

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Diseño y fabricación de impresora 3D  
basada en robot paralelo tipo Delta –  
RoPar3D”

Curso 2019/2020

**Alumno/a:**

Diego Miguel Parra Martínez

**Director/es:**

Manuel Ángel Aguilar Torres  
Fernando José Aguilar Torres





Diseño y fabricación de impresora 3D basada en robot paralelo tipo Delta - RoPar3D

**Autor**

Diego Miguel Parra Martínez

**Director**

Aguilar Torres, Manuel Ángel

**Codirector**

Aguilar Torres, Fernando José







El presente Trabajo de Fin de Grado de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Almería (UAL) se distribuye con licencia Creative Commons Reconocimiento-No comercial-Compartir Igual 4.0 International

CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

*A mis padres  
por su apoyo incondicional durante estos años*



## Contenido

Agradecimientos	7
Relación de Figuras	8
Relación de Tablas	11
Glosario	12
Abreviaturas, Siglas y Acrónimos	16
1. Interés y objetivos	17
1.1. Introducción	17
1.2. Motivación personal	18
1.3. Justificación	19
1.4. Objetivos	20
2. MARCO TEÓRICO (I): ESTADO ACTUAL DE LA IMPRESIÓN 3D FDM	21
2.1 Definición y origen.	21
2.2 Prototipado Rápido vs Fabricación Aditiva.	22
2.3 Historia y evolución.	23
2.4 Movimiento RepRap, Movimiento Maker y DIY.	26
2.5 Ventajas de la impresión 3D.	27
2.6 Impresión 3D industrial vs. Impresión 3D doméstica.	30
2.7 Tecnologías de impresión 3D.	34
Modelado por Deposición Fundida (FDM)	39
3. MARCO TEÓRICO (II): ESTADO ACTUAL ROBOT PARALELO DELTA	49
3.1 Origen y definición hitos.	49
3.2 Uso actual.	50
4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y CRONOGRAMA	51
4.1. Fases del proyecto.	51
4.2 Cronograma.	53
5. MATERIALES Y MÉTODOS.	56
5.1 Materiales.	56

Herramientas informáticas.	56
Máquina 3D materiales y pruebas de impresión.	57
Otros materiales.	58
5.2 Metodología.	59
6. DISEÑO Y FABRICACIÓN.	60
6.1 Análisis técnico-mecánico.	60
6.2 Diseño en 3D utilizando SolidWorks®.	63
6.2.1 <i>Diseño estructura.</i>	64
6.2.2 Diseño robot prototipo RoPar3D.	69
6.3 Prototipado de la máquina usando impresión 3D.	100
6.4 Creación de la lista de materiales (BOM) y selección de componentes.	116
Componentes Mecánicos	116
Componentes eléctricos	119
BOM	128
6.5 Electrónica y programación.	131
6.6 Puesta en marcha.	135
6.7 Estudio comparativo entre tipos de impresoras.	139
TEST 1: Cubo XYZ	139
TEST 2: Benchy	141
TEST 3: Jarrón	141
TEST 4: Búho	142
COMPARATIVA DE TIEMPOS	143
7. COMPETENCIAS.	144
7.1 Competencias básicas.	144
7.2 Competencias Curriculares Transversales (CCT).	146
7.3 Competencias Específicas.	147
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	149
8.1 Diseño de las piezas en SolidWorks®.	149



8.2 Construcción de Ropar3D.	149
9. VIABILIDAD ECONÓMICA.	151
10. VIABILIDAD AMBIENTAL.	152
11. CONCLUSIONES.	153
11.1 Conclusiones.	153
11.2 Conclusiones personales	154
11.3 Proyección de futuro.	154
11.4 Propuestas de mejora.	155
11.4.1 Cartelas en los perfiles	155
11.4.2. Cabezal láser.	156
11.4.3. Pinza hidráulica / Pinza de vacío para implementación robot “pick and place”.	156
11.4.5 Cubierta para tapar los motores y la parte electrónica.	157
11.4.6 Doble extrusión.	157
BIBLIOGRAFIA	158
ANEXOS	161

## Agradecimientos

El presente proyecto fin de grado fue realizado bajo la supervisión de D. Manuel Ángel Aguilar Torres y D. Fernando José Aguilar Torres a quienes me gustaría en este apartado de la memoria del TFG, expresar mi sincero agradecimiento por aceptar mi propuesta sin dudarlo. Además, agradezco su entusiasmo, asistencia e implicación continua durante la realización de todo el proyecto.

