (C)	235
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	65
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	1	Support type	Touching buildplate
Fill Density (%)	20	Platform adhesion type	None
		Filament	
		Diameter (mm)	3
		Flow (%)	100.0

Figura 67. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [whistle.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)
8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)



9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)
10. Conclusiones

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general IV se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados obtenidos de Prueba General IV

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Mediocre
Tolerancia Dimensional.	Mediocre

Como se observa en la figura 68, la pieza obtenida tiene un acabado correcto, lo que se aprecia levemente es un levantamiento de la punta del silbato.

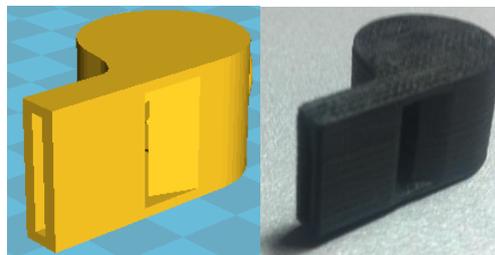


Figura 68. Comparación de resultados con respecto al diseño inicial de la pieza

Comentarios

La pieza tiene una buena calidad, pero en la parte con menor superficie apoyada en la cama caliente ha sufrido un levantamiento, lo que implica un acabado superficial asimétrico.

La falta de adherencia está limitada únicamente a la cama caliente o *heated bed*.

- i. Mala calibración de la cama caliente.
- ii. Baja temperatura.



No existe ninguna otra posibilidad aparte de las mencionadas anteriormente, ya que todas las piezas realizadas, se han imprimido con laca en la superficie de la cama caliente y con la opción de *raft*.

Acciones correctoras

- i. Se realiza la calibración mediante el giro de los 4 tornillos tensores y el ajuste nivelado de la cama caliente. (Ver capítulo 5.1 calibración de la cama caliente)

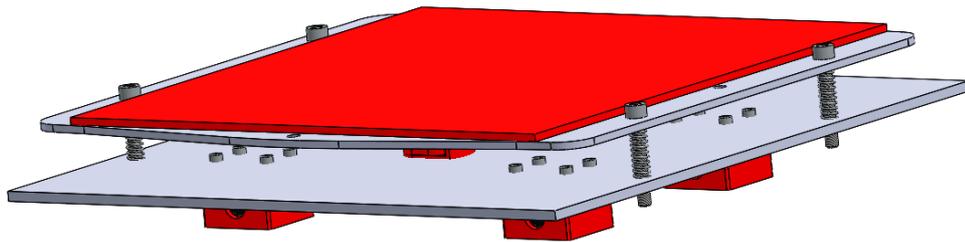


Figura 69. Composición de los diferentes elementos de la cama caliente

- ii. Se incrementa la temperatura de la cama en el software.

Solución

Al aumentar la temperatura de la cama hasta valores superiores a 75°C, no se observa ningún levantamiento de las impresiones realizadas a diferentes modelos de piezas, cumpliendo de manera satisfactoria todos los resultados de la tabla 16.

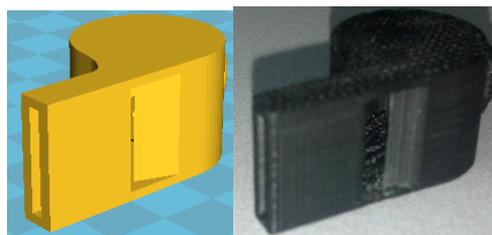


Figura 70. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño



Tabla 16. Resultados obtenidos de Prueba General IV después de adoptar las oportunas medidas correctoras.

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Conclusiones

De las diversas pruebas realizadas con diferentes valores de *Layer height* y *Shell thickness*, se ha llegado a la siguiente conclusión:

Para el rango de valores de *Layer Height* (0.1mm – 0.4mm), se observa un mejor acabado contra menor sea la altura de la capa, siendo inapreciable los valores menores a 0,15 milímetros.

Para el rango de valores de *Shell Thickness* o grosor de la pared (0.2 – 0.8mm), se observa una resistencia y un acabado aceptable para valores altos, sobre todo en la tapa.

Cabe destacar que existe un valor de *Shell Thickness* el cual es óptimo, ya que ese valor, normalmente superior a 1mm, aporta una disminución de tiempo a la hora de imprimir, debido al menor tiempo de realización del perímetro de la pieza, en comparación con diferentes movimientos aplicados a la impresión del relleno de la pieza.

Para la impresora, es más fácil y más rápido, realizar un mayor relleno de la pared de la pieza debido al movimiento constante en la realización del perímetro, que la realización de los movimientos necesarios para la realización del rellenos, de ahí la disminución de tiempos a la hora de imprimir, además de proporcionar una resistencia extra a la pieza impresa.



6.5. Protocolo de pruebas generales V

Objetivo

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora, mediante la impresión de las piezas [Helicopter.stl]

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 71)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	<input type="text" value="0.2"/>	Print speed (mm/s)	<input type="text" value="15"/>
Shell thickness (mm)	<input type="text" value="1.2"/>	Printing temperature (C)	<input type="text" value="235"/>
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	<input type="text" value="80"/>
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="1.2"/>	Support type	<input type="text" value="None"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="30"/>	Platform adhesion type	<input type="text" value="None"/>
		Filament	
		Diameter (mm)	<input type="text" value="3"/>
		Flow (%)	<input type="text" value="100.0"/>

Figura 71. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [Helicopter.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - c. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - d. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - d. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - e. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - f. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)
8. Conclusiones
9. Estudio de impresión.



Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general V se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados obtenidos de Prueba General V

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Como se observa en la figura 72, las piezas se corresponden al modelo.

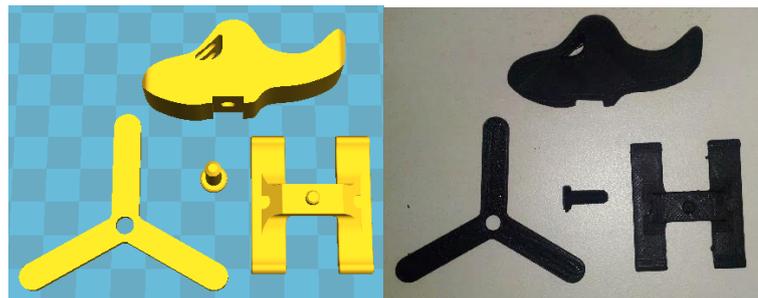


Figura 72. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño

Comentarios

El resultado ha sido totalmente satisfactorio, siendo el único inconveniente el tiempo de impresión, debido a las velocidades bajas con las que trabajamos.

El tiempo de impresión para las piezas de la figura 72 con la configuración de los parámetros mencionados anteriormente ha sido de aproximadamente de casi 6 horas

Conclusiones

Se ha comprobado una correcta impresión en paralelo, varias piezas en la misma impresión.



Se ha comprobado que los parámetros adquiridos en los anteriores ensayos son correctos, obteniendo un acabado superficial y dimensional satisfactorio.

Con estos parámetros configurados y adaptados a nuestra impresora, se realizará un estudio para la posible impresión de la pieza problemática (*New Y rod mount with tensioner*)

Estudio de impresión

Para poder obtener una pieza funcional, se ajustaran los diferentes parámetros de configuración individualmente.

- Altura de la Capa (*Layer Height*): determina la calidad de la impresión. A menor altura de capas se obtiene una mayor presión y una mejor adherencia entre ellas. [Valor óptimo: 0.1mm – 0.15mm]
- Anchura de Pared (*Shell Thickness*): determina el espesor de las paredes exteriores o perímetro, si este valor se divide por el ancho de la boquilla se obtiene el número de perímetros que trazará. Para un extrusor de diámetro de boquilla de 0,4 mm, el valor ideal es de 0,8 mm, ya que generará 2 perímetros [Valor óptimo: 0.8 mm]
- Velocidad de Impresión (*Print Speed*): parámetro problemático en la impresora. Indica la velocidad de impresión, cuando el extrusor está soltando plástico. [Valor óptimo: 20mm/s]
- Temperatura del extrusor (*Printing Temperature*): el plástico a utilizar es ABS, con lo que la temperatura de extrusión será de 235°C.
- Temperatura de la cama (*Bed Temperature*): para evitar levantamientos de la pieza durante la impresión elevaremos la temperatura hasta los 85°C – 90°C.
- Anchura de la capa Superior/Inferior (*Bottom/Top Thickness*): determina la anchura de las paredes superior e inferior con relleno del 100%. Este valor viene determinado como múltiplo de la altura de capa. Para el valor estipulado



anteriormente de altura de capa de 0,15 mm el valor de 0,6 mm nos generará 4 capas. [Valor óptimo: 0.6 mm]

- Densidad de Relleno (*Fill Density*): indica el porcentaje de relleno de las capas, nuestra pieza al ser funcional, requerirá un valor superior al 50%. [Valor óptimo: 60%]
- Tipo de soporte (*Support Type*): son estructuras frágiles y fácilmente eliminables que nos permiten sujetar voladizos o formas complicadas de la estructura. La pieza no requiere de soporte
- Tipo de Plataforma de Adhesión (*Platform Adhesion Type*): para evitar en la manera de lo posible el levantamiento de la pieza se añadirá *raft* o balsa.

Nota: Se llama *raft* o balsa a una estructura que se pone antes de imprimir la pieza. Esta estructura consiste en varias tiras gruesas de plástico separadas entre sí, situadas bajo la zona donde se imprimirá la pieza, cubiertas por otras tiras más finas de plástico, pero igualmente separadas. Sobre esta estructura que recuerda a las balsas (de allí su nombre) se imprime la pieza.

Este sistema ayuda a que la pieza se agarre bien, pero resulta algo complicado la separación de la pieza de la balsa.

Introducidos los parámetros de configuración en el software “Cura”, obtenemos una estimación temporal de 8h y 40 minutos.

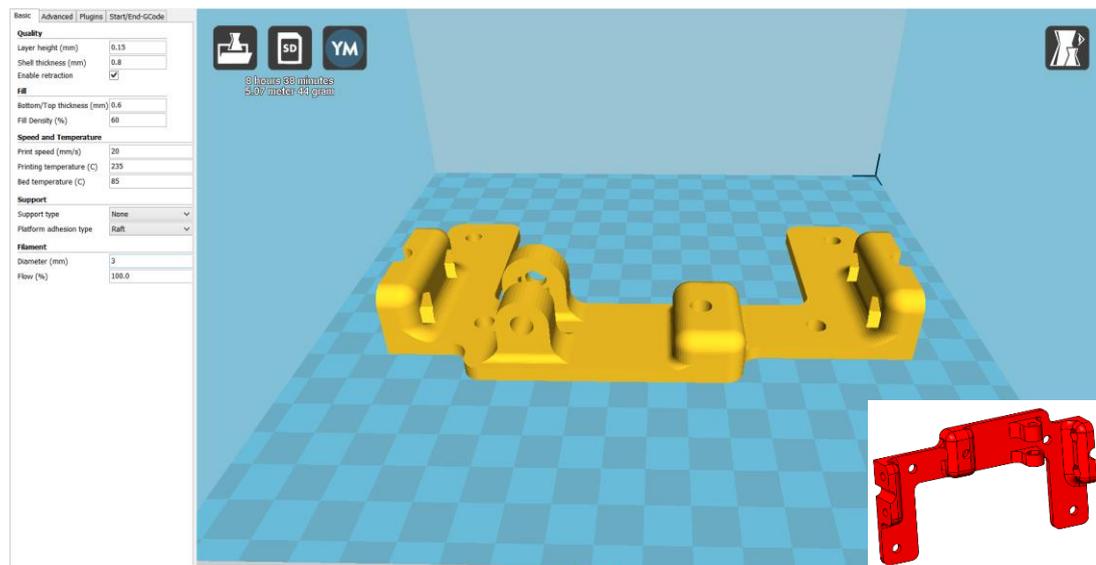


Figura 73. Pantalla principal de impresión del software Cura con la configuración de los valores estudiados.

El tiempo estimado de impresión nos plantea un reto innecesario, ya que al tener una multitud de variables de impresión tanto internas, por parte de la impresora, como externas, por parte del entorno, se decide desestimar la opción de imprimir la (*New Y rod mount with tensioner*).

Los proveedores que nos suministraron la impresora, se harán cargo de remplazar la pieza, ya que se suministró con el defecto de impresión.



6.6. Protocolo de pruebas generales VI

Objetivo

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora, mediante la impresión de la pieza de mejora [Mejora_Extrusor.stl].

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 74)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	0.15	Print speed (mm/s)	15
Shell thickness (mm)	0.8	Printing temperature (C)	230
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	70
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	0.8	Support type	None
Fill Density (%)	35	Platform adhesion type	None
		Filament	
		Diameter (mm)	3
		Flow (%)	100.0

Figura 74. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [Mejora_Extrusor.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)



8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)
9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general VI se detallan en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados obtenidos de Prueba General VI

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Como se observa en la figura 75, la pieza no se corresponde con el modelo, está en oposición con respecto al eje 'y'. (Efecto Espejo)

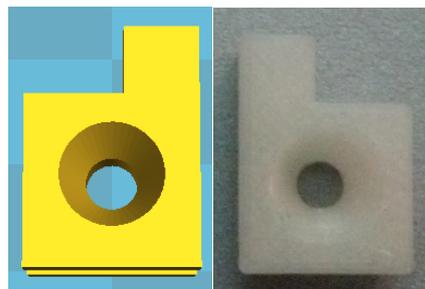


Figura 75. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño

Comentarios

El resultado ha sido totalmente satisfactorio, siendo el único inconveniente el volteo realizado respecto al eje 'y'. Este problema tiene un aspecto importante, si se van a imprimir piezas específicas que forman parte de una pieza más compleja, ya que o son simétricas con respecto al eje 'y' o la impresión la realizará volteada, efecto espejo.



Este problema es consecuencia de un mal montaje y una mala configuración del posicionamiento de los ejes en el firmware de la máquina.

Acciones correctoras

La acción realizada para paliar el efecto del volteo de la pieza nos la proporciona el propio software Cura, ya que nos da acceso a un pequeño menú de modificación de los parámetros de la pieza, dándonos la opción de realizar el efecto espejo en el eje de impresión de la pieza que nosotros queramos, corrigiendo de manera sencilla el problema de la simetría contraria en el punto Home (posicionamiento de la cama caliente con el extrusor).

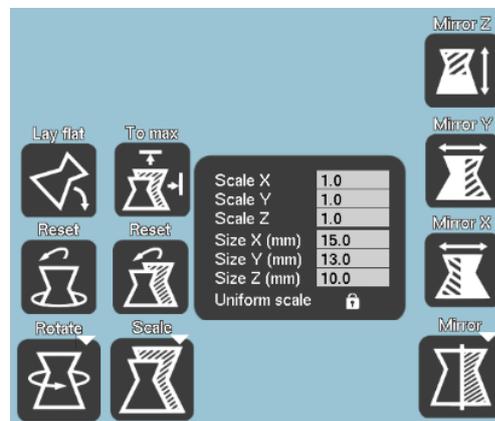


Figura 76. Menú de diseño del software Cura

La solución correcta a este problema, la cual desecharemos por ser extremadamente complicada y no tener mucha importancia a la hora de la impresión de las piezas es la de desmontar toda la impresora 3D y volverla a montar del lado correcto, ya que todos los ejes han sido invertidos de sitio, debido al montaje equivocado de la impresora.

Solución

La solución adoptada tras realizar la impresión de la pieza con éxito, mediante la opción mencionada anteriormente proporcionada por el software Cura, radica en la realización de un estudio de los parámetros de calibración de los ejes en el firmware de la impresora, ya que se prevé una mala configuración de estos. (Ver capítulo 5.5 calibración del posicionamiento de los ejes)



6.7. Protocolo de pruebas generales VII

Objetivo

Comprobar el correcto funcionamiento de la impresora para velocidades superiores a 20mm/s, mediante la impresión de la pieza [Bearing.stl], tras el cambio de la pieza (*New Y rod mount with tensioner*)

Procedimiento experimental

1. Ejecutar software Cura 14.01
2. Configuración de los parámetros básicos de Cura 14.01 (Figura 77)

Quality		Speed and Temperature	
Layer height (mm)	<input type="text" value="0.15"/>	Print speed (mm/s)	<input type="text" value="30"/>
Shell thickness (mm)	<input type="text" value="0.8"/>	Printing temperature (C)	<input type="text" value="175"/>
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	Bed temperature (C)	<input type="text" value="40"/>
Fill		Support	
Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="0.8"/>	Support type	<input type="text" value="None"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="30"/>	Platform adhesion type	<input type="text" value="None"/>
		Filament	
		Diameter (mm)	<input type="text" value="3"/>
		Flow (%)	<input type="text" value="100.0"/>

Figura 77. Parámetros de configuración Básica de Software Cura 14.01

3. Cargar el archivo de la pieza [Bearing.stl]
4. Impresión de la pieza
5. Valoración de los siguientes aspectos de la pieza obtenida:
 - a. Acabado superficial (realizar una comprobación visual para observar si en ciertos aspectos la impresión no ha sido constante o la pieza presenta imperfecciones de algún tipo)
 - b. Tolerancia dimensional (comprobar el error de impresión en los tres ejes)
6. Evaluar los resultados de cada prueba en:
 - a. Satisfactorio (el resultado es correcto)
 - b. Mediocre (el resultado contiene errores, pero se realizó la prueba)
 - c. Fallo (el resultado no es el esperado o la prueba no se finalizó)
7. Comentarios (indicar las posibles causas de fallo que hicieron que el resultado no fuera satisfactorio)



8. Acciones correctoras (indicar las acciones llevadas a cabo para solucionar o minimizar el problema)
9. Solución adoptada (de las acciones correctoras propuestas, indica la solución que se ha adoptado como la más exitosa/sencilla de llevar a cabo)
10. Conclusiones

Resultados

Los resultados obtenidos en la prueba general VII se detallan en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados obtenidos de Prueba General VII

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Fallo
Acabado Superficial
Tolerancia Dimensional.

Como se observa en la figura 78, la pieza dista mucho de lo esperado.

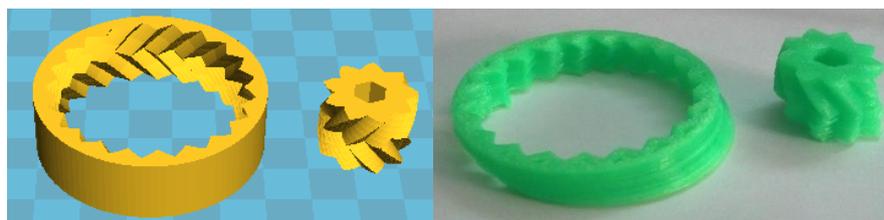


Figura 78. Comparación del resultado fallido de la impresión con respecto al diseño

Comentarios

Tras cambiar la pieza que se creía que era la causante de este problema (Ver protocolo de pruebas generales I), se observa que no existe ningún tipo de posicionamiento entre capas con lo que se cree que el problema principal del desalineamiento de las capas ha sido causado por otro motivo.

En varias pruebas realizadas para velocidades superiores a 20 mm/s, se observa que en el transcurso de la impresión se producen unos golpes “secos” en el cambio de



movimiento del eje 'y', causando el movimiento de las capas por el desplazamiento de la posición del eje. Este problema es posiblemente producido por el excesivo peso que soporta este eje.

Se piensa que el desplazamiento de las capas que se producen en el eje 'y' pueden ser causadas por la elevada inercia de este eje, impidiendo realizar una impresión correcta a velocidades superiores a 20 mm/s.

Acciones correctoras

Se realizará un ensayo de los valores dentro del Firmware para decrementar tanto las aceleraciones como las deceleraciones producidas en este eje. (Ver ensayo 7.3 Estudio de parámetros de impresión: velocidad y aceleración)

También se realizará la coordinación de movimientos entre ejes, debido al cambio de valores realizados.

Además se propondrá una serie de mejoras aplicadas al Hardware de la impresora, ya que la elevada masa del eje 'y' es causada por una instalación de componentes erróneos en este modelo de impresora.

Solución

Al realizar un decremento de la aceleración del eje 'y', causa principal de los desalineamiento de las capas producidas por la elevada inercia de este eje, se observa que la pieza cumple de manera satisfactoria todos los resultados de la tabla 20.

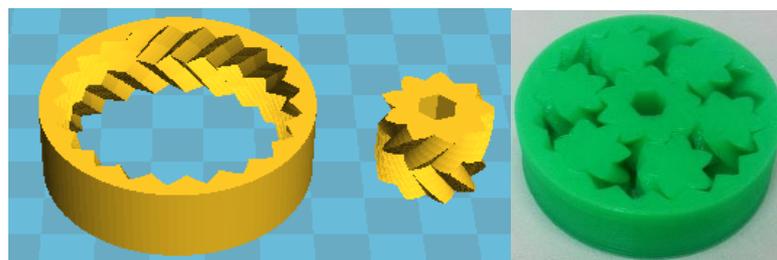


Figura 79. Comparación del resultado exitoso de la impresión con respecto al diseño



Tabla 20. Resultados obtenidos de Prueba General VII después de adoptar las oportunas medidas correctoras.

Prueba	Resultado
Cargar archivo .STL	Satisfactorio
Tiempo obtención de temperaturas	Satisfactorio
Calentamiento Extrusor	Satisfactorio
Calentamiento Cama	Satisfactorio
Posicionamiento de los Ejes (Inicio)	Satisfactorio
Extrusión	Satisfactorio
Impresión	Satisfactorio
Acabado Superficial	Satisfactorio
Tolerancia Dimensional.	Satisfactorio

Conclusiones

De las diversas pruebas realizadas a diferentes velocidades, se observa una gran mejoría en la impresión de piezas, así como un aumento en la velocidad de impresión, debido al decremento de la aceleración del eje 'y'.

La velocidad de impresión así como los parámetros mencionados en los diversos protocolos de pruebas anteriores necesarios para la impresión, dependen de la geometría, características y particularidades de la pieza, así como de un buen mantenimiento y calibración de la impresora 3D.



7. ENSAYOS

7.1. Calibración de Presión/Temperatura en plástico - ABS

Objetivo

Obtener los parámetros de presión y temperatura óptimas de extrusión para plástico ABS

Procedimiento experimental

Se han llevado a cabo una serie de ensayos sobre el plástico ABS al ser extruido, variando tanto la temperatura de extrusión (190° - 240°C), como la longitud de los muelles (15 mm – 7 mm).

