

## RESUMEN

---

Las tecnologías de impresión 3D están experimentando recientemente un gran crecimiento, ganando importancia en diferentes campos de investigación y en el mercado y ampliando la diversidad de sus aplicaciones.

Por este motivo, este proyecto consiste en el diseño de un kit de impresora 3D de la mayor calidad posible, mejorando la precisión de los kits actuales. El objetivo principal del proyecto es que esta impresora sea de uso personal, de forma que se traslada un sistema de fabricación desde la industria al domicilio particular. Al tratarse de un kit, se intenta que el usuario construya su propia impresora, y que de esta forma pueda adquirir mayor conocimiento sobre el funcionamiento de la máquina. Esto a su vez permite disminuir los costes de fabricación de la impresora y de las piezas y añade un alto grado de personalización.

En concreto este trabajo engloba el diseño de la parte mecánica de la impresora, centrándose fundamentalmente en el mecanismo de impresión. En el proyecto se estudia cada parte de la impresora, analizando cada uno de sus componentes y su distribución dentro de la impresora.

Mediante el programa de diseño *SolidWorks* se ha llevado a cabo el modelado mecánico de la impresora. Este diseño corresponde al prototipo de la impresora 3D. A partir del cual deberá realizarse un posterior estudio que verifique su correcto funcionamiento para llevar a cabo la fabricación de las mismas.

Para su diseño, el proyecto se ha inspirado en el proyecto *RepRap*. Este consiste en un conjunto de impresoras 3D que pueden ser auto-replicables. El resultado obtenido del presente trabajo es una impresora de tamaño reducido, similar a dichas impresoras pero sin la característica de poder fabricarse a sí misma. Esto por lo tanto supone un precio más elevado pero la impresora ofrece mayor precisión y duración de vida debido a una mayor resistencia.



## SUMARIO

---

Resumen.....	1
Sumario.....	3
Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas .....	9
Glosario .....	11
<b>1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1. Objeto del proyecto .....	13
1.2. Alcance .....	13
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. Razones de negocio .....	14
1.3.2. Motivación personal.....	14
<b>2. Estudio de precedentes .....</b>	<b>16</b>
2.1. Tecnologías de impresión 3D .....	16
2.2. Materiales para la impresión 3D.....	21
2.3. Impresoras 3D.....	23
2.3.1. Impresoras de uso doméstico.....	23
2.3.2. Impresoras de uso industrial .....	31
<b>3. Especificaciones técnicas .....</b>	<b>34</b>
<b>4. Diseño conceptual .....</b>	<b>36</b>
4.1. Cabezal de extrusión .....	39
4.2. Configuración de los ejes.....	40
4.2.1. Distribución de los distintos grados de libertad .....	40
4.2.2. Disposición de los ejes.....	42
4.2.3. Forma del chasis .....	43
<b>5. Diseño detallado.....</b>	<b>45</b>
5.1. Descripción del conjunto completo.....	45
5.2. Chasis .....	46
5.2.1. Evaluación de la posibilidad de incorporar tapa .....	48
5.2.2. Detalle de las piezas del chasis.....	48

5.2.3.	Perfiles estructurales <i>HEPCO</i> .....	53
5.2.4.	Embellecedores <i>HEPCO</i> .....	55
5.2.5.	Abrazaderas <i>HEPCO</i> .....	55
5.3.	Eje X.....	56
5.3.1.	Motores.....	57
5.3.1.1.	Elección de los motores.....	59
5.3.2.	Elementos de transmisión de movimiento.....	62
5.3.2.1.	Correas dentadas (síncronas).....	62
5.3.2.2.	Rodamientos lineales.....	64
5.3.3.	Soportes y sujeciones.....	67
5.3.4.	Detalle de las piezas del eje X.....	68
5.4.	Eje Y.....	73
5.4.1.	Elección del motor para el eje Y.....	74
5.4.2.	Cálculo de deformaciones.....	75
5.4.3.	Torsión del eje Y.....	78
5.4.4.	Rodamientos de bolas Xiros B180 <i>IGUS</i> .....	79
5.4.5.	Detalle de las piezas del eje Y.....	80
5.5.	Eje Z.....	85
5.5.1.	Plataforma de impresión.....	87
5.5.2.	Detalle de las piezas del eje Z.....	88
5.6.	Vistas isométricas de la impresora 3D.....	93
6.	<b>Estudio económico</b> .....	<b>95</b>
7.	<b>Planificación</b> .....	<b>98</b>
8.	<b>Impacto ambiental</b> .....	<b>103</b>
9.	<b>Conclusiones</b> .....	<b>106</b>
	<b>Agradecimientos</b> .....	<b>108</b>
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>109</b>
	Referencias bibliográficas.....	109
	Bibliografía complementaria.....	109
	<b>ANEXO 1. Visitas</b> .....	<b>114</b>
A1.1.	Visita RepRap ETSEIB.....	114

A1.2.	Visita Fundació CIM.....	115
A1.3.	Visita HP Sant Cugat.....	118
<b>ANEXO 2.</b>	<b>Planos.....</b>	<b>119</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. 1. Prótesis realizada con impresión 3D. Fuente: <i>www.unocero.com</i> .....	14
Figura 1. 2. Impresión 3D de chocolate. Fuente: <i>www.impresoras3d.com [1]</i> .....	14
Figura 2. 1. Esquema del proceso de SLA. Fuente: <i>www.CustomPartNet.com [2]</i> .....	17
Figura 2. 2. Proceso de SLS. Fuente: <i>www.CustomPartNet.com [2]</i> .....	18
Figura 2. 3. Proceso de FDM. Fuente: <i>www.CustomPartNet.com [2]</i> .....	18
Figura 2. 4. Proceso de LOM. Fuente: <i>www.CustomPartNet.com [2]</i> .....	19
Figura 2. 5. Ejemplos de piezas realizadas mediante SLA. Fuente: <a href="http://protocim.wordpress.com/">http://protocim.wordpress.com/</a> .....	19
Figura 2. 6. De izquierda a derecha: ejemplos de piezas hechas con FDM, SLS y LOM. Fuente: <i>Desktop Engineering</i> .....	20
Figura 2. 7. Impresiones 3D de metal realizadas por Siemens. Fuente: <i>www.ABC.com</i> .....	22
Figura 2. 8. Impresora BCN3D+. Fuente: <i>www.RepRapBCN.com [4]</i> .....	24
Figura 2. 9. Impresora Prusa i3. Fuente: <i>3D Hacker</i> .....	25
Figura 2. 10. Impresora Mendel Max 1.5. Fuente: <i>www.UltiBots.com [5]</i> .....	26
Figura 2. 11. Impresora <i>uPrint SE Plus</i> . Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	32
Figura 2. 12. Por orden: Glacier Summit, SLS 3D Printer y Freeform PRO 75. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	33
Figura 4. 1. Análisis funcional.....	37
Figura 4. 2. Desglose de las partes de una impresora 3D. Fuente Ilustraciones: <i>RepRapBCN [4]</i> .....	38
Figura 4. 3. Cabezal de extrusión de la RepRap BCN3D+ y su colocación sobre el eje X. Fuente: <i>RepRapBcn [4]</i> .....	39
Figura 4. 3. Boquilla de la <i>Fundació CIM</i> . Fuente: <i>3D print Barcelona [4]</i> .....	39
Figura 4. 5. Configuraciones robóticas comunes. Fuente: <i>Monografías</i> .....	40
Figura 4. 6. Impresora cartesiana. Fuente: <i>www.Three3d.com [3]</i> .....	40
Figura 4. 7. Impresora Delta, SCARA e impresora Polar. Fuente: <i>Three3d [3]</i> .....	41
Figura 4. 8. Representaciones de las posibles formas de estructura.....	43
Figura 4. 9. Esquema del diseño de la estructura escogido.....	44
Figura 5. 1. Diseño final de la impresora 3D .....	45
Figura 5. 2. Representación del área de impresión y el espacio envolvente de la impresora .....	46
Figura 5. 3. Sección del perfil estructural.....	47
Figura 5. 4. Chasis de la impresora 3D.....	47

Figura 5. 5. Vista isométrica del Chasis. Escala 1:5 .....	49
Figura 5. 6. Vista isométrica pieza 1. Escala: 2:1 .....	50
Figura 5. 7. Vista isométrica pieza 2. Escala: 2:1 .....	50
Figura 5. 8. Vista isométrica pieza 3. Escala: 1:1 .....	51
Figura 5. 9. Vista isométrica piezas 4-7. Escala: 1:5.....	51
Figura 5. 10. Vista isométrica pieza 8. Escala: 1:1 .....	52
Figura 5. 11. Vista isométrica pieza 9. Escala: 2:1 .....	52
Figura 5. 12. Vista isométrica pieza 10. Escala: 2:1.....	53
Figura 5. 13. Dimensiones de los perfiles (mm). Fuente: <i>HEPCO</i> .....	53
Figura 5. 14. Desviaciones de los perfiles. Fuente: <i>HEPCO</i> .....	54
Figura 5. 16. Dimensiones de las abrazaderas (mm). Fuente: <i>HEPCO</i> .....	55
Figura 5. 15. Dimensiones de los embellecedores (mm). Fuente: <i>HEPCO</i> .....	55
Figura 5. 17. Detalle del soporte derecho.....	56
Figura 5. 18. Eje X de la impresora 3D.....	57
Figura 5. 19. Tipos de motores paso a paso. Fuente: <i>www.PBCLinear.com [6]</i> ....	59
Figura 5. 20. Esquema del sistema. Fuente. <i>Oriental motor</i> .....	59
Figura 5. 21. Curvas de rendimiento de un NEMA 17. Fuente: <i>www.PBCLinear.com</i> .....	60
Figura 5. 22. Motor de eje .....	61
Figura 5. 23. Dimensiones en mm del NEMA 17. Fuente: <i>www.PBCLinear.com</i> . 61	
Figura 5. 24. Conexiones del motor NEMA 17. Fuente: <i>www.PBCLinear.com</i> .....	61
Figura 5. 26. Dimensiones de las correas dentadas (mm entre paréntesis). Fuente: <i>www.Stockdriveproducts.com</i> .....	63
Figura 5. 25. Correa dentada. Fuente: <i>www.Stockdriveproducts.com</i> .....	63
Figura 5. 27. Tipos de poleas. Fuente: <i>www.Stockdriveproducts.com</i> .....	64
Figura 5. 28. Dimensiones de las poleas. Fuente: <i>www.Stock drive products.com</i> .....	64
Figura 5. 29. Rodamiento eLINE. Fuente: <i>Rexroth Bosch AG [8]</i> .....	65
Figura 5. 30. Esquema del rodamiento lineal. Fuente: <i>Rexroth Bosch AG [8]</i> .....	66
Figura 5. 31. Vista isométrica del Eje X. Escala 1:2 .....	69
Figura 5. 32. Vista isométrica pieza 11. Escala: 1:1.....	70
Figura 5. 33. Vista isométrica pieza 12. Escala: 1:2.....	70
Figura 5. 34. Vista isométrica pieza 17. Escala: 1:1.....	71
Figura 5. 35. Vista isométrica pieza 18. Escala: 1:2.....	71
Figura 5. 36. Vista isométrica .....	72
Figura 5. 37. Vista isométrica .....	72
Figura 5. 38. Vista isométrica piezas 21 y 30. Escala: 2:1 .....	73
Figura 5. 39. Eje Y de la impresora 3D.....	74
Figura 5. 40. Curvas de rendimiento de un NEMA 17. Fuente: <i>www.PBCLinear.com</i> .....	74

Figura 5. 41. Representación de la flecha en los ejes X e Y .....	76
Figura 5. 42. Representación de la flecha debida al peso propio .....	77
Figura 5. 43. Representación de la flecha debida a una fuerza central.....	77
Figura 5. 44. Torsión en el Eje Y trasero .....	78
Figura 5. 45. Rodamientos de bolas Xiros B180. Fuente: <i>www.igus.com</i> .....	79
Figura 5. 46. Vista isométrica del Eje Y. Escala 1:5 .....	81
Figura 5. 47. Vista isométrica piezas 26. Escala: 2:1.....	82
Figura 5. 48. Vista isométrica piezas 29. Escala: 2:1.....	82
Figura 5. 49. Vista isométrica piezas 31. Escala: 2:1.....	83
Figura 5. 50. Vista isométrica piezas 33. Escala: 2:1.....	83
Figura 5. 51. Vista isométrica piezas 34. Escala: 2:1.....	84
Figura 5. 52. Vista isométrica piezas 38. Escala: 2:1.....	84
Figura 5. 53. Vista isométrica piezas 40. Escala: 2:1.....	85
Figura 5. 54. Eje Z de la impresora 3D .....	86
Figura 5. 55. Vista explosionada de la plataforma de extrusión.....	86
Figura 5. 56. "Warping" en una pieza de ABS. Fuente: <i>www.deelip.com/?p=7151</i> .....	87
Figura 5. 57. Dimensiones en mm de la cama caliente MK2. Fuente: <i>RepRap Wiki</i> .....	88
Figura 5. 58. Vista isométrica del Eje Z. Escala 1:5 .....	89
Figura 5. 59. Vista isométrica pieza 41. Escala: 1:2.....	90
Figura 5. 60. Vista isométrica pieza 42. Escala: 2:1.....	90
Figura 5. 61. Vista isométrica pieza 46. Escala: 2:1.....	91
Figura 5. 62. Vista isométrica pieza 50. Escala: 1:2.....	91
Figura 5. 63. Vista isométrica pieza 51. Escala: 1:2.....	92
Figura 5. 64. Vista isométrica frontal. ....	93
Figura 5. 65. Vista isométrica trasera. ....	94
Figura 7. 1. Cronograma de la programación temporal del proyecto.....	101
Figura 8. 1. Huella de carbono producida por la fabricación mediante impresión 3D e inyección de moldes. Fuente: <i>www.cuboyo.com/enviromental</i> .....	104
Figura 8. 2. Comparativa entre las emisiones del PLA y el ABS. Fuente: <i>www.Impresiontresde.com [10]</i> .....	105
Figura 8. 3. Filabot, sistema de extrusión de filamento. Fuente: <i>Cnet</i> .....	105
Figura A1. 1. A la izquierda, RepRapPrusa. A la derecha, BCN3D+.....	115
Figura A1. 2. Impresora 3D HP .....	118
Figura A1. 3. Mecanismo de limpieza de la impresora.....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 2. 1.</b> Tecnologías de fabricación aditiva .....	16
<b>Tabla 2. 2.</b> Comparación entre diferentes tecnologías.....	20
<b>Tabla 2. 3.</b> Comparativa entre ABS y PLA .....	21
<b>Tabla 2. 4.</b> Temperaturas en °C para diferentes materiales. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	22
<b>Tabla 2. 5.</b> Comparativa entre diferentes kits de impresoras 3D. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	27
<b>Tabla 2. 6.</b> Comparativa entre diferentes impresoras 3D de sobremesa. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	29
<b>Tabla 2. 7.</b> Descripción de la uPrint SE Plus. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	31
<b>Tabla 2. 8.</b> Comparativa entre tres impresoras 3D industriales. Fuente: <i>www.Thre3d.com [3]</i> .....	32
<b>Tabla 3. 1.</b> Especificaciones técnicas .....	35
<b>Tabla 4. 1.</b> Matriz de selección para las configuraciones estructurales .....	42
<b>Tabla 4. 2.</b> Tipos de estructuras según asignación de movimientos.....	42
<b>Tabla 4. 3.</b> Matriz de selección para los tipos de estructura .....	43
<b>Tabla 4. 4.</b> Matriz de selección para las formas de la estructura.....	44
<b>Tabla 5. 1.</b> Listado de piezas que componen el Chasis.....	48
<b>Tabla 5. 2.</b> Capacidad de carga de las conexiones de los perfiles. Fuente: <i>HEPCO</i> .....	56
<b>Tabla 5. 3.</b> Comparativa entre tipos de motores. ....	57
<b>Tabla 5. 4.</b> Tres tipos de motores paso a paso. Fuente: <i>Schneider Electric</i> .....	58
<b>Tabla 5. 5.</b> Fuerza de arranque y fricción de los rodamientos lineales. Fuente: <i>Bosch Rexroth AG</i> .....	60
<b>Tabla 5. 6.</b> Datos técnicos del NEMA 17. Fuente: <i>www.PBCLinear.com</i> .....	61
<b>Tabla 5. 7.</b> Series de perfiles de dientes trapezoidal según ISO/DIS 5296. Fuente: <i>Ingemecanica [7]</i> .....	62
<b>Tabla 5. 8.</b> Datos técnicos de las poleas. Fuente: <i>www.Stockdriveproducts.com</i> .....	64
<b>Tabla 5. 9.</b> Matriz para la selección de rodamientos lineales. Fuente: <i>Bosch Rexroth AG [8]</i> .....	65
<b>Tabla 5. 10.</b> Dimensiones de los rodamientos lineales eLINE Fuente: <i>Rexroth Bosch AG [8]</i> .....	66
<b>Tabla 5. 11.</b> Datos técnicos de los rodamientos lineales. Fuente: <i>Bosch Rexroth AG</i> .....	67
<b>Tabla 5. 12.</b> Alternativas para la organización de los cables .....	67
<b>Tabla 5. 13.</b> Listado de piezas que componen el Eje X.....	68

<b>Tabla 5. 14.</b> Tolerancias para el rango de diámetros de las guías. Fuente: <i>Bosch Rexroth AG</i> .....	75
<b>Tabla 5. 15.</b> Peso y E-I según el diámetro del eje.....	76
<b>Tabla 5. 16.</b> Dimensiones de los rodamientos. Fuente: <i>www.igus.com</i> .....	79
<b>Tabla 5. 17.</b> Capacidades de carga de los rodamientos. Fuente: <i>www.igus.com</i>	80
<b>Tabla 5. 18.</b> Listado de piezas que componen el Eje Y.....	80
<b>Tabla 5. 19.</b> Listado de piezas que componen el Eje Z.....	88
<b>Tabla 6. 1.</b> Coste total del prototipo.....	96
<b>Tabla 6. 2.</b> Coste total del proyecto y el prototipo.....	97
<b>Tabla 7. 1.</b> Programación temporal.....	99
<b>Tabla 9. 1.</b> Comparativa entre las especificaciones técnicas y el diseño de la impresora .....	106

## GLOSARIO

---

**ABS:** Acrilonitrilo Butadieno Estireno

**DLP:** Procesamiento digital de luz (*Digital Light Processing*)

**DSPC:** Proyección aglutinante (*Direct Shell Production Casting*)

**EBF3:** Fabricación por haz de electrones (*Electron Beam Freeform Fabrication*)

**EBM:** Fusión por haz de electrones (*Electron Beam Melting*)

**FDM:** Modelado por deposición fundida (*Fused Deposition Modeling*)

**LMD:** Sinterizado láser directo de metal (*Laser Metal Deposition*)

**LOM:** Laminado de capas (*Laminated Object Manufacturing*)

**PC:** Policarbonato

**PET:** Politereftalato de etileno

**PLA:** Poliacido láctico

**PS:** Poliestireno, polímero termoplástico

**RoHS:** Restricción de sustancias peligrosas (*Restriction of Hazardous Substances*)

**SGC:** Fotopolimerización por luz ultravioleta

**SHS:** Sinterización selectiva por calor (*Selective Heat Sintering*)

**SLA:** Estereolitografía (*Stereolithography*)

**SLM:** Fusión selectiva por láser (*Selective Laser Melting*)

**SLS:** Sinterización selectiva por láser (*Selective Laser Sintering*)



## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1. OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto consiste en el diseño del prototipo de un kit de impresora 3D de calidad superior a las disponibles actualmente. Con ello se pretende acercar esta nueva tecnología a un mayor número de usuarios y al entorno doméstico, ya que el propósito del proyecto es que esta nueva impresora pueda ser montada por el propio usuario interesado.

La meta del proyecto es conseguir entrar en el mercado actual de la impresión 3D. Siendo el nuevo diseño capaz de satisfacer las necesidades de los usuarios a un precio asequible, mejorando las características y los posibles inconvenientes que muestran los diseños actuales.

### 1.2. ALCANCE

El proyecto se basa en el diseño mecánico conceptual y de detalle de un prototipo de impresora 3D. Este diseño engloba tanto la elección de piezas (tales como perfiles estructurales, elementos de transmisión de movimiento o sujeciones para el cableado), como el diseño de piezas creadas específicamente para la impresora (como los elementos de sujeción y soporte) y la distribución espacial de estos elementos.

No se incluye, sin embargo, el diseño del cabezal de extrusión que se tomará uno existente como referencia, debido a la dificultad del componente y el tiempo reducido del proyecto. Por estos motivos, tampoco entra dentro del alcance del proyecto la construcción física del prototipo.

Para llevar a cabo el diseño, se realiza un estudio previo con el fin de analizar los aspectos a mejorar y descubrir los diseños ya existentes. El proyecto también contiene la planificación seguida para su elaboración, el estudio económico y el estudio medioambiental.

Tampoco se incluye la programación de software y la elección del hardware que formará parte del diseño final de la impresora. Estos aspectos y todo el conjunto electrónico de la impresora se llevan a cabo en un proyecto realizado en paralelo por Isabel Cañete Vela.

El proyecto se centra fundamentalmente en el mecanismo de impresión, sin estudiar en detalle la ubicación de los elementos correspondientes a la parte electrónica, como los enchufes o resistencias.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

### 1.3.1. RAZONES DE NEGOCIO

La principal razón de negocio para diseñar un kit de impresora 3D es competir en el amplio y creciente mercado actual de la tecnología de impresión.

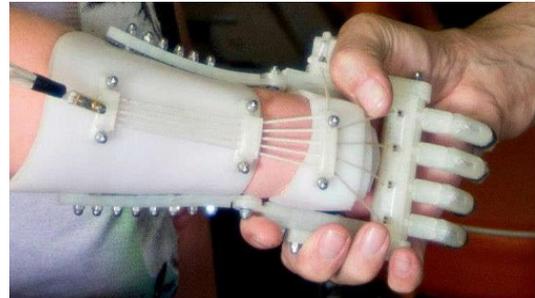
El interés en esta técnica de fabricación es debido a la gran cantidad de posibilidades que ofrece y las ventajas que proporciona, tales como la diversidad de productos que puede fabricar una única impresora 3D o los materiales posibles con los que se pueden imprimir. Además de la diversidad de campos de aplicación existentes que van desde la medicina hasta la gastronomía (Figuras 1.1 y 1.2). Este hecho destaca la importancia de profundizar en el estudio de dicha tecnología con el objetivo de mejorarla y ampliar sus aplicaciones.

Otro motivo por el que estudiar esta temática es el hecho de que es accesible para cualquier usuario que esté interesado, sin necesidad de disponer de un gran espacio para la instalación ni de grandes conocimientos. En consecuencia, el hecho de que la producción pueda realizarse en el entorno doméstico supone una reducción de los costes y la posibilidad de personalización.

Enfocado a las empresas, el motivo de invertir en esta tecnología de fabricación se centra en que es una alternativa económica para la fabricación de prototipos, que ofrece flexibilidad y versatilidad, es por ello que se ha calificado a esta tecnología como “la tecnología del futuro”.

### 1.3.2. MOTIVACIÓN PERSONAL

La motivación principal para llevar a cabo este proyecto reside en que la tecnología de impresión 3D es un área de interés que está experimentando un gran crecimiento. Este factor y el proyecto *RepRap* permiten disponer de una gran cantidad de información, lo cual facilita el estudio en profundidad de la tecnología.



**Figura 1. 1.** Prótesis realizada con impresión 3D. Fuente: [www.unocero.com](http://www.unocero.com)



**Figura 1. 2.** Impresión 3D de chocolate. Fuente: [www.impresoras3d.com](http://www.impresoras3d.com) [1]

Este proyecto se realiza con la idea de obtener los conocimientos necesarios con el fin de continuar en un futuro con el estudio del prototipado rápido. Tanto como el diseño de las máquinas que permiten obtener las piezas de forma rápida y fácil, como en el diseño de los prototipos mediante software de diseño 3D.

Además, permite reforzar y combinar los conocimientos adquiridos en diferentes materias como son “Expresión gráfica”, “Resistencia de materiales” o “Sistemas de fabricación”.

Con la realización del diseño mediante una herramienta de CAD se pretende mejorar la habilidad y ampliar los conocimientos sobre el programa *SolidWorks*.

Al mismo tiempo, realizar el proyecto en paralelo con Isabel Cañete permite visualizar la integración del producto y obtener una visión general del software utilizado.

## 2. ESTUDIO DE PRECEDENTES

### 2.1. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

El proceso de la impresión 3D permite crear objetos tridimensionales sólidos a partir de un modelo digital. Para ello existen un conjunto de tecnologías que se basan en la fabricación por adición. Esto es, mediante capas de material superpuestas sucesivamente. A continuación se exponen estas tecnologías de prototipado rápido y los materiales que se utilizan en cada una de ellas.

TIPO	TECNOLOGÍAS	SIGLAS	MATERIALES
Extrusión	Modelado por deposición fundida	FDM	- Termoplásticos - Aleaciones eutécticas de metales - Productos comestibles
	Sinterizado láser directo de metal	LMD	- La mayoría de aleaciones de metal
Granular	Sinterización selectiva por calor	SHS	- Termoplástico en polvo
	Sinterización selectiva por láser	SLS	- Termoplásticos - Metales en polvo - Polvos cerámicos
	Fusión por haz de electrones	EBM	- Aleaciones de titanio
	Fusión selectiva por láser	SLM	- Metales
	Proyección aglutinante	DSPC	- Yeso
Hilado	Fabricación por haz de electrones	EBF3	- La mayoría de aleaciones de metal
Laminado	Laminado de capas	LOM	- Papel - Hoja metálica - Película de plástico
			Estereolitografía
Foto-polimerizado	Fotopolimerización por luz ultravioleta	SGC	- Fotopolímero
	Procesamiento digital de luz	DLP	- Resina líquida

Tabla 2. 1. Tecnologías de fabricación aditiva

De las tecnologías de fabricación aditiva utilizadas para la impresión 3D y expuestas en la Tabla 2.1, la técnica utilizada para aquellas piezas que requieren cierta precisión es la estereolitografía. Mientras que, si se prefiere obtener un prototipo funcional en el que se valoran las prestaciones mecánicas, se elige el sinterizado debido a que se puede utilizar una variedad más amplia de materiales.

Seguidamente se describen y comparan (Tabla 2.2) las técnicas que más se utilizan de las expuestas en la Tabla 2.1.

- **Estereolitografía (SLA):** consiste en la solidificación de resina líquida fotosensible mediante la proyección de un haz de láser UV. Para la creación de la pieza el elevador se sitúa a una distancia de la resina igual al grosor de la primera sección. El láser sigue la superficie de la sección y el contorno de forma que el líquido solidifica. Esta operación se repite variando la altura del elevador realizando capas hasta obtener la pieza final. Para ello es necesario crear columnas que permitan soportar la pieza.

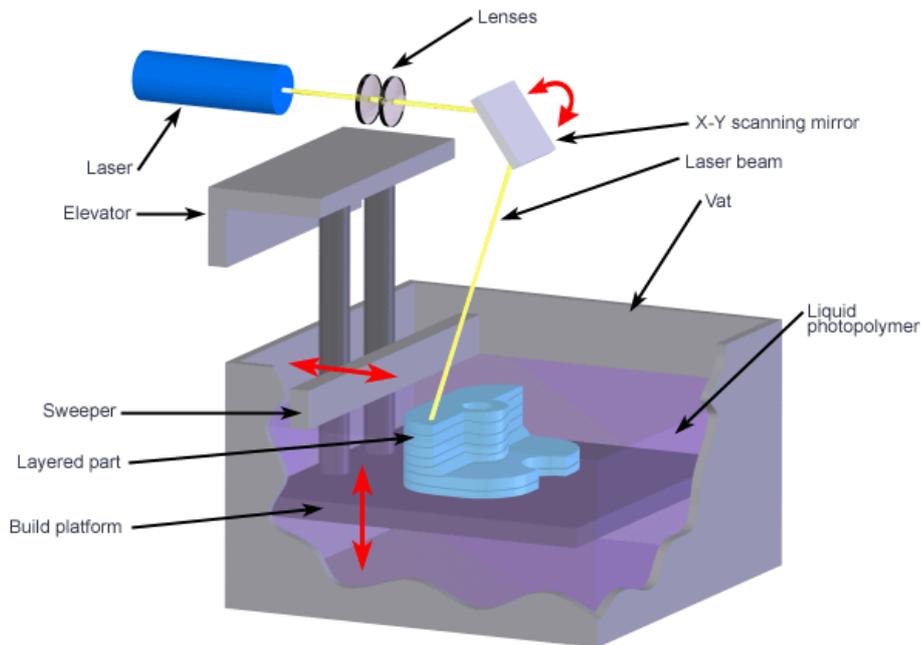


Figura 2. 1. Esquema del proceso de SLA. Fuente: [www.CustomPartNet.com](http://www.CustomPartNet.com) [2]

- **Sinterización selectiva láser (SLS):** se realiza mediante la sinterización con láser  $\text{CO}_2$  de las áreas seleccionadas, fusionando y solidificando partículas de polvo de diferentes materiales, depositadas en capas de décimas de milímetros. En este caso las piezas también se generan capa a capa.

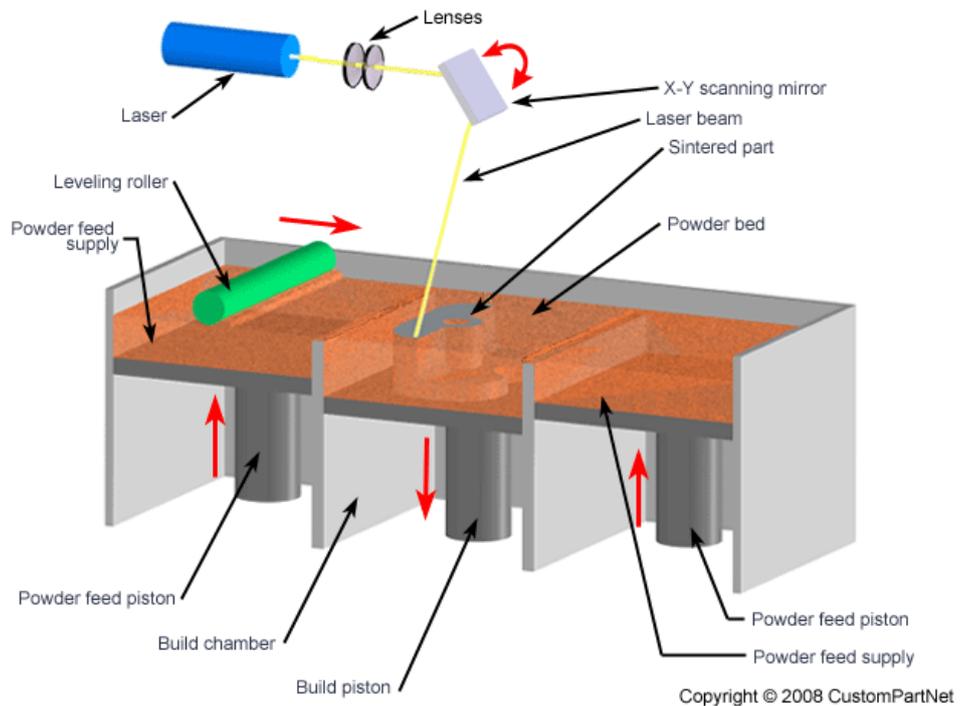


Figura 2. 2. Proceso de SLS. Fuente: [www.CustomPartNet.com](http://www.CustomPartNet.com) [2]

- **Deposición de hilo fundido (FDM):** consiste en formar la pieza por capas, mediante la extrusión de un filamento de polímero termoplástico y siguiendo la forma de las diferentes secciones. Esto se realiza con el material a 1°C por debajo de su punto de fusión, de forma que solidifica inmediatamente sobre la capa anterior.

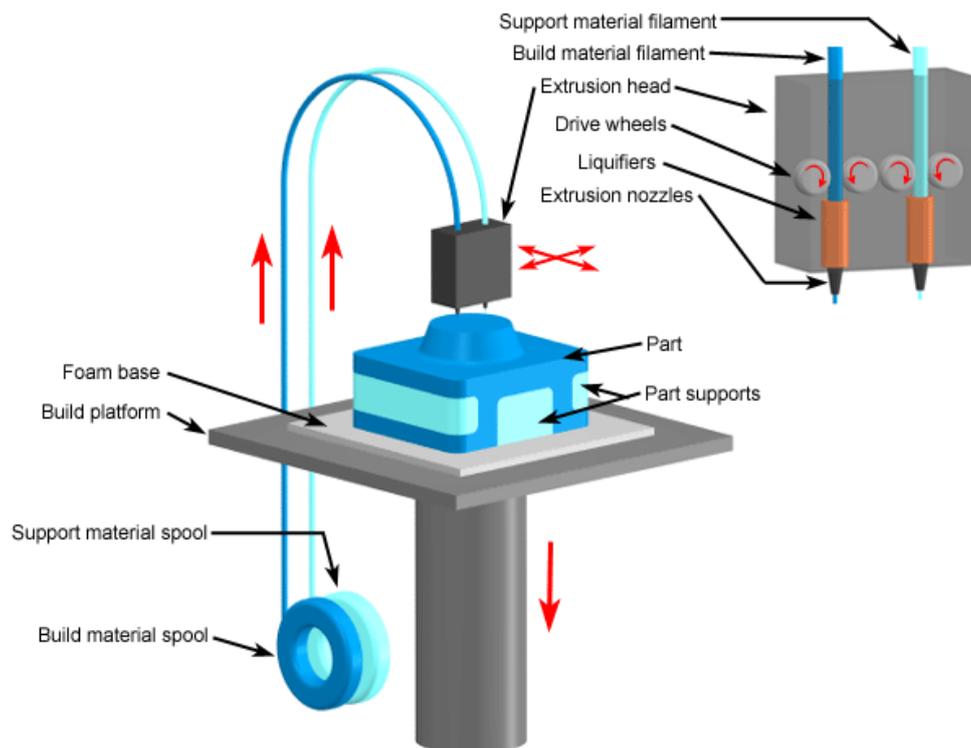


Figura 2. 3. Proceso de FDM. Fuente: [www.CustomPartNet.com](http://www.CustomPartNet.com) [2]

- **Fabricación por corte y laminado (LOM):** se basa en cortar y pegar láminas de papel. Esto es posible debido a que la parte inferior del papel tiene una capa adhesiva, que en ser presionada con un rodillo queda unida a la lámina anterior. Es este mismo rodillo el que aplica calor a la vez que presiona, de forma que se produzca la adhesión.

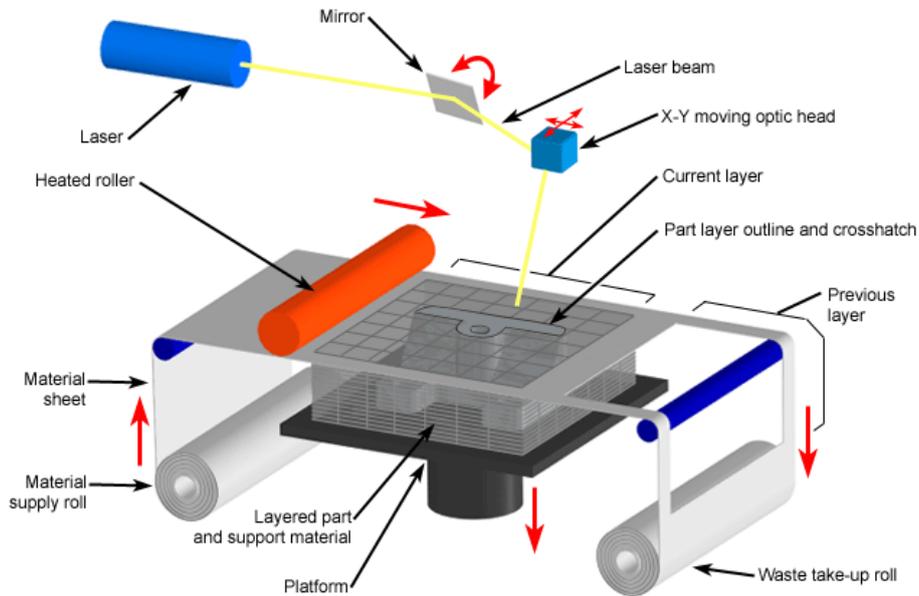


Figura 2. 4. Proceso de LOM. Fuente: [www.CustomPartNet.com](http://www.CustomPartNet.com) [2]

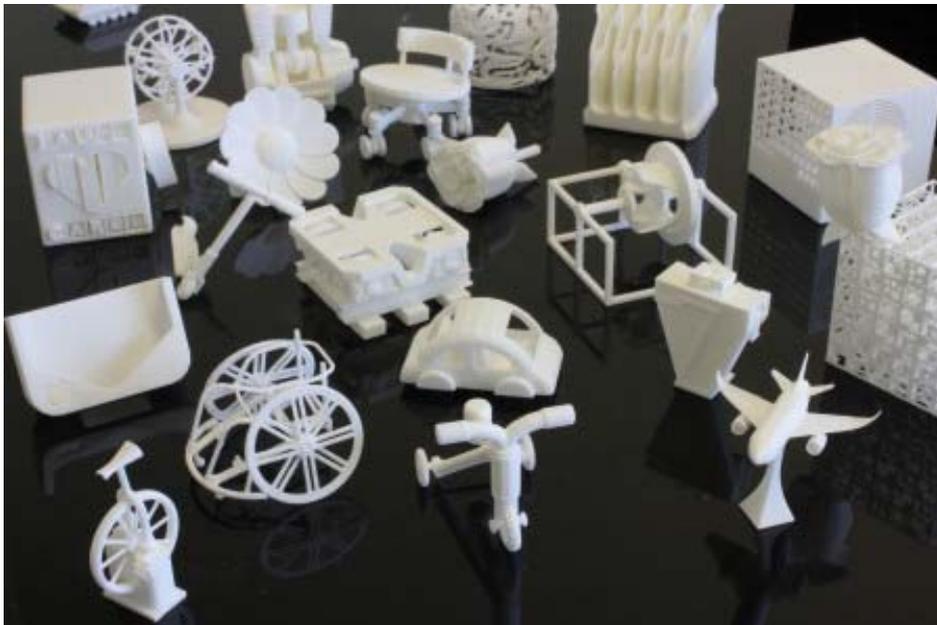


Figura 2. 5. Ejemplos de piezas realizadas mediante SLA. Fuente: <http://protocim.wordpress.com/>

En la Tabla 2.2 se presentan las principales características de las cuatro tecnologías descritas, comparando aspectos como el tamaño o acabado de la superficie de la pieza que generan.

