

**UNIVERSIDAD DE CASTILLA- LA MANCHA.
ESCUELA DE INGENIERÍA MINERA E INDUSTRIAL DE
ALMADÉN.**



**CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D OPEN
SOURCE AUTÓNOMA CON IMPLEMENTACIÓN DE
DOBLE EXTRUSOR Y BARRERA DE PROTECCIÓN
FÍSICA.**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA.

AUTOR: VÍCTOR ENCIJO GONZÁLEZ.

DIRECTOR: DR. JAVIER ALONSO ALBUSAC JIMÉNEZ.

JULIO, 2015

Víctor Encijo González.

Cuenca, España.

E-mail: victorencijo@gmail.com; victorencijo@protonmail.ch.

© 2015 Víctor Encijo González

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

Se permite la copia, distribución y/o modificación de este documento bajo los términos de la Licencia de Documentación Libre GNU, versión 1.3 o cualquier versión posterior publicada por la Free Software Foundation; sin secciones invariantes.

Muchos de los nombres usados por las compañías para diferenciar sus productos y servicios son reclamados como marcas registradas. Allí donde estos nombres aparezcan en este documento, y cuando el autor haya sido informado de esas marcas registradas, los nombres estarán escritos en mayúsculas o como nombres propios.

AGRADECIMIENTOS.

Este Trabajo Fin de Grado que aquí se presenta no habría sido posible sin la ayuda ni el apoyo de mucha gente. Por eso esta dedicación es para toda aquella gente que directa o indirectamente ha tenido algo que ver en la confección del mismo.

Este es el final de un camino iniciado en 2.012, lleno de entusiasmo, alegrías, y sobre todo, ganas de aprender. Gracias a todos los profesores que a lo largo de estos cursos me han enseñado y sobre todo, han facilitado el aprendizaje.

Gracias a Javier, mi tutor, porque sin su inestimable ayuda, confianza y ánimos, no habría sido posible la ejecución del mismo.

Gracias a mi familia, padres y hermanas, por todo el apoyo que me han brindado, porque sin ellos, seguro que no estaría ahora mismo en este punto.

Gracias a Leonor, porque ella sabe todo lo que he sufrido para llegar hasta aquí, y su apoyo ha sido vital para la consecución de este objetivo.

Gracias a mis amigos, los que me han acompañado durante toda mi vida, en todas las etapas de estos estudios y siempre han estado ahí para apoyarme en todas mis decisiones. José Manuel, César, Isa y una larga lista de personas que me han animado y apoyado incondicionalmente para conseguir mis objetivos.

A todos aquellos que han forjado una parte de lo que soy ahora mismo.

Gracias.

Víctor.

RESUMEN.

Una impresora 3D es una máquina de prototipado rápido capaz de fabricar objetos en tres dimensiones mediante la técnica del modelado por deposición fundente y la ayuda del modelado por ordenador.

El proyecto RepRap es una iniciativa con el fin de la creación de máquinas autorreproducibles. Tiene como objetivo la capacidad de reproducirse a sí misma, es decir, de imprimir parte de sus piezas estructurales, ya sea para la reparación de ella misma o para la creación de una nueva, al mismo tiempo que crear objetos útiles y modelos tridimensionales en el que el único límite es la imaginación.

El modelado por deposición fundente es una técnica que utiliza como material un filamento de plástico, el cual, mediante el arrastre hasta una cavidad con una resistencia que consigue la temperatura para su fusión y, a través de un boquilla, lo deposita en una base sobre la que se crean capas según se va solidificando dicho plástico creando así el modelo.

En el presente Trabajo Fin de grado se presenta la construcción de una impresora 3D *Open Source* (de código abierto) siguiendo las directrices del proyecto RepRap, mejorándola haciéndola autónoma, disponiendo de un lector de tarjetas y una pantalla LCD con control propio, optimizándola para la impresión en dos materiales o dos colores (doble extrusor) e incorporando una barrera de protección física para librar posibles golpes accidentales, controlar el ambiente interior, que se encuentre a una temperatura estable y libre de partículas, eliminación de las corrientes de aire dañinas para la impresión de los modelos, eliminación del *warping*, todo ello con una correcta ventilación y renovación del aire.

KEY WORDS.

- Impresora 3D.
- Prototipado rápido.
- Doble Extrusor.
- Proyecto RepRap.
- Modelado por deposición fundente.

ABSTRACT.

A 3D printer is a rapid prototyping machine able to manufacture three dimensional objects by the fused deposition modeling, helped by the computer modeling.

The RepRap project is an initiative with the purpose of creating self-replicate machines. The objective is the ability of reproducing itself, printing part of its structural parts, either to repair itself or for the creation of a new one, even while creating useful objects and three dimensional objects in which the limit is imagination.

Fused deposition modeling is a technic that uses a plastic filament as material, dragging this to a cavity with a resistance that elevates the temperature to merge it, and by a nozzle is deposited on a base on which layers are created when plastic is solidified, creating the model.

The present final work presents the construction of an Open source 3D printer following the RepRap project guidelines, improving making it autonomous with a card reader and a controlled LCD screen, optimizing it for printing with two colors or two materials by a dual extruder and incorporating a protective physical barrier to avoid possible accidental hits controlling the indoor environment, with a stable temperature without particles, elimination of air flows, harmful for printing models, elimination of warping, all with a good ventilation and air renewal.

KEY WORDS.

- 3D printer.
- Rapid prototyping.
- Dual extruder.
- RepRap project.
- Fused deposition modeling.

ÍNDICE.

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	20
1. INTRODUCCIÓN.....	21
2. OBJETIVOS.....	25
3. ESTADO DEL ARTE.....	28
3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO.....	29
3.1.1. USOS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO.....	30
3.2. IMPRESIÓN 3D.....	32
3.3. SISTEMAS DE IMPRESIÓN 3D.....	35
3.3.1. ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA).....	36
3.3.2. SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS).....	37
3.3.3. SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR CALOR (SHS).....	39
3.3.4. FOTOPOLIMERIZACIÓN POR LUZ UV (SGC).....	40
3.3.5. PROYECCIÓN AGLUTINANTE (DSCP).....	42
3.3.6. MANUFACTURA POR LAMINADO (LOM).....	42
3.3.7. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDENTE (FDM).....	43
3.4. EL SISTEMA DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDENTE (FDM).....	44
3.4.1. EXTRUSIÓN DIRECTA Y EXTRUSIÓN BOWDEN.....	46
3.5. ¿QUÉ ES UNA IMPRESORA 3D? PARTES PRINCIPALES.....	50
3.6. LOS PROYECTOS REPRAP Y CLONE WARS.....	52
3.6.1. PROYECTO REPRAP.....	52
3.6.2. MAKERBOT INDUSTRIES.....	54
3.6.3. PROYECTO CLONE WARS.....	56
3.7. ARDUINO.....	62
3.7.1. MICROCONTROLADORES.....	62
3.7.2. ¿QUÉ ES ARDUINO?.....	63
3.7.3. HISTORIA DE ARDUINO.....	64
3.7.4. SOFTWARE LIBRE Y ARDUINO.....	64
3.7.5. HARDWARE LIBRE Y ARDUINO.....	65

3.7.6.	VENTAJAS DE ARDUINO.	66
3.7.7.	ESPECIFICACIONES DE PLACAS ARDUINO.	68
3.8.	MATERIALES DE IMPRESIÓN UTILIZADOS EN EL SISTEMA FDM.	70
3.8.1.	POLÍMEROS.	70
3.8.2.	ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO: ABS.	71
3.8.3.	ÁCIDO POLILÁCTICO. PLA.	72
3.8.4.	DIFERENCIAS DE IMPRESIÓN ENTRE ABS Y PLA.	73
3.8.5.	OTROS MATERIALES.	74
3.9.	APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D POR FDM.	77
3.10.	DERECHOS DE AUTOR Y OPEN SOURCE.	79
3.11.	DOBLE EXTRUSIÓN.	82
3.12.	BARRERAS DE PROTECCIÓN FÍSICA DE LA IMPRESORA.	84
4.	CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE AUTÓNOMA CON DOBLE EXTRUSOR Y BARRERA DE PROTECCIÓN.	85
4.1.	INTRODUCCIÓN.	86
4.2.	COMPONENTES DE UNA IMPRESORA 3D PRUSA I3 STEEL.	88
4.2.1.	ESTRUCTURA.	88
4.2.2.	MECÁNICA.	90
4.2.3.	VARILLAJE.	91
4.2.4.	ELECTRÓNICA.	92
4.2.5.	TORNILLERÍA.	94
4.2.6.	PIEZAS IMPRESAS.	95
4.3.	CONSTRUCCIÓN DE LA IMPRESORA.	98
4.3.1.	MONTAJE DE LA ESTRUCTURA.	98
4.3.2.	MONTAJE DE LA ELECTRÓNICA.	114
4.4.	PROBLEMAS Y FALLOS DURANTE EL MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO.	127
4.5.	MEJORAS DE LA IMPRESORA.	129
4.5.1.	DOBLE EXTRUSOR.	129
4.5.2.	BARRERA DE PROTECCIÓN FÍSICA PARA LA IMPRESORA.	138
5.	RESULTADOS.	142
5.1.	INTRODUCCIÓN.	143
5.2.	PRUEBAS DE IMPRESIÓN EFECTUADAS CON UN EXTRUSOR.	144

5.3. CONCLUSIONES A LAS PRUEBAS DE IMPRESIÓN CON UN EXTRUSOR. .	153
5.4. PRUEBAS DE IMPRESIÓN CON DOBLE EXTRUSOR.....	154
5.5. CONCLUSIONES DE LA IMPRESIÓN CON DOBLE EXTRUSOR.....	163
6. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA IMPRESORA.	165
6.1. COMPARACIÓN ENTRE LA IMPRESORA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MINERA E INDUSTRIAL DE ALMADÉN Y LA IMPRESORA OBJETO DE ESTE TRABAJO FIN DE GRADO.....	170
7. CONCLUSIONES. OBJETIVOS ALCANZADOS. PROPUESTAS DE TRABAJO FUTURO.....	172
8. BIBLIOGRAFÍA.....	175
9. ANEXOS.....	178
9.1. GLOSARIO.....	179
9.2. CONSTRUCCIÓN DE LA IMPRESORA DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MINERA E INDUSTRIAL DE ALMADÉN.....	181
9.3. MANUAL DE USO DE CURA.....	194

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Caja de cambios de 5 velocidades para motor Toyota 22RE. Fuente: http://3dprint.com/50265/3d-printed-toyota-transmission/	30
Ilustración 2. Tornillo y tuerca fabricados mediante la técnica de prototipado rápido. Fuente: www.ovh.es	31
Ilustración 3. Calzado a medida concebido mediante prototipado rápido. Fuente: www.3dprint.com	31
Ilustración 4. Piezas impresas en 3D. Fuente: elblogdelplastico.blogs.upv.es	31
Ilustración 5. Adrian Bowyer (izqda.) y Vik Oliver (dcha.) con la primera impresora 3D creada y su primer clon. Año 2.008. Fuente: www.reprap.org	33
Ilustración 6. Sistema de impresión por estereolitografía. FUENTE: http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwkt/teachweb/lehrgebiete/cad/rapidprot_p/html/009.html	36
Ilustración 7. Pieza fabricada por estereolitografía. FUENTE: http://es.3dilla.com/impresora-3d/estereolitografia/	37
Ilustración 8. Esquema de sinterización selectiva por láser. FUENTE: Laboratory of Information Processing Science. Universidad de Helsinki. www.cs.hut.fi	38
Ilustración 9. Piezas realizadas con sinterización selectiva por láser. FUENTE: www.roechling-plastics.es	39
Ilustración 10. Pieza realizada con sinterización selectiva por láser. FUENTE: www.roechling-plastics.es	39
Ilustración 11. Engranaje realizado por la técnica SHS. FUENTE: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html	39
Ilustración 12. Hélice realizada por la técnica SHS. FUENTE: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html	39
Ilustración 13. Sistema de prototipado por sinterización selectiva por calor. FUENTE: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html	40

Ilustración 14. Fotopolimerización con luz ultravioleta. FUENTE: www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/	41
Ilustración 15. Hélices de ADN realizadas mediante la técnica SCG. FUENTE: www.aimme.es	41
Ilustración 16. Esquema del sistema de manufactura por laminado (LOM). FUENTE: elblogdelplastico.blogs.upv.es	42
Ilustración 17. Patente STRATASYS. Fuente: www.stratasys.com	45
Ilustración 18. Impresora 3D Makerbot Replicator 2. Fuente: www.makerbot.com	46
Ilustración 19. Esquema de funcionamiento de la extrusión directa. Fuente: www.mibqyyo.com	48
Ilustración 20. Esquema de funcionamiento de la extrusión Bowden. Fuente: www.mibqyyo.com	49
Ilustración 21. Estructura de impresora 3D. Fuente: www.makershopbcn.com	50
Ilustración 22. Electrónica de impresora 3D. Fuente: www.printatahit.com	51
Ilustración 23. Extrusor impresora 3D metálico. Fuente: www.makemania.com	51
Ilustración 24. Primera impresora 3D. Modelo Darwin. FUENTE: reprap.org	52
Ilustración 25. Impresora Makerbot Cupcake. FUENTE: design.interactif.free.fr	53
Ilustración 26. Impresora RepRap Mendel. FUENTE: reprap.org	54
Ilustración 27. Impresora 3D modelo Cupcake, de MakerBot. Fuente: MakerBot Industries Inc.	55
Ilustración 28. Impresora 3D modelo Thing-O-Matic, de MakerBot. Fuente: MakerBot Industries Inc.	55
Ilustración 29. Madre, primera impresora de Clone Wars, modelo Thing-O-Matic de MakerBot. Fuente: www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars	56
Ilustración 30. Primer juego de piezas para clonar una Prusa Mendel Iteración 2 hecho por un clon del Proyecto Clone Wars, por la Prusa Mendel R2. Fuente: www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars	57
Ilustración 31. Árbol genealógico completo del Proyecto Clone Wars.	57

Ilustración 32. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte I.....	59
Ilustración 33. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte II.	59
Ilustración 34. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte III.	60
Ilustración 35. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte IV.....	61
Ilustración 36. Estructuras de los termoplásticos. Fuente: http://www.losadhesivos.com/termoplastico.html	70
Ilustración 37. Pieza impresa con ABS y después de un baño de acetona. Fuente: Koala 3D Labs.	72
Ilustración 38. Figura impresa con Laybrick. Fuente: http://www.bcn3dtechnologies.com/	75
Ilustración 39. Protector de teléfono móvil realizado con filamento flexible. Fuente: www.matterhackers.com	76
Ilustración 40. Mango de bicicleta realizado con filamento flexible. Fuente: www.3dbanan.com.au	76
Ilustración 41. Pieza realizada a base de Laywoo-D3. Fuente: www.formizable.com ..	76
Ilustración 42. Pieza realizada con filamento fluorescente <i>Glow in the Dark</i> . Fuente: www.thor3d.ca	77
Ilustración 43. Modelo realizado mediante doble extrusión. Fuente: www.stuyo-3d.es	83
Ilustración 44. Figura realizada mediante doble extrusión. Fuente: http://www.imprint3d.com	83
Ilustración 45. Impresora BQ Witbox. Fuente: www.bq.com	84
Ilustración 46. Impresora Ultimaker 2. Fuente: www.ultimaker.com	84
Ilustración 47. Montaje marco acero.	98
Ilustración 48. Montaje marco de acero.	98
Ilustración 49. Montaje elementos de sujeción de correa de eje Y.	98
Ilustración 50. Montaje elementos de sujeción de correa de eje Y.	98
Ilustración 51. Formación de base de eje Y.....	99

Ilustración 52. Formación de base de eje Y.....	99
Ilustración 53. Montaje soportes de motores de eje Z.....	99
Ilustración 54. Montaje soportes de motores de eje Z.....	99
Ilustración 55. Anclaje soportes de motores de eje Z a la estructura.	100
Ilustración 56. Anclaje soportes de motores de eje Z a la estructura.	100
Ilustración 57. Montaje motor y rodamiento de eje Y.....	100
Ilustración 58. Montaje motor y rodamiento de eje Y.....	100
Ilustración 59. Montaje rigidizadores estructura.	101
Ilustración 60. Instalación base de eje Y.	101
Ilustración 61. Instalación base de eje Y.	101
Ilustración 62. Instalación de correa eje Y.	102
Ilustración 63. Ensamblado X-Axis motor end.	102
Ilustración 64. Ensamblado X-Axis motor end.	102
Ilustración 65. Montaje <i>X-Axis idler end</i>	103
Ilustración 66. Montaje <i>X-Axis idler end</i>	103
Ilustración 67. Montaje eje X.	103
Ilustración 68. Montaje eje X.	103
Ilustración 69. Acoplamiento del eje X a la estructura.....	104
Ilustración 70. Acoplamiento del eje X a la estructura.....	104
Ilustración 71. Colocación de motores del eje Z.	104
Ilustración 72. Colocación de motores del eje Z.	104
Ilustración 73. Colocación de tuercas en el <i>X-carriage</i>	105
Ilustración 74. Colocación de tuercas en el <i>X-carriage</i>	105
Ilustración 75. Montaje <i>X-carriage</i> en eje X.....	105
Ilustración 76. Montaje <i>X-carriage</i> en eje X.....	105
Ilustración 77. Montaje <i>extruder idler</i>	106

Ilustración 78. Montaje <i>extruder idler</i>	106
Ilustración 79. Montaje bloque del extrusor.....	107
Ilustración 80. Piezas para el montaje del bloque del extrusor.	107
Ilustración 81. Montaje bloque del extrusor.....	107
Ilustración 82. Montaje pantalla LCD.	108
Ilustración 83. Montaje pantalla LCD.	108
Ilustración 84. Ensamblaje LCD a la estructura de la impresora.	108
Ilustración 85. LCD ensamblado a la estructura.....	108
Ilustración 86. Termistor de cama caliente.....	108
Ilustración 87. Asegurado de cableado de termistor de la cama caliente.....	109
Ilustración 88. Montaje cama caliente sobre base del eje Y.....	109
Ilustración 89. Montaje cama caliente sobre base del eje Y.....	109
Ilustración 90. Elementos para el montaje del extrusor.....	110
Ilustración 91. Montaje <i>nozzle</i> y barrera de calor en bloque calefactor.	110
Ilustración 92. Montaje termistor.	111
Ilustración 93. Montaje termistor sobre bloque calefactor.	111
Ilustración 94. Montaje disipador de calor.	111
Ilustración 95. Soldadura de cableado del termistor.....	112
Ilustración 96. Montaje cartucho calefactor.	112
Ilustración 97. Extrusor completamente ensamblado.....	112
Ilustración 98. Bloque extrusor finalizado.	113
Ilustración 99. Montaje bloque extrusor sobre <i>X-carriage</i> y finalización de la estructura.	113
Ilustración 100. Arduino Mega 2560. Fuente: www.arduino.cc	115
Ilustración 101. <i>Shield</i> RAMPS 1.4 SB. Fuente: www.staticboards.es	115
Ilustración 102. Esquema <i>driver</i> de motor A4988.	115

Ilustración 103. <i>Driver</i> para motor A4988.	115
Ilustración 104. Finales de carrera y piezas imprimibles para su sujeción.....	116
Ilustración 105. Montaje <i>endstop</i> eje Y.....	116
Ilustración 106. Montaje <i>endstop</i> eje Z.	116
Ilustración 107. Montaje <i>endstop</i> eje X.....	116
Ilustración 108. Esquema de conexión drivers A4988 sobre Ramps.	117
Ilustración 109. Arduino y Ramps antes de montaje.....	117
Ilustración 110. Conjunto de placas montadas sobre la estructura.....	118
Ilustración 111. Esquema de conexión de cableado en electrónica Ramps.....	118
Ilustración 112. Conexión endstops en Ramps.....	119
Ilustración 113. Consumo en mA. de la electrónica.....	119
Ilustración 114. Consumo de la electrónica con el motor del eje X en funcionamiento.	119
Ilustración 115. Página web de Arduino. www.arduino.cc	120
Ilustración 116. Gráfico de temperatura de salida del extrusor en Marlin y en Sprinter en función del tiempo. Fuente: http://www.tr3sdland.com	121
Ilustración 117. Selección de tarjeta en el entorno Arduino.....	121
Ilustración 118. Pestaña <i>Configuration.h</i> de Marlin en Arduino.	122
Ilustración 119. Selección de placa en Arduino.	122
Ilustración 120. Definición de termistores en Marlin.....	123
Ilustración 121. Ajuste de lógica de los finales de carrera.	123
Ilustración 122. Activación/desactivación de motores cuando no están en uso.....	123
Ilustración 123. Inversión de dirección de los finales de carrera.	124
Ilustración 124. Dirección de los finales de carrera al hacer <i>homing</i>	124
Ilustración 125. Dimensiones máximas del área de impresión.	124
Ilustración 126. Definición de las temperaturas máximas de trabajo.....	125

Ilustración 127. Definición de las temperaturas mínimas para la comprobación del correcto funcionamiento de los termistores.....	125
Ilustración 128. Definición de mínima temperatura de extrusión.	125
Ilustración 129. Valores de movimiento de los ejes por paso de motor.....	125
Ilustración 130. Firmware en proceso de carga en la electrónica desde Arduino.	126
Ilustración 131. Finalización de carga de firmware.	126
Ilustración 132. Pieza para eliminación de problema de choque de motores con marco de acero.	132
Ilustración 133Bloque de doble extrusor montado.....	133
Ilustración 134. Conexiones en la electrónica de la impresora para el doble extrusor.	134
Ilustración 135. Cambio de placa en Marlin para doble extrusor.....	134
Ilustración 136. Definición de dos extrusores en <i>configuration_adv.h</i>	135
Ilustración 137. Configuración doble extrusor en Repetier Host.	135
Ilustración 138. Pantalla principal Repetier Host con doble extrusor.	136
Ilustración 139. Cambios en <i>Machine settings</i> en Cura.	136
Ilustración 140. Cambios en menú <i>Basic</i> en Cura.....	137
Ilustración 141. Modelado barrera de protección de la impresora.	140
Ilustración 142. Circuito integrado LM317.....	140
Ilustración 143. Esquema circuito integrado LM317 para regulación de caudal de ventiladores.....	140
Ilustración 144. Impresora dentro de la barrera de protección física.	141
Ilustración 145. Resultado test cubo de calibración eje X.....	144
Ilustración 146. Resultado test cubo de calibración eje Y.....	145
Ilustración 147. Resultado test cubo de calibración eje Z.	145
Ilustración 148. <i>Dimensional accuracy test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	147
Ilustración 149. <i>Dimensional accuracy test</i>	147

Ilustración 150. <i>Overhang test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	148
Ilustración 151. <i>Overhang test</i>	148
Ilustración 152. <i>Bridging test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	149
Ilustración 153. <i>Bridging test</i>	149
Ilustración 154. <i>Bridging test</i> con ABS.....	149
Ilustración 155. <i>Positive fine feature test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	150
Ilustración 156. <i>Positive fine feature test</i>	150
Ilustración 157. <i>Tolerance test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	151
Ilustración 158. <i>Tolerance test</i>	151
Ilustración 159. <i>XY resonance test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	152
Ilustración 160. <i>XY resonance test</i>	152
Ilustración 161. <i>Z resonance test</i>	152
Ilustración 162. <i>Z resonance test</i>	152
Ilustración 163. Medición eje X cubo de calibración primer extrusor.	154
Ilustración 164. Medición eje Y cubo de calibración primer extrusor.	154
Ilustración 165. Medición eje Z cubo de calibración primer extrusor.....	154
Ilustración 166. Medición eje X cubo de calibración segundo extrusor.	155
Ilustración 167. Medición eje Y cubo de calibración segundo extrusor.	155
Ilustración 168. Medición eje Z cubo de calibración segundo extrusor.....	155
Ilustración 169. <i>Dimensional accuracy test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	157
Ilustración 170. <i>Dimensional accuracy test</i> extrusor 1.	157
Ilustración 171. <i>Dimensional accuracy test</i> extrusor 2.	157
Ilustración 172. <i>Overhang test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	158
Ilustración 173. <i>Overhang test</i> extrusor 1.	158
Ilustración 174. <i>Overhang test</i> extrusor 2.	158
Ilustración 175. <i>Bridging test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	159

Ilustración 176. <i>Bridging test</i> extrusor 1.	159
Ilustración 177. <i>Bridging test</i> extrusor 2.	159
Ilustración 178. <i>Positive fine feature test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	160
Ilustración 179. <i>Positive fine feature test</i> extrusor 1.	160
Ilustración 180. <i>Positive fine feature test</i> extrusor 2.	160
Ilustración 181. <i>Tolerance test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	161
Ilustración 182. <i>Tolerance test</i> extrusor 1.	161
Ilustración 183. <i>Tolerance test</i> extrusor 2.	161
Ilustración 184. <i>XY resonance test</i> . Fuente: Revista Make vol.42	162
Ilustración 185. <i>XY resonance test</i> extrusor 1.	162
Ilustración 186. <i>XY resonance test</i> extrusor 2.	162
Ilustración 187. <i>Z resonance test</i>	162
Ilustración 188. <i>resonance test</i> extrusor 1.	163
Ilustración 189. <i>Resonance test</i> extrusor 2.	163
Ilustración 190. Cono de tráfico en dos colores.	164
Ilustración 191. Pulpo en dos colores.	164
Ilustración 192. Montaje de poleas.	181
Ilustración 193. Poleas para movimiento de las correas de ejes X e Y.	182
Ilustración 194. Montaje de tuercas en elemento de eje X.	182
Ilustración 195. Montaje de tuercas en elemento de eje X.	182
Ilustración 196. Elementos imprimibles eje X montados.	182
Ilustración 197. Tensor de correa de eje X.	183
Ilustración 198. Conjunto de eje X ensamblado.	183
Ilustración 199. Preparación <i>X-carriage</i>	183
Ilustración 200. Pieza de alojamiento de polea de eje Y.	183
Ilustración 201. Ensamblaje eje X.	184

Ilustración 202. Montaje marco y eje Z.....	184
Ilustración 203. Montaje varillas roscadas.	184
Ilustración 204. Acople marco y eje X.....	185
Ilustración 205. Montaje base de la impresora.	185
Ilustración 206. Montaje correa eje Y.	186
Ilustración 207. Instalación de base de metacrilato.....	186
Ilustración 208. Instalación <i>endstop</i> de eje Y.....	187
Ilustración 209. Instalación de <i>X-carriage</i> y correa del eje X.....	187
Ilustración 210. Colocación soporte de extrusor.	188
Ilustración 211. Montaje de bloque extrusor sobre soporte.....	188
Ilustración 212. Colocación de vidrio.....	189
Ilustración 213. Colocación de placa electrónica sobre marco.	189
Ilustración 214. Instalación pantalla LCD.....	190
Ilustración 215. Impresora montada a falta de cableado.	190
Ilustración 216. Introducción de cableado en la cadena portacables.....	191
Ilustración 217. Instalación cadena portacables.	191
Ilustración 218. Conexión elementos de extrusor.....	192
Ilustración 219. Diagrama de conexión electrónica impresora. Fuente: www.mibqyyo.com	192
Ilustración 220. Conexión electrónica.	193
Ilustración 221. Selección de impresora.....	195
Ilustración 222. Submenú de selección de impresora.....	195
Ilustración 223. Menú de la opción <i>Custom</i>	195
Ilustración 224. Ventana principal de Cura.....	196
Ilustración 225. Pestaña <i>Basic</i>	199
Ilustración 226. Pestaña <i>Advanced</i>	201

Ilustración 227. Pestaña <i>Plugins</i>	203
Ilustración 228. Pestaña <i>Start/end Gcode</i>	204
Ilustración 229. Menú <i>File</i>	204
Ilustración 230. Ventana <i>preferences</i>	205
Ilustración 231. Menú <i>Machine settings</i>	206
Ilustración 232. Menú <i>tools</i>	208
Ilustración 233. Menú <i>machine</i>	208
Ilustración 234. Menú <i>expert</i>	209
Ilustración 235. Ventana <i>expert settings</i>	209
Ilustración 236. Asistente de nivelación de base.....	213
Ilustración 237. Menú <i>Help</i>	214

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Sistemas de impresión 3D. FUENTE: Sistemas de Prototipado Rápido. José Antonio Alonso Rodríguez. Diseño Industrial. Universidad de Vigo.....	35
Tabla 2. Especificaciones de las diferentes placas Arduino.....	68
Tabla 3. Elementos estructurales para construcción de impresora.....	88
Tabla 4. Elementos mecánicos para construcción de impresora.....	90
Tabla 5. Elementos de varillaje para construcción de impresora.....	91
Tabla 6. Elementos electrónicos para construcción de impresora.....	92
Tabla 7. Elementos de tornillería para construcción de impresora.....	94
Tabla 8. Piezas impresas necesarias para construcción de impresora.....	95
Tabla 9. Partes del doble extrusor.....	130
Tabla 10. Medición del cubo de calibración con un extrusor.....	145
Tabla 11. Resultados de test de evaluación cualitativa de la impresora.....	153
Tabla 12. Calibración de cubo con el primer extrusor.....	154
Tabla 13. Calibración de cubo con el segundo extrusor.....	155
Tabla 14. Resultados de test de los dos extrusores de la impresora.....	163
Tabla 15. Coste inicial impresora 3D.....	166
Tabla 16. Coste mejora doble extrusor.....	168
Tabla 17. Coste mejora barrera de protección física.....	169
Tabla 18. Botones de ventana principal en Cura.....	197

1. INTRODUCCIÓN.

Este Trabajo Fin de Grado se plantea como una iniciación al mundo de la impresión 3D, el prototipado rápido y el estudio de los diferentes materiales aptos para realizar dichos prototipados, así como las implementaciones de mejora de una impresora 3D con la única limitación de la imaginación para el diseño de los prototipos.

Se trata de un campo en el que se intenta que desde empresas hasta usuarios particulares, pasando por profesionales, tengan al alcance a coste “económico” un equipo con capacidad para facilitar el desarrollo de cualquier prototipo, en un tiempo razonablemente bajo en comparación con un encargo a un profesional del sector.

El prototipado rápido crea modelos o tridimensionales como prototipos o productos terminados de acuerdo a una serie de técnicas de procesado de material como la estereolitografía, sinterización selectiva por láser, manufactura de objetos laminados, fotopolimerización por luz UV, fusión láser, modelado por deposición fundida, entre muchos otros que se desarrollarán en el apartado correspondiente de este TFG.

La técnica elegida para este Trabajo Fin de Grado es la de modelado por deposición fundida (FDM), la cual ha sido elegida por ser la más asequible dentro de todas las técnicas y a su vez, quizá por este hecho, es la más extendida para el prototipado rápido, tal y como lo muestran en diferentes publicaciones.

Otro factor a favor de esta técnica es la facilidad de acceso a la gran cantidad de información para el diseño, construcción y mejora de la impresora 3D, pues existe innumerable información, así como una muy extensa variedad de mejoras para la misma. Aún quedan muchas mejoras por hacer, todo es cuestión de no poner límites a la imaginación de cada persona.

El mundo de la impresión 3D es el futuro en bastantes aspectos, pues abre un campo al poder obtener piezas funcionales de infinidad de formas. A partir de la impresión 3D, se podrán realizar en un ambiente doméstico cualquier reparación en la que sea necesaria una pieza sustituible por otra de plástico.

Todo esto se traduce en una gran competencia a las industrias de prototipado y fabricación, pues se pueden conseguir elementos totalmente funcionales y bajo coste y con la rapidez que conlleva la impresión 3D doméstica.

Así como el modelado sólido facilita el diseño de formas complejas y su representación gráfica, el prototipado rápido permite la materialización de una maqueta

real o un modelo funcional, que adaptado a la educación, posibilita una mayor transferencia de experiencia y una mejor asimilación de la actividad industrial al aula, con el beneficio que ello conlleva tanto para el docente como para los alumnos.

Dentro de la impresión 3D, el proyecto más conocido es el *Proyecto RepRap*, iniciativa basada en la creación de una máquina auto-replicante, que es utilizada para el prototipado rápido y la manufactura, desde un modelo creado en CAD 3D. Por autoreplicante se quiere decir que la impresora es capaz de reproducir las piezas de la que está formada, para construir otra versión de sí misma.

Pero, al mismo tiempo que se realizan mejoras a los diseños (la impresora 3D en la que se basa este Trabajo Fin de Grado difiere mucho de la primera impresora realizada), la primera idea que surge es ¿por qué no mejorarla?, ¿Qué puntos débiles tiene la máquina?, ¿Qué aspectos se pueden mejorar?

En primer lugar, al analizar los puntos débiles, se puede observar que las impresoras 3D, como todo aparato electrónico, son relativamente delicados, pues los ambientes son capaces de mermar su capacidad de funcionamiento, por lo que se plantea la pregunta: ¿Por qué no protegerla? Pues dicho y hecho. Se ha creado una caja a base de aluminio, madera y metacrilato para protegerla de ambientes pulvígenos, corrientes de aire, y golpes accidentales que puedan estropear una impresión, o incluso la impresora.

Ahora bien, una vez encerrada dentro de una caja, se plantea otra cuestión: el calor tampoco es muy buen aliado de las máquinas, por lo que necesitaremos ventilar su interior de alguna forma. Para dar solución a este problema se han incorporado dos ventiladores en la parte trasera, los cuales realizarán renovaciones de aire para mantener la temperatura interior lo más constante posible. Los mismos han sido colocados estratégicamente para que la corriente de aire generada no afecte a la impresión.

Resueltos los problemas surgidos, y con ánimo de mejorar la impresora, se planteó la idea de ¿por qué imprimir modelos con un solo material pudiendo hacerlo con dos diferentes, o con dos colores distintos mezclados? Entonces se propuso la mejora de realizar una impresora que tuviera dos extrusores distintos, para combinar dos materiales en una misma figura, sin importar que tuvieran puntos de fusión distintos.

¿Y por qué tiene que ser dependiente de la conexión a un ordenador cuando solo tiene que leer un archivo y monitorizar unas temperaturas? Para ello se incorporará un lector

de tarjetas y una pantalla LCD, aunque se mantendrá la salida para la conexión a un ordenador.

Como resultado es la impresora que se montará y a la que se le aplicarán las mejoras expuestas en los párrafos anteriores durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

2. OBJETIVOS.

El presente **Trabajo Fin de Grado** consiste en el **diseño y construcción de una impresora 3D de código abierto sin necesidad de conexión con un PC, evolucionando el diseño al implementar además de implantarle un segundo bloque extrusor que trabaje de forma simultánea con el primero, además de protegerla dentro de una caja con sistema de ventilación.**

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado, se desarrollará el montaje de la impresora, tanto la mecánica como la electrónica, además del firmware nativo que será implementado en la impresora. Así mismo, se mostrará la calibración de la impresora y las pruebas de impresión. Una vez realizadas las pruebas con un extrusor, se incorporarán las mejoras descritas a la impresora, es decir, la instalación de un segundo extrusor y la construcción de una barrera de protección física adecuando el ambiente interno de la mencionada barrera. Se completará el Trabajo Fin de grado con un estudio económico del coste final de la impresora con la comparación de precio con impresoras 3D comerciales.

La **impresora 3D** tratada en este proyecto basada en *Open Source*, es mucho más barata que la que se puede encontrar suministrada por los grandes fabricantes, ya que toda la documentación para su fabricación, software, etc., es libre, por lo que puede adquirirse gratuitamente en internet, permitiendo además colaborar en el desarrollo y mejoras de las versiones de impresora 3D.

El **principal objetivo** del proyecto es la idea de **mejorar una máquina** capaz de autoreplicarse, impensable hace unos años, pues nadie podía imaginar poder tener un aparato en el que poder realizar modelos tangibles en el ámbito doméstico, tanto modelos existentes en internet, como cualquier pieza que la imaginación pueda llegar a pensar, hasta incluso maquetas a escala.

Dichas mejoras, después de haber estudiado los modelos de impresoras 3D existentes, han sido:

- a. La inclusión de un segundo extrusor para poder realizar modelos en dos materiales distintos o en dos colores del mismo material, muy útil en el caso de imprimir modelos sin apoyo, pues éstos se pueden realizar en un material soluble con la acción de otro elemento, como puede ser el ABS y la acetona, por ejemplo.
- b. Creación de una barrera de protección física para aislar a la impresora de las posibles corrientes de aire a su alrededor, ya que dichas corrientes pueden llegar a

arruinar una impresión de un modelo, con el consiguiente coste económico y de tiempo.

- c. La implementación de un sistema autónomo para el funcionamiento, consistente en un lector de tarjetas desde el que se introducirá el archivo con la información del modelo a imprimir y un panel LCD por el que mostrará la información del estado de la impresora y desde el que se podrán seleccionar algunas opciones de configuración de la impresora.

El trabajo realizado en la satisfactoria conclusión de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado corresponde al siguiente listado de hitos más importantes:

- a. Búsqueda de información acerca de la impresión 3D.
- b. Profundización en los sistemas de impresión 3D y eligiendo uno de los sistemas en los que se basará el objetivo del Trabajo Fin de Grado (Sistema por deposición de plástico fundido (FDM)).
- c. Selección de un modelo de impresora 3D para su diseño y construcción.
- d. Estudio en mayor profundidad de los parámetros de la impresora 3D elegida, evaluando y analizando las mejoras a realizar.
- e. Construcción de la nueva impresora.
- f. Calibración de la impresora.
- g. Evaluación de los resultados obtenidos.
- h. Materialización e implementación de las mejoras al proyecto realizado.
- i. Evaluación de los resultados obtenidos.
- j. Estudio de la viabilidad económica del prototipo y comparación con otros modelos.

Para la realización del presente Trabajo Fin de Grado serán necesarios conocimientos en varias áreas de la Ingeniería Industrial, tales como electrónica, informática, programación, teoría de mecanismos, electricidad, ingeniería de los materiales y resistencia de materiales.

3. ESTADO DEL ARTE.

3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO.

El *rapid manufacturing* o **prototipado rápido** es una técnica que consiste en la **generación de piezas o prototipos mediante la impresión 3D**, que permite la generación de estos a coste muy bajo y en tiempos bastante reducidos.

El *desktop prototyping* es otro concepto ligado al *rapid manufacturing*, que se refiere a la creación de estas piezas o prototipos en un entorno doméstico o de oficina. Normalmente el uso de esta técnica es realizado por usuarios técnicos con unos conocimientos avanzados en el campo del diseño y la electrónica, aunque poco a poco se va abriendo el campo a un mayor número de usuarios con menores conocimientos acerca de las materias requeridas.

El funcionamiento del prototipado rápido sigue el esquema siguiente:

A. NECESIDAD:

El prototipado rápido comienza con la **necesidad de creación o réplica de un objeto**, ya sea por la petición de un cliente, o por interés de encontrar una solución a alguna cuestión que le surja a un usuario.

B. PLASMAR EL CONCEPTO:

El concepto se **esboza en un inicio sobre papel** para asegurar que la realización del mismo es posible, así como para afianzar el concepto que tiene el usuario o un potencial cliente.

Cabe mencionar en este apartado que la plasmación del concepto puede ser realizada también en un inicio mediante un escáner 3D, o incluso el avance ha llegado a usar un accesorio de la consola de *Microsoft XBOX 360* llamado controladora *Kinect* para la reproducción en pantalla de un objeto real.

El concepto posteriormente es plasmado ya en un **entorno CAD 3D** (existen multitud de software para su dibujo en 3D que se abordará en un posterior capítulo). Dicho entorno CAD 3D puede ser Autocad, Catia, Solidworks, Freecad, Sketchup, etc.

C. IMPRESIÓN:

Una vez el prototipo está plasmado en el entorno CAD, es necesario su **tratamiento antes de ser mandado a la impresora 3D** para su proceso. Para esto, el archivo es

traducido a instrucciones gcode, que son las líneas de código que las impresoras 3D saben interpretar.

Las instrucciones en gcode son, de manera muy general, coordenadas cartesianas en tres dimensiones que indican a la impresora dónde ha de realizar acciones para la impresión 3D.

D. OBTENCIÓN DE LA PIEZA FÍSICA:

Se puede haber realizado la **pieza final**, o, también, puede haberse realizado un **molde** que sirva para la posterior realización de la pieza con respecto a ese molde.

3.1.1. USOS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO.

Son muchas las ventajas que ofrece el prototipado rápido, así como clasificaciones, que, como ejemplo, se realiza a continuación, basando el uso por sectores:

A. USO PARA DESARROLLADORES DE PRODUCTO.

Es el sector donde el prototipado tiene un mayor impulso, permite en infinidad de sectores o disciplinas (diseño, ingeniería, etc.) desarrollar trabajos a pequeña escala sin la necesidad del acceso a grandes instalaciones. En este grupo se puede incluir prototipos como nuevas impresoras 3D, fresadoras CNC, robots, etc.



Ilustración 1. Caja de cambios de 5 velocidades para motor Toyota 22RE. Fuente: <http://3dprint.com/50265/3d-printed-toyota-transmission/>

3.2.IMPRESIÓN 3D.

Basando el concepto en la definición más ampliamente aceptada, la **impresión 3D** se podría definir como un **proceso** mediante el cual se pueden **fabricar** dentro de unas determinadas dimensiones límites que determina la máquina, **objetos sólidos tridimensionales** de casi cualquier forma física, en base a un modelo generado mediante técnicas digitales y software adecuado.

Contrariamente a la creencia habitual, la impresión 3D no es una tecnología reciente, sino que aproximadamente tiene unos 30 años, pues la primera máquina funcional capaz de realizar impresiones fue creada en el año 1.984, y ya había habido un interés por la impresión 3D que llevó a realizar varias investigaciones en las décadas de los 50 y 70.

En el año 1.984, Charles Hull estuvo experimentando con las resinas líquidas que se solidifican con la exposición de las mismas a la luz UV. Hull se dio cuenta que con un rayo láser se pueden solidificar ciertas partes de la resina, formando una película donde las partes sólidas representan un corte transversal de un objeto tridimensional.

Controlando el movimiento del láser con órdenes por ordenador, Hull desarrolló un sistema que dibujaba un objeto capa por capa en una batea de resina líquida, haciendo que la batea bajara y sumergiera la capa solidificada en resina y poder solidificar la siguiente capa mediante la misma técnica de aplicación de láser. Así, capa a capa de resina, Hull consiguió imprimir el primer objeto 3D de la historia. En el año 1.986, el inventor obtuvo la patente (*US#4575330*)¹ sobre este proceso de impresión que llamó “estereolitografía” y al mismo tiempo fundó la empresa 3D Systems, una de las mayores empresas actualmente en este sector.

Aunque todo el desarrollo en este campo ha sido en base al invento de Charles Hull, cabe destacar que en 1.956, Otto Bunz obtuvo una patente por un invento casi idéntico al de Charles Hull (*US#2775758*)² y, en 1.977, Wyn Kelly Swainson, obtuvo otra patente por otro invento muy similar (*US#4041476*)³.

¹ Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Charles W. Hull. 1986.

² PHOTO-GLYPH RECORDING Otto John Munz, Annapolis, Md. Application May 25, 1951, Serial No. 228,180

³ Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product. Wyn Kelly Swainson. 1977.

En 1.992, la primera máquina de impresión 3D del tipo SLA apareció en el mercado, desarrollada y comercializada por la empresa 3DSystems (fundada por Charles Hull).

En el año 1.999, se utilizó la impresión 3D para la creación, a partir de células del propio paciente y de un recubrimiento sintético, de un aumento del tamaño de la vejiga urinaria del paciente citado.

En la Universidad de Bath (Inglaterra, Reino Unido), el Dr. Adrian Bowyer funda RepRap en el año 2.005, una iniciativa de código abierto para la construcción de una impresora 3D capaz de imprimir la mayoría de sus componentes.

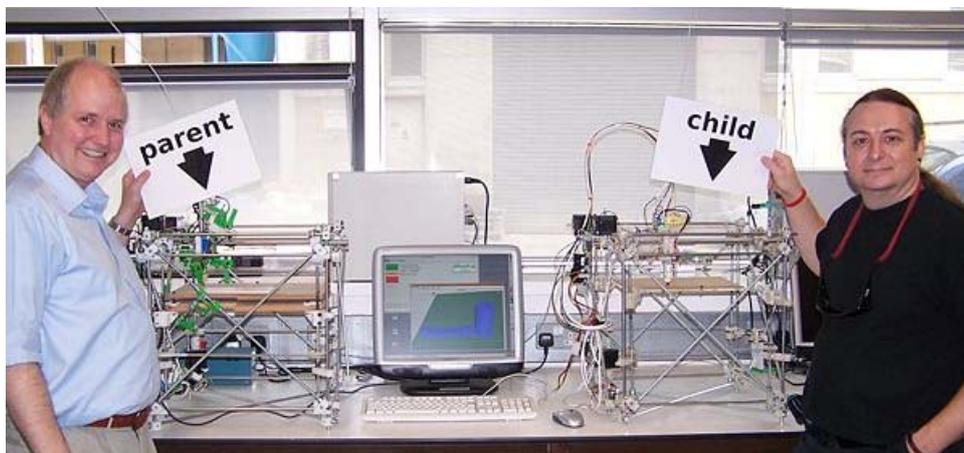


Ilustración 5. Adrian Bowyer (izqda.) y Vik Oliver (dcha.) con la primera impresora 3D creada y su primer clon. Año 2.008. Fuente: www.reprap.org

Al año siguiente, se construye la primera máquina del tipo SLS (sinterización por láser selectivo). Esta máquina cuenta con la capacidad de fundición de materiales por láser en el proceso de impresión 3D. Este hecho abre las puertas a la personalización y a la demanda masiva de fabricación de piezas. Más tarde, se implementará la técnica para la creación de prótesis.

Ese mismo año, Object, proveedor de materiales e impresoras 3D, crea una máquina capaz de impresión en múltiples materiales, consiguiendo que en la pieza final pueda existir variedad de densidades del material de fabricación.

En 2.008, el proyecto RepRap, del que se hablará más adelante en este Trabajo Fin de Grado, consigue dar sus frutos anunciando la creación de una impresora capaz de auto-replicar la mayoría de sus componentes. Dicha impresora será bautizada como Darwin, en honor a Charles Darwin, autor de la “Teoría de la Evolución de las Especies”.

También en 2.008, se consigue que una persona camine con una pierna de prótesis realizada sin montaje (es decir, de una pieza) en una impresora 3D. Este avance trajo consigo la posibilidad de fabricación de prótesis personalizadas para cualquier paciente.

Un año después, en 2.009, la empresa *Makerbot Industries LCC*, con sede en Estados Unidos, lanzaría al mercado el primer kit para la construcción de una impresora 3D DIY (*Do It Yourself*). El avance en ese año para la medicina llegó de la mano de la bio-impresión. El Dr. Gabor Forgacs utilizó una bio-impresora 3D para la creación del primer vaso sanguíneo.

El año 2.011 fue una revolución en cuanto a avances en ingeniería, con la llegada del primer avión no tripulado impreso en 3D (desarrollado en la Universidad de Southampton (Inglaterra, Reino Unido)), el primer coche con carrocería íntegramente impresa en 3D (empresa *Kor Ecologic*) y las primeras impresiones en oro y plata, lo que permite abrir en joyería un nuevo mercado con diseños más económicos, pues el tiempo de realización de las piezas se minora sensiblemente.

En 2.013, científicos diseñaron un riñón en miniatura completamente funcional y con la capacidad de filtrar sangre y producir orina diluida en un animal. A raíz de este gran desarrollo, el objetivo del Instituto de Wake Forest de medicina regenerativa⁴ fue la investigación de la impresión 3D para la reproducción de órganos y tejidos funcionales.

La impresión 3D fue descubierta hace relativamente bastante tiempo, pues la idea es una extensión bastante directa de la fotografía, y la impresora 3D es, en el fondo, un motor que mueve una plataforma de impresión o un cabezal según el objeto a diseñar.

La principal razón por la que la impresión 3D no ha sido desarrollada hasta hace poco tiempo ha sido que este campo es la convergencia de otros tres distintos, a saber, hardware, software y materiales, ya que en estos tres ámbitos, el avance en las dos últimas décadas ha sido vertiginoso.

Hoy en día, esta tecnología es más relevante que nunca y se le están adjudicando propósitos antes impensables. No solo permite una producción rápida, de menor coste y con un mayor detalle, sino que hace posible la configuración de formas imposibles de conseguir mediante los métodos de producción tradicionales.

⁴ <http://www.wakehealth.edu/WFIRM/>

Todo esto convierte a la impresión 3D en la herramienta esencial para desarrollo de prototipos, así como de productos terminados de alta complejidad. Y, aunque aún está en proceso de exploración de los límites de fabricación, dará mucho que hablar durante los próximos años, pues representa una verdadera “Revolución Industrial”, o incluso, la superación de esta. En poco tiempo se llegará a la creación personalizada y al momento para cada usuario, dejando a un lado la creación en serie.

3.3. SISTEMAS DE IMPRESIÓN 3D.

Las técnicas de impresión 3D pueden ser clasificadas según la siguiente tabla:

Tabla 1. Sistemas de impresión 3D. FUENTE: Sistemas de Prototipado Rápido. José Antonio Alonso Rodríguez. Diseño Industrial. Universidad de Vigo.

TIPO DE IMPRESIÓN	TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN	MATERIAL BASE
EXTRUSIÓN	Modelado por deposición fundente (FDM).	Termoplásticos (los más normales son ABS y PLA), metales y otros componentes fundibles.
	Sinterizado de metal por láser (DMLS).	Aleaciones metálicas.
GRANULAR	Fusión por haz de electrones (EBM).	Aleaciones de titanio.
	Sinterizado selectivo por calor (SHS).	Termoplásticos en polvo.
	Sinterizado selectivo por láser (SLS).	Termoplásticos, metal y cerámicos en polvo.
	Impresión por proyección aglutinante (DSPC).	Material en polvo (plástico si se usan resinas tintadas).
LAMINADO	Manufactura por laminado (LOM).	Papel, hojas metálicas o film plástico.
POLIMERIZACIÓN POR LUZ	Estereolitografía (SLA).	Fotopolímero, resina líquida.
	Procesado digital por luz (DLP).	Resina líquida.
OTRAS	Fotopolimerización por luz UV (SGC).	Fotopolímero, resina fotosensible.
	Impresión con hielo.	Agua.