Los resultados obtenidos de los ensayos se han catalogado de la siguiente forma:

- a. Satisfactorio: El resultado es correcto – la extrusión de plástico se realiza correctamente
La velocidad de expulsión del plástico por extrusor es constante y la temperatura de fundición es adecuada.
- b. Mediocre: El resultado contiene errores – la extrusión no se produce de manera constante.
- c. Fallo: El resultado no es correcto – la extrusión no se produce de manera correcta.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. *Hobbed Bolt*: DIN 933 M8x55 GRAF – Mecanizado
2. Cama caliente o *heated bed*
3. Boquilla extrusora o *hot end: J Head* [Entrada: 3 mm / Salida: 0,4 mm]
4. Software: Cura 14.01 – Firmware: Marlin v1
5. Plástico: ABS Natural 3 mm
6. Calibre digital



Variables

Fuerza ejercida sobre el plástico ABS mediante el tornillo *Hobbed Bolt* y el rodamiento libre durante la extrusión.

La Fuerza ejercida es medida en función de la longitud de los muelles de cierre (15 mm – 7 mm).

La temperatura de extrusión aproximada del plástico ABS es (190° - 240°C).

Resultados

En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos de las diferentes combinaciones realizadas en los ensayos, según la variación de los parámetros Presión y Temperatura

Tabla 21. Valores obtenidos de Presión / Temperatura

T(°C)	p (mm)	15	14	13	12	11	10	9	8	7
190		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
195		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
200		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
205		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
210		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
215		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Fallo
220		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
225		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
230		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
235		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
240		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
245		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

En los resultados obtenidos en la tabla anterior se observa, que para la combinación de valores de **color rojo**, la presión ejercida por los muelles es insuficiente, siendo imposible el agarre del plástico por parte del tornillo *Hobbed Bolt*. El valor correcto de presión está entorno a los 9 mm.

Para la combinación de valores de **color amarillo**, aun siendo el valor de fusión del plástico ABS de 190°C, no se obtiene una impresión correcta hasta aproximadamente 230°C.



Como puede observarse en la tabla 21 las combinaciones correctas de presión y temperatura están centrados en torno a una agrupación de valores en **color verde**.

Como valor optimo tomaremos la siguiente combinación

[Presión: 9mm – Temperatura: 235°C]

Esta combinación es única y propia para el plástico ABS Natural 3 mm, teniendo que volver a realizar el ensayo de calibración para otro tipo de plásticos como PLA.



7.2. Calibración de Presión/Temperatura en plástico - PLA

Objetivo

Obtener los parámetros de presión y temperatura óptimas de extrusión para plástico PLA

Procedimiento experimental

Se han llevado a cabo una serie de ensayos sobre el plástico PLA al ser extruido, variando tanto la temperatura de extrusión (160° - 210°C), como la longitud de los muelles (15 mm – 7 mm).

Los resultados obtenidos de los ensayos se han catalogado de la siguiente forma:

- a. Satisfactorio: El resultado es correcto – la extrusión de plástico se realiza correctamente
La velocidad de inserción del plástico en el extrusor es constante y la temperatura de fundición es adecuada.
- b. Mediocre: El resultado contiene errores – la extrusión no se produce de manera constante.
- c. Fallo: El resultado no es correcto – la extrusión no se produce.

Elementos Utilizados – [Parámetros Fijados]

1. *Hobbed Bolt*: DIN 933 M8x55 GRAF – Mecanizado
2. Cama caliente o *heatted bed*
3. Boquilla extrusora o *hot end: J Head* [Entrada: 3 mm / Salida: 0,4 mm]
4. Software: Cura 14.01 – Firmware: Marlin v1
5. Plástico: PLA Natural 3 mm
6. Calibre digital

Variables

Fuerza ejercida sobre el plástico PLA mediante el tornillo *Hobbed Bolt* y el rodamiento libre durante la extrusión.



La Fuerza ejercida es medida en función de la longitud de los muelles de cierre (15mm - 7mm).

La temperatura de extrusión aproximada del plástico ABS es (160° - 210°C).

Resultados

En la tabla 22 se observan los resultados obtenidos de las diferentes combinaciones realizadas en los ensayos, según la variación de los parámetros Presión y Temperatura

Tabla 22. Valores obtenidos de Presión / Temperatura

T(°C)	p (mm)	15	14	13	12	11	10	9	8	7
160		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
165		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
170		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
175		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
180		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
185		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
190		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Satisf	Satisf	Satisf	Medio
195		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
200		Fallo	Fallo	Fallo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
205		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo
210		Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo	Fallo

En los resultados obtenidos en la tabla anterior se observa, que para la combinación de valores de **color rojo**, la presión ejercida por los muelles es insuficiente, siendo imposible el agarre del plástico por parte del tornillo *Hobbed Bolt*. El valor correcto de presión está entorno a los 9 mm.

Para la combinación de valores de **color amarillo**, aun siendo el valor de fusión del plástico PLA de 160°C, no se obtiene una impresión correcta hasta aproximadamente 175°C.

Para la combinación de valores de **color azul**, ocurre que el plástico hierve dentro de la cámara de fundición produciendo burbujas de aire que explotan al entrar en contacto con el aire, produciendo huecos o pequeñas deformidades entre las capas.

Como puede observarse en la tabla 22 las combinaciones correctas de presión y temperatura están centrados en torno a una agrupación de valores en **color verde**.



7.3. Estudio de parámetros de impresión: velocidad y aceleración.

Objetivo

Estudiar y adaptar los parámetros de aceleración configurados en el Firmware, para evitar el problema provocado por las inercias surgidas en los ejes.

Procedimiento experimental

Se han llevado a cabo una serie de ensayos variando los diferentes parámetros configurados en el Firmware del controlador Arduino con relación a la aceleración de los movimientos de la impresora.

Los parámetros de ajuste se encuentran en el Firmware y se corresponden a las siguientes líneas de código.

En la sección Configuration.h buscaremos las siguientes líneas de código.

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION      {9000, 9000, 20, 10000}  
#define DEFAULT_ACCELERATION          3000
```

La primera línea de código (`#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION`), corresponde a la velocidad máxima de los tres ejes y el extrusor en el inicio de movimientos acelerados.

Estos valores ajustan la velocidad inicial en relación con la aceleración en los cambios de movimientos de los ejes.

En nuestro caso estos valores son altos, ya que a velocidades bajas ($> 25\text{mm/s}$) se observa que el cambio de dirección, sobre todo en el eje 'y', es demasiado brusco y tiende a "rebotar" produciendo desalineamientos en las coordenadas de impresión debido a las inercias.

La segunda línea de código (`#define DEFAULT_ACCELERATION`), corresponde a las aceleraciones máximas de los tres ejes y el extrusor de los movimientos en la impresión.



Acciones correctoras

La primera acción realizada, fue la disminución del parámetro correspondiente al eje 'y' de la velocidad de máxima de movimiento acelerado de 9000 a 4500 mm/s².

Se observó que para una velocidad global de impresión de 40 mm/s configurada en el Software Cura, la impresión fue incorrecta, además se notó una pequeña desincronización en los ejes.

Tras varias pruebas a varias velocidades con un valor de 4500 mm/s², se observó una mejoría en el acabado de las piezas a velocidades de 30 mm/s, siendo una mejoría irrelevante.

Se realizaron varias pruebas variando el valor de la velocidad máxima en el inicio de movimientos acelerados.

- Valor 3000 mm/s²: La velocidad global de impresión es elevada con una gran mejoría en los acabados generales.
- Valor 2500 mm/s²: La velocidad global de impresión es similar a la obtenida con el valor anterior de 3000 mm/s².
- Valor 3500: La velocidad global de impresión es similar a la obtenida con los valores anteriores de 2500 y 3000 mm/s².

En la prueba realizada con todos los valores mencionados se aprecia una pequeña vibración o temblor en los ejes, se cree que es debido a la desincronización de estos.

Se reajusta por aproximación, la velocidad máxima de inicio de movimientos acelerados del eje 'x' y del extrusor. El ajuste del eje 'z' se cree innecesario debido a la baja velocidad y aceleración que posee este eje en la impresión.

Tras probar varias configuraciones se obtiene una notable mejoría en la vibración para valores alrededor de 7000 mm/s² en el eje 'x' y entorno a los 8000 mm/s² en el extrusor.

Como modificación final, se realiza un decremento de las aceleraciones máximas, aunque la variación de este valor para diferentes pruebas realizadas no ha dentado ningún cambio significativo. El valor se ajusta a 2000 mm/s²



Resultados

Al realizar un decremento en la aceleración de los movimientos de los ejes en la impresión se ha observado que es posible obtener mayores velocidades globales de impresión, reduciendo de esta manera el tiempo final de impresión, ya que en este tipo de máquinas la aceleración es un parámetro independiente de la velocidad.

Al reducir el valor de aceleración, se aumenta de manera insignificante el tiempo de impresión, pero este aumento se ve ampliamente compensado por la reducción del tiempo al aumentar la velocidad global de impresión.

De manera teórica podemos explicar el problema y la solución

Como se explicó anteriormente, el problema surge por unas fuerzas de inercia que producen un error en el posicionamiento de la cama caliente con respecto al extrusor.

Si aplicamos la Segunda Ley de Newton ($F=m \cdot a$), observamos que tanto la aceleración como la masa son directamente proporcionales a la fuerza de inercia. Para poder decrementar la fuerza y al ser imposible poder disminuir la masa aplicada al eje, decidimos disminuir la aceleración.

En la gráfica de la Figura 80, observamos la variación de velocidad con respecto a las aceleraciones tomadas en el ensayo.

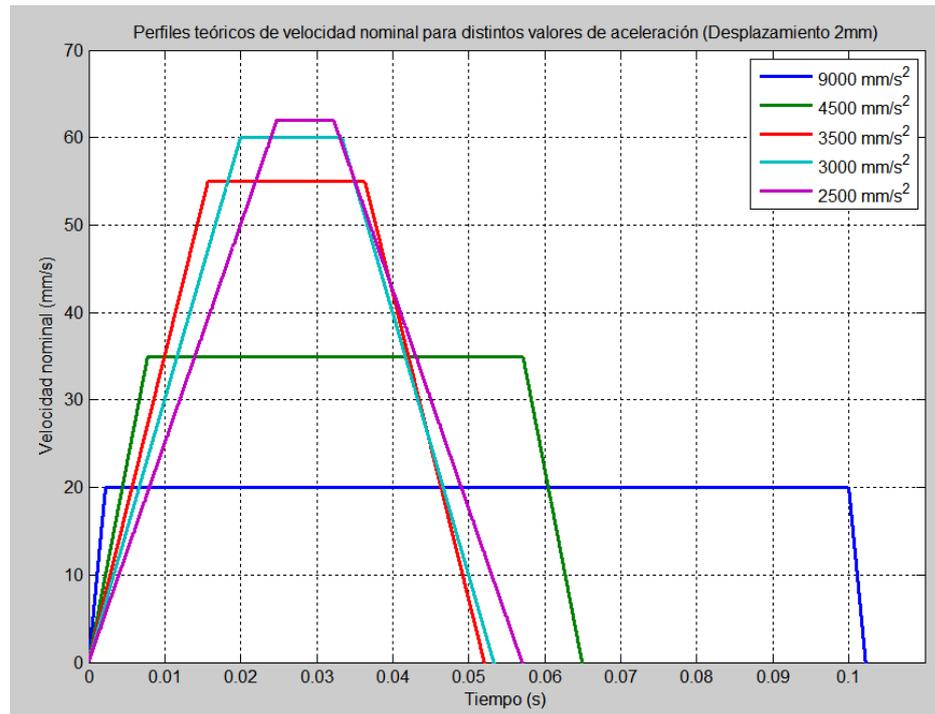


Figura 80. Perfiles teóricos de velocidad nominal para distintos valores de aceleración.

En la figura anterior se observa como para un desplazamiento de los ejes de 2 mm, al variar la aceleración obtenemos diferentes valores de velocidad nominal, reduciendo el tiempo en los movimientos de los ejes. De esta manera disminuimos el tiempo de impresión al aumentar la velocidad.

El valor que hemos tomado como aceptable en el ensayo realizado corresponde al valor de 3000 mm/s^2 , ya que un valor inferior de aceleración no muestra un gran cambio en la velocidad global de impresión.

Código de programación.

El código de la programación del gráfico correspondiente a la figura 80 es el siguiente:

```
%Frecuencia de muestreo
Fs=1000

%Vector tiempo
x=0:2/900/Fs:1;

%Funciones a trozos
f=(x<2/900).* (9000*x)+ ((x>=2/900) & (x<0.1)) .* (20)+ (x>=0.1) .* (-9000*x+920);
```



```
f1=(x<35/4500).* (4500*x)+ ((x>=35/4500) & (x<0.0571428)).* (35)+(x>=0.0571428).* ((-4500*x+292.1426));  
f2=(x<55/3500).* (3500*x)+ ((x>=55/3500) & (x<0.0363636)).* (55)+(x>=0.0363636).* ((-3500*x+182.2726));  
f3=(x<60/3000).* (3000*x)+ ((x>=60/3000) & (x<0.0333333)).* (60)+(x>=0.0333333).* ((-3000*x+160));  
f4=(x<62/2500).* (2500*x)+ ((x>=62/2500) & (x<0.032258)).* (62)+(x>=0.032258).* ((-2500*x+142.645));  
conf=plot(x,f,x,f1,x,f2,x,f3,x,f4)
```