	SLA	FDM	SLS	LOM
<b>Tipo de material</b>	Líquido (fotopolímeros)	Sólido (filamentos)	Polvo (polímeros)	Sólido (hojas)
<b>Máx. tamaño de la pieza</b>	149,86 x 74,93 x 50,038 cm	91,44 x 60,96 x 91,44 cm	55,88 x 55,88 x 76,2 cm	81,28 x 55,88 x 50,8 cm
<b>Mín. espesor de capa</b>	0,0254 mm	0,127 mm	0,004 mm	0,0508 mm
<b>Tolerancia</b>	0,127 mm	0,127 mm	0,254 mm	0,1016 mm
<b>Acabado de la superficie</b>	liso	áspero	media	áspero
<b>Velocidad de construcción</b>	media	lenta	rápida	rápida
<b>Aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas de ajuste y funcionales</li> <li>- Patrones de mecanizado rápido</li> <li>- Partes muy detalladas</li> <li>- Aplicaciones a alta temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas de ajuste y funcionales</li> <li>- Patrones de mecanizado rápido</li> <li>- Partes muy detalladas</li> <li>- Aplicaciones a alta temperatura</li> <li>- Aplicaciones para alimentos y pacientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas de ajuste y funcionales</li> <li>- Patrones de mecanizado rápido</li> <li>- Partes menos detalladas</li> <li>- Aplicaciones a alta temperatura</li> <li>- Piezas con bisagras y ajustes a presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas de ajuste</li> <li>- Partes menos detalladas</li> <li>- Patrones de mecanizado rápido</li> </ul>

Tabla 2. 2. Comparación entre diferentes tecnologías

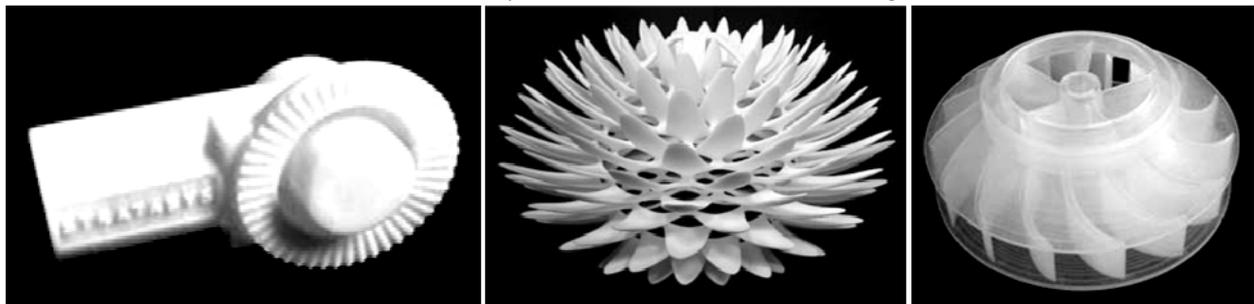


Figura 2. 6. De izquierda a derecha: ejemplos de piezas hechas con FDM, SLS y LOM. Fuente: Desktop Engineering

## 2.2. MATERIALES PARA LA IMPRESIÓN 3D

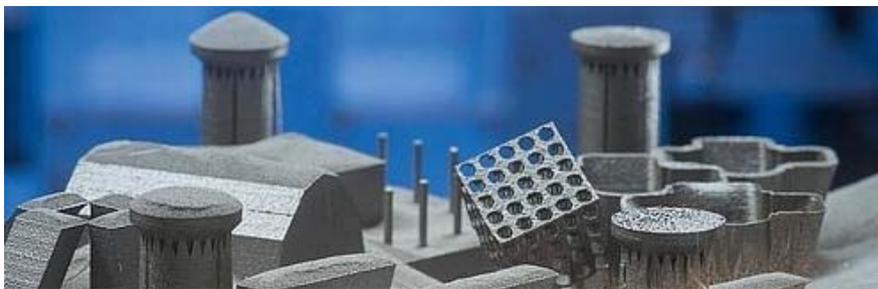
En la actualidad existe una gran variedad de materiales de impresión 3D disponibles en el mercado. Sin embargo, el 95% de las impresoras de sobremesa utiliza el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Políácido láctico (PLA). La Tabla 2.3 muestra una comparativa entre ambos materiales, destacando algunas de sus propiedades cualitativas. Cabe destacar que las impresoras diseñadas para imprimir ABS también admiten la impresión de PLA. No obstante, esto no sucede en sentido inverso.

	ABS	PLA
<b>Descripción</b>	Plástico muy común, muy resistente, duro y rígido. Con gran tenacidad.	Plástico duro y resistente. Con buen acabado.
<b>Diámetro</b>	1,75 mm y 3 mm.	1,75 mm y 3 mm.
<b>Temperatura de impresión</b>	230-260 °C	210 °C
<b>Impacto ambiental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emite gases nocivos.</li> <li>- Reciclable, pero no para volver a ser filamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No emite gases nocivos.</li> <li>- Es biodegradable.</li> </ul>
<b>Precio</b>	25 - 35 €/kg	25 - 35 €/kg
<b>Utilidad</b>	Para piezas sólidas, densas y resistentes.	Para piezas huecas con paredes finas.
<b>Colores</b>	Gran variedad.	Rango más amplio (fluorescente, transparente...)
<b>Post-proceso</b>	Se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar, etc. con facilidad, y el acabado sigue siendo bueno.	Más complicado. Esto dificulta hacer piezas grandes.
<b>Limitaciones y características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesita base de impresión caliente (~ 120 °C)</li> <li>- Es necesario ventilación si se tienen varias impresoras funcionando en un espacio cerrado, (desprende gases)</li> <li>- Sensible a cambios de temperatura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No necesita base caliente. (Más rápido).</li> <li>- No resiste altas temperaturas (máximo 50 -60 °C).</li> <li>- Es más frágil, pero más estable y más fácil de imprimir.</li> </ul>

Tabla 2. 3. Comparativa entre ABS y PLA

Otros de los materiales de impresión que existen actualmente o se están estudiando por tal de mejorar su impresión 3D son:

- Metal
- Cerámica
- Vidrio
- Resina
- Titanio
- Pegamento
- Hielo
- Chocolate y otros alimentos
- Piel
- Nylon y otros plásticos
- Madera
- Cemento



**Figura 2. 7.**  
Impresiones 3D de metal realizadas por Siemens. Fuente: [www.ABC.com](http://www.ABC.com)

En el momento de diseñar una impresora es necesario tener en cuenta las propiedades de los materiales de impresión. Una característica fundamental es la temperatura necesaria para llevar a cabo la impresión, esto se ve reflejado en la temperatura a la que ha de trabajar el extrusor y la que ha de mantener la plataforma sobre la que se realiza la impresión. En la Tabla 2.4 se exponen estas temperaturas para algunos materiales.

	Extrusor		Plataforma	
	Min	Max	Min	Max
PLA	150	210	0	50
ABS	220	275	100	130
Madera	170	210	0	50
PC	270	305	75	95
Nylon	235	260	100	130
PET	210	235	45	60

**Tabla 2. 4.** Temperaturas en °C para diferentes materiales. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]

Estos no son los únicos materiales disponibles para aplicar estas tecnologías. Un muestra de ello es la empresa *Object Geometries Ltd.* que ofrece un rango de hasta 65 materiales para la impresión 3D, 51 de los cuales son materiales compuestos.

El estudio del uso de nuevos materiales permite extender los campos de aplicación de la impresión 3D. Un ejemplo es la investigación acerca de la impresión 3D de huesos artificiales. Esto permitiría ampliar las aplicaciones que tiene esta tecnología aditiva sobre el campo de la medicina.

## 2.3. IMPRESORAS 3D

Hoy en día existe una gran variedad de modelos de impresoras 3D en el mercado. Éstas se pueden clasificar según el material con el que se realiza la impresión. Sin embargo, dado que el objetivo del proyecto es que la impresora diseñada pueda utilizarse en domicilios particulares, se estudiará únicamente el caso en que las impresoras trabajen con termoplásticos. Ya que es un material asequible y facilita la impresión.

Por lo tanto, la clasificación que se expone seguidamente se basa en los usuarios de estas impresoras, es decir, si son de uso particular o destinadas a empresas. Cabe destacar que el desarrollo de las impresoras 3D ha provocado que exista una gama intermedia de impresoras adecuadas tanto para el uso doméstico como para el empresarial. Su uso dependerá de la aplicación, la resolución de impresión y la velocidad de impresión de modelos, características que determinarán su precio (factor que se utiliza principalmente para su clasificación entre ambos usos).

### 2.3.1. IMPRESORAS DE USO DOMÉSTICO

*RepRap* es uno de los proyectos que ha hecho posible el desarrollo de impresoras de sobremesa asequibles para uso particular. Su objetivo principal es el de producir un software libre y de código abierto.

El último diseño que ofrece el proyecto RepRapBCN de la *Fundació CIM* es el modelo BCN3D+<sup>1</sup>. Diseñada para aumentar la fiabilidad, la robustez y la facilidad de montaje y siendo económicamente asequible.

Este kit incluye todas las piezas, la electrónica, cableado y las instrucciones necesarias para el montaje, además de un kit de herramientas para el montaje, aunque también se ofrece montada. Las especificaciones mejoradas respecto al

---

<sup>1</sup> Para más información sobre la impresora ver el Anexo 1.

modelo anterior, la BCN3D, son el volumen ampliado, mayor velocidad y la posibilidad de imprimir la mayoría de materiales de 3 mm de diámetro.

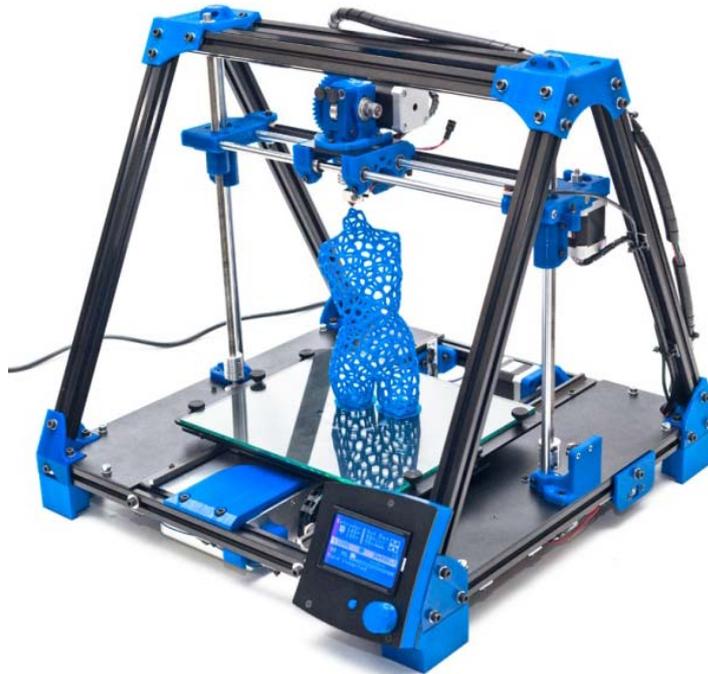


Figura 2. 8. Impresora BCN3D+. Fuente: [www.RepRapBCN.com](http://www.RepRapBCN.com) [4]

El precio de esta impresora es de 740 €. Las especificaciones de la impresora se muestran a continuación:

- Dimensiones de la impresora: 480 x 520 x 460 mm
- Peso: 11,6 kg
- Área de impresión: 240 x 210 x 200 mm
- Volumen de impresión: 10.080 cm<sup>3</sup>
- Máxima velocidad de impresión: 160 mm/s
- Tolerancia de impresión: 0,08 mm a 0,35 mm
- Diámetro del filamento: 3 mm
- Materiales: PLA, ABS, Nylon, madera, cerámica, etc.

Otras de las impresoras más conocidas que podemos encontrar en formato de kit autoinstalable son la *Prusa i3* y la *Mendel Max*, también creadas por el proyecto *RepRap*.

### Prusa i3

Esta impresora, se caracteriza por presentar mayor rigidez del marco y más facilidad de montaje respecto a modelos anteriores. Las características dimensionales de la impresora son las siguientes:

- Bases de impresión: 20 x 20 x 20 cm.
- Volumen de impresión: 8000 cm<sup>3</sup>.
- Dimensiones: 430 x 370 x 370 mm.

Pueden adquirirse dos tipos de kits, el kit básico o el kit completo. Este último consta de los siguientes componentes:

- Tipo de *hot end*: J-Head ensamblado. Boquilla de 0,4 mm.
- Tipo de Extrusor: Greg Wades
- Electrónica: Sanguinololu 1.3a, Pololu StepSticks A4988 stepper motor drivers
- Estructura: Metacrilato de 1 cm de grosor
- Base Caliente: Cama MK2
- Motores: paso a paso NEMA 17 de gran par (4000 g.cm). Angulo de paso 1,8 grados
- Kit varillas lisas: de acero inoxidable calibrado A2, tolerancia H9
- Kit varillas roscadas: hierro zincado
- Piezas impresas: juego completo (color variable)
- Tornillería completa
- 1 Juego de cableado completo
- 3 Finales de carrera
- 3 Rodamientos 608ZZ
- 2 Rodamientos 623ZZ
- 10 Rodamientos lineales LM8UU
- 2 Poleas GT2 para eje de 5mm
- 2 Correas GT2
- Espejo para la cama caliente
- Juego de Muelles: cuatro para la cama caliente y dos para el extrusor
- Fuente de alimentación industrial 12V 20A
- 1 rollo de 1 kg de filamento
- 1 rollo de cinta kapton



Figura 2. 9. Impresora Prusa i3.  
Fuente: 3D Hacker

El precio del kit sin montar ni calibrar es de 450 €.

## Mendel Max

La impresora *Mendel Max* es una versión anterior a la BCN3D. Los componentes que ofrece el kit completo del modelo *Mendel Max 1.5* son:

- Kit de perfiles de aluminio para MM 1.5
- Placa superior eje Y
- Placa inferior eje Y
- Piezas impresas MendelMax 1.5
- 5 Nema 17 step motors
- Ramps 1.4 board
- Placa de aluminio con resistencias
- 4 SC8UU bearings
- Arduino compatible board
- Kit varillas roscadas M8
- Kit varillas lisas
- Kit de tornillería completo
- Kit correas y poleas GT2
- Kit rodamientos LM8UU, 608ZZ
- j-Head hotend 3mm / 0.5-0.40-0.35 nozzle O Budastyle hotend
- 6 Muelles de compresión para *heatedbed* y extrusor
- 12V28A Fuente de alimentación
- Kit completo de cables
- 3 Finales de carrera mecánicos
- 4 A4988 *step drivers*
- *Hobbed bolt*
- Ventilador

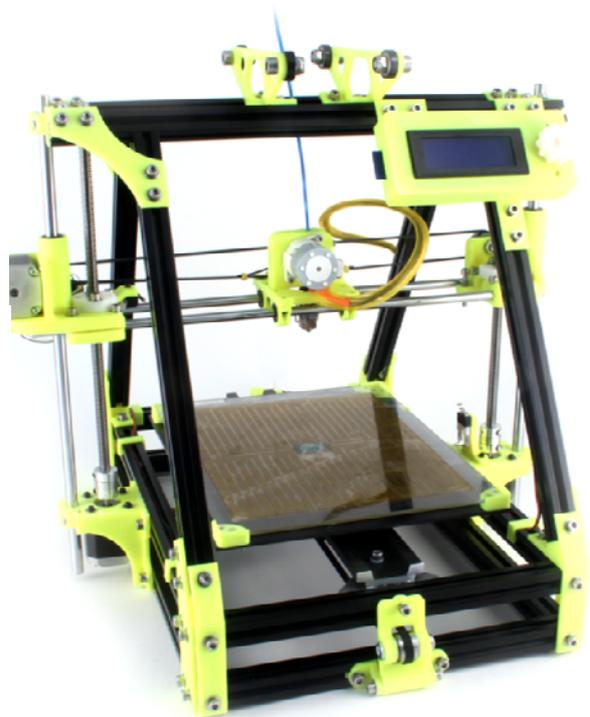


Figura 2. 10. Impresora Mendel Max 1.5. Fuente: [www.UltiBots.com](http://www.UltiBots.com) [5]

En la Tabla 2.5 se exponen algunos de los muchos kits autoinstalables de impresoras tridimensionales disponibles, comparando sus principales especificaciones técnicas. Como se ha mencionado anteriormente, existen gran cantidad de impresoras para particulares, pero no todas ellas en formato de kit. En la Tabla 2.6 se muestran algunas impresoras 3D de escritorio con diferentes características.

KITS DE IMPRESORAS 3D

Nombre	Simple Kit Printrbot	Mono Mendel RepRapPro	Tricolour Mendel RepRapPro	Rostock MAX SeeMeCNC	Fabbster Fabbster
Técnica de impresión	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM
Dimensiones de impresión	100 x 100 x 100 mm	210 x 190 x 140 mm	210 x 190 x 140 mm	254 x 330,2 x 374,65 mm	230 x 210 x 210 mm
Dimensiones	177,8 x 203,2 x 228,6 mm	500 x 460 x 410 mm	500 x 460 x 410 mm	304,8 x 355,6 x 609,6 mm	590 x 470 x 540 mm
Peso	2,38 kg	9,5 kg	9 kg	7,3 kg	13 kg
Materiales	PLA	PLA , ABS	PLA , ABS , otros plásticos	PLA , ABS	PLA , ABS
Impresión multimaterial	No	No	Si	No	No
Mín. altura de capa	100 micras	12,5 micras	125 micras	90 micras	150 micras
Número de cabezales	1	1	3	1	1
Diámetro de la boquilla	—	0,5 mm	—	0,5 mm	0,4 mm
Diámetro del filamento	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm	
Base/cama caliente	Si	Si	Si	Si	Si
Código abierto	Si	Si	Si	Si	No
Máx. velocidad de impresión	—	—	—	300 mm/s	300 mm/s
Precio	215 €	488 €	720 €	720 €	1295 €



Tabla 2.5. Comparativa entre diferentes kits de impresoras 3D. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]



**IMPRESORAS 3D DE SOBREMESA**

Nombre	RoBo 3D RoBo 3D	Up! Plus 2 PP3DP	Airwolf 3D V5 Airwolf	Replicator 2 Makerbot	Robox CEL
Técnica de impresión	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM
Dimensiones de impresión	254 x 228,6 x 203,2 mm	140 x 140 x 135 mm	195,58 x 203,2 x 114,3 mm	280 x 153 x 155 mm	210 x 150 x 100 mm
Dimensiones	431,8 x 381 x 431,8 mm	245 x 260 x 350 mm	460 x 485 x 410 mm	4900 x 4200 x 3800 mm	370 x 340 x 240 mm
Peso	11,65 kg	5 kg	8 kg	11,5 kg	8,3 kg
Materiales	PLA	PLA , ABS	ABS	PLA	Nylon , PLA , ABS , PVA , otros plásticos , PS , PC
Impresión multimaterial	No	No	No	No	Si
Mín. altura de capa	100 micras	15 micras	25 micras	100 micras	20 micras
Número de cabezales	1	1	1	1	2
Diámetro de la boquilla	0,4 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,4 mm	0,3 mm
Diámetro del filamento	1,75 mm	1,75 mm	—	1,75 mm	1,75 mm
Base/cama caliente	No	Si	No	No	Si
Código abierto	Si	No	Si	No	No
Precio	430 €	1.185 €	1.220 €	1.580 €	1.005 €



Tabla 2.6. Comparativa entre diferentes impresoras 3D de sobremesa. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]



### 2.3.2. IMPRESORAS DE USO INDUSTRIAL

La impresión tridimensional ha existido desde la década de 1980 en el entorno industrial, siendo utilizada para la creación de prototipos rápidos y dedicada a la investigación.

La principal diferencia de las impresoras de uso industrial en comparación con las de uso doméstico es el tamaño, ya que generalmente son más grandes. El precio es también más elevado, ya que estas impresoras ofrecen mayor precisión y fiabilidad.

Además, algunas de ellas disponen de varios cabezales para poder incrementar la velocidad de impresión. La velocidad actual de estas impresoras es lenta, lo cual limita la producción en masa.

De la misma forma que ocurre con los kits autoinstalables, hay una gran diversidad de impresoras diseñadas para el uso profesional. A modo de ejemplo, a continuación se describe la impresora *uPrint SE Plus*, diseñada por *Stratasys*, el fabricante más conocido de impresoras 3D industriales.

#### uPrint SE Plus

<b>Características generales</b>	
Técnica de impresión	FDM
Dimensiones	635 x 660 x 787 mm
Dimensiones de impresión	203 x 203 x 152 mm
Peso	76 kg
Materiales	Filamento
Impresión multimaterial	Sí
Mín. espesor de capa	254 micras
<b>Hardware</b>	
Ventilador de refrigeración	Sí
Cama caliente	Sí
Actualizable	No
Utiliza partes impresas	No
Número de cabezales	2
Requerimientos de instalación especiales	No
<b>Funcionamiento</b>	
Software	CatalystEX
Calibración automática	Sí
Código abierto	No

Tabla 2. 7. Descripción de la uPrint SE Plus. Fuente: *www.Thre3d.com* [3]



Figura 2. 11. Impresora *uPrint SE Plus*. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]

En la Tabla 2.8 se muestra una comparativa entre tres impresoras industriales (Figura 2.12) que utilizan diferentes tecnologías de impresión (Tabla 2.8).

Nombre	GLACIER SUMMIT	SLS 3D PRINTER 14014050	FREEFORM PRO 75
Técnica de impresión	FDM	SLS	SLA
Dimensiones de impresión	40,64 x 40,64 x 45,72 cm	140 x 140 x 50 cm	14,4 x 8,1 x 20 cm
Materiales	Nylon, PLA, ABS, PC	PS <sup>2</sup>	Fotopolímero
Impresión multimaterial	No	No	No
Mín. espesor de capa	100 micras	80 micras	25 micras
Requisitos de instalación especiales	No	Sí	No
Dimensiones	—	2390 x 2450 x 3000 mm	450 x 490 x 800 mm
Precio	4.345 €	1.517.640 €	18.116 €

Tabla 2. 8. Comparativa entre tres impresoras 3D industriales. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]

<sup>2</sup> PS= poliestireno, polímero termoplástico.



Figura 2. 12. Por orden: Glacier Summit, SLS 3D Printer y Freeform PRO 75. Fuente: [www.Thre3d.com](http://www.Thre3d.com) [3]

Para complementar el estudio de precedentes se ha realizado una visita al aula de impresión RepRap situada en la ETSEIB y a la *Fundació CIM*, con el fin de estudiar las impresoras que se están utilizando actualmente en estos centros. Ambas visitas se resumen en el Anexo 1.

### 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

---

Como objetivos concretos para el diseño del nuevo modelo de impresora 3D se propone algunas especificaciones técnicas en relación tanto con la estructura como con la impresión.

En cuanto a la estructura se impone como restricción el peso y las dimensiones máximas, no sólo de la impresora sino también del volumen de impresión máximo que puede realizar. El hecho de que se especifique un valor máximo para estas características es debido a que la finalidad del proyecto es que esta máquina sea de uso particular. Por lo que el objetivo se centra en realizar una impresora de pequeñas dimensiones y ligera para que pueda ubicarse en el domicilio particular sin necesidad de disponer de gran espacio e incluso para que ésta pudiera ser transportada si se deseara, pero al mismo tiempo que disponga de un volumen suficiente que permita crear una amplia variedad de objetos.

Las características que se definen en relación con la impresión son el diámetro del filamento, que se restringe a 1,75 o 3 mm, la tecnología de impresión utilizada que será de modelado por deposición fundida (FDM<sup>3</sup>), y los materiales que será capaz de imprimir, que como mínimo la impresora tendrá que ser capaz de imprimir PLA y/o ABS<sup>4</sup>. De la misma forma que con el dimensionado, estas especificaciones se atribuyen a que la impresora está destinada al uso particular, de forma que el usuario pueda disponer con facilidad del material necesario para la creación de las piezas, ya que tanto el PLA como el ABS son materiales asequibles que se pueden adquirir fácilmente en los tamaños de diámetro mencionados.

Otra restricción que se impone es el número de cabezales de extrusión, que se limita a 1, esto a su vez imposibilita la impresión multimaterial. Sin embargo, la restricción de un solo cabezal proporciona una mayor simplicidad de la impresora en cuanto al ensamblaje de ésta y a su vez evita realizar cambios en la programación. Otra ventaja que aporta disponer de un único cabezal es que se evita el incremento del coste que supone el propio cabezal y los derivados como por ejemplo los soportes.

---

<sup>3</sup> **FDM** = *Fused Deposition Modeling* (ver apartado 2.1: Estudio de precedentes, Tecnologías de impresión 3D).

<sup>4</sup> **PLA** = Poliláctico / **ABS** = Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ver apartado 2.2: Estudio de precedentes, Materiales para la impresión 3D).

El precio máximo se establece en 3000 € con el propósito de competir con los modelos de kits de mayor calidad actuales y hacer la impresora asequible al mayor número de usuarios posible. Por último, se asigna una velocidad de impresión mínima de 100 mm/s, ya que la mayoría de modelos disponibles en el mercado ofrecen una velocidad de impresión igual o mayor a 100 mm/s.

Otras características tales como la mínima altura de capa, la temperatura máxima de impresión, el diámetro de boquilla y la existencia de base caliente dependerán de propiedades del cabezal que se escoja para el diseño final.

Los valores y detalles de estas especificaciones se muestran en la tabla 3.1.

<b>Dimensiones</b>	
Dimensiones máximas impresora	600 x 600 x 600 mm
Dimensiones máximas de impresión	300 x 400 x 400 mm
Volumen máximo de impresión	48000 cm <sup>3</sup>
Peso máximo <sup>5</sup>	15 kg
<b>Especificaciones de impresión</b>	
Mínima velocidad de impresión	100 mm/s
Diámetro filamento	1,75 mm o 3 mm
Número de cabezales	1
Material/es a imprimir:	mínimo PLA y/o ABS
Impresión multimaterial	No
Tecnología de impresión	FDM
Precio máximo venta	3.000 €

**Tabla 3. 1.** Especificaciones técnicas

Al tratarse del diseño de un primer prototipo no se tienen en cuenta otras especificaciones técnicas tales como el consumo de la máquina, el nivel de ruido u otros aspectos relacionados con la seguridad. Estos factores se investigarán a partir del prototipo diseñado.

<sup>5</sup> Peso sin incluir la bobina de filamento y el conjunto de la electrónica.

## 4. DISEÑO CONCEPTUAL

---

Previamente a la presentación de alternativas, es necesario conocer el funcionamiento de la máquina y las partes de las que se compone. En la Figura 4.1 se muestran las funciones principales y sub-funciones que abarca una impresora 3D. El objetivo es desglosar la impresora en partes y de esta forma analizar las alternativas de cada parte de forma separada.

En el análisis funcional de la Figura 4.1 se destacan las funciones últimas que incluye el alcance del proyecto, y por tanto las funciones que deberán cubrirse con el diseño del nuevo modelo de impresora. Las funciones restantes serán cubiertas por el proyecto dedicado a la parte electrónica de Isabel Cañete Vela.

De las distintas partes que componen una impresora, las que se incluyen en el diseño de la máquina son:

- Estructura
- Plataforma de impresión
- Motores
- Elementos de transmisión de movimiento
- Soportes y sujeciones

Para ayudar a visualizar cada una de estas partes, en la Figura 4.2 se destaca a modo de ejemplo la ubicación de los componentes en una impresora *RepRap BCN3D+*.

Para el diseño de la estructura es necesario tener en cuenta la parte eléctrica y la electrónica diseñada para este nuevo modelo de impresora con el objetivo de organizar la distribución espacial de las mismas y garantizar una correcta sujeción. Los elementos a considerar son los siguientes:

- Pantalla y controles
- Placa de circuito impreso
- Soporte USB y/o Tarjeta SD
- Finales de carrera
- Termistores
- Resistencias
- Motores
- Fuente de alimentación
- Cableado

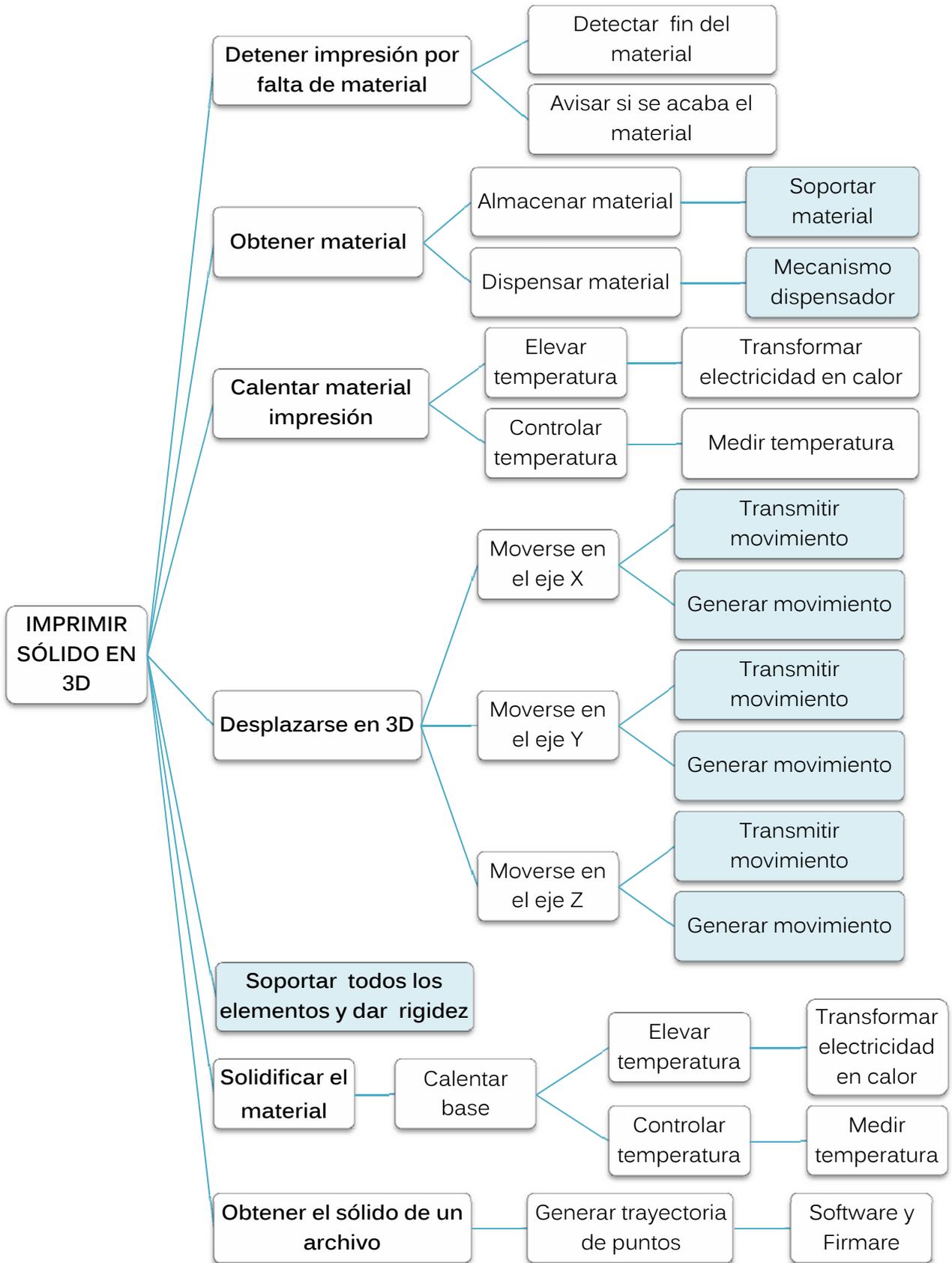
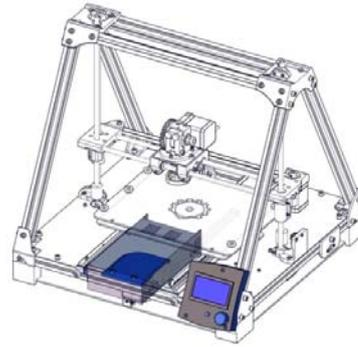


Figura 4. 1. Análisis funcional



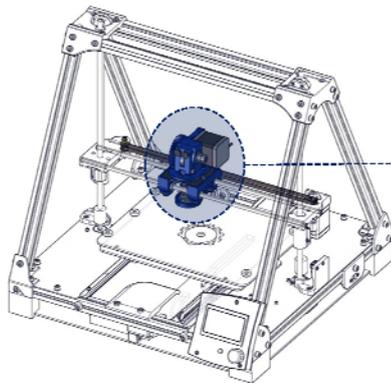
**Estructura:**

- Barras, perfiles y fijaciones
- Soportes
  - De la propia impresora
  - Electrónica
  - Bobina



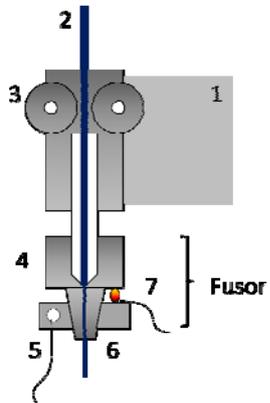
**Electrónica:**

- Pantalla LCD
- Cableado
- Fuente de alimentación
- Placa de circuito impreso
- Otros elementos



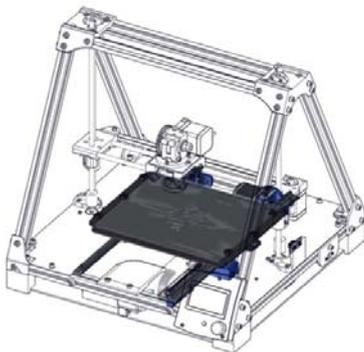
**Eje X:**

- Motor
- Elementos de transmisión
- Cabezal de extrusión



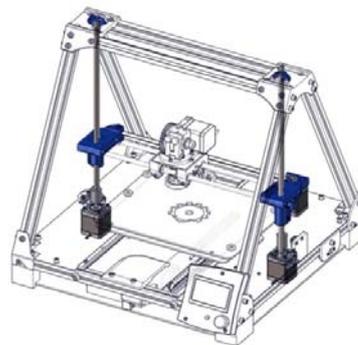
**Cabezal de extrusión:**

- |               |                |
|---------------|----------------|
| 1. Motor      | 5. Resistencia |
| 2. Filamento  | 6. Boquilla    |
| 3. Engranajes | 7. Termistor   |
| 4. Aislante   |                |



**Eje Y:**

- Motor
- Elementos de transmisión
- Plataforma de impresión



**Eje Z:**

- Motores
- Elementos de transmisión

Figura 4. 2. Desglose de las partes de una impresora 3D. Fuente Ilustraciones: *RepRapBCN [4]*

#### 4.1. CABEZAL DE EXTRUSIÓN

El cabezal de extrusión es la parte de la impresora que determina las principales características de la impresión, como por ejemplo la velocidad de impresión, los materiales adecuados para imprimir o el diámetro de filamento de dicho material.

Como se ha mencionado en el alcance (apartado 1.2), el diseño del cabezal de extrusión no forma parte del proyecto. Se toma como referencia para el diseño de la impresora el cabezal diseñado por la *Fundació CIM* (Figura 4.4) ya que la boquilla, de 0,4 mm de diámetro, presenta mejoras respecto a otros diseños<sup>6</sup> y sus características cumplen las especificaciones propuestas en el apartado 3 (Figura 4.3).



Figura 4. 3. Boquilla de la *Fundació CIM*. Fuente: *3D print Barcelona [4]*

Sus principales características son que este cabezal permite imprimir en PLA y ABS además de otros plásticos con un diámetro de filamento de 3 mm. Para su funcionamiento utiliza un motor NEMA 17 y puede soportar una velocidad máxima de impresión de 160 mm/s. La masa aproximada del cabezal es de 763,83 g<sup>7</sup> de los cuales 350 g pertenecen al motor. Esta cualidad y el resto de las características físicas de este cabezal de extrusión se tendrán que considerar para su adaptación al eje X ya que el diseño de este cabezal está pensado para moverse por dos guías horizontales (Figura 4.4).

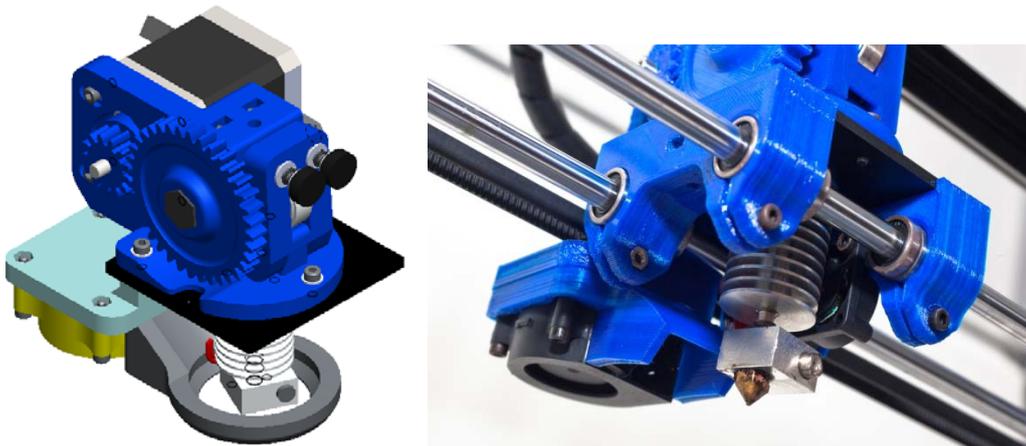


Figura 4. 4. Cabezal de extrusión de la RepRap BCN3D+ y su colocación sobre el eje X. Fuente: *RepRapBcn [4]*

<sup>6</sup> Ver Anexo Visitas: Visita a Fundació CIM

<sup>7</sup> Información proporcionada por el *aula de impresión RepRap* y mediante una aproximación en *SolidWorks*.

## 4.2. CONFIGURACIÓN DE LOS EJES

### 4.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS DISTINTOS GRADOS DE LIBERTAD

El conjunto estructural de una impresora 3D es el chasis. Este puede consistir en elementos estructurales a lo largo de los ejes de movimiento o paneles que encierran la máquina. A parte de la clasificación entre chasis abierto o cerrado, el diseño de la estructura de la impresora dependerá fundamentalmente del tipo de coordenadas a utilizar. Las principales configuraciones robóticas que se pueden encontrar dependiendo de las coordenadas utilizadas son la configuración cartesiana, cilíndrica, esférica, angular y SCARA, mostradas en este orden en la Figura 4.5.

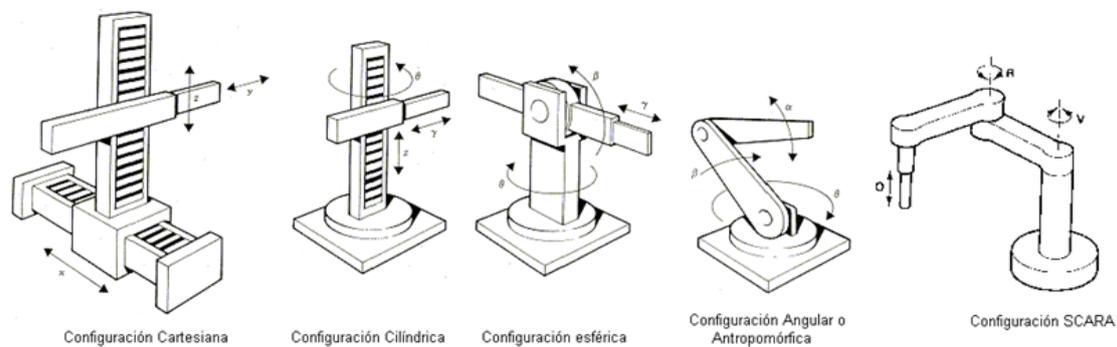


Figura 4. 5. Configuraciones robóticas comunes. Fuente: *Monografías*

A pesar de que se parte con la idea de utilizar coordenadas cartesianas debido a la compatibilidad con el diseño del software, a continuación se analizan cada uno de los tipos de configuraciones que puede presentar la impresora. Con ello se pretende comprobar que la estructura cartesiana es la que presenta más ventajas.