A continuación se tratarán las técnicas más importantes y las que mayor peso tienen tanto en el mercado como en las industrias:

3.3.1. ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA).

Se basa en el desencadenado de un proceso de polimerización de una resina sobre la que incide un láser UV de unos pocos milivatios. Los puntos afectados por el láser se solidifican, creando una capa con la forma trazada en el diseño en cada altura de la pieza.

La geometría de la capa dirige el movimiento de dos espejos que reflejan el haz láser sobre la superficie de trabajo. Cuando se ha finalizado una capa, la superficie de apoyo de la pieza terminada realiza un movimiento vertical descendente para la creación de la siguiente capa por el mismo método, dejando la capa terminada cubierta por la resina líquida.

Una vez finalizada la pieza es necesario aplicar un post-curado para que la pieza quede totalmente solidificada. Este tratamiento se realiza en un horno bajo luz ultravioleta.

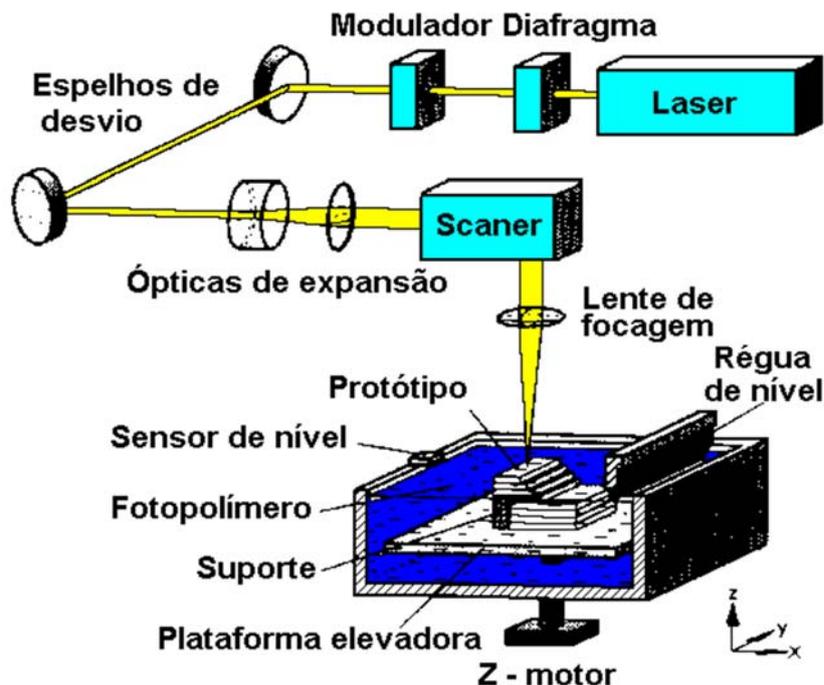


Ilustración 6. Sistema de impresión por estereolitografía. FUENTE: http://www.maschinenbau.tu-ilmenu.de/mb/wwwkt/teachweb/lehrgebiete/cad/rapidprot_p/html/009.html

Es un proceso de fabricación que necesita poco tiempo para crear un objeto y es posible crear objetos funcionales relativamente rápido. Los periodos de fabricación varían de

acuerdo al tamaño y la complejidad de la pieza, con diferencias de tiempo entre unas horas y poco más de un día por pieza.

En cuanto a la durabilidad, cabe destacar que los productos creados con esta técnica son lo suficientemente resistentes para su procesado o para su uso como moldes de inyección de plástico y en los procesos de termo-formado.

El coste de esta técnica actualmente es bastante caro, pues la resina usada en esta técnica oscila entre 70 € y 220 € por litro y las máquinas tienen un precio de aproximadamente unos 100.000,00 €

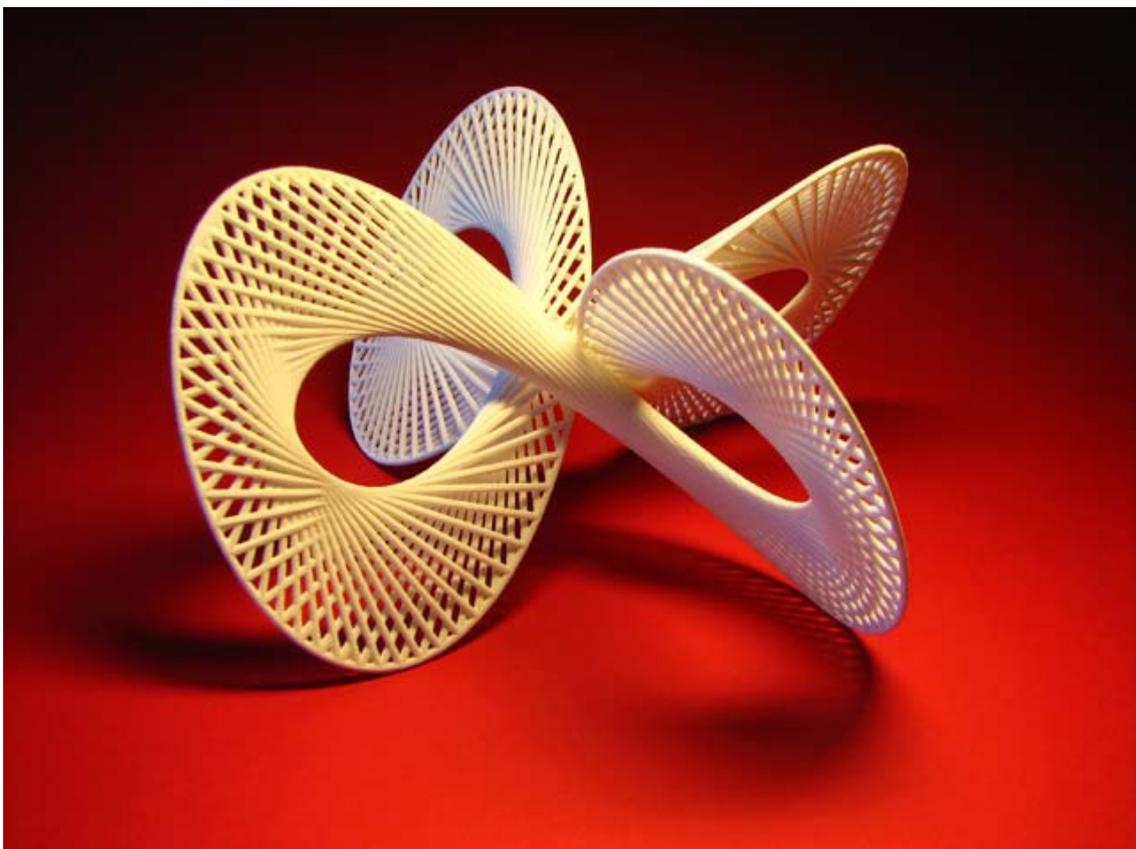


Ilustración 7. Pieza fabricada por estereolitografía. FUENTE: <http://es.3dilla.com/impresora-3d/estereolitografia/>

3.3.2. SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS).

La sinterización selectiva por láser es una técnica que fabrica las piezas por capas. El material base es un polvo, cuyas partículas miden alrededor de 50×10^{-9} metros.

La tecnología se basa en la aplicación de un láser sobre áreas seleccionadas que causa que las partículas afectadas se fusionen y posteriormente se solidifiquen. El método es

similar a la estereolitografía, empezando a fabricar los objetos por su parte inferior y terminando por la superior.

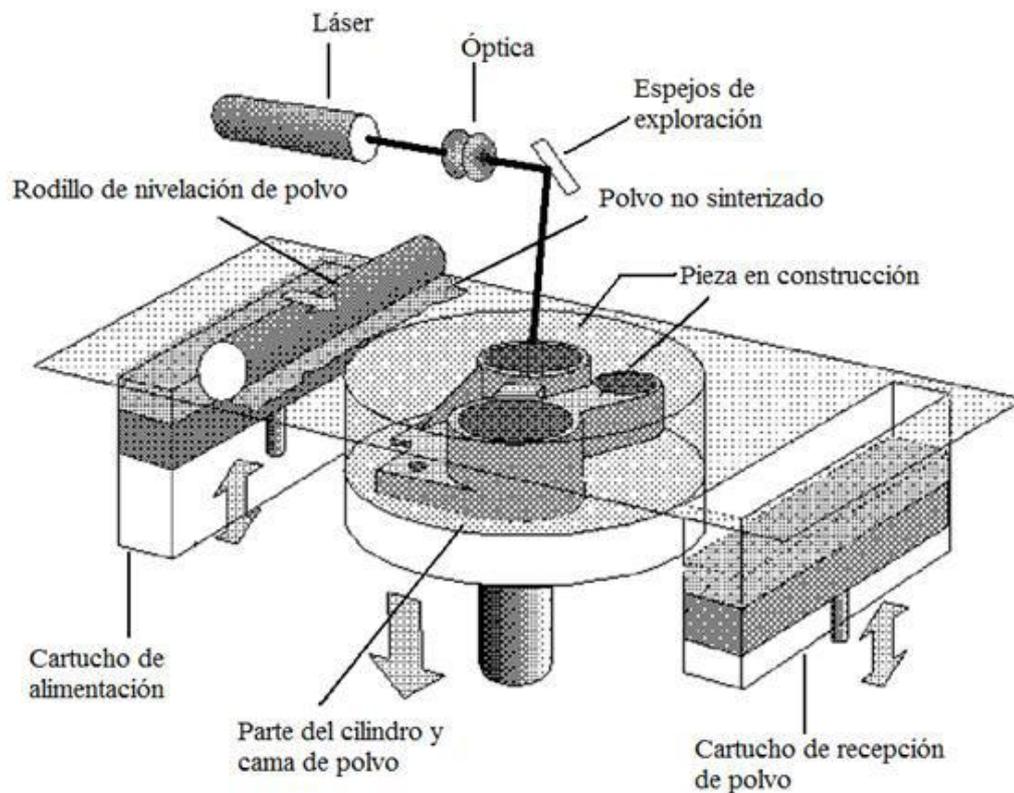


Ilustración 8. Esquema de sinterización selectiva por láser. FUENTE: Laboratory of Information Processing Science. Universidad de Helsinki. www.cs.hut.fi

El funcionamiento de esta técnica empieza por la deposición sobre una superficie horizontal de una capa de polvo (décimas de mm.) dentro de una cuba que se ha calentado hasta una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo (del orden de un grado inferior). Esta capa de polvo puede ser de varios materiales, tales como policarbonato, nylon, ABS, etc. Pero normalmente son usadas las poliamidas.

Posteriormente, un rayo láser sinteriza el polvo en las áreas seleccionadas. Una ventaja de este sistema respecto a la estereolitografía es que, al usar polvo, no es necesario crear una estructura de soporte. El rayo láser es reflejado mediante espejos sobre las partículas de polvo.

El aporte necesario para la capa siguiente se realiza mediante la subida de un pistón que expulsa polvo y un rodillo que se encarga de mantener la superficie nivelada y extendida de manera uniforme. Este proceso es iterado hasta la finalización de la pieza.



Ilustración 9. Piezas realizadas con sinterización selectiva por láser. FUENTE: www.roechling-plastics.es



Ilustración 10. Pieza realizada con sinterización selectiva por láser. FUENTE: www.roechling-plastics.es

3.3.3. SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR CALOR (SHS).

En este proceso es usado un cabezal de impresión térmica para aplicar calor a las capas de termoplástico en polvo.

El proceso de fabricación de la pieza sigue el mismo patrón que en la sinterización selectiva por láser, es decir, de manera secuencial, al terminar una capa, el lecho de polvo junto con la capa solidificada se moverá hacia abajo con la ayuda de un pistón (baja la bandeja sobre la que se apoya) y un rodillo automatizado añadirá una nueva capa de termoplástico perfectamente nivelada para fabricar la siguiente capa. Una vez terminada la pieza, esta pasa a una estación post-proceso para una limpieza del exceso de polvo, el cual puede ser reutilizado para una nueva fabricación.

El proceso de sinterización selectiva por calor es, quizá, el mejor proceso en cuanto a coste en la fabricación de prototipos para su evaluación, concepto y pruebas.



Ilustración 11. Engranaje realizado por la técnica SHS. FUENTE: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html>



Ilustración 12. Hélice realizada por la técnica SHS. FUENTE: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html>

Este proceso permite crear formas muy complejas y salientes, que en otro tipo de impresión 3D necesitaría tener un soporte especial.

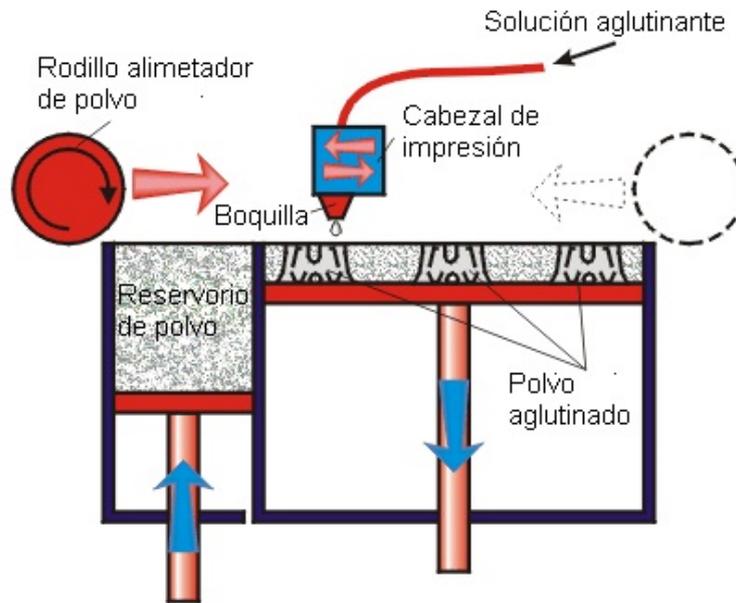


Ilustración 13. Sistema de prototipado por sinterización selectiva por calor. FUENTE:
<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/SHS.html>

3.3.4. FOTOPOLIMERIZACIÓN POR LUZ UV (SGC).

La tecnología de fotopolimerización por luz ultravioleta (Solid Ground Curing) se basa, como la estereolitografía, en la solidificación de un fotopolímero o una resina fotosensible en estado líquido, solo que, en esta técnica, en vez de un láser, se utiliza una lámpara de luz ultravioleta de gran potencia todos los puntos de la capa simultáneamente.

El funcionamiento es más laborioso que el de la sinterización selectiva por láser, pues ha de estar supervisado por personal técnico en todo momento. En un primer momento se realiza un modelado CAD 3D de la pieza o prototipo a conseguir por capas. Una vez realizado, se genera una máscara por cada capa, la cual se coloca encima de la superficie de trabajo en la que previamente se ha extendido una capa delgada y plana del fotopolímero líquido. Acto seguido, la superficie se irradia con la luz ultravioleta de gran potencia, solidificándose el polímero expuesto. El proceso de endurecimiento tarda de 2 a 3 segundos. El líquido que queda debajo de la máscara no sufre alteración y se retira para dejar libre la superficie de trabajo y rellenándola posteriormente con cera caliente, la cual servirá de apoyo al enfriarse.

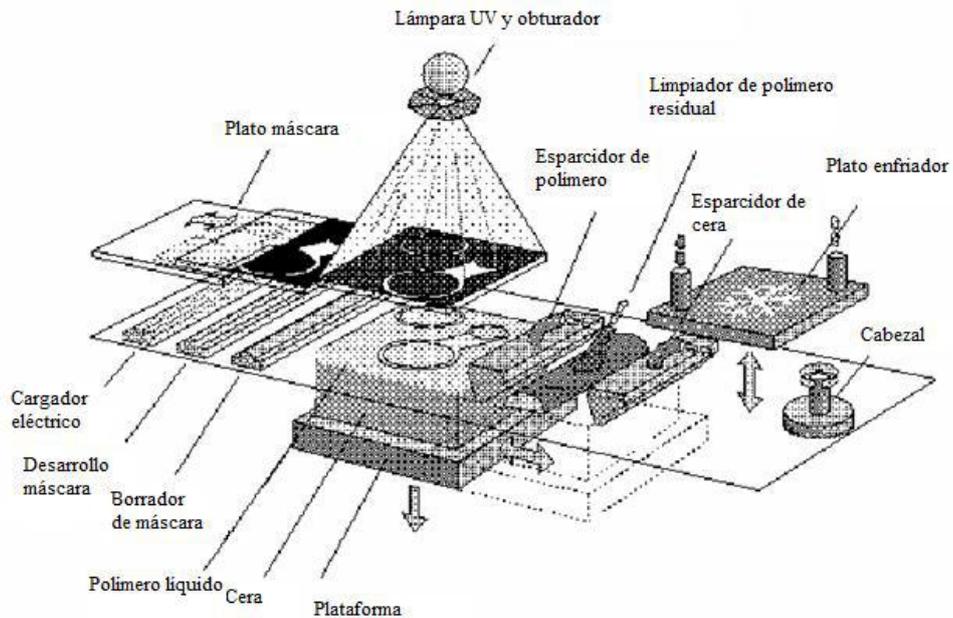


Ilustración 14. Fotopolimerización con luz ultravioleta. FUENTE:
www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/

Según la empresa desarrolladora de la técnica, se consigue una mayor precisión que con cualquier otra técnica. Otra de sus ventajas es que si existe alguna capa errónea, se puede retirar y volver a fabricar desde esa capa en adelante. Por el contrario, los modelos fabricados son translúcidos y quebradizos.



Ilustración 15. Hélices de ADN realizadas mediante la técnica SCG. FUENTE: www.aimme.es

3.3.5. PROYECCIÓN AGLUTINANTE (DSCP).

Es una tecnología de impresión que utiliza material en polvo en capas para después ligarlo selectivamente con un material aglutinante.

El material en polvo (normalmente composite) se deposita sobre al área de trabajo de manera uniforme y, a continuación, varios cabezales similares a los de inyección de tinta de las impresoras domésticas lanzan el material aglutinante (que puede ser en un solo color o varios) sobre la sección de la capa que se ha de formar.

Al terminar la impresión, el composite sobrante se aspira, pudiéndose utilizar para otra impresión, dejando la pieza o prototipo limpio y sin residuos. Se ha de tener especial cuidado en esta fase, pues la pieza desarrollada es muy frágil, y para que adquiera dureza, se ha de sumergir en un baño de adhesivo especial para que incrementar su dureza y resistencia.

La tecnología puede utilizarse para realizar modelos en color, moldes, moldes inversos y, dependiendo del infiltrante, conseguir hasta modelos elásticos.

3.3.6. MANUFACTURA POR LAMINADO (LOM).

Esta tecnología se basa en el añadido de capas como las anteriores, pero la diferencia es que el proceso se realiza con materiales en estado sólido, como pueden ser papel, metal o plástico en láminas.

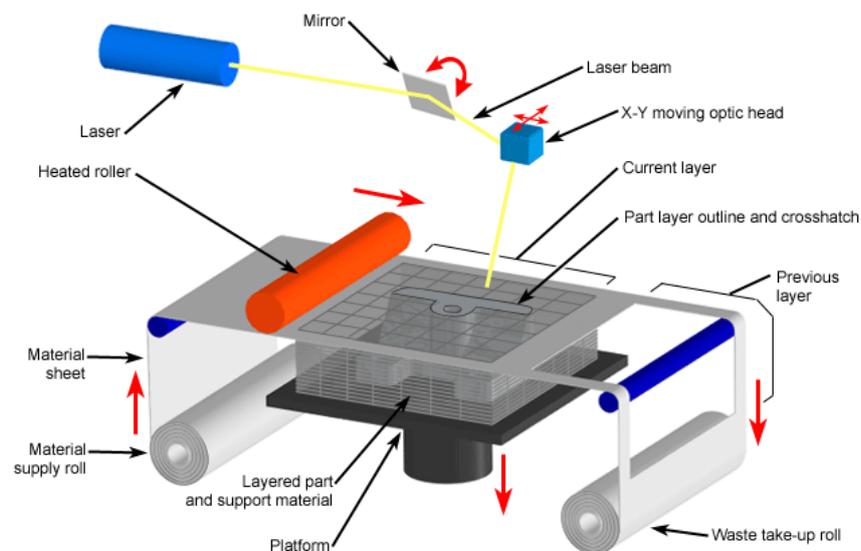


Ilustración 16. Esquema del sistema de manufactura por laminado (LOM). FUENTE:

elblogdelplastico.blogs.upv.es

La primera capa de material es encolado, normalmente con polímeros sensibles al calor. Se coloca dicha capa sobre el soporte y se apisona por un rodillo calentado, lo que confiere a la capa de polímero poder de pegado. Posteriormente, y con la ayuda de un láser, se corta el contorno ajustando a las dimensiones de la pieza. El material sobrante se corta en cuadrículas pequeñas para facilitar su retirado. Este proceso se repite hasta que se finalice la pieza.

Las ventajas de este sistema de impresión son no tener que aplicar un post-procesado a la pieza y la garantía de uniformidad del material, pues este no cambia de estado, por lo que se obtiene una pieza estable y homogénea.

3.3.7. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDENTE (FDM).

La técnica de modelado por deposición fundente (FDM) es usado para la producción de modelos y prototipos a pequeña escala. Se utiliza una técnica consistente en la deposición por capas de material fundido para la creación de la pieza. Un filamento plástico (aunque puede ser de otros materiales) es introducido por una boquilla, la cual se encarga de fundir el material.

El proceso comienza por un modelado en CAD 3D, pasando a un fichero estereolitográfico, para orientar el objeto de la mejor forma posible para la impresión, para seguir con la realización de cortes en la pieza, de grosor de décimas de milímetro. Conforme al diseño de la pieza, se calculan todas las trayectorias que habrá de seguir la boquilla para la deposición del material. Dicha boquilla se encuentra 1°C por encima de la temperatura de fusión del material y es capaz de desplazarse en los tres ejes X, Y, Z mediante un control electrónico. La boquilla es desplazada por varios motores paso a paso. Al salir de la boquilla, el material se solidifica adhiriéndose a la anterior capa, así conformando la pieza.

La calidad de la pieza se ve incrementada a un menor espesor de capa, pero requiere un mayor tiempo de impresión.

Aunque el modelado por deposición fundente es una técnica muy flexible, también posee algunas limitaciones, como la incapacidad de crear voladizos en las piezas sin tener un material de apoyo.

Los principales y más extendidos materiales en esta tecnología son el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) y el PLA (Ácido poliláctico). Existe un capítulo en esta memoria exclusivamente dedicado a los materiales usados en este tipo de impresión.

Dado que es la tecnología más asequible en el mercado, y la más extendida para el usuario medio, en este Trabajo Fin de Grado se ha seleccionado realizar el diseño y construcción de una impresora 3D de este tipo de tecnología.

3.4. EL SISTEMA DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDENTE (FDM).

En 1.986 surgió el método de impresión por extrusión, sistema creado por la empresa Stratasys, más concretamente en el mes de Octubre, con la patente estadounidense llamada *Topology Fabrication Apparatus* y que puede ser considerada como el inicio del modelado por deposición fundida.

En esta patente se define la máquina como un aparato con un cabezal inyector de plástico, el cual va montado sobre un brazo que a su vez se mueve según un carro móvil⁵. El control se realizaba mediante un ordenador y dicha máquina permitía movimientos en varios ejes simultáneamente.

La patente desarrollada por Stratasys se centra en el proceso de impresión de modelado por deposición fundida. Con ella no solo crea la máquina, sino que se introduce el método del modelado.

La patente *Apparatus and Method for creating three-dimensional objects*, define un aparato que incorpora un cabezal dispensador, el cual inyecta material a una determinada temperatura sobre una base, y que es capaz de moverse a lo largo de los ejes “X”, “Y” y “Z” en un patrón específico que crea el objeto en tres dimensiones⁶. Los objetos en 3 dimensiones son creados depositando y solidificando capa tras capa de material hasta que la forma es construida. Cada capa base queda definida por su capa anterior. El espesor de la capa está controlado y queda definido por la altura que asciende el dispensador de material.

Dentro del texto de la patente se definen también algunos aspectos característicos de la máquina. El cabezal dispensador, controlado por ordenador, puede ser movido a lo largo del eje “Z” para crear capas tan pequeñas como 0.0001 pulgada. La altura de estas

⁵ *Topology Fabrication Apparatus*, patente en Estados Unidos creada por Stratasys.

⁶ *Apparatus and Method for creating three-dimensional objects*, patente presentada en 1.989.

capas puede ser modificada para tener diferente altura de capa en función de la posición dentro de la pieza⁷.

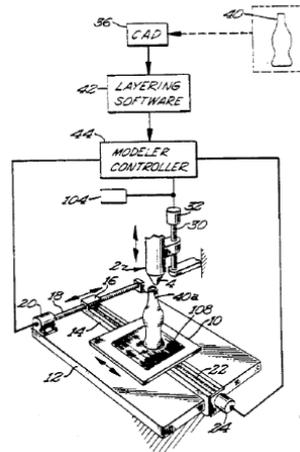


Ilustración 17. Patente STRATASYS. Fuente: www.stratasys.com

Con respecto a la entrada de material, en la patente establece un sistema de rollos de material plástico que es introducido por el cabezal a través de una guía. Este material entra en el inyector y es calentado por encima de su temperatura de solidificación. Mediante un control por software se mantiene la temperatura de salida en torno a 1°C por encima del punto de solidificación. Esto hace que el nivel de unión entre capas sea más alto porque solidifica sobre la capa anterior.

La expiración de la patente en el año 2.009 y la creciente oferta actual de impresoras 3D que usan esta tecnología ha sido la causa de la revolución de la industria. Hace unos años, el precio de este tipo de impresoras se situaba en el rango entre los 5.000 y los 15.000 € mientras que actualmente se ha llegado a precios entre 500 – 1500 €

Otro de los detonantes de la bajada de precios fue la iniciativa RepRap, creada con el propósito de desarrollar una máquina de prototipado rápido capaz de autoreplicarse. Esta iniciativa ha ido creciendo y se ha creado una comunidad muy numerosa, llegando a crear una máquina con un nivel de sofisticación muy alto.

Una de esas comunidades alrededor de la iniciativa RepRap, el proyecto Clone Wars, fue fundada en España, y actualmente es una de las comunidades más importantes que

⁷ Apparatus and Method for creating three-dimensional objects, patente presentada en 1.989.

existen en este mundo de la impresión 3D. En ella se pueden encontrar más de 1.000 personas compartiendo conocimientos de todas las áreas de la ingeniería y la tecnología.

Detrás de este movimiento está la filosofía “*Do It Yourself (DIY)*”⁸, traducido “Hazlo Tu Mismo” lo que crea que poco a poco se vayan introduciendo considerables mejoras en los modelos.

A la finalización de la patente, en Estados Unidos, surgieron varias empresas que empezaron a comercializar modelos de impresoras 3D a un relativo bajo coste. Quizá la compañía que mayor éxito tuvo fue la empresa Makerbot, la cual, como curiosidad, ha conseguido colocar una impresora a cada uno de los ingenieros de la empresa Ford, fabricante de automóviles. En Europa y en España, se han creado también empresas con esa misma filosofía, pero con bastantes años de atraso con respecto a Makerbot.

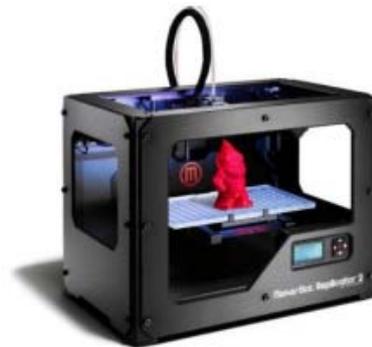


Ilustración 18. Impresora 3D Makerbot Replicator 2. Fuente: www.makerbot.com

3.4.1. EXTRUSIÓN DIRECTA Y EXTRUSIÓN BOWDEN.

El extrusor de una impresora 3D es la pieza que toma el filamento de la bobina y la deposita sobre la superficie de impresión de forma totalmente precisa, y acorde a los parámetros de impresión que lee la impresora desde el archivo GCODE, para generar capa a capa la pieza que se ha diseñado con anterioridad.

El extrusor es un elemento que está compuesto de varias piezas y puede ser muy diferente de una impresora a otra, incluso puede ser diferente entre dos impresoras iguales ya que, en principio, se podría cambiar y adaptar según la impresora, el extrusor y la electrónica de cada una. En este conjunto de piezas existen los siguientes elementos normalmente:

⁸ Adrian Bowyer. Creador del movimiento RepRap.

- **Motor paso a paso:** Es utilizado para conseguir que el filamento se desplace desde la zona por donde se realiza su introducción hasta que es depositado sobre la base para conformar la pieza. Es controlado por la impresora, girando en pequeños pasos precisos para que se deposite la cantidad exacta de plástico sobre la pieza en construcción. este motor se utiliza para el empuje del filamento desde la zona por donde entra desde la bobina hasta que sale por la boquilla para ser depositado el material de impresión sobre la pieza en construcción.

- **Engranaje de tracción:** Pieza colocada sobre el eje del motor cuya función es traccionar sobre el filamento para que este se desplace dentro del extrusor, de acuerdo con la velocidad de dicho motor. Para tal función, está provista de una parte dentada.

- **Engranaje reductor:** En ocasiones se usa un engranaje de diámetro superior para aumentar la fuerza aplicada sobre el filamento para el arrastre. Así, este engranaje toca de forma directa el filamento, por lo que con una menor fuerza del motor, se consigue el mismo arrastre de filamento.

- **Rodamiento de presión:** Es un rodamiento con la función de aprisionar contra el engranaje reductor el filamento y que éste se desplace linealmente acorde las órdenes que recibe el motor.

- **Guía del filamento:** Es un tubo de PTFE que guía el filamento desde el motor hasta el *hotend* para conseguir que no se atasque en ningún punto. Este tubo tiene el diámetro exacto para que por su interior pase el filamento. Es usado en las impresoras cuya alimentación se produce por filamento de diámetro 1.75 mm.

- **Hotend:** Elemento que calienta el filamento por encima de su punto de fusión para que salga de forma líquida por su boquilla final y se deposite sobre la superficie de impresión. Es un bloque que puede ser de completamente metálico o con partes de plástico hasta donde llega la guía del filamento. Se debe prestar especial atención al gradiente de temperaturas en su interior, pues dicho gradiente puede acarrear serios problemas tales como atascos en su interior.

- **Sensor de temperatura:** Es el elemento que se encarga de medir la temperatura para que el sistema de control de la temperatura ejecute las órdenes correctas de calentamiento o enfriamiento de las partes controladas. Mide la

temperatura exacta que existe en el extrusor con la finalidad de la fusión del material a la correcta temperatura.

- **Boquilla de salida:** Es una pieza generalmente fabricada con latón donde llega el filamento derretido y lo deposita sobre la base de impresión por un pequeño agujero cuyo diámetro ha sido previamente definido en el software de control.

Los extrusores de las impresoras son prácticamente iguales, contando con los mismos elementos comunes. Verían los diámetros de filamento con los que se puede trabajar (1.75 mm. y 3 mm.) y el diámetro de la boquilla de salida.

Existen dos tipos diferentes de extrusión, la extrusión directa y la extrusión Bowden, que a continuación se detalla su funcionamiento.

3.4.1.1. EXTRUSIÓN DIRECTA.

El sistema de extrusión directa es el sistema más simple que existe, a la vez que es muy efectivo.

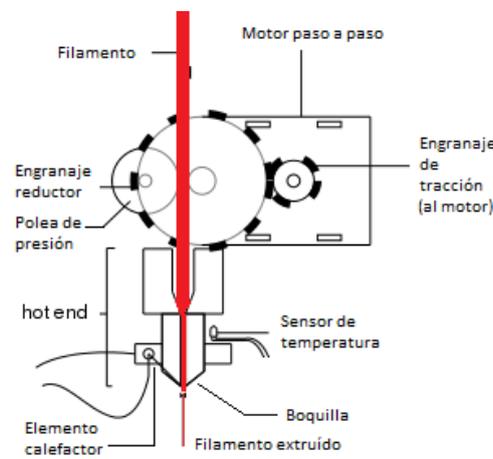


Ilustración 19. Esquema de funcionamiento de la extrusión directa. Fuente: www.mibqyyo.com

El filamento llega de forma directa hasta la boquilla de extrusión pasando por el motor de arrastre. El conjunto es formado en una sola pieza que se mueve a lo largo del eje X como un bloque.

Entre sus **ventajas** se pueden nombrar:

- Extrusor compacto.
- Fácil comprobación de avería o resolución de atasco.
- Totalmente desmontable.

Las ventajas son muy grandes en el uso de este tipo de extrusión, pero el **mayor inconveniente** de este tipo de extrusión es el gran peso del bloque extrusor, afectando en gran medida en el desplazamiento de los ejes X y Z al tener que ser movida una mayor masa.

3.4.1.2. EXTRUSIÓN BOWDEN.

La extrusión Bowden es muy parecida en cuanto a elementos que la componen y en la forma de hacer que el filamento llegue a la boquilla de salida. La principal diferencia radica en la colocación del motor de empuje, pues este está separado del bloque del extrusor y el filamento es conducido hasta él mediante una tubería flexible.

El término Bowden ha sido cogido de la funda de los cables de freno de las bicicletas, ya que esa es la principal característica del sistema.

Este sistema de extrusión tiene también sus **ventajas**:

- El bloque de extrusión es mucho más ligero al no estar el motor dentro de dicho bloque, con lo que los movimientos del eje X y Z son mucho más fluidos, es decir, el carro se desplaza con mucha menor dificultad.
- El tamaño de dicho bloque es mucho más pequeño.

Aunque, como la extrusión directa, también tiene sus **inconvenientes**:

- Es un sistema más complejo de montar y mantener.
- En principio es más susceptible a fallos (más sensible).
- Tiene más posibilidades de sufrir exudación⁹.

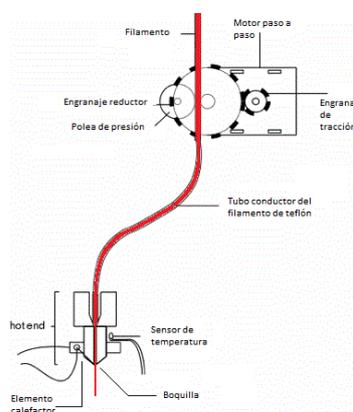


Ilustración 20. Esquema de funcionamiento de la extrusión Bowden. Fuente: www.mibqyyo.com

⁹ Exudación: concepto aplicado a la salida excesiva e imprevista de material por el *nozzle* o boquilla de salida.

3.5. ¿QUÉ ES UNA IMPRESORA 3D? PARTES PRINCIPALES.

Una impresora 3D es una máquina capaz de crear objetos mediante la técnica de modelado por deposición fundida, depositando capa a capa material fundido de acuerdo a unos parámetros leídos desde un fichero escrito en código G.

Este código G es generado mediante un programa que traduce un modelado en tres dimensiones realizado por software de dibujo tridimensional.

El código G es muy parecido al usado por las máquinas de control numérico, solo que con ligeras modificaciones para adecuarlo al uso específico del modelado por deposición fundida.

Las partes más importantes de una impresora se listan a continuación. Esta es una vista general para introducir al lector en el mundo de las impresoras 3D. Todas estas partes serán detalladas en el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado.

A. ESTRUCTURA Y MECÁNICA.

Es la parte de la impresora que sirve de soporte al resto de elementos de la máquina.

La estructura ha ido evolucionando desde la primera impresora, realizada con varillas y piezas imprimibles en las que se ensamblaban dichas varillas, hasta los marcos de acero con contrafuertes que se utilizan en la actualidad, pasando por la madera, el metacrilato, el aluminio, y todos ellos con distintas formas intentando siempre la optimización de dicha estructura.

La mecánica de las impresoras es bastante sencilla, pues para el movimiento se utilizan motores paso a paso combinados con correas y poleas, y para el guiado de los ejes son utilizadas varillas de acero.



Ilustración 21. Estructura de impresora 3D. Fuente: www.makershopbcn.com

B. ELECTRÓNICA.

La electrónica es el “alma” de la impresora. Es la encargada de recibir los datos y comandar a todos los elementos para que se realice el modelo. Consta normalmente de una placa Arduino y otra placa superpuesta sobre la que se conecta el cableado de toda la impresora. Esta electrónica es controlada mediante el software específico para impresión 3D.



Ilustración 22. Electrónica de impresora 3D. Fuente: www.printatahit.com

C. EXTRUSOR.

El extrusor es la parte que el material utilizado para la impresión se funde para a continuación ser depositado sobre la base de impresión, comandado por la electrónica. Existen muchos tipos de extrusores. Actualmente, los más utilizados son los fabricados completamente en metal, pues su resultado es muy bueno y no tienen problemas por las temperaturas alcanzadas.



Ilustración 23. Extrusor impresora 3D metálico. Fuente: www.makemania.com

3.6. LOS PROYECTOS REPRAP Y CLONE WARS.

3.6.1. PROYECTO REPRAP.

En el año 2.005 nació el **Proyecto RepRap**¹⁰, en la Universidad de Bath (Inglaterra, Reino Unido). Su precursor fue el ingeniero **Adrian Bowyer**. El nombre RepRap viene de “*Replicating Rapid prototyper*”.

La **filosofía** de este proyecto, desde un principio, siguió las directrices de los diseños y desarrollos *Open Source*, ya que pensaba que la industria nunca desarrollaría una máquina autoreplicable porque no sería rentable.

A los tres años, el proyecto llegó a buen puerto tras conseguir desarrollar el primer modelo de impresora 3D. Así, **en 2.008**, se creó la primera impresora 3D, modelo conocido como **Darwin**. Tres meses después de su creación, la impresora pudo crear su primera réplica.

El modelo Darwin que los componentes del Proyecto RepRap terminaron en el año 2.008 es una impresora como la que se muestra en la imagen inferior.

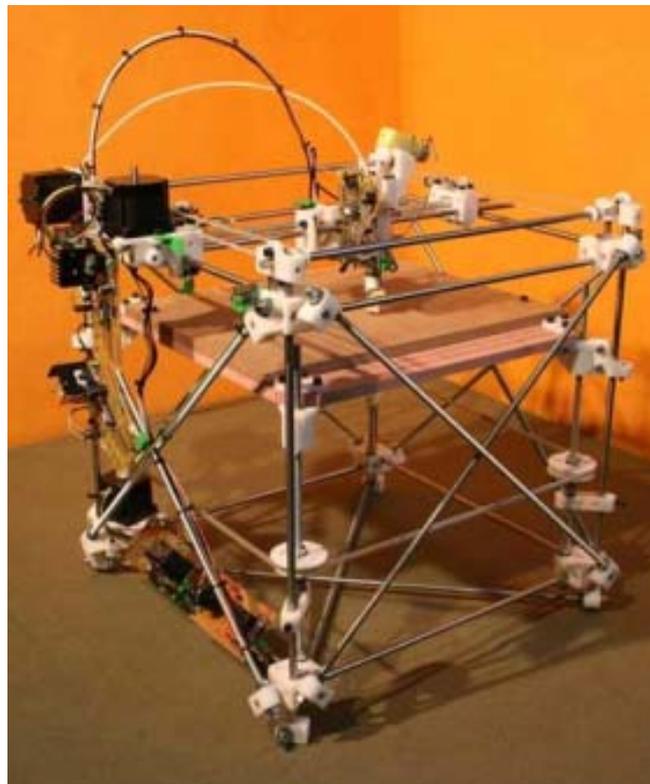


Ilustración 24. Primera impresora 3D. Modelo Darwin. FUENTE: reppap.org

¹⁰ www.reppap.org

Al poco tiempo, el grupo de ingenieros creció mucho y la *RepRap Foundation* fue creada. Uno de los impulsores fue el ingeniero **Zach Smith**, que por otro lado fue uno de los creadores de **Makerbot**.

Gracias a la *RepRap Foundation* se comenzaron a impartir talleres por todo el mundo. El propio Zach Smith dirigió el taller que se celebró en Febrero de 2.009 en el Medialab Prado de Madrid, en el cual se construyó una Darwin.

Zach Smith aprovechó para dar a conocer la noticia de que habían creado MakerBot Industries, dónde cualquiera podría comprar el material necesario para construirse un modelo de impresora que habían desarrollado en MakerBot, la denominada Cupcake; que costaba en total, incluyendo gastos de envío, alrededor de 715 €

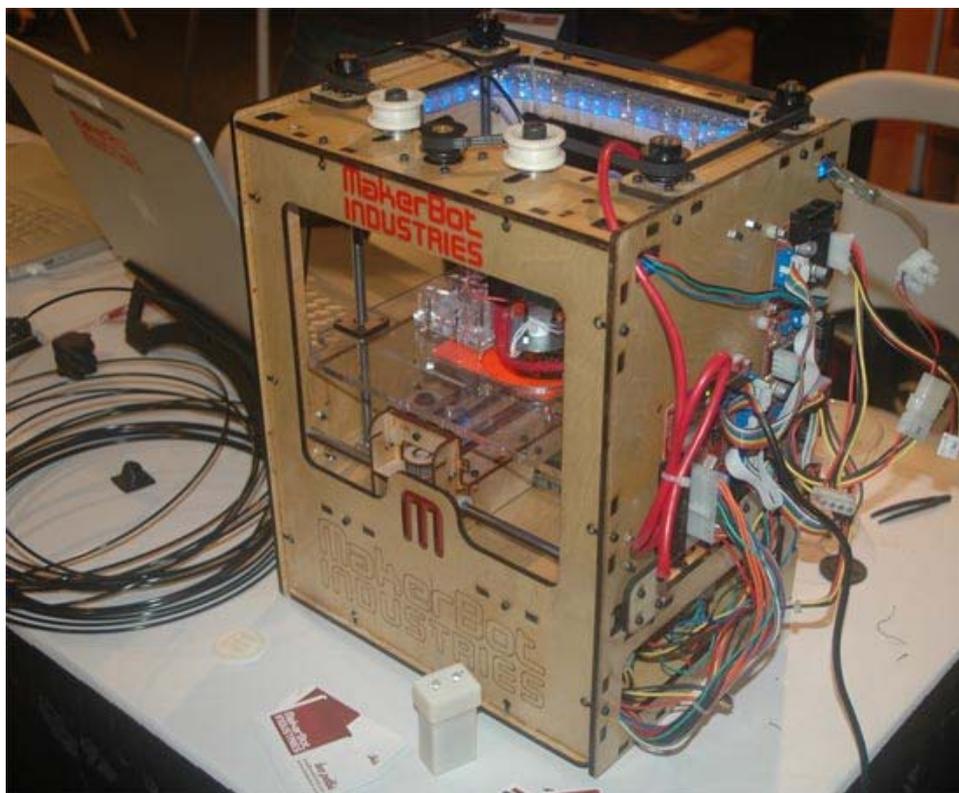


Ilustración 25. Impresora Makerbot Cupcake. FUENTE: design.interactif.free.fr

Cabe destacar también que Zach Smith, que recordemos que era uno de los impulsores de *RepRap Foundation*, creó la web *Thingiverse*¹¹. Esta web para subir sus diseños en 3D imprimibles y que los usuarios de impresoras 3D pudieran descargarlos. Actualmente,

¹¹ www.thingiverse.com

esta web es el mayor repositorio de piezas imprimibles en el mundo, ya que los usuarios suben sus diseños para compartirlos con el resto.

A finales del año **2.009**, el Proyecto RepRap dio el siguiente salto, ya que se terminó el diseño del modelo **Mendel**. Este ha sido, quizá, **el mayor avance** en el Proyecto RepRap, pues este modelo era mucho más fácil de ensamblar que los anteriores, así como su tamaño era mucho más compacto.

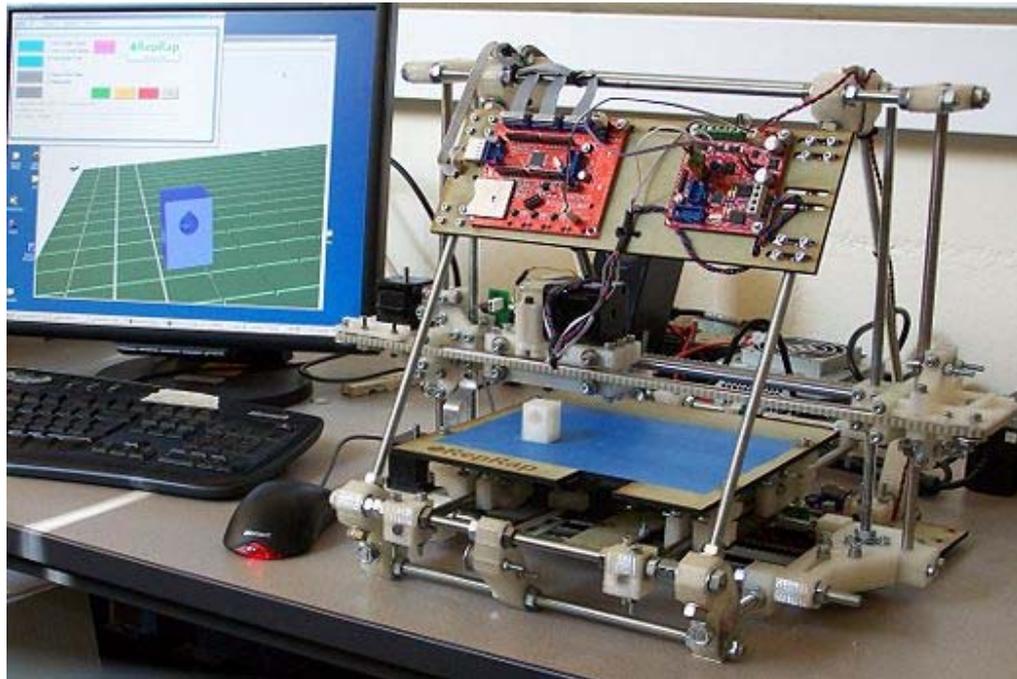


Ilustración 26. Impresora RepRap Mendel. FUENTE: repprap.org

Pero el modelo Mendel no se quedó sólo en eso, de él comenzaron a surgir modelos derivados, como podemos ver en lo que podemos llamar el “árbol genealógico” del Proyecto RepRap, el cual se puede ver en la dirección web http://repprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree.

3.6.2. MAKERBOT INDUSTRIES.

Al hablar en el Proyecto RepRap de la figura de Zach Smith hay que hablar también de la empresa MakerBot Industries.

Fue creada en Marzo de 2.009 por los ingenieros estadounidenses Zach Smith, Bre Pettis y Adam Mayer. En Julio de ese mismo año se mudaron a su local actual. Su primer producto fue el, ya comentado, modelo Cupcake.

Su fama comenzó a crecer y recibieron ayuda de la comunidad. En el año 2.011, pese a haber liberado todos los diseños del modelo Cupcake, recibieron una inversión de 10 millones de dólares.



Ilustración 27. Impresora 3D modelo Cupcake, de MakerBot. Fuente: MakerBot Industries Inc.

Evolucionaron su modelo Cupcake al modelo Thing-O-Matic, que es el que se puede apreciar en ilustración siguiente.



Ilustración 28. Impresora 3D modelo Thing-O-Matic, de MakerBot. Fuente: MakerBot Industries Inc.

Sin embargo, las impresoras de MakerBot, además de tener la pega importante de su alto precio y de que pierden la esencia de la filosofía Open Source, tienen el gran inconveniente de que su plataforma de impresión (de 10 x 10 cm) es un cuarto de la que tienen modelos como la Prusa Mendel original o su segunda versión (de 20 x 20 cm).

3.6.3. PROYECTO CLONE WARS.

El **Proyecto *Clone Wars***, es uno de los **más importantes** dentro de la **comunidad RepRap**. Es un **proyecto español** creado en nuestro país por el ingeniero Juan González Gómez en Abril de 2.011.

Este proyecto intenta documentar en español toda la documentación necesaria para construir una impresora 3D. Aparte de dicha documentación, intenta recopilar los comercios donde adquirir todo el material necesario para dicha construcción.

El Proyecto *Clone Wars* fue creado como una parte de la web de la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

En **Abril de 2.011** se celebró la **primera reunión** del Proyecto *Clone Wars* para exponer los fines del proyecto y para hablar sobre la impresora **Madre**, que pronto llegaría y que habría que ensamblar y calibrar.

Madre, la impresora de la imagen inferior y que la Asociación de Robótica de la UC3M recibió el 13 de Mayo de 2.011, tras todo el montaje, calibrado, etc., **imprimió su primera pieza el 17 de Mayo de 2.011**.



Ilustración 29. Madre, primera impresora de Clone Wars, modelo Thing-O-Matic de MakerBot. Fuente: www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars

El Proyecto *Clone Wars* fue expandiéndose fuera de la Universidad Carlos III gracias al grupo de correo de Google, con gente de España y de todas partes del mundo.

En Septiembre de 2.011, **Mardan**, fue el **primer clon** hecho por **Madre** y ensamblado por el Proyecto *Clone Wars*.

A finales de ese año, se consiguió realizar la primera **Mendel** a partir de la **Cupcake R1**. Fue la impresora bautizada como “R2”. En esta impresora se realizaron las piezas necesarias para replicar otras más, haciendo de donante para otros miembros del Proyecto **Clone Wars**.

Con la llegada del año 2.012 el Proyecto crecía cada vez más y más rápido. A principios de año, R2, imprimía por completo el primer juego de Prusa Mendel.



Ilustración 30. Primer juego de piezas para clonar una Prusa Mendel Iteración 2 hecho por un clon del Proyecto Clone Wars, por la Prusa Mendel R2. Fuente: www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars

Quizá el aspecto más importante del Proyecto *Clone Wars*, ha sido el cumplir uno de sus objetivos iniciales, y no es otro que haber creado una comunidad en la que todos los miembros exponen sus experiencias y resuelven sus dudas.