```
%Parametros Grafico
```

```
title('Perfiles teóricos de velocidad nominal para distintos valores de aceleración (Desplazamiento 2mm)')  
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Velocidad nominal (mm/s)')  
grid on  
axis([0 0.11 0 70])  
set(conf,'LineWidth',2)  
legend('9000 mm/s^2','4500 mm/s^2','3500 mm/s^2','3000 mm/s^2','2500 mm/s^2')
```



7.4. Estudio de parámetros de impresión: velocidad y tiempo de impresión

Objetivo

Estudiar y adaptar los parámetros del Software que influyen tanto en la velocidad como en la calidad de la impresión.

Procedimiento experimental

Se han llevado a cabo una serie de ensayos variando los diferentes parámetros que afectan a la velocidad de impresión en el Software Cura.

Las variables a estudiar son las siguientes:

Dentro del Software Cura en el apartado Configuración Avanzada, se encuentran los siguientes parámetros con influencia en el tiempo global de impresión.

- *Travel Speed*: velocidad a la que se realizan los movimientos sin soltar plástico.

Este parámetro nos permite prefijar la velocidad de los movimientos de desplazamiento sin extrusión.

Este parámetro afecta sobre todo a la impresión en paralelo de varias piezas. Es recomendable un valor bajo en la configuración de este parámetro, ya que si la velocidad es alta puede producirse una pérdida de pasos por parte de los motores. Además de producir un posicionamiento erróneo.

- *Bottom Layer Speed*: velocidad de impresión de la capa inferior de la pieza.

Es recomendable un valor bajo para permitir una mejor adhesión del plástico a la cama caliente de la impresora.

- *Infill Speed*: velocidad de impresión del relleno de la pieza.

Este parámetro nos permite prefijar una velocidad determinada en la impresión del relleno de la pieza. En nuestro caso este valor será el mismo que la velocidad global de impresión ya que el relleno es interno y en cierta manera no afecta de manera muy negativa a la calidad final de la pieza. Para conseguir una configuración de relleno en función de la velocidad global el valor introducido es '0'.



Estos valores mencionados anteriormente son parámetros independientes de la velocidad global de impresión, aunque influyen de manera relativa en el tiempo de impresión.

Un parámetro crítico a la hora de imprimir cierto tipo de piezas es.

- *Minimal Layer Time*: tiempo mínimo de secado entre capa

Corresponde al tiempo mínimo que tiene que transcurrir entre la impresión de la capa inferior con la superior. Si el tiempo entre capas es demasiado bajo, no se producirá ningún tipo de adhesión de plástico entre capas, imprimiendo pieza con huecos.

Este parámetro limita la velocidad global de la impresión si las capas se colocan demasiado rápido, la velocidad de impresión se ralentizará para asegurar que ha pasado como mínimo la cantidad de segundos prefijada.

Speed	
Travel speed (mm/s)	20
Bottom layer speed (mm/s)	20
Infill speed (mm/s)	0.0
Cool	
Minimal layer time (sec)	3

Figura 81. Parámetros avanzados que afectan de algún modo a la velocidad y al tiempo de impresión

Otro parámetro importante a mencionar no dependiente de la velocidad, sino de la calidad y del tiempo de impresión que se encuentra en el apartado del Software *Expert Setting*.

- *Spiralize The Outer Contour*: Contorno en espiral.

Este parámetro realiza un movimiento constante de subida durante toda la impresión en el eje 'z'. Esta característica convierte un objeto sólido en una sola pared con un fondo hueco.

Spiralize	
Spiralize the outer contour	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 82. Parámetro experto que realiza impresiones en espiral del contorno de la pieza



Variables

Las variables a utilizar en el ensayo, son la velocidad global de impresión con respecto al parámetro de tiempo mínimo de secado entre capas (*Miniaml Layer*), además se incluirán diferentes pruebas con el parámetro de contorno en espiral o (*Spiralize The Outer Contour*), todos los demás parámetros permanecerán con la configuración predeterminada por programa, exceptuando los siguientes parámetros los cuales no se variarán en todo el ensayo son:

Quality	
Layer height (mm)	0.2
Shell thickness (mm)	0.4
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/>
Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.4
Fill Density (%)	0
Infill	
Solid infill top	<input type="checkbox"/>
Solid infill bottom	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 83. Parámetros configurados para el ensayo de velocidad.

Resultados

Para este ensayo se ha escogido una pieza hueca, (un vasito ovalado), con unas dimensiones geométricas pequeñas. Esta pieza ha sido escogida representando a la peor situación posible, debido a la gran influencia que va a tener la velocidad en el acabado o calidad de la pieza por sus especificaciones geométricas y dimensionales.

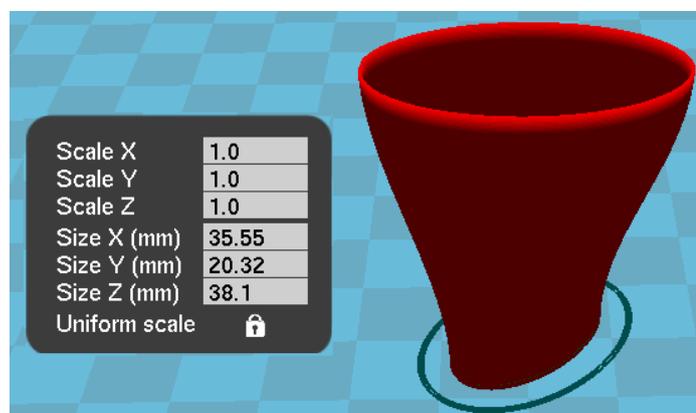


Figura 84. Pieza utilizada en el ensayo de velocidad



Los resultados obtenidos para diferentes valores de velocidad con un tiempo de secado entre capa o *Minimal Layer Time* de cero se detallan en la Figura 85 y en la Tabla 23:

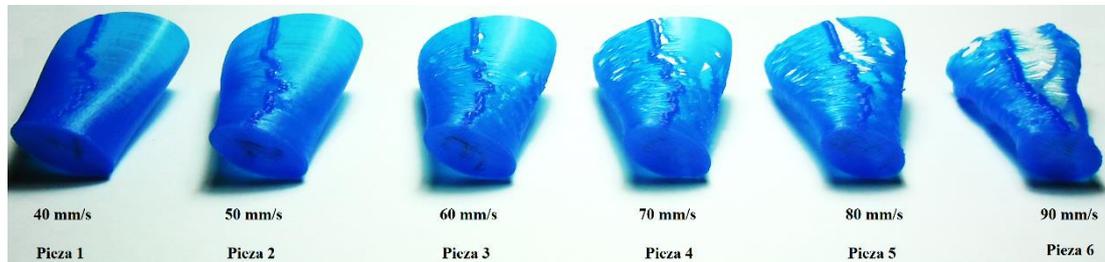


Figura 85. Diferentes pruebas realizadas para diferentes valores de velocidad y tiempo de secado de capa de 0 s

Tabla 23. Descripción de las diferentes piezas realizadas en el ensayo de velocidad

Pieza	Velocidad (mm/s)	Descripción
1	40	La calidad del acabado es perfecto, aunque se observa un nervio en la impresión. Este nervio es causado por un exceso de plástico a la hora de realizar el cambio de capa.
2	50	La calidad del acabado es peor que la pieza, sobre todo en las capas estrecha se la base. Se obtiene un acabado aceptable.
3	60	Se observan pequeños agujeros debido a la alta velocidad de impresión y a la falta de adhesión entre capas
4	70	Los agujeros son más notables, ya que el extrusor es incapaz de expulsar plástico a esa velocidad.
5	80	Se aprecia una falta de material considerable.
6	90	La falta de material es mayor al material adherido, hay una falta de material de más del 50% del utilizado para la pieza

Los problemas descritos anteriormente surgen por la falta de limitación de secado entre capas, ya que la impresión de una capa es aproximadamente 2-3 segundos.

De todas las piezas impresas se observa que el acabado es mejor en la parte alta de la pieza, ya que es contiene un mayor diámetro y el tiempo de impresión de esas capas es mayor.

El tiempo de impresión de la pieza 1 fue de 9 minutos, siendo la impresión de la pieza 6 de aproximadamente 5 minutos. Este valor no tiene mucha relevancia, ya que lo que se busca es obtener una buena calidad de impresión.



Si realizamos otra prueba de impresión de la misma pieza variando el tiempo de secado entre capa o *Minimal Layer Time* de cero a tres segundos obtenemos piezas como las de la Figura 86. Podemos ver que las tres piezas son iguales, aunque la velocidad es distinta. Esto es debido a la limitación que realiza el parámetro de secado de capa, ajustando la velocidad al tiempo configurado.

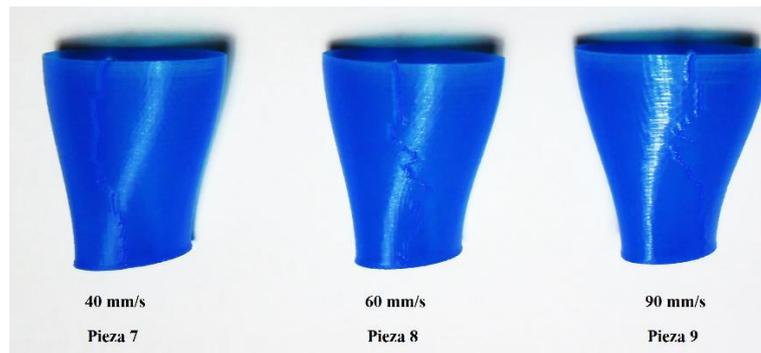


Figura 86. Diferentes pruebas realizadas para diferentes valores de velocidad y tiempo de secado de capa de 3 s

Si comparamos las dos piezas impresas a 40 mm/s (Pieza 1 - figura 85 y Pieza 7 - figura 86), observamos que el nervio es mucho menor en la pieza impresa con el valor de tiempo de secado entre capas de 3 segundos, esto se debe a que los movimientos son mucho más constantes y están más controlados.

Un parámetro que nos permite eliminar el nervio creado en el movimiento de subida del eje 'z', es el parámetro *Spiralize The Outer Contour* o contorno en espiral.

Se observa la inexistencia del nervio en la pieza de la derecha.

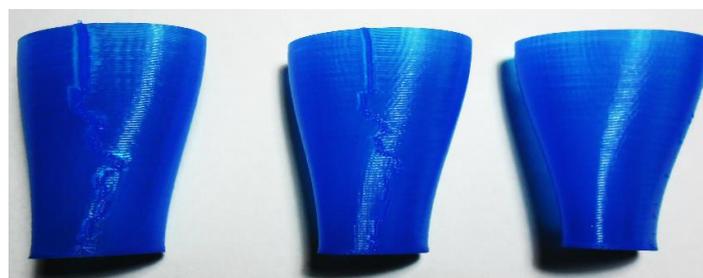


Figura 87. Diferencia entre Pieza 1, Pieza 7 y pieza impresa a 40 mm/s con la opción *Spiralize*

Este parámetro permite reducir el tiempo de impresión en piezas grandes, ya que el movimiento de subida es constante en la impresión, pero queda limitado a piezas con el interior hueco.



8. ESTUDIO DE MEJORAS APLICADAS A LA IMPRESORA 3D

8.1. Mejoras aplicadas al eje 'z'

Descripción

El Eje 'z' consta de dos motores conectados eléctricamente en paralelo, cada uno colocado en los vértices opuestos de la estructura superior.

Cada motor consta de dos varillas paralelas, una varilla roscada, la cual transformará el movimiento angular del motor en lineal mediante una tuerca, y otra lisa la cual sirve de guía para el desplazamiento del eje.

La varilla roscada va sujeta al eje del motor mediante un acoplamiento amortiguado, en cambio la varilla lisa va sujeta en los extremos mediante piezas atornilladas.

El Eje 'z' se caracteriza por tener dos piezas de unión en conjunto con el Eje 'x', lo que implica una dependencia de ejes (Figura 88).

Esta unión afecta al paralelismo y la linealidad de los ejes.

Una de los elementos que más influencia tiene sobre la calidad de las piezas de las impresoras es el denominado eje 'z' ya que este es el responsable de que las capas se depositen perfectamente unas sobre otras. El primer elemento que influye de manera muy importante es que la "cama caliente" tenga movimiento o no. Por ejemplo en las impresoras como el modelo Prusa 2 o 3, la cama caliente esta en asociada al eje 'y' que continuamente se está moviendo. Esto hace que en los desplazamientos de este eje se puedan mover la cama y las capas no se encuentren exactamente unas encima de otra.

Otras impresoras como la Repemaker (Ultimaker, Rostock, Replicator...) poseen una cama caliente "fija" desplazándose solo en el eje vertical. Aquí la calidad en la construcción del eje 'z' es la que nos va a dar la precisión en este eje 'y' a la postre una mejor o peor calidad de nuestra piezas.



Problemática

- **Paralelismo entre varillas guía, linealidad y horizontalidad:**
- **Desgaste acentuado de los materiales mecánicos:**
- **Perdida de precisión:**

Comentarios

Se ha observado en un periodo de tiempo muy corto un desgaste acentuado de las diversas varillas, este desgaste es muy excesivo, siendo totalmente visible en las zonas de más uso de la impresora.

El desgaste producido ha derivado en una falta de precisión en el posicionamiento del Eje 'z', teniendo que ajustar continuamente la altura de la cama o bed en el Eje 'y' para compensar la altura.

Aunque se ha realizado un mantenimiento preventivo basado en la lubricación de los componentes, este no ha sido suficiente.

Se prevé que debido a este desgaste se pueda producir un deterioro en la linealidad, perdiendo el Eje 'z' la perpendicularidad con respecto al Eje 'x', provocando vibraciones y una falta de paralelismo en el Eje 'z'.

Debido a esta falta de paralelismo es posible que las piezas de unión del Eje 'z' con el Eje 'x' puedan atascarse causando la rotura del motor por el alto rozamiento producido, siendo un problema grave y de alto coste económico y temporal.

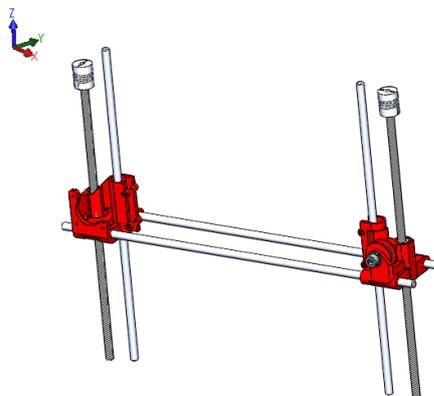


Figura 88. Piezas Unión Eje 'z' – Eje 'x'



Acciones correctoras

La solución adoptada radica únicamente en la sustitución de los componentes actuales por otros de mayor calidad y acabado, ya que el diseño basado en la transmisión de movimiento en el Eje 'z' es correcto, debido a la baja velocidad y la alta precisión que requiere este eje.

De esta manera se ha llegado a las siguientes soluciones:

1. Husillo - Tuerca.

Los husillos o tornillos de potencia, son dispositivos mecánicos que convierten un giro o desplazamiento angular en un desplazamiento rectilíneo, obteniendo un posicionamiento preciso de un movimiento axial.

Esta solución se basa en la sustitución del eje roscado de transmisión o varilla roscada, por un husillo de precisión de misma métrica diametral.

De esta manera se prevé una mejora sustancial en la precisión, un ligero incremento en la velocidad de movimiento y un rozamiento menor en el Eje.

Al optar por esta solución se podrá desechar las varillas guías, eliminando el paralelismo y simplificando así nuestro Eje.

Para poder realizar este cambio habrá que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Husillo

- Material

Existe una amplia lista de materiales y aleaciones dentro de la fabricación de husillos, siendo el más utilizado el acero.

En nuestro caso la elección del material no es un aspecto crítico, con lo que se elegirá acero o alguna de sus aleaciones, ya que con este material cubrimos todas las necesidades mecánicas necesarias a un coste económico menor.



- Tipo de rosca.

El tipo de rosca a utilizar en los husillos es diferente a la de los tornillos normales, debido al gran paso que poseen y a las diferentes formas de su perfil.

Los tipos de perfil normalizados según el filete de su rosca son: cuadrada, trapezoidal o ACME y triangular o en diente de sierra.

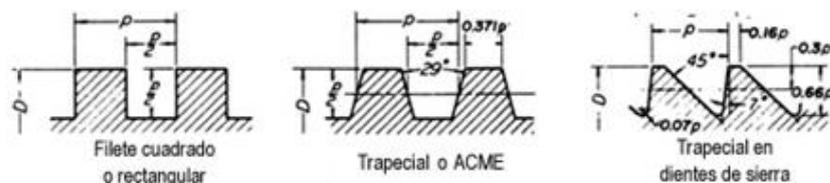