También me gustaría dar las gracias a mi familia y amigos que me han apoyado y han estado siempre ahí en todos los momentos durante mis años de estudio. Sé que, sin ellos, sin su apoyo incondicional, este proyecto no habría sido posible.

Por último, destacar a las personas más cercanas y más importantes para mí, y a quienes les dedico este proyecto: mis padres y mi pareja. Sin ellos no habría disfrutado tanto cada momento de la realización de este proyecto. Al igual que en mi vida personal, a lo largo de mis años de estudio y durante la elaboración de este proyecto, han sido un pilar fundamental y por ello les estaré eternamente agradecido.

A todos, gracias.

## Relación de Figuras

<i>Figura 1: Diagrama de la impresora de Charles Hull vs. Impresora por Estereolitografía de 2015.</i>	23
<i>Figura 2: Experimento fotográfico del artista François Willème.</i>	23
<i>Figura 3: Imagen de la primera patente de impresión 3D por Charles Hull.</i>	24
<i>Figura 4: Ilustración del proceso de codificación de la información en formas geométricas.</i>	25
<i>Figura 5: Proceso del sinterizado selectivo por láser.</i>	36
<i>Figura 6: Proceso de fabricación por laminado (LOM).</i>	37
<i>Figura 7: Proceso de impresión por SLA.</i>	38
<i>Figura 8: Proceso de fabricación por extrusión de material fundido (FDM).</i>	39
<i>Figura 9: Eje de coordenadas.</i>	42
<i>Figura 10: Impresora CoreXY, y Sistema de movimiento impresora CoreXY.</i>	44
<i>Figura 11: Tipos de impresoras de arquitectura cartesiana.</i>	45
<i>Figura 12: Impresora 3D cartesiana vs. Impresoras 3D delta.</i>	46
<i>Figura 13: Diseño impresora 3D basada en robot paralelo tipo delta.</i>	47
<i>Figura 14: Diagrama robot paralelo. Fuente: Patente US. N°(4,976,582)</i>	49
<i>Figura 15: Robot paralelo en línea de producción.</i>	50
<i>Figura 16: Anycubic Kossel Plus.</i>	57
<i>Figura 17: AM8, cartesiana diseño propio.</i>	57
<i>Figura 18: Diagramas cotas RoPar3D.</i>	62
<i>Figura 19: Perfil aluminio estructural Motedis - 20x20 Tipo-B Ranura 6.</i>	64
<i>Figura 20: Representación del volumen de trabajo del robot paralelo ABB IRB360 FlexPicker.</i>	65
<i>Figura 21: Diseño pieza esquinera.</i>	65
<i>Figura 22: Diseño pieza esquinera mediante SolidWorks®.</i>	66
<i>Figura 23: Diseño esquinera de la torre.</i>	66
<i>Figura 24: Estructura prototipo RoPar3D.</i>	67
<i>Figura 25: Base de impresión prototipo RoPar3D.</i>	68
<i>Figura 26: Detalle de la estructura con el soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D</i>	68
<i>Figura 27: Cota radio base del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.</i>	69
<i>Figura 28: Sistema tensor del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.</i>	70
<i>Figura 29: Detalle del soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.</i>	70
<i>Figura 30: Detalle del soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.</i>	71
<i>Figura 31: Diseño cuerpo RoPar3D.</i>	72
<i>Figura 32: Comparativa real Cuerpo prototipo y Cuerpo final.</i>	72
<i>Figura 33: Render diseño cuerpo final del robot RoPar3D.</i>	73
<i>Figura 34: Resultado estudio tensiones cuerpo prototipo robot.</i>	73
<i>Figura 35: Resultado estudio tensiones cuerpo final robot.</i>	74
<i>Figura 36: Resultado estudio desplazamientos cuerpo prototipo robot.</i>	74
<i>Figura 37: Resultado estudio desplazamientos cuerpo final robot.</i>	75
<i>Figura 38: Ensamblaje real cuerpo y brazos robot con motores.</i>	75
<i>Figura 39: Render diseño final unión cuerpo del robot RoPar3D.</i>	76
<i>Figura 40: Diseño del brazo prototipo robot del prototipo RoPar3D.</i>	77
<i>Figura 41: Vista explosionada del sistema de engranaje del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	77
<i>Figura 42: Detalle cuerpo con brazos y motores.</i>	78