A día de hoy se ha hecho un **árbol genealógico** de los clones del Proyecto **Clone Wars**. Dicho esquema se muestra en la web del Proyecto Clone Wars, el cual se muestra en las siguientes ilustraciones para mejorar la visualización del mismo.



Ilustración 31. Árbol genealógico completo del Proyecto Clone Wars.

Ilustración 32. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte I.

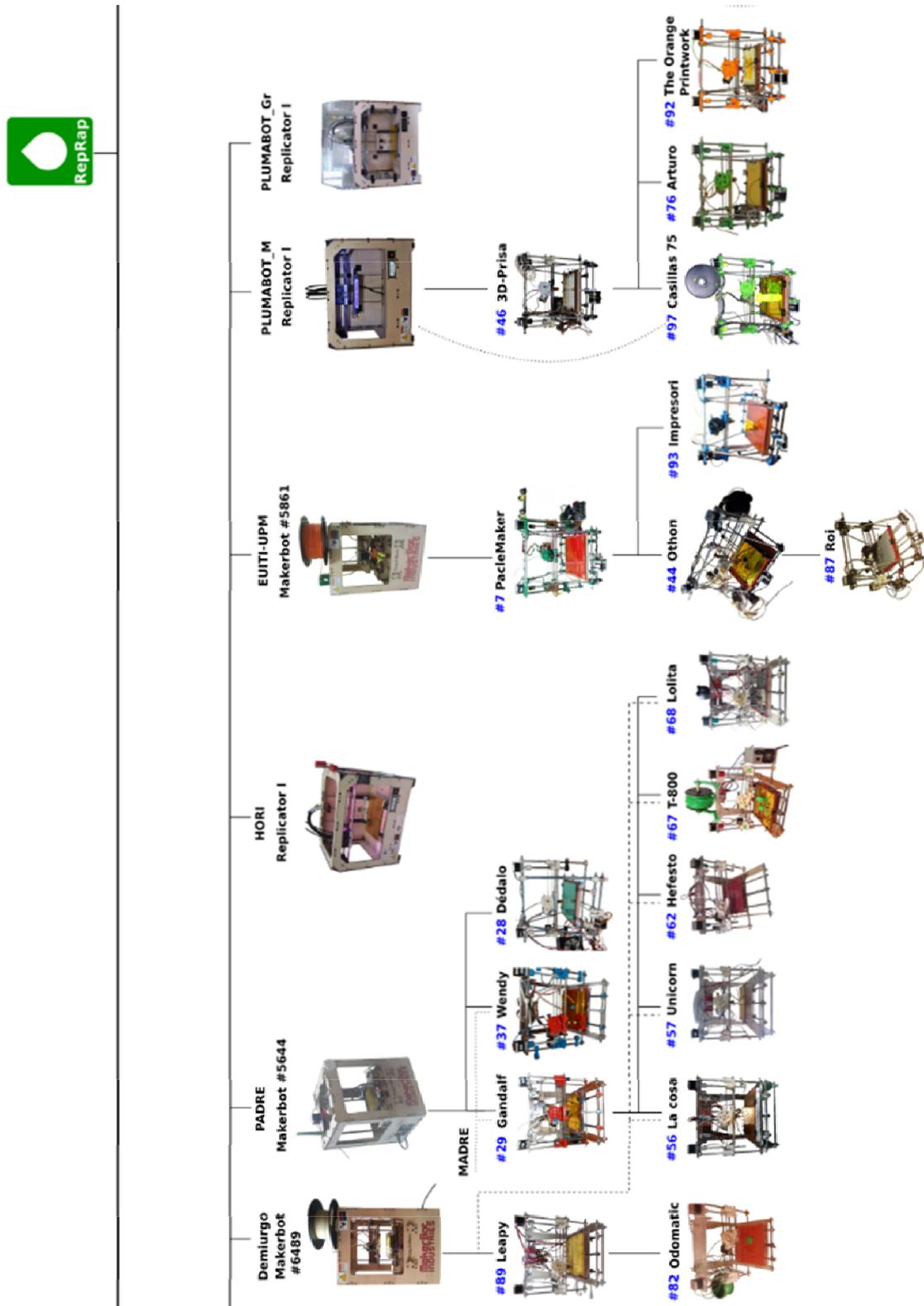


Ilustración 33. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte II.

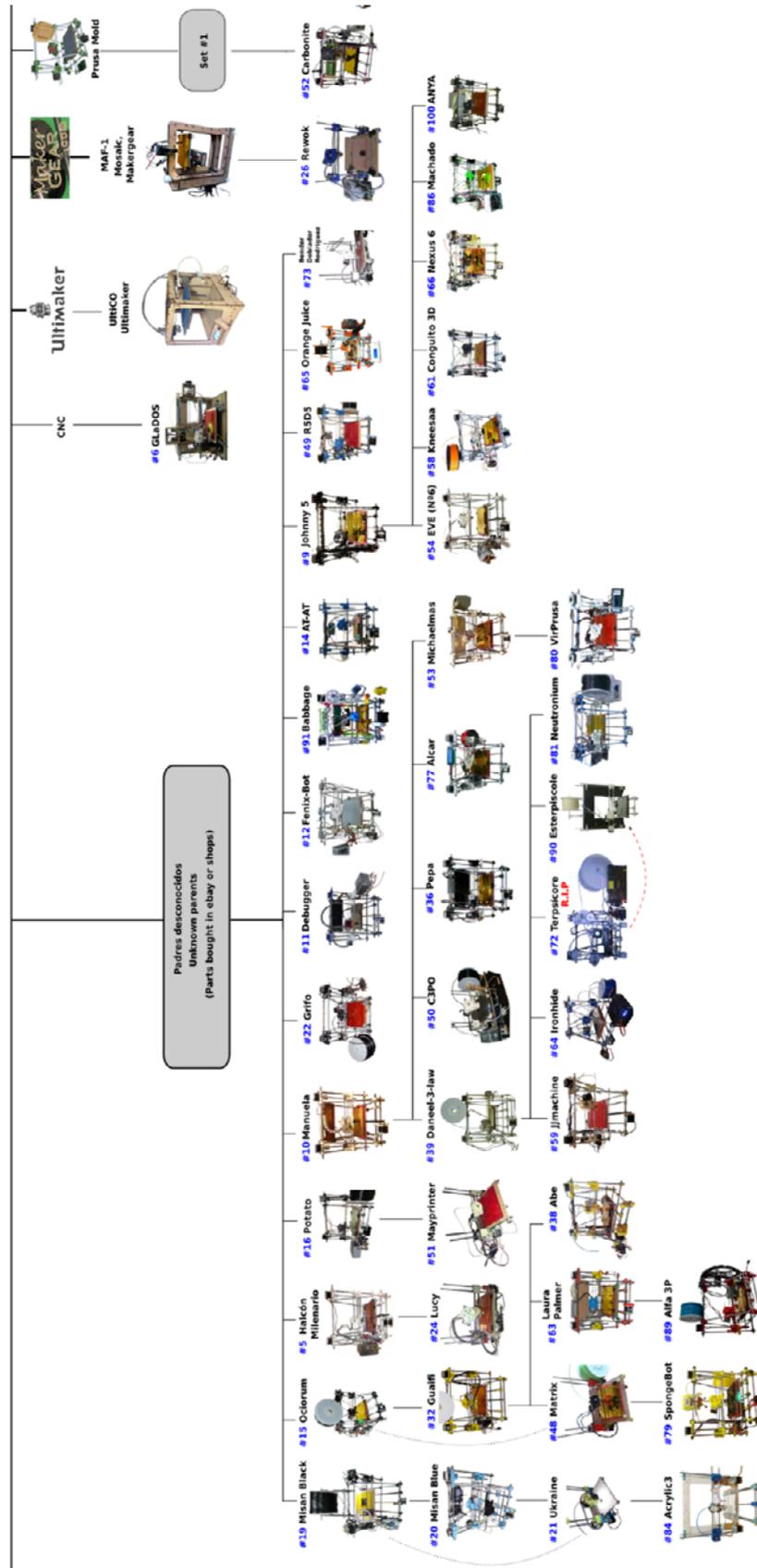


Ilustración 34. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte III.

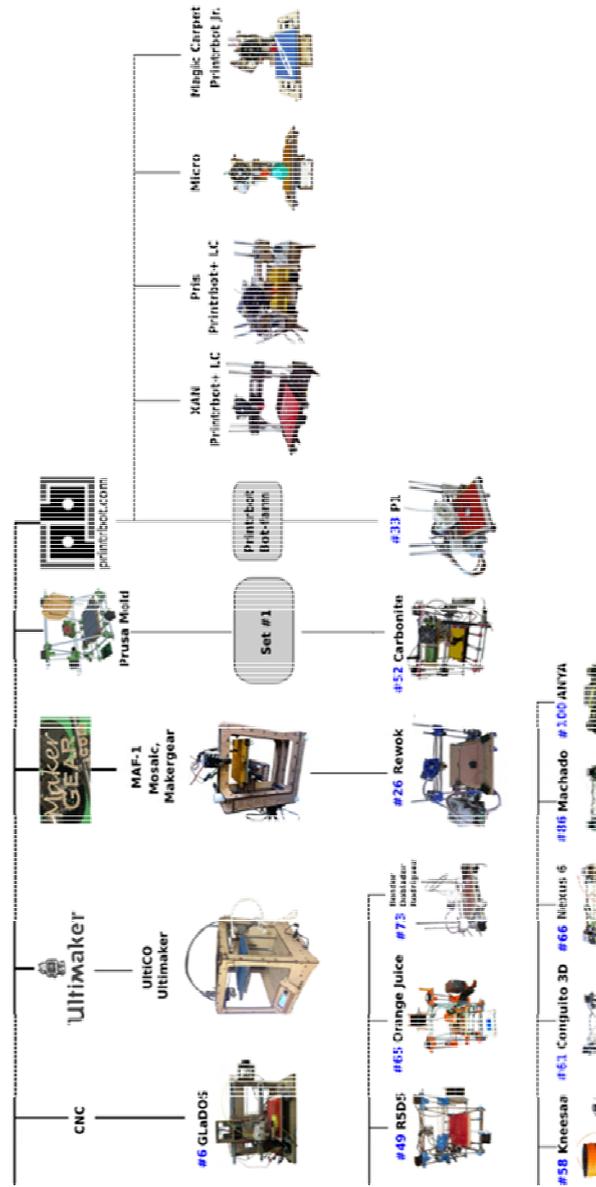


Ilustración 35. Árbol genealógico Proyecto Clone Wars. Parte IV.

3.7. ARDUINO.

3.7.1. MICROCONTROLADORES.

Un microcontrolador es un circuito integrado o “*chip*” (es decir, un dispositivo electrónico que integra en un solo encapsulado un gran número de componentes) que tiene la característica de ser programable. Es capaz de la ejecución autónoma de una serie de instrucciones ordenadamente anteriormente definidas.

Un microcontrolador ha de incluir en su interior tres elementos:

- **CPU (Unidad Central de Proceso):** Es la parte encargada de ejecutar cada instrucción y de controlar que dicha ejecución se realice correctamente. A partir de unos datos de entrada, se generan otros datos distintos de salida.

- **Diferentes tipos de memorias:** Alojjan las instrucciones como los diferentes datos que estas necesitan para su ejecución. Así, se da la posibilidad a la CPU de tener siempre disponible cualquier dato en cualquier momento para su utilización.

Existen dos tipos de memoria: las que su contenido sigue almacenado aún después de un corte de electricidad (llamadas persistentes) y las que su contenido es borrado al no recibir alimentación (llamadas volátiles). Dependiendo del dato, este se almacenará en una u otra de forma automática.

- **Diferentes patillas de E/S (entrada/salida):** Comunican el microcontrolador con el exterior. Se podrán conectar en la entrada sensores para que el microcontrolador reciba datos y en las salidas actuadores que reciban los datos de salida. Normalmente, las patillas suelen tener ambas funciones, tanto de entrada como de salida.

Es decir, un microcontrolador es un ordenador completo (aunque con prestaciones limitadas) en un solo chip, que ejecuta unas instrucciones predefinidas, las cuales tendrán en cuenta los diferentes datos de entrada en cada instante puntual.

Cada vez es posible encontrar microcontroladores en los aparatos de uso cotidiano, ya que estos aumentan sus prestaciones, mejoran su fiabilidad y reducen su coste.

3.7.2. ¿QUÉ ES ARDUINO?

Arduino¹² es en realidad tres cosas:

Una **placa hardware libre** que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines-hembra (los cuales están unidos internamente a las patillas de E/S del microcontrolador) que permiten conectar allí de forma muy sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores¹³.

Una placa hardware es una PCB (del inglés *printed circuit board*), que es una superficie fabricada con un material no conductor sobre las que se pegan pistas de material conductor para realizar conexiones eléctricas de diferentes componentes electrónicos.

Al hablar de Arduino, se ha de especificar el modelo concreto, pues existe una amplia variedad de placas, todas distintas entre ellas, pues no están basadas en el mismo microcontrolador, ni tienen las mismas entradas y salidas ni el mismo tamaño de memoria interna. No obstante, aun teniendo distintos microcontroladores, todos se asemejan lo suficiente como para programar indistintamente una placa u otra.

Un **software** (más en concreto, un “entorno de desarrollo”) **gratis, libre y multiplataforma** (ya que funciona en Linux, MacOS y Windows) que debemos instalar en nuestro ordenador y que nos permite escribir, verificar y guardar (“cargar”) en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino el conjunto de instrucciones que deseamos que este empiece a ejecutar¹⁴. Las placas Arduino incorporan un conector USB que las hace muy sencillas de conectar a un ordenador para su programación.

Los proyectos basados en Arduino pueden llegar a ser autónomos, es decir, no necesitan estar conectados a un ordenador para su funcionamiento, solo es necesario que reciba alimentación eléctrica.

Un **lenguaje de programación libre**. Por “lenguaje de programación” se entiende cualquier idioma artificial diseñado para expresar instrucciones (siguiendo unas determinadas reglas sintácticas) que pueden ser llevadas a cabo por máquinas¹⁵.

¹² <http://www.arduino.cc>

¹³ Arduino. Curso práctico de formación. Oscar Torrente Artero. Ed. Alfaomega.

¹⁴ Arduino. Curso práctico de formación. Oscar Torrente Artero. Ed. Alfaomega.

¹⁵ Arduino. Curso práctico de formación. Oscar Torrente Artero. Ed. Alfaomega.

Dentro del lenguaje de programación de Arduino, se encuentran muchas similitudes con otros lenguajes. Tanto el entorno de desarrollo como el lenguaje de programación Arduino están inspirado en otro entorno y lenguaje libre preexistente: Processing¹⁶, desarrollado inicialmente por Ben Fry y Casey Reas.

A pesar de esta similitud, el lenguaje Arduino está basado en código C/C++, mientras que Processing está desarrollado sobre una base de Java.

La plataforma Arduino es una plataforma en la que el único límite es la imaginación del desarrollador, pues se pueden realizar multitud de proyectos con posibilidades infinitas.

3.7.3. HISTORIA DE ARDUINO.

Arduino nació en el año 2005 en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea (Italia). Ese año, el instituto se vio obligado al cierre del mismo.

En un principio, Arduino iba a ser fabricado para uso interno de la escuela, pero, debido al cierre, se decidió liberarlo por el temor de perder todo el desarrollo realizado, y, hasta el presente, ha ido evolucionando hasta convertirse en lo que es hoy, un proyecto de hardware y software libre a nivel mundial.

El principal responsable de la idea y diseño de Arduino, y la cabeza visible del proyecto es el llamado *Arduino Team*, formado por Massimo Banzi (profesor en aquella época del Instituto Ivrea), David Cuartielles (profesor de la Escuela de Artes y Comunicación de la Universidad de Malmö, Suecia), David Mellis (por aquel entonces estudiante en Ivrea y actualmente miembro del grupo de investigación High-Low Tech del MIT Media Lab), Tom Igoe (profesor de la Escuela de Arte Tisch de Nueva York), y Gianluca Martino (responsable de empresa fabricante de los prototipos de las placas).

3.7.4. SOFTWARE LIBRE Y ARDUINO.

Según la *Free Software Foundation*¹⁷, organización encargada de fomentar el uso y desarrollo del software libre a nivel mundial, un software para ser considerado libre ha de ofrecer a cualquier persona u organización cuatro libertades básicas e imprescindibles:

¹⁶ <http://www.processing.org>

¹⁷ [Http://www.fsf.org](http://www.fsf.org)

- Libertad 0: la libertad de usar el programa con cualquier propósito y en cualquier sistema informático.
- Libertad 1: la libertad de estudiar cómo funciona internamente el programa, y adaptarlo a las necesidades particulares. El acceso al código fuente es un requisito previo para esto.
- Libertad 2: la libertad de distribuir copias.
- Libertad 3: la libertad de mejorar el programa y hacer públicas las mejoras a los demás, de modo que toda la comunidad se beneficie. El acceso al código fuente es un requisito previo para esto.¹⁸

El software libre da a los usuarios la posibilidad de ejecutarlo, copiarlo, modificarlo, mejorarlo y distribuirlo sin tener que pedir permiso al desarrollador original. Pero la modificación de copias puede ser o no gratuitas, ya que software libre no significa obligatoriamente software gratuito.

Para que un software sea libre a efectos legales, este tiene que someterse a algún tipo de licencia de distribución. La más usada es la GPL¹⁹ (*General Public License*). Existe una web²⁰ en la que están recopilados los textos legales de las licencias más importantes.

El software Arduino se acoge a la licencia GPL para el entorno visual de programación y a la licencia LGPL para los códigos fuente de gestión y control del microcontrolador.

Dado a que se acoge a estas licencias, cualquier persona con conocimientos puede desarrollar y modificar la base de Arduino.

3.7.5. HARDWARE LIBRE Y ARDUINO.

El hardware libre comparte muchos de los principios del software libre.

Permite que los usuarios lo estudien y en consecuencia modificarlo, mejorarlo y compartir dichos cambios. Para que sea posible, se ha de tener acceso a los ficheros esquemáticos del diseño del hardware (en tipo CAD).

¹⁸ [Http://www.fsf.org](http://www.fsf.org)

¹⁹ www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html

²⁰ <http://www.opensource.org/licenses/category>

Estos archivos detallan esquemáticamente toda la información necesaria para que cualquier persona con los materiales y conocimientos adecuados, sea capaz de reproducir autónomamente dicho hardware.

Arduino es hardware libre ya que los ficheros esquemáticos de todas las placas están disponibles para su descarga. Esos ficheros están amparados bajo la licencia *Creative Commons Attribution Share-Alike*²¹, la cual permite la modificación siempre que Arduino sea referenciado en los créditos y la modificación se acoja a la misma licencia.

En el mundo del hardware, aún no existen tantas licencias de hardware libre específicas. En 2.010 surgió el proyecto OSHD²², mediante el cual se pretenden establecer unos principios que ayuden a identificar como hardware libre un producto físico. OSHD no es una licencia al uso, sino una declaración de intenciones para que, siguiendo dichos principios, un objeto físico pueda ser declarado hardware libre.

Su objetivo es ofrecer un marco donde se respete la libertad de los creadores para controlar su tecnología y se establezcan los mecanismos para compartir el conocimiento a través del intercambio de diseños.

En resumen, OSHD abre el campo para facilitar la creación de licencias de hardware libre.

Su objetivo es intentar acercar las nuevas tecnologías de una forma activa, no pasiva ni consumista, ofreciendo la posibilidad de participar activamente en el desarrollo de nuevos productos y tecnologías.

3.7.6. VENTAJAS DE ARDUINO.

Arduino es libre y extensible: La ampliación y mejora del diseño del hardware como del software es posible sin ningún tipo de problemas. Gracias a ello existe una gran variedad de placas no oficiales y de librerías software de terceros.

Arduino tiene una gran comunidad: La comunidad de Arduino es muy extensa en número de personas, las cuales lo utilizan mejoran la documentación y se comparten ideas.

²¹ <http://es.creativecommons.org/licencia>

²² <http://freedomdefined.org/OSHW>

Su entorno de programación es multiplataforma: El entorno de programación se puede instalar y ejecutar en los sistemas operativos más extendidos en la actualidad, como Windows, Mac OS y Linux. Con ello se llega a la práctica totalidad de usuarios de ordenadores del mundo.

Su entorno y el lenguaje de programación son simples y claros: Su aprendizaje es asequible, al igual que su utilización, a la vez que flexibles y completos para los usuarios más avanzados. La documentación disponible es muy extensa.

Las placas Arduino son baratas: La placa Arduino Uno, la más básica, lista para funcionar cuesta alrededor de 20 euros. Incluso, se podría llegar a fabricar por cualquier usuario con los conocimientos adecuados, llegando a ser su coste mucho menor.

Las placas Arduino son reutilizables y versátiles: Las placas son reutilizables ya que la misma placa puede ser aprovechable para varios proyectos. Y son versátiles porque tiene varios tipos de entrada/ salida de datos.

3.7.7. ESPECIFICACIONES DE PLACAS ARDUINO.

Tabla 2. Especificaciones de las diferentes placas Arduino.

MODELO	MICRO-CONTROLADOR	VOLTAJE ENTRADA	VOLTAJE DEL SISTEMA	FRECUENCIA RELOJ	DIGITAL I/O	ENTRADAS ANALÓGICAS	PWM	UART	MEMORIA FLASH	CARGADOR	INTERFAZ PROGRAMACIÓN
ARDUINO DUE	AT91SAM3X8E	5-12V	3,3V	84MHz	54*	12	12	4	512 Kb	Due	Nativa USB
ARDUINO LEONARDO	ATmega32U4	7-12V	5V	16MHz	20*	12	7	1	32Kb	Leonardo	Nativa USB
ARDUINO UNO R3	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via ATmega16U2
REDBOARD	ATmega328	7-15V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Optiboot	USB via FTDI
ARDUINO PRO 3.3V/8MHZ	ATmega328	3,35-12V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
ARDUINO PRO 5V/16MHZ	ATmega328	5 - 12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
ARDUINO MEGA 2560 R3	ATmega2560	7-12V	5V	16MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	USB via ATmega16U2
MEGA PRO 3.3V	ATmega2560	3,3-12V	3,3V	8MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	Cabecera compatible con FTDI
MEGA PRO 5V	ATmega2560	5-12V	5V	8MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	Cabecera comp. con FTDI

CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE AUTÓNOMA CON IMPLEMENTACIÓN DE DOBLE EXTRUSOR Y BARRERA DE PROTECCIÓN FÍSICA.

MODELO	MICRO-CONTROLADOR	VOLTAJE ENTRADA	VOLTAJE DEL SISTEMA	FRECUENCIA RELOJ	DIGITAL I/O	ENTRADAS ANALÓGICAS	PWM	UART	MEMORIA FLASH	CARGADOR	INTERFAZ PROGRAMACIÓN
ARDUINO MINI 05	ATmega328	7-9V	5V	16MHz	14	6	8	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera Serial
ARDUINO PRO MINI 3.3V/8MHZ	ATmega328	3,35-12V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
ARDUINO PRO MINI 5V/16MHZ	ATmega328	3,35-12V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI
ARDUINO FIO	ATmega328P	3,35-12V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera comp. con FTDI o Inalámbrica via XBee1
MEGA PRO MINI 3.3V	ATmega2560	3,3-12V	3,3V	8MHz	54	16	14	4	256Kb	STK500v2	Cabecera compatible con FTDI
PRO MICRO 5V/16MHZ	ATmega32U4	5-12V	5V	16MHz	12	4	5	1	32Kb	DiskLoader	Nativa USB
PRO MICRO 3.3V/8MHZ	ATmega32U4	3,3-12V	3,3V	16MHz	12	4	5	1	32Kb	DiskLoader	Nativa USB
LILYPAD ARDUINO 328 MAIN BOARD	ATmega328	2,7-5,5V	3,3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	AtmegaBOOT	Cabecera compatible con FTDI

3.8. MATERIALES DE IMPRESIÓN UTILIZADOS EN EL SISTEMA FDM.

3.8.1. POLÍMEROS.

Los polímeros están formados por cadenas más pequeñas llamadas monómeros, que, mediante el proceso de polimerización se unen entre sí. Los polímeros son denominados en base al monómero principal, al cual se van añadiendo cadenas.

Existen tres tipos de polímeros en base a su comportamiento mecánico y naturaleza:

- **Termoplástico:** Son polímeros lineales, ramificados o no. Son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos, por lo que son reciclables. Su temperatura de fusión es mayor que la temperatura ambiente generalmente. La característica más interesante es que pueden fundir y solidificar varias veces.

- **Termoestables:** Estos materiales adquieren un estado final reticulado, lo que los hace imposibles de fundir. Su método de transformación es lento y a altas temperaturas poseen buenas propiedades. No pueden ser reprocesados.

- **Elastómeros:** Son compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal. Las cadenas de polímeros se encuentran enrolladas sobre sí mismas y esta propiedad les otorga gran flexibilidad.

Un aspecto a tener en cuenta en los polímeros es el grado de cristalinidad, es decir el grado de orden de su estructura. El término cristalino se utiliza para definir una estructura ordenada y amorfa para definir una estructura desordenada. Los polímeros amorfos dejan pasar la luz de una mejor manera y cuando se solidifican tienen una menor contracción, aunque tienen por otra parte menor resistencia química y peor resistencia a la fatiga.



Ilustración 36. Estructuras de los termoplásticos. Fuente: <http://www.losadhesivos.com/termoplastico.html>

3.8.2. ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO: ABS.

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno, denominado comúnmente ABS, es un termoplástico derivado del petróleo.

Este material es conocido por la resistencia que posee a impactos además de por su dureza, con un rango de temperaturas de utilización de las piezas fabricadas muy amplio.

El ABS está desarrollado a partir de tres componentes distintos, a saber, el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno. Cada una de estas tres cadenas le aporta una serie de características que son aditivas entre sí. El acrilonitrilo aporta rigidez, resistencia a ataque químicos, estabilidad a altas temperaturas y dureza. El butadieno aporta resistencia a impacto y tenacidad a bajas temperaturas y el estireno aporta resistencia mecánica, brillo, dureza y rigidez.

Esta combinación aditiva de propiedades hace que este termoplástico esté ampliamente extendido en la fabricación de piezas de uso normal en la vida cotidiana.

El ABS puede ser mecanizado, agujereado, limado, lijado, pegado, con bastante facilidad, con un gran acabado después de cualquiera de los tratamientos. Su resistencia y su poca flexibilidad lo hacen idóneo para aplicaciones industriales.

Durante su extrusión, y al ser un material derivado del petróleo, puede producir un ligero olor a plástico quemado, así como algún vapor tóxico, por lo que es recomendable una buena ventilación mientras se está imprimiendo.

El ABS, a pesar de no ser biodegradable, sí que es reciclable. En el mercado están apareciendo dispositivos en los que el filamento sobrante de las impresiones se deposita en dicho dispositivo creando otro nuevo filamento continuo.

3.8.2.1. IMPRESIÓN CON ABS.

El ABS tiene un punto de fusión relativamente alto en comparación con el resto de materiales utilizados en la impresión 3D, pues llega a alcanzar una temperatura de fusión de 230°C – 245°C, dependiendo del tipo de *hotend* usado y del diámetro del filamento. Así mismo, es necesario el empleo de cama caliente a una temperatura aproximada de 100°C, pues la impresión sobre una superficie con una temperatura ambiente o no lo suficientemente caliente provocaría la deformación del plástico y, en consecuencia, una impresión fallida.

Cabe destacar que este material es soluble en acetona, con lo que puede ser muy útil para el pegado de piezas, así como para el acabado, pues la acetona consigue dejar este termoplástico con un acabado brillante.

En la siguiente imagen se puede apreciar el acabado de un baño de acetona sobre una pieza impresa con ABS.

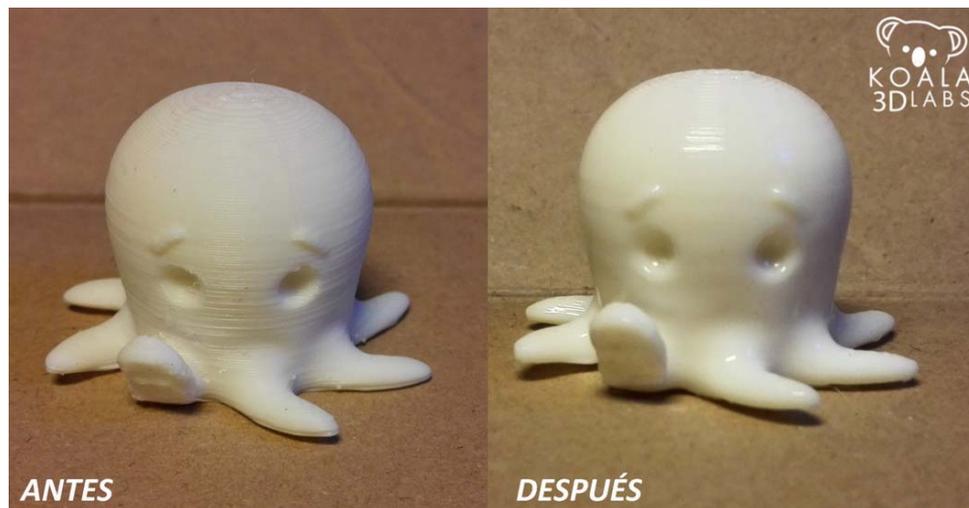


Ilustración 37. Pieza impresa con ABS y después de un baño de acetona. Fuente: Koala 3D Labs.

3.8.3. ÁCIDO POLILÁCTICO. PLA.

El ácido poliláctico, más conocido como PLA, ha sido creado a partir de recursos renovables, tales como caña de azúcar o almidón de maíz.

La principal ventaja del PLA es su biodegradabilidad, y la ausencia de emisión de gases nocivos. Es muy utilizado en el envasado de productos alimenticios.

El gran inconveniente respecto al ABS es que el PLA es mucho más frágil, aparte de que el hecho de que sea biodegradable, hace que tenga una vida útil más corta. También el post-procesado del material (mecanizado, lijado, taladrado, pintado, pegado) es mucho más complicado de realizar.

3.8.3.1. IMPRESIÓN CON PLA.

El PLA es un material que posee una mayor facilidad para ser impreso que el ABS, ya que su temperatura de fusión ronda entre los 190°C y los 220°C. Además no es necesaria la utilización de una cama de impresión, aunque es recomendable su uso para evitar el gran contraste térmico que puede sufrir.

Tiene una capacidad de enfriamiento menor que el ABS, por lo que también es recomendable el uso de una corriente de aire directa a la boquilla de extrusión para acelerar este proceso.

3.8.4. DIFERENCIAS DE IMPRESIÓN ENTRE ABS Y PLA.

3.8.4.1. PRECISIÓN.

Ambos materiales pueden producir piezas perfectas, con muy bajas tolerancias, siempre que la impresora esté correctamente calibrada, por lo que existen dificultades para distinguir que material realiza mejor la impresión.

La mayor desventaja del ABS es la tendencia que tiene a curvarse y la posible deformación en la parte inferior de la pieza. Con este material también existe la problemática de los pequeños detalles, tales como esquinas redondeadas, pues las define como afiladas y hay que postprocesarlas para conseguir el correcto acabado.

Para mejorar la terminación de dichas piezas, se utilizan los baños de acetona, consiguiendo un acabado brillante y con una mayor suavidad.

En comparación con el ABS, el PLA sufre muchas menos deformaciones, con la consecuencia de la posible impresión de detalles más finos. La incorporación de una ventilación activa (ventilador impulsando la corriente de aire sobre la boquilla de impresión) permite imprimir detalles mucho más nítidos y con mejor acabado, sin el riesgo de deformación o posibles agrietamientos.

3.8.4.2. ALMACENAMIENTO.

Ambos materiales han de estar correctamente almacenados, pues tienden a absorber la humedad ambiental. Esto se consigue almacenándolos en un lugar seco, e incluso, la mejor opción es su almacenamiento en una bolsa al vacío o en un recipiente sellado.

La consecuencia de la absorción de humedad es la posibilidad de la aparición de burbujas en el filamento, con la consecuencia de disminución de calidad y la velocidad de la impresión, además de posibles atascos y daños en la parte interior del extrusor.

3.8.4.3. PRECIO.

La diferencia de precio entre ambos materiales es muy escasa, llegando a encontrar hoy en día precios similares para ambos.

En algunas ocasiones se puede encontrar el PLA a un precio algo mayor que el ABS.

3.8.4.4. TEMPERATURA DE IMPRESIÓN.

Las temperaturas de impresión de ambos materiales son parecidas, pues ambas están comprendidas en un rango de 50°C.

El ABS tiene una temperatura de fusión de aproximadamente 230°C, aunque dependiendo del fabricante puede oscilar en $\pm 20^\circ\text{C}$. Además, para el empleo del material para impresión, es necesaria la utilización de una cama caliente, para conseguir una correcta adhesión del mismo a la base de impresión, pues su no uso, puede hacer que la impresión resulte fallida.

En el caso del PLA, la temperatura de fusión empieza en 180°C, llegando en alguna ocasión hasta los 220°C, como en el caso del ABS, dependiendo del fabricante. Para este material, dado que su proceso de enfriamiento y endurecimiento es más largo que en el ABS, es recomendable la inclusión en el sistema de extrusión de un ventilador impulsando un chorro de aire directo a la boquilla de impresión.

3.8.4.5. CONCLUSIÓN.

Es muy difícil decidir cuál de ambos materiales es mejor para la impresión 3D, pues cada usuario deberá pensar y decidir cuáles son las características que busca en un material, ya sean componentes más duraderos o con resistencia a la intemperie (en estos casos el ABS es mejor material), o si por el contrario buscan impresiones más suaves, con un mejor acabado y mayor calidad, aparte de no producir gases nocivos, el PLA será la mejor opción.

3.8.5. OTROS MATERIALES.

Una vez vistos los dos principales materiales usados en la tecnología de impresión FDM, se estudiarán con menor profundidad materiales emergentes resultado de la investigación en este tipo de tecnología.

A. LAYBRICK.

Laybrick es un filamento que permite imprimir piezas con un acabado similar a la arenisca. Al poseer áridos en su composición se consigue el efecto.

Es un material idóneo para la impresión de grandes piezas, tales como maquetas arquitectónicas, o para la reproducción de figuras que deban tener un aspecto similar a la piedra o la arena.



Ilustración 38. Figura impresa con Laybrick. Fuente: <http://www.bcn3dtechnologies.com/>

Este material puede llegar a ser impreso a una temperatura de 160° C, y, a medida que la temperatura del extrusor sube, se consigue un acabado más rugoso. La temperatura ideal de impresión ronda los 225° C, y no es necesario el uso de cama calefactada.

Debido a su composición, es un material muy quebradizo y muy frágil. El tiempo de espera para su endurecimiento ronda las 4 horas.

B. NINJAFLEX Y FILAMENTOS FLEXIBLES.

Son materiales de nueva creación los cuales aportan a las piezas impresas la capacidad de flexibilidad y elasticidad. La composición de estos materiales se basa en un elastómero termoplástico.

Es posible utilizarlo en cualquier impresora 3D que admita la impresión en ABS o PLA, tanto en 1.75 mm. como en 3 mm.

El material, después de las pruebas realizadas antes de su comercialización, ha dado excelentes resultados en unión entre capas que conforman el objeto impreso y facilidad en el trabajo y manipulación del material en la base de impresión.

Estos materiales presentan muy buena resistencia a la abrasión, y sus temperaturas de impresión aconsejadas son entre 210 °C y 230°C para el extrusor y de 30° C para la cama caliente, por lo que, en ausencia de esta última, también es posible su impresión con buenos resultados.

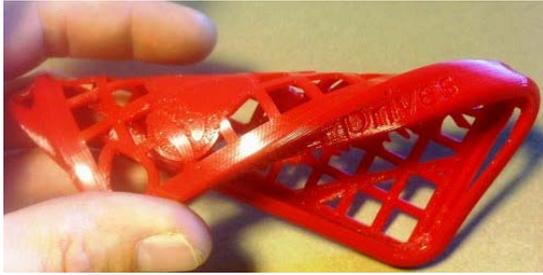


Ilustración 39. Protector de teléfono móvil realizado con filamento flexible. Fuente: www.matterhackers.com



Ilustración 40. Mango de bicicleta realizado con filamento flexible. Fuente: www.3dbanan.com.au

C. LAYWOO-D3

Este material es una mezcla de termoplástico y virutas de madera, con aproximadamente un 40% de la composición de estas últimas. Una vez impreso, tiene aspecto y tacto similar a la madera.

El rango de temperaturas para su impresión es de 180°C – 250°C aproximadamente.

Este material tiene la peculiaridad de que, dependiendo de la temperatura de extrusión, cambia su tonalidad final, es decir, a mayor temperatura de impresión, el material se vuelve más oscuro. Las variaciones de temperatura durante su impresión dejarán vetas más o menos oscuras.

Las principales características del material son:

- Poca deformación estructural.
- Se adhiere de forma notable a la base calefactada.
- Puede ser mecanizado con herramientas de carpintería.

La durabilidad térmica es similar al ácido poliláctico (PLA).



Ilustración 41. Pieza realizada a base de Laywoo-D3. Fuente: www.formizable.com

D. ALCOHOL POLIVINÍLICO: PVA.

Es un plástico especial, usado en las impresoras con doble extrusor. Su principal cualidad es su degradación con el agua, lo que lo hace muy útil para la creación de piezas imposibles de realizar con cualquier otro plástico, pues sirve de base para la impresión de cualquier tipo de voladizo, pues se utiliza como soporte para los mismos. La temperatura habitual de impresión para este material se encuentra en un rango entre 180°C y 200.

E. FILAMENTO FLUORESCENTE.

Es un compuesto similar al ácido poliláctico (PLA), con la peculiaridad de que brilla en la oscuridad.

Sus propiedades técnicas son las mismas que las de PLA normal.



Ilustración 42. Pieza realizada con filamento fluorescente *Glow in the Dark*. Fuente: www.thor3d.ca

3.9. APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D POR FDM.

Las posibilidades de impresión por esta técnica son, como se ha mencionado en este Trabajo Fin de Grado, únicamente limitadas por la creatividad y la innovación del usuario. Se dividen en cuatro grupos principales:

A. MODELOS CONCEPTUALES.

Al comienzo del proceso de diseño, la tecnología de impresión 3D por FDM puede ser utilizada para la realización de modelos para la revisión de su forma, ajuste, ergonomía, etc. Una vez realizados dichos ajustes, es necesario actualizar el modelo basado en los fallos o imperfecciones identificadas, para volver a realizar otra impresión para realizar otra inspección en busca de nuevos fallos o imperfecciones. Repitiendo este proceso de iteración las veces que sean necesarias, se conseguirá llegar a un modelo perfecto.

El cambio de desarrollo de 2D a la impresión del modelo acelerará mucho los tiempos de procesado, reduciendo los tiempos de desarrollo de un producto, así como la inversión en costes necesaria.

B. PROTOTIPOS FUNCIONALES.

Para las pruebas de los diseños, se pueden realizar prototipos funcionales y precisos. Se puede utilizar este sistema de impresión para pruebas de rendimiento y evaluaciones de ingeniería. Dado que la fabricación de los componentes mediante FDM dura horas, con esta técnica se pueden detectar fallos antes de que estos se conviertan en un mal con un coste muy elevado.

Así mismo, reduce el tiempo de salida al mercado y maximiza el rendimiento del producto.

C. HERRAMIENTAS PARA LA FABRICACIÓN.

En todo proceso de fabricación son necesarias plantillas, medidores, accesorios, moldes, matrices y/o patrones.

Todos estos elementos pueden ser construidos mediante la técnica de impresión por FDM, ahorrando tiempo y coste respecto a la fabricación de dichas herramientas por medios tradicionales. La fabricación por este método no solo reducen, como ya se ha explicado, coste y tiempo, sino que también pueden mejorar el proceso de montaje de producción, pues la producción basada en capas da libertad para la creación de herramientas muy ligeras, ergonómicas y muy complejas, pudiendo hacer el proceso de ensamblaje mucho más eficiente.

D. PRODUCTOS TERMINADOS.

Existen muchos ejemplos de compañías que ya fabrican productos mediante esta técnica, como por ejemplo, fabricantes aeroespaciales, de dispositivos médicos y un largo etcétera que ahora coste y tiempo para producciones limitadas frente a los procesos de fabricación tradicionales como la fundición o el mecanizado.

Esta técnica, además, libera de la realización de las revisiones a posteriori, pues dichas revisiones ya han podido ser realizadas anteriormente antes de empezar a producir en serie el producto final.

E. FABRICACIÓN DE MOLDES DE SOPLADO.

Mediante la tecnología FDM es posible la creación económica y rápida de moldes, usando determinados termoplásticos que consiguen aguantar temperaturas y presiones propias del moldeado por soplado, pudiendo construir cualquier envase.

3.10. DERECHOS DE AUTOR Y OPEN SOURCE.

Como cabe esperar, no todos los objetos fabricados en una impresora 3D saldrán del resultado de la creatividad e imaginación de cada individuo, sino que algunos de ellos serán descargados de algún almacén de objetos online (llamados repositorios), como el más conocido en la comunidad llamado “Thingiverse” [www.thingiverse.org].

En algún caso más concreto, dichos objetos serán copias o réplicas de productos comerciales que alguna persona tenga registrados o patentados bajo su nombre o el de alguna empresa, creando entonces un conflicto con la ley, que puede llegar a ser delictivo. Se puede decir que se avecina una batalla en los derechos de propiedad intelectual y patentes.

El sistema de patentes fue originado en Italia en el Siglo XV, con el ánimo de proteger y fomentar la innovación por medio de las concesiones de explotación y monopolio tanto a los inversores como a los estados o coronas que lo concedían. Este hecho dio lugar a muchos puestos de trabajo sirviendo al estímulo de la economía.

En sucesivos años, el sistema de patentes y copyright ha derivado en un monstruo que, en vez de proteger dichas ideas, actúa como freno al desarrollo, creatividad e innovación. El sistema como actualmente se conoce da lugar en que existe en algún sitio un producto original y más allá aún, que existe la propiedad más allá del mundo físico.

Estas ideas están siendo seriamente cuestionadas por las capacidades que ofrece la impresión 3D en combinación con los anteriormente mencionados repositorios. Estas ideas dejan de tener sentido en el mundo actual, donde las distancias han sido salvadas por las comunicaciones, donde existe una muy pequeña probabilidad que dos personas lleguen a la misma idea o conclusión sin tener nada que ver en el proceso.

El modelo Fablab es el máximo exponente de los espacios dirigidos a la fabricación digital, con la misión de favorecer la creatividad y la innovación proporcionando herramientas de fabricación de manera abierta, en concordancia con el concepto Open

Source, donde cualquier persona puede fabricar cualquier cosa con únicamente dos premisas:

- Aprender a desarrollar los proyectos por sí mismos.
- Documentar los proyectos de tal forma que puedan ser compartidos los conocimientos.

La idea del Open Source (o código abierto en castellano) es la de compartir el código para que las evoluciones de dicho código sean de calidad superior que las del primitivo.

En España, la utilización de las impresoras 3D, abre en varios campos de la propiedad algunas cuestiones legales que es necesario exponer:

A. EN EL ÁMBITO DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL.

- **Descarga ilegal de modelos 3D:** del mismo modo que es posible descargar contenido digital protegido (discografía, filmografía, software, librerías, etc...) también es posible descargar archivos que contienen diseños tridimensionales e imprimirlos. La descarga de estos archivos sin la previa autorización del autor es considerada ilegal.

- **Transformación de modelos 3D:** el autor de un modelo tiene la exclusividad sobre la licencia de modificación y mejora de los diseños digitales realizados, o, hasta convertir dichos objetos en tangibles. El usuario, sin la previa autorización del autor, que cambie, transforme o imprima un objeto sin la previa autorización del autor, estará cometiendo un acto ilegal.

- **Creación de modelos 3D:** Los usuarios pueden crear modelos tridimensionales con software adecuado de diseño 3D. Dicho usuario tiene todos los derechos de propiedad intelectual sobre sus creaciones, pro ¿Qué pasará si dicho usuario sube a internet sus creaciones?, ¿podrá oponerse con efectividad a que otros usuarios la usen contra su voluntad?

- **Canon digital por las copias privadas:** el usuario que adquiera lícitamente un objeto con propiedad intelectual podrá hacer un número limitado de copias de éste. La ley en este aspecto es permisiva, siempre que se cumpla la condición de pagar al propietario de los derechos de autor por la copia privada que haga (el conocido como canon digital).

B. EN EL ÁMBITO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL.

- **Patentes:** la tecnología de impresión 3D es capaz de imprimir objetos o prototipos patentados. El titular de una patente es el único que puede fabricar temporalmente el objeto o prototipo. Si un usuario fabrica dicho prototipo u objeto, está vulnerando la patente, lo que constituye un acto ilegal.

- **Diseño industrial:** un molde novedoso y singular puede ser objeto de protección de diseño industrial. Esta protección opera de forma similar a la patente, por lo que tiene las mismas consecuencias que la patente.

- **Marca tridimensional:** la marca tridimensional es aquella que corresponde con cuerpos representados en tres dimensiones, siempre y cuando distinga el producto y no corresponda con una forma usual en el mercado. Tiene efectos similares a los de la patente y el diseño industrial.

C. EN EL ÁMBITO DEL DERECHO DE IMAGEN.

- **Muñecos personalizados:** la legislación actual prohíbe realizar copias de cualquier tamaño de personas reales, a menos que el individuo copiado haya dado su consentimiento a dicha copia. Entonces, es ilegal la impresión exacta de figuras de personas reales.

D. OTROS ÁMBITOS JURÍDICOS.

- **Impresión de armas:** el ilegal imprimir un arma de fuego que pueda lanzar un proyectil por la acción de un combustible propulsor). Está penado por la ley con hasta tres años de cárcel.

- **Impresión de contenidos ilícitos:** también es ilegal, y puede ser hecho conductivo de privación de la libertad la impresión de imágenes en 3D de contenidos cuya fabricación o posesión sea delictiva.

- Los desarrolladores de impresoras 3D están también afectados por la normativa jurídica, ya que no pueden vulnerar las patentes existentes, así como la propiedad intelectual del software para el desarrollo de la impresión 3D, ni tampoco del software de diseño de piezas, prototipos o productos en 3D.

En 2.014 ha caducado una de las patentes clave de una de las tecnologías de impresión 3D más extendidas, la de sinterización por láser (SLS). Esta tecnología es la que tiene un

rendimiento comercial más alto. Sin embargo, su coste es bastante elevado. Por el contrario, con la caducidad de la patente, se espera que los costes desciendan drásticamente.

La previsión es, como ya sucedió con la caducidad de las patentes de la impresión 3D de modelado por deposición fundida (FDM), la competencia sea estimulada y se produzca una nueva revolución con impresoras con capacidad de impresión con una mayor precisión, más rápidamente y con una mayor variedad de materiales.

Aún con todo lo expuesto anteriormente, las patentes en este sector han contribuido a un avance tecnológico y a la innovación de procesos y técnicas de impresión 3D, las cuales, pueden llegar a producir una mayor revolución de la que supuso internet.

Con la liberación de las patentes, se está en disposición a no muy largo plazo de realizar copias de objetos idénticas y de similar calidad con escáneres 3D de bajo coste.

En conclusión, en el trienio 2.014-2.016 habrá algunos acontecimientos cruciales en el sector de la impresión 3D, ya que caducarán tres patentes muy importantes para el desarrollo de las tecnologías de impresión:

- US005597520A: *Simultaneous multiple layer curing in stereolithography* (Simultaneidad de curado de múltiples capas en la Estereolitografía). Caducidad en 2.014.
- US006007318A: *Method and apparatus for prototyping a three-dimensional object*. (Métodos y aparatos para prototipar objetos tridimensionales) Caducidad en 2.015.
- US005554336A: *Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* (Métodos y aparatos para la producción de objetos tridimensionales por Estereolitografía).

3.11. DOBLE EXTRUSIÓN.

Se ha hablado ya durante este documento de las formas de extrusión posibles en el mundo de la impresión 3D, extrusión directa y extrusión bowden, pero ¿y si se le vuelve a dar una vuelta de tuerca a la idea? ¿Por qué no se puede pensar en la posibilidad de imprimir con dos materiales a la vez?

La impresión con dos extrusores al mismo tiempo, ya sea con dos materiales distintos o dos colores, es, a criterio del autor del presente Trabajo Fin de Grado, el mayor avance

dentro del mundo de la impresión 3D, pues ser capaz de combinar dentro de una impresión dos materiales, abre un mundo de posibilidades.

La doble extrusión permite realizar modelos impensables con un solo extrusor, pues, por ejemplo, se pueden realizar piezas con grandes voladizos, usando un segundo material como apoyo para dichos voladizos. Este material puede ser alguno de los existentes en el mercado que son de fácil disolución en agua, acetona, etc.

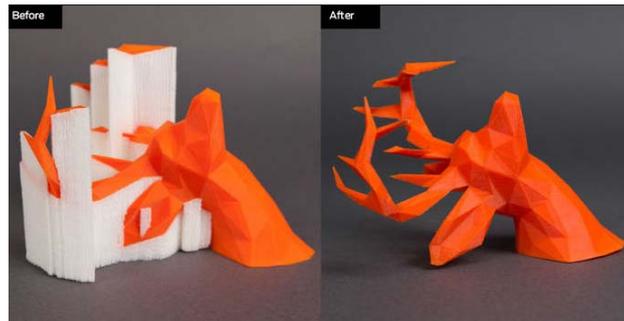


Ilustración 43. Modelo realizado mediante doble extrusión. Fuente: www.stuyo-3d.es

También puede servir la doble extrusión para la generación de agujeros internos perfectos rellenos con este segundo material de fácil disolución.

En caso del uso del mismo material en ambos extrusores, se puede combinar para la realización de figuras únicas con ambos colores mezclados en su impresión.

Esta mezcla se realiza capa a capa, depositando de cada uno de los colores por orden, es decir, primero deposita uno de los extrusores todo el material en una capa, y acto seguido lo deposita el otro extrusor.