Figura 89. Diferentes tipos de roscados

De las roscas mencionadas anteriormente nos centraremos en las trapezoidales de una única entra o entrada simple, ya que la rosca triangular no se considerará debido al gran rozamiento que produce y el paso limitado que tiene, tampoco la rosca cuadrada o rectangular al no estar diseñada para este fin, utilizadas para regular el apriete.

- Diámetro y longitud del paso.

El cambio más sencillo, radica en la sustitución de elementos de misma métrica diametral, en este caso Métrica 8 (8mm diámetro exterior).

Basándonos en la norma ISO 2901/2903 o DIN 103 [17] para roscas trapezoidales, hemos escogido los siguientes diámetros para nuestro husillo, ya que otros diámetros mayores, no serán viables por sus elevadas dimensiones.

Tabla 24. Tolerancias dimensionales según norma ISO 2901/2903 o DIN 103 para Husillo M8 y M10.

Métrica ISO Trapezoidales DIN 103													
Tamaño mm	Designación de rosca	Pitch	Externo						Interno				
			Mayor Dia		Paso Dia		Dia Menor		Dia Menor		Paso Dia		Mayor Dia
			Max	Min	Max	Min	Max	Min	Min	Max	Min	Max	Min
8	TR8x1.5	1.5	8.000	7.850	7.183	7.013	6.200	5.921	6.500	6.690	7.250	7.474	8.300
10	TR10x2	2	10.000	9.820	8.929	8.739	7.500	7.191	8.000	8.236	9.000	9.250	10.500



El cambio a Métrica 10, implica una modificación tanto de las piezas de unión del Eje 'z' con el Eje 'y' (Figura 90), como de las piezas de soporte inferior del husillo, además de nuevos acoples amortiguados para la unión del eje del motor al husillo y rodamientos con un diámetro mayor.

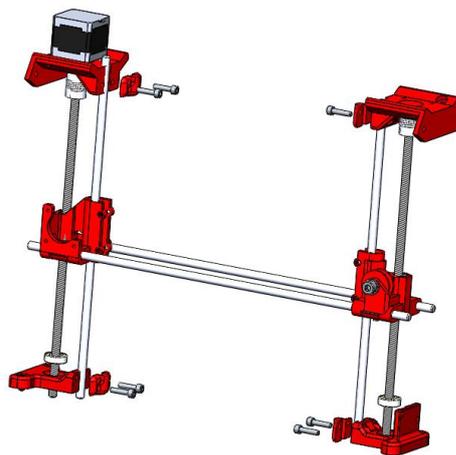


Figura 90. Composición de Piezas de Eje 'z'

La longitud del paso, viene determinado por la norma DIN 103 para roscas trapecoidales.

Con respecto a las métricas escogidas existe un problema comercial, la Métrica 8 es extremadamente complicada de adquirir, limitándonos tanto las formas de los componentes, como los materiales utilizados en ellos.

Para las dimensiones seleccionadas en la Tabla 24, se ha encontrado un único proveedor (http://www.igus.es/wpck/2371/drylin_trapezgewindemutter) para métrica 8, siendo más común de encontrar métrica 10.

Tuerca

- Forma

El cambio más sencillo, para métrica 8 consiste en la utilización de una tuerca hexagonal, forma que no requiere modificación en las piezas de la impresora. Para métrica 10 la forma es indiferente, ya que es necesario rediseñar las piezas de unión del Eje 'z' con el Eje 'y'.



El problema para Métrica 8 radica en la forma de la tuerca, cilíndrica o con valona, sin posibilidad de forma hexagonal, lo que requiere una modificación de las piezas de unión del Eje 'z' con el Eje 'y'.



Figura 91. Formas de tuerca (Hexagonal, Con Valona, Cilíndrica)

Tanto para Métrica 8 como para Métrica 10, será necesario el rediseño de las piezas de unión del Eje 'z' con el Eje 'y', con lo que se elige una forma cilíndrica para cualquiera de las métricas.

- Material

El material de la tuerca es un aspecto crítico, ya que el coeficiente de rozamiento dependerá del material elegido.

La elección del acero como material de la tuerca, queda descartado, ya que elementos de unión de material similar tienden al agarre.

También se elegirá un material de dureza menor, ya que es preferible el desgaste de la tuerca al husillo, debido al alto precio de este.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de rozamiento de diferentes materiales:

Tabla 25. Coeficientes de rozamiento para diferentes materiales de unión.

Material del tornillo	Material de la turca				
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido	Teflón
Acero en Seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25	0.04
Acero lubricado	0.11-0.17	0.1-0.16	0.1-0.15	0.11-0.17	0.04

De una búsqueda más exhaustiva se ha encontrado que la compañía Igus suministra tuercas realizadas en material plástico, ya que esta empresa es innovadora en la creación de elementos mecánicos plásticos.



El material elegido para la tuerca es plástico, debido a su menor peso y a sus bajos coeficientes de fricción.

Tabla 26. Coeficientes de fricción de plásticos Igu.

Material plásticos de la turca	Coeficiente fricción.
Iglidur J	0.08-0.18
Iglidur W300	0.08-0.23

- Análisis del mecanismo husillo – tuerca [18].

En este apartado se calcularán los pares de torsión tanto de subida como de bajada, de esta manera sabremos si el mecanismo husillo-tuerca es válido para nuestro sistema.

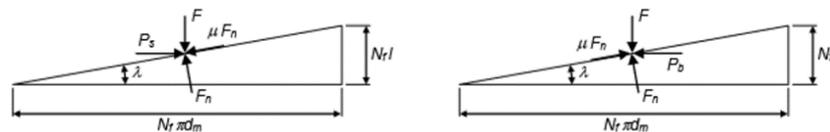


Figura 92. Izq.: Fuerzas en los filetes, al subir la carga **dcha.:** Fuerzas en los filetes, al bajar la carga

Las ecuaciones para calcular el par requerido para subir y bajar el eje ‘x’ son:

$$T_S = F \frac{d_m}{2} \frac{l + \frac{\mu \pi d_m}{\cos \alpha_F}}{\pi d_m - \frac{\mu l}{\cos \alpha_F}} = F \frac{d_m}{2} \frac{\tan \lambda + \frac{\mu}{\cos \alpha_F}}{1 - \frac{\mu \tan \lambda}{\cos \alpha_F}} \quad (3)$$

$$T_b = F \frac{d_m}{2} \frac{\frac{\mu \pi d_m}{\cos \alpha_F} - l}{\pi d_m + \frac{\mu l}{\cos \alpha_F}} = F \frac{d_m}{2} \frac{\frac{\mu}{\cos \alpha_F} - \tan \lambda}{1 + \frac{\mu \tan \lambda}{\cos \alpha_F}} \quad (4)$$

Donde:

Tabla 27. Significado de las variables de las Ecuaciones 3 - 8

P	Paso
F	Fuerza total actuante sobre el área nominal de la rosca
Dm	Diámetro medio
DM	Diámetro Mayor
l	Avance del Tornillo
αF	Ángulo entre flancos
μ	Rozamiento entre tornillo y tuerca
λ	Angulo de Avance
Ts	Par Torsor requerido para la subida
Tb	Par Torsor requerido para la bajada



Al utilizar dos tornillos de potencia uno en cada extremo de la impresora, la carga total F que debe de llevar el eje 'z', correspondiente al peso del eje 'x', debe dividirse entre el número de tornillos.

Suponiendo una masa aproximada de 1,5 kg en el eje 'x', obtenemos una fuerza de 15 N, con lo que la fuerza correspondiente a cada tornillo de potencia.

$$F(\text{Un tornillo}) = F(\text{Total})/2 \quad (5)$$

Para calcular el diámetro medio D_m , aplicamos la siguiente Ecuación:

$$D_m = D_M - \text{Paso}/2 \quad (6)$$

El diámetro medio, se corresponde al diámetro interno mínimo de paso de la tabla 24

El avance del tornillo, es igual:

$$l = n^{\circ} \text{ entradas} * \text{paso} \quad (7)$$

Como nuestra expresión del par de torsión está en función de Ángulo de avance o $\tan \lambda$, la expresión a utilizar es, de acuerdo con la figura 92.

$$\tan \lambda = l/\pi \cdot D_m \quad (8)$$

El caso más general es el de una rosca trapezoidal de ángulo entre flancos $2\alpha_F$ (las roscas trapezoidales o ACME tienen un ángulo entre flancos de 29° , tal como se muestra en la figura 89.

Para roscas trapezoidales el valor de $\alpha_F=14,5^{\circ}$.

Sustituyendo en las ecuaciones (3) y (4) del par torsor de subida y bajada, obtenemos los siguientes valores utilizando el rango de coeficientes de fricción de plásticos mostrado en la tabla 26.



Los resultados obtenidos son:

Tabla 28. Valores obtenidos de par de torsión de bajada – subida.

Tr 8x1.5			Tr 10x2		
Iglidur J	μ (mínimo)	0,08	Iglidur W300	μ (mínimo)	0,08
	μ (máximo)	0,18		μ (máximo)	0,23

Ts (Par de Torsión de subida)			Ts (Par de Torsión de subida)		
Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo	
4,059	6,930	N·mm	5,207	10,583	N·mm

Tb (Par de Torsión de Bajada)			Tb (Par de Torsión de Bajada)		
Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo	
0,454	3,225	N·mm	0,399	5,537	N·mm

$T_b > 0$, el tornillo es autoasegurante (se requiere un par para hacer descender la carga).

$T_b < 0$, el tornillo no es autoasegurante (la carga desciende por sí sola, a menos que se ejerza un par que se oponga al movimiento).

En los resultados obtenidos observamos que para cualquiera de los husillos, el eje 'x' no descenderá por gravedad, una vez desconectados los motores.

Por otro lado los pares obtenidos, aun para rozamientos máximos, son insignificantes, ya que los motores de nuestra impresora (NEMA 17) tienen un par de subida aproximado de 0,3 N·m (Parámetros obtenidos del Datasheet)

El efecto autoblocante, el motor lo realiza mediante el enclavamiento eléctrico de los dos bobinados, garantizando un alto par de detención, alrededor de 0.014 N·m (Parámetros obtenidos del Datasheet)

Se verifica que el par motor es adecuado a pesar de estar sobredimensionado.

A continuación calcularemos la eficiencia mediante la siguiente expresión:

$$e = \tan\lambda \frac{1 - \frac{\mu \tan\lambda}{\cos\alpha_F}}{\tan\lambda + \frac{\mu}{\cos\alpha_F}} \quad (9)$$



Sustituyendo en la ecuación 9, obtenemos los siguientes rendimientos para subir la carga de cada tornillo de potencia.

Tabla 29. Valores obtenidos de eficiencia

Tr 8x1.5		Tr 10x2		
Iglidur J	μ (mínimo)	0,08	Iglidur μ (mínimo)	0,08
	μ (máximo)	0,18	W300 μ (máximo)	0,23

e (Eficiencia Tornillo)		e (Eficiencia Tornillo)	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
44,11	25,84 %	45,85	22,56 %

Parte del trabajo realizado en una transmisión de tornillo de potencia se entrega al sistema que se está accionando, pero otra parte se pierde en forma de calor, debido a la fricción en los flancos. Este es el principal motivo por el que los rendimientos obtenidos sean bajos.

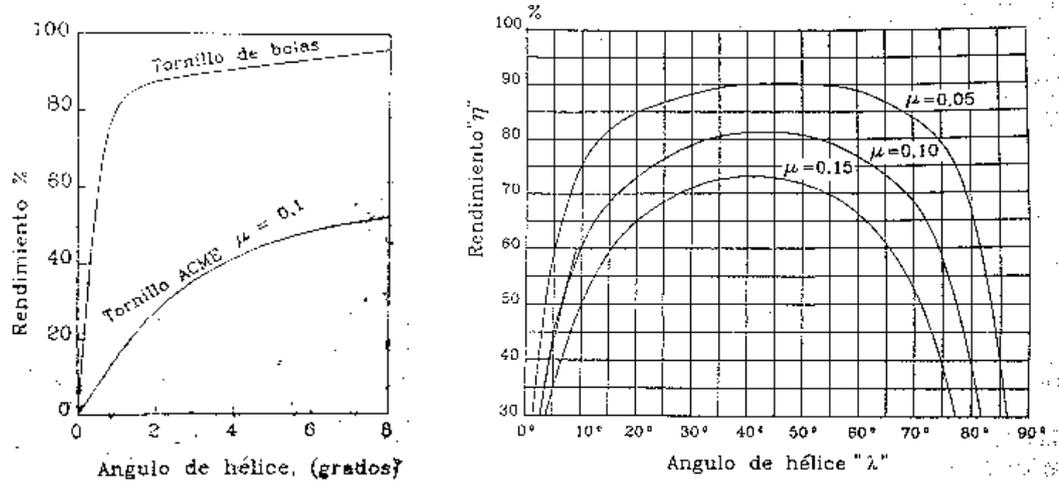


Figura 93. Gráficos de rendimientos para tornillos trapecoidales.

Se logran eficiencias mucho mayores con tornillos de bolas, los cuales poseen un tren de balines que ruedan sobre el tornillo y la tuerca. Como la fricción es rodante, las pérdidas son mínimas.

El gran inconveniente de este tipo de elementos de bolas es el alto coste económico.



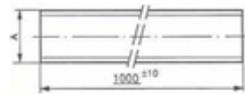
2. Varilla roscada - Tuerca.

Esta solución se basa en la mejora de materiales y calidades y no requiere de ninguna modificación en el eje 'z', ya que respetaremos el tipo de métrica, por no existir ningún tipo de problema comercial.

- Características Varilla roscada

Para este tipo de elementos mecánicos, el tipo de roscado utilizado es el perteneciente a la Norma DIN 975 [19], roscado clásico.

Según la norma DIN 975 para una Métrica 8 tenemos un paso de 1,25 y un roscado a izquierdas.



A	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	M52
Paso	0,4	0,5	0,7	0,8	1	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5

(Todas las medidas están expresadas en mm.)

Figura 94. Métricas correspondientes a la norma DIN 975

El material a utilizar será acero inoxidable, ya que las varillas utilizadas actualmente, acero cincado, son las varillas de peor calidad y peor mecanizado.

- Características tuerca.

La forma de la tuerca a utilizar será hexagonal normativa DIN 934, ya que cualquier otra forma, requerirá un nuevo diseño de las piezas de la impresora. En cuanto al materia utilizado al igual que en la solución anterior se requerirá de un material con una dureza menor y un coeficiente de rozamiento bajo.

Para esta solución según la disponibilidad y el precio utilizaremos tuercas de latón o bronce de forma hexagonal.



8.2. Mejoras aplicadas al eje ‘y’

Descripción

El eje ‘y’ es el encargado de proporcionar movimiento a la cama caliente de la impresora, de este movimiento se encarga un motor paso a paso el cual mediante una correa y un rodamiento axial en el extremo opuesto convierte el movimiento angular del motor en lineal de la cama, ya que la correa se encuentra sujeta a una plancha inferior rectangular metálica que sostiene cuatro piezas donde van introducidos 4 rodamientos lineales.

Esta plancha inferior metálica es guiada mediante 2 varillas lisas en paralelo, introducidas en 4 rodamientos lineales, 2 rodamientos por varillas.

En los vértices de la plancha inferior van colocados, en el interior de 4 tornillos 4 muelles. Estos muelles sirven de soporte a otra plancha superior cuadrada de aluminio, encima de la cual irá la cama caliente.

La finalidad de los muelles es la de proporcionar variación en altura a la cama caliente con respecto a la punta del *hot end*, pudiendo realizar un ajuste rápido a la hora de calibrar.

Como hemos visto anteriormente, la cama caliente está asociada al eje ‘y’ que continuamente se está moviendo en la impresión, ya que otras impresoras como Ultimaker, Replicator poseen una cama caliente “fija” que es desplazada de arriba hacia abajo por el eje ‘z’ o en el caso del modelo Rostock totalmente fija en la parte inferior de la impresora, ya que este modelo de impresora correspondería a una configuración Delta en robótica y no a una cartesiana.

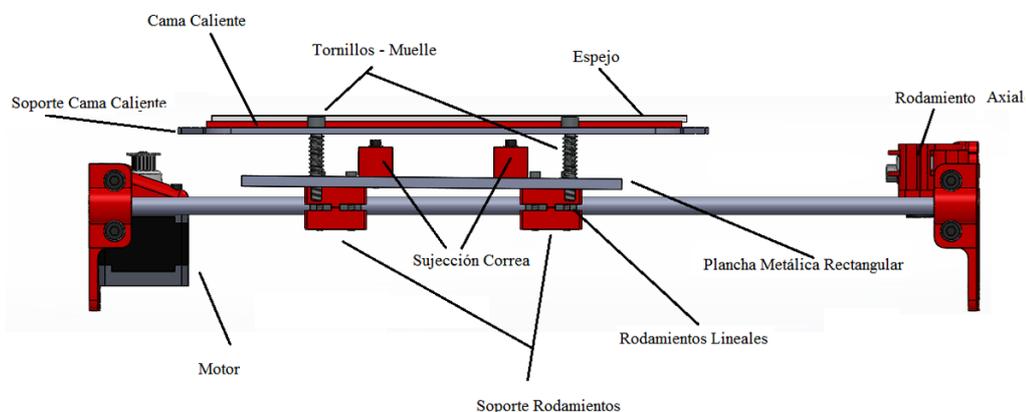


Figura 95. Composición de las diferentes partes Eje ‘y’



Problemática I. Paralelismo y linealidad entre varillas guía:

Comentarios

Se ha observado al igual que en el eje 'z', como las vibraciones, el uso y el ahorro de materiales en el diseño afectan al paralelismo de las varillas guías, afectando a su vez a los soportes de los rodamientos.

Una vez producida esta falta de paralelismo los rodamientos tienden a seguir a la varillas, lo que a su vez hace que la unión mediante tornillo – turca de los soportes, se afloje y produzca la caída de las tuercas.