<i>Figura 43: Detalle rueda prototipo izquierda y rueda final derecha. Fuente: Elaboración propia.</i>	78
<i>Figura 44: Croquis envolvente del diente en rueda dentada y perfil de correa GT2.</i>	80
<i>Figura 45: Render diseño rueda dentada 80 dientes para correa GT2.</i>	80
<i>Figura 46: Diagrama solido libre brazo.</i>	81
<i>Figura 47: (Cargas)Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	82
<i>Figura 48: (Tensiones- VonMises). Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	83
<i>Figura 49: (Desplazamientos – URES (mm)). Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	83
<i>Figura 50: Segunda Iteración del diseño del prototipo del brazo de robot RoPar3D.</i>	84
<i>Figura 51: (Tensiones-VonMises). Ensayo de elementos finitos segunda iteración del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	84
<i>Figura 52: (Desplazamientos – URES (mm)). Ensayo de elementos finitos segunda iteración del brazo prototipo robot RoPar3D.</i>	85
<i>Figura 53: Ensamblaje RoPar3D prototipo SolidWorks®.</i>	86
<i>Figura 54: Tercera Iteración del diseño del prototipo del brazo de robot RoPar3D tras ensayo topológico.</i>	86
<i>Figura 55: Tercera Iteración del prototipo brazo de robot RoPar3D.</i>	87
<i>Figura 56: (Tensiones-VonMises). Ensayo de elementos finitos tercera iteración del brazo robot RoPar3D.</i>	88
<i>Figura 57: (Desplazamientos – URES (mm)). Ensayo de elementos finitos tercera iteración brazo robot RoPar3D.</i>	88
<i>Figura 58: Vista explosionada ensamblaje brazo RoPar3D.</i>	89
<i>Figura 59: Ensamblaje real del brazo. Fuente: Elaboración propia.</i>	89
<i>Figura 60: Logo en brazo RoPar3D. Fuente: Elaboración propia.</i>	90
<i>Figura 61: Ensamblaje conjunto efector SolidWorks®. Fuente: Elaboración propia.</i>	90
<i>Figura 62: Modelo 3D efector con parámetros característicos.</i>	91
<i>Figura 63: Detalle ensamblaje final de carrera prototipo SolidWorks®.</i>	91
<i>Figura 64: Detalle ensamblaje final de carrera SolidWorks®.</i>	92
<i>Figura 65: Diseño soporte electrónica SolidWorks®.</i>	93
<i>Figura 66: Diseño soporte placa SBC - Orange Pi (mini pc) SolidWorks®.</i>	93
<i>Figura 67: Diseño soporte mosfet externo cama caliente SolidWorks®.</i>	93
<i>Figura 68: Diseño soporte conector interruptor de alimentación SolidWorks®.</i>	94
<i>Figura 69: Ensamblaje plataforma de impresion SolidWorks®.</i>	94
<i>Figura 70: Soporte portabobinas SolidWorks®. Fuente: Elaboración propia.</i>	95
<i>Figura 71: Refuerzos de esquinas SolidWorks®. Fuente: Elaboración propia.</i>	96
<i>Figura 72: Escuadras SolidWorks®. Fuente: Elaboración propia.</i>	97
<i>Figura 73: RoPar3D primer prototipo.</i>	97
<i>Figura 74: Vista 1 Ensamblaje RoPar3D final en SolidWorks®.</i>	98
<i>Figura 75: Vista 2 Ensamblaje RoPar3D final en SolidWorks®.</i>	99
<i>Figura 76: RoPar3D prototipo final.</i>	99
<i>Figura 77: Vista por capas detalle relleno brazo RoPar3d mediante Simplify3D®.</i>	101
<i>Figura 78: Vista por capas brazo RoPar3D mediante Simplify3D®. Fuente: Elaboración propia.</i>	102
<i>Figura 79: Vista por detalle relleno y soportes cuerpo robot mediante Simplify3D®. Fuente: Elaboración propia.</i>	103
<i>Figura 80: Postprocesado, retirada de soportes de impresión del cuerpo robot. Fuente: Elaboración propia.</i>	103
<i>Figura 81: Vista por capas cuerpo robot mediante Simplify3D®. Fuente: Elaboración propia.</i>	103
<i>Figura 82: Vista por capas esquinera mediante Simplify3D®.</i>	104
<i>Figura 83: Vista por capas refuerzo esquinera mediante Simplify3D®. Fuente: Elaboración propia.</i>	105
<i>Figura 84: Refuerzos de esquinera.</i>	106