Ilustración 44. Figura realizada mediante doble extrusión. Fuente: <http://www.imprint3d.com>

La doble extrusión abre un sinfín de posibilidades dentro del prototipado rápido, pues vuelve a la impresora 3D capaz de realizar cualquier objeto dentro del único límite: la imaginación.

3.12. BARRERAS DE PROTECCIÓN FÍSICA DE LA IMPRESORA.

Uno de los efectos más temidos en la impresión 3D y que hace que los modelos no sean todo lo óptimos que se espera es el efecto conocido como *warping*

El *warping* es la palabra como se conoce al levantamiento de las esquinas del modelo en la base de impresión. Este efecto sucede gracias al gradiente térmico existente entre la boquilla del *nozzle* y la base sobre la que se deposita el material, pues éste, con el cambio de temperatura, sufre una contracción. El material depositado en la parte central, al retraerse, tira de las esquinas, provocando tensiones internas que acaban derivando en el efecto descrito.

Para minimizar este efecto se recurre a dos soluciones:

- La primera es el uso de una base calefactada o cama caliente, con la que se consigue aumentar la temperatura de la base y así minimizar el gradiente térmico antes explicado.
- La otra solución existente, es el uso de una barrera de protección física, donde quedará la impresora aislada del medio, pudiendo controlar mucho mejor la temperatura.

La barrera de protección física, además de poder tener una temperatura mucho más estable, protege a la impresora de posibles golpes accidentales, del polvo ambiental y elimina las corrientes de aire, a las que la impresión es muy sensible, tanto para el efecto del *warping* como para la unión entre las distintas capas entre la pieza, pues una corriente de aire puede llegar a hacer que el material no se solidifique en el tiempo concreto, provocando que la capa no se adhiera a la anterior y arruine por completo la impresión del modelo, con los consiguientes costes económicos y de tiempo.

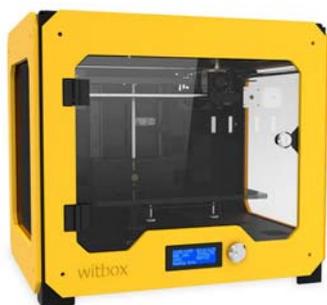


Ilustración 45. Impresora BQ Witbox. Fuente: www.bq.com



Ilustración 46. Impresora Ultimaker 2. Fuente: www.ultimaker.com

4. CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE AUTÓNOMA CON DOBLE EXTRUSOR Y BARRERA DE PROTECCIÓN.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se ha elegido el montaje de una impresora “Prusa i3 Steel”, la cual es una evolución de la Prusa i3, mejorando la estructura a base de piezas realizadas en acero, sustituyendo varias de las anteriores, que estaban formadas por piezas imprimibles y varillas de acero, dando una mayor consistencia a la impresora, previniendo la transmisión de vibraciones.

Para el cumplimiento de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, es necesario seguir unos pasos bien definidos:

- a. Montaje de una impresora 3D, con la correcta calibración de la misma para la comprobación del correcto ensamblado y óptima configuración.
- b. Instalación de un doble extrusor, diseñando/ mejorando las piezas que lo conformarán intentando minimizar la pérdida de área de impresión, pues al ocupar un mayor espacio, por razones físicas, es imposible la conservación del mismo área de impresión.
- c. La instalación de la impresora dentro de una barrera de protección física, la cual será una caja realizada con aluminio, madera y metacrilato que conserve la impresora en un entorno estable de temperatura, sin corrientes de aire, evitando el polvo ambiental y, al mismo tiempo, disponiendo un medio de protección ante golpes fortuitos.

Para la construcción de una impresora 3D son necesarios dos tipos de componentes. Por un lado, se necesitan las piezas imprimibles y por otro lado, las no imprimibles.

Las piezas imprimibles, son las piezas que pueden replicarse desde otra impresora 3D, las cuales sirven de soporte de parte de la estructura, es decir, soportes del eje X y soportes del extrusor.

Las piezas no imprimibles son el resto, es decir, marco soporte de acero, varillas de hacer, tornillos, tuercas, arandelas, componentes electrónicos, cables, motores y sensores.

Antes del comienzo del montaje se debe asegurar un espacio amplio de trabajo, así como la disponibilidad de las herramientas de trabajo necesarias.

Durante el montaje de la impresora se han de seguir unas pautas básicas para la correcta realización del mismo:

- No forzar las piezas, con especial mención de las de plástico, pues con grandes esfuerzos pueden deteriorarse.
- Si fuera necesario, para conseguir el encaje de todas las piezas de acero del marco, se utilizará un mazo de goma.

Una vez montada la impresora, se procederá a su calibración para una correcta impresión de las piezas, controlando los parámetros de tolerancias, nivelación de la base, cantidad de material extruida, entre muchas otras.

Después de la calibración, se realizarán unas impresiones de prueba para comprobar su correcto funcionamiento.

Cumplido el punto “a” de los pasos definidos anteriormente, se pasará a la realización del segundo punto, la instalación de un doble extrusor en el cual se podrán emplear indistintamente los materiales que se desee, pues el control de temperatura de ambos es independiente.

Una vez realizadas la mejora del doble extrusor, se procederá a realizar de nuevo una calibración, pues los parámetros de impresión habrán cambiado, así como se realizará el mismo test para comprobar que la impresora funciona correctamente.

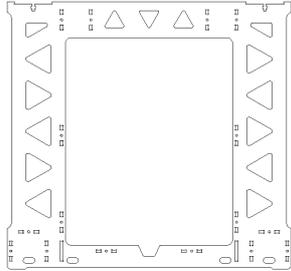
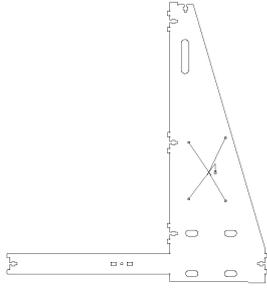
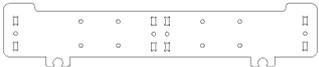
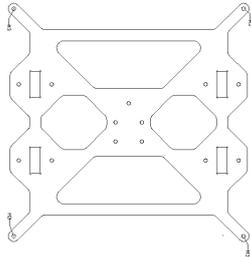
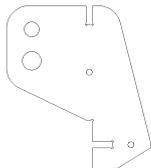
Terminado el montaje de la mejora de la extrusión, se instalará la impresora dentro de la barrera de protección física, instalando ventiladores en su interior que renovarán el ambiente interno a la vez que mediante ellos podrá ser controlada la temperatura interior con un sensor de temperatura.

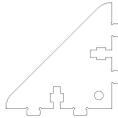
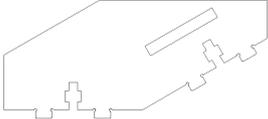
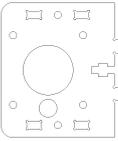
A continuación se realizará un estudio económico del coste de la impresora y la comparación con un modelo comercial que el autor del presente Trabajo Fin de Grado construyó para la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén.

4.2. COMPONENTES DE UNA IMPRESORA 3D PRUSA I3 STEEL.

4.2.1. ESTRUCTURA.

Tabla 3. Elementos estructurales para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Marco de acero 3mm. de espesor. Parte fundamental que soporta el resto de estructura de la impresora tanto en el eje X como en el eje Z.</p>	1	
<p>Contrafuertes para rigidización de la estructura. Junto con el marco de acero, sustentan al resto de elementos en el eje Y.</p>	2	
<p>Piezas base eje Y. Sirven de unión de los contrafuertes a la vez que terminan de formar el apoyo para la base del eje Y.</p>	2	
<p>Soporte base cama caliente. Pieza de acero que sirve de sustento para el apoyo de la base de impresión y que a la vez se une con los rodamientos lineales del eje Y para dar el movimiento a la base.</p>	1	
<p>Piezas sujeción varillas Eje Z. Elementos utilizados para anclar las varillas del eje Z en su parte superior.</p>	2	

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Rigidizadores Eje Y. Piezas que impiden la formación de un ángulo distinto a 90° entre los contrafuertes y las piezas de la base del eje Y.</p>	2	
<p>Piezas sujeción de rodamiento para correa de Eje Y. Piezas auxiliares para el sustento del rodamiento del eje Y necesario para el movimiento de la correa.</p>	2	
<p>Piezas sujeción correa Eje Y. Anclan la correa a la base del eje Y.</p>	2	
<p>Piezas anclaje de motores Eje Z. Sirven para anclar los motores al marco de la estructura.</p>	4	
<p>Soporte marco LCD. Piezas auxiliares para el anclaje de la pantalla LCD al marco de la estructura.</p>	2	
<p>Piezas de anclaje motores Eje Z. Sirven para anclar los motores al marco de la estructura y de base a la varilla guía del eje Z.</p>	2	
<p>Piezas anclaje de rodamientos. Piezas que fijan los rodamientos al soporte de la base del eje Y.</p>	4	
<p>Marco LCD. Frontal de acero para protección de la pantalla LCD</p>	1	

4.2.2. MECÁNICA.

Tabla 4. Elementos mecánicos para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Rodamientos lineales LM8UU. Usados para el movimiento a lo largo de los ejes.</p>	11	
<p>Rodamientos axiales 608ZZ. Usados para el movimiento perpendicular a su eje.</p>	4	
<p>Poleas GT2. Sirven para transmitir a la correa el movimiento de giro del motor.</p>	2	
<p>Correas GT2. Con su movimiento desplazan el carro en el eje X y en el eje Y.</p>	2	
<p>Rodamientos axiales 623ZZ. Acoplado dentro de la polea, permiten el movimiento de esta.</p>	1	
<p>Acoplador flexible 5mm. a 5mm. Transmiten el movimiento de giro del motor a las varillas roscadas.</p>	2	
<p>Motores paso a paso NEMA 17. Realizan el movimiento para luego ser transmitido a los ejes.</p>	5	
<p>Bridas 2.5x100 mm. Fijan los rodamientos con el X-carriage.</p>	6	

4.2.3. VARILLAJE.

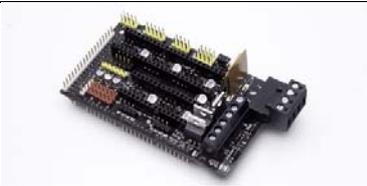
Tabla 5. Elementos de varillaje para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
Varillas roscadas M5x295 mm. (EJE Z)	2	
Varilla de acero lisa Ø8x375 mm. (EJE X)	2	
Varilla de acero lisa Ø8x350 mm. (EJE Y)	2	
Varilla de acero lisa Ø8x320 mm. (EJE Z)	2	
Varilla de acero lisa Ø8 x 20 mm.	1	

Las varillas de acero lisas sirven como guía al desplazamiento lineal en cada eje, mientras que las varillas roscadas tienen la función de transmitir el movimiento de los motores del eje Z para el desplazamiento del eje X en altura.

4.2.4. ELECTRÓNICA.

Tabla 6. Elementos electrónicos para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Arduino 2560 Mega. Placa que sirve de puente entre ordenador e impresora en la que se carga el firmware de la impresora</p>	1	
<p>Shield Ramps 1.4. Placa en la que se realizan las conexiones del cableado de la impresora.</p>	1	
<p>Drivers A4988 para motores paso a paso. Controlan el movimiento de los motores.</p>	4	
<p>Finales de carrera. Activadores de parada de movimiento de los ejes cuando se cierra el circuito.</p>	3	
<p>Pantalla LCD con ranura para tarjeta SD. Conjunto que otorga autonomía a la impresora.</p>	1	
<p>Fuente de alimentación 20A/240W. Suministra la energía eléctrica a la impresora.</p>	1	

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Termistor 100k. Mide la temperatura del extrusor y de la cama caliente.</p>	1	
<p>Cama caliente. Base acoplada en el eje Y que se calienta para disminuir el gradiente térmico en la deposición del filamento.</p>	1	
<p>Extrusor E3d V6 all metal. Encargado de fundir el filamento para su deposición sobre la base.</p>	1	

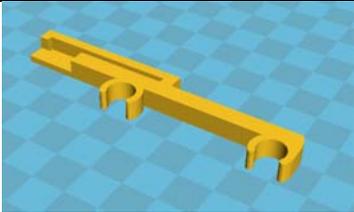
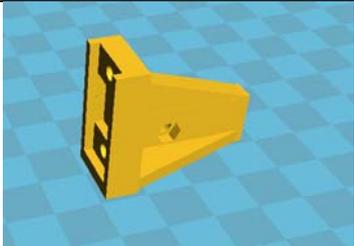
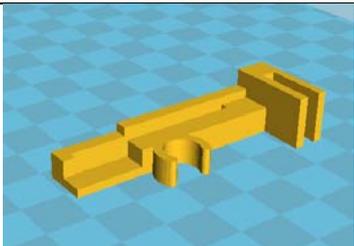
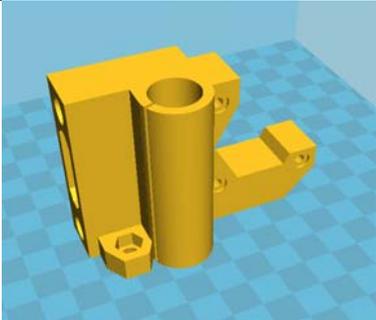
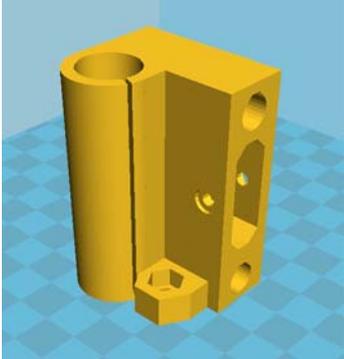
4.2.5. TORNILLERÍA.

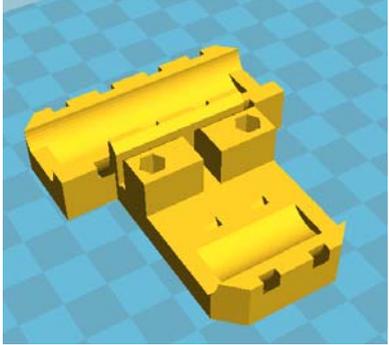
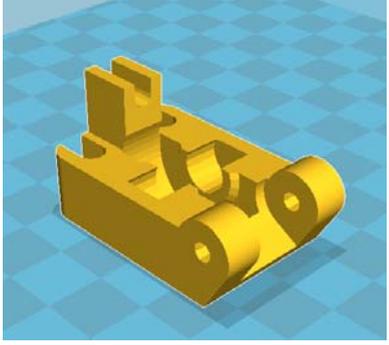
Tabla 7. Elementos de tornillería para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN	
Tornillo M3x12.	40		
Tuerca M3 autoblocante.	40		
Tuerca M8 autoblocante.	2		
Tornillo M8x20.	1		
Tuerca M5.	2		
Arandela M8.	4		
Tornillo M3x25.	7		
Tornillo M3x30.	6		
Tuerca M4.	2		
Tornillo M4x60.	2		
Arandela M3.	12		
Arandela M4.	12		
Muelle Ø5 interior. Ayuda para nivelación de la cama caliente.	6		
Tornillo M8 <i>hobbed bolt</i>. Encargado de arrastrar el filamento hasta el extrusor.	1		
Tornillo M3x25 nylon. Usados para el anclaje de la electrónica al marco de acero.	4		
Separador plástico L=10 mm. Ø5. Usados para separar la electrónica del marco.	4		

4.2.6. PIEZAS IMPRESAS.

Tabla 8. Piezas impresas necesarias para construcción de impresora.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p><i>Endstop holder Eje X.</i> Soporte para el <i>endstop</i> del eje X.</p>	1	
<p><i>Endstop holder Eje Y.</i> Soporte para el <i>endstop</i> del eje Y.</p>	1	
<p><i>Endstop holder Eje Z.</i> Soporte para el <i>endstop</i> del eje Z.</p>	1	
<p><i>X-Axis end motor.</i> Pieza parte del conjunto del eje X en la que se ensambla el motor.</p>	1	
<p><i>X-Axis idler end.</i> Pieza del eje X en la que se coloca la polea para el movimiento de dicho eje.</p>	1	

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p><i>X-carriage.</i> Pieza soporte del bloque del extrusor en las varillas del eje X.</p>	<p>1</p>	
<p><i>Extruder idler.</i> Pieza que aprieta el filamento sobre el <i>hobbed bolt</i> para conseguir el avance del filamento.</p>	<p>1</p>	
<p><i>X-Axis belt guide.</i> Polea que hace posible el movimiento de la correa del eje X.</p>	<p>1</p>	
<p><i>Small Gear.</i> Rueda dentada que transmite el movimiento de giro del motor del extrusor.</p>	<p>1</p>	
<p><i>Greg's Wade 24 mm. motor support.</i> Soporte del bloque del extrusor que se ancla al <i>X-carriage</i>.</p>	<p>1</p>	

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p><i>Big gear.</i> Rueda dentada que recoge el movimiento de la <i>small gear</i> y lo transmite al <i>hobbed bolt</i> para el avance del filamento.</p>	1	

4.3. CONSTRUCCIÓN DE LA IMPRESORA.

4.3.1. MONTAJE DE LA ESTRUCTURA.

La construcción de la impresora comienza con el montaje de la estructura de acero.

Todas las piezas están realizadas en acero de 3 mm. de espesor con un acabado de pintura para protegerlo de la corrosión.

Sobre el marco se colocan los contrafuertes, que le darán la rigidez suficiente a la impresora.

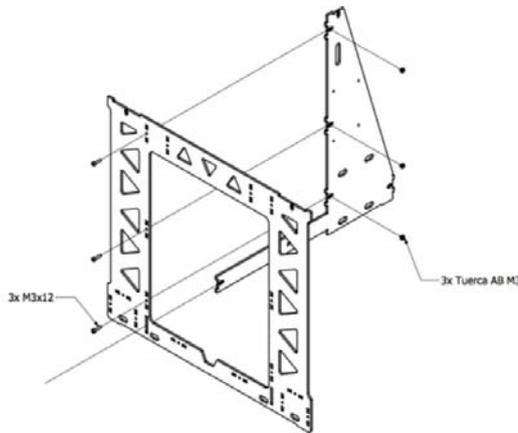


Ilustración 47. Montaje marco acero.



Ilustración 48. Montaje marco de acero.

Posteriormente, se fijan a los elementos que conforman el eje Y junto con los contrafuertes, las piezas de sujeción tanto del motor como del rodamiento sobre el que se moverá la correa de desplazamiento de dicho eje.

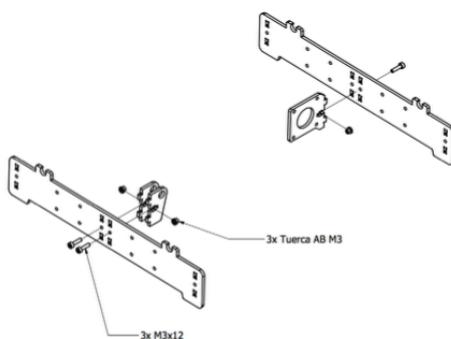


Ilustración 49. Montaje elementos de sujeción de correa de eje Y.



Ilustración 50. Montaje elementos de sujeción de correa de eje Y.

Acopladas las piezas auxiliares para los elementos del eje Y, se introducirán sobre dos varillas de acero lisas, dos rodamientos lineales LM8UU en cada una de ellas y se acoplarán en las piezas de formación del eje Y, acoplando estas sobre los contrafuertes antes montados.

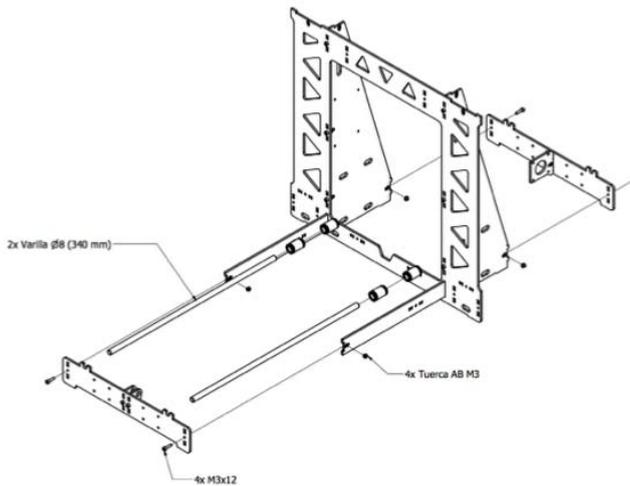


Ilustración 51. Formación de base de eje Y.



Ilustración 52. Formación de base de eje Y.

Se realiza el montaje de los soportes de acero para los motores del eje Z, que también servirán de apoyo para las guías de dicho eje, que consisten en dos varillas de acero, ancladas en la parte superior a otra pieza de hacer que será montada más tarde.

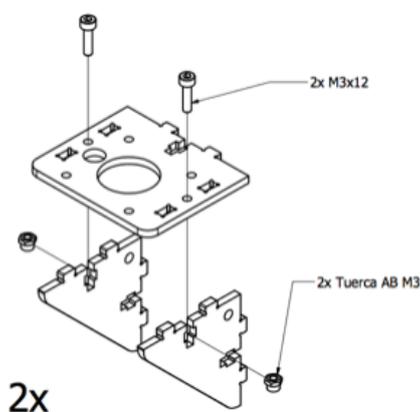


Ilustración 53. Montaje soportes de motores de eje Z.

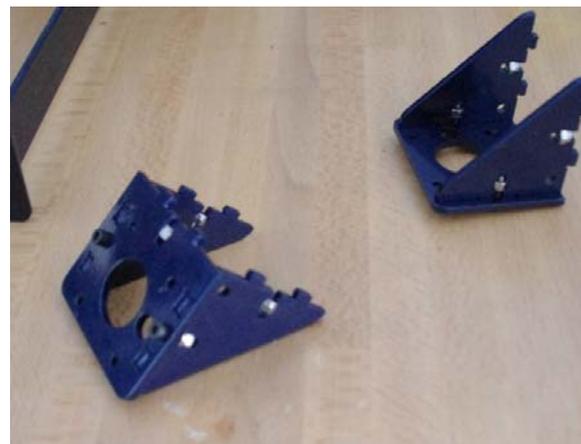


Ilustración 54. Montaje soportes de motores de eje Z.

Estas piezas son montadas en la parte frontal, en cada uno de los laterales, en los extremos inferiores de la estructura.

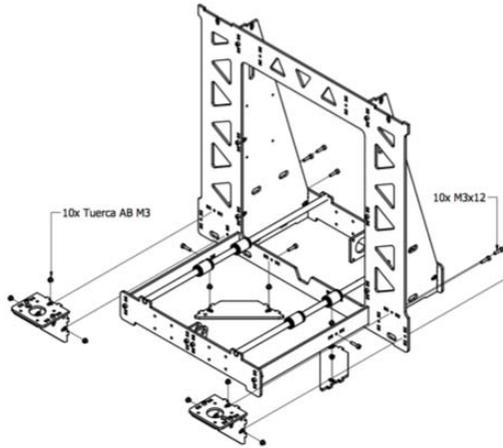


Ilustración 55. Anclaje soportes de motores de eje Z a la estructura.



Ilustración 56. Anclaje soportes de motores de eje Z a la estructura.

Se ensamblan los elementos necesarios para el montaje de la correa del eje Y. En la parte trasera se monta el motor paso a paso en cuyo eje se coloca una polea GT2, coincidente en número de dientes para el correcto movimiento de la correa. En la parte delantera, se coloca el rodamiento, el cual gira alrededor de un tornillo M8x20, asegurado con una tuerca M8 autoblocante. El conjunto queda atornillado a la estructura en las piezas auxiliares de la base previamente montada. Acto seguido, se montarán los rigidizadores de la base de la impresora, los cuales anclan los contrafuertes y el marco por la parte delantera, dando rigidez al conjunto.

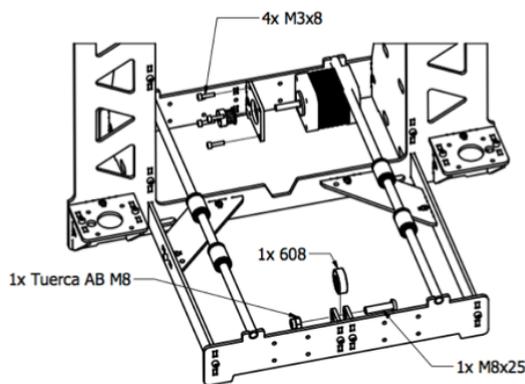


Ilustración 57. Montaje motor y rodamiento de eje Y.



Ilustración 58. Montaje motor y rodamiento de eje Y.

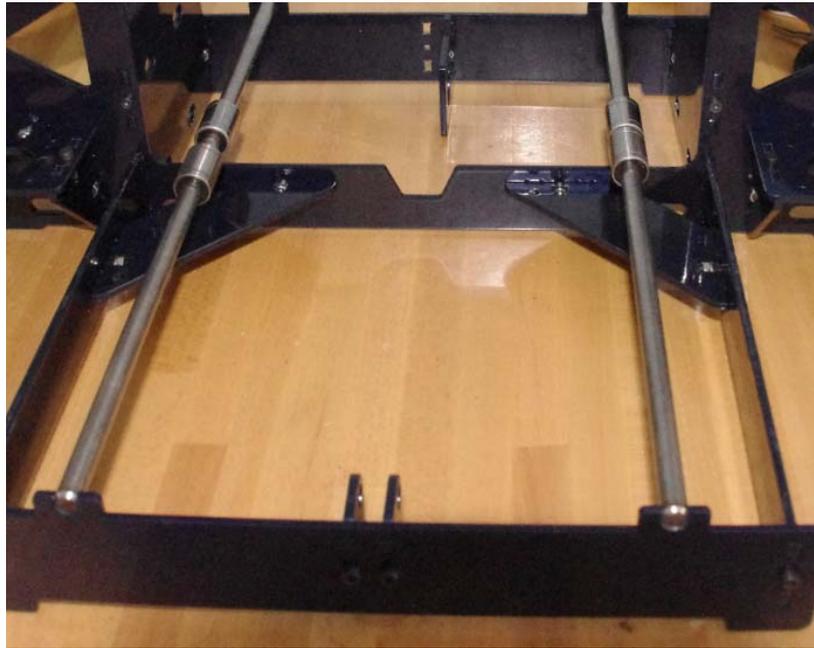


Ilustración 59. Montaje rigidizadores estructura.

Para la conclusión del montaje del eje Y, se coloca sobre los rodamientos lineales previamente introducidos en las varillas de desplazamiento del eje Y, la base sobre la que se colocará la cama caliente. Dicha base está construida en acero de 3 mm. de espesor al igual que el resto de la estructura. Si dicha base está correctamente instalada, no se necesitará esfuerzo para ser desplazada a lo largo del eje Y.

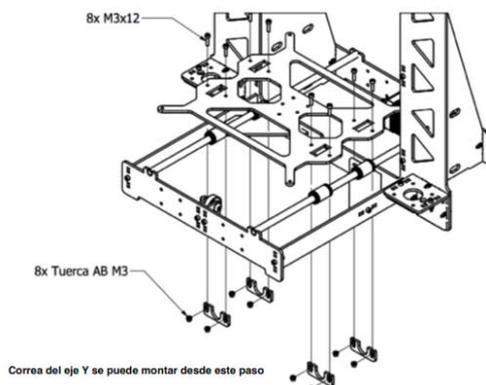


Ilustración 60. Instalación base de eje Y.



Ilustración 61. Instalación base de eje Y.

Una vez realizado el montaje de la base, se puede colocar la correa con dos anclajes a dicha base y haciéndola pasar alrededor del rodamiento instalado en la parte interior delantera y alrededor de la polea instalada en el motor que moverá el eje Y.



Ilustración 62. Instalación de correa eje Y.

Terminado el montaje del eje Y, se comienza el ensamblaje del eje X.

Se coloca una polea dentada en el motor que moverá el eje X y se atornilla a la pieza imprimible *X-Axis motor end*. Esta pieza posee un hueco en el que se introducirán dos rodamientos lineales LM8UU, que servirán de guía para el desplazamiento por el eje Z.

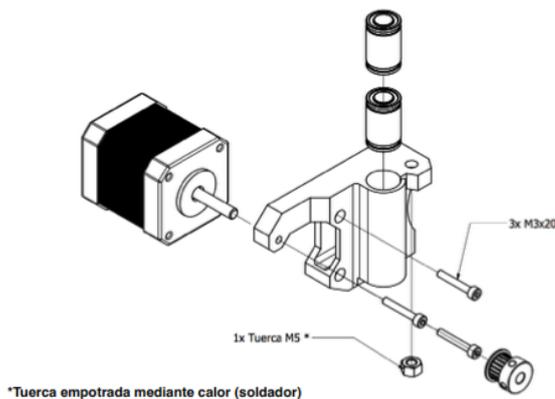


Ilustración 63. Ensamblado X-Axis motor end.



Ilustración 64. Ensamblado X-Axis motor end.

Sobre la pieza *X-Axis Idler end* se montan otros dos rodamientos lineales LM8UU para el desplazamiento a lo largo del eje Z, así como mediante un rodamiento axial 623ZZ introducido en el interior de las dos piezas que conforman el *X-Axis belt guide*, se conforma una polea que servirá para el movimiento de la correa del eje X. Esta última

pieza se atornilla a la pieza principal. Tanto el *X-Axis idler end* como el *X-Axis motor end* se monta una tuerca M5 empotrada con calor que servirá para el desplazamiento a lo largo del eje X mediante dos varillas roscadas que serán movidas gracias al giro de los motores de desplazamiento del eje Z.

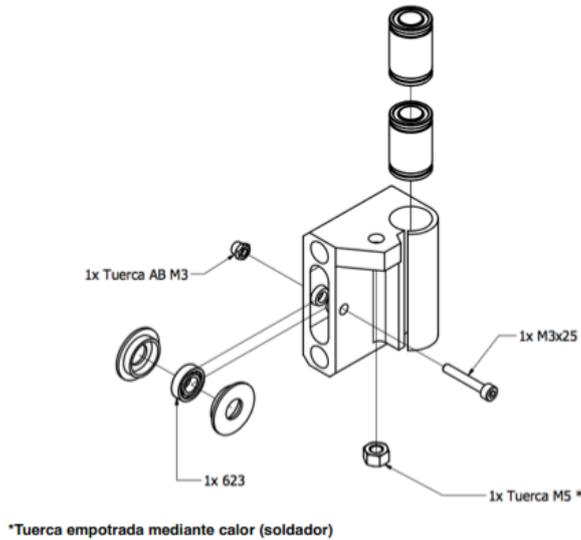


Ilustración 65. Montaje *X-Axis idler end*.



Ilustración 66. Montaje *X-Axis idler end*.

Una vez montadas los dos conjuntos con las piezas impresas del eje X, se unen mediante dos varillas lisas, colocando en la varilla superior dos rodamientos lineales LM8UU y un rodamiento lineal en la varilla inferior. Estos rodamientos servirán de anclaje y de desplazamiento para el *X-carriage*, al cual irá unido el bloque de piezas del extrusor.

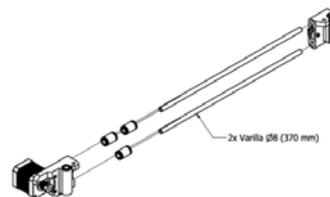


Ilustración 67. Montaje eje X.



Ilustración 68. Montaje eje X.

En el siguiente paso se ensambla el conjunto del eje X previamente montado, uniéndolo al conjunto de la estructura mediante la colocación de las varillas roscadas y las piezas superiores del marco que sirven de soporte para que las varillas que conforman el eje Z estén totalmente verticales.

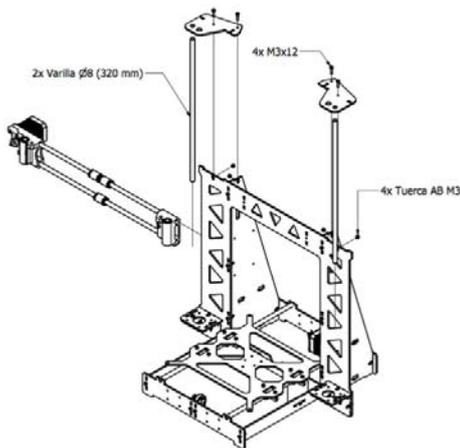


Ilustración 69. Acoplamiento del eje X a la estructura.



Ilustración 70. Acoplamiento del eje X a la estructura.

En el paso siguiente, mediante los acoples flexibles de aluminio, se unen los cabezales de giro de los motores con las varillas lisas que sirven de guía para el carro de desplazamiento del eje X a lo largo del eje Z y se colocan en su posición definitiva, atornillando a las piezas de anclaje de los motores previamente colocadas los mismos. Con este paso finaliza el montaje del eje Z.

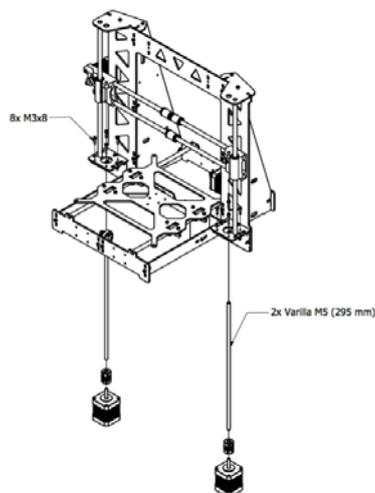


Ilustración 71. Colocación de motores del eje Z.

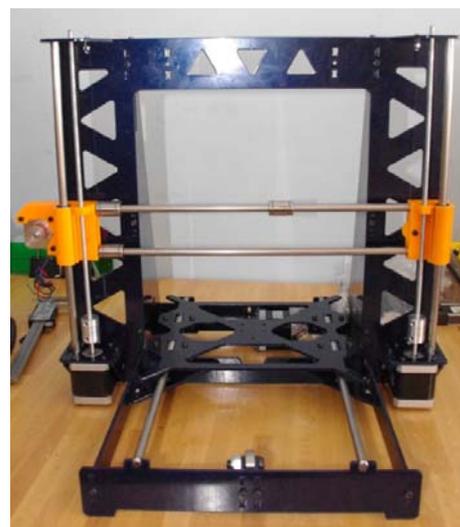


Ilustración 72. Colocación de motores del eje Z.

A partir de este momento, se comienza a montar la última parte de la estructura y la mecánica, que es el bloque del extrusor.

Se empotran mediante calor dos tuercas M3 en el *X-carriage*, que es la pieza unida al eje X y que a su vez soporta el bloque del extrusor completo y hace que se mueva a lo largo del eje X. Las tuercas son empotradas mediante la aplicación de calor con un soldador.

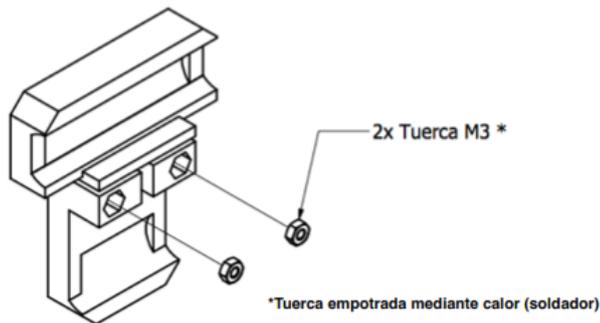


Ilustración 73. Colocación de tuercas en el *X-carriage*.



Ilustración 74. Colocación de tuercas en el *X-carriage*.

El *X-carriage* se monta sobre los rodamientos que antes fueron introducidos en las varillas sobre las que se desplazará, uniéndola con estos mediante el uso de bridas de plástico.

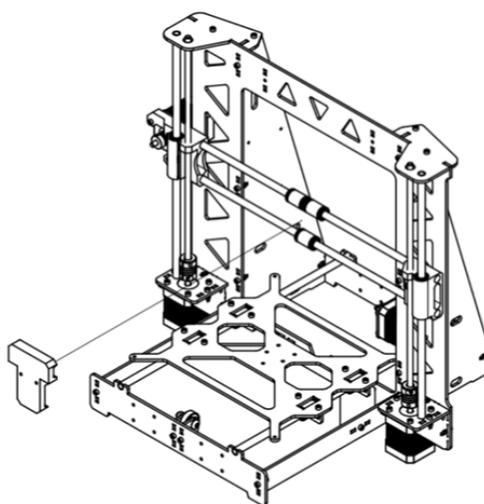


Ilustración 75. Montaje *X-carriage* en eje X.

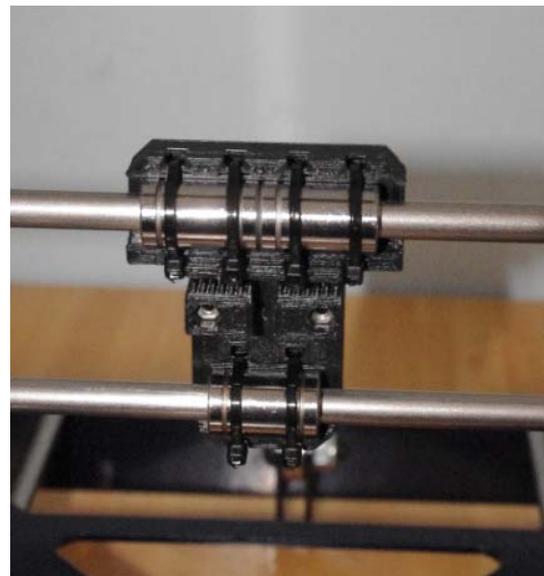


Ilustración 76. Montaje *X-carriage* en eje X.

Para el montaje del *Extruder idler* (es la pieza que guía el filamento y lo aprieta contra el *hobbed bolt* para su correcto desplazamiento hacia el extrusor) se ha de montar sobre una varilla de $\varnothing 8$ y 20 mm. de longitud un rodamiento 608ZZ, haciendo presión contra la pieza imprimible para encajarlo.

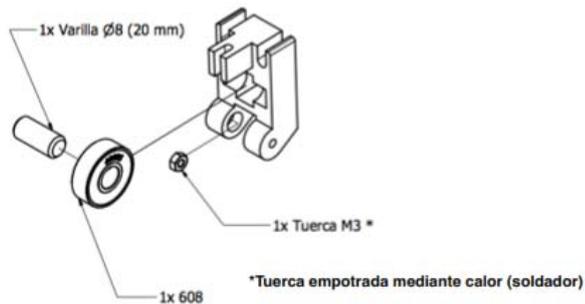


Ilustración 77. Montaje extruder idler.



Ilustración 78. Montaje extruder idler.

A continuación se realiza el montaje del extrusor. Se necesitan las siguientes piezas:

- Extruder idler* previamente montado.
- Greg's wade 24 mm. motor support*.
- Big gear*.
- Small gear*.
- Hobbed bolt*.
- Tuerca M8 autoblocante.
- Arandelas M8.
- Rodamientos 608ZZ.
- Tornillería M3.
- Motor Nema 17.

Sobre la *Big gear* se introduce el *Hobbed bolt*, empotrándolo en su eje, y sobre este se introducen arandelas M8, los rodamientos, y entre ellos, la pieza *Greg's wade 24 mm. motor support*, asegurando todo el conjunto mediante la tuerca M8 autoblocante.

Se acopla el motor en su hueco con la tornillería M3 y en su eje se monta la *small gear*, los dientes de la cual se acoplan sobre la *big gear*, quedando el conjunto totalmente ensamblado.

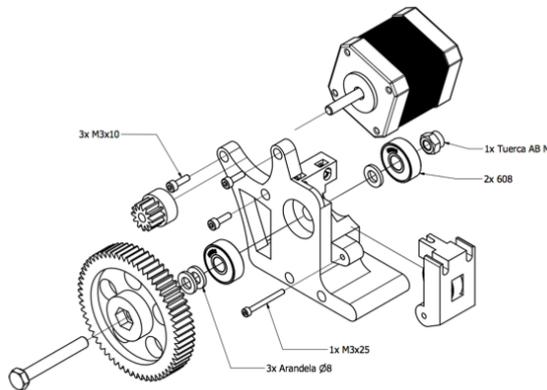


Ilustración 79. Montaje bloque del extrusor.



Ilustración 80. Piezas para el montaje del bloque del extrusor.

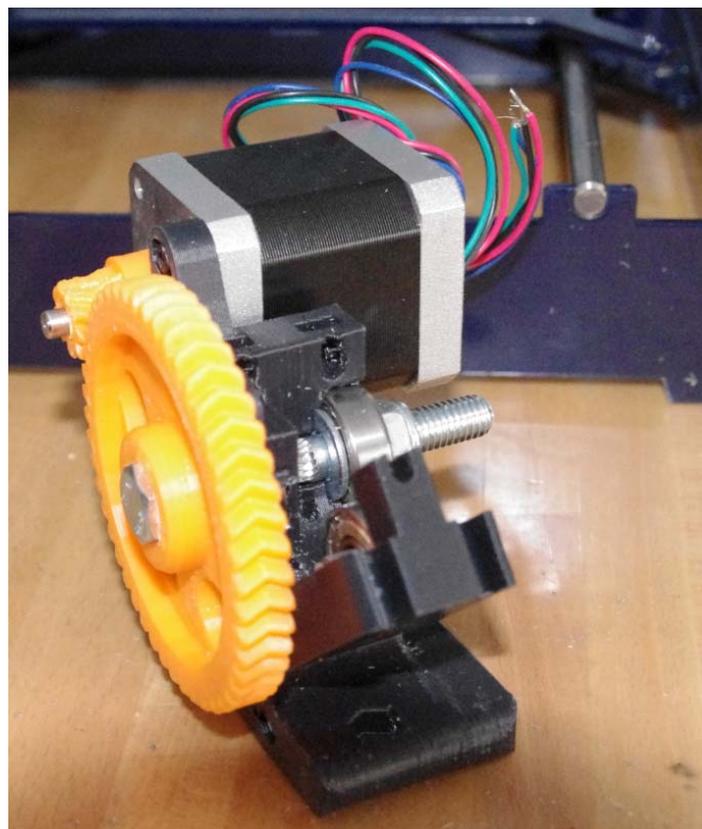


Ilustración 81. Montaje bloque del extrusor.

Para el montaje de la pantalla LCD con lector de tarjetas SD incorporado, se ensamblan las piezas de soporte del LCD que irán unidas a la estructura con el frontal del mismo, que servirá de protección a la pantalla.

Una vez unidos, se atornilla el circuito del LCD al conjunto mediante tornillería M3.

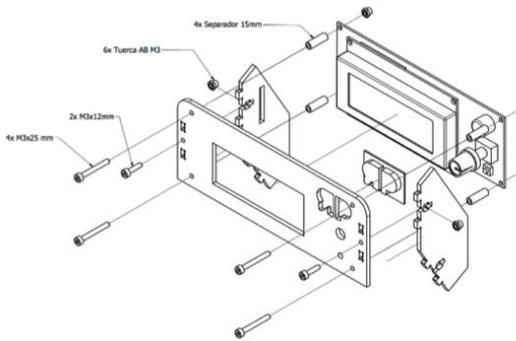


Ilustración 82. Montaje pantalla LCD.

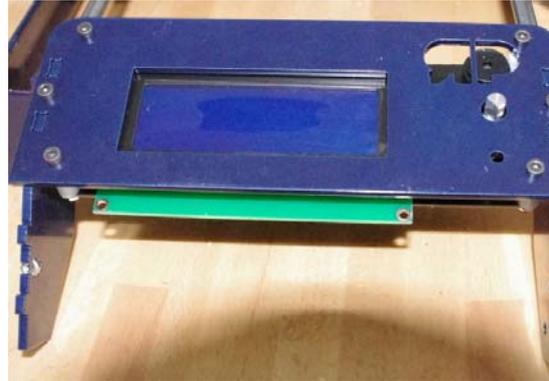


Ilustración 83. Montaje pantalla LCD.

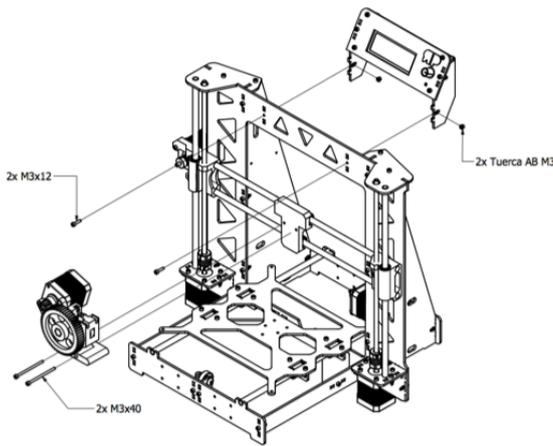


Ilustración 84. Ensamblaje LCD a la estructura de la impresora.

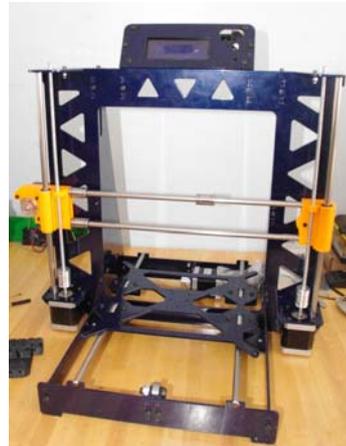


Ilustración 85. LCD ensamblado a la estructura.

Una vez terminado el montaje de la estructura, se procede a realizarlo con la cama caliente, que será la encargada de minorizar el gradiente térmico del material extruido entre la temperatura de fusión y la temperatura de depósito del mismo, haciendo este gradiente térmico mucho más pequeño.

Para medir la temperatura de la cama caliente se utilizará un termistor, que es una resistencia, alojada en el centro de dicha cama.

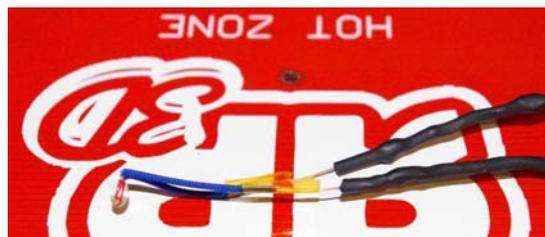


Ilustración 86. Termistor de cama caliente.

El termistor, una vez alojado en la oquedad del centro de la cama caliente, se asegura con cinta *kapton*, una cinta de poliamida resistente a altas temperaturas (alrededor de 400°C sin perder sus propiedades).

El cableado del termistor se dirige en la misma dirección que los de la cama caliente, que para evitar posibles interferencias con el movimiento del eje Y, serán colocados en la parte trasera de la misma.



Ilustración 87. Asegurado de cableado de termistor de la cama caliente.

Con la ayuda de tornillería, tuercas, arandelas de métrica 3, y uniendo al conjunto unos muelles, se coloca la cama caliente sobre el soporte del eje Y. Los muelles son necesarios para la posterior nivelación de la cama caliente.

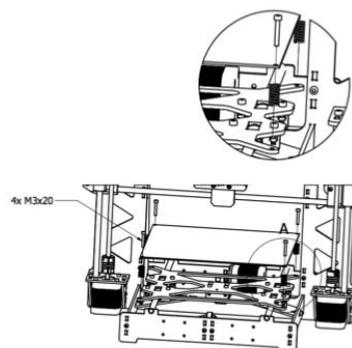


Ilustración 88. Montaje cama caliente sobre base del eje Y.



Ilustración 89. Montaje cama caliente sobre base del eje Y.

Por último en este capítulo, se realizará el montaje del extrusor. El elegido es un extrusor completamente metálico de la casa E3D, concretamente el modelo *E3D V6 all metal*, ya que según la experiencia de los usuarios, es el que mejores resultados consigue.

Alcanza temperaturas de hasta 300°C pasando de 20°C a 200°C en 65 segundos, con un rango estable de temperatura de 0,5°C una vez conseguida la temperatura deseada.

El extrusor se compone de:

- Disipador de calor de aluminio.
- Barrera para el calor de acero inoxidable.
- *Nozzle* de latón (boquilla extrusora).
- Bloque calentador de aluminio.
- Termistor para el control de la temperatura.
- Cartucho calefactor 12V 40W.
- Ventilador 30x30x10 mm.
- Acoplador para ventilador.
- Tubo de fibra de vidrio para el termistor.
- Casquillos de alambre.
- Tornillería para el ensamblaje.
- Tubo PFTE para la conducción del filamento hasta el bloque calefactor.



Ilustración 90. Elementos para el montaje del extrusor.

Se comienza el montaje fijando al bloque calefactor tanto el *nozzle* de latón como la barrera para el calor.



Ilustración 91. Montaje *nozzle* y barrera de calor en bloque calefactor.

Acto seguido se realiza el montaje del termistor. Para ello, se requiere que ambos hilos no se toquen entre sí, pues provocaría un cortocircuito y el termistor dejaría de funcionar. Para conseguir este objetivo, se enfundan ambos hilos en el conducto de fibra de vidrio, asegurándolos con los casquillos de alambre.



Ilustración 92. Montaje termistor.

El termistor es montado sobre el bloque calefactor, que es donde se realizará la medición de la temperatura. Se introduce en una oquedad existente para su alojamiento, se doblan los hilos a 90° y se aseguran con una arandela y un tornillo, quedando cada hilo por un lado de la rosca del tornillo.

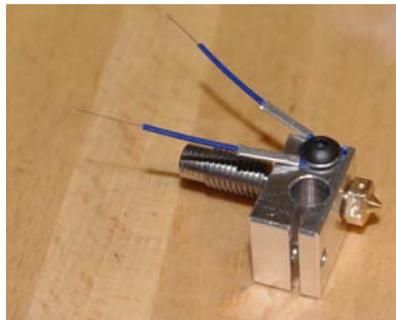


Ilustración 93. Montaje termistor sobre bloque calefactor.

Sobre el disipador de aluminio se introduce un tubo de PFTE de aproximadamente 50 mm., que es asegurado con un racor que impide su desplazamiento hacia la parte superior, y el disipador es enroscado en la barrera de calor.



Ilustración 94. Montaje disipador de calor.

Para la conexión del termistor en la placa electrónica es necesario soldar unos cables con un terminal *Dupont*, para lo que con la ayuda de un soldador y estaño con proporción 60% zinc y 40% plomo, se realiza la unión de hilos con los cables y se protegen las soldaduras con funda termo retráctil.