Aplicadas a las estructuras de impresoras 3D existen 4 tipos de configuraciones:

- **Cartesiana:** la base de las impresoras que utilizan este tipo de configuración es de forma cuadrada o rectangular y tienen 3 grados de libertad que corresponden a los tres ejes, X, Y y Z, cuyo movimiento es lineal. Puede considerarse el diseño más sencillo debido a que el software y los mecanismos de la impresora son más simples.
- **Delta:** diseño de forma cilíndrica en el que el cabezal de extrusión se encuentra colocado en el centro de la estructura, formada por tres brazos que controlan el

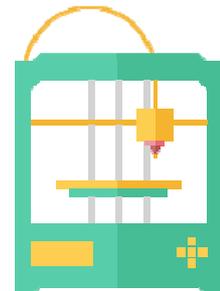
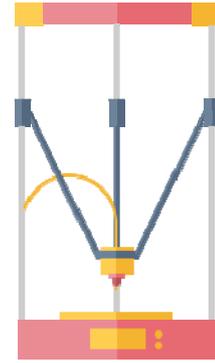
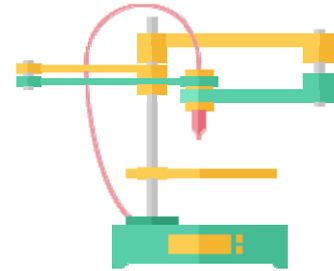


Figura 4. 6. Impresora cartesiana. Fuente: [www.Three3d.com](http://www.Three3d.com) [3]

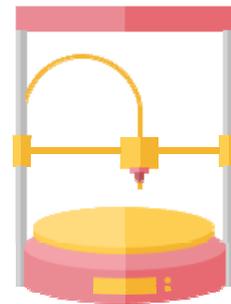
movimiento del cabezal, que se mantiene paralelo a la plataforma de impresión. La principal ventaja de este tipo de impresoras es su altura, lo cual las hace eficientes respecto a la ocupación del espacio, además de tener un aspecto llamativo. Sin embargo, el software requerido para esta configuración es más complicado debido a su compleja geometría.



- **SCARA**<sup>8</sup>: estas impresoras 3D se basan en dos brazos de dos articulaciones que proporcionan el movimiento al cabezal de extrusión. Si bien son más fáciles de construir estructuralmente, tienen el inconveniente de que es necesario compensar la altura de la superficie de impresión durante el funcionamiento debido a la flexión del brazo.



- **Polar**: el diseño de estas impresoras, también de estructura cilíndrica, está formado por dos ejes que se mueven solidarios al cabezal de extrusión. Esta configuración posee la ventaja de ser más fácil de construir en comparación con los mecanismos mencionados anteriormente, ya que, por ejemplo, únicamente requiere dos motores. Este diseño puede suponer ventajas para la creación de piezas con geometrías que incluyan curvas. Sin embargo, se traduce en errores cuando se escala a tamaños más grandes y el software requerido es difícil de diseñar debido a las matemáticas involucradas. Además, la plataforma giratoria dificulta el diseño de la "cama caliente".



**Figura 4. 7.**  
Impresora Delta,  
SCARA e impresora  
Polar. Fuente:  
*Three3d [3]*

Para la selección de configuración en la que estará basada la estructura se realiza una matriz de filtrado con cuatro criterios de selección. Estos son la facilidad de construir la estructura, la facilidad de diseño del software o firmware, la cantidad de motores necesarios y la rigidez que presentan las impresoras utilizando estas configuraciones. Para el análisis se utiliza como referencia la estructura cartesiana, y se comparan con un "+" si la solución es mejor que ésta o con un "-" en caso contrario.

<sup>8</sup> **SCARA** = Selective Compliant Assembly/Articulated Robot Arm o Selective Compliant Articulated

CONFIGURACIÓN	CARTESIANA	DELTA	SCARA	POLAR
ESTRUCTURA	0	-	+	0
SOFTWARE/FIRMWARE	0	-	-	-
MOTORES	0	0	0	+
RIGIDEZ	0	0	-	0
<b>TOTAL</b>	<b>0 ✓</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>

Tabla 4. 1. Matriz de selección para las configuraciones estructurales

Teniendo en cuenta los criterios de selección, las configuraciones que presentan más ventajas son la cartesiana y la polar. Sin embargo, la única que no dificulta el diseño del software y firmware es la cartesiana y por este motivo es la que se escoge para realizar la estructura.

#### 4.2.2. DISPOSICIÓN DE LOS EJES

Como se expone en el apartado 4.2.1, el sistema de coordenadas seleccionado para el diseño de la estructura es la configuración cartesiana. Las diferentes alternativas para la disposición de los ejes y sistemas de transmisión se clasifican según a que elemento se atribuye el movimiento, es decir, si el movimiento se asigna al cabezal de extrusión o a la plataforma de impresión para cada uno de los tres ejes: X, Y o Z.

ELEMENTO	CABEZAL			PLATAFORMA		
	X	Y	Z	X	Y	Z
TIPO 1	●	●	●			
TIPO 2	●		●		●	
TIPO 3	●	●				●
TIPO 4	●				●	●

Tabla 4. 2. Tipos de estructuras según asignación de movimientos

Como se puede observar en la Tabla 4.2, se distinguen 4 tipos de estructuras diferentes dependiendo del movimiento de sus elementos. Para establecer esta clasificación se limita el movimiento de la plataforma de impresión a dos ejes como máximo, ya que como soporte de la pieza debe garantizar su estabilidad y fijación sobre ésta. Es por este motivo que uno de estos dos movimientos corresponde al movimiento en el eje Z, evitando asignar a la plataforma el movimiento a través del eje X e Y al mismo tiempo, debido a que el movimiento más lento corresponde al eje Z. El resto de alternativas no se consideran ya que

corresponden a un intercambio entre el eje X y el Y, es decir, a girar la impresora 90°.

De la misma forma que anteriormente, se realiza una matriz de selección utilizando como criterios de selección los mostrados en la tabla 4.3 y como referencia el TIPO 1, correspondiente a asignar los 3 movimientos al cabezal de extrusión.

TIPO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
INERCIA DE LA PLATAFORMA	0	-	0	-
NÚMERO DE MOTORES	0	0	0	0
RIGIDEZ	0	+	+	+
POSIBILIDAD DE TAPA	0	-	0	-
FACILIDAD DE MONTAJE	0	+	+	+
COSTE	0	0	0	0
ESPACIO ENVOLVENTE	0	-	0	-
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>+2 ✓</b>	<b>-1</b>

Tabla 4. 3. Matriz de selección para los tipos de estructura

Como se justifica en la tabla anterior, el diseño de la impresora se basará en el TIPO 3 ya que de esta forma se obtiene una mínima inercia en la plataforma de impresión y se facilita la construcción de la zona del cabezal.

### 4.2.3. FORMA DEL CHASIS

Otro de los aspectos a considerar previamente a la realización del diseño detallado de la estructura es su forma. En la Figura 4.8 se muestran esquemáticamente 4 posibles formas en las que podría basarse el diseño final.

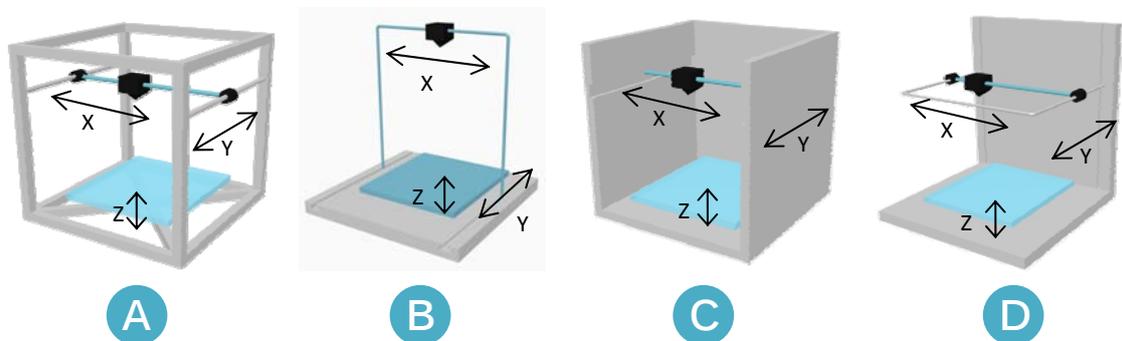


Figura 4. 8. Representaciones de las posibles formas de estructura

- **Estructura A:** la primera estructura está compuesta por perfiles de barras a partir de las cuales se sujetan todos los elementos de la máquina.

- **Estructura B:** esta estructura consiste en una base que soporta el resto de piezas. En este caso la estructura utilizada para la sujeción del cabezal es solidaria a él en caso de tener el movimiento Y asociado.
- **Estructura C:** ésta consiste en una estructura cerrada, es decir, formada por planchas que protegen y sostienen los componentes de la impresora.
- **Estructura D:** la última representación consiste en un soporte en forma de “L” a partir del cual se sujetan el resto de las piezas que forman parte del sistema.

Se realiza la selección de la forma de las presentadas en la Figura 4.8 en la que estará basado el diseño de la estructura (Tabla 4.4). En este caso se utiliza como referencia la estructura “tipo A” y los criterios para la evaluación de estas alternativas son el número de motores que se necesitan para su funcionamiento, la rigidez de la estructura, la posibilidad de incorporar tapa en el diseño, su facilidad de montaje y el coste. Además se tiene en cuenta la visibilidad que puede tenerse de la pieza con el objetivo de verificar un funcionamiento correcto con facilidad y el acceso a los elementos del interior para facilitar su manipulación en caso de necesidad.

ESTRUCTURAS	A	B	C	D
NÚMERO DE MOTORES	0	0	0	0
RIGIDEZ	0	–	0	–
POSIBILIDAD DE TAPA	0	–	0	0
FACILIDAD DE MONTAJE	0	–	–	–
COSTE	0	0	–	0
VISIBILIDAD DE LA PIEZA	0	0	–	0
ACCESO A LOS ELEMENTOS INTERIOR	0	0	–	0
<b>TOTAL</b>	<b>0 ✓</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>

Tabla 4. 4. Matriz de selección para las formas de la estructura

Como se puede observar en la Tabla 4.4, es la estructura de referencia la que presenta más ventajas en comparación con el resto. Por tanto, el diseño de la impresora consistirá en una estructura formada por perfiles de barras que sujetaran los elementos necesarios para proporcionar movimiento a lo largo de los eje X e Y al cabezal y que permitan garantizar la estabilidad de la plataforma y elevarla en el eje Z (Figura 4.9).

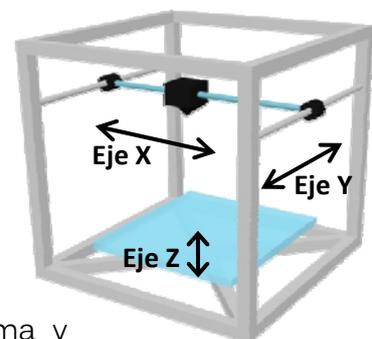


Figura 4. 9. Esquema del diseño de la estructura escogido

## 5. DISEÑO DETALLADO

---

### 5.1. DESCRIPCIÓN DEL CONJUNTO COMPLETO

A continuación se realiza una introducción al conjunto antes de describir en detalle cada una de los componentes de la impresora.

El diseño del prototipo de la nueva impresora 3D se muestra en la Figura 5.1. Como se ha mencionado a lo largo del documento, esta impresora funciona con tecnología FDM, utilizando coordenadas cartesianas y está basada en una construcción mediante perfiles estructurales.

El cabezal aporta los movimientos a lo largo del eje X e Y para formar la silueta de la pieza a generar y el movimiento Z, que determina la altura de la capa de impresión, viene dado por la plataforma de impresión.

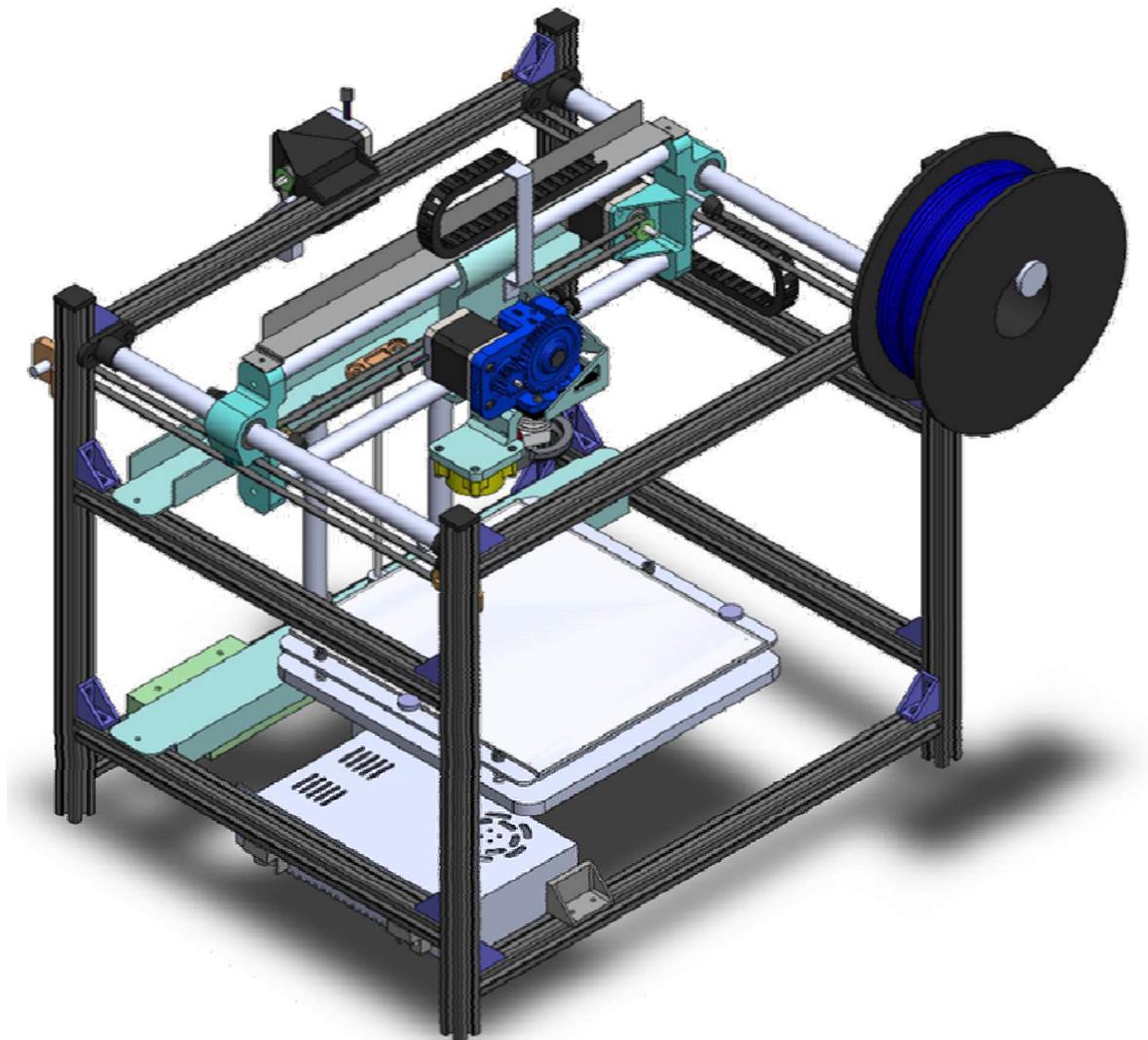


Figura 5. 1. Diseño final de la impresora 3D

Las dimensiones totales de la impresora son de 482 x 523 x 500 mm y su peso estimado es de 14,61 kg (sin incluir la bobina ni la electrónica) y el área de impresión es de 224 x 210 x 155 mm (Figura 5.2).

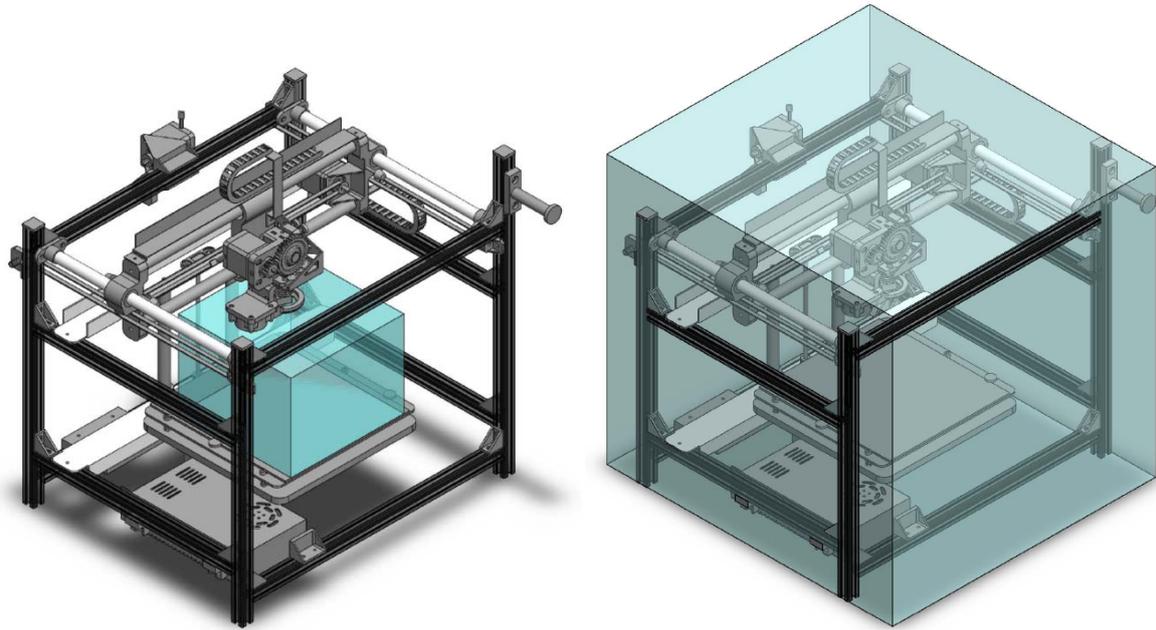


Figura 5. 2. Representación del área de impresión y el espacio envolvente de la impresora

Como se ha mencionado en el apartado 4.1, el cabezal de extrusión permite imprimir ABS, PLA y otros plásticos con un diámetro de filamento de 3 mm.

Para ver con más detalle cada uno de los elementos que componen la impresora, se ha desglosado el diseño en 4 partes principales: el chasis, el eje X, el eje Y y el eje Z.

## 5.2. CHASIS

El chasis del diseño final de la impresora engloba aquellos elementos que soportan el resto de piezas que componen tanto los tres ejes de movimiento como los dispositivos electrónicos y la bobina.

El primer factor que se ha estudiado para el diseño de la estructura es el material. Las opciones que se han considerado para el análisis son realizar una estructura metálica, de aluminio o acero, de plástico o de madera.

Finalmente, el material que se utiliza para los perfiles estructurales es el aluminio. Esto es debido a que, aunque los chasis de metal son más caros y pesados, suponen un conjunto de ventajas respecto a las impresoras construidas con madera o plásticos.

La principal desventaja que suponen los chasis de madera es que estos se deforman ligeramente con el tiempo. Esta deformación dificulta la calibración y por tanto la precisión dimensional de las piezas. Actualmente también existen impresoras formadas por marcos de metacrilato. Sin embargo, el aluminio presenta una rigidez mayor en comparación con este material.

Se ha considerado el aluminio mejor opción que el acero, ya que es un metal más ligero, económico y por disponibilidad, ya que existe una gran variedad de perfiles estructurales de aluminio.

Por lo tanto, la estructura está formada por 12 perfiles estructurales de aluminio de 20 x 20 mm, cuya sección se muestra en la Figura 5.3. Estos perfiles están unidos mediante abrazaderas del mismo material. También se utilizan embellecedores para mejorar la estética de la impresora y evitar posibles daños.

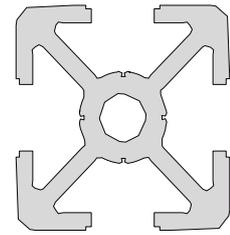


Figura 5.3. Sección del perfil estructural

Los elementos electrónicos y la bobina de filamento están sujetos a dichos perfiles. En la Figura 5.4 se representan la fuente de alimentación y la placa PCB diseñada por Isabel Cañete y el soporte de la bobina.

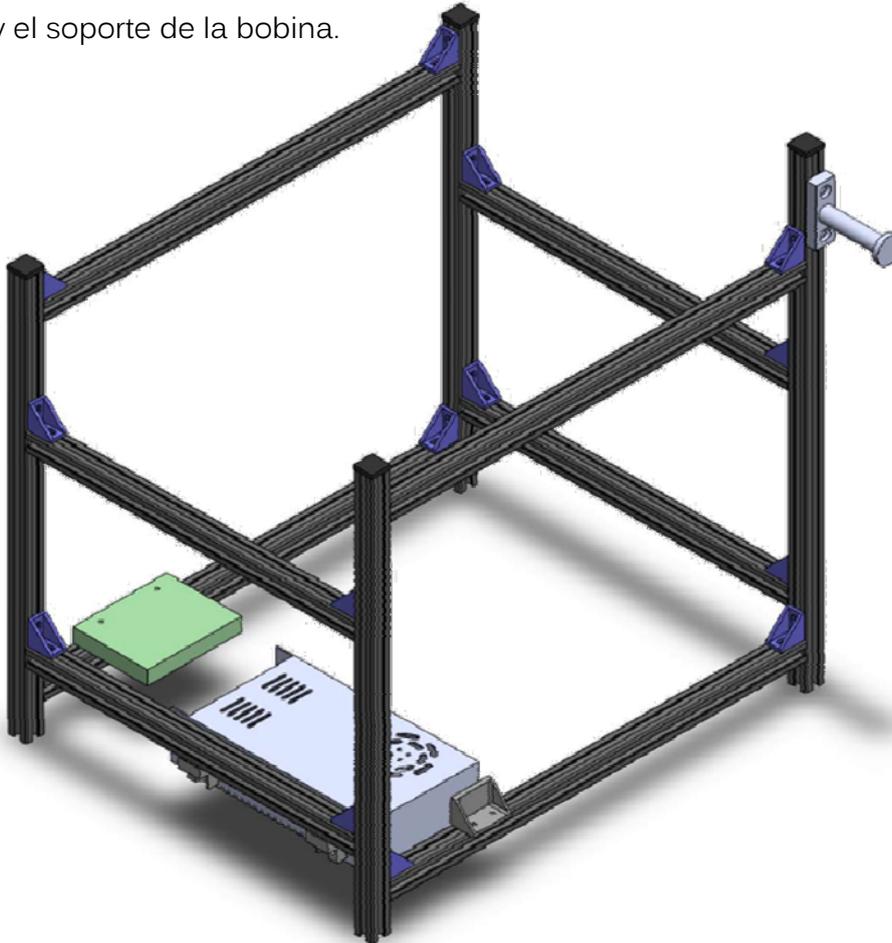


Figura 5.4. Chasis de la impresora 3D

### 5.2.1. EVALUACIÓN DE LA POSIBILIDAD DE INCORPORAR TAPA

Para definir por completo el diseño del chasis, se estudia la opción de incorporar tapa. Añadiendo una tapa que cubriera la máquina se conseguiría evitar deformaciones, grietas o distorsiones en las piezas, originadas por las corrientes de aire exterior que generan gradientes de temperatura, ya que se consigue atrapar el calor y controlar la atmosfera en la que se imprime. Otra ventaja que supone la cobertura de la impresora es la seguridad para el usuario, ya que la impresora trabaja a altas temperaturas.

Sin embargo, aunque el control de temperatura ayuda a las impresiones en ABS, no es imprescindible para imprimir piezas correctamente en PLA e incrementaría el coste tanto por el material necesario para su construcción y fijación al chasis como por el pago de patentes. En consecuencia, a pesar de que supone ventajas respecto a la calidad de las piezas y la seguridad, se decide no incorporar tapa al diseño para evitar un aumento del precio de la impresora y de la dificultad para el montaje de ésta.

### 5.2.2. DETALLE DE LAS PIEZAS DEL CHASIS

En la Tabla 5.1 se muestra el listado de las piezas que componen el chasis de la impresora. La situación espacial de los componentes se puede observar en la vista isométrica representada en la Figura 5.5.

Id.	Cant.	Descripción
1	16	Abrazaderas
2	4	Embellecedores
3	1	Soporte bobina
	12	Perfiles <i>HEPCO</i> 20x20
4	3	Perfiles verticales 430 mm
5	1	Perfiles verticales 496 mm
6	4	Perfiles horizontales 350 mm
7	4	Perfiles horizontales 443,84 mm
8	1	Soporte fuente de alimentación derecha
9	1	Soporte fuente de alimentación izquierda trasera
10	1	Soporte fuente de alimentación izquierda frontal

Tabla 5. 1. Listado de piezas que componen el Chasis

Además, se adjuntan el conjunto de vistas isométricas de las piezas que forman parte del chasis para facilitar su visualización y los detalles técnicos de los perfiles, las abrazaderas y los embellecedores.

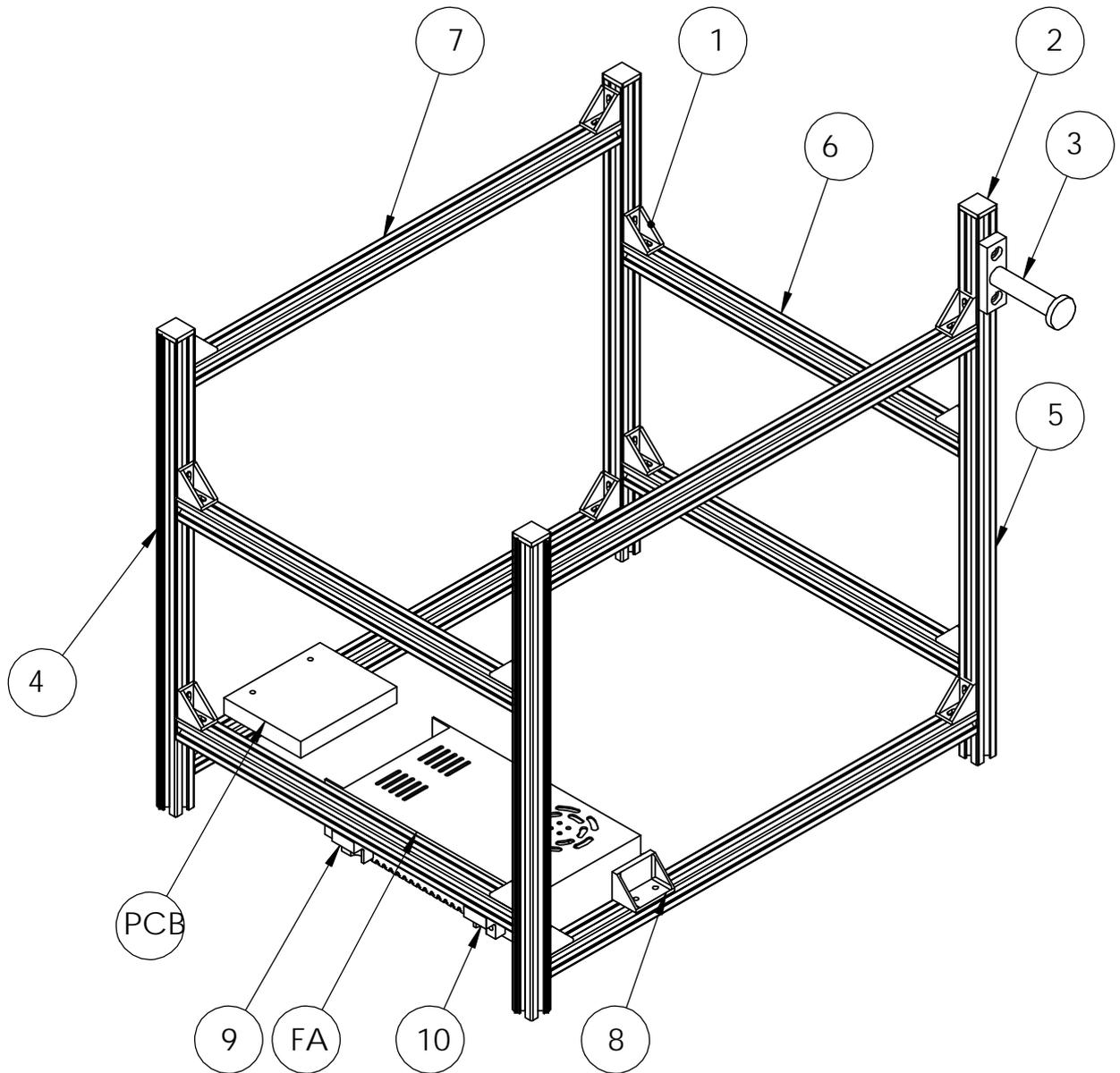


Figura 5. 5.Vista isométrica del Chasis. Escala 1:5

## 1. ABRAZADERAS (HEPCO)

Las abrazaderas de aluminio de 17 x 25 mm (del mismo proveedor que los perfiles estructurales) permiten unir los perfiles de manera fácil mediante dos tornillos de sombrerete M4x10.

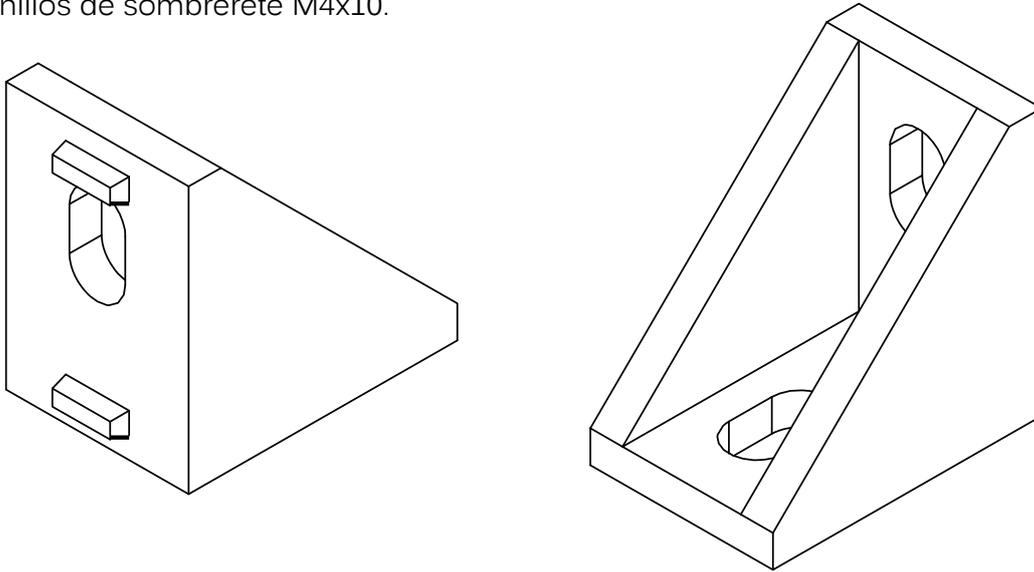


Figura 5. 6. Vista isométrica pieza 1. Escala: 2:1

## 2. EMBELLECEDORES (HEPCO)

La función de los embellecedores de plástico ABS es la de proteger los extremos superiores de los perfiles y mejorar la estética. Estos embellecedores de 20 x 20 mm se adquieren junto con los perfiles y las abrazaderas.

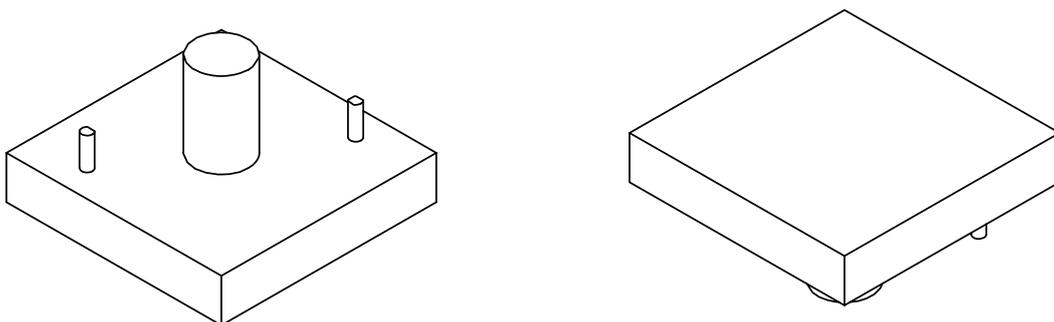


Figura 5. 7. Vista isométrica pieza 2. Escala: 2:1

### 3. SOPORTE BOBINA

El soporte de la bobina de filamento hecho de acero se encarga de, como su nombre indica, sujetar la bobina a la estructura de la impresora, dejando que esta pueda rotar al suministrar el material al cabezal.

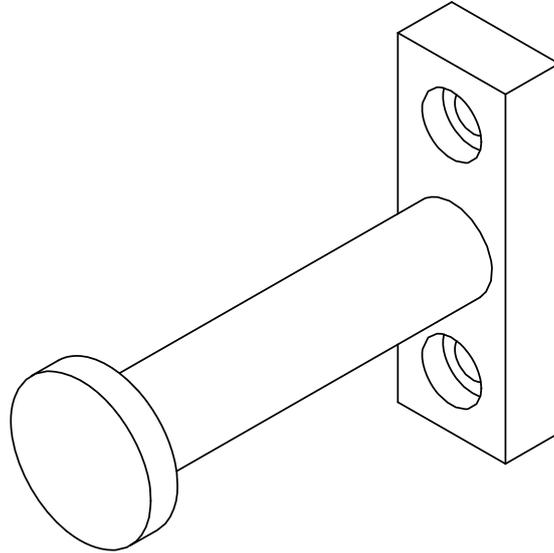


Figura 5. 8. Vista isométrica pieza 3. Escala: 1:1

### 4-7. PERFILES *HEPCO* 20X20

Como se ha mencionado, la estructura cuenta con doce perfiles estructurales de aluminio. Estos perfiles se anodizan con un revestimiento transparente de 10 micrómetros para garantizar la precisión, la resistencia al rayado y la corrosión.

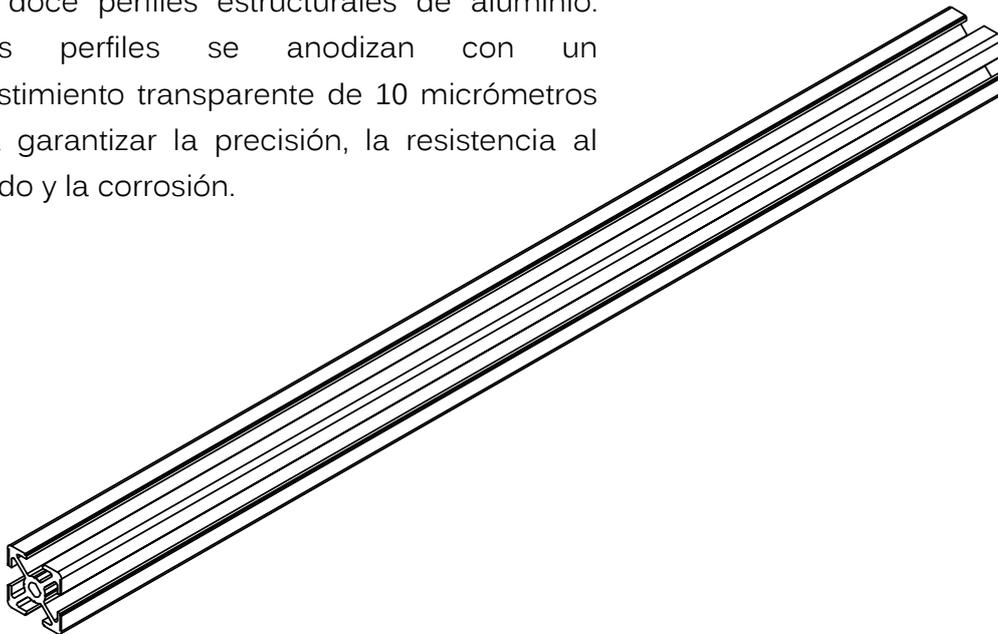


Figura 5. 9. Vista isométrica piezas 4-7. Escala: 1:5

Los tres soportes que se muestran a continuación son los encargados de sujetar la fuente de alimentación. Estas piezas de aluminio se han diseñado para atornillarse a los perfiles horizontales del chasis y soportar la fuente de alimentación mediante tres puntos.