Este desprendimiento de las tuercas produce unas grandes vibraciones en la cama caliente además de su desnivelamiento.

Acciones correctoras

La solución requerida para la eliminación del problema surgido por la falta de paralelismo y linealidad de las varillas guía se basa en la sustitución de estas por un guiado mediante railes o guías pre-alineadas.

En el caso de las varillas guía la desalineación da lugar a fuerzas de fricción inconsistentes, lo que afecta al suave movimiento requerido por la cama caliente.

Este sistema de movimiento mediante railes está diseñado para la eliminación de la falta de paralelismo, proporcionando unos rozamientos mínimos.

Para esta sustitución se ha elegido un riel con perfil de aluminio en V o W, rodadura integrada en el perfil y cojinetes deslizantes de rodillo, de esta manera se evitarán problemas de ajuste a la hora de instalarlo en el perfil actual de la impresora.

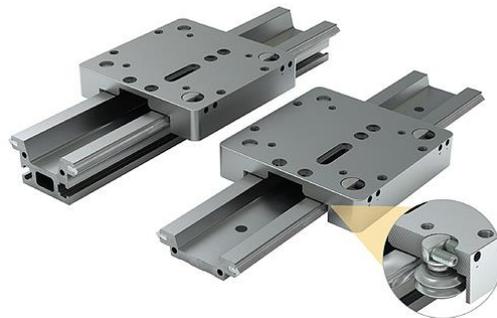


Figura 96. Sistema industrial de guías pre-alineadas con perfil en V



Como inconveniente cabe destacar que debido a las amplias dimensiones tanto del soporte, como de la cama caliente será necesario la instalación de dos rieles en paralelos.

Para la instalación del riel se requerirá del diseño de dos piezas en T, para la unión con el perfil actual que conforma la impresora, también será necesario el ajuste y la alineación de los orificios de los tornillos de la plancha inferior rectangular con respecto a los de la plataforma móvil del riel.

Debido al alto coste de esta mejora se ha optado por un guiado menos industrial.

El guiado mediante railes que se propone a continuación está diseñado exclusivamente para la implantación en prototipos de impresoras 3D y máquinas CNC, ya que el problema surgido en nuestra impresora es un problema común en este tipo de máquinas.

Esta opción de mejora consiste en la implantación de un carril abierto en un perfil de aluminio en V (compatible con todas las marcas existentes y dimensiones), como el actual que forma la estructura de la impresora.

Este perfil de aluminio puede ser de diferentes dimensiones, teniendo un amplio abanico a la hora de elegir.

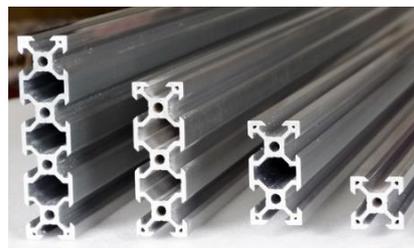


Figura 97. Perfiles de Aluminio en diferentes configuraciones

El carril o riel lineal abierto irá atornillado en los extremos del perfil, proporcionando un guiado lineal al movimiento de la plataforma.

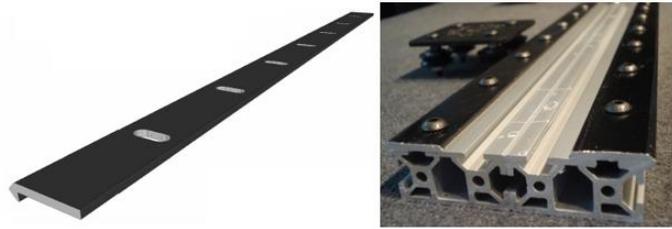


Figura 98. Izq.: Riel lineal abierto. Dcha.: Instalación del riel en un perfil de aluminio

Unido a este riel de rodadura irá conectado una serie de ruedas o rodamientos tanto metálicos o plásticos, que irán atornillados a una plataforma de las dimensiones requeridas.

Tanto las dimensiones de la plataforma, como el número de ruedas introducidas en el montaje son de nuestra elección. La ventaja de este modelo de carril radica en el fácil montaje, ya que al constar nuestra impresora de un perfil idéntico al sugerido en esta mejora, las piezas de unión del carril guiado con el perfil de la estructura de la impresora no requieren de un diseño por estar ya implementadas.

La pieza de unión que se requerirá en el montaje del rail es la siguiente pieza en T.

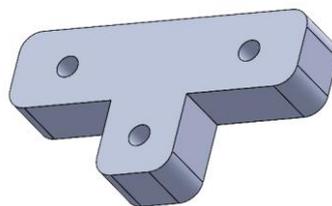


Figura 99. Pieza de unión a estructura (*Lower ZT*)

Esta pieza en T está instalada actualmente en nuestra impresora uniendo dos perfiles perpendiculares en la base de la impresora, sirviendo este para proporcionar rigidez a la estructura.

Al contrario que la opción barajada anteriormente este montaje no requiere de dos carriles lineales, ya que a la hora de elegir optaremos por unas dimensiones adecuadas a la plataforma inferior metálica rectangular con la que estamos trabajando.

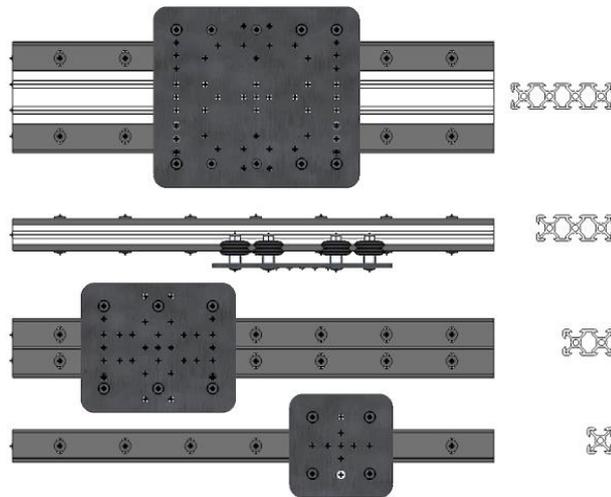


Figura 100. Diferentes configuraciones de Eje 'y'

Otra ventaja importante a la hora de realizar la compra de los componentes es el amplio número de distribuidores, siendo el más cercano en Barcelona (<http://openbuilds-partstore.com/>), con lo que el coste económico a la hora de realizar un posible pedido es mucho menor.

Problemática II. Inercias

Comentarios

Otro problema que se ha observado es la incapacidad de decelerar por parte del eje 'y', esto es debido a la alta inercia en los cambios de sentido a la hora de imprimir.

Debido a esta inercia la cama caliente pierde su posicionamiento, produciendo errores de alineamiento de capas en la impresión.

Una manera temporal de evitar los cambios bruscos de sentido y así la inercia producida, es la disminución de la velocidad de impresión.

Acciones correctoras

La solución requerida para la eliminación del problema surgido por la inercia es la eliminación de masa en las planchas de soporte superior e inferior.



El problema de las inercias obtenidas a la hora de imprimir, es causa de las planchas metálicas, tanto de la plancha rectangular que sostiene los soportes de los rodamientos, como de la plancha cuadrada que soporta la cama.

Estas planchas aun siendo de aluminio contienen una masa considerable debido a su tamaño y a su grosor.

Se ha comprobado que este diseño no es el diseño de serie que trae los modelos similares creados en Barcelona, siendo una modificación realizada por los proveedores que nos suministraron la impresora.

Para poder realizar una eliminación de material de las planchas de soporte se requerirá de un mecanizado especial debido al alto grado de dificultad que requiere el corte del aluminio.

Como solución se propone el cambio de material a acero inoxidable con un grosor de placa mucho menor que el actual y un diseño mucho más ligero.

La figura 101 muestra un ejemplo diseño de placa inferior rectangular más adecuado para la impresora.

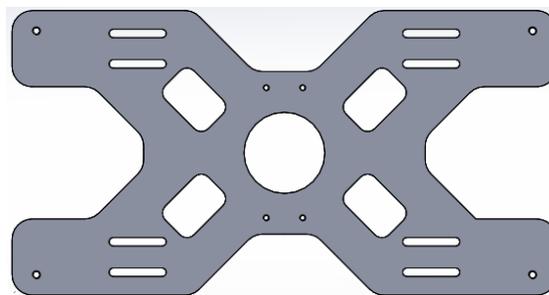


Figura 101. Diseño soporte inferior.

Para el diseño del soporte de la cama caliente se propone una disminución de las medidas actuales tanto en longitud, anchura y altura, ya que estas están bastante sobredimensionadas para la cama caliente.

Con respecto al material se elegirá acero inoxidable, debido a su bajo coste económico y sus ventajas de mecanizado.



8.3. Mejoras aplicadas al extrusor

Descripción

El extrusor se torna dispuesto en una base la cual se desplaza mediante 3 rodamientos lineales por el Eje 'x' de la impresora.

El extrusor consta de un motor paso a paso que mueve un tornillo en el cual han sido mecanizadas una serie de hendiduras para proporcionar de cierto agarre al hilo de plástico.

Mediante este tornillo llamado *Hobbed Bolt* (DIN 933 M8x55 GRAF – Mecanizado), se convierte el movimiento angular del tornillo, en lineal del hilo de plástico.

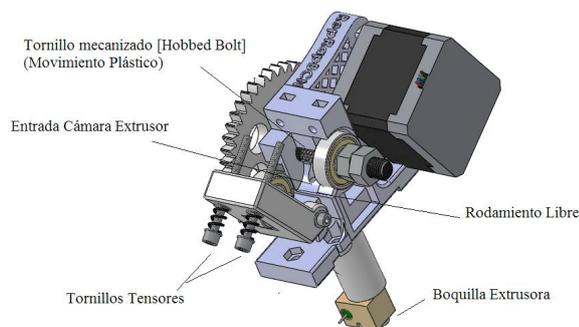


Figura 102. Composición de las diferentes partes del extrusor – *Hot end*

De esta manera el plástico es introducido a una velocidad controlada por software a la cámara de fundición del extrusor, donde se fundirá adquiriendo una constitución líquida y saliendo por presión por la boquilla.

El de *hot end* o punta caliente utilizado en la impresora, corresponde al modelo J-Head IV con cuerpo de plástico PEEK (Poliéter éter cetona)



Figura 103. *Hot end* J-Head IV con calentador y termistor NTC

El diámetro máximo de extrusión del plástico es de 0,4mm, diámetro de la boquilla de salida, siendo el diámetro de entrada de 3 mm. Diámetro utilizado en el hilo de plástico



Problemática I. Posicionamiento del hilo de plástico en la hendidura del Tornillo *Hobbed Bolt*

Comentarios

Se ha observado que debido a la tensión del hilo de plástico, este tiende a salirse de la hendidura del tornillo mecanizado *Hobbed Bolt*, lo que provoca un agarre insuficiente.

Este agarre insuficiente a la su vez provoca una mínima introducción de plástico en el extrusor, produciendo una impresión incorrecta.

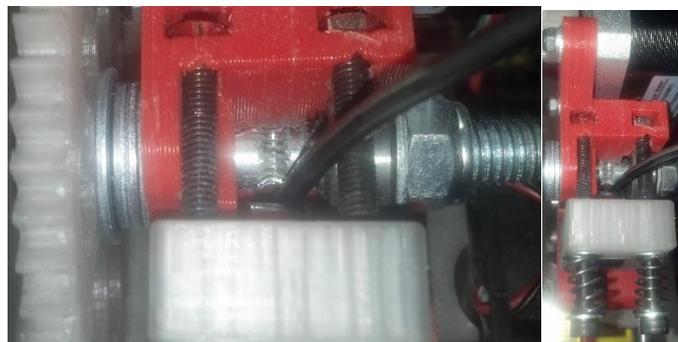


Figura 104. Perdida de guiado del plástico en la hendidura del tornillo *Hobbed Bolt*

Como se observa en la imagen, el hilo de plástico ha perdido el agarre del tornillo mecanizado, siendo necesario tener que guiar a mano el plástico en la hendidura.

Para realizar el guiado del plástico en la hendidura, es necesario, aflojar los dos tornillos tensores, y guiar a mano el plástico hasta la hendidura del tornillo *Hobbed Bolt*.

Este proceso aunque sencillo, requiere de una pérdida innecesaria de tiempo, ya que aflojados los tornillos tensores de la entrada del extrusor, y situado el plástico en su lugar correspondiente, se tendrá que realizar la calibración de presión de los tornillos tensores mediante un calibre. (Ver ensayos 7.1 – 7.2 Temperatura / Presión)



Acciones correctoras

La solución adoptada radica únicamente en la creación de un elemento que realice el guiado del hilo de plástico sobre la hendidura mecanizada en el tornillo.

De esta manera se ha llegado a las siguientes soluciones:

1. Sustitución de la pieza cuerpo del extrusor.

Este tipo de problema es muy común a la hora de imprimir, con lo que mediante una búsqueda por la red, se han encontrado una gran variedad de piezas de acople que pueden evitar este problema.

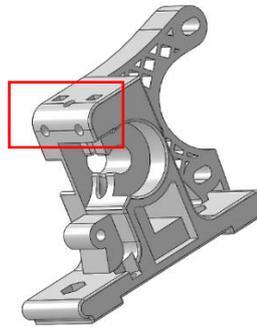


Figura 105. Cuerpo de extrusor con guiado del plástico

Aunque esta solución es muy válida, se desestima, debido al alto tiempo de impresión y al tiempo que requiere sustituir la pieza, ya que la impresión de la pieza, se estima en aproximadamente 5 horas, además de tener como inconveniente la dificultad de realizar un mantenimiento adecuado tanto del tornillo *Hobbed Bolt* como de los demás componentes utilizados en el movimiento del hilo de plástico.

Por otro lado la creación de una sencilla pieza adicional, que proporcione el centrado del plástico, parece una solución más correcta.

2. Creación de una pieza adicional.

La creación de una pequeña pieza adicional, mediante un diseño propio, nos aporta varias ventajas, ya que además de ahorrarnos tiempo y materia prima, su diseño estará orientado al fácil mantenimiento.



Como se observa en la figura siguiente, al contrario que el diseño de la figura 106 se ha diseñado en forma de embudo, y con un único soporte, proporcionando así un desacople más rápido y una buena visualización de los posibles fallos producidos a la hora de realizar un cambio de plástico o a la hora de realizar una impresión.

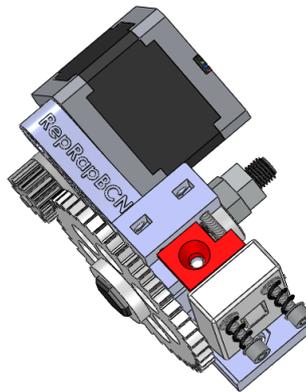


Figura 106. Vista superior del extrusor. En rojo: pieza creada para realizar el centrado del plástico en la hendidura del tornillo *Hobbed Bolt*.

Nota: Los archivos .STL y .SLDPRT relativos al proyecto de diseño de la pieza Mejora_1, se encuentran en el CD que acompaña a esta memoria.



Problemática II. Deterioro del recubrimiento PEEK del *hot end*.

Comentarios

Se ha observado un deterioro en el recubrimiento de plástico del extrusor, debido a las altas temperaturas de impresión (ABS - 235°C), así como los altos tiempos que ha estado la impresora en funcionamiento.

Este plástico PEEK o poliéter éter cetona es un polímero orgánico termoplástico utilizados en aplicaciones de ingeniería, que ofrece una combinación única de altas propiedades mecánicas, resistencia a la temperatura y excelente resistencia química.

El rango de temperaturas recomendable de este plástico es aproximadamente de -50°C a 275°C.

Como se observa en la figura 107 la máxima temperatura se adquiere en la zona final del extrusor, teniendo la zona media-alta forma de disipador, ya que la entrada del filamento a la cámara de extrusión requiere de una conservación de temperatura y rigidez para poder ser traccionado.

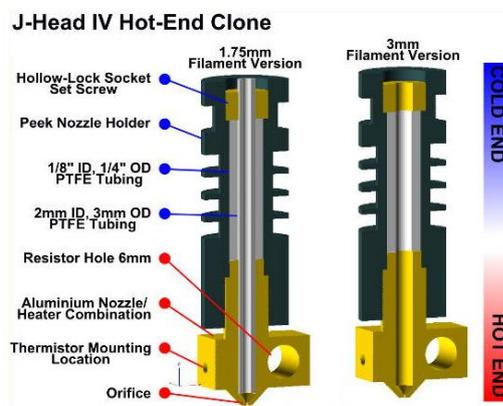


Figura 107. Diferentes partes del *hot end* J-Head IV

Si no se mantiene esta variación de temperaturas a lo largo del cuerpo del extrusor, es posible, que se produzcan reflujos en el plástico, pudiendo provocar atascos.



Acciones correctoras

La solución adoptada consiste en la incorporación de un ventilador en el carril del eje 'x', de esta manera proporcionaremos un flujo de aire constante al cuerpo del extrusor, incrementando la vida útil de este.

1. Incorporación de ventilador 40x40 cm

El carril del eje 'x', viene preparado con 2 orificios de 3mm de diámetro, para poder incorporar la mejora mencionada anteriormente, pero debido al modelo de *hot end* existe un problema de altura, ya que como se observa en la figura 108, la altura una vez colocado el ventilador es mayor a la del extrusor.

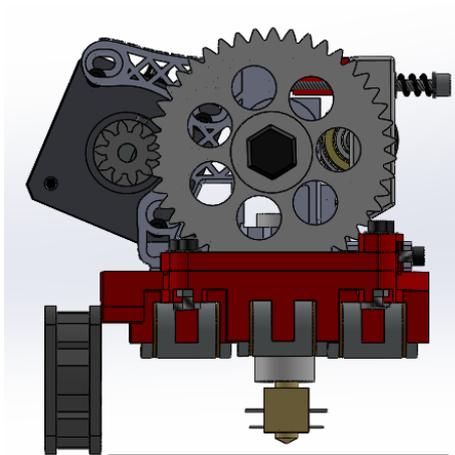


Figura 108. Problema en la colocación del ventilador debido a los orificios de los tornillos

Debido a este problema es imposible que se produzca la impresión, ya que el ventilador chocara con la cama.

Otro problema que existe es la orientación del flujo de aire, ya que queremos que este orientado a la parte superior del cuerpo del *hot end* y no a la parte del calentador.