Ilustración 95. Soldadura de cableado del termistor.

Se monta sobre el bloque calefactor el cartucho calefactor, que es el encargado de calentar el conjunto, asegurándolo con un tornillo de métrica 2.



Ilustración 96. Montaje cartucho calefactor.

Se atornilla el ventilador sobre el acople y se monta sobre el disipador de aluminio, quedando el extrusor completamente montado.

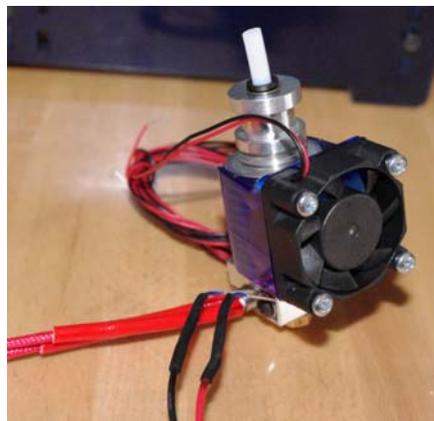


Ilustración 97. Extrusor completamente ensamblado.

Por último, se monta en la oquedad dispuesta para tal fin en el bloque del extrusor previamente montado.



Ilustración 98. Bloque extrusor finalizado.

Para finalizar, se ensambla el conjunto sobre el *X-carriage* mediante dos tornillos de métrica 3, quedando la estructura completamente finalizada.

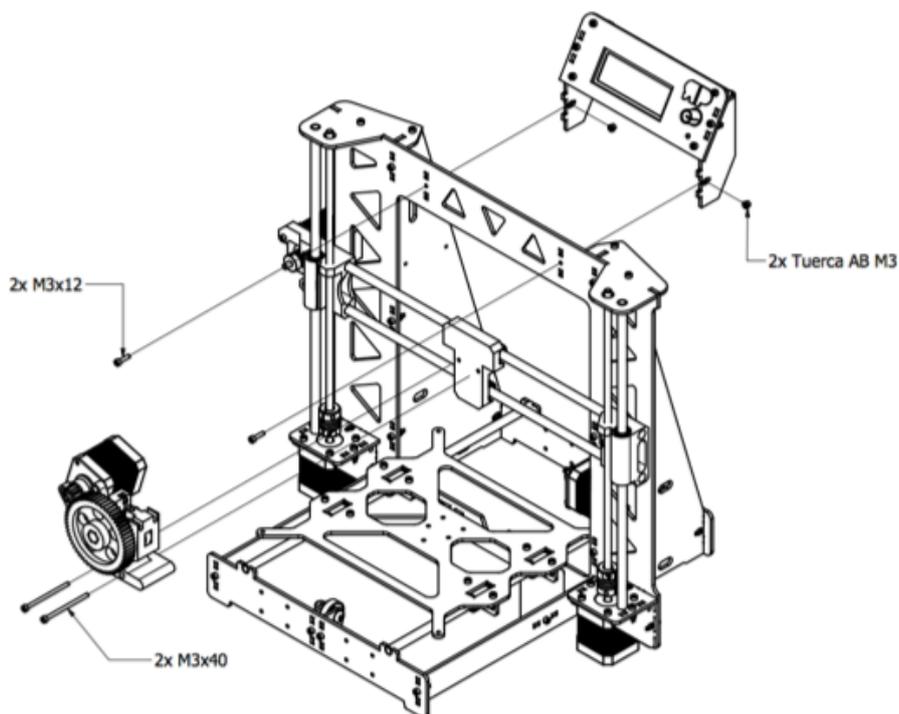


Ilustración 99. Montaje bloque extrusor sobre *X-carriage* y finalización de la estructura.

4.3.2. MONTAJE DE LA ELECTRÓNICA.

Para el control de la impresora 3D existen varios tipos de placa. Los más comunes son la utilización de una placa Arduino y un *shield* denominado RAMPS sobre él y otra placa llamada Sanguinololu, la cual no necesita de Arduino para funcionar.

La opción escogida en el montaje de esta impresora ha sido la combinación de la placa Arduino y un *shield* RAMPS, concretamente un Arduino Mega 2560 y una RAMPS 1.4.

Para el control de los motores, en la placa RAMPS existen unos conectores sobre los cuales se pincha un driver de control. Existen dos tipos de drivers, el A4988 y el DRV8825. Se ha escogido el driver A4988 pues es también el más extendido en el mundo de la impresión 3D. Dicho driver cuenta con un tornillo que regula la potencia suministrada al motor. La regulación de potencia es necesaria para la correcta conservación de la electrónica y de los motores, pues más potencia suministrada de la necesaria se convierte en calor, pudiendo dañar o acortar la vida tanto de los componentes electrónicos como de los motores.

Los motores estarán regulados de la siguiente forma:

- Eje X: 240 mA.
- Eje Y: 240 mA.
- Eje Z: 480 mA. (Ya que el mismo driver controla ambos motores del eje Z).
- Extrusor: 480 mA.

Se han seguido estas indicaciones dado que son valores contrastados por muchos usuarios los cuales no hacen calentarse la placa controladora ni los motores.

4.3.2.1. MONTAJE DE RAMPS Y DRIVERS DE LOS MOTORES.

La electrónica es el alma de la impresora. Es la que controla todos los movimientos que realiza, así como monitoriza todos los parámetros de temperatura.

Para el montaje de esta impresora se ha seleccionado una controladora basada en Arduino, concretamente el modelo Arduino Mega 2560 y un shield que se acopla sobre esta llamado Ramps, en su versión 1.4.

Este *shield* controla todas las entradas y salidas de tensión, los movimientos de los motores, todas las temperaturas y los finales de carrera.



Ilustración 100. Arduino Mega 2560. Fuente: www.arduino.cc

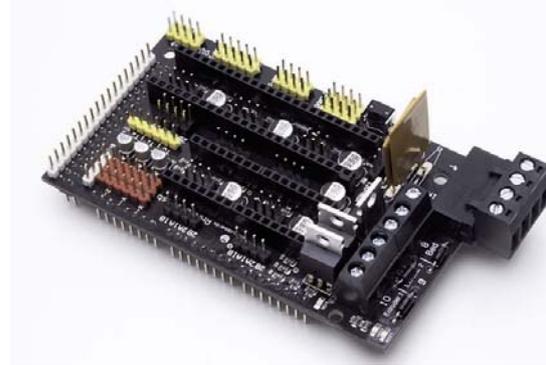


Ilustración 101. Shield RAMPS 1.4 SB. Fuente: www.staticboards.es

Los *drivers* para los motores son los que controlan sus movimientos, comandados por la *shield* Ramps. Se encuentran alojados en esta y existe un motor para cada eje y uno por cada extrusor. Cada placa puede controlar hasta un máximo de 5 drivers, es decir, uno para el eje X, otro para el eje Y, otro para el eje Z y dos para dos posibles extrusores.

Son regulables en potencia mediante un tornillo y según la requerida, se atornillará o desatornillará dicho tornillo, con la precaución de la sensibilidad, pues con poco paso de vuelta, varía sensiblemente la tensión.

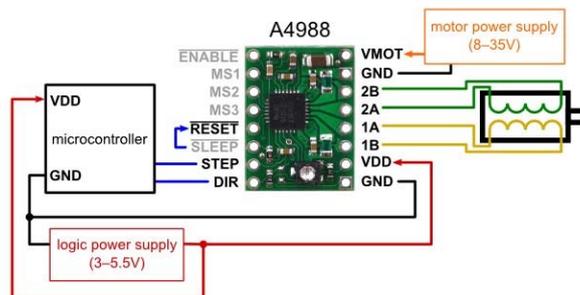


Ilustración 102. Esquema *driver* de motor A4988.



Ilustración 103. *Driver* para motor A4988.

Los finales de carrera o *endstops* son actuadores directos, que cuando son pulsados cortan el movimiento de los motores a lo largo de los ejes. Existe uno por eje, que son colocados al inicio de cada uno, aunque existe la posibilidad de la colocación de otro más por cada eje para fijar la coordenada máxima de cada eje.



Ilustración 104. Finales de carrera y piezas imprimibles para su sujeción.

Cada uno de los *endstop* se sitúan en el origen de los ejes de la impresora, es decir, en el punto 0 de cada eje, montándolos sobre las piezas imprimibles destinadas a su sujeción.



Ilustración 105. Montaje *endstop* eje Y.

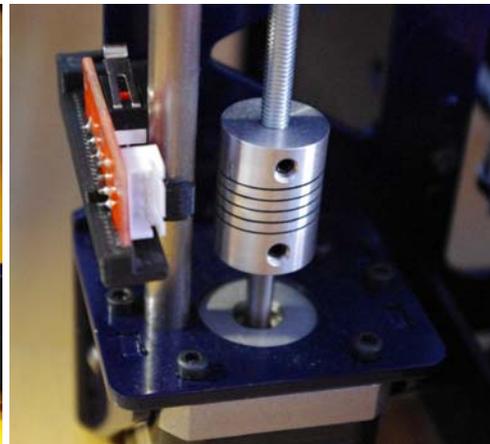


Ilustración 106. Montaje *endstop* eje Z.

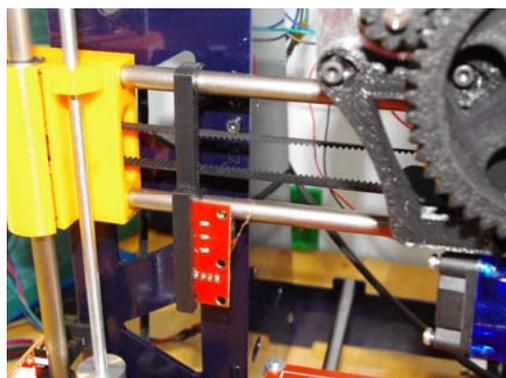


Ilustración 107. Montaje *endstop* eje X.

Una vez colocados en sus respectivas posiciones los *endstop*, se procede al montaje del conjunto de las placas de la electrónica.

Los drivers A4988, que sirven para el comando de las operaciones de los motores, son puestos sobre la placa Ramps, localizando el pin DIR, que será situado en la esquina

superior derecha. Se necesitan 4 drivers montados, uno para cada eje (el driver del eje Z controla los dos motores simultáneamente) y otro para el motor del extrusor.

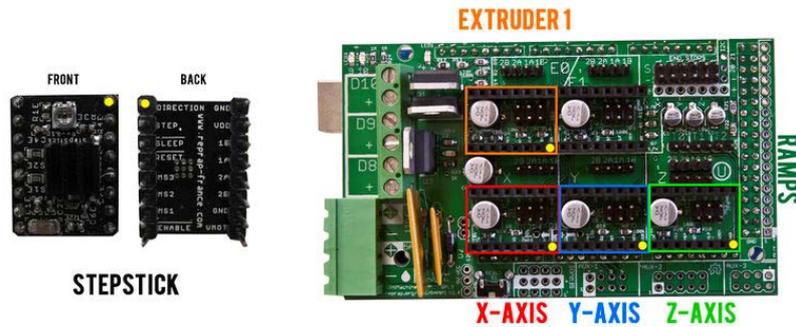


Ilustración 108. Esquema de conexión drivers A4988 sobre Ramps.

La shield Ramps con los drivers instalados se pincha sobre el Arduino, acoplándose en los conectores destinados a tal fin.

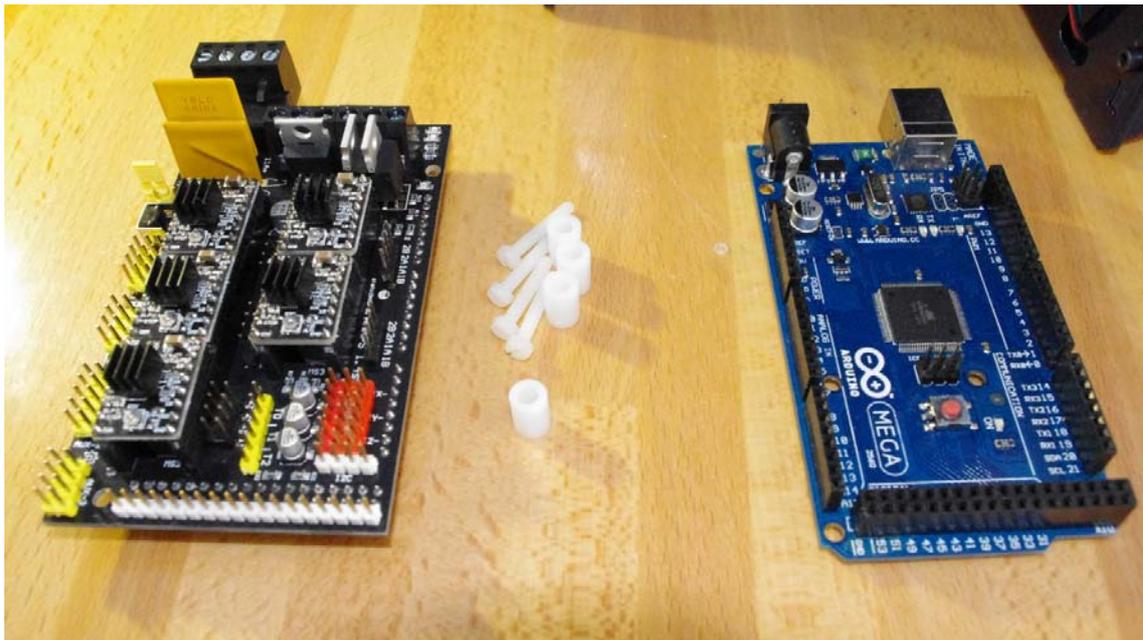


Ilustración 109. Arduino y Ramps antes de montaje.

Para evitar posibles contactos con cualquier metal y que se produzca una derivación de la tensión, se realizara el montaje con tornillos de nylon, material no conductor, además de la colocación de unos separadores para mantenerla distanciada de la estructura de acero de la impresora.



Ilustración 110. Conjunto de placas montadas sobre la estructura.

Finalizada la instalación de la electrónica sobre la estructura de acero, se procede a realizar el cableado según el siguiente esquema:

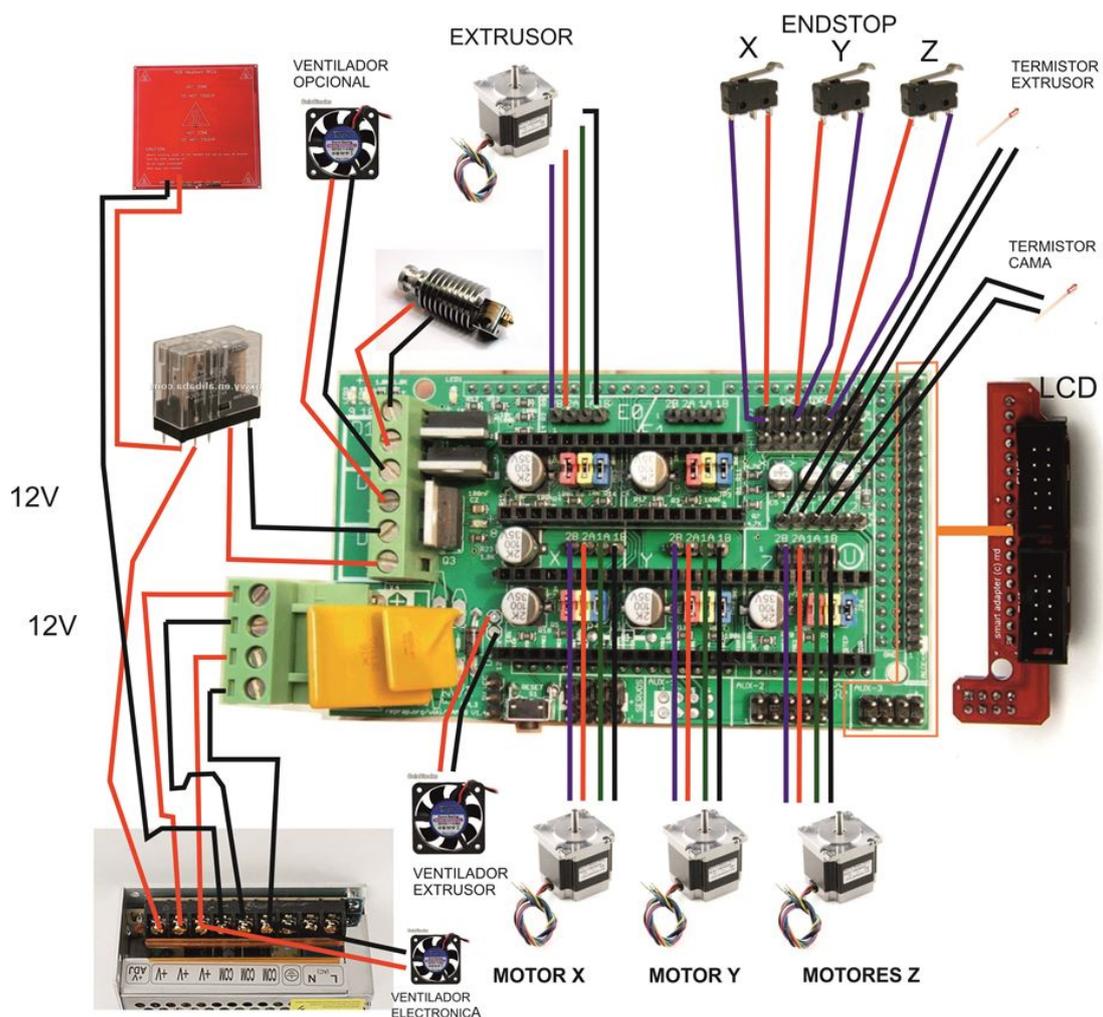


Ilustración 111. Esquema de conexión de cableado en electrónica Ramps.

Se ha optado por la instalación de un relé para proteger contra sobretensiones y calentamientos excesivos la electrónica. Este esquema es válido para todos los elementos de la impresora base de este Trabajo Fin de Grado, excepto para los endstop, puesto que éstos están montados sobre una PCB, siguiendo el esquema de conexión que se muestra a continuación:

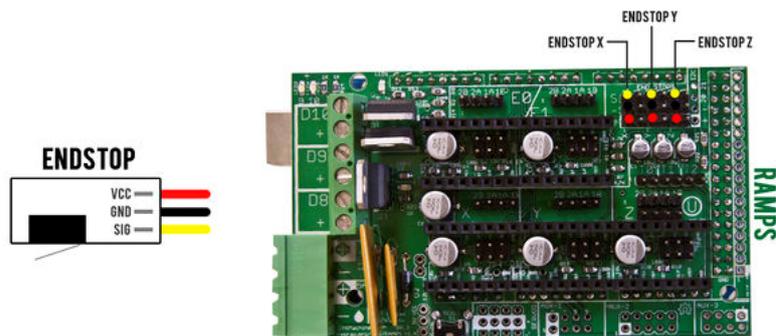


Ilustración 112. Conexión endstops en Ramps.

Antes de realizar todo el cableado, se necesita regular el amperaje suministrado a los motores, por lo que se realiza una medición individual de cada uno de ellos, para luego ser ajustado con el tornillo que posee cada uno de los *drivers* A4988.

En la primera ilustración de las dos siguientes se aprecia el consumo de la electrónica, mientras que en la segunda se puede comprobar el estado final del consumo de la suma de la electrónica y el motor del eje X.



Ilustración 113. Consumo en mA. de la electrónica.



Ilustración 114. Consumo de la electrónica con el motor del eje X en funcionamiento.

Los valores óptimos de amperaje para que los motores funcionen correctamente sin sobrecalentamientos según la experiencia de los usuarios, son las siguientes:

- Eje X: 240 mA.
- Eje Y: 240 mA.
- Eje Z (dos motores): 480 mA.
- Extrusor: 480 mA.

Una vez terminada la calibración de los motores y habiendo realizado el cableado de la electrónica, se está en disposición de realizar la carga del firmware de la impresora en la shield Ramps, mediante el software Arduino.

Para poder trabajar con la electrónica de la impresora ha de instalarse en el ordenador el entorno Arduino. El instalador se puede obtener desde la web de Arduino²³. Actualmente, la versión más avanzada es la 1.6.5, pero es posible disponer de versiones anteriores del entorno en la misma página web.



Ilustración 115. Página web de Arduino. www.arduino.cc

Después de finalizar la instalación del entorno Arduino, se requiere cargar el firmware de la impresora en Arduino para posteriormente, después de modificar algunos parámetros, pueda ser cargado en el shield Ramps.

Este firmware actúa de puente entre el software que se manejará en el ordenador por el usuario y la impresora 3D.

Existen dos firmwares predominantes (por su estabilidad) en el mundo de la impresión 3D para el control del shield: Marlin²⁴ y Sprinter²⁵.

²³ www.arduino.cc

²⁴ <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>

²⁵ <https://github.com/kliment/Sprinter>

Dichos firmwares se pueden descargar desde cada una de sus páginas oficiales.

De entre ambos, se ha elegido trabajar con el firmware Marlin, pues, atendiendo a la siguiente gráfica, se puede apreciar como la temperatura de salida del extrusor es más constante que en Sprinter.

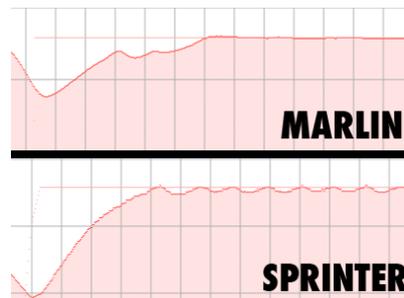


Ilustración 116. Gráfico de temperatura de salida del extrusor en Marlin y en Sprinter en función del tiempo.
Fuente: <http://www.tr3sland.com>

Una vez descargado el firmware Marlin, se carga en el entorno Arduino y se abre el archivo de configuración Marlin, previamente extraído en una carpeta.

En primer lugar, en la pestaña herramientas, se ha de seleccionar la tarjeta Arduino con la que se está trabajando, concretamente la *Arduino Mega 2560*.

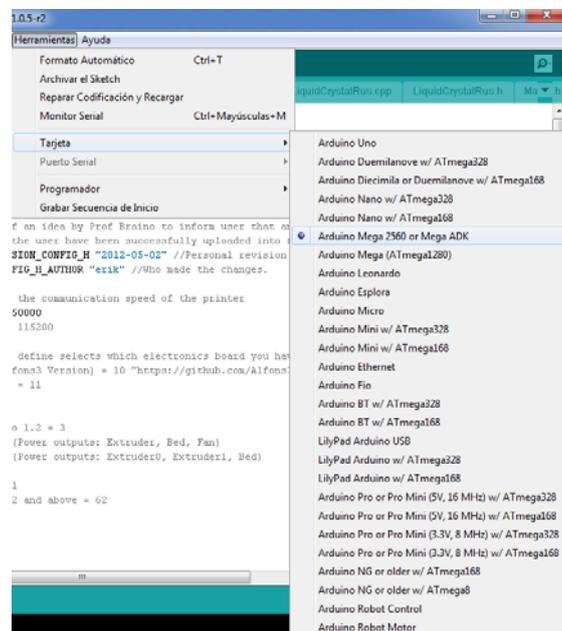


Ilustración 117. Selección de tarjeta en el entorno Arduino.

En el archivo del firmware, se pueden encontrar diversas pestañas. De todas ellas, se seleccionará la pestaña *Configuration.h*, que es en la que se realizarán los cambios pertinentes para adaptar el firmware a la impresora.

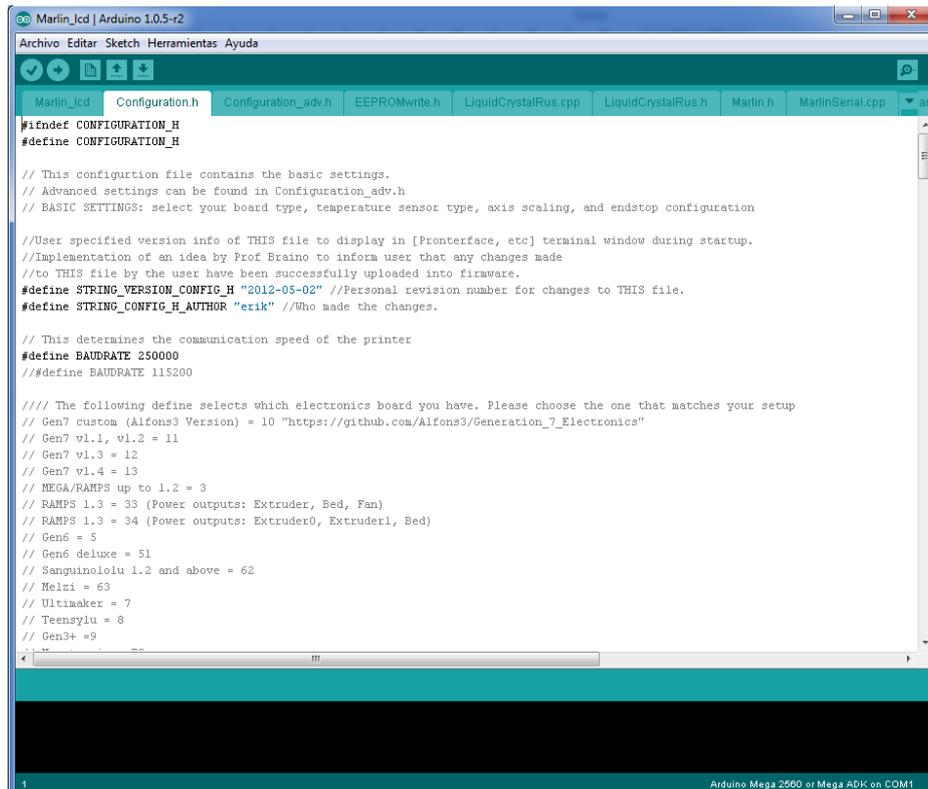


Ilustración 118. Pestaña *Configuration.h* de Marlin en Arduino.

En dicha pestaña se harán los cambios y selecciones de hardware necesarios para el correcto funcionamiento de la impresora 3D.

A. SELECCIÓN DE PLACA.

Existen diversas tipologías de placas, y, aun dentro de la misma placa, diversas configuraciones, ya que no es lo mismo si se posee un extrusor y una cama caliente a si se tienen dos extrusores y una cama caliente. En este caso, se selecciona el valor 33 (*Power outputs: Extruder, Bed, Fan*).

```
//// The following define selects which electronics board you have. Please choose the one that matches your setup
// Gen7 custom (Alfons3 Version) = 10 "https://github.com/Alfons3/Generation_7_Electronics"
// Gen7 v1.1, v1.2 = 11
// Gen7 v1.3 = 12
// Gen7 v1.4 = 13
// MEGA/RAMPS up to 1.2 = 3
// RAMPS 1.3 = 33 (Power outputs: Extruder, Bed, Fan)
// RAMPS 1.3 = 34 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)
// Gen6 = 5
// Gen6 deluxe = 51
// Sanguinololu 1.2 and above = 62
// Melzi = 63
// Ultimaker = 7
// Teensylu = 8
// Gen3+ =9
// Megatronics =70

// #define MOTHERBOARD 64

#endif
#define MOTHERBOARD 33
#endif
```

Ilustración 119. Selección de placa en Arduino.

B. CONFIGURACIÓN DE TERMISTORES.

Se ha de definir el tipo de termistor que se ha dispuesto en cada caso, ya que en caso de no ser el correcto, la lectura de la temperatura no coincidirá con la real. En la impresora objeto de este Trabajo Fin de Grado se han dispuesto dos termistores, uno en el extrusor y otro en la cama caliente. Ambos son del tipo 1.

```
//--NORMAL IS 4.7kohm PULLUP!-- lkohm pullup can be used on hotend sensor, using correct resistor and table
//
//// Temperature sensor settings:
// -2 is thermocouple with MAX6675 (only for sensor 0)
// -1 is thermocouple with AD595
// 0 is not used
// 1 is 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
// 2 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (4.7k pullup)
// 3 is mendel-parts thermistor (4.7k pullup)
// 4 is 10k thermistor !! do not use it for a hotend. It gives bad resolution at high temp. !!
// 5 is 100K thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (4.7k pullup)
// 6 is 100k EPCOS - Not as accurate as table 1 (created using a fluke thermocouple) (4.7k pullup)
// 7 is 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-J01 (4.7k pullup)
//
// lk ohm pullup tables - This is not normal, you would have to have changed out your 4.7k for lk
//                          (but gives greater accuracy and more stable PID)
// 51 is 100k thermistor - EPCOS (1k pullup)
// 52 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (1k pullup)
// 55 is 100k thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (1k pullup)

#define TEMP_SENSOR_0 1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

Ilustración 120. Definición de termistores en Marlin.

C. ENDSTOPS O FINALES DE CARRERA.

La siguiente opción define la lógica de los endstop, es decir, dependiendo de la conexión, ha de mandar la señal “siempre abierto” o siempre cerrado, para que al hacer contacto, cambie la variable de salida y detenga el movimiento del eje.

```
// The pullups are needed if you directly connect a mechanical endswitch between the signal and ground pins.
const bool X_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the endstops.
const bool Y_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the endstops.
const bool Z_ENDSTOPS_INVERTING = true; // set to true to invert the logic of the endstops.
#define DISABLE_MAX_ENDSTOPS
```

Ilustración 121. Ajuste de lógica de los finales de carrera.

Es posible configurar el funcionamiento de los motores cuando no están en uso, por ejemplo en cada capa se pueden desactivar los motores del eje Z para que la impresora consuma menos electricidad.

```
// Disables axis when it's not being used.
#define DISABLE_X false
#define DISABLE_Y false
#define DISABLE_Z false
#define DISABLE_E false // For all extruders
```

Ilustración 122. Activación/desactivación de motores cuando no están en uso.

Las siguientes variables controlan la dirección de movimiento de los ejes. Es posible la inversión de la dirección. Con esta configuración se debe conseguir que, cuando se haga un *homing*, los ejes se desplacen en dirección a los finales de carrera, es decir, al punto cero de cada eje.

```
#define INVERT_X_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_Y_DIR true // for Mendel set to true, for Orca set to false
#define INVERT_Z_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_E0_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E1_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E2_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
```

Ilustración 123. Inversión de dirección de los finales de carrera.

Los finales de carrera pueden estar colocados en el punto máximo o mínimo de la carrera de los ejes. Normalmente estos se hallan situados en el inicio, pero por alguna circunstancia, este hecho puede variar, por lo que habría que cambiar el valor de las siguientes variables para cada uno de los ejes.

```
// ENDSTOP SETTINGS:
// Sets direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1
```

Ilustración 124. Dirección de los finales de carrera al hacer *homing*.

D. DIMENSIONES MÁXIMAS DEL AREA DE IMPRESIÓN.

Se definen las posiciones máximas y mínimas del área de impresión disponible en la impresora.

```
// Travel limits after homing
#define X_MAX_POS 200
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MAX_POS 200
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MAX_POS 200
#define Z_MIN_POS 0
```

Ilustración 125. Dimensiones máximas del área de impresión.

E. TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS.

Estos valores definen la temperatura máxima hasta la que el extrusor será calentado, para prevenir daños por elevadas temperaturas que no sea posible aguantar por los componentes.

```
// When temperature exceeds max temp, your heater will be switched off.
// This feature exists to protect your hotend from overheating accidentally, but *NOT* from thermistor short/failure!
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 275
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150
```

Ilustración 126. Definición de las temperaturas máximas de trabajo.

Con la definición de una temperatura mínima se comprueba que los termistores funcionen correctamente.

```
// The minimal temperature defines the temperature below which the heater will not be enabled It is used
// to check that the wiring to the thermistor is not broken.
// Otherwise this would lead to the heater being powered on all the time.
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5
```

Ilustración 127. Definición de las temperaturas mínimas para la comprobación del correcto funcionamiento de los termistores.

F. MÍNIMA TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN.

Con estos valores se define la temperatura mínima a la que el motor del extrusor podrá funcionar para prevenir posibles fallos internos en el bloque del extrusor.

```
//this prevents dangerous Extruder moves, i.e. if the temperature is under the limit
//can be software-disabled for whatever purposes by
#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
//if PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE is on, you can still disable (uncomment) very long bits of extrusion separately.
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE

#define EXTRUDE_MINTEMP 170
#define EXTRUDE_MAXLENGTH (X_MAX_LENGTH+Y_MAX_LENGTH) //prevent extrusion of very large distances.
```

Ilustración 128. Definición de mínima temperatura de extrusión.

G. MOVIMIENTO DE LOS EJES POR PASO.

Esta variable es la más importante de todas, pues define el movimiento de los ejes con cada paso de vuelta del motor. Permite calibrar la impresora correctamente en sus movimientos.

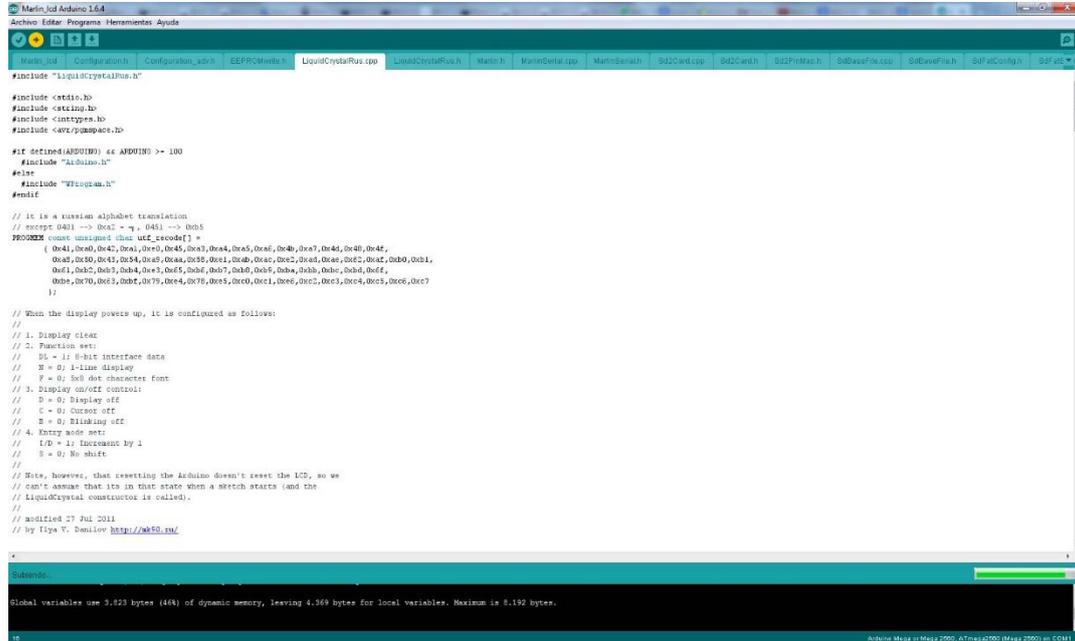
Para una correcta calibración, se ha de medir el desplazamiento de los ejes y si no es el correcto, realizar un cálculo entre el valor de la variable, la distancia que ha recorrido y la distancia teórica de movimiento para así conseguir el nuevo valor de la variable.

```
// default settings
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,4000,775} // default steps per unit for ultimaker
```

Ilustración 129. Valores de movimiento de los ejes por paso de motor.

CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE AUTÓNOMA CON IMPLEMENTACIÓN DE DOBLE EXTRUSOR Y BARRERA DE PROTECCIÓN FÍSICA.

Una vez terminados los cambios en el firmware, ha de programarse la placa con el firmware. Para ejecutar este paso, y teniendo la placa conectada por USB al ordenador, desde el entorno Arduino se ordena cargar el código en la placa.



```
#include "LiquidCrystalPlus.h"

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <ctype.h>
#include <avr/pgmspace.h>

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif

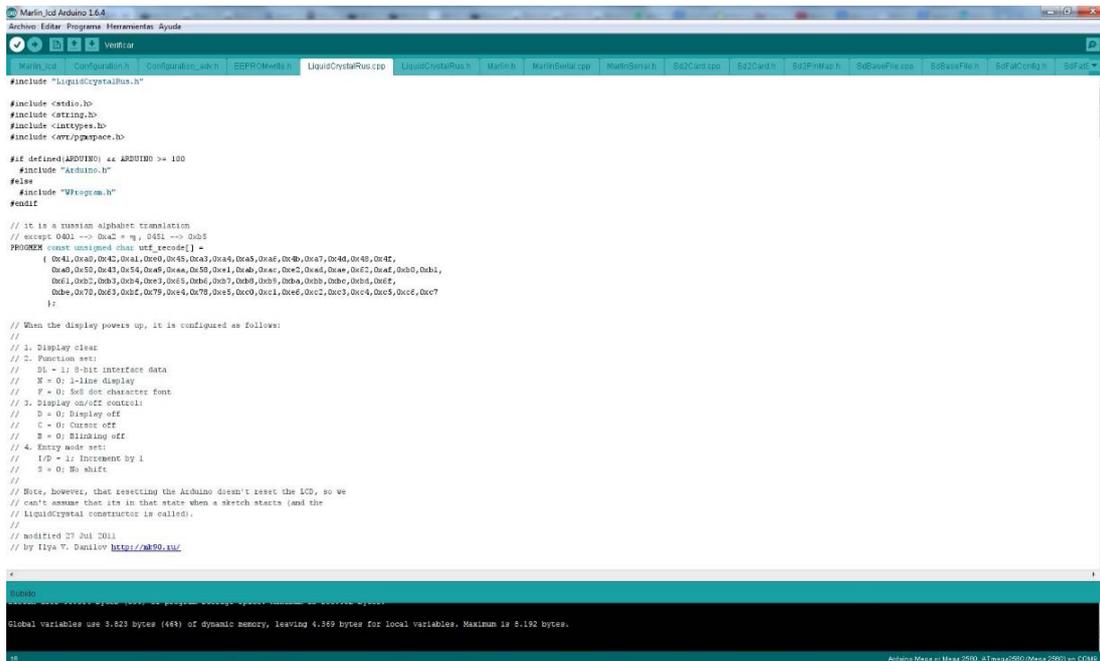
// It is a russian alphabet translation
// except 0x41 -> 0x42 = 'a', 0x411 -> 0x045
PROGRAM const unsigned char utf_recode[] =
{ 0x41,0x42,0x43,0x44,0x45,0x46,0x47,0x48,0x49,0x4A,0x4B,0x4C,0x4D,0x4E,0x4F,0x50,0x51,0x52,0x53,0x54,0x55,0x56,0x57,0x58,0x59,0x5A,0x5B,0x5C,0x5D,0x5E,0x5F,0x60,0x61,0x62,0x63,0x64,0x65,0x66,0x67,0x68,0x69,0x6A,0x6B,0x6C,0x6D,0x6E,0x6F,0x70,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A,0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89,0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96,0x97,0x98,0x99,0x9A,0x9B,0x9C,0x9D,0x9E,0x9F,0xA0,0xA1,0xA2,0xA3,0xA4,0xA5,0xA6,0xA7,0xA8,0xA9,0xAA,0xAB,0xAC,0xAD,0xAE,0xAF,0xB0,0xB1,0xB2,0xB3,0xB4,0xB5,0xB6,0xB7,0xB8,0xB9,0xBA,0xBB,0xBC,0xBD,0xBE,0xBF,0xC0,0xC1,0xC2,0xC3,0xC4,0xC5,0xC6,0xC7,0xC8,0xC9,0xCA,0xCB,0xCC,0xCD,0xCE,0xCF,0xD0,0xD1,0xD2,0xD3,0xD4,0xD5,0xD6,0xD7,0xD8,0xD9,0xDA,0xDB,0xDC,0xDD,0xDE,0xDF,0xE0,0xE1,0xE2,0xE3,0xE4,0xE5,0xE6,0xE7,0xE8,0xE9,0xEA,0xEB,0xEC,0xED,0xEE,0xEF,0xF0,0xF1,0xF2,0xF3,0xF4,0xF5,0xF6,0xF7,0xF8,0xF9,0xFA,0xFB,0xFC,0xFD,0xFE,0xFF };

// When the display powers up, it is configured as follows:
//
// 1. Display clear
// 2. Function set:
//   DL = 1: 8-bit interface data
//   N = 0: 1-line display
//   F = 0: 5x8 dot character font
// 3. Display on/off control:
//   D = 0: Display off
//   C = 0: Cursor off
//   B = 0: Blinking off
// 4. Entry mode set:
//   I/D = 1: Increment by 1
//   S = 0: No shift
//
// Note, however, that resetting the Arduino doesn't reset the LCD, so we
// can't assume that its in that state when a sketch starts (and the
// LiquidCrystal constructor is called).
//
// modified 27 Jul 2011
// by Ilya V. Danilov http://ni90.ru/
```

Global variables use 3,823 bytes (46%) of dynamic memory, leaving 4,369 bytes for local variables. Maximum is 8,192 bytes.

Ilustración 130. Firmware en proceso de carga en la electrónica desde Arduino.

Tras unos minutos de espera el firmware estará subido a la impresora y estará lista para ser utilizada mediante uno de los múltiples programas existentes para la impresión 3D.



```
#include "LiquidCrystalPlus.h"

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <ctype.h>
#include <avr/pgmspace.h>

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif

// It is a russian alphabet translation
// except 0x41 -> 0x42 = 'a', 0x411 -> 0x045
PROGRAM const unsigned char utf_recode[] =
{ 0x41,0x42,0x43,0x44,0x45,0x46,0x47,0x48,0x49,0x4A,0x4B,0x4C,0x4D,0x4E,0x4F,0x50,0x51,0x52,0x53,0x54,0x55,0x56,0x57,0x58,0x59,0x5A,0x5B,0x5C,0x5D,0x5E,0x5F,0x60,0x61,0x62,0x63,0x64,0x65,0x66,0x67,0x68,0x69,0x6A,0x6B,0x6C,0x6D,0x6E,0x6F,0x70,0x71,0x72,0x73,0x74,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A,0x7B,0x7C,0x7D,0x7E,0x7F,0x80,0x81,0x82,0x83,0x84,0x85,0x86,0x87,0x88,0x89,0x8A,0x8B,0x8C,0x8D,0x8E,0x8F,0x90,0x91,0x92,0x93,0x94,0x95,0x96,0x97,0x98,0x99,0x9A,0x9B,0x9C,0x9D,0x9E,0x9F,0xA0,0xA1,0xA2,0xA3,0xA4,0xA5,0xA6,0xA7,0xA8,0xA9,0xAA,0xAB,0xAC,0xAD,0xAE,0xAF,0xB0,0xB1,0xB2,0xB3,0xB4,0xB5,0xB6,0xB7,0xB8,0xB9,0xBA,0xBB,0xBC,0xBD,0xBE,0xBF,0xC0,0xC1,0xC2,0xC3,0xC4,0xC5,0xC6,0xC7,0xC8,0xC9,0xCA,0xCB,0xCC,0xCD,0xCE,0xCF,0xD0,0xD1,0xD2,0xD3,0xD4,0xD5,0xD6,0xD7,0xD8,0xD9,0xDA,0xDB,0xDC,0xDD,0xDE,0xDF,0xE0,0xE1,0xE2,0xE3,0xE4,0xE5,0xE6,0xE7,0xE8,0xE9,0xEA,0xEB,0xEC,0xED,0xEE,0xEF,0xF0,0xF1,0xF2,0xF3,0xF4,0xF5,0xF6,0xF7,0xF8,0xF9,0xFA,0xFB,0xFC,0xFD,0xFE,0xFF };