#### 8. SOPORTE FUENTE DE ALIMENTACIÓN DERECHA

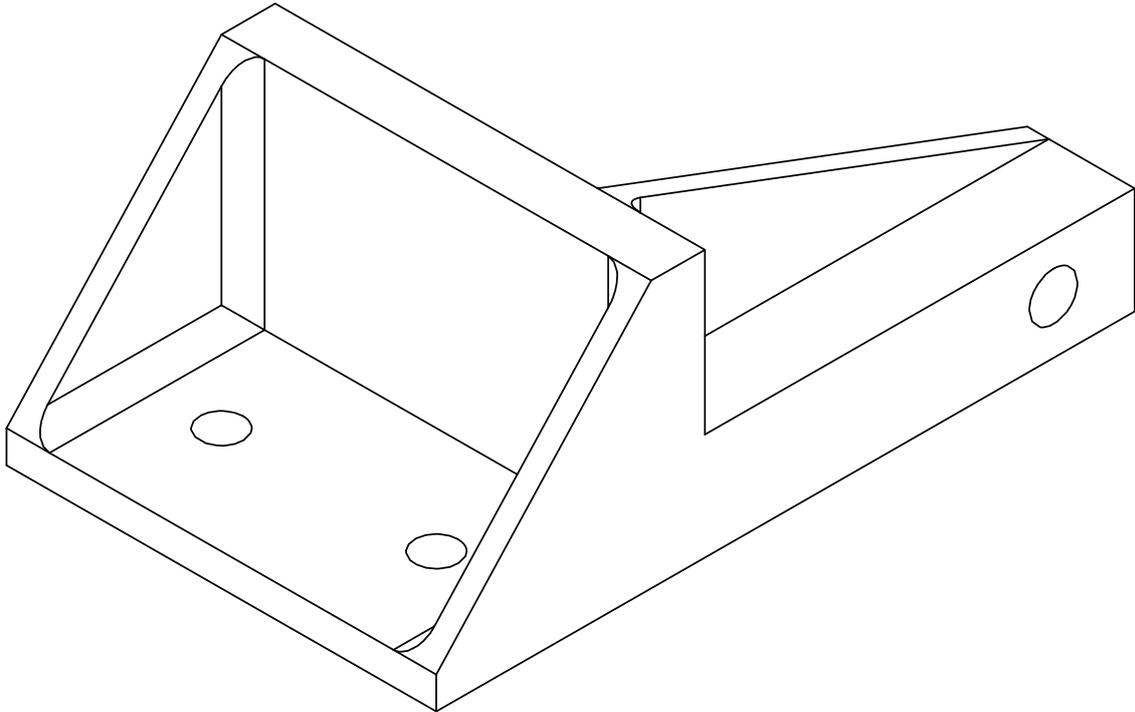


Figura 5. 10. Vista isométrica pieza 8. Escala: 1:1

#### 9. SOPORTE FUENTE DE ALIMENTACIÓN IZQUIERDA TRASERA

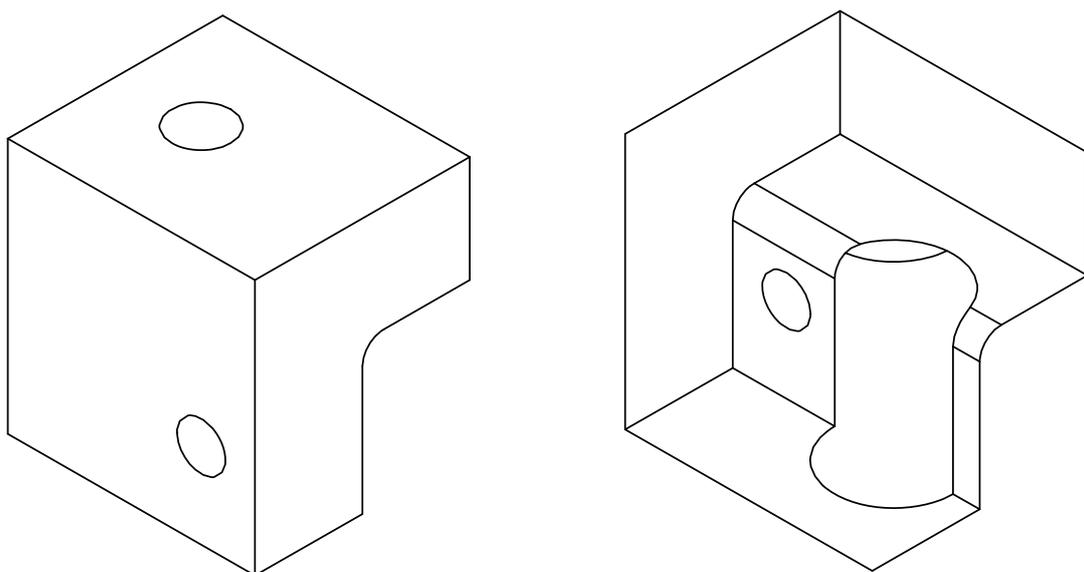


Figura 5. 11. Vista isométrica pieza 9. Escala: 2:1

10. SOPORTE FUENTE DE ALIMENTACIÓN IZQUIERDA FRONTAL

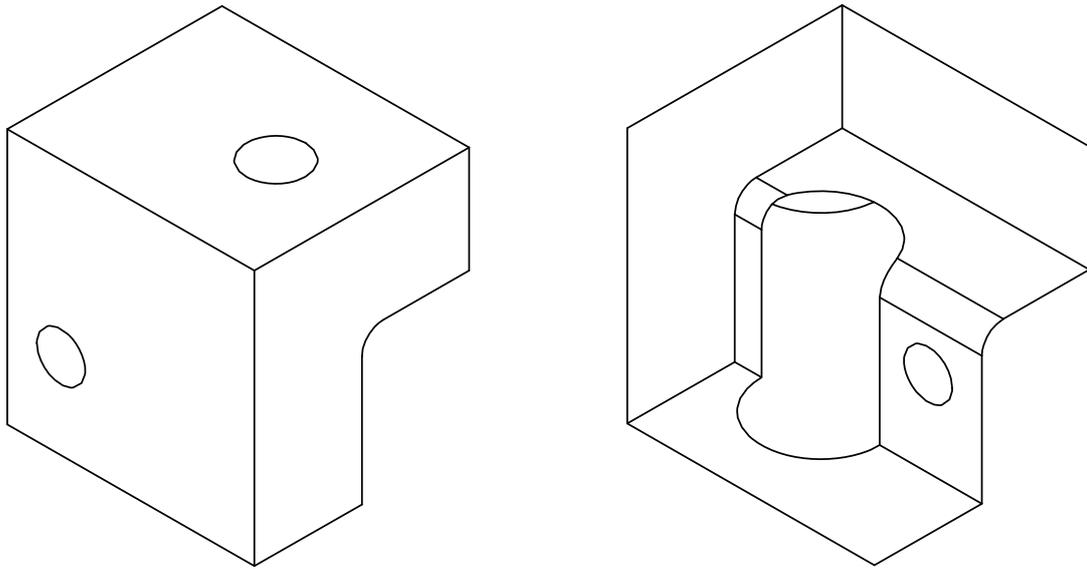


Figura 5. 12. Vista isométrica pieza 10. Escala: 2:1

5.2.3. PERFILES ESTRUCTURALES *HEPCO*

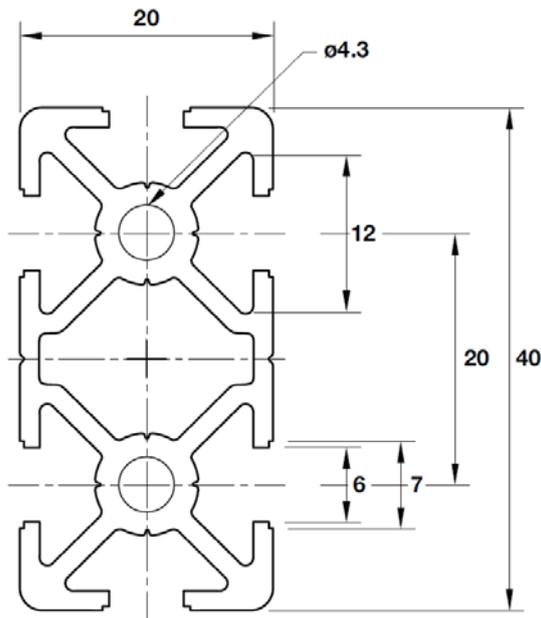


Figura 5. 13. Dimensiones de los perfiles (mm).

Fuente: *HEPCO*

Código: 0-130-2020

Dimensiones: 20 x 20 mm

**Datos técnicos:**

Longitud máxima: 4000 mm

Masa: 0,44 kg/m

Material: Aluminio

Momento de inercia:  $I_{xx} = I_{yy} = 0,7 \text{ cm}^4$

Momento resistente de la sección transversal:  $W_{xx} = W_{yy} = 0,7 \text{ cm}^3$

### Especificaciones técnicas:

- Designación del material: AlMgSi0.5F25
- Número del material: Al6063-T5
- Resistencia a la tracción mínima:  $250 \text{ N/mm}^2$
- Esfuerzo de prueba 0,2%:  $160 \text{ N/mm}^2$
- Deformación dúctil  $A_5$ : 10%
- Deformación dúctil  $A_{10}$ : 8%
- Módulo de elasticidad:  $70\,000 \text{ N/mm}^2$
- Dureza brinell: 75 HB
- Coeficiente de expansión térmica:  $(-50..+20^\circ\text{C}) = 21,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$   
 $(+20..+100^\circ\text{C}) = 23,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
- Cifra de contracción transversal:  $\nu = 0,34$
- Proceso de anodización: E6/EV1 transparente
- Espesor de la capa:  $10 \mu\text{m}$
- Dureza 300 HV

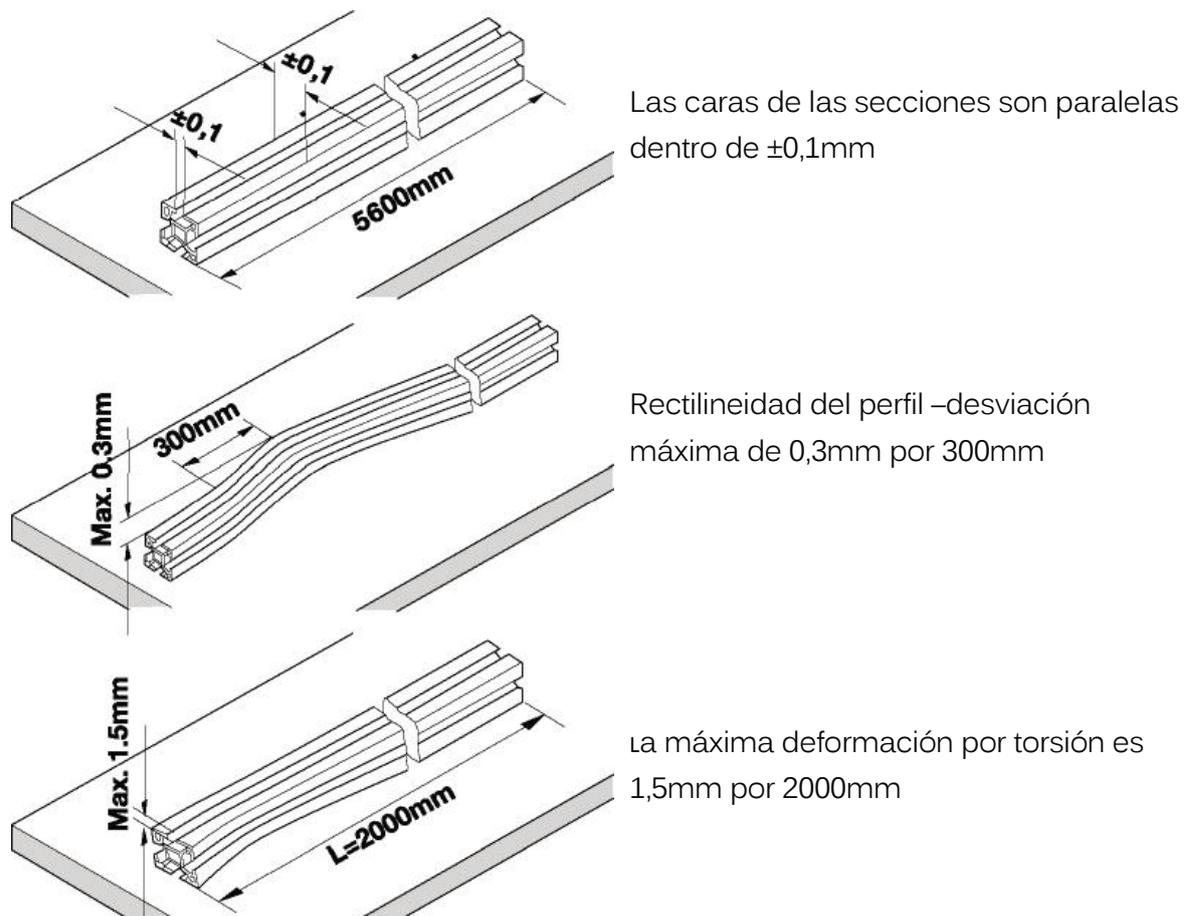


Figura 5. 14. Desviaciones de los perfiles. Fuente: HEPCO

### 5.2.4. EMBELLECEDORES *HEPCO*

Código: 1-243-4049

Dimensiones: 20 x 20 mm

**Datos técnicos:**

Material: Plástico ABS

Acabado: Negro

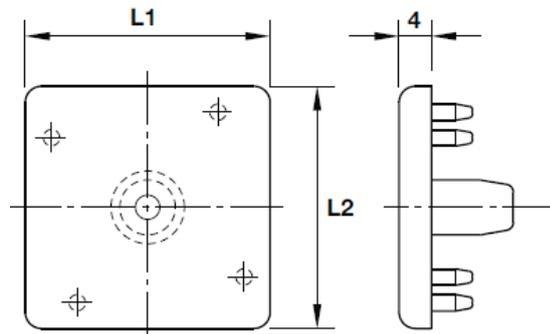


Figura 5. 15. Dimensiones de los embellecedores (mm). Fuente: *HEPCO*

### 5.2.5. ABRAZADERAS *HEPCO*

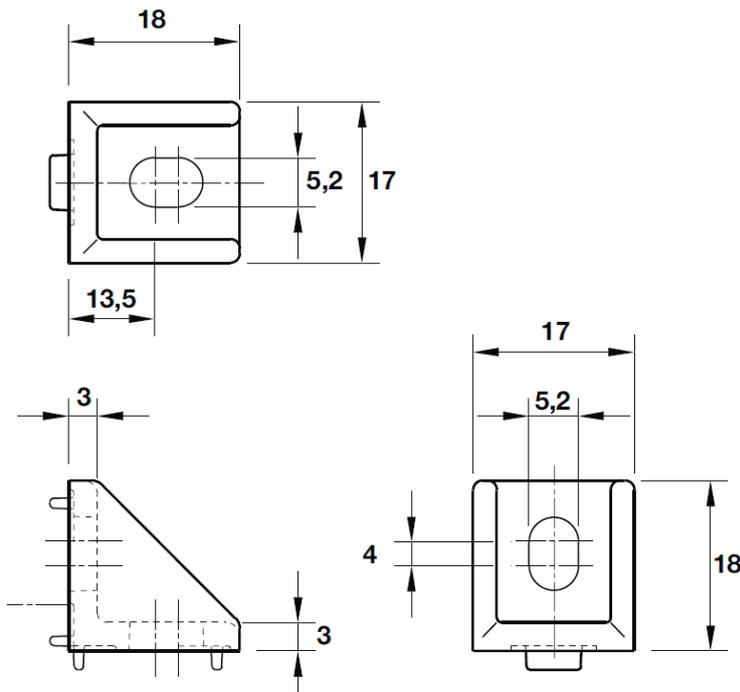


Figura 5. 16. Dimensiones de las abrazaderas (mm). Fuente: *HEPCO*

Código: 1-242-1725

Dimensiones: 17 x 25 mm

**Datos técnicos:**

Material: Aluminio

Acabado: ninguno

Masa: 0,02 kg

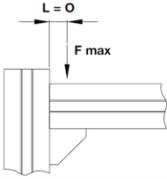
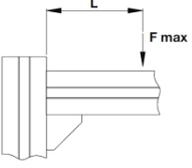
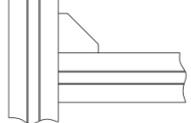
Carga directa (N)	Carga descentrada (LxF)(Nm)	Carga torsor (Nm)	Posición de la unión
			
400	8	2	
400	20	2	

Tabla 5. 2. Capacidad de carga de las conexiones de los perfiles. Fuente: HEPCO

### 5.3. EJE X

Es en este eje donde se sitúa el cabezal de extrusión, guiado por una correa dentada MXL de 2,032 mm de paso, para moverse a lo largo del eje X con un recorrido de 225 mm. El cabezal de extrusión se soporta mediante una pieza guiada por dos ejes de acero de 16 mm colocados de forma vertical para disminuir la flexión de estos.

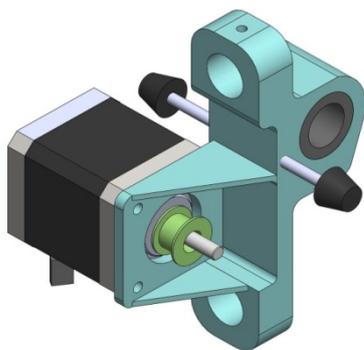


Figura 5. 17. Detalle del soporte derecho

Este eje cuenta con dos soportes que permiten la unión con el eje Y y sujetan las dos guías lineales. Es en el soporte derecho (Figura 5.17) de la impresora donde se sitúa el motor paso a paso NEMA 17 que proporciona el movimiento al cabezal. Por tanto, es junto al soporte del cabezal donde se encuentra una cadena portacables *Easy Chain* para garantizar la protección del cableado. Para ello, se sitúa una base en forma de L sujeto a dichos soportes.

El soporte izquierdo es simétrico, con la diferencia de que en lugar de incorporar el motor, cuenta con un tensor para la correa dentada.

Este eje cuenta además con tacos de goma para evitar un contacto brusco de las piezas con los elementos del eje Y.

Tanto las piezas que permiten unir este eje con el eje Y como el soporte del cabezal de extrusión, cuentan con rodamientos lineales de bolas. Estos rodamientos permiten disminuir la fricción al deslizarse por las guías lineales de ambos ejes.

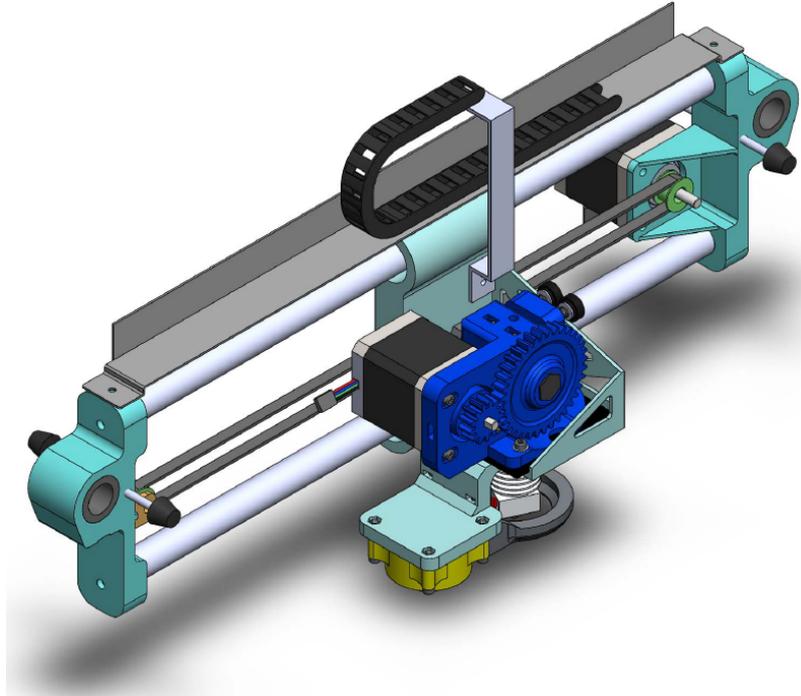


Figura 5. 18. Eje X de la impresora 3D

En los siguientes apartados se explican y detalla la elección de los elementos mencionados, así como sus características técnicas.

### 5.3.1. MOTORES

Para elegir cómo generar el movimiento en cada uno de los ejes se realiza una comparativa entre los motores paso a paso y los de corriente continua. En la Tabla 5.3 se muestran a grandes rasgos algunas características de estos motores, diferenciando sus ventajas e inconvenientes.

Características	Paso a paso ✓	De corriente continua
Necesidad de <i>Encoder</i>	No	Sí
Calentamiento	Mayor	Menor
Volumen respecto a potencia	Mayor	Menor
Velocidad variable	Sí	Sí
Desgaste	No	Sí

Tabla 5. 3. Comparativa entre tipos de motores.

Entre los dos motores expuestos en la tabla anterior, los motores paso a paso son los que presentan las características que más se adecúan a las requeridas. Este tipo de motores se pueden adquirir por un bajo precio y presentan una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. Otra característica que los define es su baja complejidad y que no disponen de escobillas por lo que no se desgastan, permitiendo reducir el mantenimiento.

El funcionamiento de estos motores se basa en girar en función de la alimentación de impulsos eléctricos. Según el tipo de alimentación se diferencian los motores unipolares y los bipolares, según si están siempre alimentados por una única tensión y en un mismo sentido o si se alternan los sentidos.

Existen tres categorías de motores paso a paso principales: de imán permanente, de reluctancia variable e híbridos, una combinación de las dos anteriores. En la Tabla 5.4 se resumen las características y el funcionamiento de estos 3 tipos de motores.

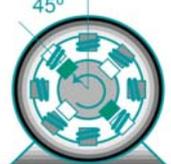
Tipo	Bipolar de imán permanente	Unipolar de reluctancia variable	Bipolar híbrido
Características	2 fases, 4 espiras	4 fases, 8 espiras	2 fases, 4 espiras
Número paso/vueltas	8	24	12
<b>Etapas de funcionamiento</b>			
Paso 1			
Etapas intermedia			
Paso 2			

Tabla 5. 4. Tres tipos de motores paso a paso. Fuente: *Schneider Electric*

De los motores tipo paso a paso disponibles en el mercado, los diferentes conjuntos de modelos escogidos para el análisis de alternativas son los tipos NEMA 8, NEMA 11, NEMA 14, NEMA 15, NEMA 17, NEMA 23 y NEMA 34 (Figura

5.19), entre otros. Cada uno de los modelos pertenecientes a los grupos nombrados presenta diferentes características de voltaje, intensidad, par, inercia, etc.

NEMA<sup>9</sup> hace referencia a la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos. Esta asociación industrial es la autora de numerosos estándares industriales comunes utilizados en el campo de la electricidad. Por lo tanto los motores nombrados emplean dichos estándares y es por ello que la selección de motores se reduce a estos 7 conjuntos.



Figura 5. 19. Tipos de motores paso a paso. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com) [6]

### 5.3.1.1. ELECCIÓN DE LOS MOTORES

Para la elección de los motores se utilizan las siguiente ecuaciones, extraída de un sistema como el mostrado en la Figura 5.20.

$$T_{\text{motor}} = (T_i + T_L) \cdot f \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$T_i = I \cdot (\omega/t) \cdot \pi \cdot \Theta \cdot K \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$T_L = R_{\text{polea}} (m \cdot a + F_f) \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Donde:

- $T_{\text{motor}}$ : par total proporcionado por el motor (N·m)
- $T_i$ : par de inercia del motor (N·m)
- $T_L$ : par del motor debido a la carga (N·m)

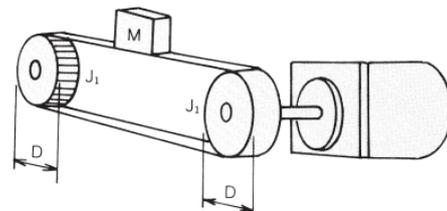


Figura 5. 20. Esquema del sistema. Fuente: *Oriental motor*

<sup>9</sup> NEMA = *National Electrical Manufacturers Association*

- $f$ : factor de seguridad. En este caso, de 1,4 para obtener un margen del 40%
- $F_f$ : fuerza de fricción entre los rodamientos y las guías (N) (Tabla 5.5)
- $K$ : constante = 97,73
- $I$ : inercia del motor ( $g \cdot cm^2$ )
- $w/t$ : aceleración angular ( $pasos/s^2$ )
- $\theta$ : ángulo de paso ( $^\circ$ )
- $p$ : paso de la correa dentada
- $z$ : número de dientes

Eje $\varnothing$ d (mm)	Fuerza de arranque aprox. (N)	Fuerza de fricción aprox. (N)
12	1,5	0,8
14	1,8	0,9
16	2	1
20	3	1,5

Tabla 5. 5. Fuerza de arranque y fricción de los rodamientos lineales. Fuente: *Bosch Rexroth AG*

Teniendo en cuenta las características de las correas dentadas obtenemos, como se justifica en la ecuación 5.4, un radio de 6,468 mm para las poleas.

Si  $z = 20$  y  $p = 0,08'' \equiv 2,032$  mm

$$R_{polea} = p \cdot z / 2\pi = 6,468 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Seguidamente se exponen los cálculos para el caso del motor NEMA 17, teniendo en cuenta que el diámetro de los ejes es de 16 mm<sup>10</sup>:

$$T_{motor} = [R_{polea} (m \cdot a + F_f) + I \cdot (w/t) \cdot \pi \cdot \theta \cdot K] \cdot f = [6,468 (9,81 + 4) + 57 (787,408/2,5) \pi \cdot 1,8 \cdot 97,73] \cdot 1,4 = 0,138943 \text{ N}\cdot\text{m}$$

A partir del par obtenido y considerando que el objetivo es obtener una velocidad máxima de 236,222 RPM para el eje X, se puede comprobar que el motor paso a paso NEMA 17 puede proporcionar el par necesario. En la Figura 5.21 se observa que el motor cumple con las características requeridas ya que se sitúan por debajo de la curva de 12 Vdc.

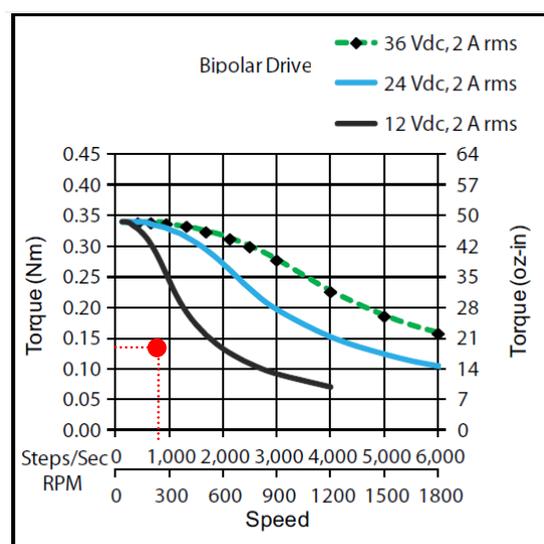


Figura 5. 21. Curvas de rendimiento de un NEMA 17. Fuente: *www.PBCLinear.com*

<sup>10</sup> Justificación de la elección en el apartado 5.4.1

**DATOS TÉCNICOS DE LOS MOTORES PASO A PASO NEMA 17**

A continuación se describen las especificaciones mecánicas y eléctricas del motor paso a paso de PBC Linear.



Figura 5. 22. Motor de eje estándar. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com)

- Fases 2
- Paso/vuelta 200
- Exactitud paso ±5%
- Carga del eje 20,000 Horas at 1000 RPM
- Axial 25 N (5.6 lbs.) Push  
65 N (15 lbs.) Pull
- Radial 29 N (6.5 lbs.)
- IP clasificación 40
- Aprobación RoHS
- Temp. de funcionamiento -20° C to +40° C
- Aislamiento B, 130° C
- Resistencia de aislamiento 100 MegOhms

Longitud	Corriente nominal	Par de retención	Devanado	Par de retención	Inercia del rotor	Peso
"L" máx.	Amps	Nm	±10%	mNm	g·cm <sup>2</sup>	kg
39,8 mm	2	0,48	1,04	15	57	0,28

Tabla 5. 6. Datos técnicos del NEMA 17. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com)

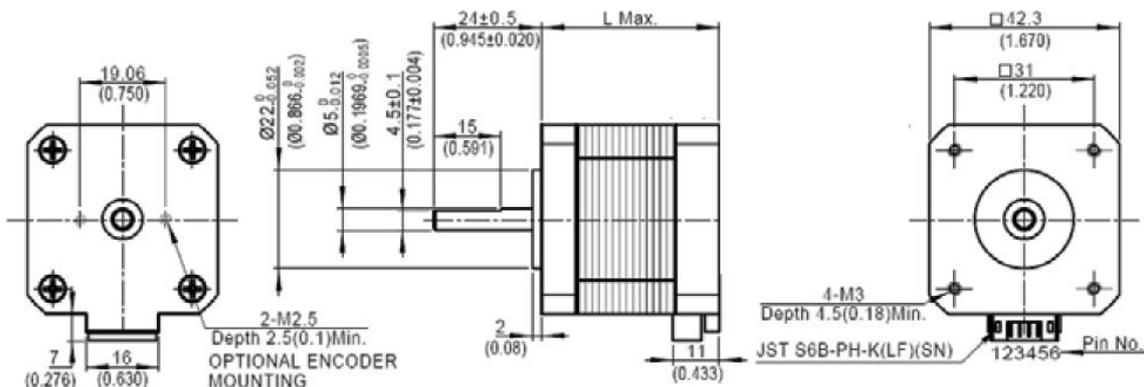


Figura 5. 23. Dimensiones en mm del NEMA 17. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com)

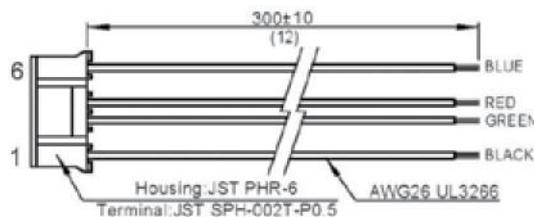


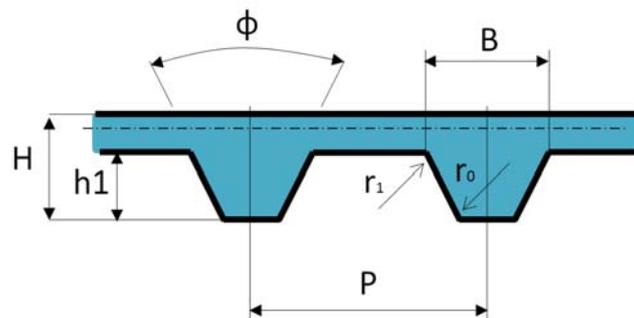
Figura 5. 24. Conexiones del motor NEMA 17. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com)

### 5.3.2. ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

#### 5.3.2.1. CORREAS DENTADAS (SÍNCRONAS)

Para la transmisión de movimiento tanto en el eje X como en el eje Y se utilizan correas dentadas ya que permiten el uso de poleas de diámetro pequeño transmitiendo una alta potencia. Además cuentan con la ventaja de ofrecer mayor flexibilidad y mejor adaptación a las poleas con el mínimo deslizamiento. Otros motivos para la elección de este tipo de transmisión son que garantizan una relación de transmisión constante entre los ejes y facilitan el mantenimiento de la impresora por parte del usuario ya que no necesitan lubricación y el tensado no es tan exigente.

Existen diferentes tipos de correas dentadas según la forma de los dientes y el paso entre ellos. De estos tipos se estudiarán las alternativas para las correas clásicas, es decir con perfil de dientes trapezoidal. En la Tabla 5.6 se muestran las dimensiones para cada una de las series normalizadas para correas dentadas de perfil trapezoidal.



Tipo	Paso (mm)	H (mm)	h1 (mm)	B (mm)	r <sub>0</sub> (mm)	r <sub>1</sub> (mm)	φ (°)	Aplicaciones
MXL	2,032	1,14	0,51	1,14	0,13	0,13	40	Precisión ✓
XXL	3,175	1,52	0,76	1,73	0,30	0,20	50	Extra ligera
XL	5,08	2,30	1,27	2,57	0,38	0,38	50	Muy ligera
L	9,525	3,60	1,91	4,65	0,51	0,51	40	Ligera
H	12,7	4,30	2,29	6,12	1,02	1,02	40	Pesada
XH	22,225	11,20	6,35	12,57	1,19	1,57	40	Muy pesada
XXH	31,75	15,70	9,53	19,05	1,52	2,29	40	Extra pesada

Tabla 5. 7. Series de perfiles de dientes trapezoidal según ISO/DIS 5296. Fuente: *Ingemechanica* [7]

De los perfiles expuestos el que se utilizará para el diseño de la impresora será la correa dentada tipo MXL ya que proporciona máxima sincronización y precisión y

es la recomendada para espacios reducidos y velocidades elevadas. Sus principales ventajas son:

- Permite ahorro de espacio
- Ideal para transmisiones de precisión
- Permite el uso de poleas de diámetro pequeño con el máximo de dientes engranados
- Adecuada para motores paso a paso
- Gran precisión de posicionamiento
- Muy estable

Como se observa en la tabla anterior, es el tipo de correa que presenta las menores dimensiones. Este factor y las ventajas expuestas confirman que las correas tipo MXL son las que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto.

#### DATOS TÉCNICOS DE LAS CORREAS DENTADAS MXL 0,08"

**Material:** Cuerpo: Poliuretano, Cable: Kevlar

**Especificaciones:**

Resistencia a la flexión<sup>11</sup>:

<155 dientes – 112 N/mm

≥155 dientes – 182 N/mm

Paso: 2,032 mm

Ancho de la correa: 6,35 mm

**Rango de temperaturas:**

Continuo: -34°C a +85°C

Intermitente: +121°C

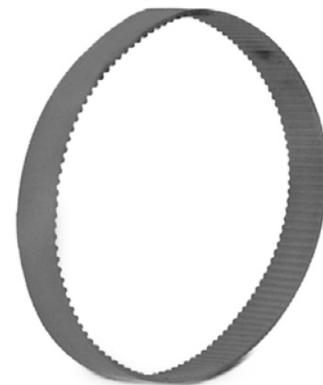


Figura 5. 25. Correa dentada.

Fuente:

[www.Stockdriveproducts.com](http://www.Stockdriveproducts.com)

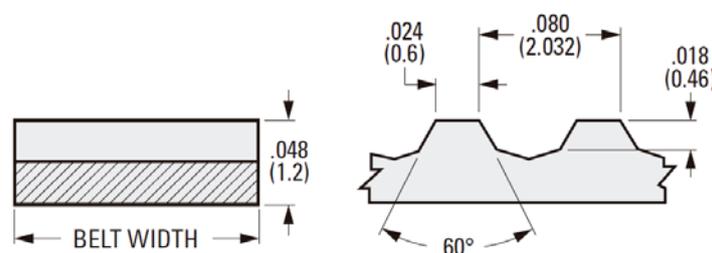


Figura 5. 26. Dimensiones de las correas dentadas (mm entre paréntesis). Fuente:

[www.Stockdriveproducts.com](http://www.Stockdriveproducts.com)

<sup>11</sup> La resistencia a flexión no es representativa de la capacidad de carga.

**DATOS TÉCNICOS DE LAS POLEAS**

**Material:** Policarbonato, fibra de vidrio reforzada

**Especificaciones:**



Figura 5. 27. Tipos de poleas. Fuente: *www.Stockdriveproducts.com*

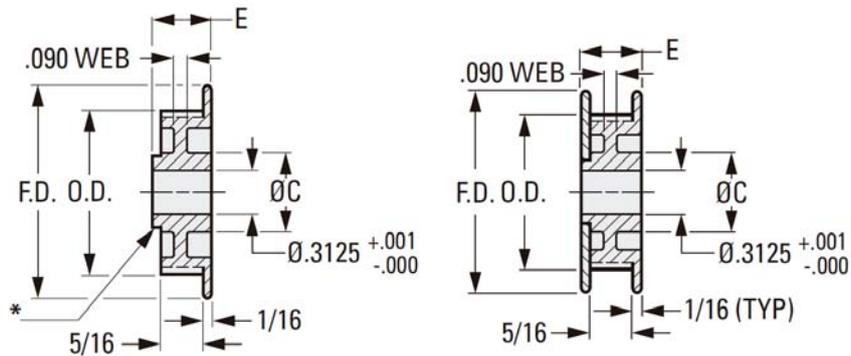


Figura 5. 28. Dimensiones de las poleas. Fuente: *www.Stock drive products.com*

Tipo	Nº de dientes	P.D.	O.D.	F.D.	E longitud
Simple	20	0.509	0.489	0.68	3/8
Doble	20	0.509	0.489	0.68	7/16

Tabla 5. 8. Datos técnicos de las poleas. Fuente: *www.Stockdriveproducts.com*

**5.3.2.2. RODAMIENTOS LINEALES**

Para disminuir la fricción de los elementos en movimiento con las guías se utilizan rodamientos lineales. En la tabla 5.9 se muestra a grandes rasgos una comparativa entre los distintos tipos de rodamientos.

TIPO	COMPACTOS Y ELINE ✓	SUPER A/B	ESTÁNDAR	SEGMENTARIOS
Frecuencia de utilización	+++	+++	++	++
Bajos costes	+++	++	++	+++
Montaje especialmente liviano	+++	++	++	++
Dimensiones reducidas	+++	+	+	+++
También anticorrosivos	+++	-	+++	+++
Cargas normales	+++	+++	+++	+++
Cargas altas	++	+++	++	++
Con compensación de errores de alineación	-	+++	-	-
Deslizamiento especialmente suave	++	+++	++	++
También abiertos	-	+++	+++	-
Altas temperaturas	-	-	+++	-
Gran suciedad	-	-	+++	-
Adecuado para vacío	-	-	+++	-

Tabla 5. 9. Matriz para la selección de rodamientos lineales. Fuente: *Bosch Rexroth AG [8]*

(+++ muy bien adecuado; ++ bien adecuado; + adecuado; - no se recomienda)

Observando los datos mostrados en la tabla anterior se puede apreciar que los rodamientos eLINE son los más adecuados ya que en comparación con el resto de rodamientos destacan en características relevantes para este caso como son la frecuencia de utilización, el coste, la facilidad de montaje y las dimensiones reducidas.

Las principales ventajas que proporciona el uso de este tipo de rodamiento en frente del resto y sus características son:



Figura 5. 29. Rodamiento eLINE. Fuente: *Rexroth Bosch AG [8]*

- Se trata de un rodamiento lineal muy económico para exigencias generales
- Adecuado para dimensiones reducidas (tamaño de ejes desde 12 hasta 50) (Tabla 5.10<sup>12</sup>)
- Montaje fácil, no requiere fijación adicional
- Gran capacidad de carga
- Larga duración de vida
- Largos intervalos de lubricación o lubricación de por vida

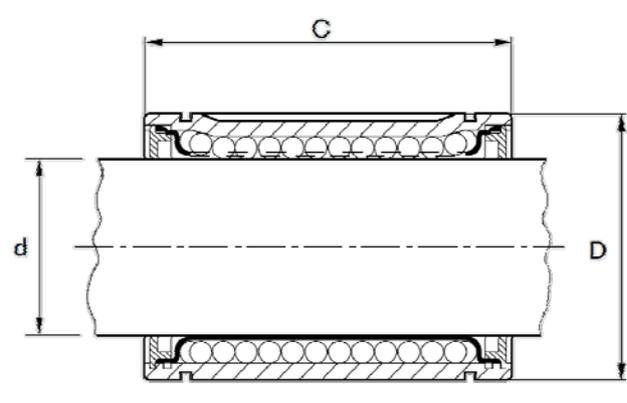


Figura 5. 30. Esquema del rodamiento lineal. Fuente: *Rexroth Bosch AG [8]*

Eje Ø d	Rodamiento lineal eLINE	
	D	C
8	15	24
10	17	26
12	19	28
14	21	28
16	24	30
20	28	30
25	35	40
30	40	50
40	52	60
50	62	70

Tabla 5. 10. Dimensiones de los rodamientos lineales eLINE Fuente: *Rexroth Bosch AG [8]*

## DATOS TÉCNICOS DE LOS RODAMIENTOS LINEALES Eline *BOSCH Rexroth*

### Características de construcción:

- Jaula de guiado POM
- Con retenes integrados
- Bolas de acero de rodamientos
- Segmentos de acero templados
- Anillos de sujeción de metal
- Con juego radial reducido, para aplicaciones con taladros H7
- Lubricados con Dynalub 510

<sup>12</sup> La selección del diámetro de los rodamientos se determina en función del diámetro del eje, para ver la selección ver el Apartado 5.4.1.

Datos técnicos:

Velocidad máxima: 5 m/s

Aceleración máxima: 150 m/s<sup>2</sup>

Temperatura de servicio: -10 °C hasta 80 °C

Eje	Peso (kg)	Hileras de bolas	Juego radial (µm) Eje/taladro	Capacidades de carga (N)			
				dinámica		estática	
				mín.	máx.	mín.	máx.
16	0,025	5	+8 -24	950	1120	500	730

Tabla 5. 11. Datos técnicos de los rodamientos lineales. Fuente: *Bosch Rexroth AG*

5.3.3. SOPORTES Y SUJECIONES

A continuación se presentan las alternativas estudiadas para la organización del cableado (Tabla 5.12).