Para poder solucionar este problema se ha diseñado una pieza adicional, que mediante su sujeción al carro del eje 'x', produzca una pequeña elevación del ventilador, así pues se ajustará a la altura adecuada, proporcionando un flujo de aire a la zona superior mediante una pequeña tobera y no a la zona del calentador. Ver figura 109

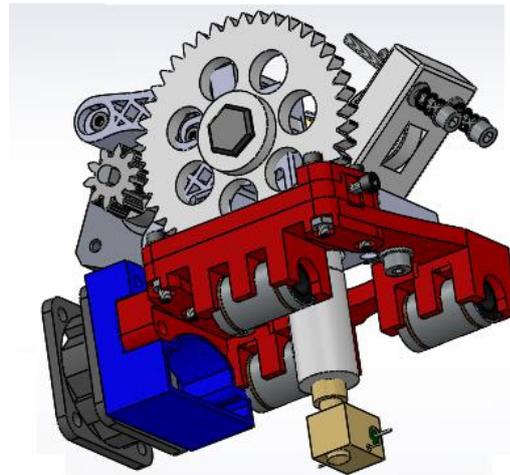


Figura 109. Pieza de adaptación para refrigeración de la parte superior del *hot end*.

Nota: Los archivos .STL y .SLDPRT relativos al proyecto de diseño de la pieza Tovera_1, se encuentran en el CD que acompaña a esta memoria.

A continuación se mostrara la conexión del ventilador a la placa electrónica Ramps 1.4 (Escudo colocado encima de la placa Arduino Mega).

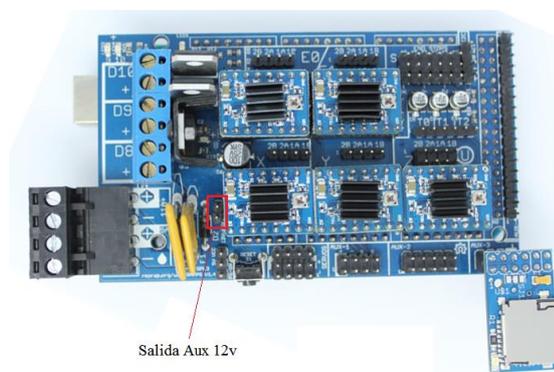


Figura 110. Conexión del ventilador a la placa Ramps 1.4

Este ventilador no requiere de ninguna programación en el firmware de la controladora, ya que está conectado a una salida auxiliar que proporciona una tensión de 12v, de esta manera el ventilador permanecerá encendido siempre que la placa Ramps 1.4 esté conectada a tensión.



8.4. Mejoras aplicadas a la electrónica de la placa Ramps

Descripción

RAMPS - RepRap Arduino Mega Pololu Shield board.

La versión de shield utilizada en nuestra impresora 3D es la versión 1.4, diseñada para manejar un microcontrolador con un Arduino Mega 2560. Usa controladores de drivers para motores paso a paso Pololu con una precisión de hasta 1/16 micropasos.

Cuatro controladores son necesarios para mover la gran mayoría de impresoras 3d, como la utilizada en nuestro caso, tres se usan para mover los ejes y uno para manejar el extrusor.

Una quinto controlador opcional se puede usar para aplicaciones adicionales como el manejo de un segundo extrusor.

Esta placa incluye elementos electrónicos tradicionales (con orificios) y de montaje en superficie (SMT).

Esta placa dispone de la licencia de código abierto hardware GPLv3

Sus características principales son:

- Dimensiones placa: 102mm x 60mm
- 3 PWM salidas mosfet controladas
- Control de cama caliente con fusible
- 3 circuitos de thermistor
- 5 sockets Pololu Stepper Driver
- 6 pares de pines para finales de carrera
- Usa un bloque de terminales enroscables con tornillos para la conexión de corriente (Bornero)
- Fusible de 5A para seguridad adicional y protección de los componentes
- Pines extra: PWM, digital, serial, SPI, I2C and analógico



Problemática I. Elevación de la temperatura de la placa Ramps 1.4

Comentarios

Se ha observado que tras varias horas de impresión ininterrumpidas, la placa electrónica Ramps 1.4 tiende a calentarse mucho.

Esta elevación de la temperatura puede llevar a producir una destrucción de diferentes componentes electrónicos, con lo que se han medido con un termómetro laser las diferentes partes de la placa, obteniendo las siguientes temperaturas tras 18 horas de impresión ininterrumpida en plástico ABS.

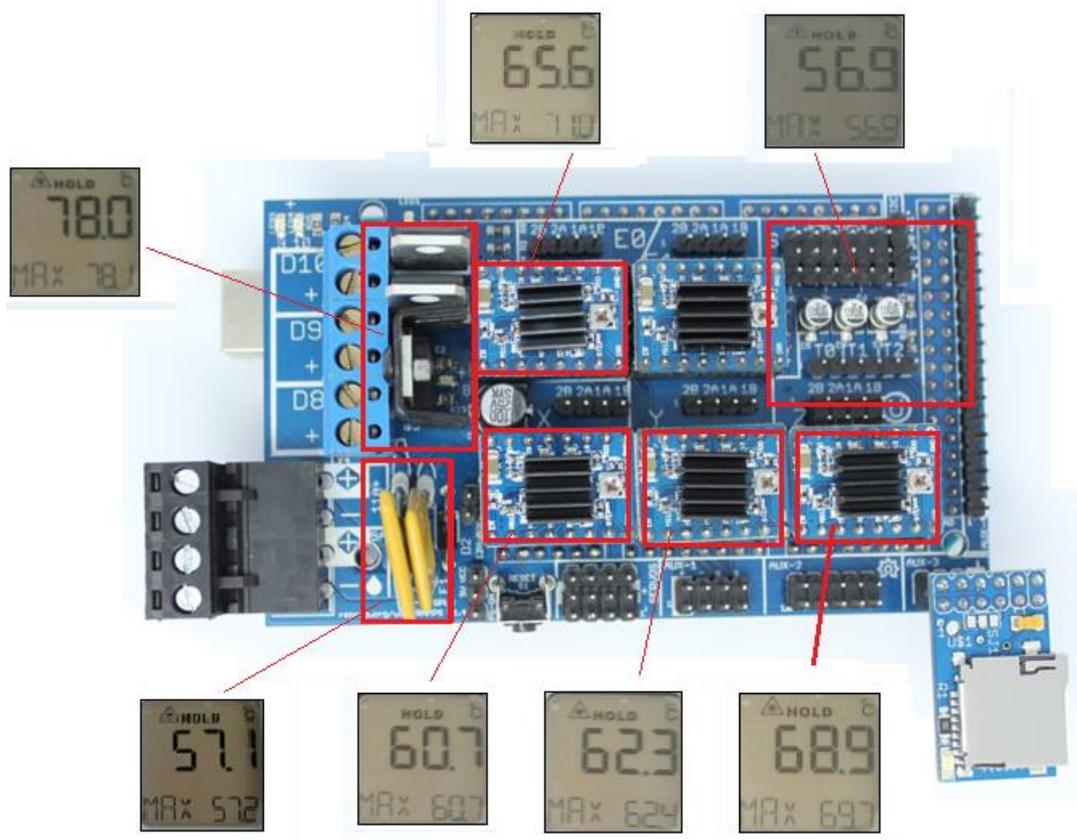


Figura 111. Lectura de temperaturas de la placa electrónica Ramps

Cabe destacar que estos valores de temperatura son orientativos y aproximados, ya que el error del aparato de medida es de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

En las diferentes mediciones existen dos valores relativamente altos con respecto a todos los demás, nuestro estudio de soluciones, se basará en estos valores ya que debido a sus temperaturas empiezan a ser críticos.



Se observa que para los valores de temperatura más altos en los diferentes elementos electrónicos existen disipadores o radiadores diseñados para paliar los efectos de las altas temperaturas.

Se ha observado que debido a los altos tiempos de impresión y al desgaste prolongado de los componentes de la impresora, parte de la electrónica sufre de calentamiento.

Los valores anteriores se han medido en las peores circunstancias posibles, ya que la impresión de plástico ABS, requiere de mayor temperatura tanto en la punta del extrusor como en la cama caliente. Este aumento de temperatura a la hora de imprimir se corresponde a un aumento de corriente y de esta manera de temperatura en la placa electrónica.

Este calentamiento es más alto en dos zonas de la placa Ramps, la correspondiente al driver de control de los motores del Eje 'z' y la etapa de potencia, encargada de conmutar la corriente hacia el *hot end* y la cama caliente.

Con respecto al driver del motor del eje 'z', el calentamiento es asumible y lógico, ya que existe un solo driver de control para dos motores, lo que implica el doble de consumo de corriente, aumentando por este motivo la temperatura.

De este modo nos centraremos en la etapa de potencia, en concreto en el transistor Mosfet el cual lleva incorporado un radiador, ya que se ha observado que este transistor aun incorporado un disipador de aluminio es el que más caliente se encuentra.

Antes de optar por una serie de soluciones, el problema requiere de un estudio más profundo.



Estudio de soluciones

El estudio de soluciones se centrará en la etapa de potencia, más concreto en el bloque de conmutación de potencia de la cama caliente.

Simularemos mediante Orcad Spice las condiciones reales de control de la cama caliente de la placa Ramps1.4. El elemento que se encarga de esta tarea es un transistor Mosfet de potencia de canal N [Modelo: STP55NF06L]



Figura 112. Transistor STP55NF06L con encapsulado TO-220

La librería del transistor Mosfet canal N STP55NF06L para poder realizar la simulación, la obtenemos de la página web del fabricante STMicroelectronics [http://www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM100/CL824/SC1165/PF64759#]

El modelado de la placa Ramps 1.4 correspondiente a la parte de conmutación de potencia de la cama caliente es el que se muestra en la figura 113.

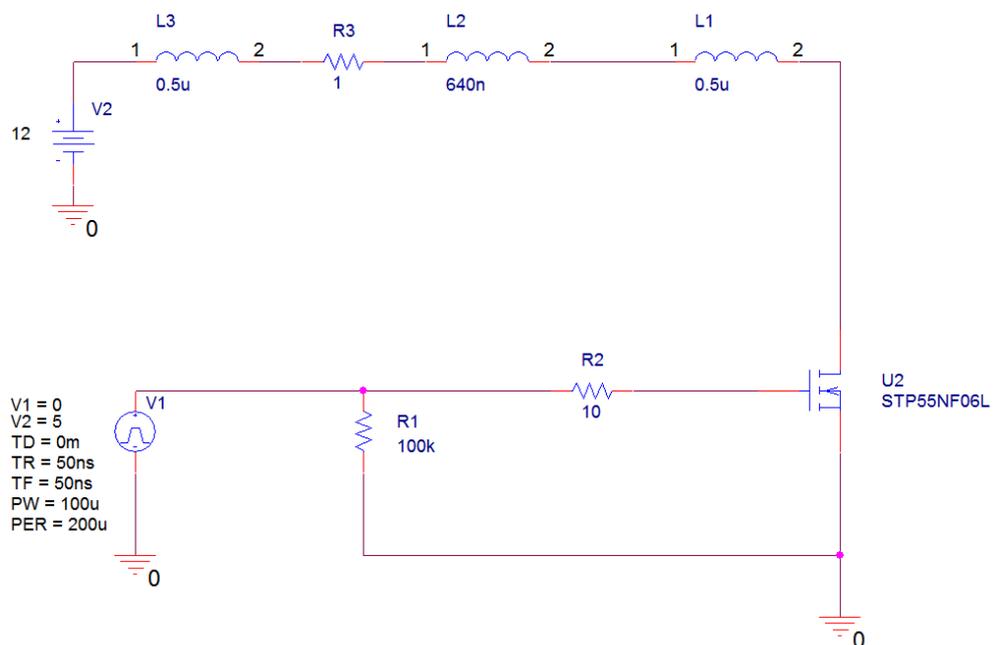


Figura 113. Circuito de Simulación de la cama caliente en la placa electrónica Ramps



Tabla 30. Diferentes elementos utilizados en la simulación de la cama caliente en la placa Ramps

Elemento	Finalidad
V1	Fuente generadora de tren de impulsos – Simula pin Salida de Microcontrolador Arduino Mega 2560
V2	Fuente de Alimentación
R1	Resistencia Pull Down, evita entradas de alta impedancia
R2	Resistencia de puerta- Reduce la corriente de carga del condensador de V_{GS}
L1	Inductancia extremo de cable Cama Caliente (AWG 18 1uH x metro)
L2	Inductancia Cama Caliente MK2
R3	Resistencia Cama Caliente MK2
L3	Inductancia otro extremo de cable Cama Caliente (AWG 18 1uH x metro)
U2	Transistor Trabajando en Conmutación [V_{DS} : 60v - R_{DS} : 0,014 – Id: 55A]

La simulación realizada en Pspice se realizará en el dominio del tiempo, obteniendo diferentes gráficas tanto de tensión como de corriente en los puntos clave del circuito.

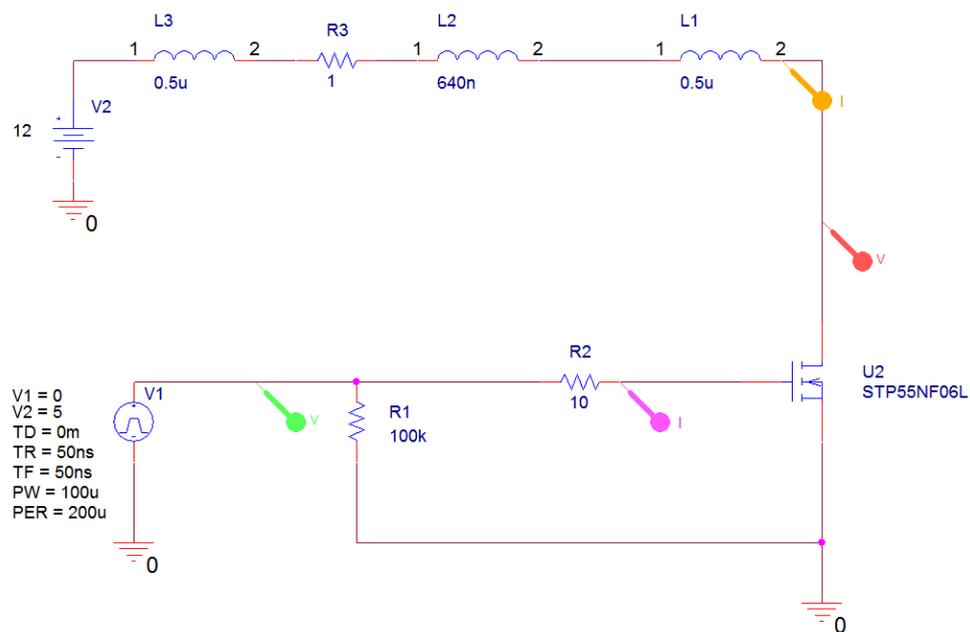


Figura 114. Situación de las sondas introducidas en el circuito para la simulación.



La primera simulación se centrará en el comportamiento de VDS (drenador - fuente) del transistor a la hora de realizar la conmutación.

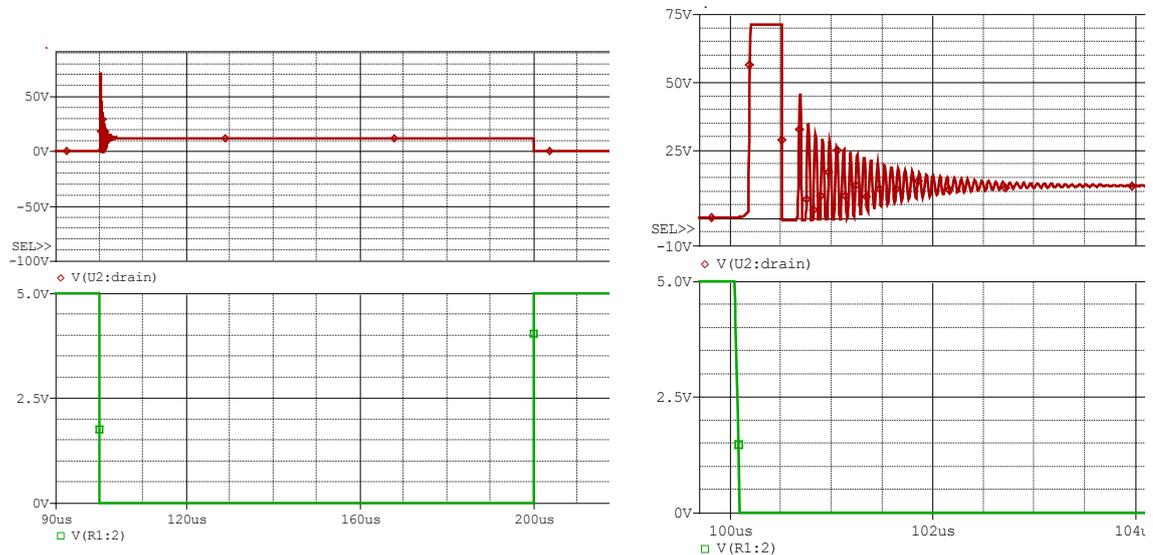


Figura 115. Comportamiento de la tensión VDS en el circuito de control de la cama caliente

Se observa el comportamiento del microcontrolador en el Gráfico verde, simulado por una fuente pulsada de 0-5v, mientras que la respuesta drenador-fuente del transistor se muestra en el gráfico de color rojo.

Como se puede observar el transistor Mosfet muestra una oscilación con un Pico de tensión en el corte de conmutación, esta oscilación es de aproximadamente 73v.

Esta tensión es creada por el componente inductivo de las bobinas cuando se realiza el corte en la puerta del transistor mediante la fuente pulsada.

Las características del transistor STP55NF06L muestran una tensión máxima de funcionamiento drenador - fuente de 60v muy por debajo del valor obtenido en la simulación.

A continuación observaremos la respuesta en corriente del drenador.



En la siguiente simulación observaremos la respuesta en corriente de la cama caliente o entrada del drenador del transistor, en función del tren de pulsos que nos proporciona la fuente V1.

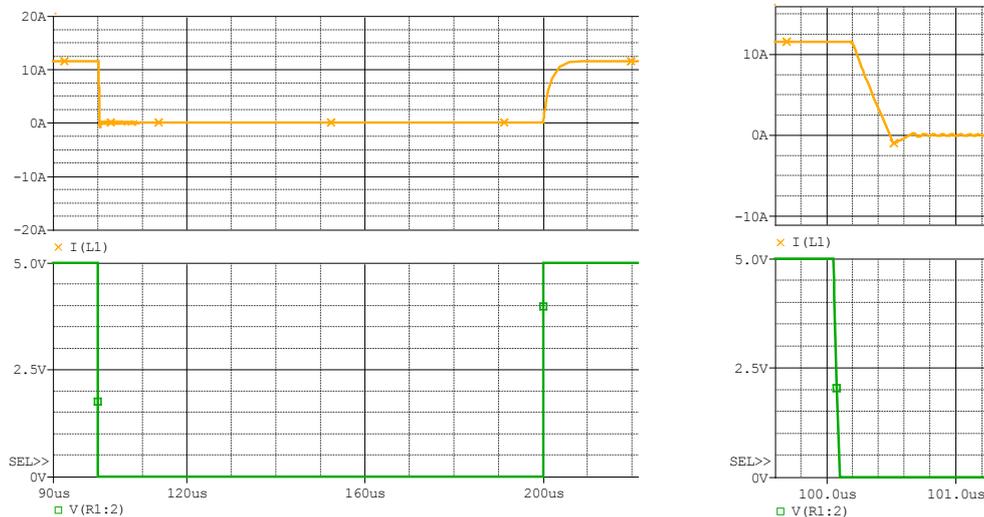


Figura 116. Comportamiento de la corriente de drenador I_d en el circuito de control de la cama caliente

Se observa como la corriente cae hasta valores negativos de aproximadamente -1,2A, en el flanco de bajada.

Esta corriente rápidamente empieza a oscilar recuperándose y estabilizándose en un tiempo de 2us.

Como podemos deducir de las dos simulaciones anteriores, existe un problema de diseño en el transistor, ya que estamos trabajando fuera del rango del fabricante, comprometiendo gravemente la electrónica de nuestra impresora.

Otro aspecto importante que simularemos a continuación es la entrada de corriente en la puerta del transistor, la cual teóricamente en régimen estático tiene que ser cero, por ser un dispositivo controlado por tensión.



La última simulación corresponde a la corriente en puerta del transistor Mosfet, la cual teóricamente en régimen estático deberá de ser cero aunque nuestro circuito se encuentra trabajando en régimen dinámico con lo que encontraremos fluctuaciones de corrientes.

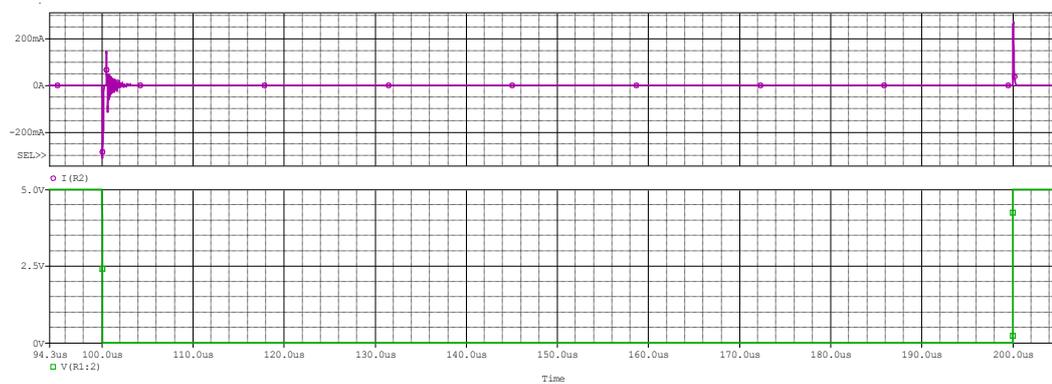


Figura 117. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el circuito de control de la cama caliente

Para una mejor comprensión de la figura anterior trataremos por separado el comportamiento de la corriente de puerta en el flanco de bajada y el flanco de subida.

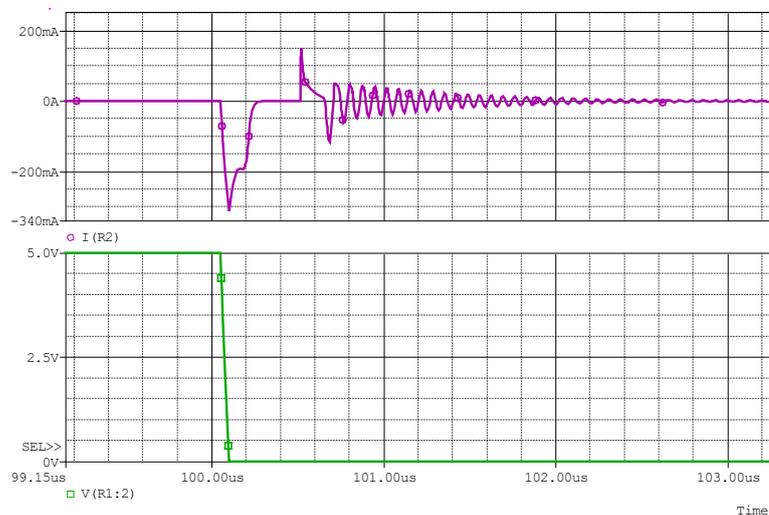


Figura 118. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación

Se observa como en el ciclo negativo o flanco de bajada, la corriente obtiene un pico negativo de aproximadamente -300mA, rápidamente oscila estabilizándose.

La duración de este proceso es relativamente corta 2us, pero afecta a la salida del microcontrolador ya que esta corriente fluye desde el Mosfet hacia el microcontrolador



En el flanco de subida en cambio, observamos lo siguiente.

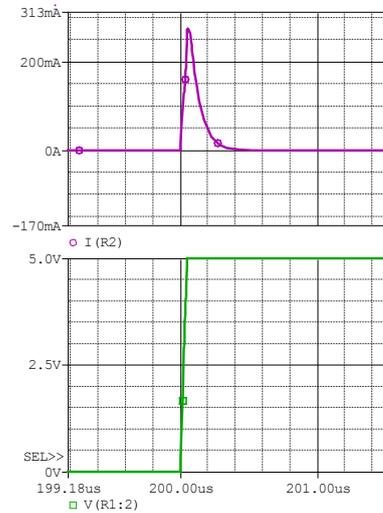


Figura 119. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación

En el flanco de subida, la corriente adquiere un valor cercano a los 300mA, la cual fluye desde el la salida del micro hacia el transistor Mosfet.

Estos valores obtenidos en la simulación no son críticos, aunque van a suponer unos acoples de ruidos en la alimentación del microcontrolador que se van a propagar por los bloques de entrada – salida de la placa.

Este diseño es erróneo y compromete varios elementos importantes de la electrónica de la impresora, no solo el propio transistor, ya que la placa Arduino Mega 2560 suministra y recibe picos de corriente que aunque no muy importantes podrían llegar a dañarla.

Con la simulación hemos descubierto cual es el problema térmico del transistor, ya que al trabajar en conmutación con valores de pico de VDS de alrededor de un 20% mayores a su funcionamiento máximo este transistor está recalentándose.

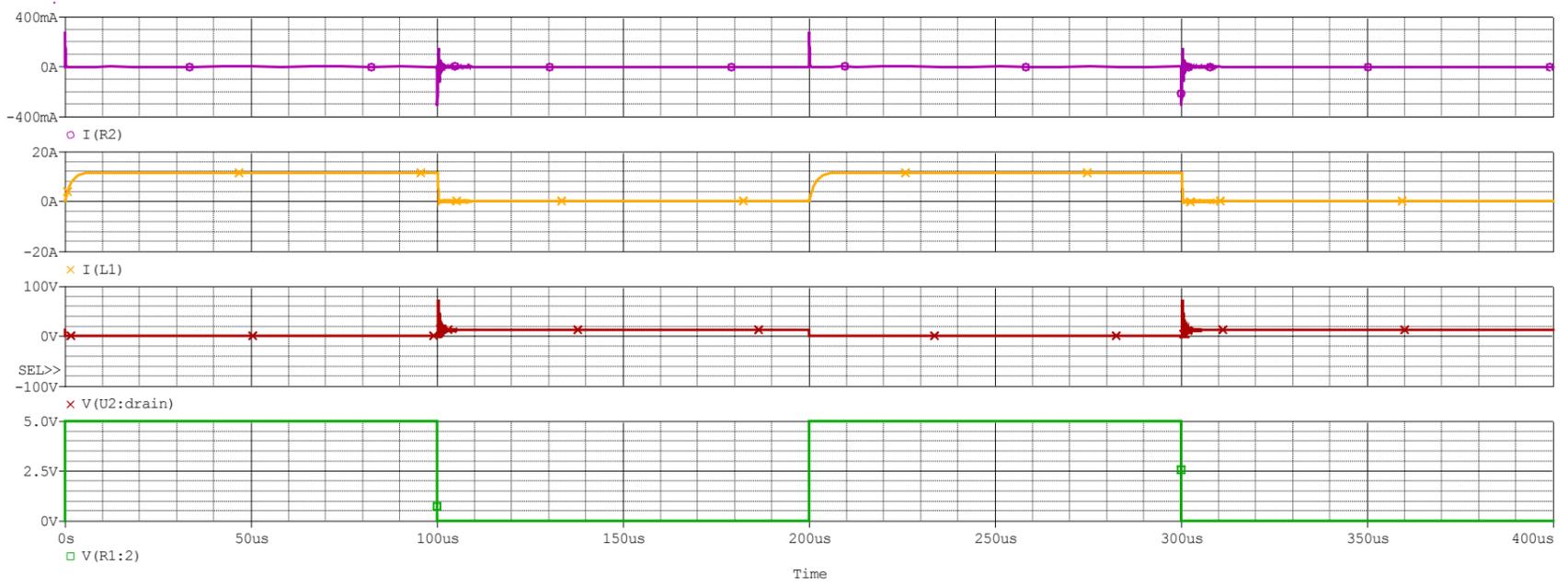


Figura 120. Gráfica de simulacion inicial de dos periodos

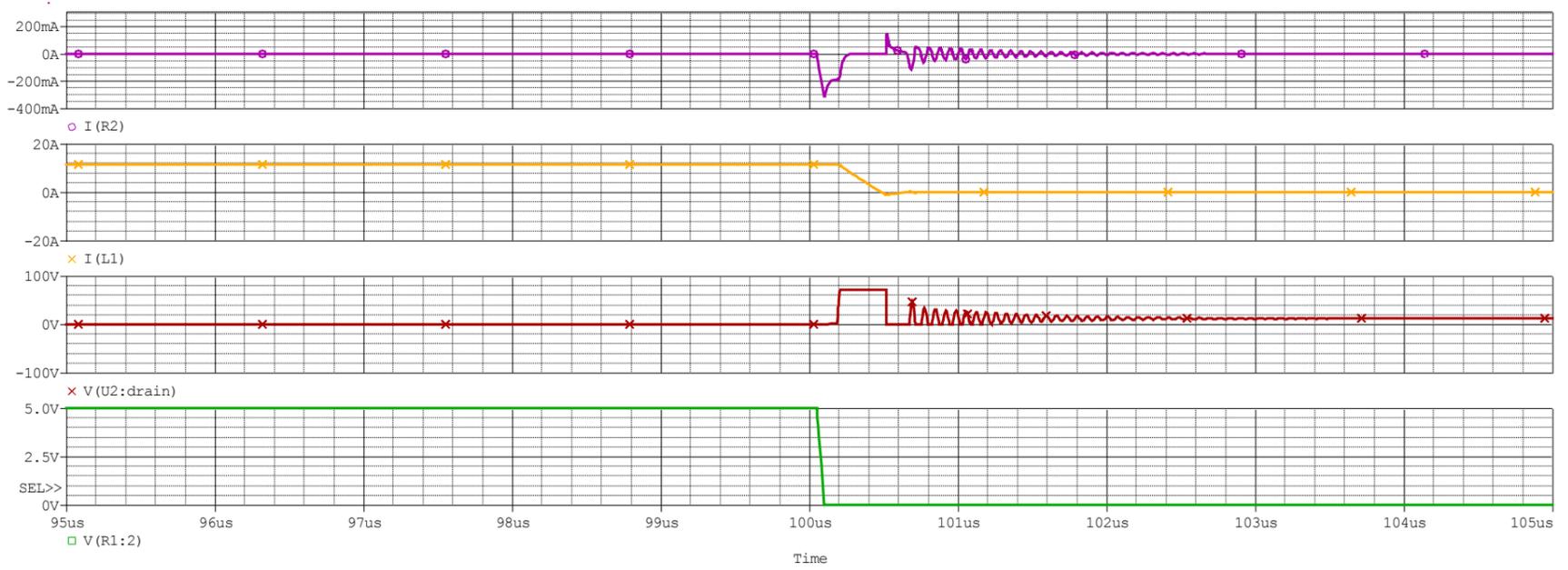


Figura 121. Gráfica de simulacion inicial del flanco de bajada

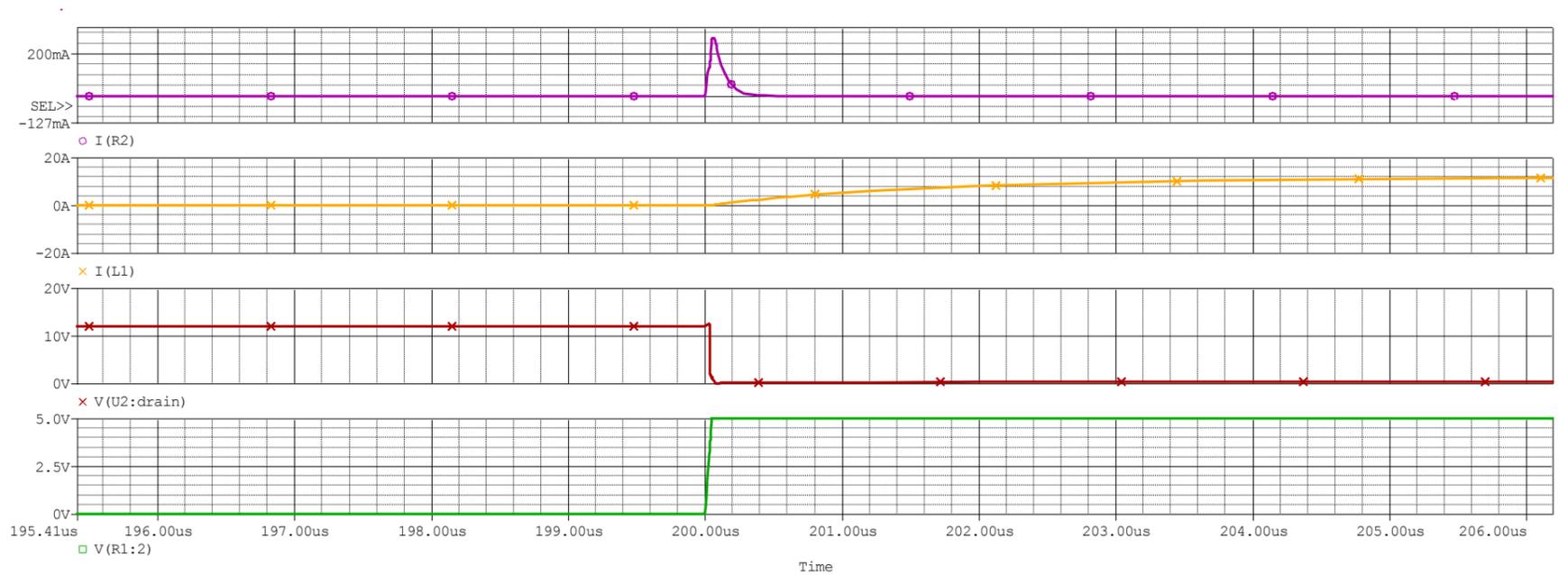


Figura 122. Gráfica de simulacion inicial del flanco de subida



Acciones correctoras

Las soluciones adoptadas para el problema térmico del transistor Mosfet y de la placa Ramps en general, son los siguientes:

De esta manera se ha llegado a las siguientes soluciones para el transistor Mosfet.

Sustitución del modelo de transistor STP55NF06L

Como se ha demostrado en las simulaciones anteriores, el transistor que ofrece la placa electrónica Ramps 1.4 no es el adecuado.

Este problema es debido a una mala elección del transistor, ya que trabaja a valores superiores de los máximos estipulados por el fabricante.

De esta manera se ha realizado una búsqueda de un transistor más adecuado, obteniendo como resultado el modelo STP60NF10, el cual nos ofrece unos valores mucho mayores.

Tabla 31. Tabla comparativa.

	VDS	ID (25°C)	ID (100°C)	RDS (ON)	Ptot dissipation
Modelo: STP55NF06L	60	55	39	0.015	95 W
Modelo: STP60NF10	100	80	66	0.019	300 W

El transistor STP60NF10, al ser un modelo más alto de gama, cumple de manera satisfactoria todos los requisitos eléctricos requeridos.

Incorporación de un diodo Schottky

Se ha incorporado al montaje anterior, un diodo de Freewheelin o volante.

La conexión de este diodo se utiliza para eliminar la repentina subida de tensión vista a través de una inductancia de carga. Al conecta el diodo Schottky MBR1100RL en antiparalelo con la inductancia de la cama caliente observaremos la rápida estabilización de la tensión VDS como de la corriente Id del transistor Mosfet.