<i>Figura 85: Vista por capas pareja de escuadras mediante Simplify3D®.</i>	106
<i>Figura 86: Vista por capas soportes para plataforma de impresión mediante Simplify3D®.</i>	107
<i>Figura 87: Vista por capas rueda dentada mediante Simplify3D®.</i>	108
<i>Figura 88: Detalle engrane de diente en correa.</i>	108
<i>Figura 89: Vista por capas soportes final de carrera mediante Simplify3D®.</i>	109
<i>Figura 90: Vista por capas soporte electrónica mediante Simplify3D®.</i>	110
<i>Figura 91: Vista por capas soporte Orange Pi mediante Simplify3D®.</i>	110
<i>Figura 92: Vista por capas soporte mosfet mediante Simplify3D®.</i>	111
<i>Figura 93: Vista por capas soporte interruptor alimentación mediante Simplify3D®.</i>	112
<i>Figura 94: Vista por capas accesorio final del porta bobinas mediante Simplify3D®.</i>	113
<i>Figura 95: Útiles de corte para perfiles por prototipado rápido.</i>	115
<i>Figura 96: Detalle ensamblaje perfiles tras corte. Fuente: Elaboración propia.</i>	115
<i>Figura 97: Rodamientos 608RS. Fuente: Elaboración propia.</i>	116
<i>Figura 98: Tabla de tolerancias según tipo de rodamiento.</i>	116
<i>Figura 99: Escuadras aluminio 20mm. Fuente: Elaboración propia.</i>	118
<i>Figura 100: Conjunto controlador electrónica: Re-ARM / Ramps 1.6+ / TMC2130. Fuente: Elaboración propia.</i>	120
<i>Figura 101: Orange Pi PC.</i>	122
<i>Figura 102: : Diagrama motor paso a paso.</i>	122
<i>Figura 103: Nema 17 mod. 42HD4027-01.</i>	123
<i>Figura 104: Conector interruptor alimentación. Fuente: Elaboración propia.</i>	124
<i>Figura 105: Sensor de nivelación. Fuente: Elaboración propia.</i>	125
<i>Figura 106: Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT). Fuente: BOE</i>	126
<i>Figura 107: Control web de maquina Octoprint. Fuente: Elaboración propia.</i>	133
<i>Figura 108: Conexiones placa.</i>	134
<i>Figura 109: Estados de final de carrera. Fuente: Elaboración propia.</i>	136
<i>Figura 110: Proceso de calibración automático.</i>	137
<i>Figura 111: Proceso de calibración de PID. Fuente: Elaboración propia.</i>	138
<i>Figura 112: Resultados de impresión de prueba RoPar3D.</i>	138
<i>Figura 113: Cubo de calibración XYZ: AKP / AM8 / RoPar3D.</i>	139
<i>Figura 114: Mediciones cubo XYZ impreso en RoPar3D.</i>	140
<i>Figura 115: Benchy: AKP / AM8 / RoPar3D.</i>	141
<i>Figura 116: Jarrón : AKP / AM8 / RoPar3D.</i>	142
<i>Figura 117: Búho : AKP / AM8 / RoPar3D.</i>	142
<i>Figura 118: Ropar3D - Impresora 3D basada en robot paralelo tipo Delta.</i>	149
<i>Figura 119: RoPar3D final con bobina.</i>	153
<i>Figura 120: RoPar3D con cartelas instaladas .</i>	156