Tabla 5. 12. Alternativas para la organización de los cables

De los sistemas presentados con la función de sujetar y organizar los cables, los que permiten una distribución más organizada por cubrir completamente los cables protegiéndolos del exterior son:

- los cubre cables
- los sistemas *FlexWrap* (Fundas con cierre de velcro) y mallas
- las cadenas portacables

Una de las características más importantes que debe presentar la sujeción es la de permitir el movimiento de los cables a lo largo de los ejes para evitar la rotura de estos. Es por esta razón por el que se utilizarán cadenas portacables para el eje X. En comparación con el resto de mecanismos, son los que facilitan el movimiento y la fijación de los cables sin que interrumpan el funcionamiento de la máquina, además de agilizar la introducción de los cables en su interior.

Entre los tipos de cadenas portacables podemos encontrar diferentes grupos según sus dimensiones y función. Las cadenas escogidas para el eje X son las cadenas *Easy Chain* de *IGUS*, ya que entre sus características principales destacan la facilidad de llenado y su bajo precio.

#### 5.3.4. DETALLE DE LAS PIEZAS DEL EJE X

A continuación se presenta la ubicación de cada una de las piezas que forma el eje X y las vistas isométricas de las piezas diseñadas.

Id.	Cant.	Descripción
11	1	Cabezal de extrusión
12	1	Soporte del cabezal de extrusión
13	4	Rodamientos lineales
14	2	Guías lineales
15	1	Correa dentada
16	1	Correa portacables <i>Igus</i>
17	1	Unión correa <i>Igus</i> X
18	1	Soporte correa portacables
19	1	Soporte X-Y izquierdo
20	1	Soporte X-Y derecho
21	1	Tensor correa dentada
22	1	Motor NEMA 17
23	2	Poleas dentadas
24	4	Tacos de goma

Tabla 5. 13. Listado de piezas que componen el Eje X

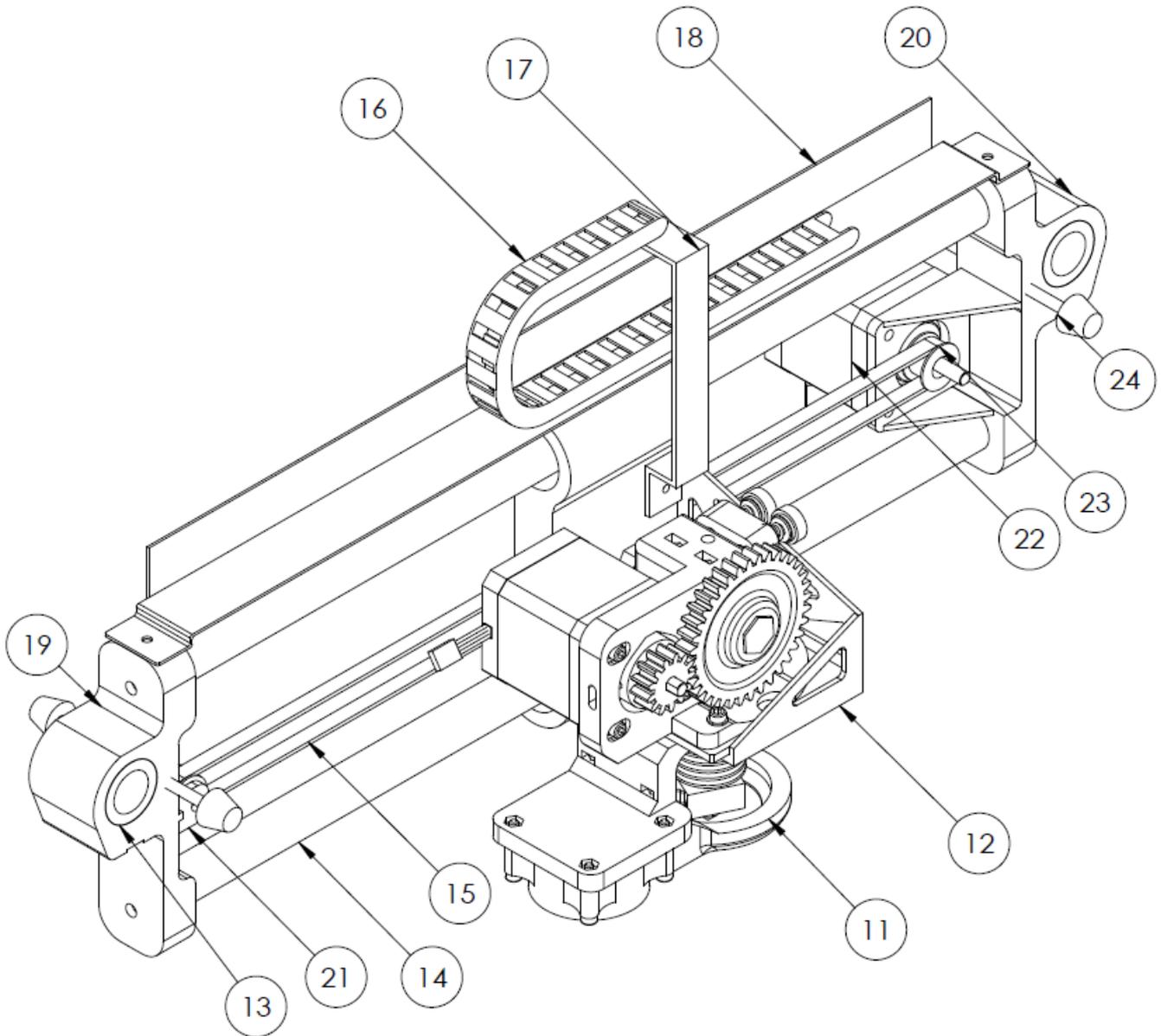


Figura 5. 31. Vista isométrica del Eje X. Escala 1:2

## 11. CABEZAL DE EXTRUSIÓN (FUNDACIÓ CIM) (ver apartado 4.1)

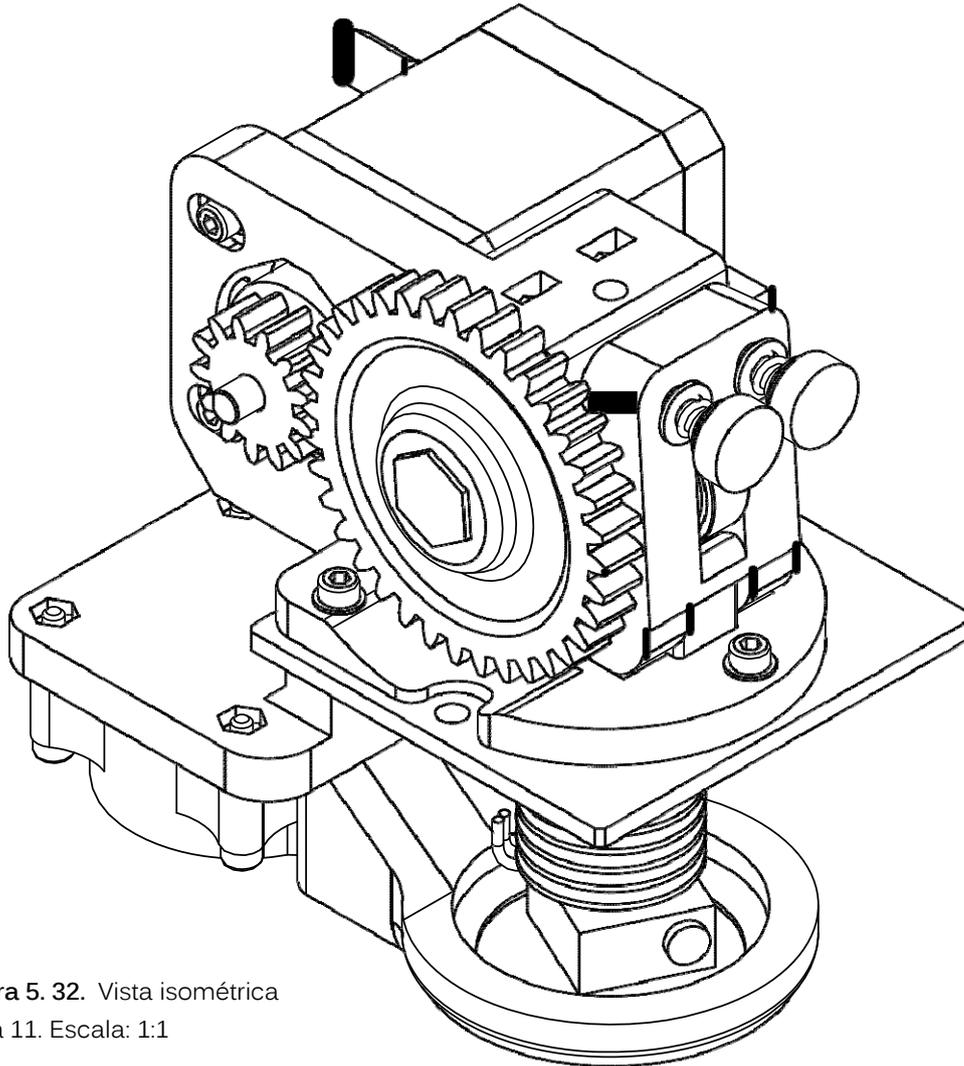


Figura 5.32. Vista isométrica  
pieza 11. Escala: 1:1

## 12. SOPORTE DEL CABEZAL DE EXTRUSIÓN

El soporte del cabezal de extrusión se ha diseñado para soportar el cabezal de la Fundació CIM. Este soporte permite el deslizamiento del cabezal a lo largo de las guías del eje X, gracias a la correa dentada que queda fijada en la parte posterior del soporte y con la ayuda de dos rodamientos lineales de bolas.

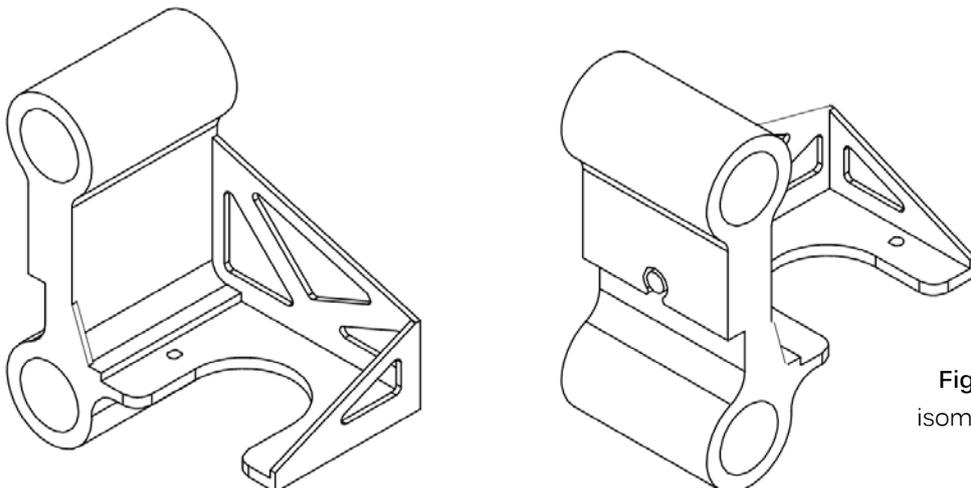


Figura 5.33. Vista  
isométrica pieza 12.  
Escala: 1:2

## 17. UNIÓN CORREA PORTACABLES X

La pieza de la Figura 5.34 corresponde al componente que permite unir el cabezal de extrusión con la cadena portacables que se desliza a lo largo del eje X acompañando al cabezal.

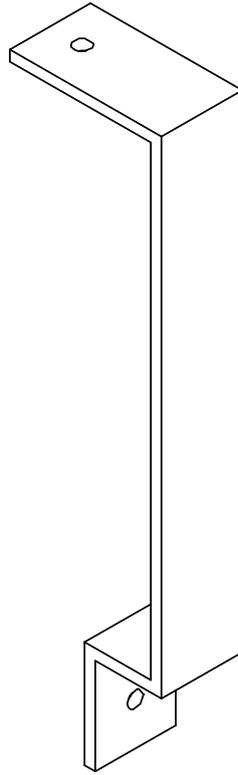


Figura 5. 34. Vista isométrica pieza 17. Escala: 1:1

## 18. SOPORTE CORREA PORTACABLES X

El soporte de acero que se muestra a continuación está diseñado para fijarse a los soportes laterales del eje X (Figura 5.36 y 5.37). Este es el encargado de servir de soporte a la cadena portacables del eje X y tiene forma de L con el objetivo de evitar la flexión.

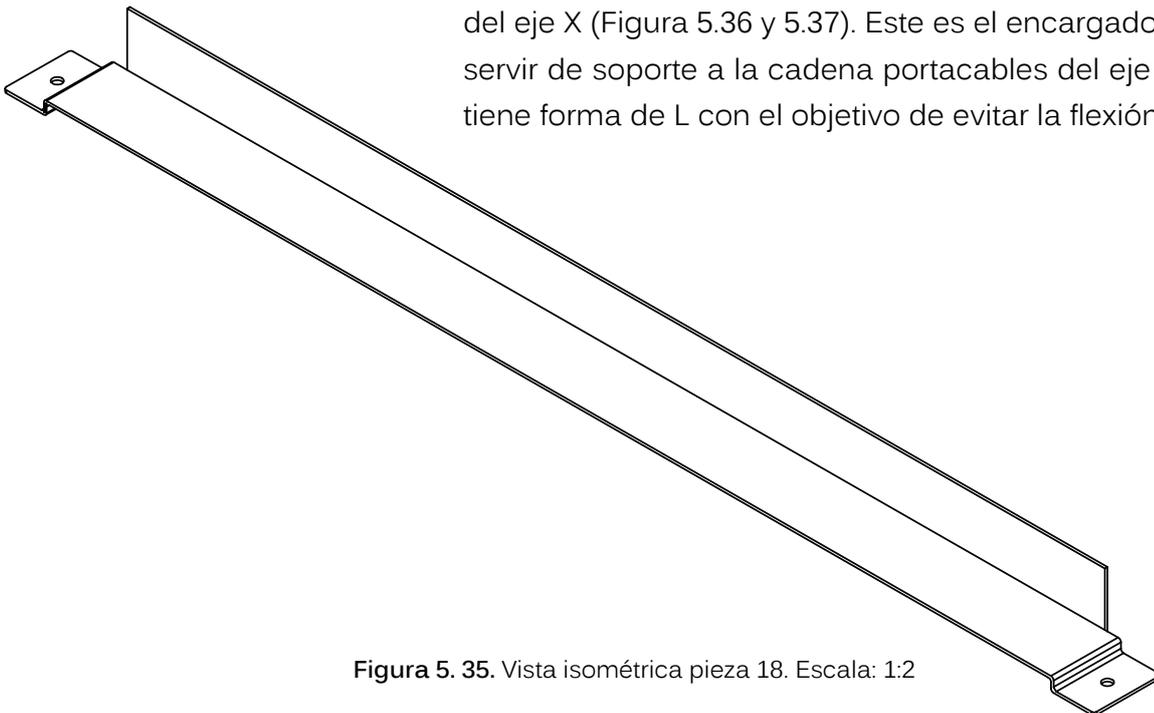
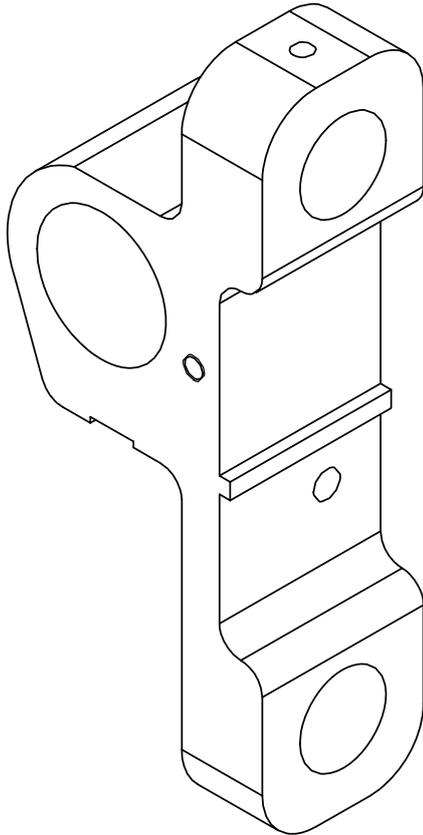


Figura 5. 35. Vista isométrica pieza 18. Escala: 1:2

## 19. SOPORTE X-Y IZQUIERDO



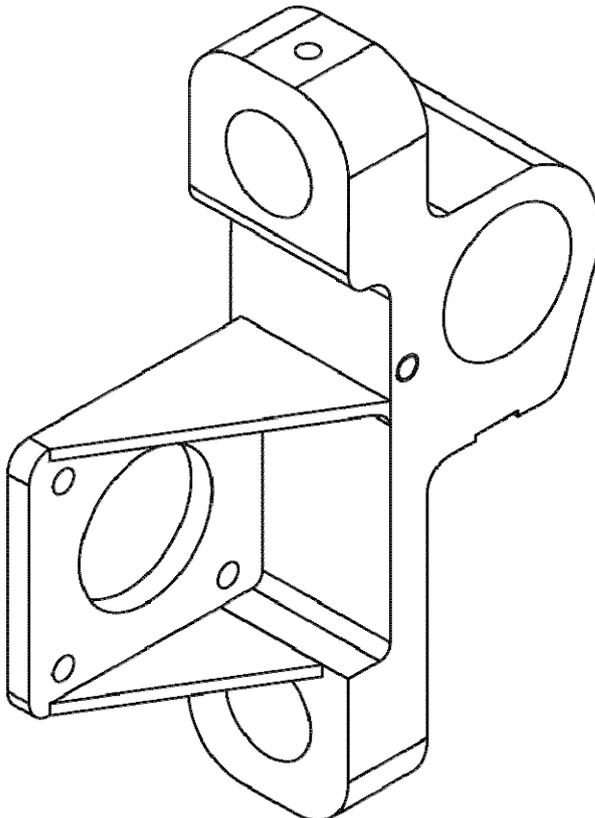
El soporte que se muestra en la Figura 5.36 corresponde a la unión entre las dos guías del eje X y la guía del eje Y, donde se sitúa un rodamiento lineal para facilitar el deslizamiento.

El soporte izquierdo se utiliza para sujetar el tensor de las correas dentadas (Figura 5.38) y está diseñado de forma que se evite la rotación del tensor.

Además, es a esta pieza a la que se sujeta la correa dentada del eje Y.

**Figura 5. 36.** Vista isométrica pieza 19. Escala: 2:1

## 20. SOPORTE X-Y DERECHO



De la misma forma que para el soporte izquierdo, el derecho permite deslizar el eje X a lo largo del eje Y mediante una correa dentada. Por tanto, también cuenta con un rodamiento lineal.

Sin embargo, en lugar de sujetar el tensor, el soporte derecho se encarga de sujetar el motor que proporciona el movimiento en X.

**Figura 5. 37.** Vista isométrica pieza 20. Escala: 2:1

## 21, 30. TENSOR CORREA DENTADA

El tensor se utiliza tanto para el eje X como para el eje Y (apartado 5.4). Esta pieza de acero está diseñada para sujetar la polea dentada y tensar las correas mediante el ajuste de un tornillo en la parte posterior de la pieza.

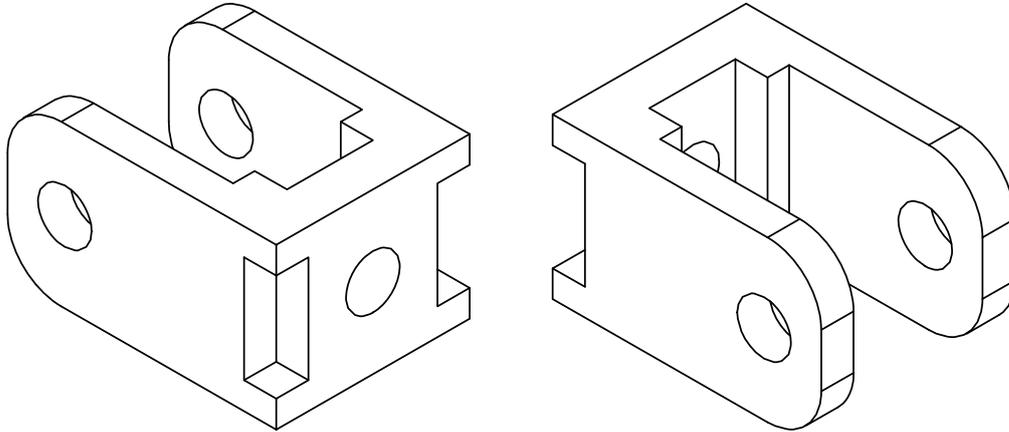


Figura 5. 38. Vista isométrica piezas 21 y 30. Escala: 2:1

### 5.4. EJE Y

El movimiento a lo largo del eje Y se genera mediante un único motor paso a paso NEMA 17. Este motor proporciona la rotación, mediante un sistema de poleas, a un eje de acero situado en la parte trasera. El eje, sujeto a la estructura utilizando rodamientos de bolas, transmite el movimiento a dos correas dentadas MXL de 2,032 mm de paso. Dichas correas son las encargadas de desplazar el eje X con un recorrido de 210 mm, soportado en dos guías de acero de 16 mm de diámetro. Para ello se unen mediante una pieza a los soportes mencionados en el apartado anterior.

Este eje también cuenta con dos tensores para ajustar la tensión de las correas. Ya que, si la tensión es demasiado baja, disminuye la eficiencia de la transmisión e incrementa el consumo energético y, en caso contrario, contribuiría a la fatiga de las correas dentadas.

De la misma forma que para el eje X, este eje también posee una cadena portacables con el objetivo de organizar los cables utilizados para el motor del eje X. Esta cadena está unida al soporte mencionado en el eje X.

Cada una de estas piezas de sujeción, como los tensores, el soporte del motor o las sujeciones de las guías se sujetan a los perfiles de la estructura y han sido

diseñadas de forma que se eviten rotaciones y garanticen la correcta sujeción de los elementos.

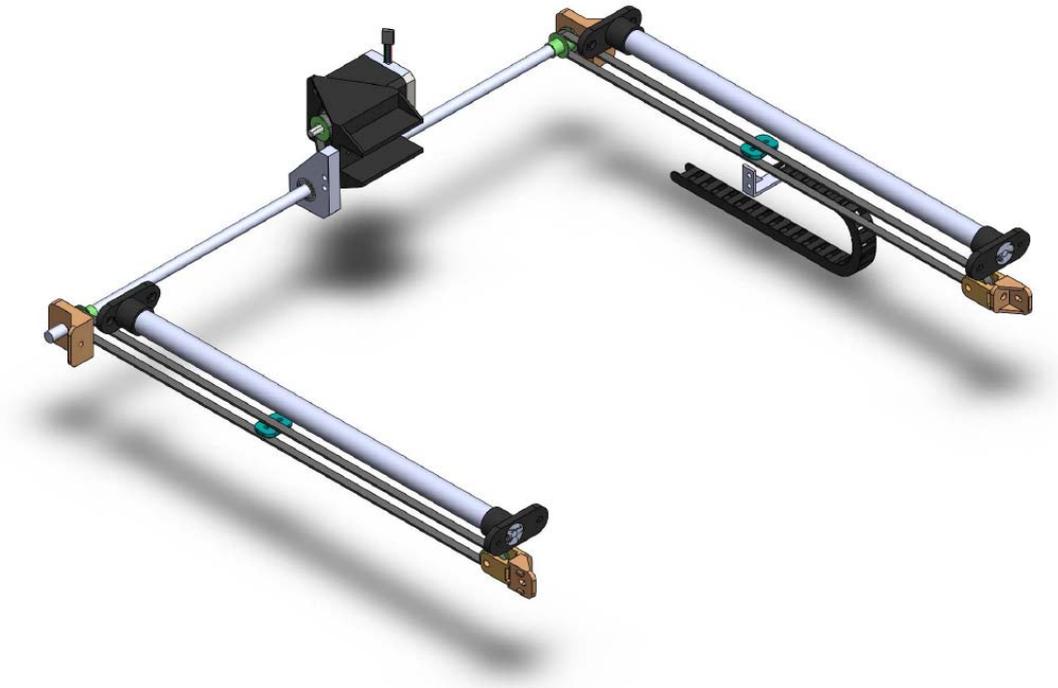
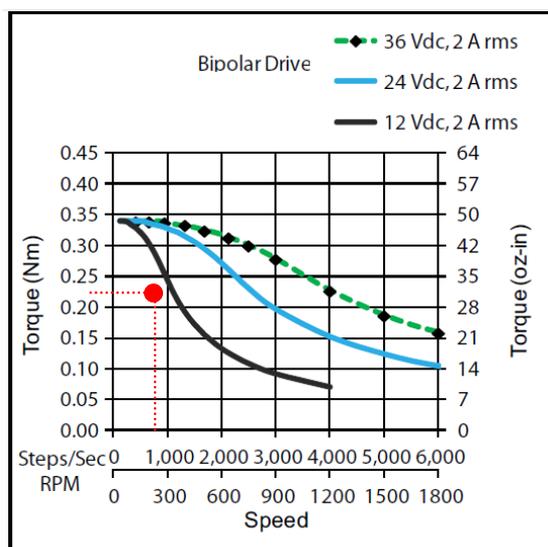


Figura 5. 39. Eje Y de la impresora 3D

Para la elección de los elementos nombrados como los elementos deslizantes, las correas dentadas o la cadena portacables se ha seguido el mismo procedimiento que en el caso del eje X.

#### 5.4.1. ELECCIÓN DEL MOTOR PARA EL EJE Y



En relación con el motor, se realizan los cálculos de la misma manera que para el caso del eje X, teniendo en cuenta que el par de inercia coincide con el anterior, el par necesario para el arranque del motor es de 0,2278 N·m.

Considerando que el motor ha de proporcionar 361,37 RPM y utilizando el mismo gráfico de rendimiento (Figura 5.40), se observa que es capaz de suministrar el par requerido.

Figura 5. 40. Curvas de rendimiento de un NEMA 17. Fuente: [www.PBCLinear.com](http://www.PBCLinear.com)

5.4.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

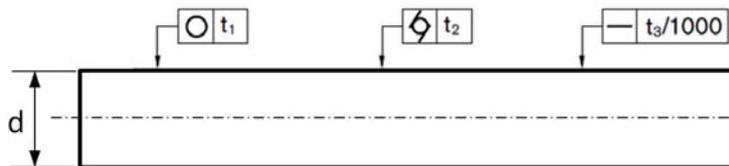
Los cálculos de flexión se realizan para las guías utilizadas en los ejes X e Y. El objetivo de los siguientes cálculos es encontrar el diámetro que garantice el soporte de las piezas que componen ambos ejes y al mismo tiempo presenten la mínima flexión. La restricción que se impone para cumplir ambas características es que la deformación total de las guías no supere los 0,15 mm.

A continuación se presentan las características de dichas guías y los cálculos correspondientes.

Características de las guías (proveedor: Bosch Rexroth AG)

- Material = eje macizo de acero
- Densidad = 7800 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young, E= 2,1 · 10<sup>5</sup>MPa

En la tabla 5.14 y 5.15 se muestran las tolerancias dimensionales en función de los diámetros de las guías y el peso correspondiente.



Rango de medidas nominales d (mm)	sobre	1	3	6	10	18	30	50	80
	hasta	3	6	10	18	30	50	80	120
Tolerancia del diámetro (µm)	h6	0	0	0	0	0	0	0	0
		-6	-8	-9	-11	-13	-16	-19	-22
Tolerancia de redondez t <sub>1</sub> (µm)	h7	0	0	0	0	0	0	0	0
		-10	-12	-15	-18	-21	-25	-30	-35
Tolerancia cilíndrica t <sub>2</sub> (µm)	h6	3	4	4	5	6	7	8	10
	h7	4	5	6	8	9	11	13	15
Tolerancia de rectitud t <sub>3</sub> <sup>13</sup> (µm/m)	h6	4	5	6	8	9	11	13	15
	h7	6	8	9	11	13	16	19	22
Rugosidad media (Ra) (µm)		0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabla 5. 14. Tolerancias para el rango de diámetros de las guías. Fuente: Bosch Rexroth AG

<sup>13</sup> En longitudes por debajo de un metro, el valor mínimo es de 40 µm . La medición de la rectitud según ISO 13012

$\varnothing d$ (mm)	E·I (N/mm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m)
3	$8,35 \cdot 10^5$	0,06
4	$2,64 \cdot 10^6$	0,1
5	$6,44 \cdot 10^6$	0,15
8	$4,22 \cdot 10^7$	0,39
10	$1,03 \cdot 10^8$	0,61
12	$2,14 \cdot 10^8$	0,88
14	$3,96 \cdot 10^8$	1,2
16	$6,76 \cdot 10^8$	1,57
20	$1,65 \cdot 10^9$	2,45
25	$4,03 \cdot 10^9$	3,83
30	$8,35 \cdot 10^9$	5,51
40	$2,64 \cdot 10^{10}$	9,8
50	$6,44 \cdot 10^{10}$	15,32
60	$1,34 \cdot 10^{11}$	22,05
80	$4,22 \cdot 10^{11}$	39,21

Tabla 5. 15. Peso y E·I según el diámetro del eje

### Cálculo de la flecha

$$\delta_{\text{máx}} = \delta_{\text{máx X}} + \delta_{\text{máx Y}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$\delta_{\text{máx X}} = \delta_1 + \delta_2 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$\delta_{\text{máx Y}} = \delta_1' + \delta_2' \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Siendo:

- $\delta$ : flexión máxima (mm)
- L: longitud del eje (mm)
- F: carga, mitad del peso del cabezal de extrusión (N)
- $\delta_1$ : flexión máxima debida al peso del cabezal de extrusión (mm)
- $\delta_2$ : flexión máxima debida al peso propio (mm)
- q: carga repartida, peso de la guía por unidad de longitud (N/mm)
- E: módulo de elasticidad de Young (N/mm<sup>2</sup>)
- I: inercia de la guía (mm<sup>4</sup>)

Para el cálculo de la planitud de las guías se tiene en cuenta tanto la rectitud de los ejes (Tabla 5.13) como la deformación debida al propio peso (Figura 5.42) y al peso de las piezas que soportan (Figura 5.43).

Para la flecha máxima de las guías, se tiene en cuenta la flexión máxima eje X y la del eje Y representadas en la Figura 5.41.

Los cálculos mostrados a continuación corresponden a una guía de 16 mm de diámetro. La rectitud en este caso es de 0,1 mm/m.

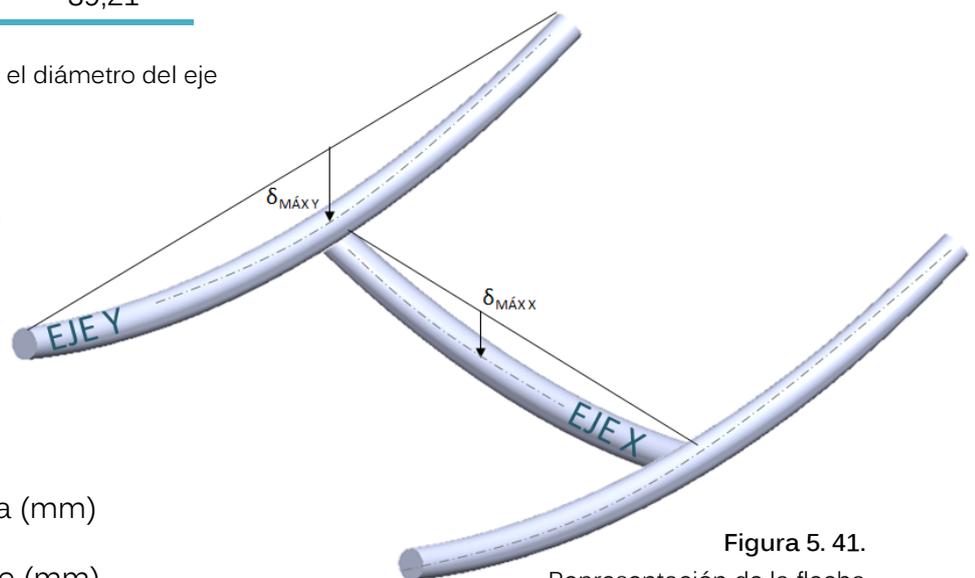


Figura 5. 41.  
Representación de la flecha en los ejes X e Y

Deformación debida al peso propio de la guía:

$$\delta_2 = \frac{5qL^4}{348 EI} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

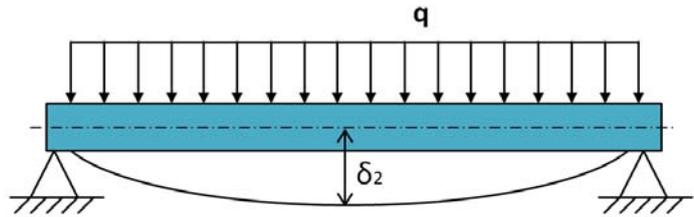


Figura 5. 42. Representación de la flecha debida al peso propio

Deformación debida al peso del cabezal:

$$\delta_1 = \frac{FL^3}{48 EI} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

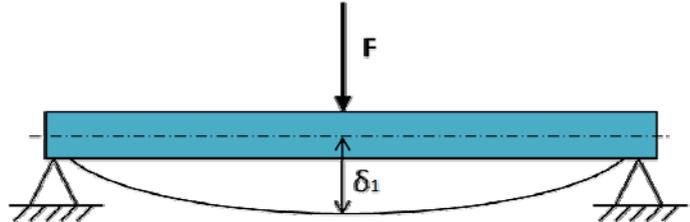


Figura 5. 43. Representación de la flecha debida a una fuerza central

### EJE X

La longitud de las dos guías utilizadas en el eje X es de 400 mm y la massa de los elementos que soporta se estima en 1 kg. La deformación calculada corresponde a una guía, por lo tanto la masa queda repartida entre 2.

Para el caso en que  $\varnothing = 16 \text{ mm}$ :

$$m_{\text{cabezal}} = 763,83 \text{ g} \rightarrow 1 \text{ kg} \rightarrow F = (m_{\text{cabezal}} \cdot g)/2 = 1/2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 4,905 \text{ N}$$

$$m_{\text{eje}} = 1,57 \text{ kg/m} \rightarrow q = 0,0154 \text{ N/mm}$$

$$E \cdot I = 6,76 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$$

$$\delta_1 = \frac{FL^3}{48 EI} = \frac{4,905 \cdot 400^3}{48 \cdot 6,76 \cdot 10^8} = 0,0096746 \text{ mm}$$

$$\delta_2 = \frac{5qL^4}{348 EI} = \frac{5 \cdot 0,0154 \cdot 400^4}{348 \cdot 6,76 \cdot 10^8} = 0,00838 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{máx X}} = \delta_1 + \delta_2 = 0,0096746 + 0,00838 = 0,01805 \text{ mm}$$

### EJE Y

$$L = 350 \text{ mm}$$

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$F = (F_{\text{elementos X}} + 2 \cdot F_{\text{ejes}})/2 = 17,6525 \text{ N}$$

$m_{\text{elementos}} \leq 2,5 \text{ kg}$  (aproximación del cabezal de 1kg + correas dentadas + 4 rodamientos de 0,025 kg + 2 elementos de sujeción).

$$m_{\text{eje}} = 1,57 \text{ kg/m} \rightarrow F_{\text{eje}} = 0,0154 \text{ N/mm} \cdot 350 \text{ mm} = 5,39 \text{ N}$$

$$E \cdot I = 6,76 \cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$$

$$\delta_{1'} = \frac{FL^3}{48 EI} = \frac{17,6525 \cdot 350^3}{48 \cdot 6,76 \cdot 10^8} = 0,023325041 \text{ mm}$$

$$\delta_{2'} = \frac{5qL^4}{348 EI} = \frac{5 \cdot 0,0154 \cdot 350^4}{348 \cdot 6,76 \cdot 10^8} = 0,004911758 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{máx Y}} = \delta_{1'} + \delta_{2'} = 0,023325041 + 0,004911758 = 0,028236799 \text{ mm}$$

$$\text{Planitud total} = \text{Rectitud}_x + \text{Rectitud}_y + \delta_{\text{máx}} = \text{Rectitud}_x + \text{Rectitud}_y + \delta_{\text{máx X}} + \delta_{\text{máx Y}}$$

$$\text{Rectitud}_x = 0,1 \text{ mm/m} \cdot 0,4 \text{ m} = 0,04 \text{ mm}$$

$$\text{Rectitud}_y = 0,1 \text{ mm/m} \cdot 0,35 \text{ m} = 0,035 \text{ mm}$$

$$\text{Planitud total} = 0,04 + 0,035 + 0,01805 + 0,0282368 = \mathbf{0,1213 \text{ mm}} < 0,15 \text{ mm} \checkmark$$

Esta deformación corresponde a la flecha en Z. Dado que para su cálculo se ha considerado una aceleración de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , la deformación horizontal en X e Y debido a la inercia de los elementos será equivalente a la calculada para cada uno de los ejes. La deformación horizontal del eje X será de 0,058 mm y de 0,063 mm para el eje Y. Sin embargo, estas deformaciones serán inferiores ya que la aceleración es menor.

### 5.4.3. TORSIÓN DEL EJE Y

Para proporcionar movimiento a lo largo del Eje Y se utiliza un único motor, por esta razón se calcula la deformación de torsión en el eje trasero. Este eje es el que transmite el movimiento a las dos correas dentadas, es por ello que se produce una torsión desde el centro del eje (Figura 5.44).

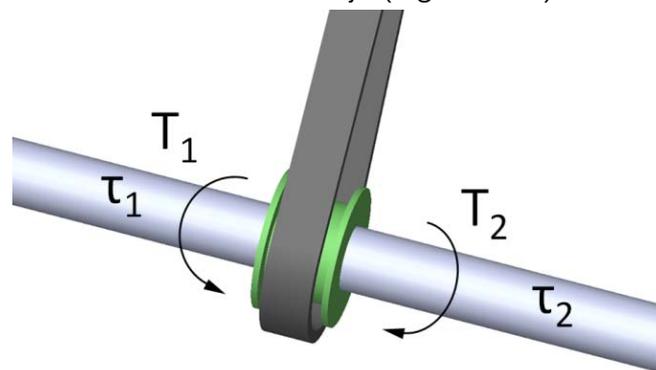


Figura 5. 44. Torsión en el Eje Y trasero

Dado que  $\tau_1 = \tau_2$ , el par aplicado a cada uno de los ejes será la mitad del proporcionado por el motor, 0,1139 N·m y la deformación de torsión se calcula mediante la ecuación 5.10.

$$\theta = \frac{T_x \cdot l}{G \cdot I} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Donde:

- $\theta$ : deformación de torsión del eje
- T: par proporcionado por el motor = 113,9 N·mm
- I: inercia del eje = 201,06 mm<sup>4</sup>
- l: longitud de medio eje = 222,5 mm
- G:  $E/2(1+\nu) = 81.000 \text{ MPa}$

En este caso la Inercia es igual a  $\frac{1}{4} \cdot \pi r^4$ , por lo tanto la torsión es:

$$\theta = \frac{113,9 \cdot 222,5}{81000 \cdot 201,06193} = 0,001556 \text{ rad} = \mathbf{0,08915^\circ}$$

La deformación por torsión obtenida de 0,08915° se considera mínima por lo que no provocará problemas de desfase entre ambos extremos de la guía.

#### 5.4.4. RODAMIENTOS DE BOLAS XIROS B180 IGUS

A continuación se muestran los datos técnicos de los rodamientos de bolas utilizados en la guía trasera del eje Y.