Los puntos clave de la simulación realizada en el dominio del tiempo son:

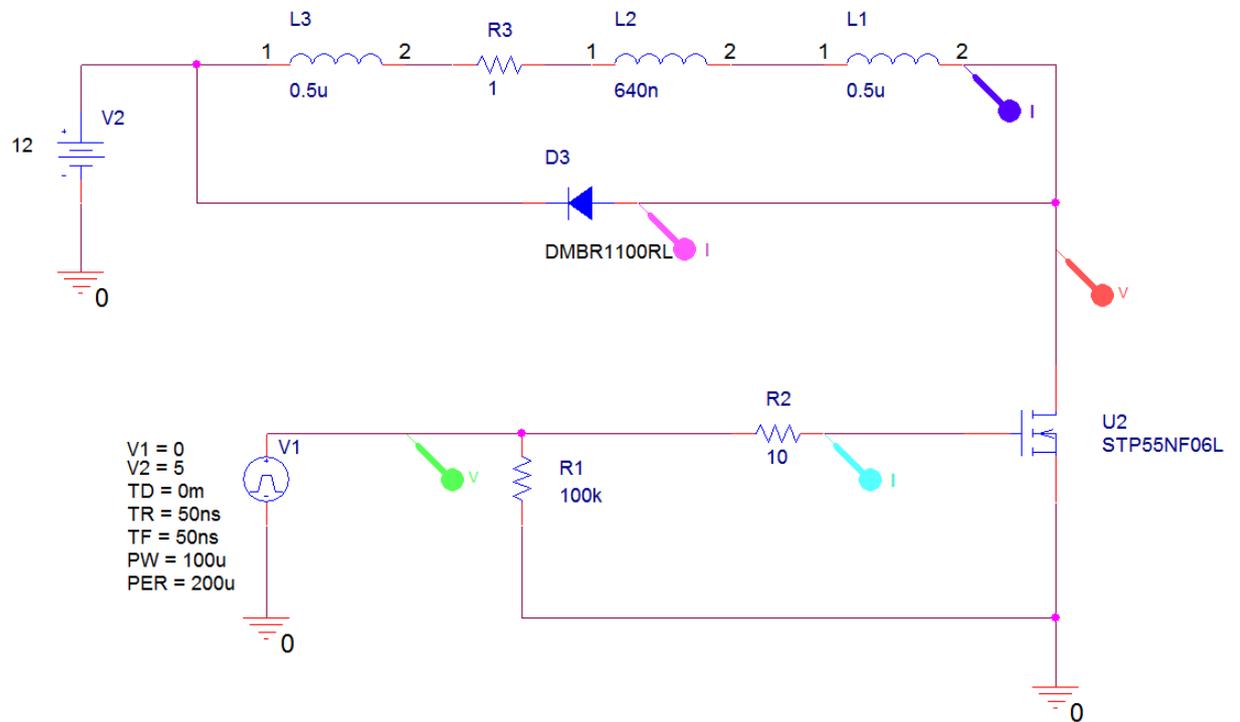


Figura 123. Situación de las sondas introducidas en el circuito con diodo en antiparalelo.

La primera simulación, se centra en el nuevo comportamiento de V_{DS} , a la hora de realizar la conmutación en el flanco de bajada:

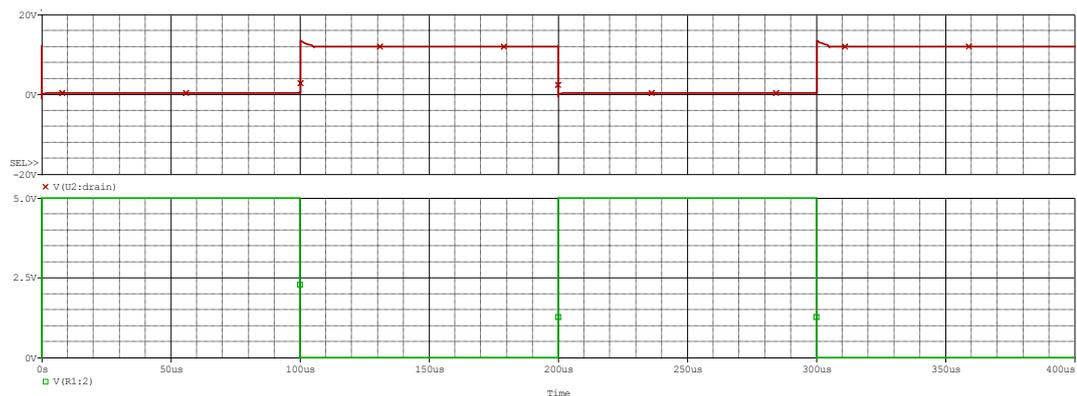


Figura 124. Comportamiento de la tensión V_{DS} introducido un diodo en antiparalelo

Como podemos observar, el diodo ha eliminado el gran pico de tensión en V_{DS} , produciéndose una estabilización inmediata de 12v.



Al ser un diodo de alta conmutación, no se producen grandes oscilaciones hasta la estabilización de tensión en 12v.

La siguiente grafica muestra la respuesta en corriente de la corriente de drenador en función del tren de pulsos:

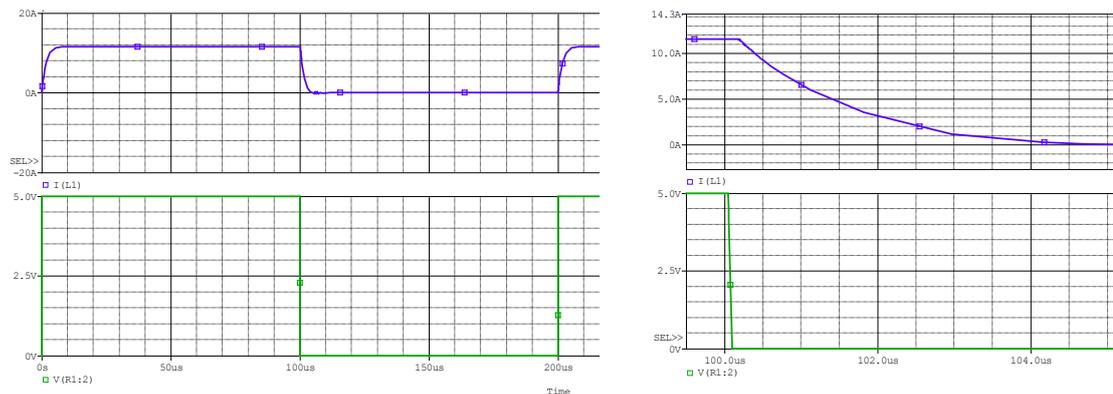


Figura 125. Comportamiento de la corriente de drenador I_d introducido un diodo en antiparalelo.

Por otro lado la incorporación del diodo crea una pendiente menos pronunciada, evitando que la corriente de drenador caiga a límites negativos y se produzca una oscilación antes de la estabilización.

La siguiente simulación se centra en la respuesta de corriente que fluye por el ánodo del diodo:

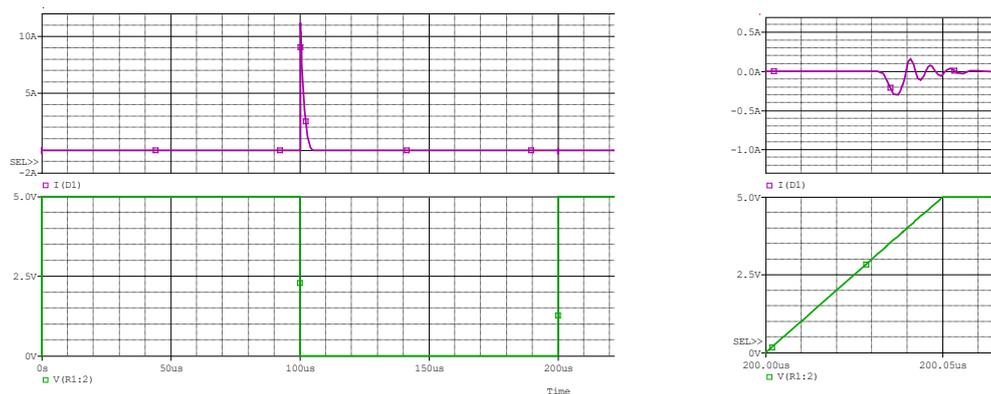


Figura 126. Comportamiento de la corriente que circula por el ánodo del diodo conectado en antiparalelo

Se observa de la gráfica que existe una corriente de 11 A que circula puntualmente por el diodo, hacia la fuente en el flanco de bajada de la conmutación.



En cambio en el flanco de subida se observa una pequeña oscilación de apenas $\pm 300\text{mA}$.

La corriente que puede soportar el diodo en conmutación según fabricante es de 50 A, con lo que puede soportar el pico de corriente.

Por último observaremos la respuesta de corriente en puerta del transistor.

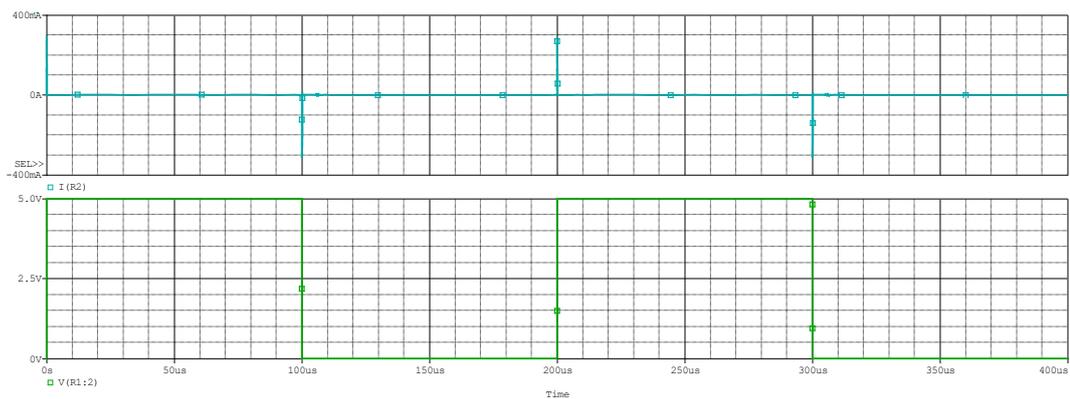


Figura 127. Comportamiento de la corriente de puerta IG introducido un diodo en antiparalelo

Para una mejor comprensión de la figura anterior trataremos por separado el comportamiento de la corriente de puerta en el flanco de bajada y el flanco de subida.

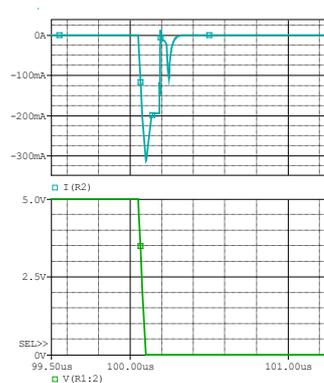


Figura 128. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de bajada de la conmutación introducido un diodo en antiparalelo

En el flanco de subida, al igual que en la simulación sin la incorporación del diodo, se produce un pico de corriente negativa, pero en este caso la estabilización es mucho más rápida, ya que no se producen oscilaciones.

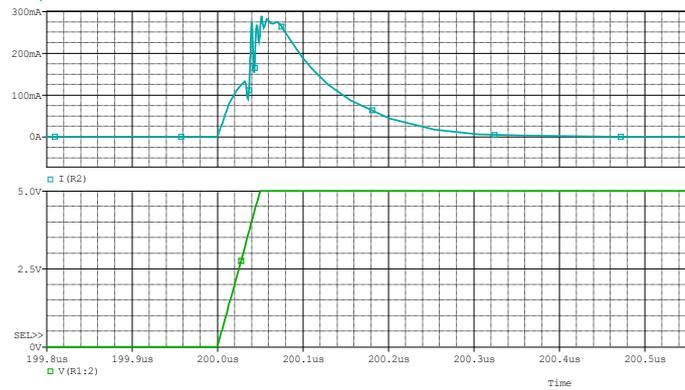


Figura 129. Comportamiento de la corriente de puerta IG en el flanco de subida de la conmutación introducido un diodo en antiparalelo

En el flanco de subida en la conmutación, observamos una respuesta de la corriente con una oscilación en la pendiente de subida con un valor de 290mA de pico.

Una vez alcanzado el valor máximo de pico la corriente se estabiliza con una suave pendiente en un periodo muy corto de tiempo.

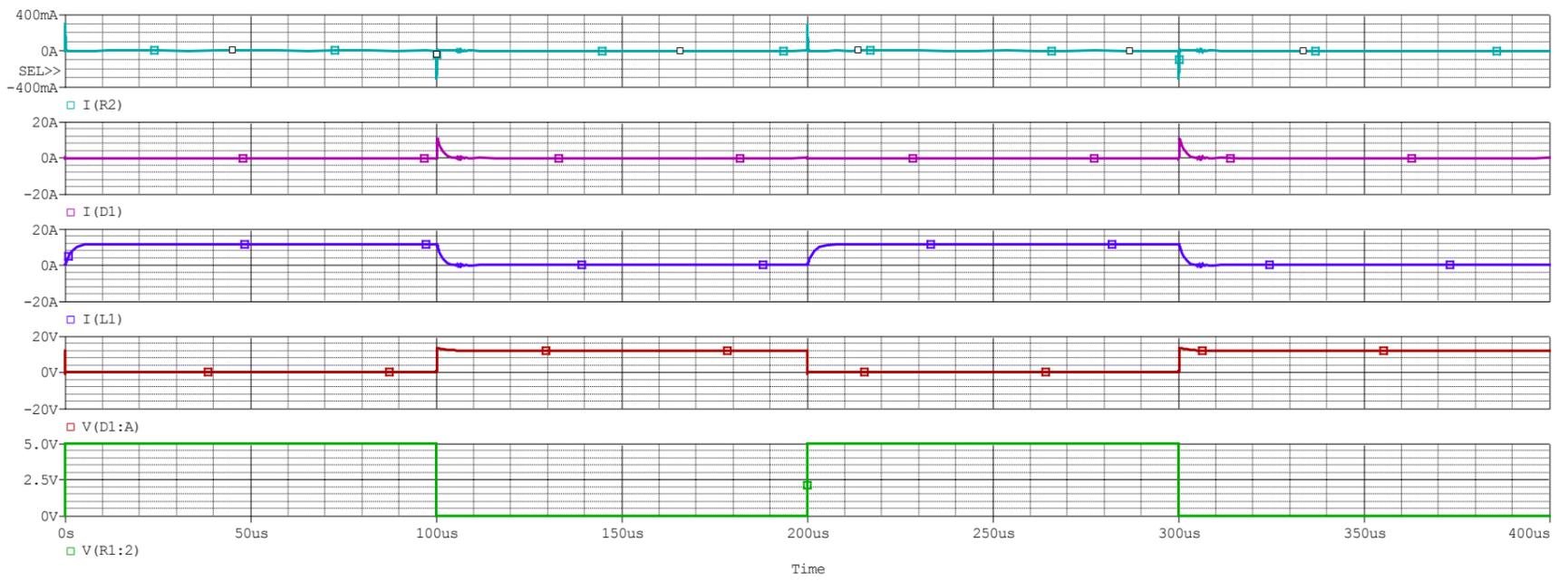


Figura 130. Gráfica de simulacion de dos periodos con diodo Schottky

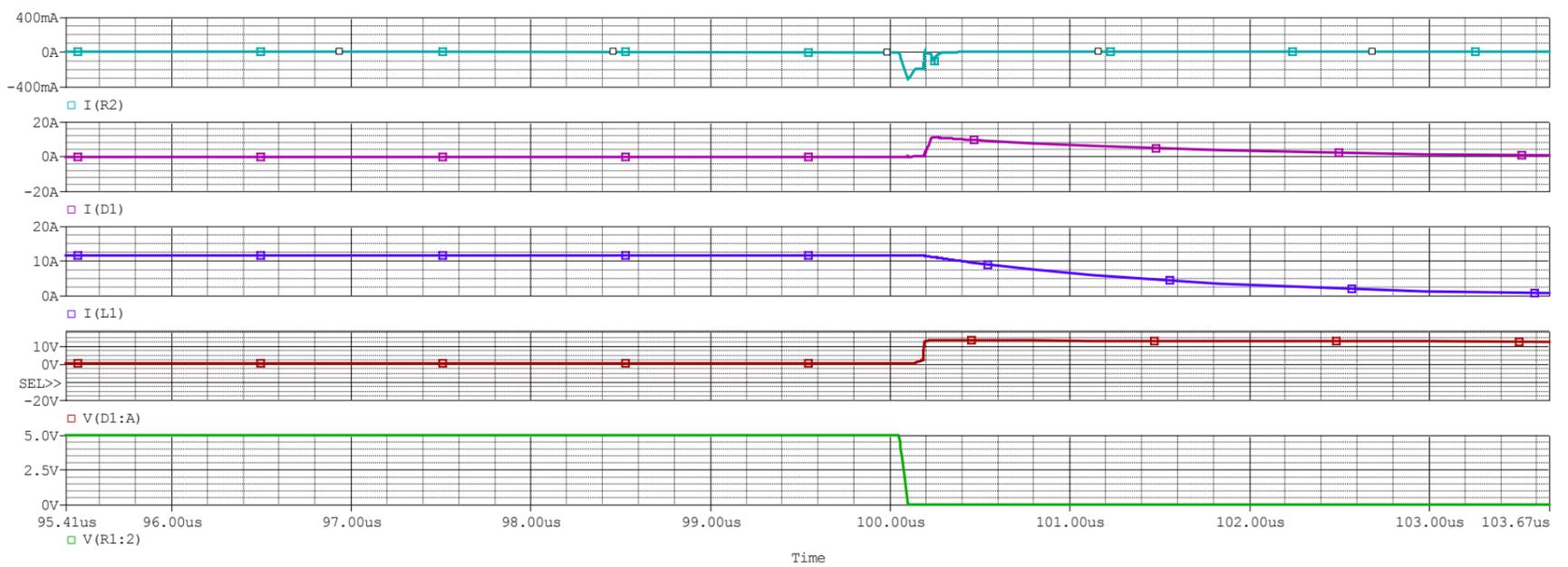


Figura 131. Gráfica de simulacion del flanco de bajada con diodo Schottky

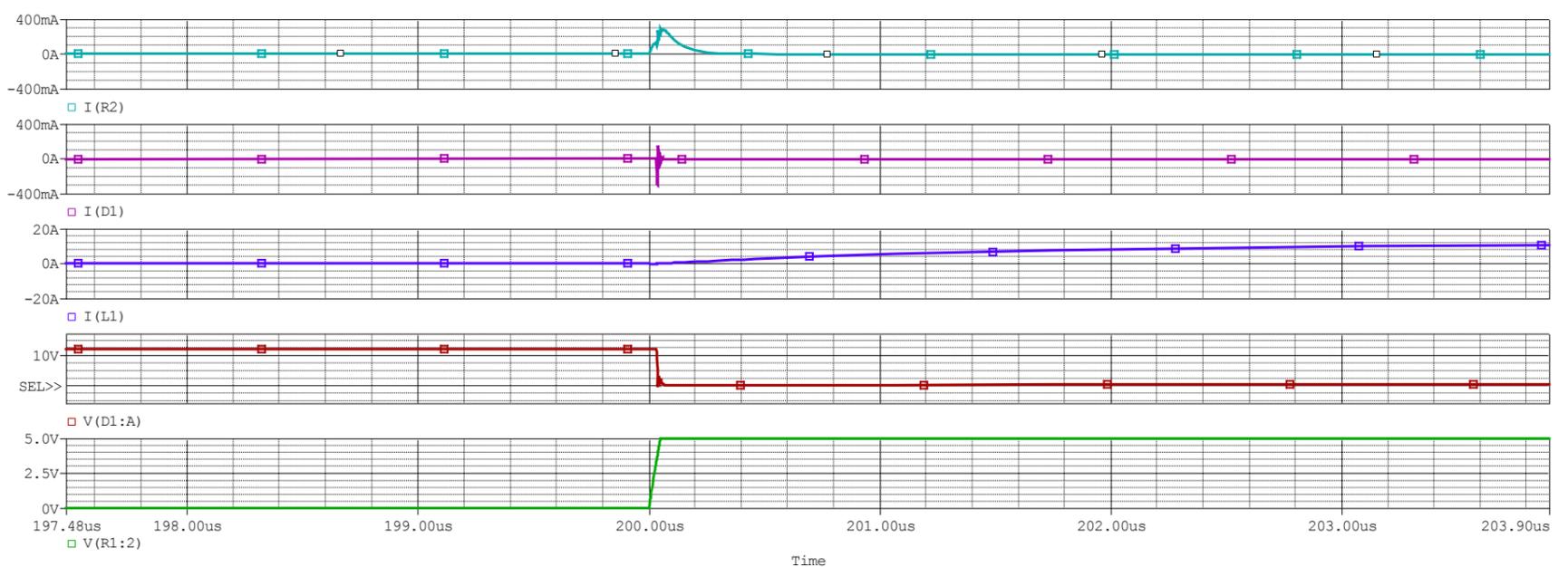


Figura 132. Gráfica de simulacion del flanco de subida con diodo Schottky



La solución adoptada para el calentamiento de la placa Ramps, solucionado el problema térmico del transistor es el siguiente

Diseño PCB de 4 capas en Placa Ramps

La placa PCB actual de Ramps consta de dos capas. Se ha realizado un nuevo diseño de placa con un aumento de 2 planos más en medio para las pistas de Vcc y Gnd, proporcionando una serie de ventajas:

- Menor sensibilidad al ruido al introducir todas las pistas dedicadas a Vcc y Gnd en dos planos exclusivos para esa tarea.
- Mayor compatibilidad electromagnética, ya que se ha diseñado un plano aislado de alimentación y masa con mayor capacidad de transporte de corriente, blindando las componentes de ruido regenerado en el circuito.
- Menor calentamiento térmico tanto en la placa como en los componentes debido al aislamiento de la alimentación y masa.

Como inconveniente cabe destacar el alto precio de fabricación, ya que al aumentar los planos a cuatro, el precio aumenta considerablemente. El precio como el lógico decrementará según el número de placas pedidas.

Las diferentes capas realizadas se muestran en el Anexo Planos.



Incorporación de un ventilador de 50x50mm

Una solución más barata que la fabricación de una placa Ramps con cuatro planos, es la incorporación de un ventilador encima de la electrónica.

Este ventilador proporcionara la refrigeración necesaria para evitar el calentamiento de la circuitería y de los componentes.

Para poder incorporar este ventilador se ha realizado un diseño en tres piezas dos de ellas destinadas a la sujeción y otra a la orientación, pudiendo así desplazar el flujo de aire a zonas específicas.

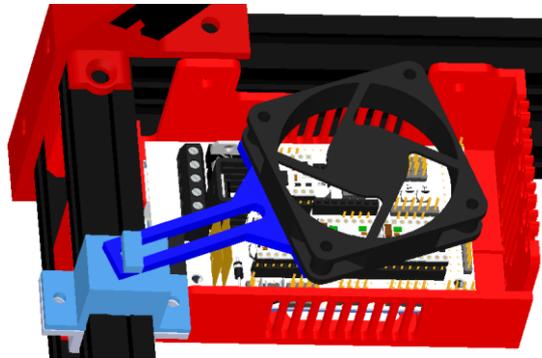


Figura 133. Composición de las 3 piezas realizadas para el soporte y la orientación del ventilador

Nota: Los archivos .STL y .SLDPRT relativos al proyecto de diseño de las piezas Ventilador_1, SoporteVent_1, SoporteVent_2 se encuentran en el CD que acompaña a esta memoria.

Para poder realizar una buena sujeción al perfil de aluminio se requieren dos tornillos-*turecas* correspondientes a métrica 4.

El ventilador ira conectado en paralelo con el ventilador destinado a la refrigeración del *hot end* o punta caliente y alimentada en la salida auxiliar de 12v.



9. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

9.1. Conclusiones

Se puede afirmar que los objetivos se han cumplido al realizar un trabajo multidisciplinar con los distintos miembros de laboratorio de impresión 3D que pertenecen a varias de las ramas de ingeniería impartidas en la universidad (Ing. Informática, Ing. Mecánica), de esta manera, se ha podido realizar un trabajo de mejora y optimización del prototipo de impresora 3D utilizada.

Durante el trabajo en este proyecto se ha conseguido adquirir una mejora en la comprensión del proceso de impresión 3D, tanto a nivel Software, como a nivel Hardware, así como capacidades a la hora de resolver problemas, aunque uno de los grandes lastres surgidos a la hora de realizar el TFG ha sido la falta de documentación encontrada y la veracidad de esta, necesitando un gran uso del inglés, ya que la mayoría de la información requerida se encuentra en esta lengua.

Esta falta de documentación es debida a los amplios prototipos existentes, así como al gran número de variables a controlar en este tipo de máquinas.

Un aspecto importante a destacar en este tipo de máquinas es el problema de la calibración, ya que al incorporar una serie de elementos mecánicos, es frecuente que surjan problemas a la hora de realizar una impresión satisfactoria.



9.2. Líneas de trabajo futuras.

El primer trabajo a realizar en un futuro, es la actualización tanto del Software de control Cura 14.01, como la actualización del Firmware Marlin v1.0, ya que al ser de libre acceso periódicamente se van incorporando mejoras y solucionando errores.

Puede resultar también interesante la incorporación de un sistema contador de horas de trabajo, este puede ser desarrollado en dos sistemas. El primero a nivel de firmware, modificando el código de Marlin para que se generara un contador total. El segundo en el propio sistema Cura, para que se contabilizaran las horas de impresión con este programa.

Como complemento a las actualizaciones, sería correcto realizar alguna de las mejoras reflejadas en el TFG, con el fin de adaptar y mejorar las calidades de los componentes instalados.

Otro posible trabajo futuro, sería el estudio detallado de las diferentes características y calidades a nivel mecánico de los materiales plásticos a imprimir, incluyendo nuevos materiales además del PLA y el ABS.

También sería interesante realizar un control mediante sensórica, de la rotura del hilo de plástico, de problemas de calentamiento, autocalibración de la cama caliente y control de humos.

Finalmente, resulta muy interesante la posibilidad que nos ha ofrecido la UBU de colaborar en un proyecto interdisciplinar con profesionales de otras áreas de la ingeniería, por lo que considero interesante la continuación de proyectos similares en el campo de la impresión 3D.



10. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Impresoras 3D - [Acceso: 2 Junio 2014].
Disponible: <http://www.impresoras-3d.info/>
- [2] Historia de la Impresión 3D – [Acceso: 2 Junio 2014].
Disponible: <http://impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [3] Proyecto RepRap – [Acceso: 3 Junio 2014].
Disponible: <http://reprap.org/wiki/RepRap>
- [4] Printron – [Acceso: 4 Junio 2014]. Disponible: <https://github.com/kliment/Printron>
- [5] ReplicatorG – [Acceso: 4 Junio 2014]. Disponible: <http://replicat.org/>
- [6] Repetier-Host – [Acceso: 4 Junio 2014].
Disponible: <http://repetier.com/download/>
- [7] Cura 14.01 – [Acceso: 4 Junio 2014].
Disponible: <http://software.ultimaker.com/>
- [8] Marlin v1 – [Acceso: 4 Junio 2014].
Disponible: <https://github.com/ErikZalm/Marlin>
- [9] Arduino – [Acceso: 5 Junio 2014]. Disponible: <http://www.arduino.cc/es/>
- [10] Arduino Mega 2560 – [Acceso: 5 Junio 2014].
Disponible: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [11] Ramps 1.4 – [Acceso: 5 Junio 2014].
Disponible: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4
- [12] G-Code – [Acceso: 5 Junio 2014]. Disponible: <http://reprap.org/wiki/G-code>
- [13] A4988 G3D stepper – [Acceso: 31 Abril 2014].
Disponible: http://reprap.org/wiki/G3D_driver
- [14] Manual de montaje BCN-3D – [Acceso: 31 Abril 2014].
Disponible: <http://www.rascomras.com/doc/220/bcn3d-completa.html>
- [15] Brain Evans, *Practical 3D Printers. The Science and Art of 3D Printing*, Technology in Action, 2012. pág 70-73
-



[16] Repositorio piezas 3D - [Acceso: 24 Febrero 2014].

Disponible: <http://www.thingiverse.com/>

[17] Normativa DIN 103 - [Acceso: 10 Marzo 2014].

Disponible: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Screws/Trapezoidal.html

[18] J. Ruiz Calvo, *Diseño de elementos de Máquinas*, Escuela Universitaria Politécnica UBU, Capítulo Tornillos de potencia.

[19] Normativa DIN 975 - [Acceso: 14 Marzo 2014].

Disponible: http://www.globalfastener.com/product/detail_81.html



11. ANEXOS

11.1. Planificación

Introducción

En este anexo se incluye la información sobre la planificación temporal del proyecto, incluyendo las diversas tareas que se han considerado relevantes a realizar a lo largo del proyecto.

Planificación

En este apartado se trata el desarrollo del proyecto desde un origen, viendo la planificación inicial ideal desde la que se partió, así como el desarrollo final del proyecto, viendo que desviaciones han sufrido las tareas con respecto a su planificación inicial.

El proyecto en origen estaba destinado a comenzar en Diciembre de 2013, pero debido a varios imprevistos con el tema del suministro se consideró que era mejor posponerlo y comenzar a finales de Enero de 2014.

Con el fin de lograr una representación más gráfica tanto de las tareas como de los tiempos que ha llevado cada una de ellas, se han empleado diagramas de Gantt, para construirlos se ha utilizado como se ha comentado anteriormente la herramienta GanttProject 2.6.6.

Planificación Inicial

Como se explicaba en el apartado anterior, el proyecto está planificado para comenzar en enero de 2014 y finalizar a finales de junio de 2014.

En este punto se explica cómo se planificó el principio temporal, para que fuera desarrollándose el proyecto, delimitando un tiempo para cada tarea para así tomarlo como referencia y poder ver si se cumplían los plazos.

La siguiente imagen muestra el diagrama de Gantt correspondiente a la planificación inicial del proyecto:

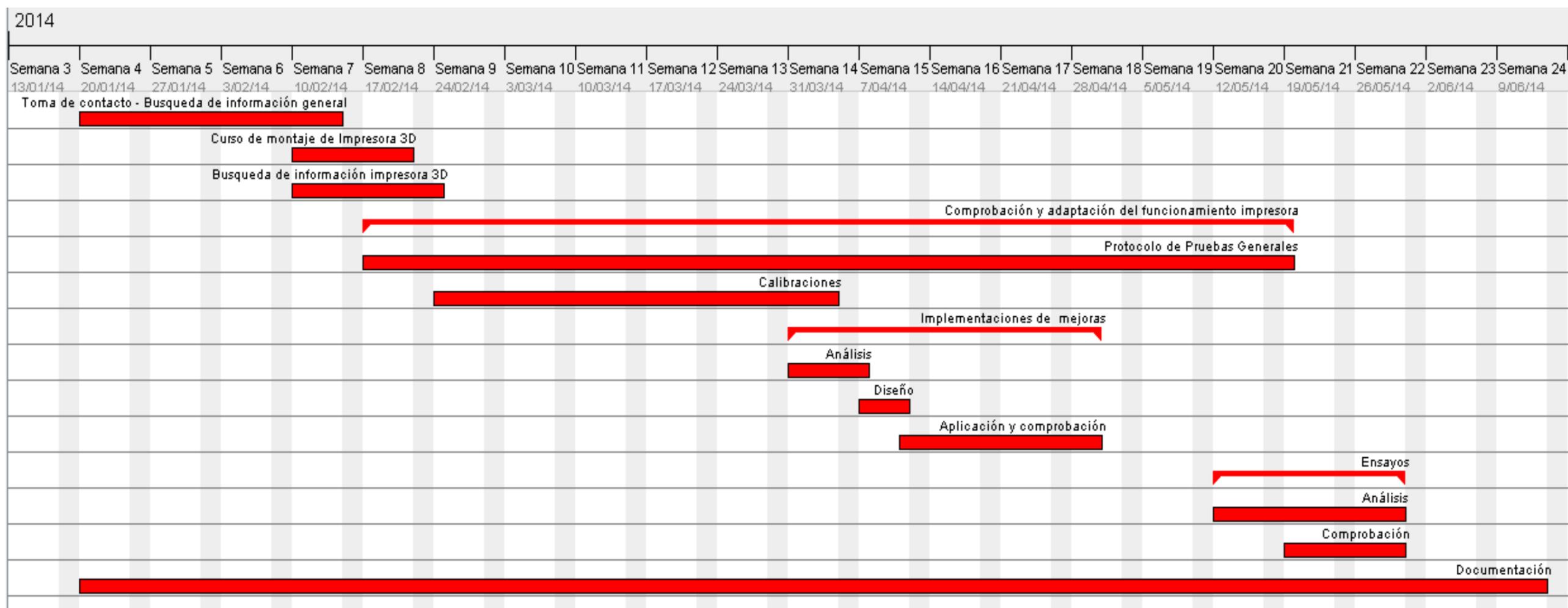


Figura 134. Diagrama de Gantt de la planificación Inicial del Proyecto



A continuación se mostrará una imagen con las correspondientes tareas mostradas en la imagen anterior, detallando las fechas de comienzo y final para cada una.

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
• Toma de contacto - Búsqueda de información general	20/01/14	14/02/14
• Curso de montaje de Impresora 3D	10/02/14	21/02/14
• Búsqueda de información impresora 3D	10/02/14	24/02/14
♀ • Comprobación y adaptación del funcionamiento impresora	17/02/14	19/05/14
• Protocolo de Pruebas Generales	17/02/14	19/05/14
• Calibraciones	24/02/14	4/04/14
♀ • Implementaciones de mejoras	31/03/14	30/04/14
• Análisis	31/03/14	7/04/14
• Diseño	7/04/14	11/04/14
• Aplicación y comprobación	11/04/14	30/04/14
♀ • Ensayos	12/05/14	30/05/14
• Análisis	12/05/14	30/05/14