// When the display powers up, it is configured as follows:
//
// 1. Display clear
// 2. Function set:
//   DL = 1: 8-bit interface data
//   N = 0: 1-line display
//   F = 0: 5x8 dot character font
// 3. Display on/off control:
//   D = 0: Display off
//   C = 0: Cursor off
//   B = 0: Blinking off
// 4. Entry mode set:
//   I/D = 1: Increment by 1
//   S = 0: No shift
//
// Note, however, that resetting the Arduino doesn't reset the LCD, so we
// can't assume that its in that state when a sketch starts (and the
// LiquidCrystal constructor is called).
//
// modified 27 Jul 2011
// by Ilya V. Danilov http://ni90.ru/
```

Global variables use 3,823 bytes (46%) of dynamic memory, leaving 4,369 bytes for local variables. Maximum is 8,192 bytes.

Ilustración 131. Finalización de carga de firmware.

4.4. PROBLEMAS Y FALLOS DURANTE EL MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO.

Tanto durante el montaje de la impresora como durante los primeros funcionamientos, han existido diversos problemas y fallos que se han conseguido arreglar satisfactoriamente. A continuación se detallan todos ellos, con la solución adoptada.

A. DURANTE EL MONTAJE.

a. Rotura de piezas de plástico durante el ensamblaje del extrusor.

Durante el montaje de las piezas de plástico del extrusor se observó que las piezas de plástico que conforman el doble extrusor no poseían la calidad suficiente para el correcto funcionamiento posterior de la impresora, al mismo tiempo que en el *Greg's Wade*, tanto los agujeros para el anclaje del extrusor como los de anclaje al *X-carriage* no se encontraban bien realizados, por lo que la solución adoptada fue realizar una pieza nueva.

Las ruedas dentadas, tanto la *Big Gear* como la *Small Gear*, fueron también sustituidas debido a que los dientes de transmisión presentaban ligeras desviaciones que impedirían su correcto funcionamiento.

b. Fallo de la electrónica.

Al realizar la conexión de la electrónica por primera vez a la red eléctrica, esta originó un cortocircuito en la que la *shield Ramps* se estropeó, quedando inservible. La causa posible del cortocircuito fue un mal ensamblaje de la misma, es decir, fallo de fábrica, pues todas las conexiones estaban correctamente realizadas. La solución fue el cambio de la placa *Ramps* por otra fabricada en España con mejores y más fiables componentes.

B. DURANTE EL FUNCIONAMIENTO.

a. La impresora no hace *homing*.

Homing es un término que se refiere a la realización del movimiento de los ejes hacia su origen. En un primer momento, después de realizar la carga del firmware, la impresora no respondía al traslado hasta el origen en ninguno de sus ejes. En un primer momento se pensó que podía ser algún fallo físico, pero después de mucha lectura, se encontró la solución: la lógica de los finales de carrera estaba cambiada en el firmware, es decir, la impresora reconocía que los ejes estaban siempre en el origen pues los *endstop* tenían la configuración “siempre cerrado” cuando la tienen que tener “siempre abierto hasta que el

actuador haga el cierre con la pulsación de dicho final de carrera. Se cambió la lógica de los *endstop* y la impresora empezó a funcionar correctamente.

b. Atasco de material dentro del bloque extrusor.

El atasco de material dentro del bloque extrusor es el fallo más común que se puede encontrar dentro de este mundo, ya sea producido por una retracción excesiva, por un calentamiento del extrusor insuficiente o por el avance del material sin que llegue a entrar en el extrusor.

La causa del atasco por la que hubo que desmontar el extrusor fue debida a esta última, pues el *hobbed bolt* no guio correctamente el material hasta el tubo de PFTE que conduce el filamento hasta el extrusor, acumulándolo dentro de la pieza imprimible. La solución fue el desmontaje del total del extrusor y la colocación de un tubo de PFTE más largo, para que no existiese la posibilidad de guiado del filamento fuera del tubo, llegando correctamente hasta el *hotend*.

c. Rotura de un termistor.

En uno de los atascos, al desmontar el extrusor, el termistor que controla la temperatura se partió por uno de sus terminales, resultando imposible su arreglo ya que la rotura se produjo al lado del encapsulado que une los terminales y toma la temperatura, por lo que la solución fue adquirir uno igual y proceder a su cambio.

d. Lectura errónea de la temperatura del extrusor.

Al realizar el cambio del termistor, se observó que marcaba una temperatura ambiente de 763°C, a todos los efectos errónea, por lo que se llegó a la conclusión de que el termistor estaba estropeado, con la solución de efectuar el cambio del mismo por otro que sí leía unos resultados correctos.

4.5. MEJORAS DE LA IMPRESORA.

4.5.1. DOBLE EXTRUSOR.

La impresión con dos extrusores simultáneamente, ya sea con dos materiales distintos o dos colores, es, a criterio del autor del presente Trabajo Fin de Grado, el mayor avance dentro del mundo de la impresión 3D, pues la posibilidad de la combinación dentro de una impresión dos materiales, abre un mundo de posibilidades.

La doble extrusión permite realizar modelos impensables con un solo extrusor, pues, por ejemplo, se pueden realizar piezas con grandes voladizos, usando un segundo material como apoyo para dichos voladizos²⁶. Este material puede ser alguno de los existentes en el mercado que son de fácil disolución en agua, acetona, etc.

También es factible la utilización de un segundo material que se pueda disolver fácilmente con algún otro para la creación de agujeros internos que necesiten de una precisión muy grande, pues así el usuario se asegura el que no exista ninguna interferencia de deposición de material accidental.

La idea de la implementación de un doble extrusor surge a raíz de la idea de la mejora de una máquina ya de por sí novedosa. Esta mejora está muy poco extendida dentro del mundo de la impresión 3D, pues es complicada llevarla a cabo, a la vez que costosa, pues en el siguiente apartado se podrá comprobar que es necesario duplicar los elementos que componen el bloque extrusor, con el consiguiente coste económico, además de la realización de múltiples cambios en el firmware, y si no se es un usuario avanzado, no es sencilla su implementación.

Uno de los puntos más críticos de la doble extrusión es la pérdida de área de impresión, pues al ser de un mayor tamaño el bloque extrusor, es físicamente imposible mantener la misma área.

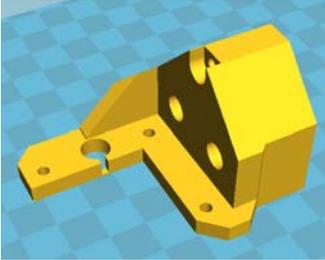
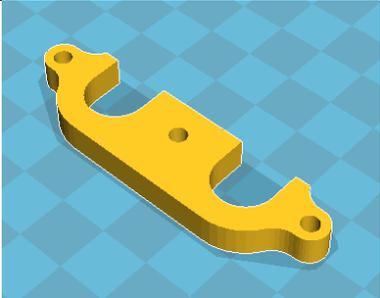
Estudiando a fondo esta última problemática, se ha conseguido minimizar este efecto, sin apenas pérdida de área de impresión, pues se ha rediseñado un bloque extrusor con una distancia entre boquillas de salida de apenas 33 milímetros, en el eje X, estando totalmente alineadas en el eje Y. La pérdida real de área de impresión no existe, pero en esta situación, el segundo extrusor no puede imprimir en la distancia igual a la separación con el primero desde el origen, y lo mismo le pasa al primer extrusor, por la limitación

²⁶ Voladizo: Elemento que sobresale horizontal o inclinadamente de la vertical de su apoyo.

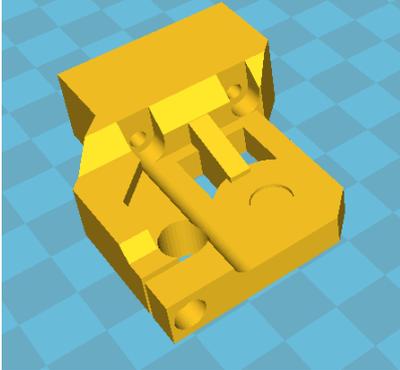
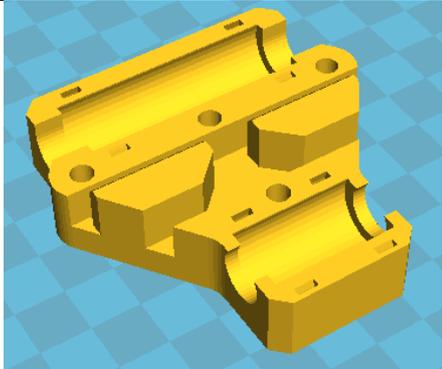
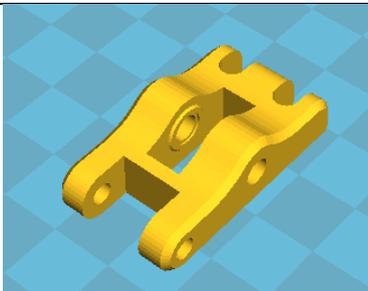
física no puede imprimir en la parte final del eje X. La altura de impresión se sigue conservando.

Para la realización de la mejora a doble extrusor, se ha seleccionado un conjunto existente en la web *Thingiverse*²⁷. Se muestra el conjunto en la siguiente tabla:

Tabla 9. Partes del doble extrusor.

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<i>Bottom right.</i> Pieza inferior para acoplar el motor derecho y las varillas del eje Z.	1	
<i>Bottom left.</i> Pieza inferior para acoplar el motor izquierdo y las varillas del eje Z.	1	
<i>Clamp E3D V6.</i> Sirve para acople de los dos extrusores al cuerpo del bloque extrusor.	1	
<i>Dual extruder.</i> Cuerpo del extrusor.	1	

²⁷ <http://www.thingiverse.com/thing:780401>

PIEZA	CANTIDAD	IMAGEN
<p>Top left. Pieza superior para el acople de las varillas del eje Z en la parte izquierda de la impresora.</p>	1	
<p>Top right. Pieza superior para el acople de las varillas del eje Z en la parte derecha de la impresora.</p>	1	
<p>X carriage GT2 dual extruder. Pieza para realizar el acople a los rodamientos lineales insertados en las varillas del eje X</p>	1	
<p>Idler arm. Pieza, que con la ayuda de un rodamiento en su interior, ayuda al motor del extrusor a conducir en filamento hasta la parte calefactada para la realización de la impresión.</p>	2	

Dado que este conjunto de piezas es para la mejora de un impresora Prusa I3, anterior versión de impresora que la de este Trabajo Fin de Grado, se ha optado por hacer las modificaciones necesarias para conseguir el mismo resultado que con este conjunto de piezas.

En la impresora objeto de este TFG, al estar realizada su estructura con acero, no cabe la posibilidad de realizar un cambio de situación de varillaje y, por tanto del eje Z, por lo que se optó por desechar las piezas *bottom right*, *bottom left*, *top left* y *top right*.

Al realizar esta modificación, el cuerpo de los motores chocaba con la estructura soporte de la impresora. Entonces la única solución era diseñar una pieza para que, situada entre el *X carriage dual extruder* y el *dual extruder*, pudiera evitar el choque con el marco de la estructura, y al mismo tiempo sirviera de soporte para aguantar el peso de los motores. La pieza que se diseñó fue la siguiente:

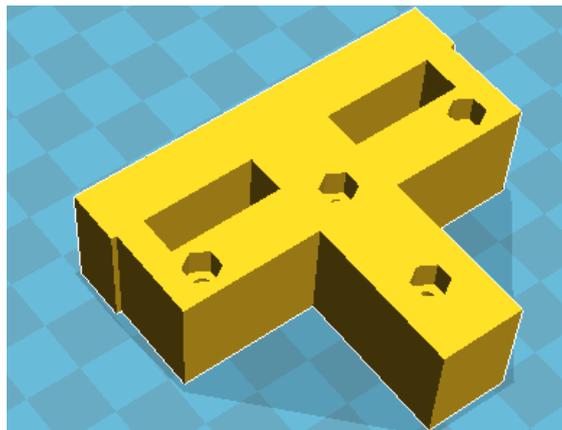


Ilustración 132. Pieza para eliminación de problema de choque de motores con marco de acero.

Unido a ambas piezas, cada una por una cara, se consiguió evitar la problemática descrita.

La tornillería utilizada para toda la modificación ha sido de métrica 3, tanto tornillos (de longitudes 10, 12, 20, 25 y 30 milímetros), como tuercas (autoblocantes y normales) y arandelas.

Para el arrastre del filamento, se ha incorporado a cada uno motor una rueda dentada de suficiente diámetro, para que con ayuda del rodamiento insertado en los *idler arm*, pueda conducir el filamento hasta el extrusor.

Para evitar la interferencia del cableado con el movimiento del bloque, se han recogido todos los cables dentro de una malla recoge cables.

A continuación se muestra el conjunto del doble extrusor completamente ensamblado y listo para su montaje:

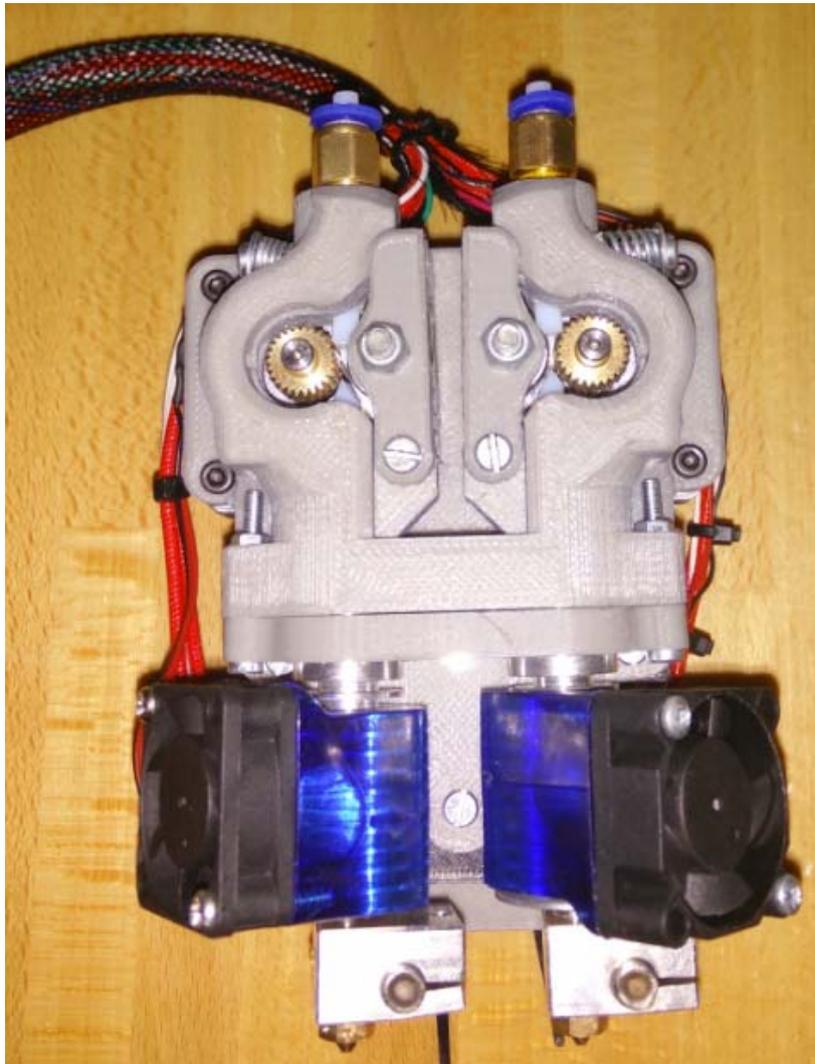


Ilustración 133Bloque de doble extrusor montado.

Es necesaria la incorporación de un segundo motor para poder arrastrar el filamento hasta el *hotend*, así como la incorporación de un nuevo termistor que medirá la temperatura del segundo extrusor y además el propio extrusor, que se conectará a otra salida distinta de la del primero, por lo que son totalmente independientes.

Una vez terminada la parte mecánica de la mejora, se procederá a realizar los cambios en la parte electrónica.

Las conexiones electrónicas necesarias para la implementación del segundo extrusor se muestran en la tabla siguiente:

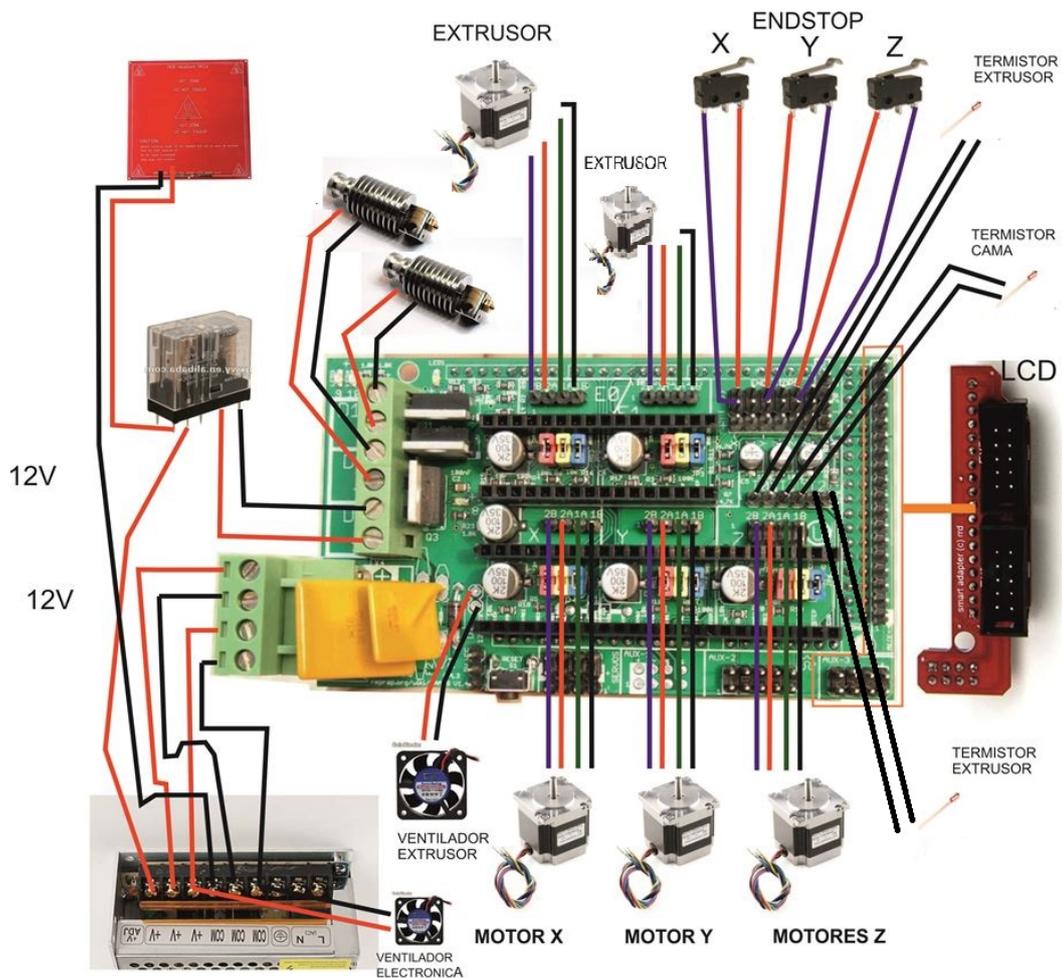


Ilustración 134. Conexiones en la electrónica de la impresora para el doble extrusor.

Terminado el conexionado de la parte electrónica, queda por último realizar la correcta configuración del doble extrusor en el firmware. Como se hizo para la configuración del firmware de la impresora con un extrusor, es necesario realizar los cambios en el entorno Arduino, con el archivo base que se posee.

En la pestaña de Arduino *configuration.h* se definirá el tipo de placa que ahora se posee (dos extrusores y una cama caliente, por lo que corresponde el número 34).

```
// RÁMPAS 1.3 = 34 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)
// Gen6 = 5
// Gen6 deluxe = 51
// Sanguinololu 1.2 and above = 62
// Melzi = 63
// Ultimaker = 7
// Teensylu = 8
// Gen3+ =9
// Megatronics =70

#ifndef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD 34
#endif
```

Ilustración 135. Cambio de placa en Marlin para doble extrusor.

En la pestaña *configuration_adv.h* han de realizarse el cambio del número de extrusores de uno a dos:

```
//=====
//=====Mechanical Settings=====
//=====

// This defines the number of extruders
#define EXTRUDERS 2
```

Ilustración 136. Definición de dos extrusores en *configuration_adv.h*

En el Software *Repetier Host* se incluirán los siguientes cambios:

- En *Ajustes*, pestaña *Extruder*, se cambiará el número de extrusores a 2, cambiando el diámetro de la boquilla de salida si fuera necesario, y el valor *Offset X* del segundo extrusor para indicar la distancia a la que se encuentran las boquillas de salida en milímetros.

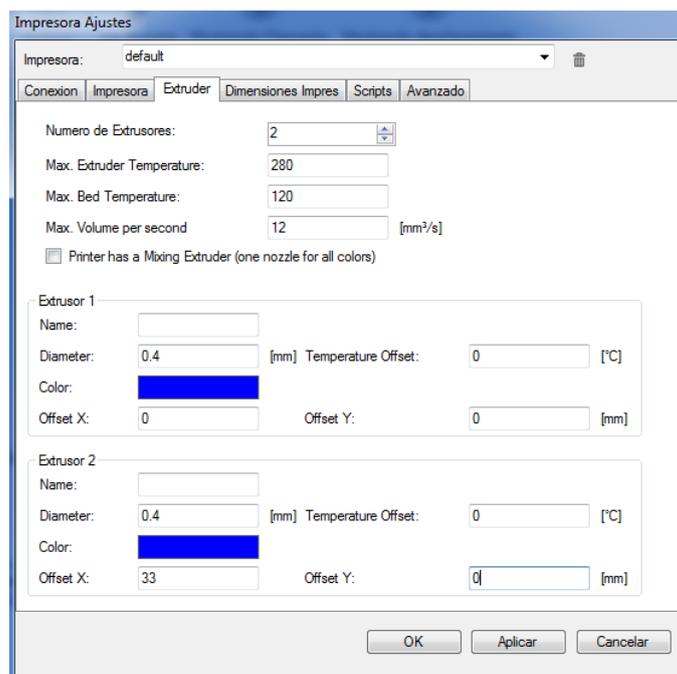


Ilustración 137. Configuración doble extrusor en *Repetier Host*.

- En la pantalla principal se puede apreciar cómo ha aparecido un nuevo control de temperatura llamado extrusor 2 y un menú desplegable para el control del motor de los extrusores.

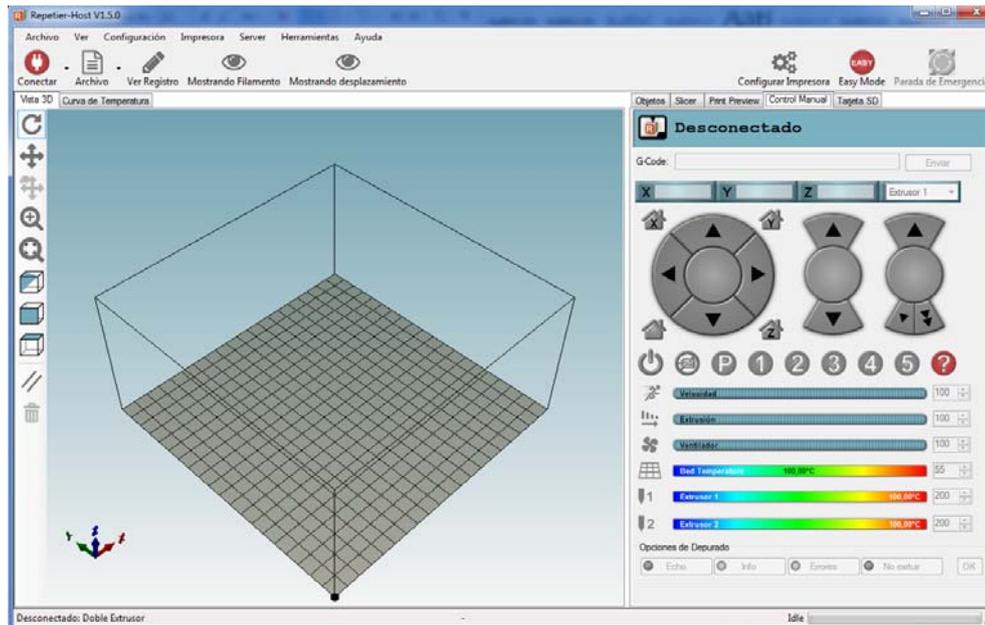


Ilustración 138. Pantalla principal *Repetier Host* con doble extrusor.

A partir de aquí, ya se puede utilizar la impresión con el doble extrusor, comprobando antes la correcta relación de pasos de los motores de los extrusores.

Por otro lado, en el software Cura se tendrán que modificar los siguientes parámetros:

- En el menú *Machine settings* se sustituirá el valor del número de extrusores (*Extruder count*) por 2, y se indicará el desfase en los ejes X e Y del segundo extrusor con respecto al primero.

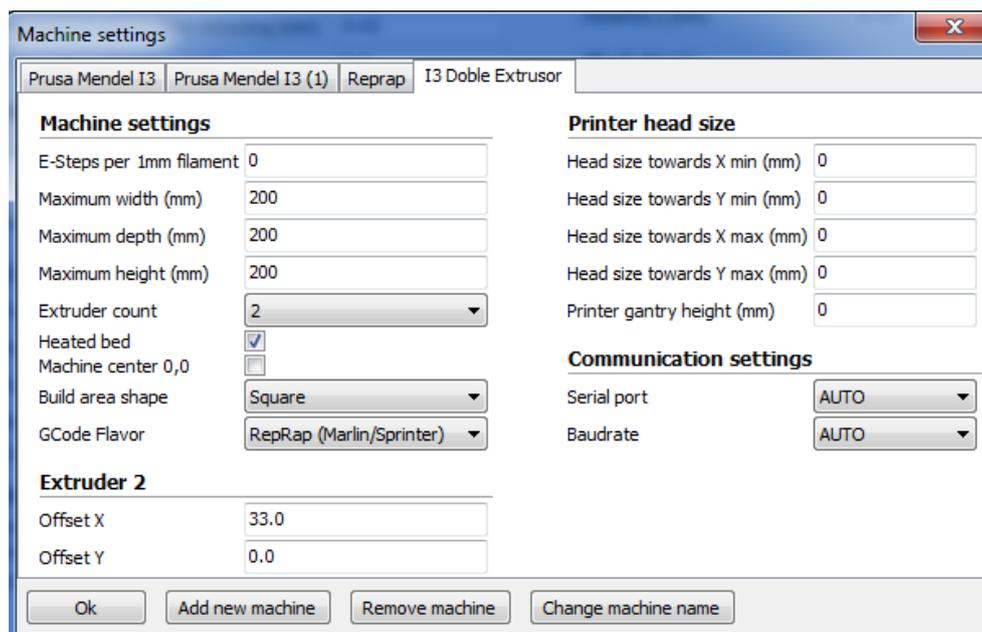


Ilustración 139. Cambios en *Machine settings* en Cura.

Por último, es necesario definir el diámetro de los filamentos así como la temperatura de extrusión de cada uno. Esto se puede realizar en la ventana principal del programa, en el menú *Basic*.

The screenshot shows the 'Basic' settings menu in Cura, which is divided into several sections:

- Quality:** Layer height (mm) is 0.1; Shell thickness (mm) is 0.8; Enable retraction is checked.
- Fill:** Bottom/Top thickness (mm) is 0.6; Fill Density (%) is 20.
- Speed and Temperature:** Print speed (mm/s) is 50; Printing temperature (C) is 210; 2nd nozzle temperature (C) is 230; Bed temperature (C) is 70.
- Support:** Support type is None; Platform adhesion type is None; Support dual extrusion is Both.
- Dual extrusion:** Wipe&prime tower and Ooze shield are both unchecked.
- Filament:** Diameter (mm) is 1.75; Diameter2 (mm) is 1.75; Flow (%) is 100.0.

Ilustración 140. Cambios en menú *Basic* en Cura.

Realizados estos cambios, ya se podrán realizar impresiones en Cura.

4.5.2. BARRERA DE PROTECCIÓN FÍSICA PARA LA IMPRESORA.

El segundo de los objetivos principales de mejora de la impresora 3D objeto de este Trabajo Fin de grado ha sido la realización de una barrera de protección física puesto que las ventajas de esta son muchas:

- Protección física, para salvaguardarla de posibles golpes accidentales.
- Protección contra ambientes pulvígenos, ya que los elementos mecánicos sufren con la deposición de polvo sobre ellos, llegando a producir malos funcionamientos y como consecuencia roturas.
- Mantenimiento de una temperatura estable en el recinto.
- Eliminación de las corrientes de aire, ya que estas pueden llegar a estropear una impresión por la mala adherencia entre capas al enfriar a destiempo las deposiciones de material.

Uno de los efectos más temidos en la impresión 3D y que hace que los modelos no sean todo lo óptimos que se espera es el efecto conocido como *warping*

El *warping* es la palabra como se conoce al levantamiento de las esquinas del modelo en la base de impresión. Este efecto sucede gracias al gradiente térmico existente entre la boquilla del *nozzle* y la base sobre la que se deposita el material, pues éste, con el cambio de temperatura, sufre una contracción. El material depositado en la parte central, al retraerse, tira de las esquinas, provocando tensiones internas que acaban derivando en el efecto descrito.

La inclusión de la impresora dentro de la caja hace que el efecto del *warping* desaparezca por la mezcla de todas las ventajas antes señaladas.

Existe una desventaja muy grande, y es el aumento de la temperatura que se produce dentro de la caja, pues al existir elementos a altas temperaturas (el extrusor siempre se encuentra en el rango entre 180°C y 250°C y la cama caliente en torno a los 100°C), dicha temperatura interior puede estar en el entorno de los 50°C-60°C, lo que es bastante perjudicial para la electrónica.

La problemática del aumento de temperatura, se ha solucionado mediante la renovación del aire interior realizada con dos ventiladores de 12 centímetros. Estarán situados en la parte posterior de la impresora. El situado en la parte inferior será el encargado de meter aire al interior de la caja, y aprovechando dicho flujo de aire para el

enfriamiento de la electrónica, mientras que el superior se encargará de sacar el aire caliente acumulado en la parte alta de la caja. Estarán situados de forma estratégica, para que en ningún momento la corriente de aire afecte a la impresión.

Las conexiones con el exterior se realizarán mediante un orificio en la parte inferior trasera. Estas conexiones serán a la red eléctrica y a un ordenador, mediante un cable USB. La fuente de alimentación será también ubicada en la parte posterior de la caja.

Para la construcción de la caja se han empleado varios materiales:

- Tablero de madera para la base y la parte trasera: se ha seleccionado este material para la base por la resistencia del mismo empleándola como soporte. La parte trasera se realizó también con madera por la facilidad de mecanización, pues era necesario realizarle agujeros para los ventiladores, para el paso del cableado del exterior y para el paso del material de extrusión.
- Perfiles angulares de aluminio para el perímetro de la base y la parte trasera: Se eligió el aluminio por su ligereza y su facilidad de mecanizado. Se ha empleado el material para la unión de ambos tableros. Los angulares han sido unidos a la madera mediante tornillos, otorgándole rigidez al conjunto.
- Metacrilato para el resto de la caja: Se ha escogido el metacrilato, porque al ser un material transparente, deja ver el interior de la caja. Se ha realizado un conjunto de los laterales, el frontal y la parte superior, que no va anclada a la otra parte de la estructura para poder acceder perfectamente a la impresora. La parte superior se ha mecanizado para que sin tener que retirar la cubierta, pueda ser manejada la pantalla LCD. Únicamente se ha de retirar el metacrilato para poder acceder a los modelos impresos. Dado que es un material muy frágil, se desechó la idea de utilizarlo como base y como parte trasera, pues en el mecanizado existen altas probabilidades de dañar el material.

A continuación se incluye un modelado de dicha estructura:

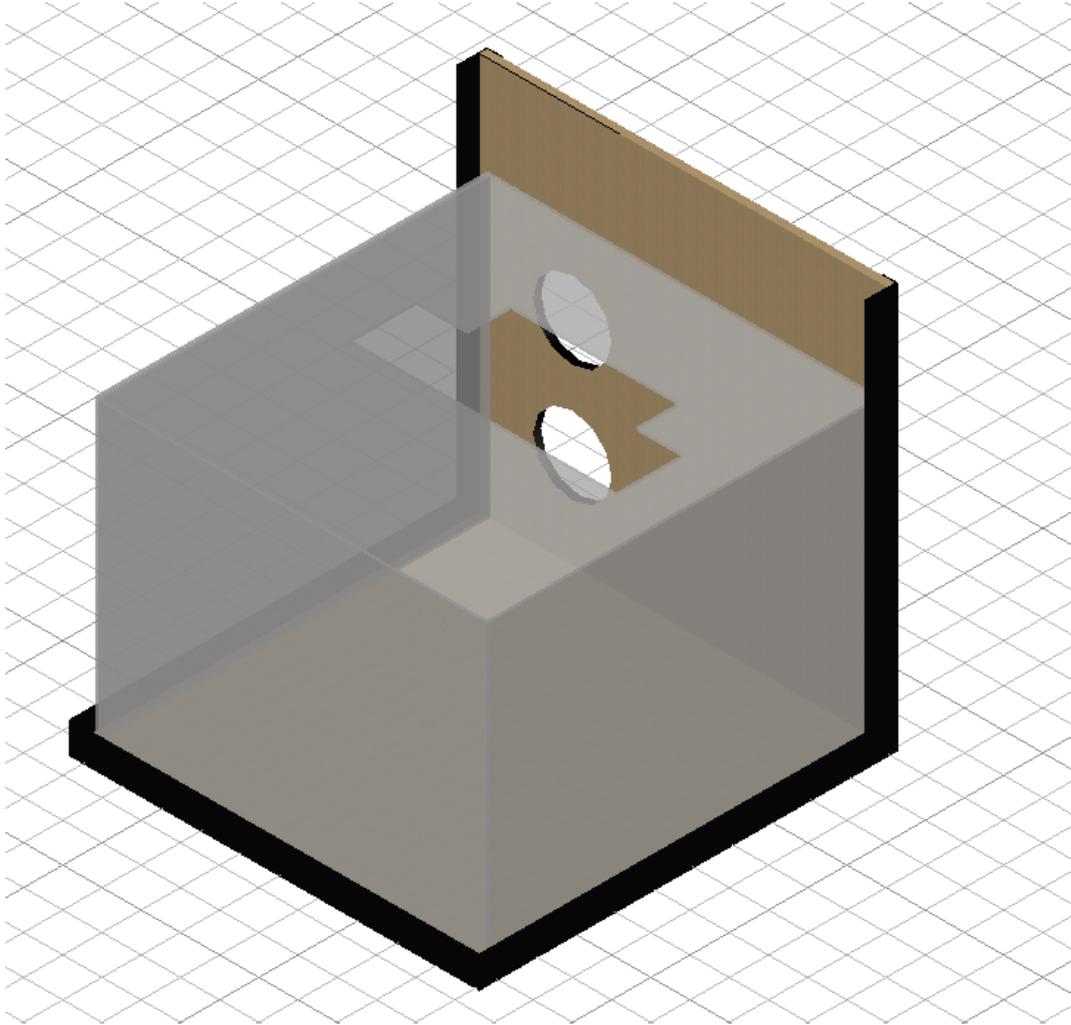


Ilustración 141. Modelado barrera de protección de la impresora.

Para la regulación de caudal de aire de los ventiladores se ha añadido un circuito diseñado con un microchip LM317, que es un regulador de potencia, pudiendo en cualquier momento modificar dicho caudal para un mejor control de la temperatura interior.



Ilustración 142. Circuito integrado LM317.

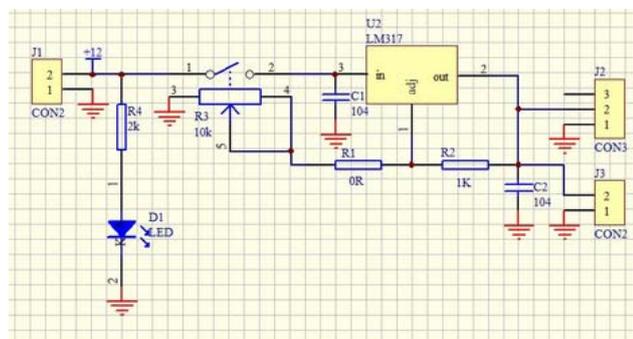


Ilustración 143. Esquema circuito integrado LM317 para regulación de caudal de ventiladores.

A continuación se muestra una imagen de la impresora dentro de la barrera de protección física:

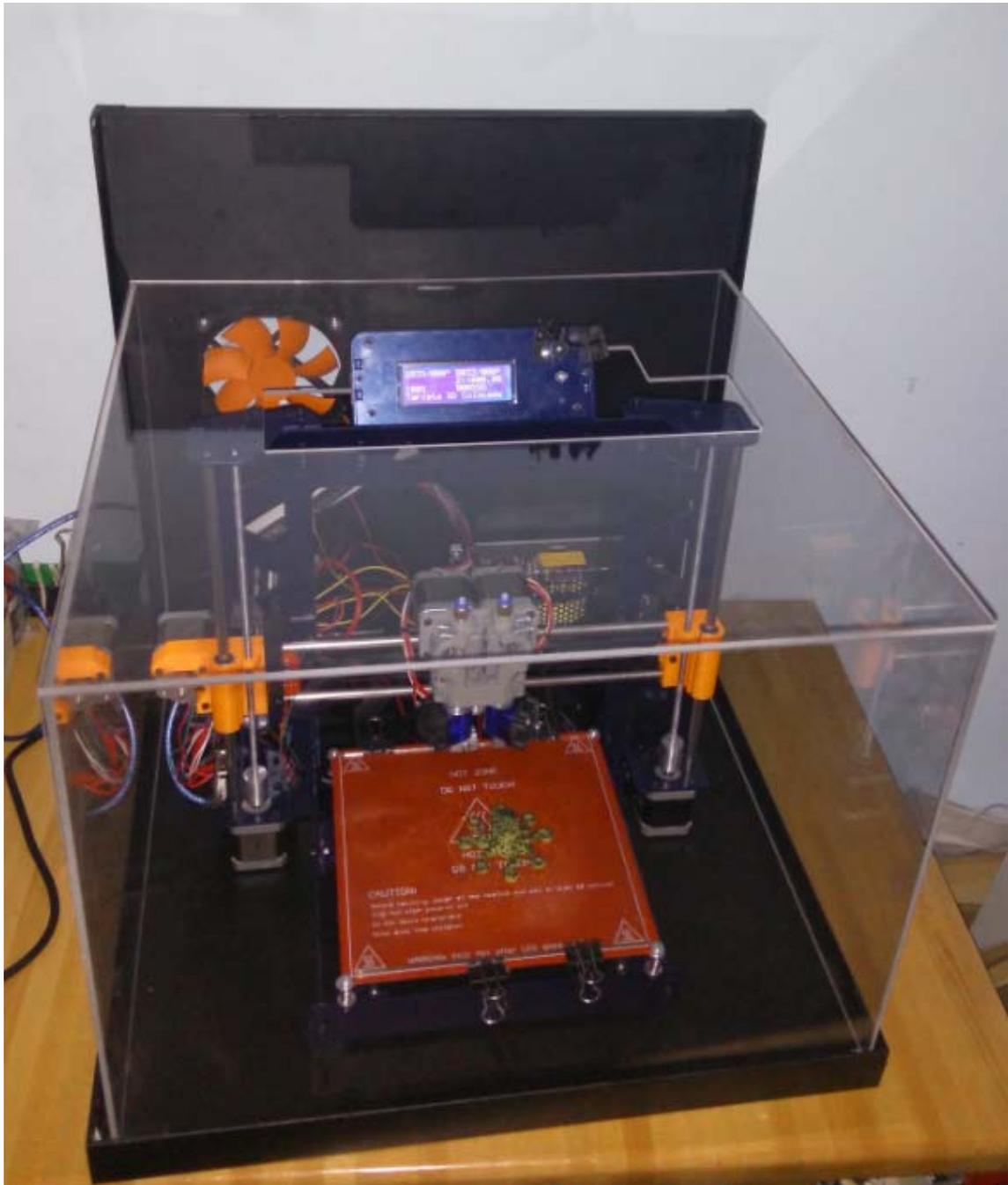


Ilustración 144. Impresora dentro de la barrera de protección física.

5. RESULTADOS.

5.1. INTRODUCCIÓN.

La calidad de los modelos realizados con una impresora 3D están directamente relacionados con la calibración de la misma, aunque también tienen parte influyente los componentes usados en su fabricación, así como la precisión del montaje, pues no sirve que solo se haya cuidado uno o dos de los puntos descritos, puesto que todos ellos, en mayor o menor medida están directamente relacionados con el resultado final.

En la fabricación, se intenta abaratar lo posible, pero se ha de comentar que, por ejemplo, un extrusor de una casa reconocida dará mucha mayor calidad que cualquier réplica que se pueda encontrar en el mercado.

La precisión del montaje ha de ser milimétrica, cuidando todos los detalles, pues una tuerca mal apretada, una varilla desalineada, puede hacer que los elementos no encajen correctamente o que los desplazamientos no sean correctos.

La calibración de la impresora solo requiere tiempo, tiempo y más tiempo. Se han de probar multitud de valores, adaptándolos a la impresora, pues, al no ser una ciencia exacta, dichos valores difieren de una máquina a otra.

Los fabricantes de impresoras 3D comerciales basan su publicidad en el área de impresión de sus productos, la no dependencia de un ordenador para poder funcionar, la inclusión de la misma en una caja con colores llamativos, la posibilidad de control desde un panel táctil, etc. Que en definitiva son factores que en un usuario medio llaman la atención. El mayor inconveniente de las impresoras comerciales es su elevado coste respecto a la fabricación de una impresora adquiriendo los componentes por separado y realizando el montaje uno mismo.

En el apartado de comparación de una impresora 3D comercial con la realizada en este Trabajo Fin de Grado se expondrán las características de ambas y se someterán a una exhaustiva comparación.

Para la evaluación de los resultados obtenidos en la impresora 3d base de este TFG, se ha realizado en un principio una figura disponible en la web *Thingiverse*, la cual es un cubo de calibración de dimensiones 20 x 20 x 20 milímetros, que después de realizar la impresión, se medirá con un calibre o pie de rey digital para comprobar cuál es la desviación de la pieza en cada uno de sus ejes.

Posteriormente, se realizarán unas pruebas de impresión cualitativas, aparecidas en la revista Make, en su volumen 42 (Barnatt, 2014), que evalúa distintos aspectos de la calidad de los modelos impresos. Cada uno de estos test se centra exclusivamente en un aspecto de evaluación, para poder encontrar algún error de calibración o incluso, llevar al límite del fallo la impresora.

5.2. PRUEBAS DE IMPRESIÓN EFECTUADAS CON UN EXTRUSOR.

5.2.1. CUBO DE CALIBRACIÓN.

Para la correcta calibración de la impresora, existe un modelo de un cubo de medidas 20 x 20 x 20 milímetros en la web *Thingiverse*²⁸, que es el que se va a utilizar para la realización de este test.

El objetivo que se persigue con la impresión de esta pieza es el de comprobar si la impresora realiza los modelos fielmente al modelo teórico, sin desviaciones de medida en ninguno de los ejes, y si el resultado es óptimo, querrá decir que el *driver* del motor está bien configurado, pues suministra la suficiente energía eléctrica al motor, ni el motor pierde pasos y que las correas de transmisión de movimiento están correctamente colocadas y tensadas.

Una vez impreso el modelo, se tomarán mediciones de longitud de las caras del cubo mediante un calibre o pie de rey digital. Los resultados se exponen a continuación en las siguientes ilustraciones y se resumen en una tabla.

El material utilizado para la impresión es PLA, a una temperatura de extrusión de 210°C, a una velocidad de avance de 40 mm/s y con una altura de capa de 0.2 mm.



Ilustración 145. Resultado test cubo de calibración eje X.

²⁸ <http://www.thingiverse.com>



Ilustración 146. Resultado test cubo de calibración eje Y.

Ilustración 147. Resultado test cubo de calibración eje Z.

Tabla 10. Medición del cubo de calibración con un extrusor.

EJE	MEDIDA TEÓRICA (mm.)	MEDIDA REAL (mm.)	DIFERENCIA (mm.)
EJE X	20.00	20.01	+0.01
EJE Y	20.00	19.99	-0.01
EJE Z	20.00	20.00	0.00

Como puede apreciarse en la tabla anterior, las desviaciones en los ejes X e Y son muy pequeñas, del orden de 0.01 milímetros en 20.00 milímetros, lo que representa un error del 0.05%, totalmente aceptable dentro de los límites de la impresión por deposición fundente de material.

Con estos valores, se puede considerar que la impresora está correctamente calibrada.

5.2.2. PRUEBAS DE EVALUACIÓN CUALITATIVAS DE LA IMPRESIÓN.

La revista Make²⁹, publicación especializada en impresión 3D, publicó en su volumen 42, una guía de impresión 3D en la que existe un artículo para comprobar la calidad de las impresiones realizadas. Estos test darán una idea de la correcta calibración y los parámetros óptimos para la impresión de todo tipo de modelos.

Cada modelo del test ha sido pensado para probar un aspecto de la calidad de impresión. Los test son lo más exhaustivos posible para determinar la calidad de impresión, pero también se han tenido en cuenta la funcionalidad y el rendimiento.

Cabe destacar que cada modelo está pensado para el menor consumo posible de material y el mínimo tiempo de impresión.

Además, algunas de estas pruebas, como las *positive fine feature* y *Overhang*, están pensadas para llevar a la impresora al fallo (tales como atasco del extrusor o la caída del material durante la impresión). Las pruebas pensadas para el fallo generan mayor información que otro tipo de test, e incluso se puede llegar a realizar un protocolo de mejora de impresión.

Los test se han realizado con PLA como material, con una altura de capa de 0.2 milímetros, relleno de un 15% y una velocidad de impresión de 40 mm/s.

5.2.2.1. PRECISIÓN DIMENSIONAL.

Con este test se persigue la comprobación de la precisión de la impresión en los ejes X e Y mediante la realización de varios cilindros superpuestos concéntricos. Para la comprobación de la correcta impresión, se han de tomar las mediciones de los diámetros de todos los cilindros. En caso de una buena impresión, las mediciones en ambos ejes han de coincidir. En caso contrario, se apreciarán los cilindros con forma de óvalo. Si esta prueba falla, el fallo estará en la insuficiente tensión en las correas.

El criterio de calificación de esta prueba es:

- 1 punto: La media de la desviación de las medidas en X e Y es mayor de 0.4 milímetros.
- 2 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.4 – 0.3 milímetros.

²⁹ <http://www.makezine.com>

- 3 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.3 – 0.2 milímetros.
- 4 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.2 – 0.1 milímetros.
- 5 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y es menor a 0.1 milímetros.



Ilustración 148. *Dimensional accuracy test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 149. *Dimensional accuracy test*.

La puntuación obtenida en este test es de 5 puntos.

5.2.2.2. PRUEBA DE PROYECCIÓN.

El objetivo de este test es la evaluación de las impresiones en ángulo de 30, 45, 60 y 70 grados sin apoyo inferior. Se pretende observar si existen perímetros caídos, falta de relleno en algún punto o extrusiones tambaleantes.

El criterio de calificación seguido en esta prueba es:

- 1 punto: La impresión falla en todos los ángulos.
- 2 puntos: La impresora realiza correctamente la geometría pero existe caída de relleno en los ángulos de 60 y 70 grados.
- 3 puntos: La pieza solo tiene bucles caídos en la parte a 70 grados.
- 4 puntos: La pieza no tiene caídas en los perímetros y la superficie de 60 y 70 grados es solo ligeramente diferente a la de 30 y 45 grados

- 5 puntos: Existe una pequeña diferencia en la estructura de las cuatro pendientes.

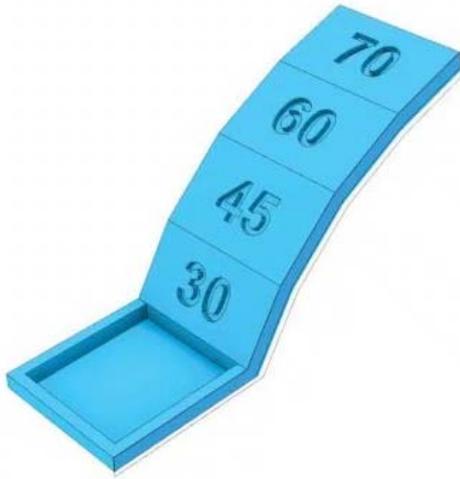


Ilustración 150. *Overhang test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 151. *Overhang test*.

La calificación obtenida en este test es de 5 puntos.

5.2.2.3. PRUEBA DE PUENTE.

Esta prueba mide la capacidad de la impresora para la realización de puentes sin que se produzca el efecto catenaria al realizar la unión de los dos extremos del mismo. La figura a imprimir consiste en 5 puentes de longitud comprendida entre 1 y 5 cm. a distinta altura cada uno de ellos.

La calificación será la siguiente:

- 1 punto: Cualquier puente tiene relleno caído.
- 2 puntos: Solo los puentes de mayor longitud tienen relleno caído.
- 3 puntos: Ningún puente tiene relleno caído.
- 4 puntos: Los dos puentes más pequeños no tienen perímetros caídos.
- 5 puntos: Todos los puentes se realizaron sin caídas en los perímetros (2 milímetros de caída es considerado aceptable).

Al realizar la prueba, se puede apreciar en la siguiente imagen que la impresión fue desastrosa, pues ningún puente fue completado exitosamente y uno de ellos, concretamente el de mayor longitud, no tiene ninguna conexión entre pilares, por lo que la puntuación de esta prueba inicialmente fue 1 punto.



Ilustración 152. *Bridging test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 153. *Bridging test*.

La posible causa de esta impresión fallida ha sido la lenta solidificación del plástico, y, al no enfriarse lo suficientemente rápido, no se ha adherido a la capa anterior, por lo que la boquilla del extrusor ha arrastrado el material hasta que se ha depositado irregularmente sobre la pieza.

Una posible solución a la impresión con PLA es la colocación de un ventilador llamado “de capa” que consigue con una corriente de aire la solidificación inmediata del material de deposición. No se ha podido probar puesto que no se disponía en ese momento de un ventilador para la ejecución de la prueba.

Se volvió a realizar el test cambiando el material, pasando de PLA a ABS, con una temperatura de impresión de 230°C y una temperatura en la cama caliente de 100°C, con el resto de valores igual que en la anterior impresión, dando el resultado que se aprecia en la siguiente ilustración.



Ilustración 154. *Bridging test con ABS*.

En esta impresión no existen perímetros caídos ni relleno caído, solo en el tercer puente una pequeña falta de material, que no puede considerarse relleno caído. Aun así, al no ser perfecto el modelo, se penaliza con un punto, por lo que la puntuación para este test es de 4 puntos.

Otra solución a la mejora de impresión sin cambiar el material de extrusión podría haber sido la instalación de un ventilador de capa, elemento que se coloca con el flujo de aire concentrado apuntando directamente a la boquilla de extrusión, haciendo que el material extruido se enfríe más rápidamente, consiguiendo una solidificación del mismo en un menor tiempo.

5.2.2.4. PRUEBA DE FUNCIÓN POSITIVA FINA.

La meta de esta prueba es la comprobación de la correcta retracción del material en la impresora. Si la retracción no existe o es insuficiente, existirán conexiones de material entre los elementos impresos.

Esta es una de las pruebas que somete a fallo la impresora. Las calificaciones para este test son:

- 1 punto: No se consigue realizar la figura debido al atasco o falta de flujo de material de impresión.
- 2 puntos: Los capiteles se consiguen pero están conectados por tiras densas de material.
- 3 puntos: Los capiteles se consiguen realizar pero existe alguna conexión de material entre ellos
- 4 puntos: Los capiteles se consiguen, no existe conexión entre ellos pero existe problemas con el volumen de flujo.
- 5 puntos: Los capiteles se consiguen, no existe ninguna conexión y no se aprecian problemas de volumen de flujo.

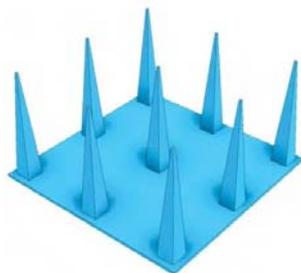


Ilustración 155. *Positive fine feature test*. Fuente: Revista Make vol.42

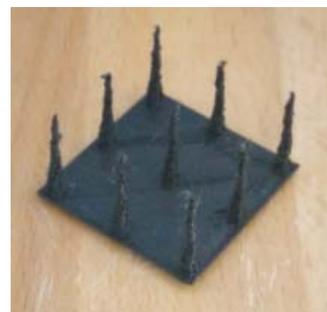


Ilustración 156. *Positive fine feature test*.

La calificación obtenida en este test es de 4 puntos, puesto que ha habido problema con el volumen de flujo y los capiteles presentan alguna irregularidad.

5.2.2.5. PRUEBA DE TOLERANCIA.

El test evalúa la tolerancia dimensional de los modelos impresos. La pieza es un prisma rectangular que posee varios agujeros en una de sus caras en las que se imprimen al mismo tiempo una serie de cilindros de distintas dimensiones. El objetivo de la prueba es conseguir separar dichos cilindros del prisma sin ayuda de herramientas.

El criterio de calificación de la prueba es el siguiente:

- 0 puntos: Ningún cilindro puede ser extraído.
- 1 punto: El cilindro de tolerancia 0.6 milímetros puede ser extraído.
- 2 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.
- 3 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.4, 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.
- 4 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.
- 5 puntos: Todos los cilindros pueden ser extraídos.

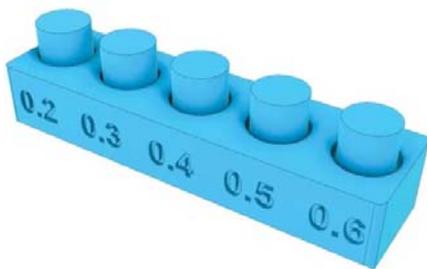


Ilustración 157. *Tolerance test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 158. *Tolerance test*.

Han podido ser extraídos los cilindros con tolerancia 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 milímetros, por lo que la puntuación de la prueba es de 4 puntos.

5.2.2.6. PRUEBA DE RESONANCIA EN EJES X E Y.

La prueba evalúa la resonancia en los ejes X e Y, el control de la deposición de material en las extrusiones lineales y la deposición de material en los cambios de capa.

La resonancia es un parámetro muy difícil de ser medido, por lo que en este test solo existen dos posibilidades con su calificación correspondiente:

- 0 puntos: Existe material en las esquinas o en el punto medio del muro impreso.

- 2 puntos: No existe levantamiento del material en las esquinas.

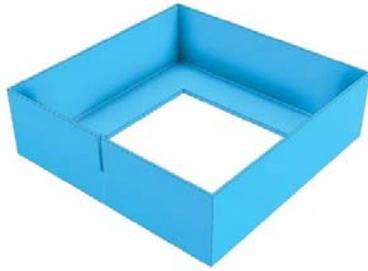


Ilustración 159. *XY resonance test*. Fuente: Revista Make vol.42

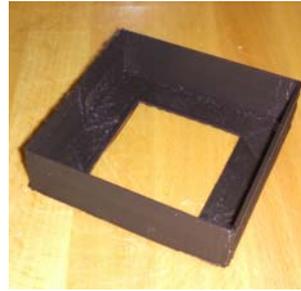


Ilustración 160. *XY resonance test*.

El resultado es óptimo, sin levantamiento de material en las esquinas, por lo que se aplica una calificación de 2.

5.2.2.7. PRUEBA DE RESONANCIA EN EJE Z.

Como el anterior test, esta prueba evalúa la resonancia en el eje Z, y la calificación solo puede ser binaria, con los siguientes condicionantes:

- 0 puntos: Al iluminar la pieza desde su parte superior, si existe una pérdida de consistencia de capas en la mitad superior de la impresión y se muestra como rugosidad horizontal.
- 2 puntos: No hay pérdida de registro de capas en altura.

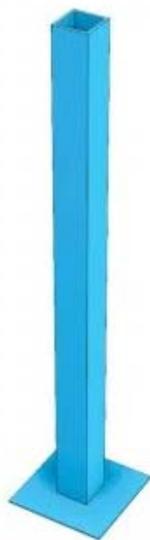


Ilustración 161. *Z resonance test*.



Ilustración 162. *Z resonance test*.

Al no existir pérdida de registro, la calificación obtenida es un 2.

5.3. CONCLUSIONES A LAS PRUEBAS DE IMPRESIÓN CON UN EXTRUSOR.

A continuación se resume en la siguiente tabla la calificación obtenida en cada una de las pruebas.

Tabla 11. Resultados de test de evaluación cualitativa de la impresora.

TEST	CALIFICACIÓN MÁXIMA	CALIFICACIÓN OBTENIDA
<i>Dimensional accuracy.</i>	5	5
<i>Overhang test.</i>	5	5
<i>Bridging test.</i>	5	4
<i>Positive fine feature test.</i>	5	4
<i>Tolerance test</i>	5	4
<i>XY resonance test</i>	2	2
<i>Z resonance test</i>	2	2
TOTAL		26

La calificación global del test ha sido de 26 puntos sobre 29 posibles, Este test ha resultado de mucha utilidad para la corrección de fallos y posibilidad de mejora de la calibración atendiendo a determinados puntos concretos.

5.4. PRUEBAS DE IMPRESIÓN CON DOBLE EXTRUSOR.

5.4.1. CUBO DE CALIBRACIÓN.

Al igual que se ha realizado para la correcta calibración de la Para la correcta calibración de la impresora, se realizará la impresión del mismo cubo de calibración, pero con ambos extrusores por separado. Mediante el calibre digital se comprobarán las dimensiones. El material utilizado para la impresión es PLA, a una temperatura de extrusión de 210°C, a una velocidad de avance de 40 mm/s y con una altura de capa de 0.2 mm.



Ilustración 163. Medición eje X cubo de calibración primer extrusor.



Ilustración 164. Medición eje Y cubo de calibración primer extrusor.



Ilustración 165. Medición eje Z cubo de calibración primer extrusor.

Tabla 12. Calibración de cubo con el primer extrusor.

EJE	MEDIDA TEÓRICA (mm.)	MEDIDA REAL (mm.)	DIFERENCIA (mm.)
EJE X	20.00	20.00	0.00
EJE Y	20.00	19.99	-0.01
EJE Z	20.00	20.02	+0.02



Ilustración 166. Medición eje X cubo de calibración segundo extrusor.



Ilustración 167. Medición eje Y cubo de calibración segundo extrusor.



Ilustración 168. Medición eje Z cubo de calibración segundo extrusor

Tabla 13. Calibración de cubo con el segundo extrusor.

EJE	MEDIDA TEÓRICA (mm.)	MEDIDA REAL (mm.)	DIFERENCIA (mm.)
EJE X	20.00	20.00	0.00
EJE Y	20.00	19.99	-0.01
EJE Z	20.00	20.02	+0.02

Como puede apreciarse en las tablas anteriores, las desviaciones en ambos extrusores son las mismas, existiendo un error en la fabricación de un 0.05% en el eje Y, y un error del 0.10% en el eje Z, desviaciones muy pequeñas que máquinas industriales no son capaces de conseguir, por lo que puede afirmarse que la impresora está totalmente calibrada.

5.4.2. PRUEBAS DE EVALUACIÓN CUALITATIVAS DE LA IMPRESIÓN.

Al igual que se hizo con un extrusor, se efectuarán las pruebas cualitativas para ambos extrusores. El objetivo de la prueba es comprobar en los distintos aspectos de la calidad de impresión de los test. En un principio se supone que la calidad es la misma, pues los extrusores son idénticos, misma marca y mismo modelo.

Los test se han realizado con PLA como material, con una altura de capa de 0.2 milímetros, relleno de un 15% y una velocidad de impresión de 40 mm/s.

5.4.2.1. PRECISIÓN DIMENSIONAL.

Con este test se persigue la comprobación de la precisión de la impresión en los ejes X e Y mediante la realización de varios cilindros superpuestos concéntricos. Para la comprobación de la correcta impresión, se han de tomar las mediciones de los diámetros de todos los cilindros. En caso de una buena impresión, las mediciones en ambos ejes han de coincidir. En caso contrario, se apreciarán los cilindros con forma de óvalo. Si esta prueba falla, el fallo estará en la insuficiente tensión en las correas.

El criterio de calificación de esta prueba es:

- 1 punto: La media de la desviación de las medidas en X e Y es mayor de 0.4 milímetros.
- 2 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.4 – 0.3 milímetros.
- 3 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.3 – 0.2 milímetros.
- 4 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y está en el intervalo 0.2 – 0.1 milímetros.
- 5 puntos: La media de la desviación de las medidas en X e Y es menor a 0.1 milímetros.



Ilustración 169. *Dimensional accuracy test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 170. *Dimensional accuracy test extrusor 1*. Ilustración 171. *Dimensional accuracy test extrusor 2*.

La puntuación obtenida en este test es de 5 puntos para el primer extrusor y 5 para el segundo extrusor.

5.4.2.2. PRUEBA DE PROYECCIÓN.

El objetivo de este test es la evaluación de las impresiones en ángulo de 30, 45, 60 y 70 grados sin apoyo inferior. Se pretende observar si existen perímetros caídos, falta de relleno en algún punto o extrusiones tambaleantes.

El criterio de calificación seguido en esta prueba es:

- 1 punto: La impresión falla en todos los ángulos.
- 2 puntos: La impresora realiza correctamente la geometría pero existe caída de relleno en los ángulos de 60 y 70 grados.
- 3 puntos: La pieza solo tiene bucles caídos en la parte a 70 grados.
- 4 puntos: La pieza no tiene caídas en los perímetros y la superficie de 60 y 70 grados es solo ligeramente diferente a la de 30 y 45 grados
- 5 puntos: Existe una pequeña diferencia en la estructura de las cuatro pendientes.

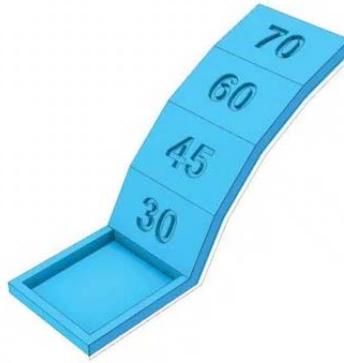


Ilustración 172. *Overhang test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 173. *Overhang test* extrusor 1.

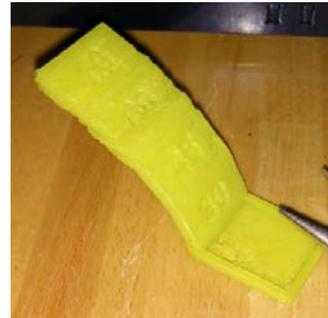


Ilustración 174. *Overhang test* extrusor 2.

La puntuación obtenida en este test es de 5 puntos para el primer extrusor y 5 para el segundo extrusor.

5.4.2.3. PRUEBA DE PUENTE.

Esta prueba mide la capacidad de la impresora para la realización de puentes sin que se produzca el efecto catenaria al realizar la unión de los dos extremos del mismo. La figura a imprimir consiste en 5 puentes de longitud comprendida entre 1 y 5 cm. a distinta altura cada uno de ellos.

La calificación será la siguiente:

- 1 punto: Cualquier puente tiene relleno caído.
- 2 puntos: Solo los puentes de mayor longitud tienen relleno caído.
- 3 puntos: Ningún puente tiene relleno caído.
- 4 puntos: Los dos puentes más pequeños no tienen perímetros caídos.
- 5 puntos: Todos los puentes se realizaron sin caídas en los perímetros (2 milímetros de caída es considerado aceptable).



Ilustración 175. *Bridging test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 176. *Bridging test* extrusor 1.

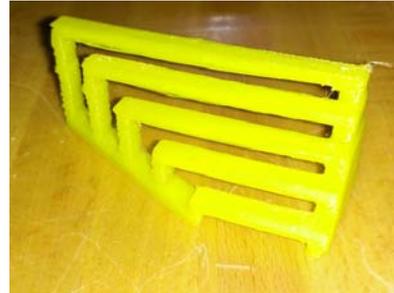


Ilustración 177. *Bridging test* extrusor 2.

La puntuación obtenida en este test es de 5 puntos para el primer extrusor y otros 5 para el segundo extrusor.

5.4.2.4. PRUEBA DE FUNCIÓN POSITIVA FINA.

La meta de esta prueba es la comprobación de la correcta retracción del material en la impresora. Si la retracción no existe o es insuficiente, existirán conexiones de material entre los elementos impresos.

Esta es una de las pruebas que somete a fallo la impresora. Las calificaciones para este test son:

- 1 punto: No se consigue realizar la figura debido al atasco o falta de flujo de material de impresión.
- 2 puntos: Los capiteles se consiguen pero están conectados por tiras densas de material.
- 3 puntos: Los capiteles se consiguen realizar pero existe alguna conexión de material entre ellos
- 4 puntos: Los capiteles se consiguen, no existe conexión entre ellos pero existe problemas con el volumen de flujo.
- 5 puntos: Los capiteles se consiguen, no existe ninguna conexión y no se aprecian problemas de volumen de flujo.

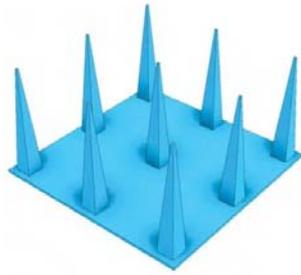


Ilustración 178. *Positive fine feature test*. Fuente: Revista Make vol.42

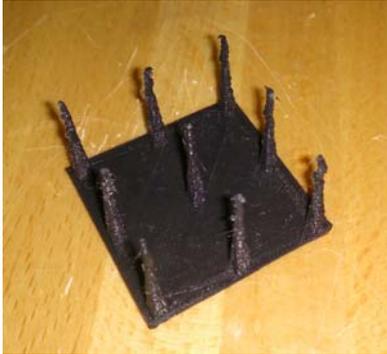


Ilustración 179. *Positive fine feature test* extrusor 1.

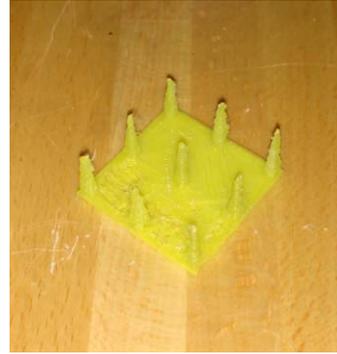


Ilustración 180. *Positive fine feature test* extrusor 2.

La calificación obtenida en este test es de 4 puntos para el primer extrusor y 4 para el segundo, pues sigue existiendo el problema con el volumen de flujo por lo que los capiteles presentan irregularidades.

5.4.2.5. PRUEBA DE TOLERANCIA.

El test evalúa la tolerancia dimensional de los modelos impresos. La pieza es un prisma rectangular que posee varios agujeros en una de sus caras en las que se imprimen al mismo tiempo una serie de cilindros de distintas dimensiones. El objetivo de la prueba es conseguir separar dichos cilindros del prisma sin ayuda de herramientas.

El criterio de calificación de la prueba es el siguiente:

- 0 puntos: Ningún cilindro puede ser extraído.
- 1 punto: El cilindro de tolerancia 0.6 milímetros puede ser extraído.
- 2 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.
- 3 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.4, 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.
- 4 puntos: Los cilindros de tolerancia 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6 milímetros pueden ser extraídos.

- 5 puntos: Todos los cilindros pueden ser extraídos.

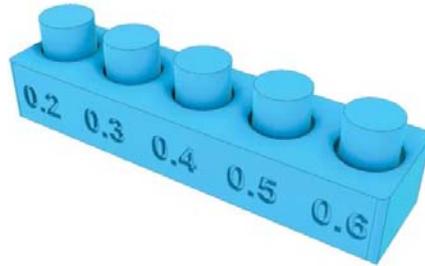


Ilustración 181. *Tolerance test*. Fuente: Revista Make vol.42



Ilustración 182. *Tolerance test* extrusor 1.

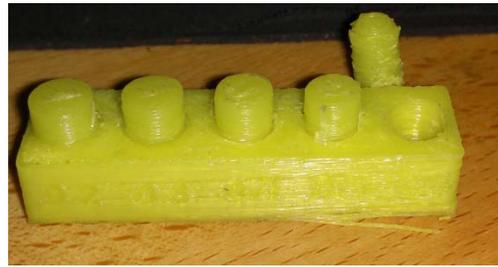


Ilustración 183. *Tolerance test* extrusor 2.

Han podido ser extraídos todos los cilindros, por lo que la puntuación de la prueba es de 5 puntos para el primer extrusor, y se ha extraído el cilindro de tolerancia 0.6 milímetros en la prueba con el segundo extrusor, por lo que la calificación es de 1 punto. Este test ha sido realizado con diferentes valores de velocidad de extrusión (10 mm/s más rápido y más lento) y con distinta altura de capa (0.1 y 0.3 milímetros), consiguiendo el mismo resultado. La única diferencia existente entre ambas pruebas es el material, pues no es del mismo fabricante y dentro de unos rangos puede tener unas propiedades distintas.

5.4.2.6. PRUEBA DE RESONANCIA EN EJES X E Y.

La prueba evalúa la resonancia en los ejes X e Y, el control de la deposición de material en las extrusiones lineales y la deposición de material en los cambios de capa.

La resonancia es un parámetro muy difícil de ser medido, por lo que en este test solo existen dos posibilidades con su calificación correspondiente:

- 0 puntos: Existe material en las esquinas o en el punto medio del muro impreso.
- 2 puntos: No existe levantamiento del material en las esquinas.

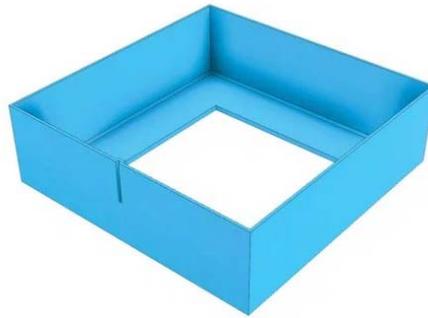


Ilustración 184. *XY resonance test*. Fuente: Revista Make vol.42

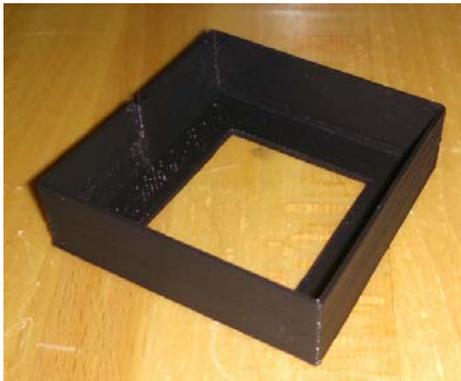


Ilustración 185. *XY resonance test extrusor 1*.

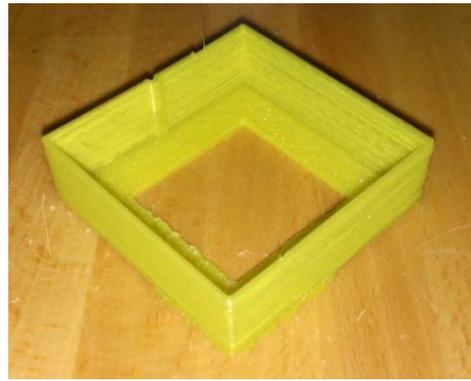


Ilustración 186. *XY resonance test extrusor 2*.

El resultado es óptimo, pues no existe levantamiento de material en las esquinas de ninguna de las dos impresiones, por lo que se aplica una calificación de 2.

5.4.2.7. PRUEBA DE RESONANCIA EN EJE Z.

Como el anterior test, esta prueba evalúa la resonancia en el eje Z, y la calificación solo puede ser binaria, con los siguientes condicionantes:

- 0 puntos: Al iluminar la pieza desde su parte superior, si existe una pérdida de consistencia de capas en la mitad superior de la impresión y se muestra como rugosidad horizontal.
- 2 puntos: No hay pérdida de registro de capas en altura.



Ilustración 187. *Z resonance test*.



Ilustración 188. *resonance test* extrusor 1.



Ilustración 189. *Resonance test* extrusor 2.

Al no existir pérdida de registro, la calificación obtenida es un 2 para ambos extrusores.

5.5. CONCLUSIONES DE LA IMPRESIÓN CON DOBLE EXTRUSOR.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las puntuaciones obtenidas por cada uno de los dos extrusores:

Tabla 14. Resultados de test de los dos extrusores de la impresora.

TEST	CALIFICACIÓN MÁXIMA	CALIFICACIÓN OBTENIDA	
		EXTRUSOR	EXTRUSOR
		1	2
<i>Dimensional accuracy.</i>	5	5	5
<i>Overhang test.</i>	5	5	5
<i>Bridging test.</i>	5	5	5
<i>Positive fine feature test.</i>	5	4	4
<i>Tolerance test</i>	5	5	1
<i>XY resonance test</i>	2	2	2
<i>Z resonance test</i>	2	2	2
TOTAL		28	24

La calificación global del test ha sido de 28 puntos sobre 29 posibles para el primer extrusor y de 24 para el segundo extrusor. La única diferencia en puntuación ha sido en el test de espacios negativos, en el cual en el caso del primer extrusor ha sido posible extraer todos los cilindros, mientras que en el caso del segundo extrusor, solo se ha podido sacar uno de los cinco cilindros. La causa más probable ha sido la diferencia del material utilizado, pues solo existe ese cambio entre los dos extrusores.

A continuación se muestran dos pruebas realizadas con dos plásticos PLA simultáneamente, uno negro y otro amarillo *Glow in the dark*. Los parámetros utilizados han sido los siguientes:

- Velocidad de extrusión: 50 mm/s.
- Temperatura de extrusión: 210°C.
- Altura de capa: 0.2 mm.



Ilustración 190. Cono de tráfico en dos colores.

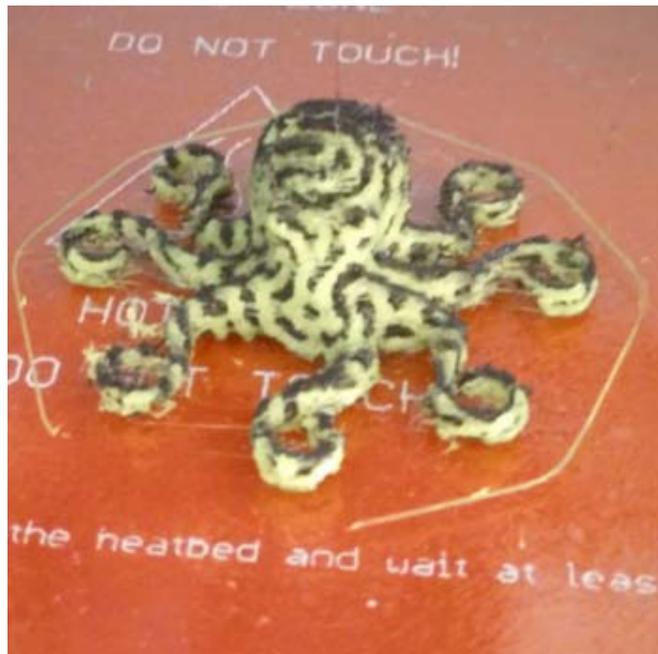


Ilustración 191. Pulpo en dos colores.

6. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA IMPRESORA.

Cada día aparecen un mayor número de proveedores del material necesario para la construcción de una impresora 3D, por lo que el presente presupuesto quedará desfasado en poco tiempo, pues la oferta hace que los precios disminuyan sensiblemente.

La mejor opción para adquirir los componentes es en tiendas on-line, pues en muchas de las opciones el coste de gastos de envío sumado al precio de los componentes hace mucho más asequible económicamente hablando que adquirirlo en tiendas locales, a excepción de la tornillería, pues en una ferretería especializada se podrán adquirir a un menor precio.

El presente apartado incluye el coste en Noviembre de 2.014 de los componentes, con su precio unitario y la cantidad de unidades adquirida. Se detallan en tablas diferentes el coste económico de las mejoras abordadas en el presente Trabajo Fin de Grado.

Tabla 15. Coste inicial impresora 3D.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)
Piezas de acero estructura.	1	45.00	45.00
Rodamiento lineal LM8UU.	11	1.10	12.10
Rodamiento axiales 608ZZ.	4	0.90	3.60
Rodamiento axial 623ZZ.	1	0.60	0.60
Polea GT2.	2	3.50	7.00
Correa GT2.	2	3.25	6.50
Acoplador 5mm./5mm..	2	3.00	6.00
Motor paso a paso Nema 17.	5	13.00	65.00
Bridas 2.5x100.	1	1.50	1.50
Varillaje.	1	12.50	12.50

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)
Arduino 2560 Mega.	1	25.00	25.00
Ramps 1.4.	1	28.00	28.00
Driver A4988.	4	7.00	28.00
Final de carrera.	3	3.00	3.00
Pantalla LCD.	1	21.00	21.00
Fuente de alimentación 20A/240W.	1	20.00	20.00
Termistor 100k.	2	2.00	4.00
Cama caliente.	1	16.00	16.00
Extrusor E3D V6.	1	70.00	70.00
Tornillería.	1	8.50	8.50
Muelle diámetro 5 mm.	2	0.20	0.40
Tornillo <i>hobbed bolt</i> diámetro 8 mm.	1	5.50	5.50
Piezas impresas.	1	26.00	26.00
Cables para conexión.	1	6.00	6.00
TOTAL IMPRESORA 3D			421.20

Tabla 16. Coste mejora doble extrusor.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)
Piezas doble extrusor.	1	12.00	12.00
Extrusor E3D V6.	1	70.00	70.00
Rodamiento axiales 608ZZ.	2	0.90	1.80
Tornillería.	1	2.00	2.00
Rueda dentada 8 mm.	2	6.50	13.00
Muelles diámetro 5 mm..	4	0.20	0.80
Driver A4988.	1	7.00	7.00
Motor paso a paso Nema 17.	1	13.00	13.00
Termistor 100k.	1	2.00	2.00
Cables para conexión.	1	3.00	6.00
TOTAL MEJORA DOBLE EXTRUSOR			127.60

Tabla 17. Coste mejora barrera de protección física.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)
Tablero de madera DM 520x520 mm. de espesor 10 mm.	2	3.50	7.00
Perfil angular de aluminio 40x20 mm.	3	2.50	5.00
Tornillería.	1	1.50	1.50
Placa de metacrilato de 4 mm. de espesor cortada a medida.	4	18.00	72.00
Circuito integrado de regulación de velocidad LM317.	1	4.00	4.00
Ventilador 12 cm.	2	9.50	19.00
Pintura acrílica para madera.	1	6.00	6.00
TOTAL MEJORA BARRERA DE PROTECCIÓN FÍSICA.			114.50

El total de la inversión en la construcción de la impresora con mejoras ya incluidas asciende a la cantidad de 663.30 €(Seiscientos sesenta y tres Euros con treinta céntimos).

A simple vista puede parecer una cantidad elevada para un impresora “doméstica”, pero en comparación con los modelos comerciales que incorporan una caja de protección, es bastante asequible, pues los modelos comentados suelen tener un coste mínimo de unos 1.200 €, sin la implementación del doble extrusor. Con un doble extrusor, el precio llega a alcanzar los 3.000€para los modelos más asequibles.

6.1. COMPARACIÓN ENTRE LA IMPRESORA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MINERA E INDUSTRIAL DE ALMADÉN Y LA IMPRESORA OBJETO DE ESTE TRABAJO FIN DE GRADO.

En este apartado se compararán las diferencias existentes entre la impresora objeto de este Trabajo Fin de Grado y la impresora montada para la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén. La segunda impresora es una impresora Prusa I3 Hephestos, comercializada por la empresa BQ, mientras que la primera, es una impresora genérica Prusa I3 Steel, evolución de la BQ.

En el caso de la impresora BQ tiene varias ventajas, como son:

- Se adquiere como un kit completo, muy bien organizado dentro de una caja, con instrucciones de montaje y todas sus partes separadas.
- Un extrusor completamente de aluminio en un bloque, incluido hasta el motor, el cual simplemente es atornillar al carro del eje X.
- Servicio técnico de la empresa para cualquier duda o problema durante el montaje y funcionamiento, dentro del periodo de garantía que se establece en la legislación española.
- Posibilidad de ampliación del eje Y, puesto que solo es necesario el cambio del varillaje del eje Y por otras varillas de mayor longitud.
- Control de calidad de las piezas muy correcto, tanto de la estructura como de la electrónica.
- Firmware precargado, por lo que no hay que modificar nada.
- Incluye una cadena portacables, muy útil para que no haya interferencias entre el movimiento del bloque extrusor y el cableado.
- Piezas rediseñadas por el departamento técnico de BQ.

Esta impresora también tiene sus desventajas, por ejemplo:

- Mayor número de piezas imprimibles, lo que requiere de un montaje más cuidadoso.
- La estructura del eje Y está realizada con varillas de acero y piezas de plástico, por lo que es endeble en comparación con una estructura rígida de acero, además de tener mayor vibración.

- No posee cama caliente, por lo que no es posible imprimir con ABS, y, si se monta esta, se anula la garantía al ser una modificación del producto.

En la Prusa I3 Steel se han evolucionado varios aspectos con respecto a la Prusa I3, tales como:

- Estructura de acero, otorgando una mayor rigidez y una menor transmisión de vibraciones.
- El montaje de la estructura es más rápido. Puesto que tiene un menor número de piezas y para todo el ensamblaje se utiliza el mismo tipo de tornillería.
- Una vez ensamblada, no es necesaria la realización de ajustes.
- Los soportes de los motores son de acero, más rígidos que los de plástico.
- Solo se utilizan varillas roscadas para el movimiento del eje Z.
- Versatilidad en cuanto a los componentes, es decir, se puede acoplar cualquier tipo de electrónica existente en el mercado, o cualquier extrusor, incluso el de la BQ Hephestos.
- Posibilidad de implementación de cama caliente y por lo tanto de imprimir con ABS.
- Una vez ensamblada, es posible su transporte puesto que forma una sola unidad estructural.

Pero a su vez también posee ciertas desventajas:

- Es mucho más pesada al tener la estructura realizada íntegramente en acero.
- El acero ha de ser pintado para protegerlo de la corrosión, o, en su defecto, realizar la estructura con acero inoxidable, pero con el inconveniente del incremento sustancial de precio.

El coste de la impresora BQ es de 599 € mientras que el de la impresora de este Trabajo Fin de Grado es de 421 € a igualdad de componentes. Con las mejoras implementadas resulta algo más cara, pero las prestaciones aumentan considerablemente, por lo que si atendemos al coste económico exclusivamente, es más rentable la adquisición de una Prusa I3 Steel. Pero si el lector compara pros y contras, y queda a su criterio por cual decantarse.

7. CONCLUSIONES. OBJETIVOS ALCANZADOS. PROPUESTAS DE TRABAJO FUTURO.

A la conclusión de este Trabajo Fin de Grado se puede afirmar que se han cumplido todos los objetivos marcados en el capítulo 2.

Se ha realizado la construcción de dos impresoras, una para la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén y otra más evolucionada en la que se basa el presente Trabajo Fin de Grado.