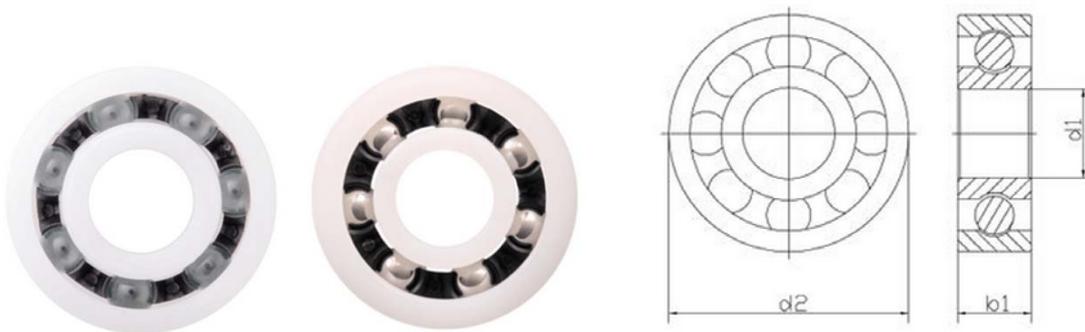


Figura 5. 45. Rodamientos de bolas Xiros B180. Fuente: [www.igus.com](http://www.igus.com)

Referencia	Anillos	Carcasas	Bolas	d1 (mm)	d2 (mm)	b1 (mm)
BB-688-B180-10-GL	B180	PA	Vidrio	8	16	5

Tabla 5. 16. Dimensiones de los rodamientos. Fuente: [www.igus.com](http://www.igus.com)

Máx. capacidad de carga estática axial (N)	Capacidad de carga estática (N)	Capacidad de carga dinámica (N)	Velocidad límite (min <sup>-1</sup> )
132	40	55	2800

Tabla 5. 17. Capacidades de carga de los rodamientos. Fuente: [www.igus.com](http://www.igus.com)

#### Características:

- Aptos para usar a un máximo de +80 °C
- Libres de lubricación y mantenimiento
- Antimagnético y lavable
- Resistente a la corrosión
- Ligeros
- Aislante eléctrico

#### 5.4.5. DETALLE DE LAS PIEZAS DEL EJE Y

Seguidamente se muestran las vistas isométricas y la ubicación de los componentes del eje Y.

Id.	Cant.	Descripción
25	1	Motor NEMA 17
26	1	Soporte motor
27	2	Correas dentadas
28	1	Correa dentada pequeña
29	2	Sujeciones correas dentadas
30	2	Tensor de correas dentadas
31	2	Sujeciones tensores
32	2	Guías lineales
33	4	Sujeciones guías
34	2	Soportes eje Y trasero
35	3	Rodamientos de bolas
36	1	Guía lineal trasera
37	6	Poleas
38	1	Soporte guía trasera
39	1	Correa portacables <i>Igus</i>
40	1	Unión correa <i>Igus</i> Y

Tabla 5. 18. Listado de piezas que componen el Eje Y

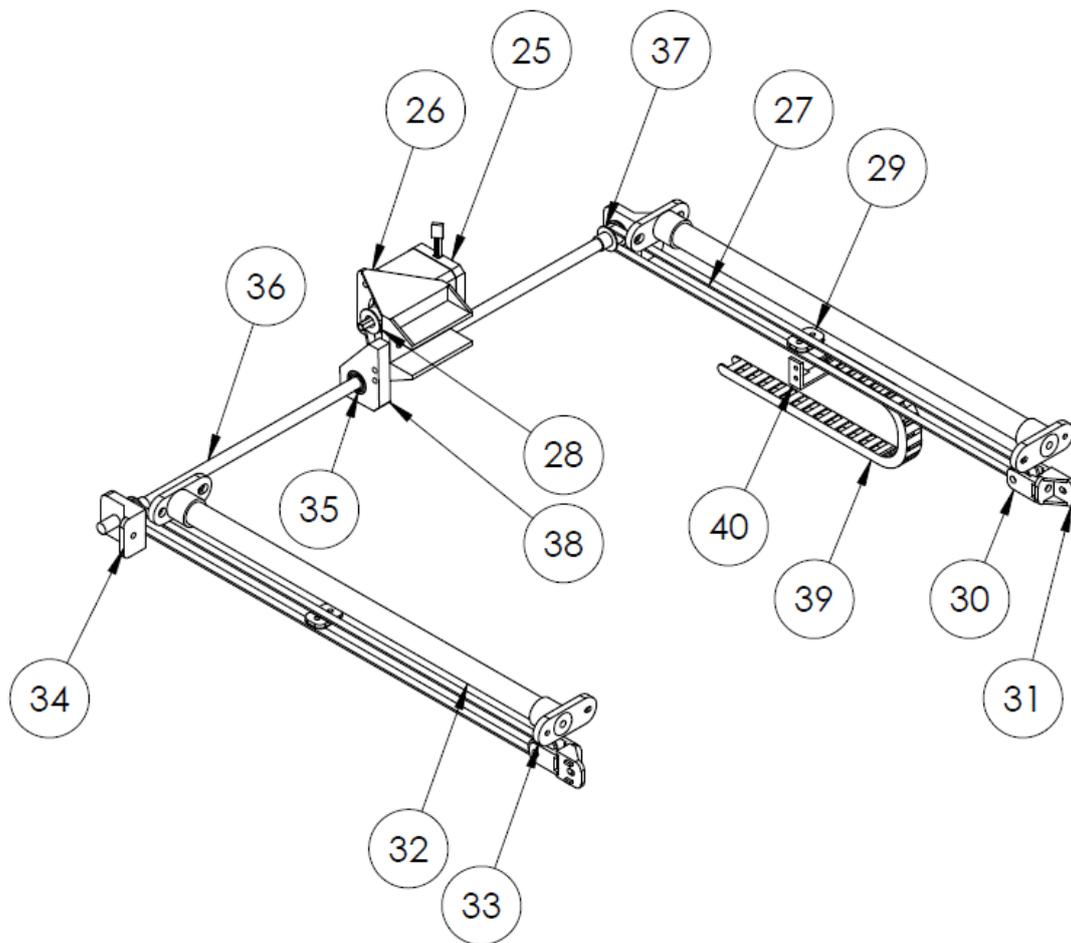


Figura 5. 46. Vista isométrica del Eje Y. Escala 1:5

## 26. SOPORTE MOTOR

La función de esta pieza de aluminio es sujetar el motor que proporciona la rotación de la guía trasera del eje Y. El soporte del motor está diseñado para garantizar su correcta fijación al perfil horizontal trasero de la estructura.

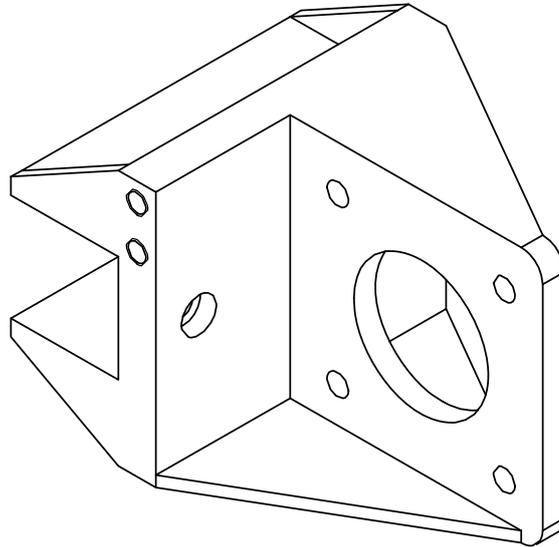


Figura 5. 47. Vista isométrica piezas 26. Escala: 2:1

## 29. SUJECIONES CORREAS DENTADAS

La siguiente pieza de plástico ABS está diseñada para sujetar las correas dentadas del eje Y. Este componente se fija a los soportes laterales del eje X (Figura 5.26 y 5.27) para garantizar la correcta transmisión de movimiento a este eje.

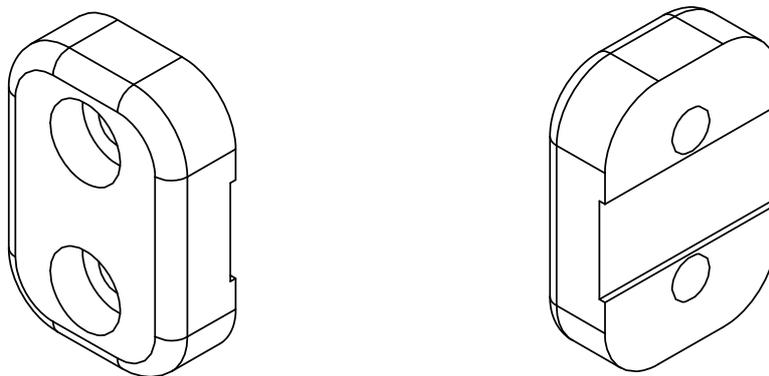


Figura 5. 48. Vista isométrica piezas 29. Escala: 2:1

### 31. SUJECIONES TENSORES

Las sujeciones de los tensores de las correas dentadas son piezas de aluminio, diseñadas para adaptarse a los perfiles estructurales y así asegurar la fijación y evitar la rotación. Su función es la de fijar los tensores a los perfiles y facilitar el tensado de las correas.

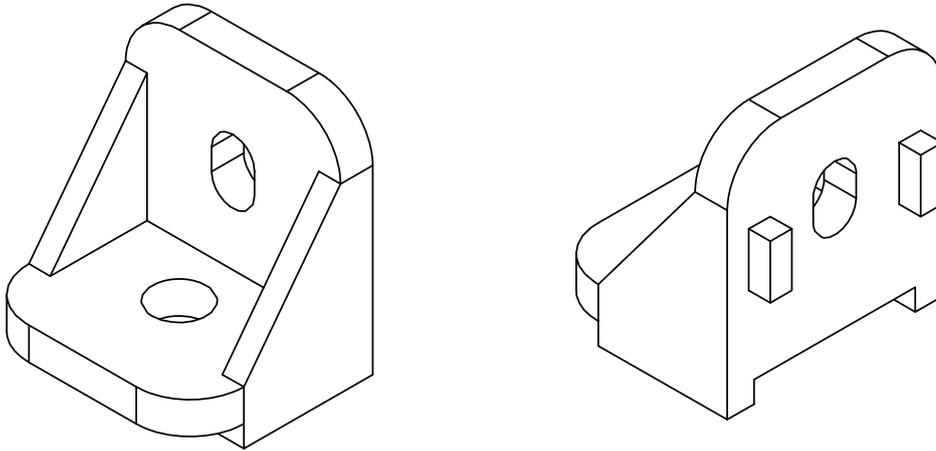


Figura 5. 49. Vista isométrica piezas 31. Escala: 2:1

### 33. SUJECIONES GUÍAS

El componente que se muestra en la siguiente figura es el encargado de fijar las guías del eje Y al chasis.

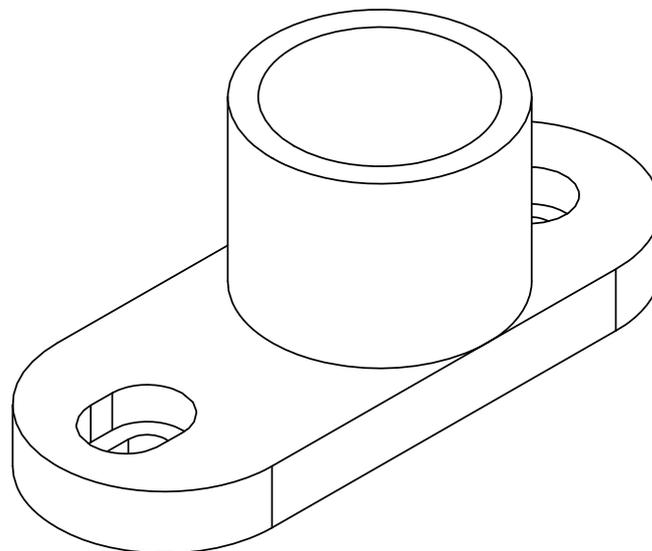
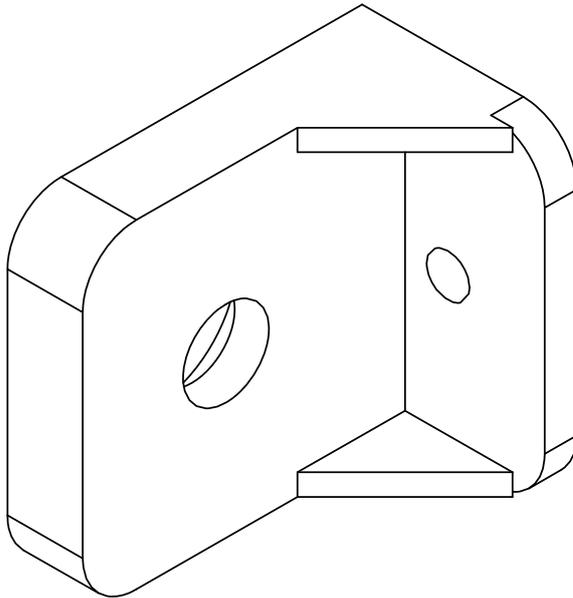


Figura 5. 50. Vista isométrica piezas 33. Escala: 2:1

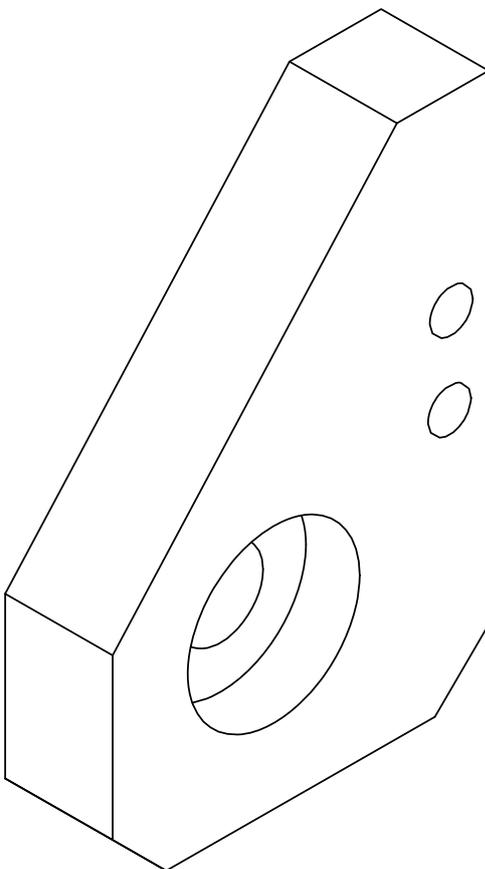
### 34. SOPORTE EJE Y TRASERO



Este soporte va ubicado en la parte trasera de la impresora, unido a los perfiles estructurales. Su función es la de sujetar y soportar la guía trasera. Es en esta pieza donde se incorpora un rodamiento de bolas, para facilitar la rotación de esta guía.

Figura 5. 51. Vista isométrica piezas 34. Escala: 2:1

### 38. SOPORTE GUÍA TRASERA



El siguiente soporte de aluminio está diseñado para evitar la flexión de la guía lineal trasera del eje Y. Es por ello que se encuentra fijada al soporte del motor mencionado anteriormente (Figura 5.47) y, de la misma forma que el soporte anterior, esta pieza cuenta con un rodamiento lineal,

Figura 5. 52. Vista isométrica piezas 38. Escala: 2:1

#### 40. UNIÓN CORREA PORTACABLES Y

La pieza diseñada de la Figura 5.53 corresponde al componente encargado de unir el soporte derecho del eje X con la cadena portacables que se desliza a lo largo del eje Y. De esta forma la cadena situada en uno de los perfiles horizontales acompaña al eje X evitando posibles daños en el cableado.

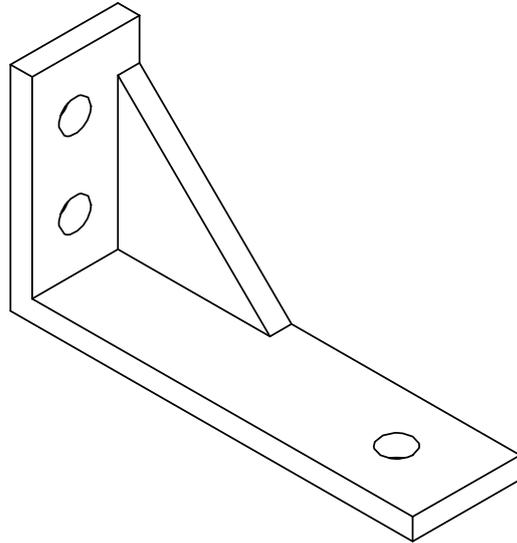


Figura 5. 53. Vista isométrica piezas 40. Escala: 2:1

### 5.5. EJE Z

Por último, la plataforma de impresión es la encargada de proporcionar el movimiento vertical con un recorrido de 155 mm. Para ello, este eje (Figura 5.54) cuenta con un husillo accionado por un motor paso a paso y dos guías de acero sobre las que la plataforma se desliza con la ayuda de rodamientos lineales. Tanto el husillo, las guías y el motor están unidos a dos perfiles, sujetos a su vez a la estructura. Estos perfiles tienen forma de U con el objetivo de tener más inercia y evitar así la flexión.

La plataforma de impresión está formada por un cristal de 220 x 240 mm, sujeto a la base de la plataforma. Esta plataforma se utiliza como soporte para la placa MK2 (ver apartado 5.5.1) y está sujeta mediante tres puntos que permiten calibrarla para garantizar la planitud de la superficie. En la Figura 5.55 se muestran todos los elementos que componen la plataforma de impresión.

Para la organización de los cables en este eje se utiliza un cubre cables no representado en la ilustración (ver apartado 5.3.3).

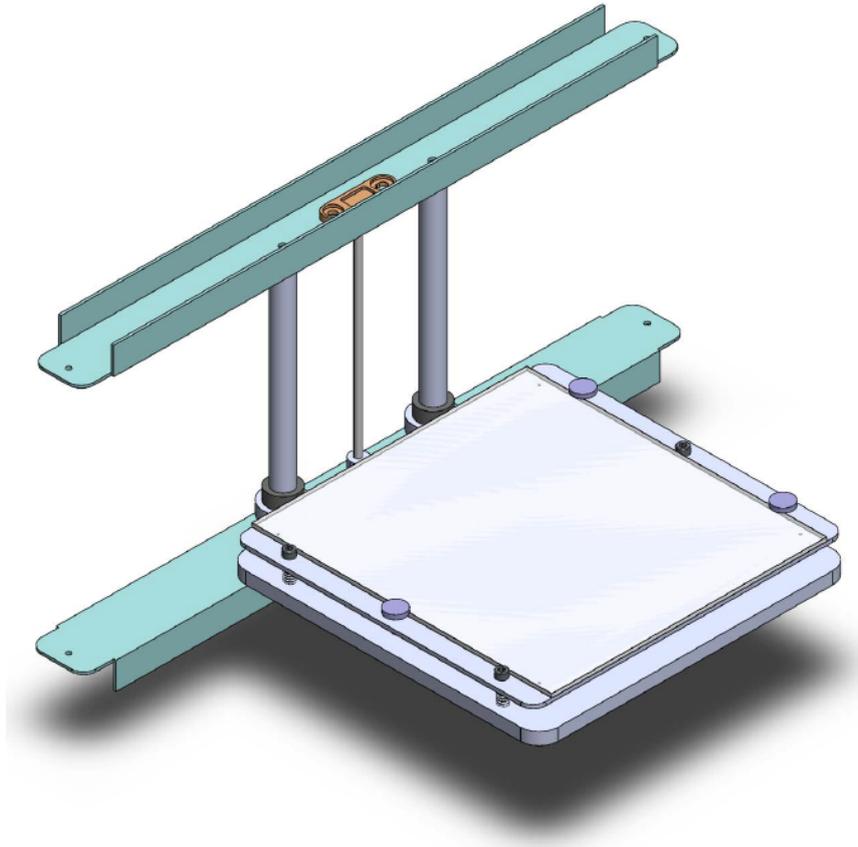


Figura 5. 54. Eje Z de la impresora 3D

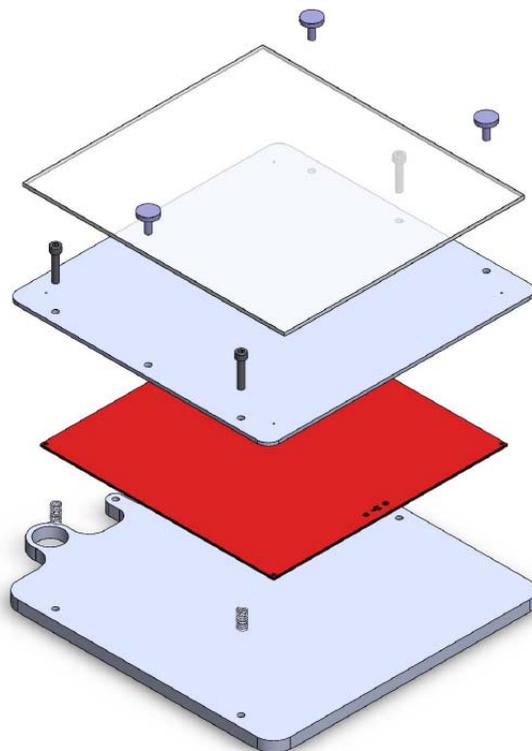


Figura 5. 55. Vista explosionada de la plataforma de extrusión

### 5.5.1. PLATAFORMA DE IMPRESIÓN

La característica que determinará el diseño de la plataforma de impresión es si la base se mantendrá caliente o no. Este aspecto es el que evita el “warping”, es decir, que debido a la contracción del material al enfriarse la pieza, ésta se desprege de la plataforma (Figura 5.56). El uso de plataforma caliente no es imprescindible para el caso del PLA pero deberá mantener una temperatura entre 100 y 130 °C para imprimir correctamente piezas de ABS o Nylon. Es por esto que se utilizará una plataforma de impresión caliente, que soporte y garantice la estabilidad y la adherencia de la pieza durante la impresión, aprovechando que el cabezal de extrusión permite imprimir piezas en diferentes materiales, incluido PLA y ABS.

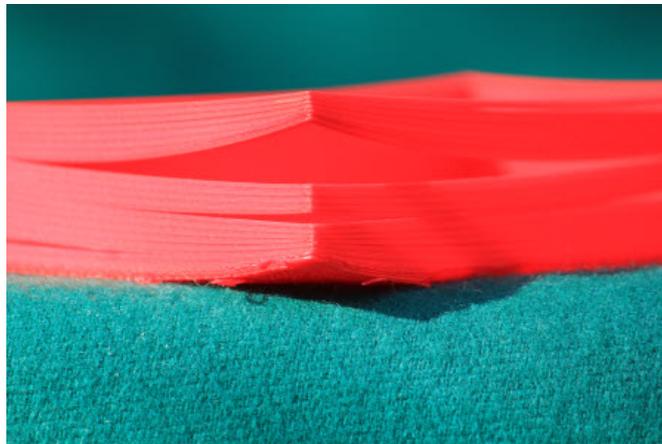


Figura 5. 56. “Warping” en una pieza de ABS. Fuente: [www.deelip.com/?p=7151](http://www.deelip.com/?p=7151)

Mayoritariamente se utilizan dos sistemas para calentar la base. El primero y más rudimentario, consiste en una placa metálica que incorpora resistencias soldadas, lo que permite el calentamiento de esta. El segundo, y el más utilizado en la actualidad debido a su eficiencia, consiste en una placa de circuito impreso que lleva serigrafiado un circuito que ayuda a la distribución rápida y uniforme de la temperatura.

En el mercado existen múltiples diseños de este último tipo de placas. Para cumplir con el objetivo marcado en el apartado 3 finalmente se ha escogido la MK2 (Figura 5.57).

La superficie de contacto entre la pieza y la plataforma de impresión debe ser lo más lisa posible ya que, de lo contrario, podría provocar imperfecciones en las piezas. Esta superficie consiste en una placa de cristal extraíble, de forma que facilite la extracción de la pieza y su intercambio en caso de rallarse.

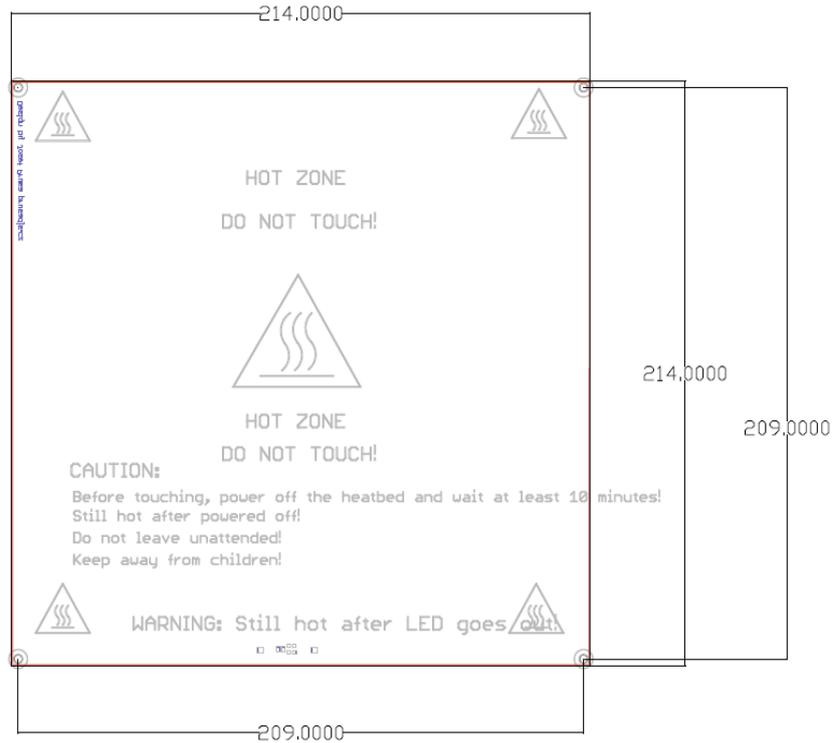


Figura 5. 57. Dimensiones en mm de la cama caliente MK2. Fuente: *RepRap Wiki*

### 5.5.2. DETALLE DE LAS PIEZAS DEL EJE Z

De la misma forma que para el resto de partes de la impresora, la tabla 5.19 contiene las piezas que componen el eje Z del prototipo de la impresora. Para facilitar la visualización de la ubicación de las piezas, la Figura 5.58 muestra una vista frontal y una trasera del eje Z. También se adjuntan las vistas isométricas de los componentes diseñados para este eje.

Id.	Cant.	Descripción
41	1	Soporte inferior
42	1	Soporte superior
43	2	Guías lineales verticales
44	1	Husillo vertical
45	1	Motor NEMA 17
46	1	Sujeción husillo
47	2	Rodamientos lineales
48	1	Placa PCB MK2
49	1	Cristal
50	1	Plataforma de impresión
51	1	Soporte plataforma de impresión

Tabla 5. 19. Listado de piezas que componen el Eje Z

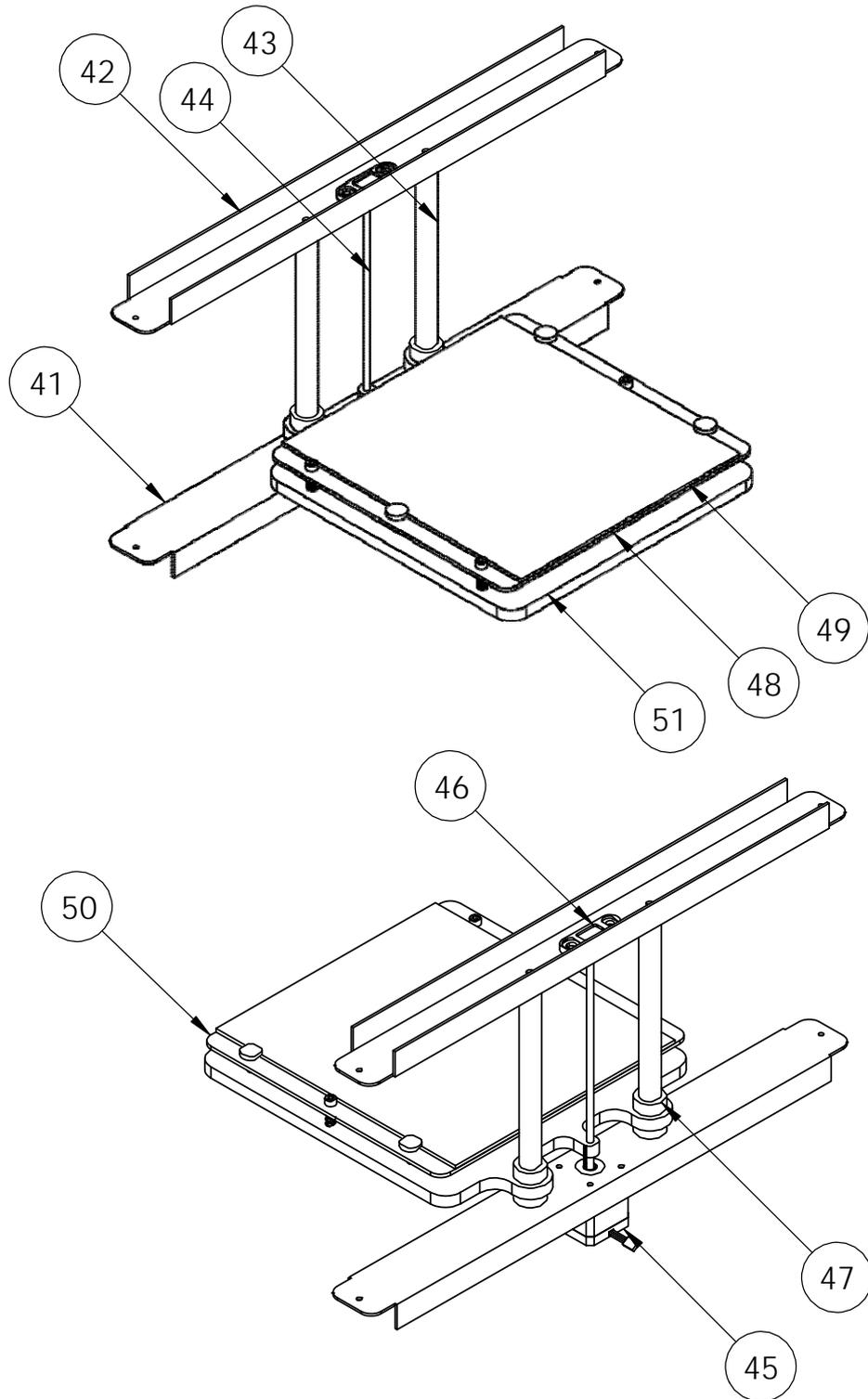


Figura 5. 58. Vista isométrica del Eje Z. Escala 1:5

#### 41. SOPORTE INFERIOR

El soporte inferior de acero del eje Z va sujeto a dos de los perfiles estructurales. Su forma de U permite disminuir la flexión de la pieza. A este soporte va fijado el motor que proporciona el movimiento en Z y las dos guías lineales por las que se desliza la plataforma de impresión.

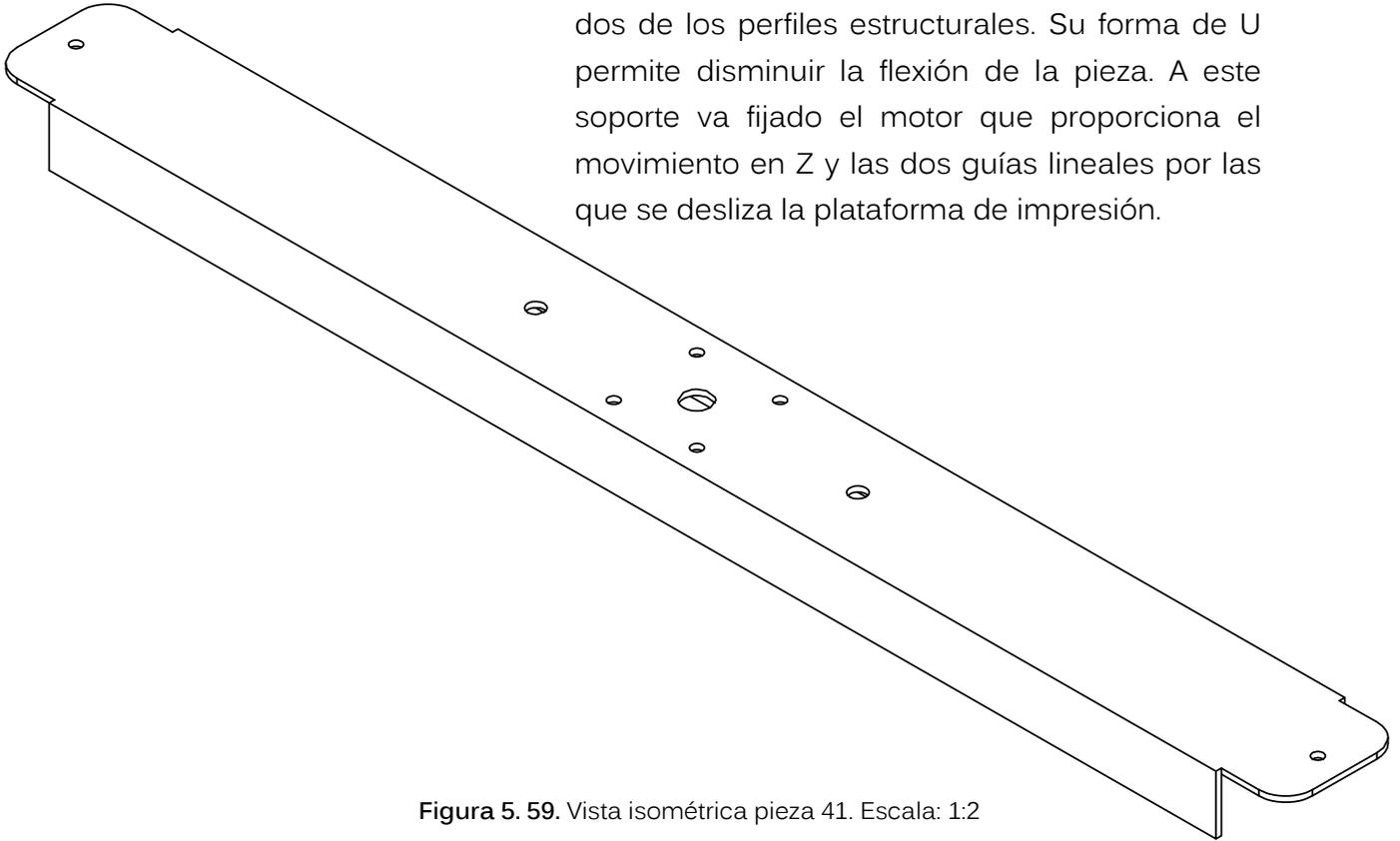


Figura 5. 59. Vista isométrica pieza 41. Escala: 1:2

#### 42. SOPORTE SUPERIOR

De la misma forma que para el soporte inferior, al superior quedan fijadas las dos guías lineales verticales. A esta pieza, a diferencia de sujetar el motor, va fijada la pieza que permite sujetar el husillo vertical (Figura 5.61).

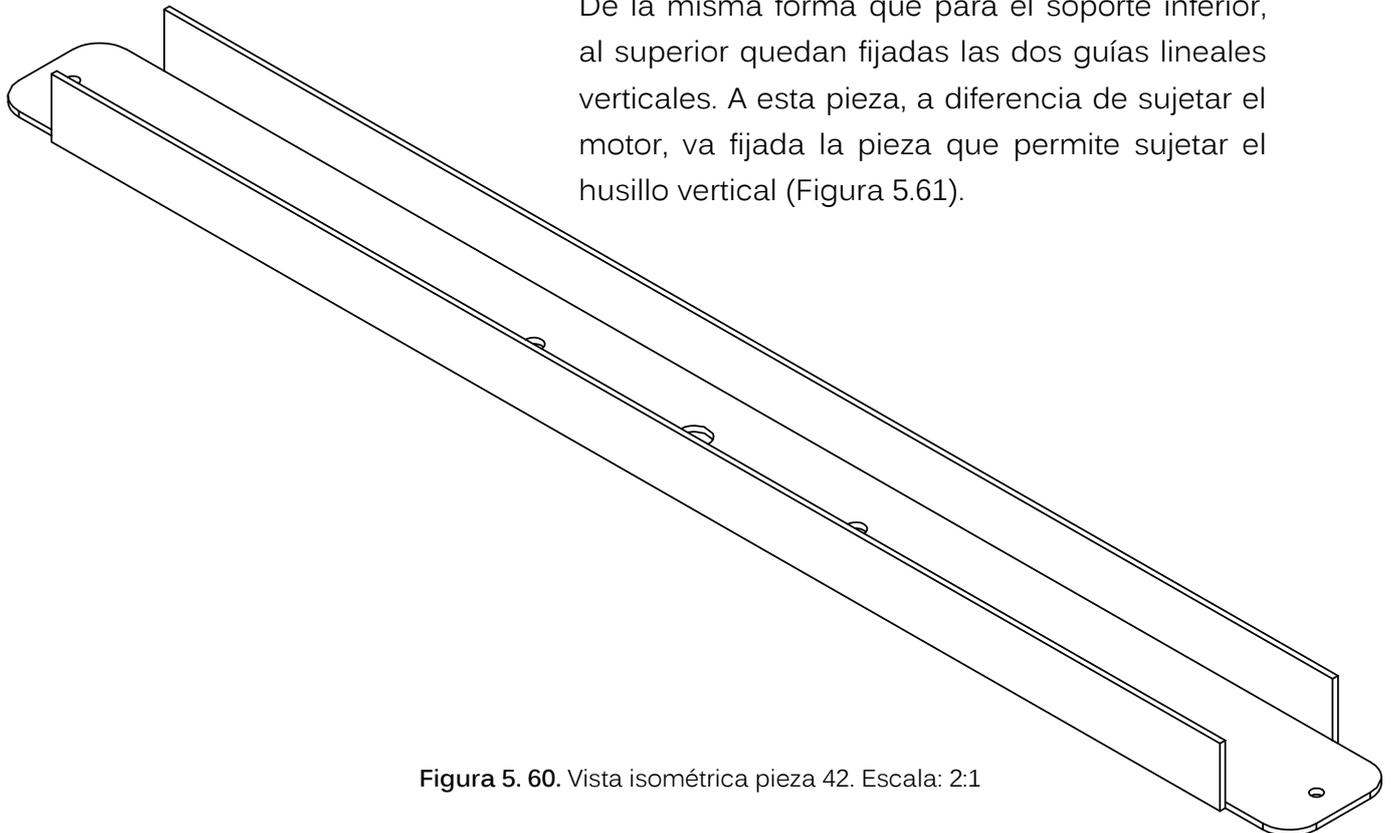


Figura 5. 60. Vista isométrica pieza 42. Escala: 2:1

#### 46. SUJECIÓN HUSILLO

Como se ha mencionado, la sujeción del husillo va fijada al soporte superior del eje Z. La forma de la pieza ha sido diseñada para evitar la concentración de masa.