• Comprobación	19/05/14	30/05/14
• Documentación	20/01/14	13/06/14

Figura 135. Tareas planificadas inicialmente

Definición de tareas

En este apartado se explicaran detalladamente las tareas mostradas en la imagen anterior.

Para la realización del proyecto se han llevado a cabo las siguientes tareas

1. Toma de contacto – Búsqueda de información general: la intención de esta tarea es la de introducción en el ámbito de la impresión 3D, así como la búsqueda y comparación de diferentes modelos de prototipos de impresoras.
2. Curso de montaje de Impresora 3D: se realiza un curso de montaje de la propia impresora utilizada en el TFG. En este curso se adquiere diferente información de la propia impresora, modelo, elementos de montaje utilizados, diferentes tecnologías aplicadas a los prototipos de impresión 3D etc.



3. Búsqueda de información de la impresora 3D: se realiza una búsqueda detallada de la propia impresora 3D utilizada para el proyecto, así como información de los diferentes elementos que la constituyen a nivel Hardware, Software y Firmware.
4. Comprobación y adaptación del funcionamiento de la impresora: en este punto la intención es la de adquirir conocimientos prácticos con la impresora 3D.

En este apartado se muestran dos de los aspectos más importantes en la realización del proyecto:

- Protocolo de pruebas generales: se realizan una serie de pruebas para obtener el conocimiento de las diferentes variables que se deben de tener en cuenta a la hora de realizar una impresión.
- Calibraciones: se analiza el Hardware y el Software de la impresora, realizando las modificaciones necesarias para la correcta impresión de piezas.

Con estos dos apartados también se adquiere el conocimiento de los límites de la máquina en el estado inicial, dando comienzo a los diferentes apartados de mejora y optimización de la propia impresora.

5. Implementación de mejoras: en este apartado se realiza un estudio de los fallos de la impresora y se propone una solución más correcta.

En este apartado consta de tres subtareas a realizar:

- Análisis: Se analiza el error producido y se propone una mejora. Si la mejora es posible, se realiza un diseño.
- Diseño: se realiza un diseño de la pieza prototipo para paliar el error.
- Aplicación y comprobación: se incorpora la mejora al conjunto de la máquina y se realizan las pruebas pertinentes para su comprobación.

6. Ensayos: mediante prueba – error se buscaran los valores óptimos de trabajo de las variables pertinentes que no estén en un rango determinado de trabajo.

Este apartado consta de dos etapas:



- **Análisis:** se analiza el error producido y la variable que influye en ese error para realizar una búsqueda más exacta.
- **Comprobación:** se realizan una serie de impresiones para comprobar el cambio producido.

7. **Documentación:** se documenta todo el trabajo.

Planificación Final

En el siguiente diagrama de Gantt mostramos la planificación final llevada a cabo para la realización del proyecto, se pueden apreciar los cambios desde la planificación inicial (previa al comienzo del proyecto) hasta su conclusión.

La siguiente imagen muestra el diagrama de Gantt correspondiente a la planificación final del proyecto:

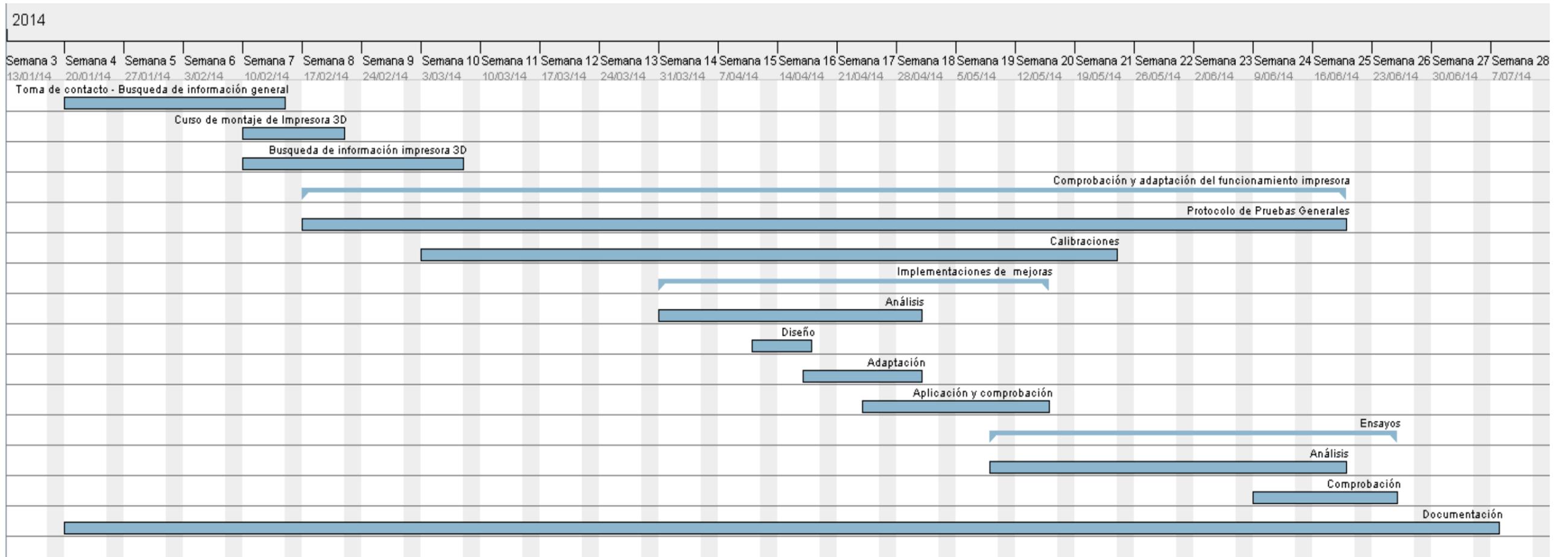
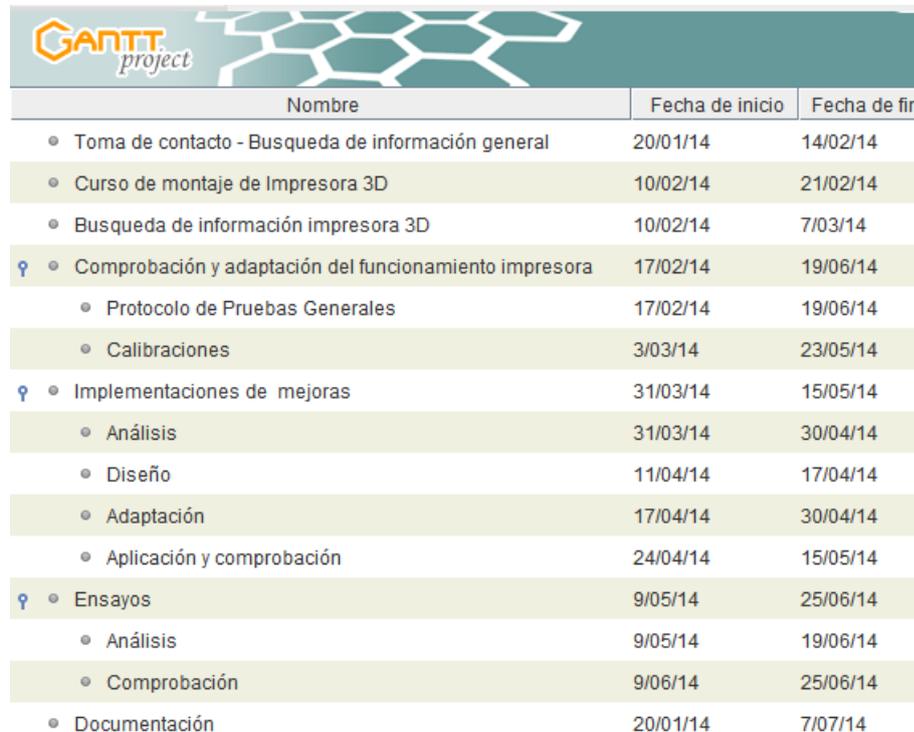


Figura 136. Diagrama de Gantt de la planificación Final del Proyecto



A continuación se mostrará una imagen con las correspondientes tareas mostradas en la imagen anterior, detallando las fechas de comienzo y final para cada una.



Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
• Toma de contacto - Búsqueda de información general	20/01/14	14/02/14
• Curso de montaje de Impresora 3D	10/02/14	21/02/14
• Búsqueda de información impresora 3D	10/02/14	7/03/14
♀ • Comprobación y adaptación del funcionamiento impresora	17/02/14	19/06/14
• Protocolo de Pruebas Generales	17/02/14	19/06/14
• Calibraciones	3/03/14	23/05/14
♀ • Implementaciones de mejoras	31/03/14	15/05/14
• Análisis	31/03/14	30/04/14
• Diseño	11/04/14	17/04/14
• Adaptación	17/04/14	30/04/14
• Aplicación y comprobación	24/04/14	15/05/14
♀ • Ensayos	9/05/14	25/06/14
• Análisis	9/05/14	19/06/14
• Comprobación	9/06/14	25/06/14
• Documentación	20/01/14	7/07/14

Figura 137. Tareas de la planificación Final

Comparativa entre planificación inicial y final del proyecto

Como se puede comprobar observando ambas gráficas, ha habido diferencias importantes entre los previsto inicialmente y las realizaciones de las tareas finales.

Este cambio es debido a los problemas surgidos en la impresora 3D, sobretudo las diferentes roturas de los elementos. Estas roturas y su posterior arreglo han conllevado un incremento en el tiempo de realización de las tareas.

Otros aspectos como el tipo de ensayo realizado (Prueba - error) y la dificultad de calibración y adaptación de los diferentes elementos también han producido un incremento temporal en la realización de las tareas.

La siguiente imagen muestra el diagrama de Gantt correspondiente a la comparación entre la planificación inicial (color rojo) y la planificación final (color azul) del proyecto

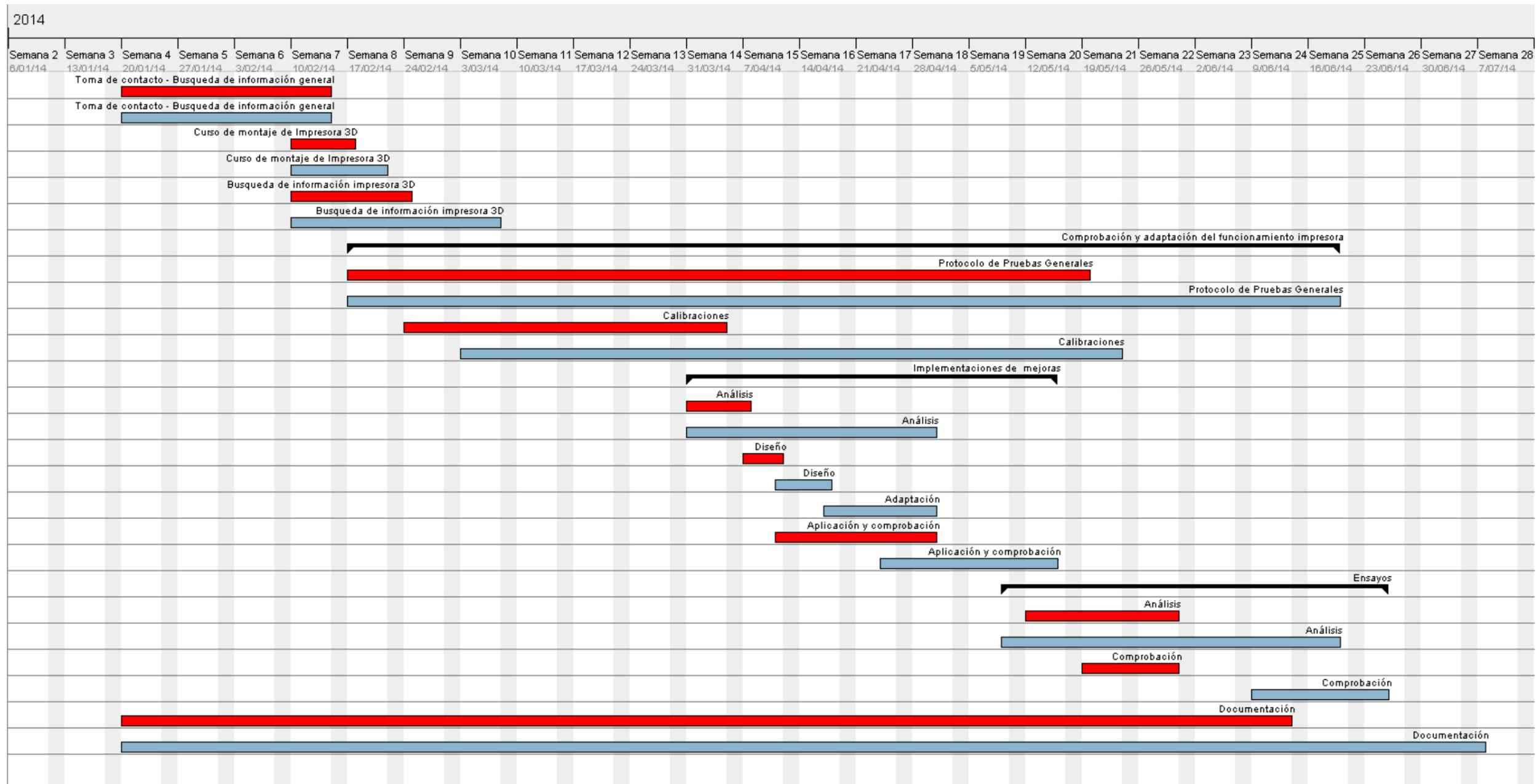


Figura 138. Comparación de la planificación Inicial y la planificación final



11.2. Estudio Económico.

Inversión Inicial (Impresora BCN-3D)

Tabla 32. Inversión Inicial.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total (€)
Metros perfil simétrico 20x20mm – sin cortar	7 m	6.05	42.35
Motor paso-paso NEMA 17	5 ud	13.25	66.25
Kit Electrónica: Arduino Mega 2560 + Ramps + LCD + Drivers + Finales de Carrera + Cama Caliente	1 ud	164	164
Kit rodamientos	1 ud	20	20
Correas de distribución y correas T2.5	1 ud	30	30
Hot end tipo J - Head IV (Boquilla 0.4 mm) Y Calentador	1 ud	69	69
Acople eje motores	2 ud	3	6
Bobina de plástico ABS	2 kg	14.9	29.8
Bobina de plástico PLA	2 kg	14.9	29.8
Curso de montaje impresora 3D.	20 h	12	240
Total Sin IVA			697.2 €
Impuestos (IVA – 21%)			146.42 €
TOTAL			843.62 €

Coste del Proyecto

En este apartado observaremos los costes que acarreará el proyecto, dividiéndolo en varios factores que tendremos en cuenta:

1. Costes de personal.

El proyecto será llevado a cabo por un Ingeniero Técnico y la duración del proyecto se estima en 6 meses, invirtiendo un trabajo de seis horas diarias.

Tabla 33. Coste de personal.

Concepto	Nº Horas	Coste Unitario (€/h)	Total Sin IVA (€)
Ingeniero Técnico:	720	20	14400



2. Costes de Hardware.

Se han empleado un equipo informático, una impresora 3D y plástico para la impresión durante el proceso de elaboración del proyecto.

Tabla 34. Coste del Hardware.

Concepto	Cantidad	Coste Unitario (€)	Total Sin IVA (€)
Ordenador: Intel i7, 8GB, HDD 1TB	1 ud	600	600
Impresora 3D + Plástico (4 kg)	1 ud	697.2	697.2
			1297.2 €

Una vez sumados los costes sin IVA, tenemos una cantidad total de 1297.2€, pero hay que tener en cuenta de que este no se trata del precio final, ya que habrá que calcular primero la amortización del producto para el periodo en el que se ha realizado el proyecto, puesto que aunque el proyecto termine estos equipos seguirán siendo utilizados.

Se estima que el período de amortización en el caso de los equipos informáticos para el tratamiento de la información es de 4 años, por lo tanto primero calcularemos la amortización anual y posteriormente para el período de nuestro proyecto. Consideraremos que la amortización del ordenador se realizará en 4 años.

$$\text{Amortización anual del equipo} = 600\text{€} / 4 \text{ años} = 150\text{€/año}$$

$$\text{Amortización del equipo en 6 meses} = 150\text{€/año} / 6 \text{ meses} = 75 \text{ €}$$

El coste total para nuestra impresora, puesto que tiene un periodo de amortización distinto por lo que si se calculara sobre los mismos periodos obtendríamos un coste desvirtuado. Se considera que los equipos de laboratorio de impresión 3D y ensayos tienen un ciclo de vida de entre 3 y 6 años. En este caso consideraremos el periodo mínimo puesto que este tipo de maquinarias, al tratarse de licencia abierta y ser “low cost”, requieren gran cantidad de mantenimiento y su ciclo de vida útil suele ser más corto que el de maquinaria profesional de alto coste.

$$\text{Amortización anual de la impresora} = 697.2\text{€} / 3 \text{ años} = 232.4\text{€/año}$$

$$\text{Amortización de la impresora en 6 meses} = 232.4\text{€/año} / 6 \text{ meses} = 116.2 \text{ €}$$



Una vez calculados estos costes sumando las cantidades calculadas por separado tenemos un total de 191.2 € sin IVA, una cantidad muy distinta de los 1297.2 € sin IVA iniciales que hemos obtenido sin calcular las distintas amortizaciones de cada elemento necesitado a la hora de realizar el proyecto.

3. Costes de Software.

Licencias de los programas y de los sistemas operativos utilizados.

Tabla 35. Coste del Software.

Concepto	Cantidad	Coste Unitario (€)	Total Sin IVA (€)
Windows 7 Profesional	1 ud	125	125
Microsoft Office	1 ud	129.9	130
OrCAD 16.5	1 ud	1500	1500
SolidWorks 2013	1 ud	1900	1900
CadSoft EAGLE PCB 6.1.0	1 ud	345	345
			4000 €

De igual forma que en el caso del Hardware tendremos que calcular la amortización del Software para el periodo de nuestro proyecto. El periodo de amortización del Hardware oscila entre un mínimo de 3 años y un máximo de 6 así que calcularemos sobre un periodo medio de 5 años.

$$\text{Amortización anual del Software} = 4000 \text{ €} / 5 \text{ años} = 800 \text{ €/año}$$

$$\text{Amortización del Software en 6 meses} = 800 \text{ €/año} / 6 \text{ meses} = 400 \text{ €}$$



4. Coste total del proyecto

Suma de todos los costes anteriormente mencionados.

Tabla 36. Coste Total.

Descripción	Importe (€)
Costes de Personal	14400
Costes de Hardware	191.2
Costes de Software	400
Total Sin IVA	14991.2
IVA (21 %)	3148.16
	<u>18139.36 €</u>

El presupuesto para la realización del proyecto “Mejora y Optimización Hardware y Software de un Prototipo de Impresora 3D” es de DIECIOCHO MIL CIENTO TREINTA Y NUEVE euros con TREINTA Y SEIS céntimos de euro.

En Burgos, a 25 de Julio de 2014

Fdo.: Javier Pérez Sáiz



Coste de las Mejoras

En este apartado se detalla el coste de las mejoras descritas en el apartado 8, Estudio de mejoras aplicadas a la impresora 3D, así como un tiempo previsto para su implantación.

Tabla 37. Coste de las Mejoras.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas al Eje 'z' - Paralelismo			
Husillo Trapezoidal M8x1.5 (Acero C15)	1 m	54.20	54.20
Tuerca Trapezoidal Auto lubricada Cilíndrica Iglidur W300	4 ud	13.34	53.36
Gastos de envío	1 ud	10	10
Montaje - Adaptación	5 h	20	100
TOTAL			217.56
Varilla Roscada - Acero Inoxidable M8x1.25	1 m	5.5	5.5
Tuerca Hexagonal Bronce	4 ud	1.2	4.8
Montaje - Adaptación	1 h	20	20
TOTAL			30.3
Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas al Eje 'Y' - Paralelismo			
Carril Lineal Aluminio en V + 2 Patines	2 ud	96.20	192.40
Gastos de envío	1 ud	10	10
Diseño Piezas Acople	1 h	20	20
Montaje - Adaptación	5 h	20	100
TOTAL			322.4
Perfil Aluminio V (20x60)	1 m	16.86	16.86
Riel Lineal Abierto	2 ud	7.33	14.66
Kit Juego de Ruedas Delrin	6 ud	2.82	16.92
Gastos de envío	1 ud	10	10
Soporte Universal Aluminio	1 ud	8.79	8.79
Montaje - Adaptación	2 h	20	40
TOTAL			107.23



Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas al Eje 'Y' - Inercias			
Plancha Soporte Inferior Forma Aspa Acero Inoxidable (265x140x3)	1 ud	9.95	9.95
Plancha Soporte Superior Acero Inoxidable (265x255x3)	1 ud	12.5	12.5
Gastos de envío	1 ud	10	10
Montaje - Adaptación	1 h	20	20
TOTAL			52.45

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas al Extrusor - Guiado			
Pieza de Plástico Guiado	0.020 Kg	18€/Kg	0.36
Montaje – Diseño - Adaptación	1 h	20	20
TOTAL			20.36

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas al Extrusor Ventilador			
Pieza de Plástico Tobera	0.025 Kg	18€/Kg	0.45
Ventilador 40 x 40 mm	1 ud	2.5	2.5
Montaje – Diseño - Adaptación	1 h	20	20
TOTAL			22.95



Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total con IVA (€)
Mejoras Aplicadas a la Electrónica Temperatura			
Transistor STP60NF10	1 ud	1.2	1.2
Estudio y Análisis	10 h	20	200
TOTAL			201.2
Diodo Schottky	1 ud	0.50	0.50
Estudio y Análisis	2 h	20	40
TOTAL			40.5
Fabricación Prototipo PCB 4 Capas	1 ud	350	350
Diseño	2 h	20	40
TOTAL			390
Ventilador 50x50 mm	1 ud	1.2	1.2
Pieza Soporte Ventilador	0.010 Kg	18€/Kg	0.18
Pieza Guiado	0.025 Kg	18€/Kg	0.45
Pieza Unión	0.005 Kg	18€/Kg	0.10
Diseño e Impresión	1 h	20	20
TOTAL			21.93

El cliente elegirá las mejoras que se adapten mejor a sus necesidades y a los requerimientos de la Impresora 3D, ya que el rango de elección y de precios es amplio.



12. PLANOS

Introducción

En este documento se incluyen los planos que contienen las diferentes capas, componentes y conexiones electrónicas de la placa Ramps 1.4.

Índice de Planos

- Plano 1: Conexiones Ramps 1.4
- Plano 2: Capas PCB Ramps 1.4