A la segunda impresora se le han realizado mejoras tales como el montaje de un segundo extrusor para la posibilidad de impresión en dos materiales o dos colores, se ha dispuesto en el interior de una barrera de protección física transparente, para evitar ambientes pulvígenos, posibles golpes accidentales, eliminar las corrientes de aire y mantener una temperatura estable en el ambiente de la máquina. Todo ello sin perder la visibilidad del modelo en impresión.

Se ha expuesto el montaje de ambas impresoras, para que a cualquier lector le resulte asequible el seguimiento del mismo y un posible montaje de otra impresora.

Se han analizado los cambios necesarios en la configuración del firmware, tanto para un extrusor como para dos.

Se han realizado test para la comprobación de la correcta ejecución de los modelos, analizando los casos de fallo y corrigiéndolos para que las impresiones lleguen a ser de buena calidad y con tolerancias muy pequeñas.

Se ha realizado un estudio económico tanto de la construcción de la impresora 3D como de las mejoras aplicadas, para comprobar la viabilidad de dicha construcción. En este Trabajo Fin de Grado, se ha intentado la construcción con piezas asequibles de conseguir y dentro de la calidad de los distintos elementos, seguir una relación calidad-precio buena.

Y por último, se ha incluido una guía completa del manejo de uno de los programas de impresión 3D existentes, *Cura*, para que el lector pueda llegar a familiarizarse rápido con el mundo de la impresión 3D.

Cabe destacar, que cada impresora 3D es distinta del resto y no todas tienen los mismos parámetros de configuración, pues pueden variar muchos aspectos, tales como la calidad del montaje o de las piezas utilizadas para el mismo.

Como conclusión personal, la realización de este Trabajo Fin de Grado ha permitido profundizar en áreas de conocimiento de electrónica y modelado 3D, sectores muy del interés del autor del presente Trabajo, y un campo en constante evolución, por lo que nunca se deja de aprender.

La satisfacción es muy grande al poder observar cómo se ha creado una máquina capaz de modelar piezas que hasta hace unos pocos años solo podían ser vistas en la pantalla de un ordenador en un entorno doméstico, así como observar como de una bobina de plástico al ser calentada, llega a producir las figuras que antes solo existían en la imaginación.

Existen muchos campos de avance para un trabajo futuro sobre la impresora, como pueden ser los siguientes:

- Una autonivelación de la impresora, con lo que una de las partes más delicadas y que más tiempo ocupa una vez realizado el montaje, es dejar la cama perfectamente nivelada. Esto se puede realizar con un sensor capacitivo que detecte la distancia existente a la base de extrusión. El principio es el mismo que el del final de carrera, pero controlando por software la altura de parada del eje Z al comienzo de la impresión.
- La colocación de iluminación dentro de la caja de protección para en ambientes en los que exista déficit de luz, se pueda controlar la impresión. Este punto se podría realizar mediante la colocación de tiras LED en la parte trasera de la caja, con un interruptor y directamente conectadas a la fuente de alimentación. Como dicha fuente sólo trabaja a 12 voltios, esta iluminación tendría que trabajar a ese voltaje.
- Realizar el control de la impresión mediante un dispositivo móvil, conectado mediante un cable USB a la impresora o con una conexión inalámbrica, como pudiera ser bluetooth o, incluso con una conexión a internet.
- Montaje de una pantalla táctil a color y con mayor definición, en la que, conservando la autonomía que otorga el lector de tarjetas SD, se pueda visualizar el modelo a imprimir antes de hacerlo.
- Utilización de la impresora como fresadora CNC, únicamente cambiando el bloque extrusor por una herramienta tipo *Dremel*.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- Mark Frauenfelder Ed. (2013). *Make: Ultimate Guide to 3D Printing 2014*.
- Anderson, C. (2014). *Makers: The New Industrial Revolution*.
- Artero, O. T. (2010). *Arduino. Curso práctico de formación*. Alfaomega.
- Barnatt, C. (2014). *3D Printing: Second Edition*.
- Bauer, J. (2015). *Impresión 3D: Introducción al mundo de la impresión 3D*.
- BQ. (Enero de 2015). <http://www.mibqyyo.com/articulos/2014/09/22/asi-funciona-la-extrusion-en-las-impresoras-3d/>.
- Budmen, I. (2013). *The Book on 3D Printing*.
- Clone Wars. (Noviembre de 2014). http://www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars.
- Createc3d. (Enero de 2015). <http://www.createc3d.com/abs-vs-pla-que-material-utilizamos/>.
- Edgar A. Torres, J. X. (2015). Diseño y construcción de una impresora 3D aplicando la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida. *3 Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica. UNAB*.
- Evans, B. (2012). *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*.
- France, A. K. (2013). *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*.
- Hod Lipson, M. K. (2013). *Fabricated: The new world for 3D Printing*.
- Horvath, J. (2014). *Mastering 3D Printing (Technology in Action)*.
- i3dCarlos. (Diciembre de 2014). <http://www.impresoras3d.com/aspectos-legales-de-la-impresion-3d-abanlex/>.
- Instituto Baikal. (Noviembre de 2014). <http://institutobaikal.com/impresion3d/blog/triangulo-estrategico-impresion-3d/>.
- Jesse Harrington, E. G. (2015). *3D CAD with Autodesk 123D: Designing for 3D Printing, Laser Cutting, and Personal Fabrication*.
- MasMag. (Marzo de 2015). <http://www.masmag.com>.
- Norton, G. (2015). *3D Printing: The Ultimate Guide to Mastering 3D Printing for Life*.
- Pixel Sistemas. (Diciembre de 2014). <http://www.pixelsistemas.com/descargas/productos/tecnologiafdm.pdf>.
- Proyecto RepRap. (Noviembre de 2014). <http://www.reprap.org>.
- Romano, J. M. (2014). *La verdad sobre las impresoras 3D*.
- Salinas, R. (2014). *3D Printing with RepRap Cookbook*.

- Textos científicos. (Enero de 2015). <http://www.textoscientificos.com/polimeros/>.
- Universidad de Valladolid. (Noviembre de 2014). <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/>.
- Universidad de Vigo. (Noviembre de 2014).
<http://webs.uvigo.es/disenoindustrial/docs/protorapid.pdf>.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (Diciembre de 2014).
http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10682/4/Fabricació_prototips.pdf.
- Universidad Politécnica de Valencia. (Noviembre de 2014).
<http://elblogdelplastico.blogs.upv.es/>.
- Vazhnov, A. (2013). *Impresion 3D: Como va a cambiar el mundo*.
- www.impresoras3d.com. (s.f.). <http://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>.

9. ANEXOS.

9.1. GLOSARIO.

Impresión 3D: Término genérico que es utilizado para imprimir objetos físicos mediante la deposición de material en capas.

Add-In: Programa que es ejecutado dentro de otro programa para obtener funcionalidades adicionales.

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno. Termoplástico muy resistente al impacto. Puede producir vapores tóxicos.

PLA: Ácido Poliláctico. Termoplástico con menos dureza que el ABS. Es biodegradable. Es seguro para el contacto con los alimentos.

CAD: Siglas en inglés de diseño asistido por computador.

CAM: Siglas de fabricación asistida por computador.

Modelo conceptual: Término utilizado para la evaluación de modelos tempranos.

Modelo funcional: Prototipo realizado con el mismo material o similar al producto final.

Post-procesado: Trabajos posteriores de aplicación a la pieza, tales como lijado, taladrado, etc.

Modelado por deposición fundida: Proceso mediante el cual se deposita un material fundido sobre una base y se va creando el modelo por la adición de capas.

RepRap: Acrónimo de *Replicating Rapid Prototyper*, máquina capaz de replicarse a sí misma mediante la impresión de algunas de sus partes funcionales.

Arduino: Placa basada hardware libre que sirve para la realización de prototipos.

Shield: Placa diseñada para ser ensamblada sobre un Arduino que sirve para extender las capacidades del mismo.

Firmware: Conjunto de datos que se instala en una placa para el control de los procesos y la comunicación con el ordenador.

Host: Programa instalado en el ordenador para la comunicación con la impresora.

Gcode: Lenguaje de programación para el control numérico.

Laminado o *Slicing*: Proceso por el cual un modelo se lamina convirtiéndolo a Gcode para la lectura por parte de la impresora.

Vitaminas: Partes de la impresora que no son imprimibles.

9.2. CONSTRUCCIÓN DE LA IMPRESORA DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MINERA E INDUSTRIAL DE ALMADÉN.

Se ha realizado el montaje de una impresora 3D para la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén. Se trata del modelo comercial “Prusa I3 Hephestos”, de la casa comercial BQ.

La impresora viene correctamente embalada en una caja con todas las piezas por separado, bien organizadas dentro de divisiones dentro del empaquetado, con cajas para los montajes de:

- Eje X.
- Eje Y.
- Eje Z.
- Electrónica.
- Elementos frágiles (vidrio y metacrilato).
- Extrusor.
- Tornillería.
- Herramientas.

En primer lugar, se han preparado las piezas impresas con la colocación de tuercas y rodamientos. Las tuercas han sido colocadas mediante la técnica de la aplicación de calor mediante un soldador para que encajen correctamente en los agujeros destinados a tal fin, y los rodamientos han sido introducidos mediante la aplicación de presión sobre ellos.

Se ha introducido dentro de la polea un rodamiento 623ZZ para el movimiento correcto de las correas de los ejes X e Y.



Ilustración 192. Montaje de poleas.



Ilustración 193. Poleas para movimiento de las correas de ejes X e Y.

A continuación se dispusieron las tuercas y los rodamientos en las partes imprimibles que conforman el eje X.



Ilustración 194. Montaje de tuercas en elemento de eje X.



Ilustración 195. Montaje de tuercas en elemento de eje X.

A continuación se introdujeron los rodamientos lineales en los huecos previstos para tal fin para el desplazamiento a lo largo del eje Z.



Ilustración 196. Elementos imprimibles eje X montados.

Para completar la construcción de los conjuntos de piezas imprimibles del eje X, se asegura la polea dentro de una de las piezas que servirá para tensar la correa del eje X y se coloca en el hueco destinado al alojamiento de dicha pieza en uno de los conjuntos.



Ilustración 197. Tensor de correa de eje X.



Ilustración 198. Conjunto de eje X ensamblado.

A continuación se prepara el *X-carriage*, elemento auxiliar que será el encargado de anclar el conjunto del extrusor al eje X.



Ilustración 199. Preparación *X-carriage*.

Seguidamente se prepara el tensor de la correa del eje Y, que lleva alojada la segunda polea ensamblada con anterioridad.



Ilustración 200. Pieza de alojamiento de polea de eje Y.

Una vez terminadas de preparar las piezas imprimibles, se procede a ensamblar el endstop del eje X. Acto seguido se introducen en las varillas del eje X tres rodamientos lineales, dos en una y uno en la otra, para, a continuación, unir el conjunto del eje X mediante las piezas imprimibles. Al mismo tiempo, se finalizará el montaje con el acople del motor del eje X.



Ilustración 201. Ensamblaje eje X.

Acto seguido, se continúa con el montaje del marco de acero junto con el eje Z. Para ello, se acoplan los motores al marco mediante las piezas imprimibles y se introducen las varillas lisas, que servirán de desplazamiento al eje X a lo largo del eje Z.



Ilustración 202. Montaje marco y eje Z.

Se introducen las varillas roscadas en las tuercas colocadas para tal fin en las piezas del eje X, que son las que con el giro de los motores hagan desplazarse en altura el eje X.



Ilustración 203. Montaje varillas roscadas.

Una vez realizados todos estos ensamblajes, se procede al acople de todos los conjuntos montados.

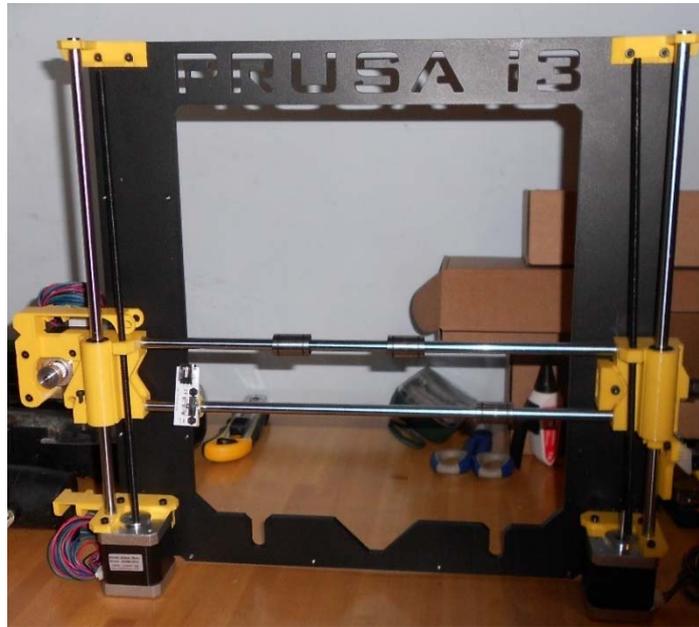


Ilustración 204. Acople marco y eje X.

Para terminar el montaje de la estructura se realiza el montaje de la base del eje Y, que consiste en la unión mediante cuatro piezas imprimibles de varillas roscadas y lisas, uniendo en cada dirección de cada pieza dos varillas. Las varillas lisas servirán para el desplazamiento de la base del eje Y, y el resto para la unión con el marco y para la colocación de la correa del eje Y.



Ilustración 205. Montaje base de la impresora.

La base de impresión se colocará sobre los rodamientos lineales previamente introducidos en las varillas lisas y se sujetará a estos mediante el uso de bridas.

Dicha base lleva atornillada una pieza imprimible que servirá para el aseguramiento de la correa del eje Y, que será la encargada de mover dicha base. La correa pasará por la polea insertada en el eje del motor y por la del tensor del eje Y.



Ilustración 206. Montaje correa eje Y.

Sobre la base del eje Y se dispondrá una pieza de metacrilato que será la verdadera base sobre la que se depositará el material fundido proveniente de la extrusión. El metacrilato, para su correcta nivelación, será dispuesto sobre unos muelles y unos tornillos que anclarán sobre la base del eje Y.



Ilustración 207. Instalación de base de metacrilato.

El endstop del eje Y será colocado sobre el marco de acero, que será accionado por un tornillo instalado en la parte inferior de la base del eje Y, que hará contacto al llegar al origen de ese eje, deteniendo así el avance.



Ilustración 208. Instalación *endstop* de eje Y.

A continuación se realiza la unión del eje Y con el marco de acero, con las tuercas y arandelas dispuestas en las varillas del eje Y, asegurándolo mediante presión por ambas caras del marco.

Se instalará sobre los rodamientos del eje X el *X-carriage* y se instalará la correa, con la tensión suficiente para que el movimiento del eje X sea de acuerdo a las órdenes recibidas desde la electrónica, previo paso por el motor.

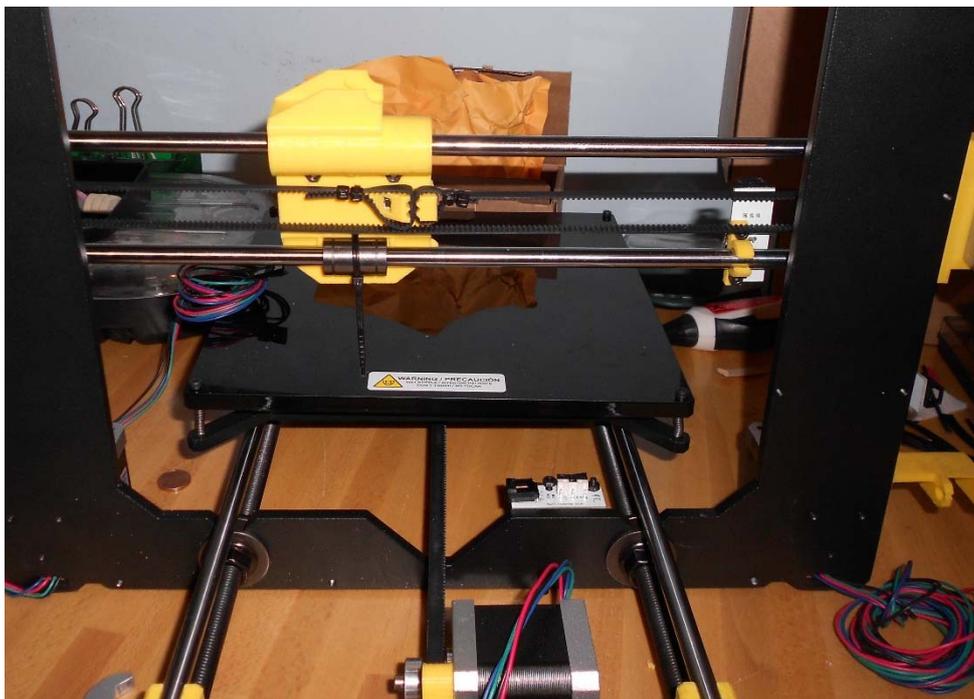


Ilustración 209. Instalación de *X-carriage* y correa del eje X.

Hecho el montaje de la correa del eje X, se coloca el soporte del extrusor anclándolo al *X-carriage*.

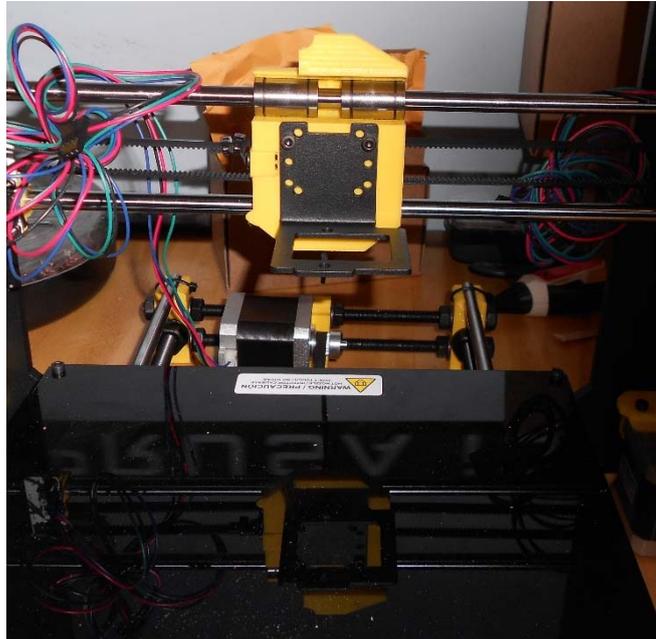


Ilustración 210. Colocación soporte de extrusor.

Acto seguido, se monta el extrusor sobre el soporte, uniéndolo mediante tornillería en los huecos previstos para tal fin.

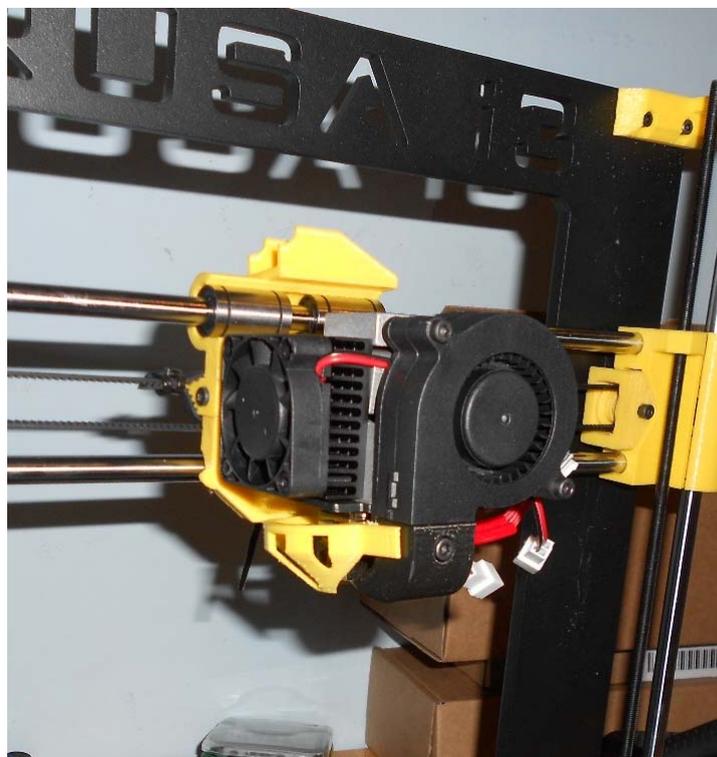


Ilustración 211. Montaje de bloque extrusor sobre soporte.

Sobre el metacrilato, y para no dañar éste con las impresiones ni los productos para mejorar la adherencia de las piezas, se coloca un vidrio con las dimensiones del área de impresión, que en este caso son 200 x 200 milímetros.



Ilustración 212. Colocación de vidrio.

En este punto se acaba de completar la construcción de la impresora. A partir de este momento solo falta el montaje de la electrónica, el cual empieza acoplado sobre una pieza imprimible destinada a tal fin la placa electrónica, la cual es un Arduino sobre la que se monta un *shield* Ramps, sobre el que se colocan 4 *drivers* A4988 para el movimiento de los motores. La pieza imprimible es atornillada sobre el marco por su parte trasera.

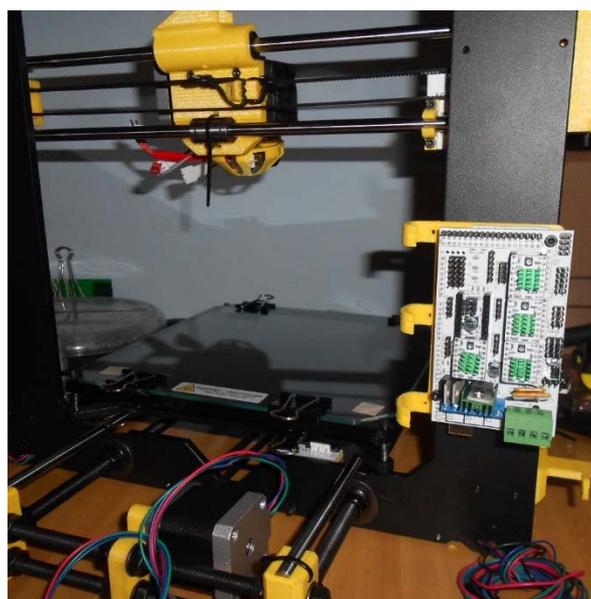


Ilustración 213. Colocación de placa electrónica sobre marco.

A continuación, se dispone el LCD sobre otra pieza imprimible, la cual es atornillada en la parte superior del marco, realizando por la parte trasera las conexiones con el *shield* Ramps.



Ilustración 214. Instalación pantalla LCD.

La impresora está terminada en este punto a falta del conexionado del cableado.



Ilustración 215. Impresora montada a falta de cableado.

Para la conducción del cableado se utilizará una cadena portacables, que conducirá desde el extrusor hasta la electrónica el cableado, permitiendo el movimiento tanto en el eje X como en el eje Z, sin posibilidad de interferencia de dicho cableado con el movimiento.



Ilustración 216. Introducción de cableado en la cadena portacables.

Una vez introducidos los cables, se realiza el montaje, anclando las cadenas a las piezas imprimibles mediante tornillería.



Ilustración 217. Instalación cadena portacables.

A continuación se realiza el conexionado de los elementos que conforman el extrusor: ventiladores, cartucho cerámico y termistor.

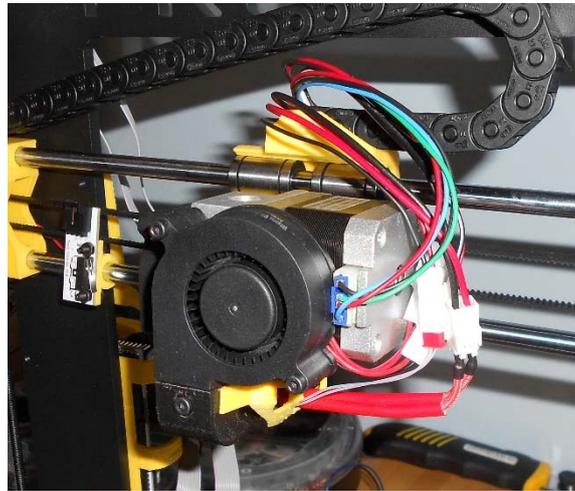


Ilustración 218. Conexionado elementos de extrusor.

Para finalizar se realiza el conexionado de todos los elementos a la placa siguiendo el siguiente esquema:

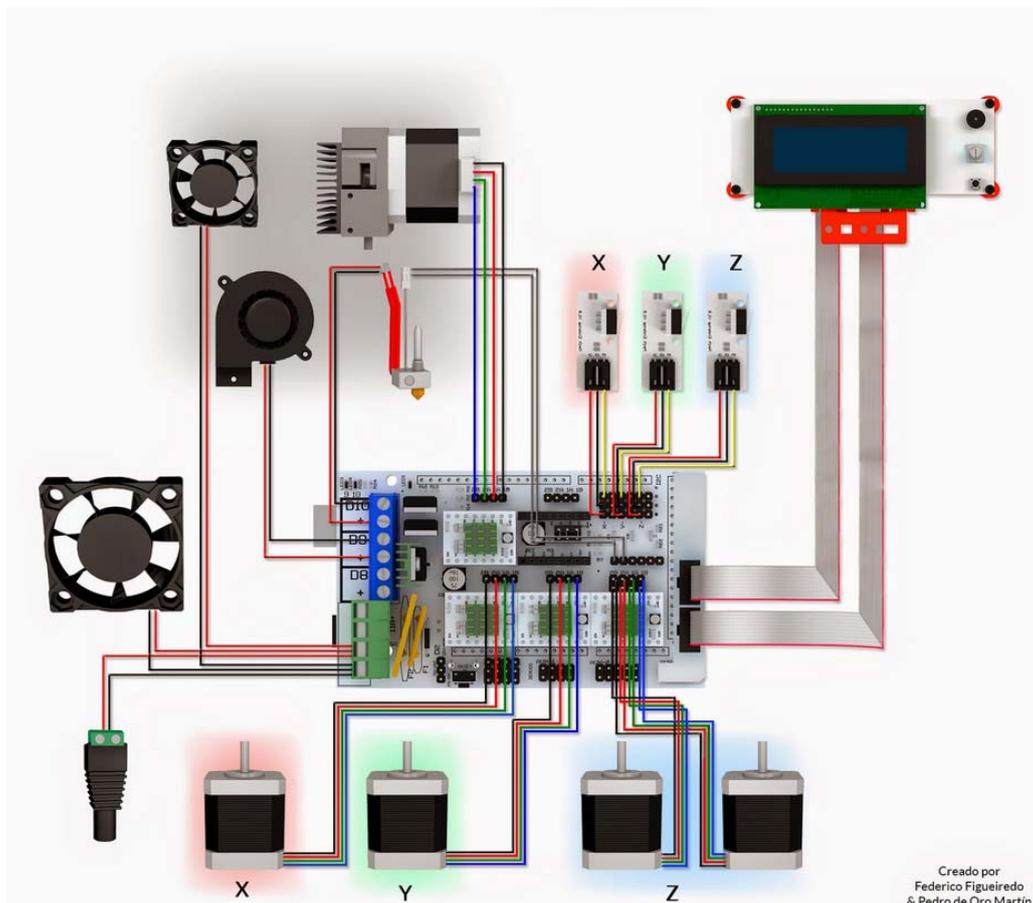


Ilustración 219. Diagrama de conexionado electrónica impresora. Fuente: www.mibqyyo.com

Al tener los cables una mayor longitud, se optó por recogerlos para que el ventilador de la electrónica pudiera hacer su función, quedando de la siguiente manera:

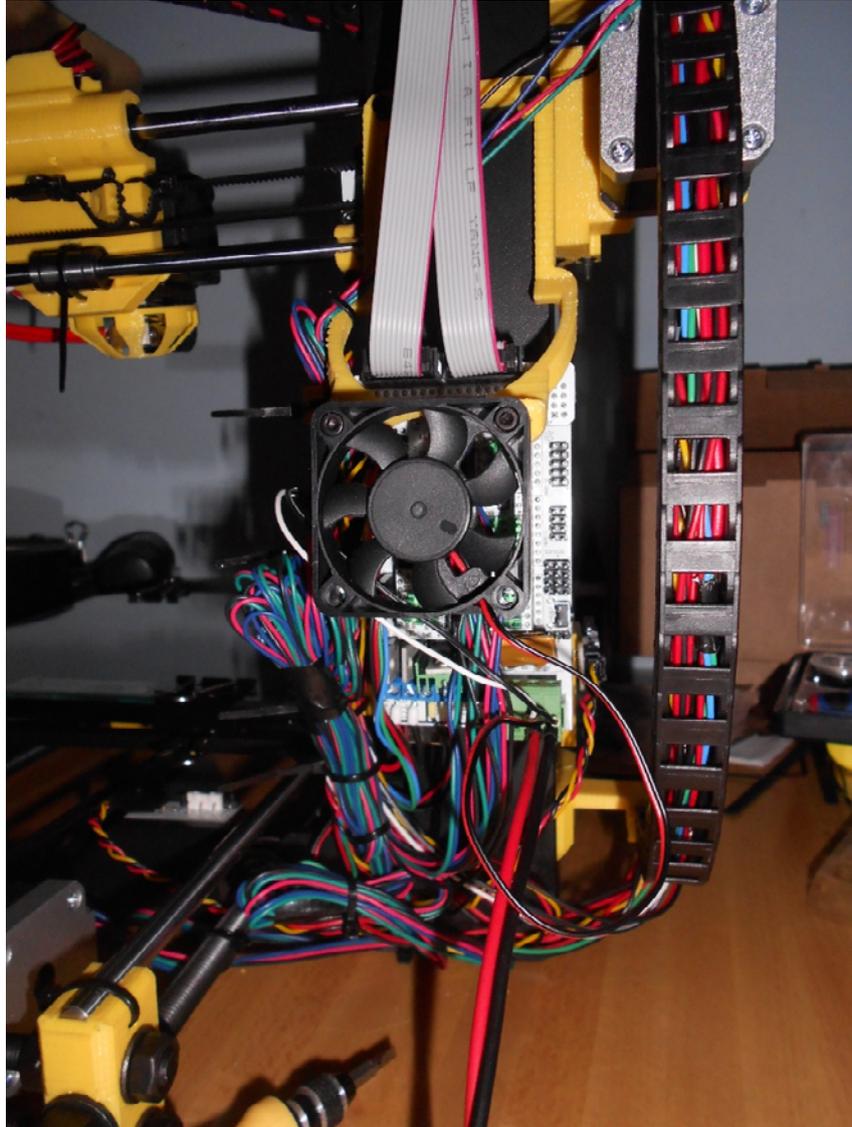


Ilustración 220. Conexión electrónica.

Con el conexionado de la electrónica se terminó el montaje, pues esta impresora comercial ya tiene precargado y configurado el firmware dentro del *shield* Ramps, por lo que, con cualquier programa de impresión, se puede empezar a trabajar con ella.

9.3. MANUAL DE USO DE CURA.

A. INTRODUCCIÓN.

Cura es un software Open Source que es utilizado para el laminado e impresión de modelos en tres dimensiones. Está desarrollado por la empresa Ultimaker.

Es un programa que combina adecuadamente la facilidad de manejo con un entorno bastante amigable y unos resultados bastante buenos.

Se ha realizado este manual de uso para dar al lector unas nociones de manejo con el que después de su lectura, será capaz de manejar el programa sin gran dificultad.

El idioma del programa es inglés, por lo que para su manejo, se requiere dominio de este idioma.

Cura es un software sobre el que se han desarrollado versiones para distintos sistemas operativos: Windows, Mac OS y Linux. Este manual se basará en la versión sobre la plataforma Windows, concretamente en su versión 15.02.1.

B. INSTALACIÓN Y PRIMERA CONFIGURACIÓN.

El archivo de instalación se puede obtener de la dirección <http://software.ultimaker.com>.

Una vez descargado, se ejecuta el instalador haciendo doble clic sobre el archivo descargado.

Las opciones son las típicas de cualquier instalación, tales como seleccionar el directorio de instalación, los componentes que serán instalados en el disco duro y la asociación de extensiones de archivos para que sean abiertas con Cura.

Al terminar de instalar el software, se abrirá el programa con una asistente de configuración en el que se elegirá la impresora que se posee de una lista. En caso de que no esté listada, se elegirá la opción “Other” en la primera ventana.

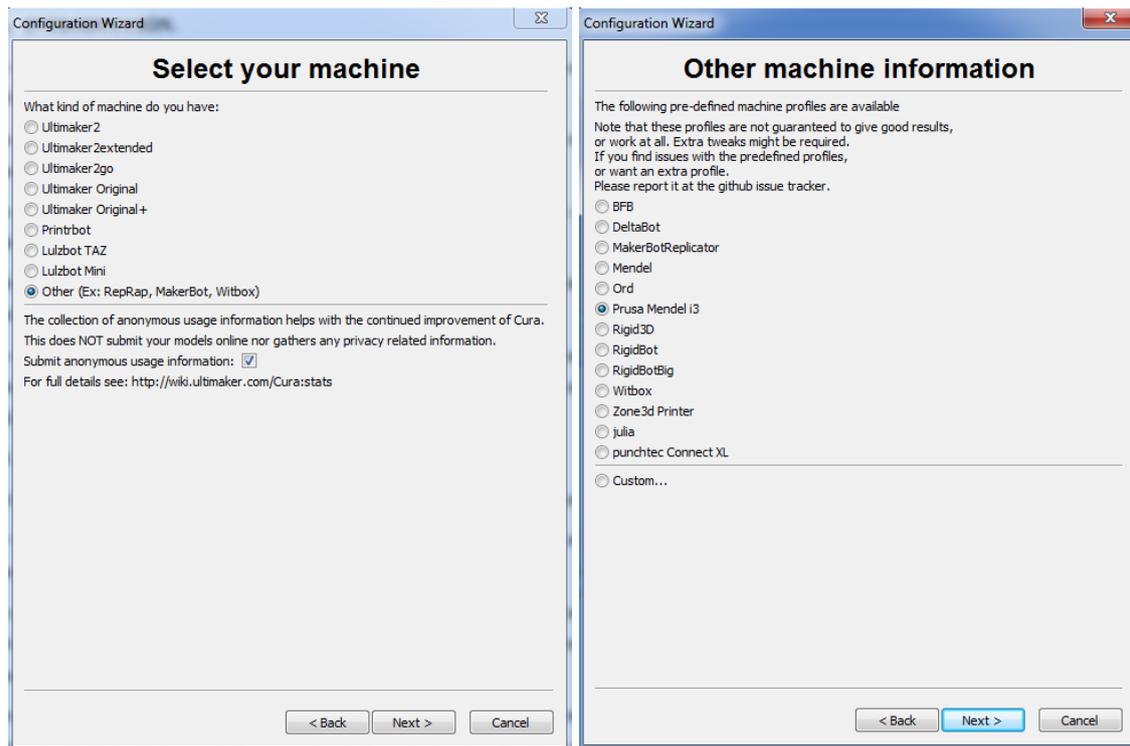


Ilustración 221. Selección de impresora.

Ilustración 222. Submenú de selección de impresora.

En caso de tampoco estar en el segundo submenú, se abrirá otra ventana en la que se pedirá que se definan unos parámetros para la configuración de la máquina (dimensiones de impresión de cada uno de los ejes, tamaño del agujero de salida del nozzle y si existe base calefactada o no).

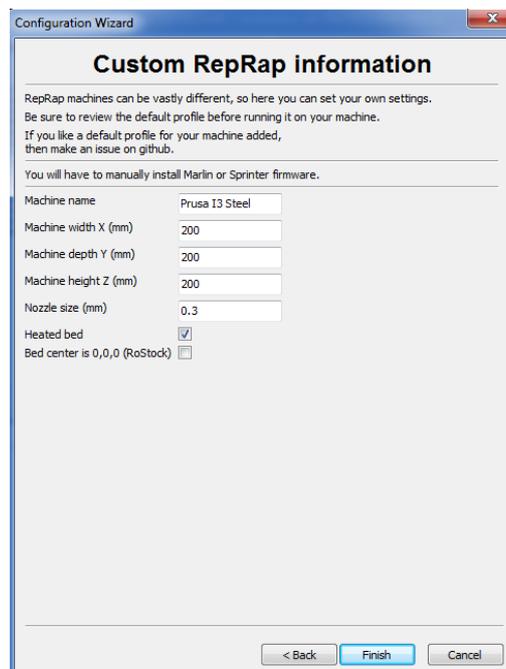


Ilustración 223. Menú de la opción Custom.

C. VENTANA PRINCIPAL.

Terminada la configuración de la impresora, se llega a la ventana principal del programa, desde la que se tendrá acceso a todos los parámetros para el control de la impresora.

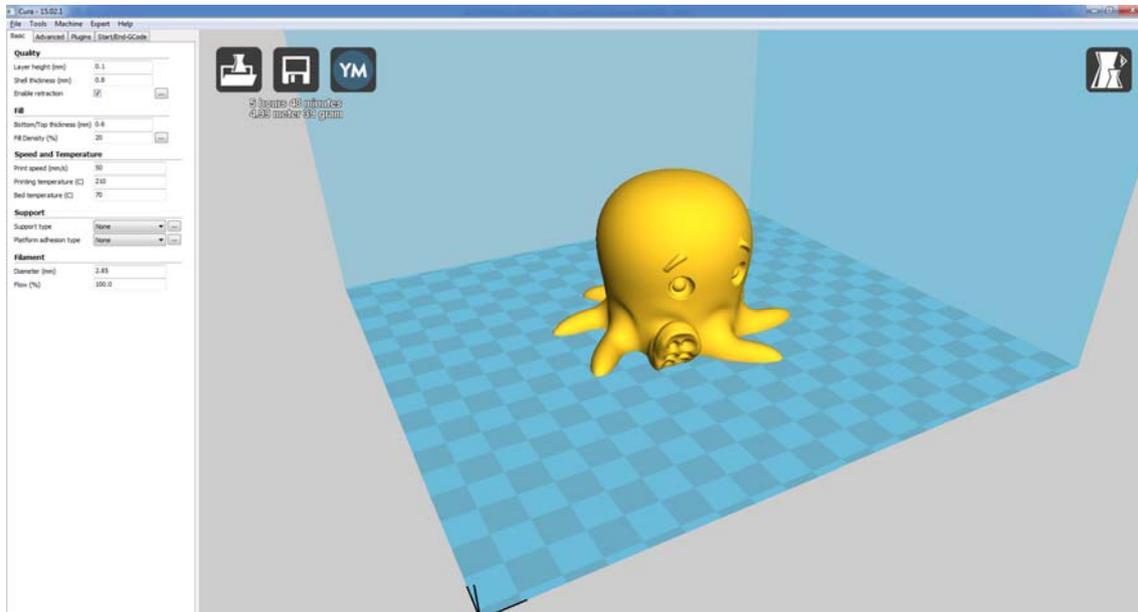


Ilustración 224. Ventana principal de Cura.

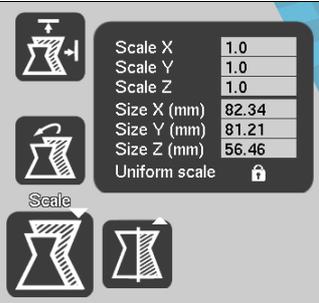
En primer lugar, para tener control sobre todos los parámetros, se ha de activar la opción Full Settings, dentro del menú Expert y seleccionando la opción Switch to full settings.

La ventana principal se estructura en tres partes diferenciadas: la barra de herramientas superior, la parte izquierda para la configuración de todos los parámetros y el área de impresión, donde se visualiza lo que se imprimirá.

El área de impresión es una ventana donde se representa mediante un esquema de cuadros de distinto color el área de impresión, sobre el que se situarán los modelos a imprimir.

Tabla 18. Botones de ventana principal en Cura.

BOTÓN	ACCIONES/ OPCIONES
	Abre el modelo 3D del archivo elegido y lo muestra dentro del área de impresión,
	Al pulsar este botón, si la impresora no está conectada, el programa salvará la impresión como un archivo G-Code, el cual se podrá exportar a una tarjeta SD y ser impreso desde el lector de tarjetas. En caso de estar la impresora conectada, este botón iniciará la conexión con la impresora y se abrirá un submenú para imprimir el modelo.
	Con este botón se pueden subir los modelos a un repositorio de piezas llamado <i>Youmagine</i> , en el cual, los usuarios comparten sus modelos.
	<p>Este botón desplegable ofrece las posibles opciones de visualización de la pieza:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Normal, en la que se ve una pieza sólida. Esta es la vista por defecto. - <i>Overhang</i>, en el que se visualizan las zonas con un ángulo máximo superior al configurado. Útil para ver las zonas problemáticas antes de la impresión. - <i>Transparent</i>, opción en la que la figura se torna transparente, permitiendo ver a través de ella. - <i>X-Ray</i>, similar a <i>transparent</i>, pero mostrando cavidades o elementos internos de las propias piezas. - <i>Layers</i>, que mostrará el diseño por capas, pudiendo observar cómo se realizará la impresión virtualmente, pudiendo encontrar zonas con dificultad de impresión.

BOTÓN	ACCIONES/ OPCIONES
	<p>Permite rotar el modelo en cualquiera de los tres ejes, en pasos de 15°, pudiendo volver al punto de origen del modelo, o apoyarlo sobre su parte plana.</p>
	<p>Esta opción permite el escalado del modelo 3D, haciéndolo proporcional en cada eje o modificándolo con una dimensión en cada uno. Se puede volver a la escala inicial y también escalar el modelo al máximo de volumen de impresión.</p>
	<p>Esta opción permite realizar un espejo del modelo en cualquiera de los tres ejes de coordenadas.</p>

Al hacer clic con el botón derecho sobre uno de los modelos, se encuentra una opción muy útil, como es Multiply Objects, opción que realizará copias exactas del modelo. Se puede elegir el número de copias que se desean, con el único límite del área de impresión.

D. CONFIGURACIÓN DE LA LAMINACIÓN DEL MODELO.

Esta configuración es la más importante, pues unos correctos parámetros de laminación son igual de importantes que una correcta calibración de la impresora. Para la óptima configuración de dichos parámetros se han de realizar muchas pruebas, hasta que el resultado obtenido sea el esperado.

En el presente manual se indican los parámetros óptimos conseguidos para la impresora objeto de este Trabajo Fin de Grado con un extrusor.

En la parte izquierda de la pantalla se hallan estas opciones de configuración, divididas en cuatro pestañas, que a continuación se detallan.

a. **BASIC.**

Ilustración 225. Pestaña *Basic*.

- *Quality*:
 - a. *Layer Height* (altura de capa): Indica el grosor de la capa de impresión. Con una menor altura de capa se consigue mucha mayor calidad, pero el tiempo de impresión aumenta considerablemente. Este valor no ha de superar el diámetro de salida del *nozzle*, pues el resultado sería una mala unión entre capas.

- b. *Shell thickness* (grosor de los bordes): Determina el grosor del borde de las piezas. Este valor ha de ser el diámetro de la salida del *nozzle* o un múltiplo de dicho valor.
 - c. *Enable retraction* (habilitar retracción): Sirve para realizar una determinada retracción del material de extrusión, para así evitar la posible deposición de plástico durante el movimiento sin extrusión del cabezal de impresión.
- *Fill*:
- a. *Bottom/ Top thickness* (grosor de capas inferior y superior): Indica el grosor de las capas inferior y superior. Estas capas siempre son macizas y no se ven afectadas por el parámetro de relleno del modelo.
 - b. *Fill density* (densidad de relleno): Este valor indica el porcentaje de relleno de la figura en tanto por uno. Va directamente unido al tiempo de impresión, pues a mayor porcentaje de relleno, mayor tiempo de impresión. El valor 0 indica una pieza totalmente hueca, mientras que el valor 1 imprime una pieza totalmente maciza.
- *Speed and temperature*:
- a. *Print speed* (velocidad de impresión): Fija la velocidad a la que se desplazará el extrusor durante la impresión. A una mayor velocidad, menor calidad de impresión. No todas las impresoras tienen la misma velocidad óptima, por lo que habrá que realizar pruebas para conseguir el valor idóneo.
 - b. *Printing temperatura* (temperatura de impresión): Este valor indica la temperatura a la que se va a calentar el extrusor para la impresión. En función del material a utilizar, esta temperatura variará dentro de un rango.
 - c. *Bed temperature* (temperatura de la cama caliente): Fija la temperatura a la que se calentará la base calefactora. Según el material a utilizar el valor de calentamiento variará.
- *Support*:
- a. *Support type* (tipo de soporte): En este desplegable se puede seleccionar que el software cree soportes donde se considere necesario. Esta opción es interesante para la creación de partes sin apoyo en los modelos. Se podrá

seleccionar que se realicen soportes solo apoyados sobre la base o en cualquier lugar de la pieza.

- b. *Platform adhesion type* (plataforma de adhesión): Mediante esta opción se puede realizar un base para la pieza que mejore la adherencia de la pieza mediante dos opciones, *brim*, que crea una visera en todos los bordes de la pieza y *raft*, que dispondrá una base completa para el apoyo de la pieza., esta última, con el inconveniente del no tan buen acabado del modelo como si se hiciera sobre el vidrio de la base.

- *Filament:*

- a. *Diameter* (diámetro): Establece el diámetro del material que se utilizará para la impresión.
- b. *Flow* (multiplicador del flujo del filamento): Mediante este parámetro se corrige la cantidad de plástico extruido, ya sea por estar mal calibrado el extrusor o por ser el filamento de un diámetro ligeramente distinto al indicado.

b. **ADVANCED.**

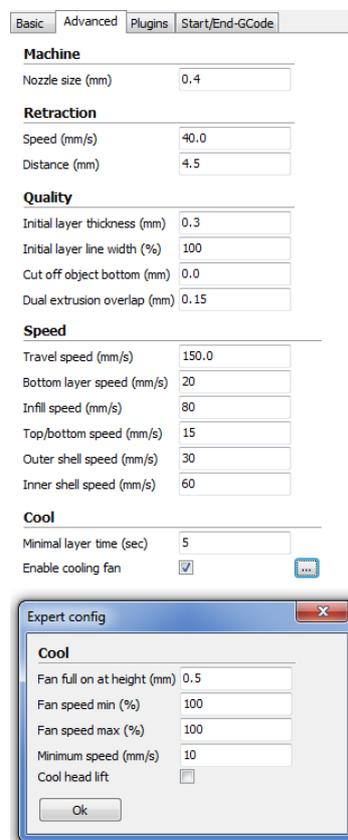


Ilustración 226. Pestaña *Advanced*.

- *Machine:*
 - a. *Nozzle size* (tamaño de la salida del extrusor): Se indicará el diámetro de la boquilla de salida del extrusor.
- *Retraction:*
 - a. *Speed* (velocidad): define la velocidad a la que se realiza la retracción del filamento. Una velocidad alta puede ser contraproducente.
 - b. *Distance* (distancia): longitud que se retraerá el filamento.
- *Quality:*
 - a. *Initial layer thickness* (grosor de capa inicial): Indica el grosor de la primera capa de filamento. Para que tenga el mismo grosor que el resto de capas se le asignará el valor 0.
 - b. *Initial layer width* (anchura de capa inicial): Indica en porcentaje el grosor de la capa inicial.
 - c. *Cut off Object bottom* (corte de base de objeto): Parámetro que indica a la altura que se quiere empezar la impresión, cortando la figura a la altura en milímetros que indique este parámetro.
 - d. *Dual extrusión overlap* (superposición en doble extrusión): Indica en milímetros la cantidad de material que se superpone sobre el otro.
- *Speed:*
 - a. *Travel speed* (velocidad de desplazamiento): Velocidad a la que se desplazará el cabezal de extrusión mientras no esté realizando deposición de filamento.
 - b. *Bottom layer speed* (velocidad de impresión de la base): Fija la velocidad a la que será impresa la primera capa. Es recomendable realizar la primera capa con una velocidad baja para mejorar la adherencia de la pieza a la base.
 - c. *Infill speed* (velocidad de relleno): Velocidad a la que se depositará el material en el relleno de la pieza. No afecta a la calidad exterior de la pieza.
 - d. *Outer shell speed* (velocidad de la capa externa): Velocidad a la que se depositará el material en la capa externa de la pieza. A menor velocidad, mejor acabado.
 - e. *Inner shell speed* (velocidad de los bordes interiores de las capas): Establece la velocidad de los bordes interiores, aquellos que no se ven.

- *Cool:*
 - a. *Minimal layer time* (tiempo mínimo de capa): Indica el tiempo mínimo para terminar una capa antes de comenzar con la siguiente. Si la capa no se ha enfriado lo suficiente antes de comenzar con la siguiente, el acabado no será óptimo.
 - b. *Enable cooling fan* (habilitar ventilador de capa): Se habilita el ventilador de capa en caso de existir. Dicho ventilador ayuda a un enfriado uniforme, consiguiendo un acabado mejor que sin él.
 - c. **PLUGINS.**

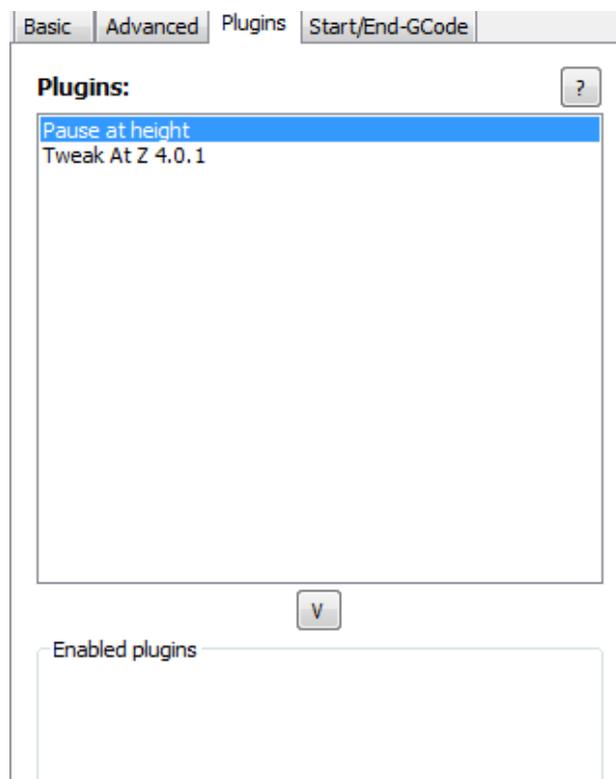


Ilustración 227. Pestaña *Plugins*.

Los plugins son pequeños programas que se fusionan con el programa principal que dotan de funcionalidades extra al software. Por defecto, Cura tiene instalados dos plugins.

- *Pause at heigth* (pausa a una altura): Pausa la impresión a la altura indicada.
- *Tweak at Z* (cambio en Z): Cambia los valores de impresión a una determinada altura.

d. START/ END GCODE.

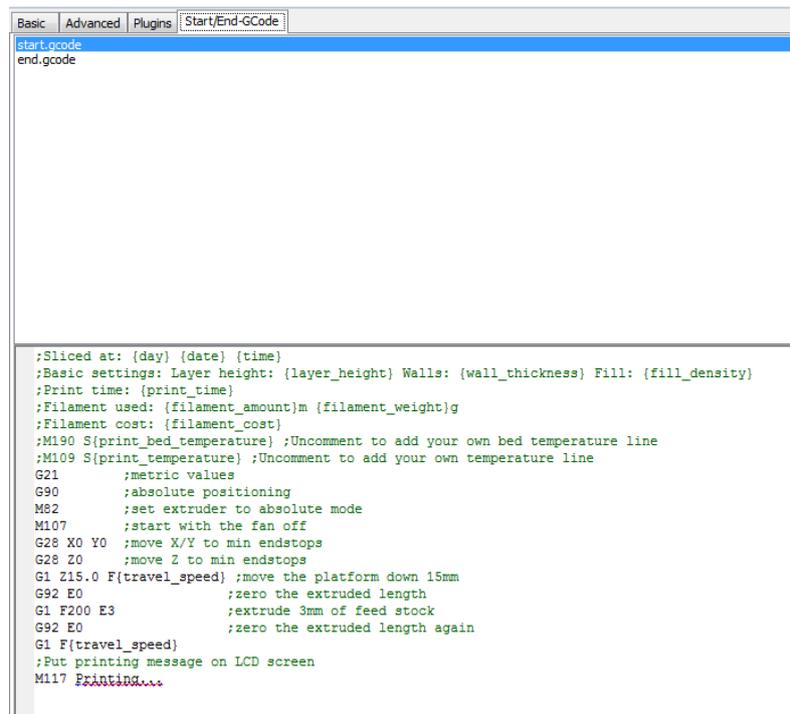


Ilustración 228. Pestaña Start/end Gcode.

En esta pestaña se permite la introducción de líneas de código G en el inicio o al final del archivo Gcode generado para la impresión de la pieza.

E. BARRA DE MENÚ.

En la barra de menú se pueden encontrar todas las opciones disponibles tanto para la impresora como para el manejo del programa. Se encuentra dividido en cinco submenús, los cuales se detallan a continuación:

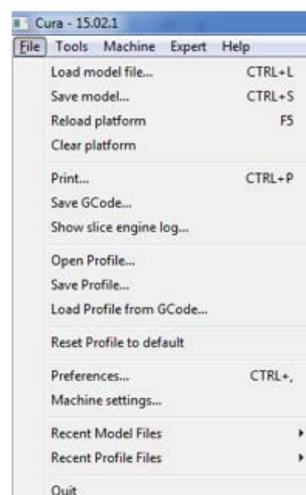


Ilustración 229. Menú File.

a. MENÚ *FILE*.

- *Load/ Save model file* (cargar/salvar archivo de modelo): Abrir/ salvar un modelo desde/ a un archivo que pueda ser leído por el software.
- *Reload platform* (recargar plataforma): Actualiza el espacio de impresión.
- *Clear platform* (limpia plataforma): Con este comando se quitarán todos los objetos existentes en el área de trabajo.
- *Print* (imprimir): Con esta opción se abrirá una ventana desde la que se podrán imprimir los modelos que estén en el área de trabajo.
- *Save Gcode* (salvar Gcode): Esta opción salva en un archivo con formato Gcode los medelos existentes en el área de impresión para introducirlos en una tarjeta SD e imprimir desde la propia impresora.
- *Show slice engine log* (mostrar registro del motor de corte): Abre una ventana mostrando el registro del resultado del corte de los modelos existentes en el área de impresión.
- *Open/ save profile* (abrir/ salvar perfil): Permite guardar configuraciones distintas para distintos filamentos o máquinas, sin tener que volver a cambiar todos los parámetros.
- *Load profile from Gcode* (abrir perfil desde Gcode): permite recuperar un perfil desde un archivo Gcode.
- *Reset profile to default* (reiniciar al perfil por defecto): Vuelve a la configuración inicial de perfil.
- *Preferences* (preferencias): Muestra la ventana inferior con las siguientes opciones:

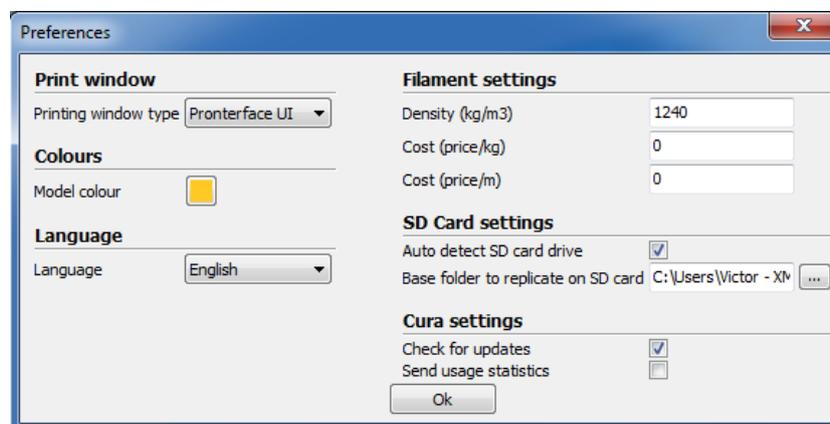


Ilustración 230. Ventana *preferences*.

- a. *Print window* (ventana de impresión): Permite elegir entre dos vistas de impresión distintas, una simple y otra con mayor número de opciones, estilo *Pronterface*, otro software de impresión 3D.
 - b. *Colours* (colores): En esta opción se puede elegir el color de representación del modelo en la vista de la ventana principal.
 - c. *Language* (lenguaje): Elección del idioma del programa. Es posible la elección entre inglés, alemán, francés, turco y ruso.
 - d. *Filament settings* (configuración del filamento): Muestra opciones para configurar la densidad del filamento y el coste por kilogramo o metro de material.
 - e. *SD card settings* (opciones de tarjeta SD): apartado para la configuración de la tarjeta SD, su autodetección y el directorio en el que se realizarán las imágenes de la tarjeta.
 - f. *Cura settings* (configuración de Cura): Muestra opciones de Cura tales como el chequeo de actualizaciones y el envío de datos estadísticos.
- *Machine settings* (configuración de la impresora): Muestra un menú como en la imagen inferior en el que cada pestaña es cada una de las impresoras configuradas. Para cada una de ellas se guarda una configuración distinta de los siguientes parámetros:

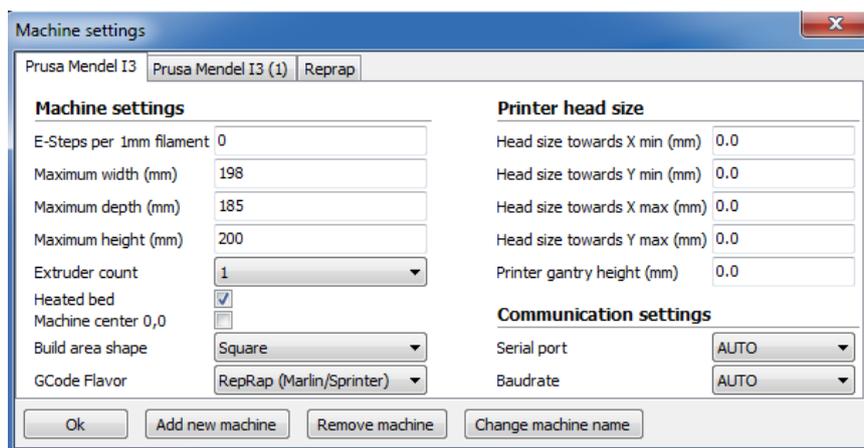


Ilustración 231. Menú *Machine settings*.

- a. *Machine settings* (configuración de la máquina):
 - i. *E-steps per 1mm filament* (pasos por cada milímetro de filamento): Pasos que ha de dar el motor para extruir un milímetro de

- filamento. Es recomendable que este valor esté definido en el firmware de la impresora y no aquí.
- ii. *Maximum width/ depth/ height* (máxima longitud/ profundidad/ altura): Define en milímetros las cotas máximas a las que puede llegar cada eje.
 - iii. *Extruder count* (número de extrusores): Número de extrusores que posee la impresora.
 - iv. *Heated Bed* (cama calefactada): Defina si la impresora tiene cama caliente o no.
 - v. *Machine center 0,0* (centro de la máquina 0,0): Mediante la habilitación de esta opción, sitúa el origen de coordenadas en el centro de la impresora.
 - vi. *Build area shape* (forma del área de impresión): Esta opción define la forma que posee el área de impresión. Las opciones para la elección son cuadrada o circular.
 - vii. *Gcode flavor* (reconocimiento Gcode): En función de la impresora y del firmware cargado en ella, reconocerá una variante del código G u otra distinta, pues cada firmware tiene órdenes de código G específicas.
 - viii. *Printer head size* (tamaño del cabezal de impresión): En este apartado se indica el tamaño desde la boquilla de salida del extrusor para, en caso de realizar múltiples piezas, que éste no pueda ser invadido por ningún objeto.
 - ix. *Communication settings* (parámetros de comunicación): Dentro de este apartado se encuentra la gestión de la comunicación de la impresora con el puerto serie asignado por el ordenador, tanto el número de puerto como los baudios a los que se realiza la conexión.

b. MENÚ *TOOLS*.

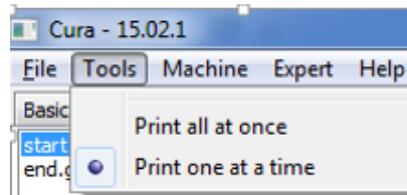


Ilustración 232. Menú *tools*.

Existen dos opciones de impresión:

- Por un lado, la opción por defecto es la impresión de todas las piezas que se han colocado en el área de impresión al mismo tiempo.
- Por otro, el software es capaz de imprimir cada pieza por separado, es decir, nunca empieza una pieza sin haber terminado la anterior. El beneficio de esta opción es que si en algún momento falla la impresión, ésta se puede detener sin arruinar toda la impresión y desechar la impresión entera con el consiguiente coste de tiempo y material.

c. MENÚ *MACHINE*.

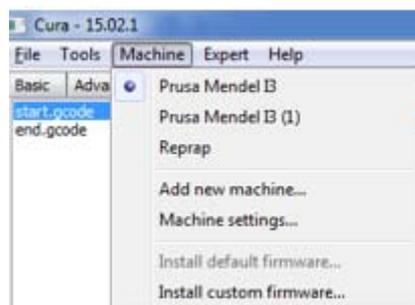


Ilustración 233. Menú *machine*.

En este menú se podrá seleccionar la impresora que se usará para la impresión. Cabe destacar que se puede configurar la misma impresora con varios perfiles de área de impresión, si se posee uno o más extrusores, o, para el caso descrito anteriormente, señalar las distancias que ocupa el extrusor para la impresión pieza por pieza.

d. MENÚ *EXPERT*.

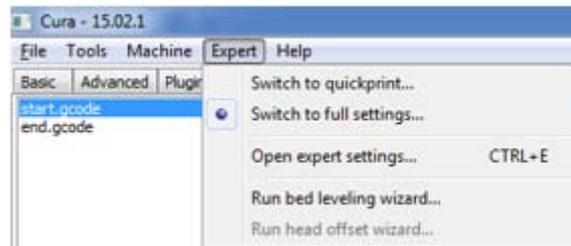


Ilustración 234. Menú *expert*.

- *Switch to quickprint* (cambio a impresión rápida): Esta opción permite definir únicamente los parámetros básicos de impresión para usuarios no avanzados.
- *Switch to full settings* (Cambio a configuración experta): Con esta opción seleccionada, pueden controlarse todos los parámetros de configuración de la impresora y de la impresión, es decir, los definidos en este manual.
- *Open expert settings* (abrir configuración experta): Abre la ventana de la ilustración siguiente:

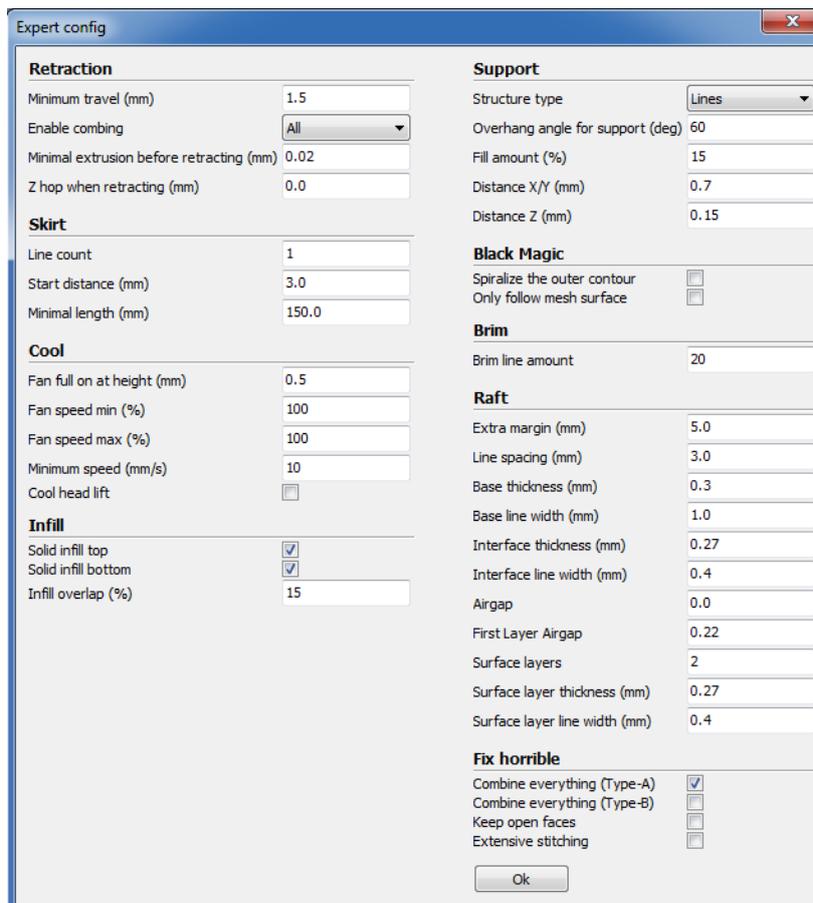


Ilustración 235. Ventana *expert settings*.

- a. *Retraction*:
 - i. *Minimum travel* (desplazamiento mínimo): Desplazamiento mínimo necesario para que se efectúe la retracción. Por debajo de este valor de desplazamiento, no se efectuará.
 - ii. *Enable combining*: Activando esta opción, la boquilla de salida del extrusor nunca pasará sobre los agujeros creados en la pieza.
 - iii. *Minimal extrusión before retracting* (mínima extrusión antes de la retracción): Longitud de filamento mínima que ha de ser extruida antes de realizar una retracción de filamento.
 - iv. *Z hop when retracting* (elevación del eje Z al retraer): Eleva el eje Z la cantidad de milímetros indicada para realizar la retracción y efectuar el desplazamiento. Es una opción muy útil en caso de tener alguna pieza con mucho detalle, pero por el contrario, incrementa mucho el tiempo de impresión.
- b. *Skirt*:
 - i. *Line count* (contador de líneas): El *skirt* o falda es una impresión realizada en el contorno de la pieza para evitar que la primera capa pueda salir defectuosa, ya que prepara el filamento en condiciones óptimas para la impresión. Esta opción fija el número de vueltas que tendrá la falda alrededor de la pieza.
 - ii. *Start distance* (distancia de comienzo): Establece la distancia a la que se realizará la falda.
 - iii. *Minimal length* (longitud mínima): Esta opción fija la longitud mínima que tendrá la falda. Indicado para piezas pequeñas que no posean mucho perímetro. En este caso, el número de vueltas alrededor de la pieza será mayor.
- c. *Cool*:
 - i. *Fan full on at height* (ventilador activo a altura): Marca la altura a partir de la cual el ventilador de capa estará activo.
 - ii. *Fan speed min/ max* (velocidad del ventilador mínima/ máxima): Marca las velocidades mínima y máxima a la que funcionará el ventilador.

- iii. *Minimum speed* (velocidad mínima): Este parámetro indica la velocidad mínima a la que se podrá realizar la impresión. A velocidades muy bajas, la deposición de filamento puede no enfriar correctamente, llegando a deformar la pieza.
 - iv. *Cool head lift* (elevación de cabezal para enfriamiento): Marcando esta opción, si no se ha cumplido el tiempo mínimo de enfriamiento de capa, el extrusor subirá de altura hasta completar dicho tiempo.
- d. *Infill*:
- i. *Solid infill top/ bottom* (relleno sólido en capas inferior/ superior): Activando estas opciones, los rellenos de la primera y última capa serán completos.
 - ii. *Infill overlap* (solapamiento de relleno): Esta opción marca el porcentaje que se solaparán las paredes exteriores con el relleno de la pieza.
- e. *Support*:
- i. *Structure type* (tipo de estructura): Selección del tipo de estructura para los soportes auxiliares. Se podrá elegir entre realizarlo en tipo cuadrícula o tipo línea.
 - ii. *Overhang angle for support* (ángulo máximo para soportes): Indica el ángulo máximo a partir del cual se realizarán soportes, medido desde la vertical.
 - iii. *Fill amount* (cantidad de relleno): Establece el porcentaje de relleno para realizar el soporte.
 - iv. *Distance X/ Y* (distancia X/ Y): Establece la separación entre los bordes de la pieza y los soportes.
 - v. *Distance Z* (distancia Z): Separación en altura entre el soporte y la pieza. Es recomendable colocar un valor que sea aproximadamente la mitad de la altura de capa.
- f. *Black Magic*:
- i. *Spiralize the outer contour*: Imprime el contorno del objeto con una base sólida, es decir, convierte en hueco un modelo sólido.

- ii. *Only follow the mesh surface* (Solo sigue la superficie mallada): Realiza la impresión del contorno sin tener en cuenta base, capa superior y relleno.
- g. *Brim*:
 - i. *Brim line amount* (cantidad de línea): Este valor indica el ancho de la visera que se crea para asegurar la correcta adhesión de la pieza a la base de impresión. A mayor valor mejor será la adhesión.
- h. *Raft*:
 - i. *Extra margin* (margen extra): Indica el margen que sobresaldrá la base ejecutada del área ocupada por el objeto.
 - ii. *Line spacing* (espaciado de líneas): Determina la distancia entre líneas de la malla auxiliar.
 - iii. *Base thickness* (grosor de la base): Fija el grosor que tendrá la base auxiliar para la adhesión de la pieza.
 - iv. *Base line width* (anchura de la línea de la base): Establece la anchura de las líneas de la base. A mayor grosor de líneas, mayor adherencia. Es recomendable que dichas líneas sean múltiplos del ancho de la boquilla de salida.
 - v. *Interface thickness* (grosor de la capa intermedia): Fija el grosor de la capa intermedia.
 - vi. *Interface line width* (Espesor de la línea intermedia): Determina el grosor de las líneas de la capa intermedia.
 - vii. *Airgap*: Modifica el espacio entre la última capa de la base y la primera capa del objeto. Este espacio es el que determinará la facilidad para despegar el modelo de la base.
 - viii. *Surface Layers* (capas de superficie): Determina el número de capas de la parte superior de la base.
- i. *Fix horrible*:
 - i. *Combine everything type A* (combina todo tipo A): Une las partes del modelo procurando mantener los orificios del modelo intactos.
 - ii. *Combine everything type B* (combina todo tipo B): Une al igual que la parte anterior todas las partes del modelo, pero sin respetar los agujeros internos, conservando la capa exterior.

- iii. *Keep open face* (conserva caras abiertas): Conserva abiertos los pequeños huecos u orificios que pudiera tener el modelo.
- iv. *Extensive stitching* (puntadas extensivas): Cura reparará los agujeros o grietas del modelo.
- *Run bed leveling wizard* (abre asistente de nivelación de la base): Esta opción abre un asistente que ayuda a la correcta nivelación de la cama con respecto al extrusor, midiendo en cinco puntos de la cama. Esta nivelación se realiza apretando o desapretando los tornillos existentes en las esquinas de la cama, y haciendo pasar un folio entre el extrusor y la base para la medición de la distancia óptima a la que se tiene que encontrar la cama.

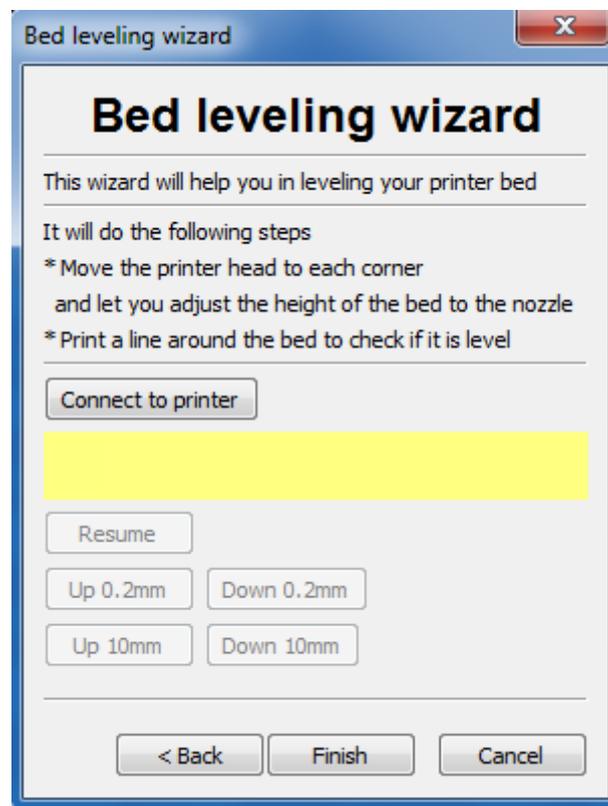


Ilustración 236. Asistente de nivelación de base.

e. **MENÚ *HELP*.**

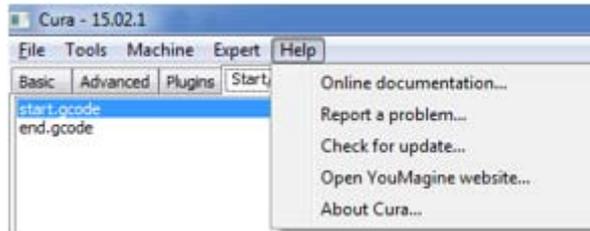


Ilustración 237. Menú *Help*.

Este menú es habitual en todo el software. Existe una documentación en línea que puede consultarse en cualquier momento (en idioma inglés), se puede enviar a los desarrolladores un problema encontrado, existe un botón para buscar actualizaciones del programa y por último, una línea donde se muestran los detalles del programa.