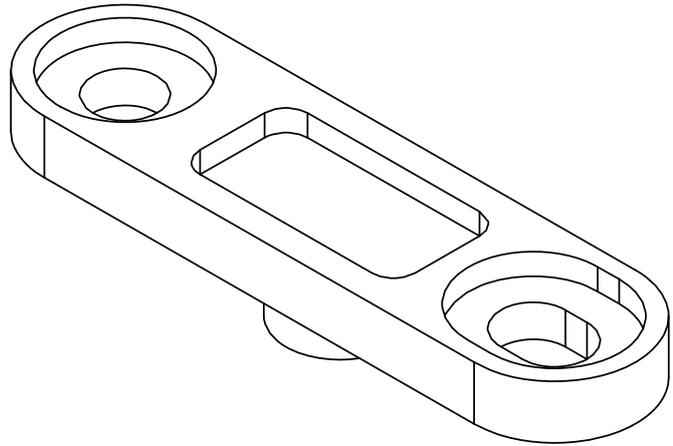


Figura 5. 61. Vista isométrica pieza 46. Escala: 2:1

#### 50. PLATAFORMA DE IMPRESIÓN

La plataforma de impresión consiste en una placa de acero a la que se sujeta el cristal. Esta pieza cuenta con seis agujeros, tres de ellos necesarios para calibrar la plataforma y tres para unir el cristal a la superficie superior. La placa PCB MK2, encargada de calentar la plataforma se sitúa en la superficie inferior de esta pieza.

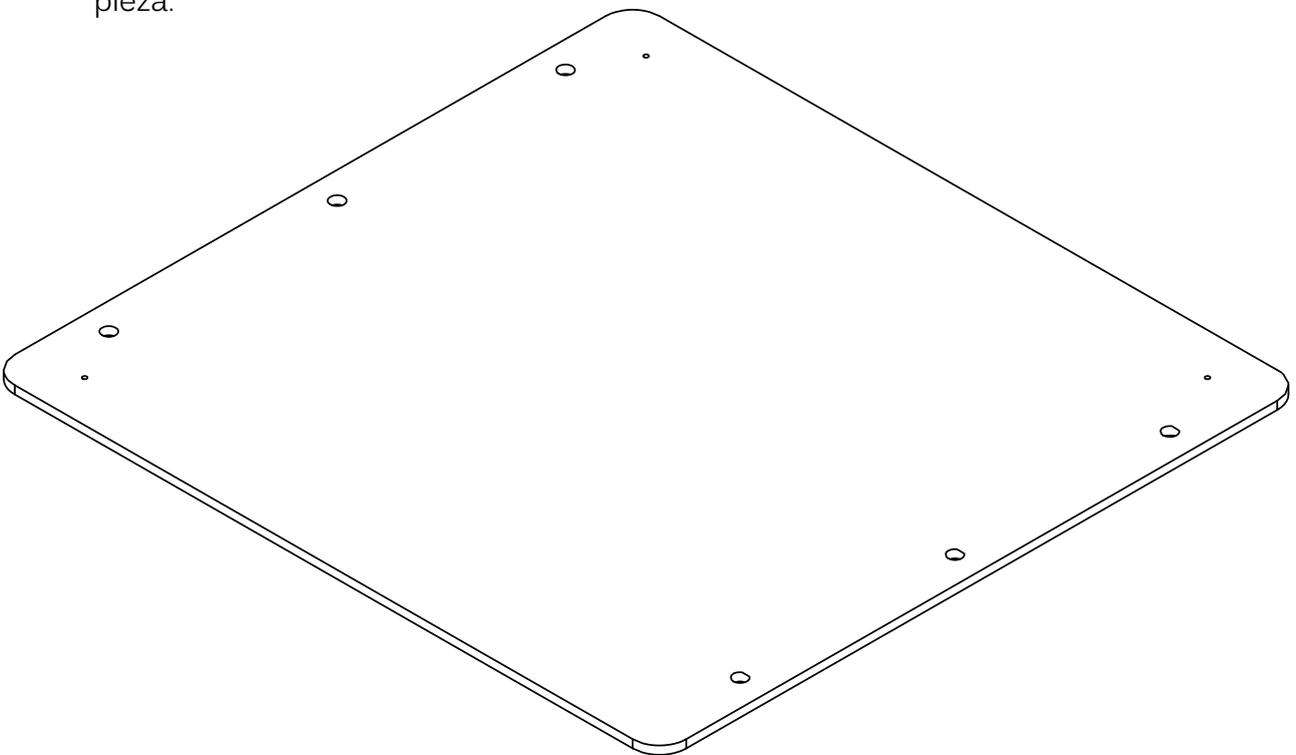


Figura 5. 62. Vista isométrica pieza 50. Escala: 1:2

## 51. SOPORTE PLATAFORMA DE IMPRESIÓN

Por último, el soporte de la plataforma de impresión es la encargada de deslizarse a lo largo del eje Z. Para ello, se incorporan dos rodamientos lineales de bolas que facilitan el desplazamiento a través de las guías verticales.

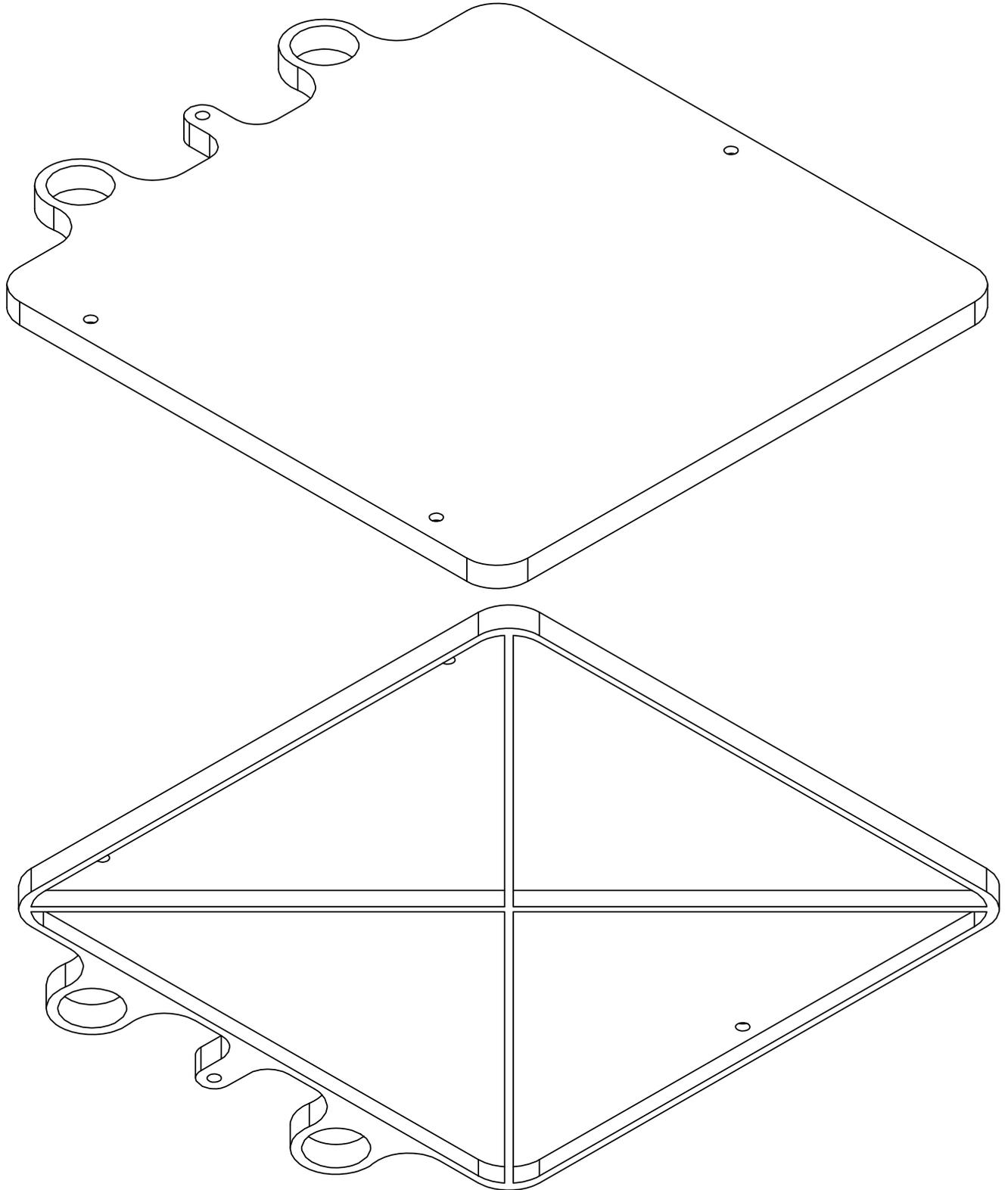


Figura 5. 63. Vista isométrica pieza 51. Escala: 1:2

## 5.6. VISTAS ISOMÉTRICAS DE LA IMPRESORA 3D

En las Figuras 5.64 y 5.65 se muestra una vista isométrica frontal y una trasera del conjunto del prototipo de impresora 3D.

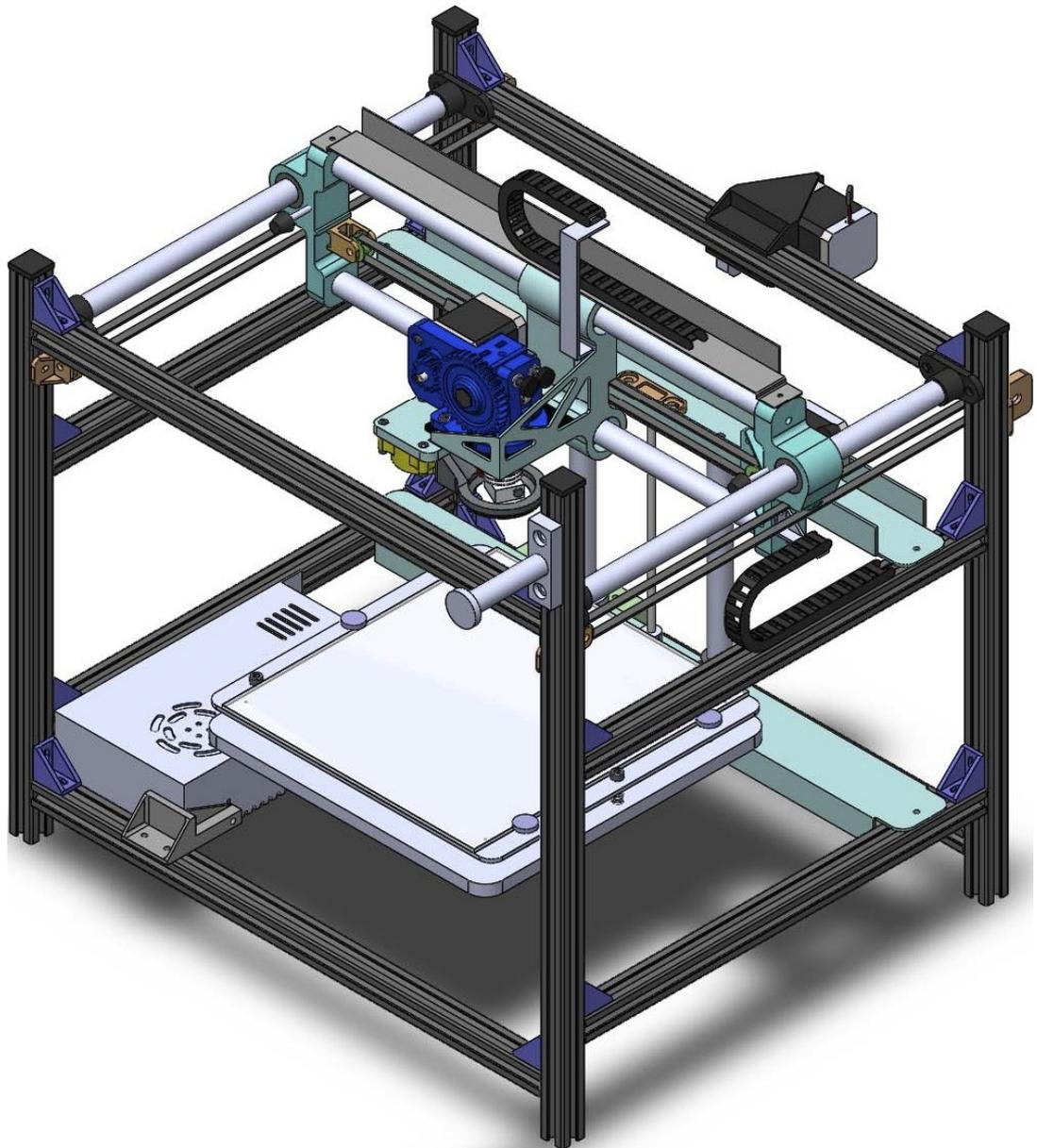


Figura 5. 64. Vista isométrica frontal.

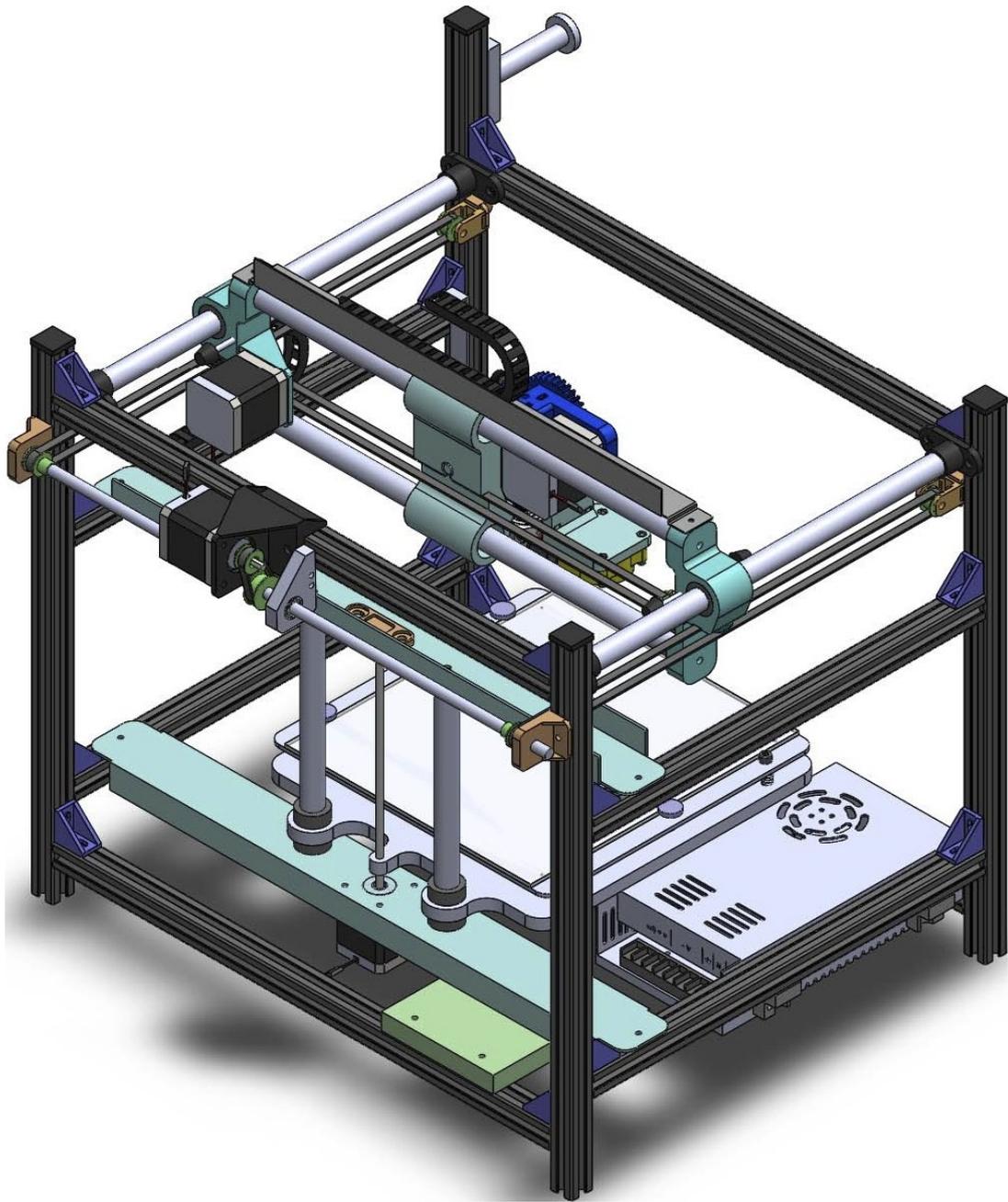


Figura 5. 65. Vista isométrica trasera.

## 6. ESTUDIO ECONÓMICO

En la realización del estudio económico se han tenido en cuenta los costes asociados a la investigación y desarrollo del proyecto y el coste estimado del prototipo de la impresora incluyendo el coste de su montaje.

El coste total del proyecto se ha desglosado en el coste correspondiente al diseño conceptual, dimensionado y selección de componentes y al coste relacionado con el modelado en *Sollidworks*. Para ello se han multiplicado las horas dedicadas al estudio y desarrollo del proyecto a 35 € la hora y a 25 € la hora para el diseño en CAD. Estimando una dedicación de 200 horas en investigación y de 100 horas en el diseño, el coste generado es de 9.500 €.

Para el cálculo del prototipo se estima el precio del conjunto de piezas que forman parte de la impresora, sin tener en cuenta los componentes electrónicos ni la fase de test posterior. El coste de la fabricación de las piezas diseñadas específicamente para el nuevo modelo de impresora ha sido estimado por la empresa *TI Automotive* y la tornillería se ha considerado de un 10 % sobre el precio total del prototipo (Tabla 6.1).

Id.	Cant.	Pieza	Precio unitario (€/ud)	Precio (€)
1	16	Abrazaderas	10	160
2	4	Embellecedores	5	20
3	1	Soporte bobina	30	30
4-7	12	Perfiles HEPCO 20x20	8	96
8	1	Soporte fuente de alimentación derecha	35	35
9	1	Soporte fuente de alimentación izquierda trasera	16	16
10	1	Soporte fuente de alimentación izquierda frontal	16	16
11	1	Cabezal de extrusión	84	84
12	1	Soporte del cabezal de extrusión	45	45
13	4	Rodamientos lineales	2	8
14	2	Guías lineales	4,54	9,08
15	1	Correa dentada	3,15	3,15
16	1	Correa portacables <i>Igus</i>	4,68	4,68
17	1	Unión correa <i>Igus</i> X	20	20
18	1	Soporte correa portacables	17	17
19	1	Soporte X-Y izquierdo	25	25
20	1	Soporte X-Y derecho	28	28
21	1	Tensor correa dentada	55	55

22	1	Motor NEMA 17	15,99	15,95
23	2	Poleas dentadas	3,25	6,5
24	4	Tacos de goma	5	20
25	1	Motor NEMA 17	15,99	15,95
26	1	Soporte motor	80	80
27	2	Correas dentadas	3,15	6,3
28	1	Correa dentada pequeña	1,575	1,575
29	2	Sujeciones correas dentadas	16	32
30	2	Tensor de correas dentadas	55	110
31	2	Sujeciones tensores	12	24
32	2	Guías lineales	3,969	7,938
33	4	Sujeciones guías	40	160
34	2	Soportes eje Y trasero	35	70
35	3	Rodamientos de bolas	1,26	3,78
36	1	Guía lineal trasera	3,255	3,255
37	6	Poleas	3,25	19,5
38	1	Soporte guía trasera	15	15
39	1	Correa portacables <i>Igus</i>	4,68	4,68
40	1	Unión correa <i>Igus</i> Y	18	18
41	1	Soporte inferior	20	20
42	1	Soporte superior	18	18
43	2	Guías lineales verticales	2,268	4,536
44	1	Husillo vertical	10	10
45	1	Motor NEMA 17	15,99	15,95
46	1	Sujeción husillo	50	50
47	2	Rodamientos lineales	2	4
48	1	Placa PCB MK2	21,99	21,99
49	1	Cristal	4,95	4,95
50	1	Plataforma de impresión	15	15
51	1	Soporte plataforma de impresión	100	100
Total				1550,76 €
<b>TOTAL (tornillería 10%)</b>				<b>1705,83 €</b>

**Tabla 6. 1.** Coste total del prototipo

Por último, se considera que el tiempo necesario para el montaje de la máquina es de 30 horas. Considerando un coste de 20 € la hora, la construcción de la impresora supone un coste de 600 €. Teniendo en cuenta los costes mencionados, el importe total del proyecto y el prototipo es de 11.805,83 € (Tabla 6.2).

Concepto	Cantidad	Coste	Importe
Costes de ingeniería			
▪ Diseño conceptual, dimensionado y selección de componentes	200 h	35 €/h	7.000 €
▪ Diseño CAD	100 h	25 €/h	2.500 €
Fabricación prototipo	1	1.705,83 €	1.705,83 €
Construcción prototipo	30 h	20 €/h	600 €
<b>TOTAL</b>			<b>11.805,83 €</b>

Tabla 6. 2. Coste total del proyecto y el prototipo

No se ha estimado el coste en producción debido a que no se han contemplado todos los componentes de la impresora ni se han considerado otros costes como los asociados al test posterior o el transporte.

## 7. PLANIFICACIÓN

---

La duración total del proyecto es de 5 meses aproximadamente y corresponde a una dedicación de 300 horas totales. La fecha de inicio del proyecto es el 10 de Febrero de 2014 y finaliza con la entrega final programada del 23 de Junio al 2 de Julio del mismo año. La planificación del proyecto se divide en 3 fases principales. Estas son la Fase previa, la Fase de diseño y la Fase final.

### FASE PREVIA

La primera fase del proyecto consiste en plantear los objetivos del proyecto y definir las especificaciones técnicas que deben tenerse en cuenta en el momento de diseñar la impresora 3D. Para ello, es necesario realizar una búsqueda de información sobre los modelos de impresora disponibles actualmente en el mercado, el funcionamiento de éstas y la normativa aplicable al proyecto.

Además, se realizan dos visitas a centros que trabajan con esta tecnología: una al *aula de impresión RepRap* y la segunda al centro *Fundació CIM*.

### FASE DE DISEÑO

En esta fase se estudian las posibles soluciones del proyecto, analizando a grandes rasgos su viabilidad y se eliminan aquellas ideas y propuestas que no cumplan con las especificaciones detalladas en la fase anterior. Esta fase queda subdividida por el estudio de cada una de las partes que compone una impresora 3D por separado. Posteriormente, se procede a escoger la solución de cada elemento más conveniente para el conjunto final.

### FASE FINAL

Una vez escogidas las alternativas de las diferentes partes de la impresora, es en esta última fase en la que se realiza el diseño detallado de la máquina, es decir, se realizan los cálculos y estudios finales y el modelado 3D del diseño final.

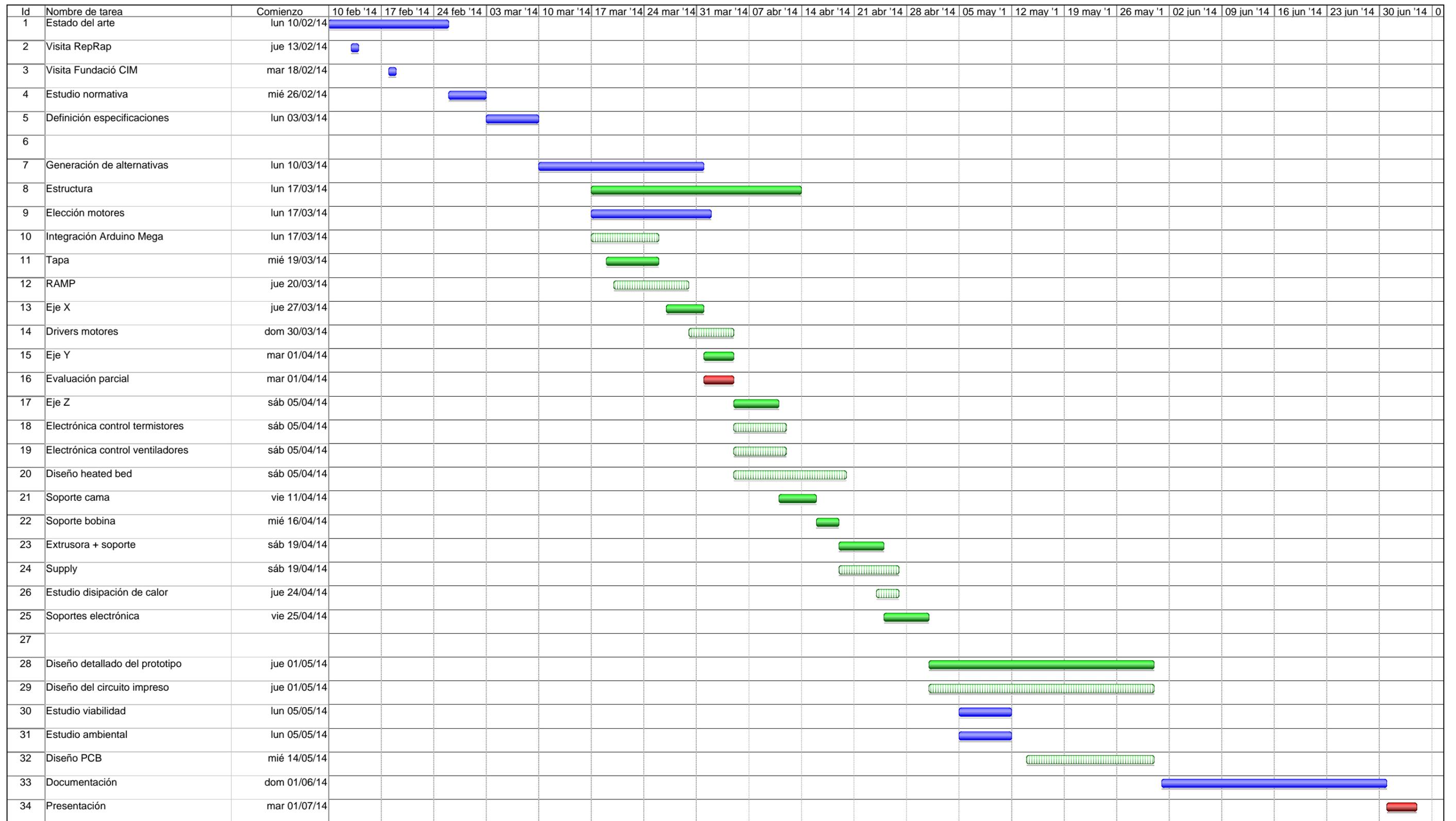
Finalizado el diseño, se realiza el estudio ambiental y el estudio de viabilidad, analizando los costes y la rentabilidad del proyecto. Finalmente, se elabora la documentación correspondiente. Terminada esta fase, se iniciaría una nueva fase correspondiente a la fabricación de un prototipo que permita comprobar la correcta funcionalidad de la impresora diseñada y los resultados obtenidos deberían ser suficientes para poner en práctica el proyecto y comenzar a fabricar las impresoras.

En la Tabla 7.1 se muestran las tareas contenidas en cada una de las fases mencionadas y las no incluidas en el proyecto que se realizan en paralelo por Isabel Cañete, diferenciadas en el cronograma de la Figura 7.1.

<b>Id</b>	<b>Tarea</b>	<b>Duración</b>	<b>Comienzo</b>	<b>Fin</b>
<b>0</b>	<b>FASE PREVIA</b>			
1	Estado del arte	12 días	10/02/2014	25/02/2014
2	Visita <i>RepRap</i>	1 día	13/02/2014	13/02/2014
3	Visita <i>Fundació CIM</i>	1 día	18/02/2014	18/02/2014
4	Estudio normativa	3 días	26/02/2014	02/03/2014
5	Definición especificaciones	5 días	03/03/2014	09/03/2014
<b>6</b>	<b>FASE DISEÑO</b>			
7	Generación de alternativas	17 días	10/03/2014	31/03/2014
8	Estructura	24 días	17/03/2014	13/04/2014
9	Elección motores	13 días	17/03/2014	01/04/2014
10	Integración <i>Arduino Mega</i>	7 días	17/03/2014	25/03/2014
11	Tapa	5 días	19/03/2014	25/03/2014
12	RAMP	7 días	20/03/2014	29/03/2014
13	Eje X	4 días	27/03/2014	31/03/2014
14	Drivers motores	6 días	30/03/2014	04/04/2014
15	Eje Y	4 días	01/04/2014	04/04/2014
16	Evaluación parcial	4 días	01/04/2014	04/04/2014
17	Eje Z	5 días	05/04/2014	10/04/2014
18	Electrónica control termistores	6 días	05/04/2014	11/04/2014
19	Electrónica control ventiladores	6 días	05/04/2014	11/04/2014
20	Diseño heated bed	14 días	05/04/2014	19/04/2014
21	Soporte cama	5 días	11/04/2014	15/04/2014
22	Soporte bobina	3 días	16/04/2014	18/04/2014
23	Extrusora + soporte	5 días	19/04/2014	24/04/2014
24	Supply	6 días	19/04/2014	26/04/2014
25	Estudio disipación calor	2 días	24/04/2014	26/04/2014
26	Soportes electrónica	5 días	25/04/2014	30/04/2014
<b>27</b>	<b>FASE FINAL</b>			
28	Diseño detallado del prototipo	24 días	01/05/2014	30/05/2014
29	Diseño del circuito impreso	7 días	01/05/2014	09/05/2014
30	Estudio viabilidad	6 días	05/05/2014	11/05/2014
31	Estudio ambiental	6 días	05/05/2014	11/05/2014
32	Diseño PCB	14 días	14/05/2014	30/05/2014
33	Documentación	22 días	01/06/2014	30/06/2014
34	Presentación	4 días	01/07/2014	04/07/2014

Tabla 7. 1. Programación temporal





Programación temporal

Tarea conjunta



División



Fecha límite



Evaluación



Mecánica



Electrónica





## 8. IMPACTO AMBIENTAL

---

Para facilitar el estudio del impacto ambiental, se ha clasificado en tres tipos:

- El impacto ambiental relacionado con el uso de las tecnologías de impresión 3D.
- El impacto asociado a la fabricación y fin de la vida útil de la impresora 3D diseñada en el proyecto.
- El impacto generado durante su funcionamiento debido a los materiales que utiliza para las impresiones.

### IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

En comparación con otros sistemas de fabricación, la impresión 3D representa un impacto ambiental positivo ya que, consigue eliminar la mayor parte de los residuos generados. Esto es debido a que con esta tecnología es posible crear un único artículo por el mismo precio unitario que mediante la producción en masa.

En comparación con la tecnología de inyección, es necesario tener en cuenta que las tecnologías de impresión 3D representan una huella de carbono menor únicamente para la producción a pequeña escala. Según un estudio de *Cuboyo* publicado en 2013 que compara la producción en masa con la producción personalizada, el impacto ambiental de la impresión 3D es menor en el caso de que los volúmenes de producción sean inferiores a 300 réplicas. En la figura 8.1 puede verse la huella de carbono de ambas tecnologías.

Otro aspecto a destacar es que, el hecho de descentralizar la producción fabricando los productos necesarios en el domicilio particular, permitiría reducir el consumo de combustibles y recursos naturales debidos al transporte de los productos ya fabricados.

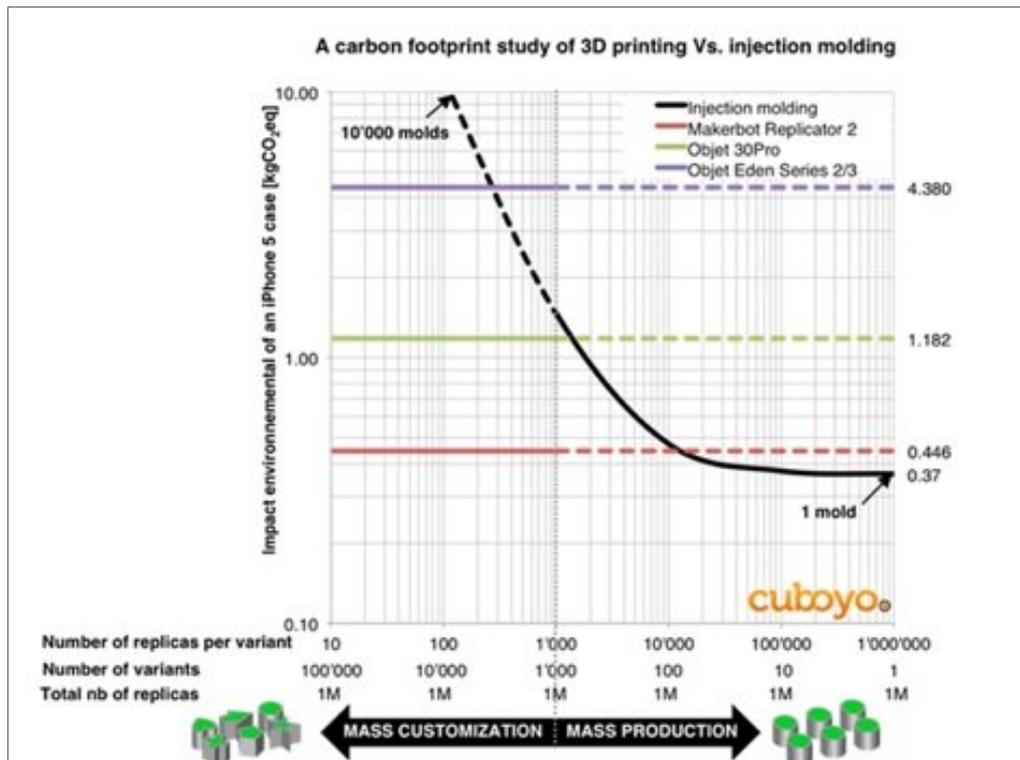


Figura 8. 1. Huella de carbono producida por la fabricación mediante impresión 3D e inyección de moldes. Fuente: [www.cuboyo.com/ambiental](http://www.cuboyo.com/ambiental)

### IMPACTO DE LA FABRICACIÓN DE LA IMPRESORA

En el caso particular de la fabricación del prototipo de impresora diseñado, los materiales principales utilizados para las piezas son el aluminio, el acero y el ABS. Estos tres materiales son reciclables, permitiendo reducir el gasto energético que supone su fabricación. Las piezas producidas explícitamente para la impresora se realizan con materiales reciclados con el objetivo de producir un menor impacto ambiental. Para el resto de elementos que no hayan sido diseñados, como los perfiles estructurales, será imprescindible realizar una buena gestión de los residuos una vez finalizada la vida útil de la impresora.

En cuanto a la electrónica esta cumple la directiva RoHS, la cual restringe el uso de materiales peligrosos para los componentes eléctricos y electrónicos.

### IMPACTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA IMPRESORA

Durante la vida útil de la impresora, el impacto medioambiental se reduce al gasto energético y el consumo de los materiales utilizados para la impresión. Entre los materiales con los que permite imprimir la máquina, el menor impacto se produce con el uso del PLA. A pesar de que tanto el ABS como el PLA son termoplásticos reutilizables, el PLA es un plástico biodegradable y más ecológico

ya que no emite gases contaminantes y es reciclable (Figura 8.2). Además, su impresión es más fácil por lo que consume menos en comparación con el ABS.

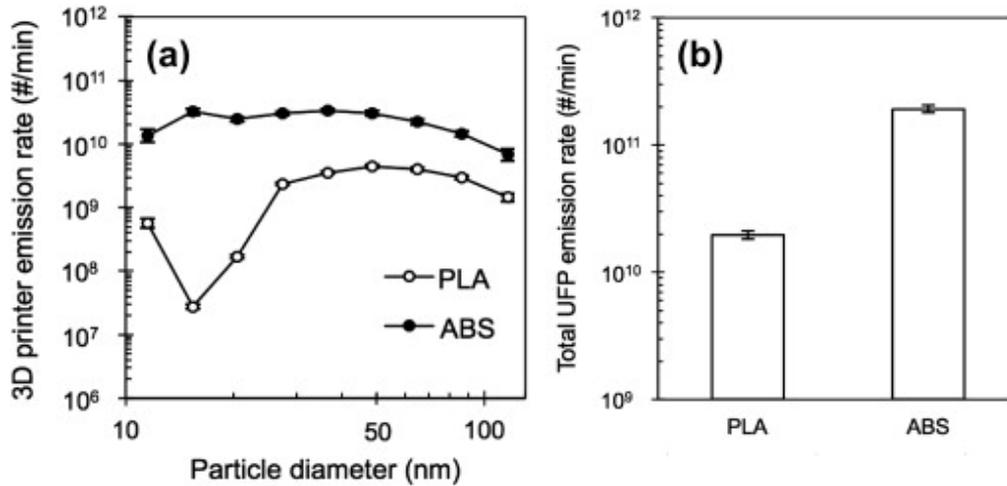


Figura 8. 2. Comparativa entre las emisiones del PLA y el ABS. Fuente: [www.Impresiontresde.com](http://www.Impresiontresde.com) [10]

Sin embargo, el impacto medioambiental provocado por el consumo de estos plásticos puede reducirse utilizando materiales reciclados. Para ello, existen máquinas destinadas a la fabricación de filamento a partir de productos de plástico reciclables como botellas y envases (Figura 8.3). De esta forma, el usuario puede reaprovechar el material de impresiones antiguas o defectuosas, reduciendo los residuos generados mediante la impresión.



Figura 8. 3. Filabot, sistema de extrusión de filamento. Fuente: *Cnet*

## 9. CONCLUSIONES

Una vez realizado el diseño detallado del prototipo de la impresora 3D, se puede concluir que los objetivos detallados en el apartado 3 se han alcanzado con éxito. En la tabla 9.1 se muestra una comparativa entre las especificaciones técnicas propuestas y las características del modelo diseñado.

	Especificaciones técnicas	Diseño
<b>Dimensiones</b>		
Dimensiones máx. impresora	600 x 600 x 600 mm	482 x 523 x 500 mm ✓
Dimensiones máx. de impresión	300 x 400 x 400 mm	224 x 210 x 155 mm ✓
Volumen máx. de impresión	48000 cm <sup>3</sup>	7291,2 cm <sup>3</sup> ✓
Peso máximo	15 kg	14,61 kg ✓
<b>Especificaciones de impresión</b>		
Mínima velocidad de impresión	100 mm/s	160 mm/s ✓
Diámetro filamento	1,75 mm o 3 mm	3 mm ✓
Número de cabezales	1	1 ✓
Material/es a imprimir:	mínimo PLA y/o ABS	PLA, ABS, otros plásticos ✓
Impresión multimaterial	No	No ✓
Tecnología de impresión	FDM	FDM ✓

**Tabla 9. 1.** Comparativa entre las especificaciones técnicas y el diseño de la impresora

Como se observa en la tabla anterior, las dimensiones de la impresora y las características de impresión que aporta el cabezal de extrusión permiten alcanzar el objetivo principal del proyecto. Este objetivo se centra en que la impresora pueda ser utilizada en el domicilio particular y pueda ser montada por el propio usuario.

En comparación con la impresora *BCN3D+ RepRap*, el nuevo diseño presenta las ventajas de necesitar únicamente tres motores para proporcionar el movimiento a lo largo de los tres ejes (en lugar de los cuatro que utiliza la *BCN3D+*). Además, la inercia de la plataforma de impresión es menor ya que proporciona el

movimiento vertical. Otra diferencia en comparación con los kits de impresoras disponibles es el coste de la impresora. Como se ha comprobado en el estudio económico, este coste es más elevado que los kits presentados a modo de ejemplo. Sin embargo, este precio queda justificado al ofrecer una mayor calidad y fiabilidad.

A pesar de cumplir las especificaciones técnicas propuestas, existen algunos aspectos del diseño que podrían formar parte de un estudio posterior con el objetivo de ser mejorados. Después de realizar un estudio de las diferentes partes que componen una impresora 3D, se ha observado que las características de la impresión vienen determinadas en gran parte por el cabezal de extrusión. Por lo tanto, el primer factor para completar el diseño de la impresora consiste en diseñar un cabezal de extrusión específico para el modelo.

Otros aspectos que se podrían mejorar son el aprovechamiento del espacio, optimizando la distribución de las piezas para lograr una mayor área de impresión, el peso de la impresora y su coste de fabricación.

A nivel personal, este proyecto ha servido para:

- Aumentar la capacidad de búsqueda y selección de información
- Reforzar y ampliar conocimientos sobre componentes mecánicos
- Mejorar la capacidad de elección
- Resolver cuestiones no basadas en enunciados
- Mejorar la habilidad con el programa *SolidWorks*

## AGRADECIMIENTOS

---

Y por último, expresar mi gratitud a aquellas personas que han hecho posible la realización del presente proyecto. En primer lugar agradecerle a Emilio Angulo, director del proyecto, la atención prestada, la información facilitada y los conocimientos adquiridos.

Agradecer también al profesor Joan Vivancos y a Xavi Martínez de la *Fundació CIM* por su colaboración y al personal de la Aula de impresión *RepRap* de la ETSEIB por su ayuda y disponibilidad, en concreto a Sebas Chavez-Ferrer por la información facilitada.

A todos aquellos compañeros que han mostrado su apoyo y en especial a Isabel Cañete, Marc Fajardo y Pedro Díaz por sus correcciones y sugerencias durante la realización del trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

---

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Impresoras 3D* [en línea]. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.impresoras3d.com/>
- [2] *Custom Part Net* [en línea]. Olney. [Consulta: 10 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.custompartnet.com/>
- [3] *THRE3D* [en línea]. [Consulta: 15 de febrero de 2014] Disponible en: <https://thre3d.com/>
- [4] *Reprap 3D printer* [en línea]. [Consulta: 29 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.reprap-3d-printer.com/?gclid=CKuspsTSqrwCFU7HtAodWUkAmA>
- [5] *MendelMax* [blog]. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.mendelmax.com/>
- [6] *PBC LINEAR* [en línea]. [Consulta: 18 de marzo de 2014] Disponible en: <http://www.pbclinear.com/Download/DataSheet/Stepper-Motor-Support-Document.pdf>
- [7] *Ingemecánica* [en línea]. Sevilla. [Consulta: 7 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>
- [8] *Rexroth Boshc Group* [blog]. [Consulta: 30 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.boschrexroth.com/>
- [9] *Igus* [en línea]. [Consulta: 15 de mayo de 2014] Disponible en: <http://www.igus.es/>
- [10] *Impresiontresde* [blog]. [Consulta: 18 de junio de 2014] Disponible en: <http://impresiontresde.com/blog/una-nueva-revision-al-impacto-ambiental-de-la-impresion-3d/>

### BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- [11] *RepRap Power* [blog]. [Consulta: 4 de junio de 2014] Disponible en: <http://reprappower.blogspot.com.es/>

- [12] *Entres D* [en línea]. [Consulta: 2 de febrero de 2014] Disponible en: <http://entresd.es/es/>
- [13] *Protorapid* [en línea]. Barcelona. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.protorapid.com/>
- [14] *3dimpresoras3d* [en línea]. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.3dimpresoras3d.com>
- [15] *3d.Formación* [en línea]. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://formacion.impresoras3d.com/>
- [16] *RobotsIn Gastronomy* [en línea]. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://robotsgastronomy.com/>
- [17] *Pixel Sistemas* [en línea]. Guipuzkoa. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.pixelsistemas.com/impresoras3dpixel.php?gclid=CLbxh9DdnrwCFWLHtAod7EgASw>
- [18] *Impresora 3D Printer* [en línea]. Argentina. [Consulta: 27 de enero de 2014] Disponible en: <http://impresora3dprinter.com>
- [19] *MakerBot Thingiverse* [en línea]. Brooklyn [Consulta: 29 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.thingiverse.com/MakerBot/designs/page:1>
- [20] *MakerBot* [en línea]. Boston [Consulta: 29 de enero de 2014] Disponible en: <https://www.makerbot.com/>
- [21] *Kickstarter* [en línea]. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <https://www.kickstarter.com/projects/43884669/build-a-production-space-and-storefront-for-piq-ch?ref=live>
- [22] Levi Lalla; Donovan Crowley. *Piq Chocolates* [en línea]. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <https://piqchocolates.com/>
- [23] Sergio Parra. *Xataka Ciencia* [en línea]. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.xatakaciencia.com/tecnologia/creada-la-primera-impresora-de-chocolate>
- [24] *3Dprinters-shop* [en línea]. Jaén. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.3dprinters-shop.com/>
- [25] *Fabber* [en línea]. Madrid. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <http://fabber.cc/servicios/abs/>

- [26] Takashi Yamada. *Yanko Design* [en línea]. [Consulta: 1 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.yankodesign.com/2012/11/07/3d-food-printing/>
- [27] Christopher Barnatt. *Explaining the future* [en línea]. [Consulta: 2 de febrero de 2014] Disponible en: <http://explainingthefuture.com/3dprinting.html>
- [28] Braydon Moreno; Coby Kabili; Mike Pilkington; Jerry Grauman. *RoBo 3D printer* [en línea]. San Diego. [Consulta: 2 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.robo3dprinter.com/>
- [29] *Ultra-lab* [en línea]. Madrid. [Consulta: 6 de febrero de 2014] Disponible en: <http://www.ultra-lab.net/>
- [30] *Undo prototipos* [en línea]. Guipúzcoa. [Consulta: 6 de febrero de 2014] Disponible en: <http://undoprototipos.com/index.php/Tecnologias/sla.html>
- [31] *3dilla* [en línea]. París. [Consulta: 10 de febrero de 2014] Disponible en: <http://es.3dilla.com/impresion-3d/materiales/>
- [32] *Moebyus machines* [en línea]. Madrid. [Consulta: 18 de febrero de 2014] Disponible en: <http://moebyus.com/index.php/partes/kits/prusa-i3-kit-completo-detail>
- [33] *Diario Ti* [en línea]. España. [Consulta: 24 de febrero de 2014] Disponible en: <http://diarioti.com/objet-anuncia-nuevos-materiales-avanzados-de-impresion-3d/30252>
- [34] *MicroPaP* [en línea]. Terrassa, España. [Consulta: 8 de marzo de 2014] Disponible en: <http://www.micropap.com>
- [35] *Tecnología de los Plásticos* [blog]. [Consulta: 15 de marzo de 2014] Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2013/02/impresion-3d.html>
- [36] Salvador Cardona Foix, Daniel Clos Costa. *TEORIA DE MAQUINAS*. Ediciones UPC 2001. ISBN 9788483014523
- [37] Guerau Femenias Riera. *Motion Assembling* [Vídeo]. [Consulta: 17 de marzo de 2014] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=cGVYy19M8so>
- [38] *Diseño e implementación de un robot SCARA*. [blog]. [Consulta: 18 de marzo de 2014] Disponible en: <http://tesisdegradohectorc2.es.tl/Capitulo-2.htm>

- [39] Eduardo Julio Carletti. *ROBOTS* [en línea]. Buenos Aires. [Consulta: 18 de marzo de 2014] Disponible en: [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm)
- [40] Aliexpress [en línea]. [Consulta: 18 de marzo de 2014] Disponible en: <http://es.aliexpress.com/item/ABS-0-3mm-Nozzle-Extruder-Print-Head-for-RepRap-3D-Printer-high-quality-new/1407010985.html>
- [41] *Haydon kerk* [en línea]. [Consulta: 20 de marzo de 2014] Disponible en: <http://www.haydonkerk.com/Resources/StepperMotorTheory/tabid/192/Default.aspx>
- [42] *Daycounter, Inc.* [en línea]. Salt Lake City, Utah. [Consulta: 22 de marzo de 2014] Disponible en: <http://www.daycounter.com/Calculators/Stepper-Motor-Calculator.phtml>
- [43] *Shinano Kenshi* [en línea]. [Consulta: 22 de marzo de 2014] Disponible en: [http://www.shinano.com/motors/docs/SKC\\_stepper\\_operation.pdf](http://www.shinano.com/motors/docs/SKC_stepper_operation.pdf)
- [44] *A Quick CNC* [en línea]. Minnesota. [Consulta: 22 de marzo de 2014] Disponible en: [http://www.aquickcnc.com/wiki/Stepper\\_Motor\\_Calculations](http://www.aquickcnc.com/wiki/Stepper_Motor_Calculations)
- [45] *Aprendemos tecnología* [en línea]. Barcelona. [Consulta: 10 de abril de 2014] Disponible en: <http://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/>
- [46] *Stock drives products / Sterling instrument* [en línea]. Nueva York. [Consulta: 24 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.sdp-si.com/#slide-two>
- [47] Chapman, Stephen J. MAQUINAS ELECTRICAS. Universidad de Houston: McGraw-Hill.
- [48] *Transmisión de potencia industrial Gates* [en línea]. España. [Consulta: 25 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.ingenieros.es/files/catalogos/Gates%20-%20Cat%C3%A1logo%20de%20productos%20industriales-%20Transmisi%C3%B3n%20de%20potencia.pdf>
- [49] *Gates* [en línea]. [Consulta: 25 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.gates.com/products/industrial/industrial-belts/synchronous-belts>

- [50] *Geckodrive motor controls* [en línea]. Estados Unidos. [Consulta: 28 de abril de 2014] Disponible en: <http://www.geckodrive.com/support/step-motor-basics.html>
- [51] Galceran i Arellano, Samuel. Sudriá i Andreu, Antoni. PRÀCTIQUES DE CONTROL DE MÀQUINES ELÈCTRIQUES. Publicacions d'abast UPC: CPDA-ETSEIB.
- [52] *Tumaker* [blog]. [Consulta: 4 de mayo de 2014] Disponible en: <http://tumaker.com/blog/2013/06/05/la-plataforma-de-impresion-el-primer-paso-para-obtener-buenos-resultados-en-impresion-3d/>
- [53] *Punkwell* [blog]. [Consulta: 4 de mayo de 2014] Disponible en: <http://www.punkwell.com/files/8bfb27c6bb2995e02100761bb4c5c8e9-5.html>
- [54] *Mux'blog, Tweakblogs* [blog]. [Consulta: 4 de mayo de 2014] Disponible en: <http://ssj3gohan.tweakblogs.net/blog/6474/mixley-3d-printer-designing-a-heated-print-bed.html>

## ANEXO 1. VISITAS

Previamente a realizar el diseño del nuevo modelo de impresora, se efectuaron dos visitas junto con Isabel Cañete Vela. En ellas se estableció contacto con el personal de centros que trabajan con impresoras *RepRap*. La primera de ellas fue al aula *RepRap* de la ETSEIB (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona) y la segunda a la *Fundació CIM*. Seguidamente se exponen los temas tratados en cada una de ellas.

### A1.1. VISITA REPRAP ETSEIB

El día 13 de febrero de 2014 se realizó una visita a la *Aula de impresión RepRap* situada en el ETSEIB. Durante esta visita se profundizó en temas relacionados con los fallos de las impresoras que se encontraba el encargado del aula a nivel de usuario, Sebas Chavez-Ferrer Marcos, así como los aspectos a mejorar de las impresoras disponibles en el aula.

Asimismo, se evaluaron los dos modelos de impresoras del aula, realizando una breve comparación entre el primer y el tercer modelo desarrollados por la *Fundació CIM* (Figura A1.1). Estos modelos corresponden a la *RepRapPrusa* y *BCN3D+* respectivamente.

Estos fallos, características y ventajas del tercer modelo respecto al primero, quedan reflejados en la Tabla A1.1, donde se resumen los principales problemas y si estos han sido solucionados mediante el diseño del último modelo de impresora *RepRap*.

Problemas	Primer modelo	Tercer modelo
Aprovechamiento del área de impresión	No aprovecha la altura	Aprovecha la altura pero la estructura es mayor
Atasco en la boquilla	Frecuente	Frecuente
Cambio de boquilla (consecuencia del atasco)	Cambio difícil, es necesario desmontar gran cantidad de piezas	Mejorado pero aún así sigue siendo un proceso lento
Calibración de la mesa	Difícil, se realiza mediante 4 puntos	Mejorada, se realiza mediante 3 puntos
Soporte del rodillo	Inexistente	Solo disponible para un modelo de bobina
Calentamiento	No solucionado	No solucionado
Fallo de los componentes	No solucionado y difícil localización del fallo	No solucionado y difícil localización del fallo

Tabla A1.1. Principales problemas de impresoras *RepRap*.

Una de las características que se recalcó durante la visita fue la robustez de la impresora BCN3D+, mayor que la del primer modelo. Además, como opinión personal del encargado del aula, se destaca la mejora estética del nuevo modelo.

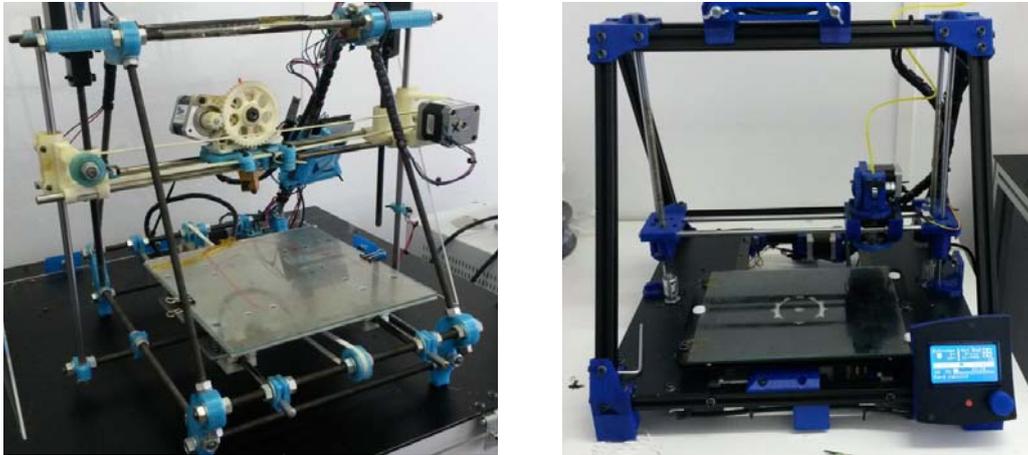


Figura A1. 1. A la izquierda, RepRapPrusa. A la derecha, BCN3D+.

## A1.2. VISITA FUNDACIÓ CIM

El 18 de febrero de 2014 se efectuó una visita a la *Fundació CIM*, entidad adscrita a la UPC, que como describe en su web “*su misión institucional es transferir conocimientos de ingeniería y de gestión de tecnología y facilitar las herramientas a empresas y profesionales para que puedan crear y mejorar sus productos y los procesos de fabricación [...] consiguiendo la máxima competitividad tecnológica. [...] Esto se consigue generando tecnología de producto y proceso mediante la realización de proyectos R+D+i.*”

Dado su carácter difusor, de innovación y de mejora continua, se realizó una visita al centro con el objetivo de, por un lado descubrir el origen de este y por otro la tecnología utilizada en las impresoras 3D y las posibles mejoras que podrían hacerse. Por ello se realizó una entrevista a uno de los fundadores, Joan Vivancos Calvet, conjuntamente con unos de los responsables de RepRap BCN, Xavi Martínez Faneca.

### Entrevista

En primera instancia únicamente nos encontrábamos Joan, Sara e Isabel:

- Joan, sabemos que eres uno de los fundadores de la *Fundació CIM*, ¿Cómo y cuándo se creó?

*Joan Vivancos:* Se creó entre el 1989 y 1990. El estado destinó un presupuesto a la creación de un laboratorio, que finalmente el rector Gabriel Ferraté i Pascual se

decantó por la creación de un laboratorio de Fabricación, ya que la universidad no disponía de ninguno en aquellos momentos. Y por una cosa u otra, finalmente cayó en mis manos y del profesor Ferrer decidir que material se compraba para laboratorio. En esos años, se empezaban a usar las 'máquinas con CN' pero el principal problema que tenían las empresas era la comunicación entre ellas. Entonces en vez de pedir a Alemania la fábrica 'llave en mano', se optó por coger diferentes máquinas y encontrarse con los problemas que tenían las empresas y así solucionarlos.

- **¿Cuál ha sido la trayectoria de la *Fundació CIM* a lo largo de los años?**

*J.V.:* La *Fundació CIM* experimentó un gran progreso hasta llegar a un punto de auge con un gran número de trabajadores. Llegó la crisis, fusión y hasta lo que es ahora.

Actualmente no se dispone de tanto personal fijo, únicamente lo son unas 40 personas. El resto integrantes está compuesto por aproximadamente 160 becarios, 100 de ellos en empresas exteriores. Además, al año se forman 1500 alumnos.

- **¿Qué es la *Fundació CIM* y de dónde viene el nombre?**

*J.V.:* Es un entidad que tiene tres pilares principales, la formación, servicios a la industria e investigación. El nombre tiene dos significados, el primero de ellos son las siglas de *Computer Integrated Manufacturing* y el otro es su significado en catalán. El "cim" representa el punto más alto de una montaña, y nuestro objetivo era este, llegar lo más alto posible.

**Cuando llegó Xavi, Joan tomó la palabra e hizo la primera pregunta:**

- **(*J.V.*) ¿Cuál es el procedimiento desde el diseño realizado en un CAD al hasta el diseño sólido físico?**

*Xavi Martínez:* En primer lugar se debe diseñar la pieza con algún software de CAD (ya sea *SolidWorks*, *Rinoceros*, *3D Studio...*). Luego se pasa a *STL*, que es un archivo que definido por puntos y caras. Posteriormente se usa el programa *Slic3r* que pasa a G-Code, este es el programa que usa la *Fundació CIM*, pero hay otros como Cura.

A veces también es necesario un paso intermedio, para cuando aparecen problemas en el archivo de *STL*, en la *Fundació CIM* se usa *NetFabb*, programa que detecta caras desaparecidas o malas orientaciones.

Una vez se tienen las instrucciones en G-Code viene el hardware de la impresora, que en el caso que nos ocupa es la placa *Arduino*, que a través de *Marlin* que

interpreta las acciones del G-Code, envía las acciones a los motores y sensores a través de los drivers y de una RAMP.

- **¿Qué problemas son los más comunes en la electrónica y porqué se usa Arduino+RAMP+Drivers y no una placa con todo integrado?**

*X.M.:* Los problemas principales son que se queman drivers, yo nunca los haría en la misma placa porque habría que tirar toda la placa. Luego, a veces la RAMP también se quema cuando hacen pasar mucha intensidad para que se caliente rápido la cama, no sabemos si es problema nuestro o de la electrónica. Y se usa eso porque es lo más común y por lo que os he comentado de los drivers. Otro problema importante es el calentamiento.

- **Hemos pensado de hacerlo en cámara caliente, por las ventajas que comporta, e incluir un sensor de temperatura y humedad en la placa. ¿Hay alguna razón por la que no se haga en cámara caliente?**

*X.M.:* Me parece muy buena idea lo de integrar el sensor. A ver, el inconveniente principal es que se calienta todo por igual y en consecuencia todas las partes que actualmente se hacen con impresoras 3D deberían hacerse con PVC o un material que aguante mejor el calor, y si lo haces con otro material ya se perdería la reproducibilidad.

- **El hecho de que la estructura de todas las impresoras sea de forma triangular, ¿supone alguna ventaja?**

*X.M.:* La primera impresora de este tipo se realizó con este tipo de estructura, desde entonces se ha mantenido ya que es un identificador “de la marca”, pero actualmente se tiende a hacer estructuras cuadradas.

- **Nos han comentado que la sujeción de la boquilla no es la más adecuada, ¿se ha introducido algún cambio en este aspecto en el último modelo de impresora?**

*X.M.:* Sí, se han hecho cambios en la forma de la boquilla porque tiene que mantener el material sólido hasta un punto en el que se funde con rapidez y por completo. La única diferencia de nuestra impresora respecto al resto es que hemos conseguido hacer una de las piezas interiores más cortas, por lo demás, todas tienden a tener la misma forma.

En cuanto a la sujeción ha habido proyectos intentando hacer más fácil de cambiar la boquilla ya que se atasca con facilidad. Pero es por esto mismo que la boquilla debe tener el mínimo juego, así que en todos los modelos van atornilladas.

### A1.3. VISITA HP SANT CUGAT

Una vez realizados los primeros pasos del diseño de la nueva impresora, se visita una última empresa el día 28 de marzo de 2014 con la compañía de Isabel Cañete Vela. La visita se efectuó a la empresa HP situada en Sant Cugat del Vallés. En ella, acompañadas por Emilio Angulo Navarro, director del proyecto e Ingeniero de proyectos de HP, se examinaron las impresoras 3D de tecnología FDM con las que cuenta la empresa (Figura A1.2).

Aprovechando que el tipo de impresoras utilizadas en la empresa coinciden con el tipo 3 elegido para el nuevo diseño (el movimiento del eje Z está situado en la plataforma de impresión y el resto de movimientos los proporciona el cabezal de extrusión), se observan las ventajas que aporta el diseño y distribución de los ejes X e Y en esta impresora.

También se advierte que la impresora cuenta con varios ventiladores de refrigeración, ya que consiste en una estructura cerrada y de esta manera se consigue mantener la atmósfera adecuada para una correcta impresión.

En comparación con las impresoras vistas durante las visitas anteriores, se destaca un procedimiento de impresión que se distingue de los anteriores. Esto es debido a que la impresora cuenta con un sistema de limpieza de la boquilla (Figura A1.3), que se utiliza cada cierto tiempo durante una impresión. Este mecanismo simple que consiste en un cepillo y un recipiente permite evitar la obstrucción de la boquilla, inconveniente que se mostraba en las impresoras *RepRap* anteriores.



Figura A1. 2. Impresora 3D  
HP



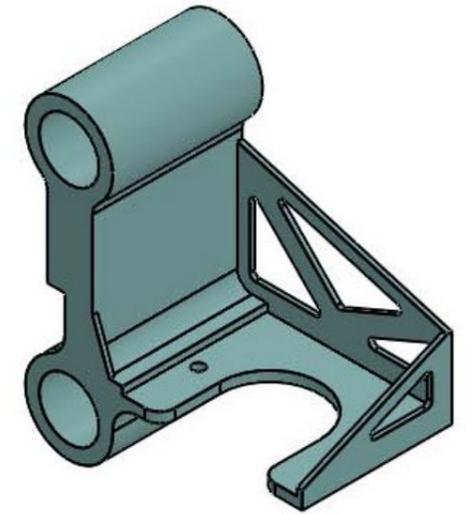
Figura A1. 3. Mecanismo de  
limpieza de la impresora

## ANEXO 2. PLANOS

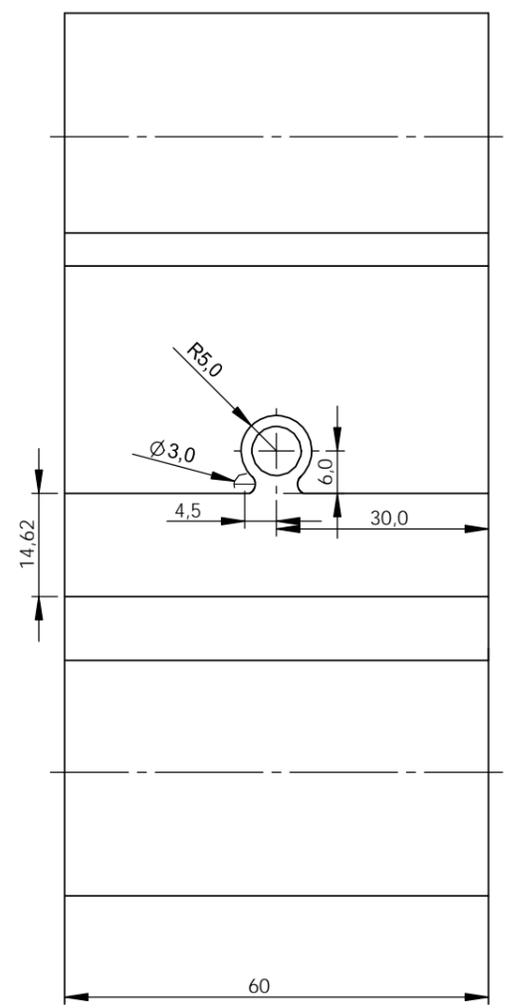
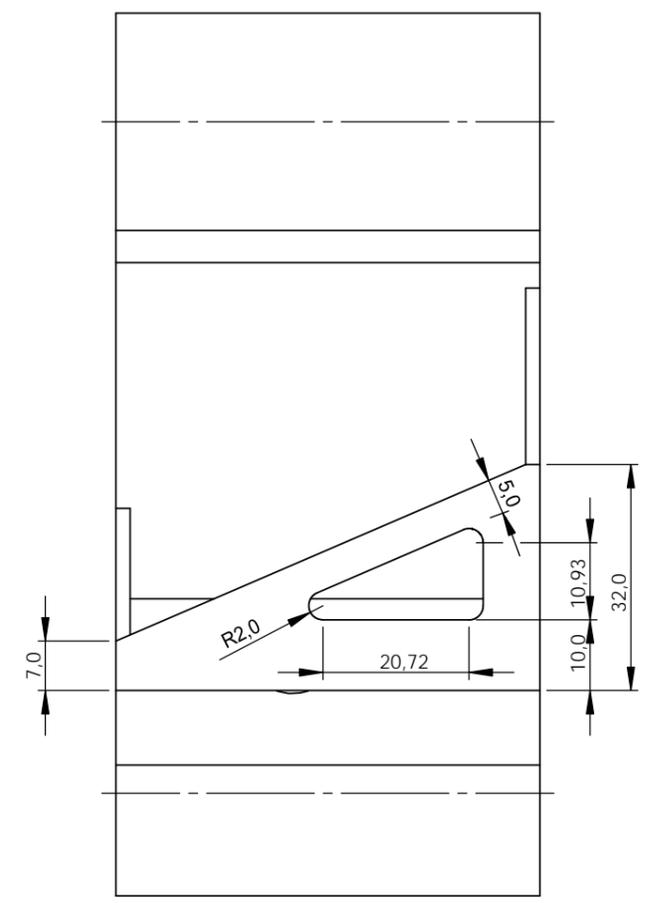
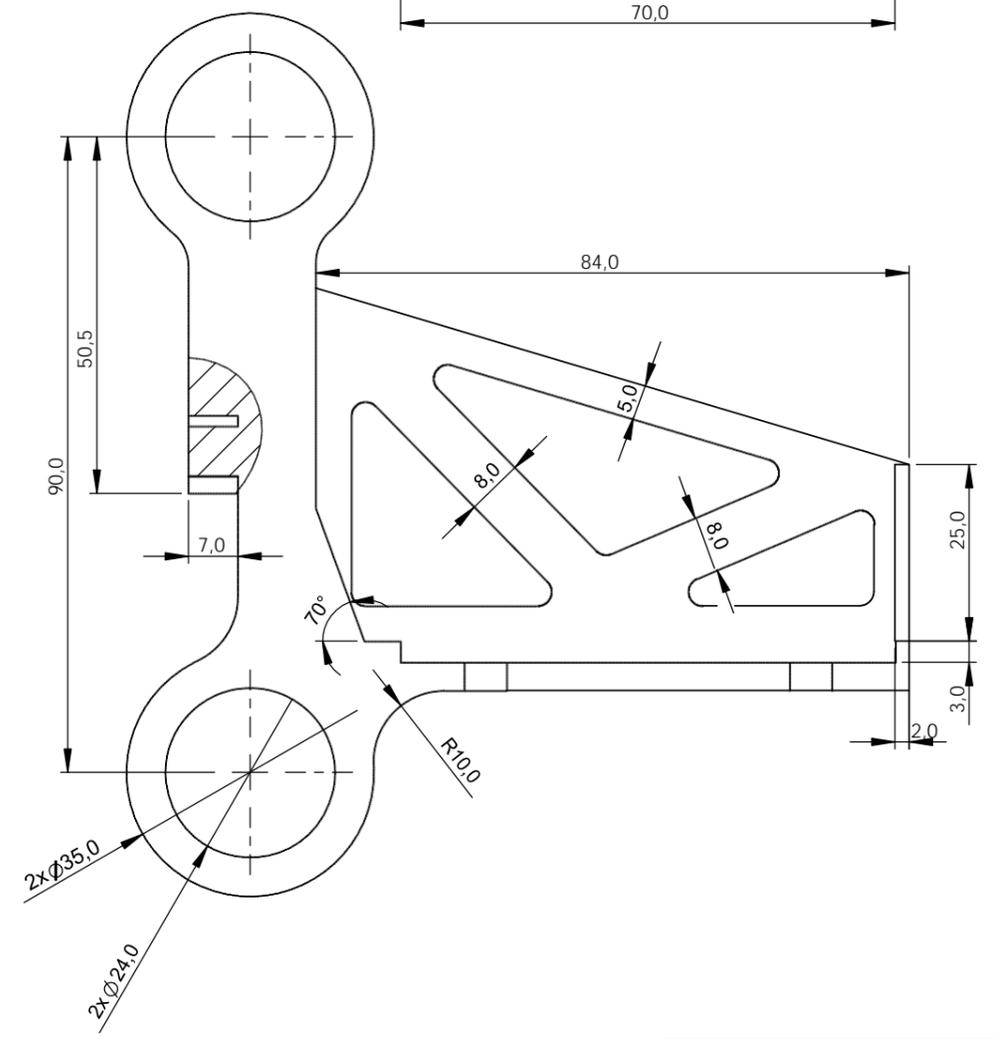
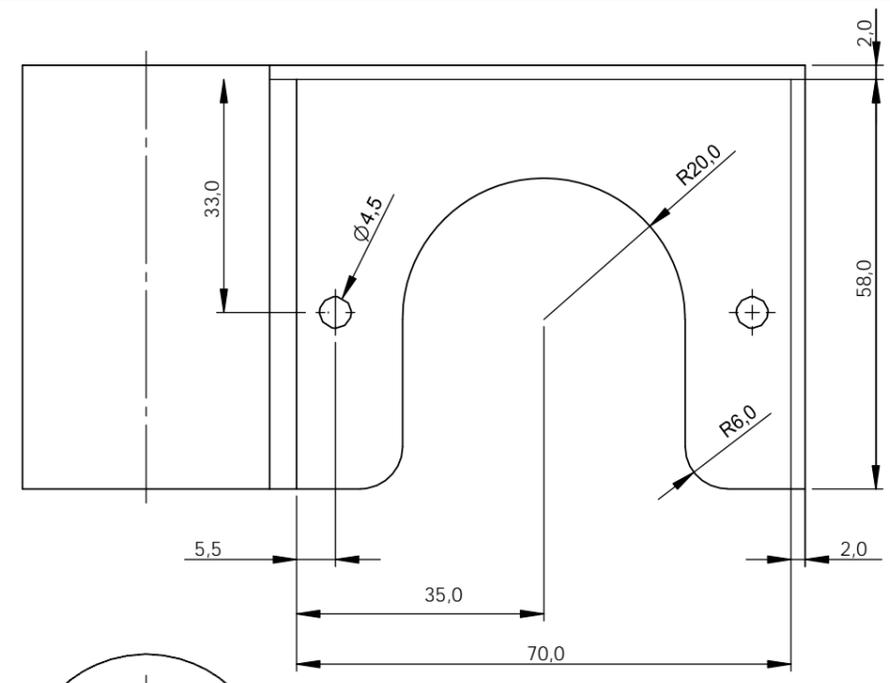
---

A continuación se muestran tres planos a modo de ejemplo de tres de los elementos que componen la impresora. Estos son:

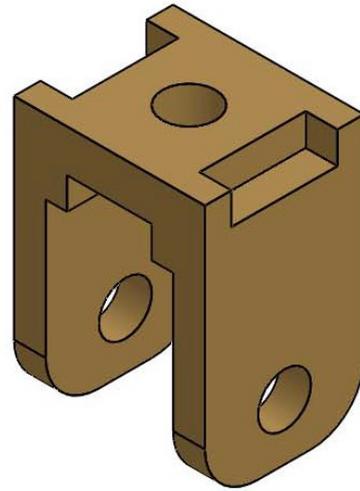
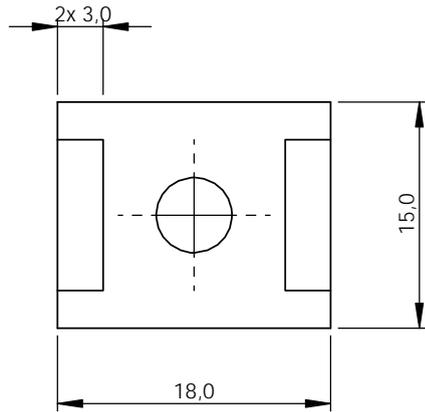
- El soporte del cabezal de extrusión (elemento 12 del eje X)
- El tensor de las correas dentadas (elemento 21 del eje X y 30 del eje Y)
- La sujeción de las guías (elemento 33 del eje Y)



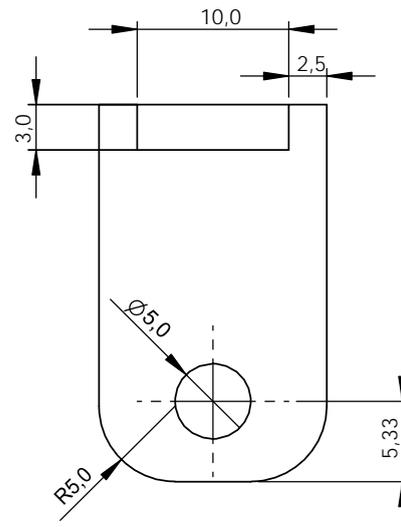
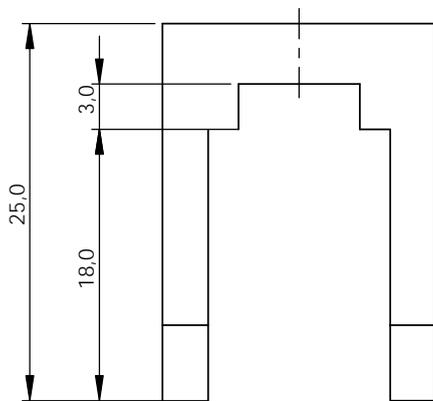
Vista isométrica solo para referencia



	NOMBRE	FECHA				TITULO:		
DIBUJ.	Sara de la Peña	3/06/14				Soporte del cabezal de extrusión		
VERIF.								
APROB.	Sara de la Peña	3/06/14						
FABR.								
  Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA						N.º DE DIBUJO	12	A3
						ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 3



Vista isométrica solo para referencia



	NOMBRE	FECHA			
DIBUJ.	Sara de la Peña	10/06/14			
VERIF.					
APROB.	Sara de la Peña	10/06/14			
FABR.					

TÍTULO:

Tensor correas dentadas

N.º DE DIBUJO

21,30

A4

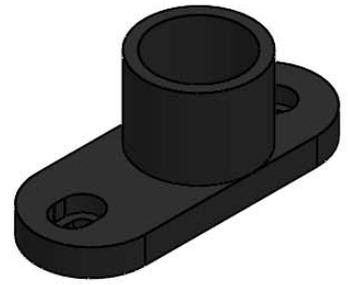


Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

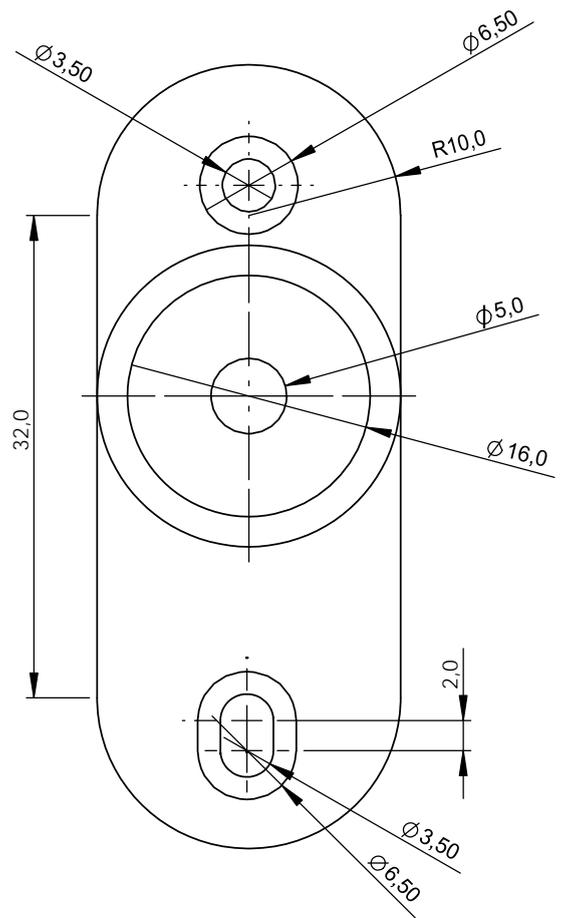
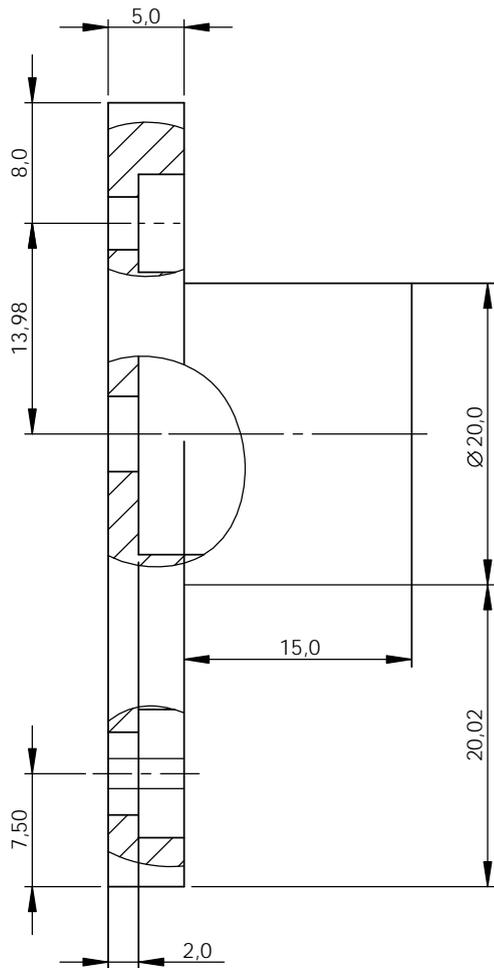
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESCALA:2:1

HOJA 2 DE 3



Vista isométrica solo para referencia



	NOMBRE	FECHA			
DIBUJ.	Sara de la Peña	3/06/14			
VERIF.					
APROB.	Sara de la Peña	3/06/14			
FABR.					

TÍTULO:	Sujeción guías eje Y	
N.º DE DIBUJO	33	A4



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESCALA:2:1

HOJA 3 DE 3