## Relación de Tablas

<i>Tabla 1: Tabla comparativa entre diferentes impresoras de uso doméstico.</i>	33
<i>Tabla 2: Procesos y tecnologías utilizadas en fabricación aditiva.</i>	35
<i>Tabla 3: Comparativa de propiedades técnicas de ABS, PLA y PETG.</i>	42
<i>Tabla 4: Tabla comparativa impresoras 3D cartesiana, delta y coreXY.</i>	47
<i>Tabla 5: Cómputo de horas por fase TFG.</i>	53
<i>Tabla 6: Cronograma TFG.</i>	6
<i>Tabla 7: Parámetros constructivos.</i>	63
<i>Tabla 8: Comparativa reducción de masa.</i>	87
<i>Tabla 9: Comparativa simulaciones.</i>	88
<i>Tabla 10: Parámetros comunes de impresión.</i>	101
<i>Tabla 11: Tiempo, materia y coste prototipado Brazo.</i>	102
<i>Tabla 12: Tiempo, materia y coste prototipado Cuerpo.</i>	104
<i>Tabla 13: Tiempo, materia y coste prototipado Esquinera.</i>	104
<i>Tabla 14: Tiempo, materia y coste prototipado Refuerzo esquinera 40mm.</i>	105
<i>Tabla 15: Tiempo, materia y coste prototipado Refuerzo esquinera 50mm.</i>	105
<i>Tabla 16: Tiempo, materia y coste prototipado Escuadras.</i>	107
<i>Tabla 17: Tiempo, materia y coste prototipado Soportes plataforma impresión.</i>	107
<i>Tabla 18: Tiempo, materia y coste prototipado Rueda dentada GT2.</i>	108
<i>Tabla 19: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte finales de carrera.</i>	109
<i>Tabla 20: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Electrónica.</i>	110
<i>Tabla 21: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Orange Pi PC.</i>	111
<i>Tabla 22: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Mosfet.</i>	111
<i>Tabla 23: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Interruptor alimentación.</i>	112
<i>Tabla 24: Tiempo, materia y coste prototipado Tapa portabobinas.</i>	113
<i>Tabla 25: Desglose costes prototipado.</i>	114
<i>Tabla 26: Comandos por segundo en diferentes controladores utilizando Klipper. Fuente: Klipper.</i>	119
<i>Tabla 27: Desglose materiales mecánicos.</i>	128
<i>Tabla 28: Desglose materiales electrónicos.</i>	129
<i>Tabla 29: Desglose material de impresión.</i>	130
<i>Tabla 30: Presupuesto total.</i>	130
<i>Tabla 31: Resultados mediciones Cubo XYZ en cada máquina y su error.</i>	140
<i>Tabla 32: Tiempos de impresión por máquina para los diferentes modelos.</i>	143
<i>Tabla 33: Presupuesto viabilidad económica.</i>	152

## Glosario

### **Bobina** *Spool*

Soporte de rollo de filamento plástico utilizado para la impresión 3D por deposición de material fundido FDM.

### **Cama caliente** *Hot bed*

Es la base de impresión calefactada mediante electrónica sobre la que se imprimen las piezas. El hecho de estar calefactada, la hace adecuada para imprimir materiales como el filamento ABS y garantizar su adherencia a la base de impresión.

### **Correa**

Cinta de caucho cuya utilidad es la de transferir los giros de los motores mediante poleas a los ejes y a las piezas móviles de una máquina.

### **Cracking**

Fallo de impresión por separación de las capas debido a la falta de adhesión entre ellas provocada por la contracción del material al enfriarse.

### **Diámetro de filamento**

Es el valor nominal (en milímetros) del diámetro de la sección de filamento que admite la impresora por FDM

### **Extrusor**

Mecanismo fundamental en las impresoras por FDM que contiene un sistema mecánico con motores y engranajes que hacen posible que se empuje el filamento polimérico para que pueda salir por la boquilla hacia la base de impresión e ir conformando las capas de la pieza tridimensional.

### **Extrusor Bowden** *Bowden extruder*

Tipo de extrusión en la que el motor y la boquilla caliente están unidos entre sí a través de un tubo PTFE por el que transcurre el filamento de manera remota entre ambos.

### **Falda Skirt**

Marco impreso por fuera del perímetro de la pieza a imprimir con la finalidad de calentar el extrusor y asegurar que éste funciona correctamente antes de proceder con la primera capa de impresión del objeto tridimensional.

### **Fichero .OBJ**

Formato de archivo de diseño asistido por ordenador de código libre que define la geometría de objetos tridimensionales. Fue desarrollado por Wavefront Technologies inicialmente, pero se encuentra universalmente aceptado gracias a su uso en gráficos 3D de numerosas empresas de diferentes ámbitos.

### **Fichero .STL**

Formato de archivo de diseño asistido por ordenador que define la geometría de objetos tridimensionales sin incluir información acerca de color, textura o propiedades mecánicas del objeto.

### **Filamento**

Forma de “hilo” (de 1,75mm o 3mm) en la que se presenta el material de impresión de las impresoras que funcionan mediante tecnología FDM.

### **G-Code**

Es el lenguaje estándar de programación que manda la información a la impresora para que esta realice los movimientos necesarios e imprima las piezas.

### **Ghosting**

También llamado Ringing. Líneas o formas que se repiten en las caras de la pieza en forma de eco, producidas por las vibraciones de las inercias.

### **Histéresis *Backlash***

Problema surgido producido cuando al cambiar el motor el sentido del giro (paso a paso), éste gira antes de que la correa se tense, por lo que provoca la pérdida de pasos del motor.

### **Hot end**

Extremo final del extrusor por el que pasa el filamento y se calienta para después salir por la boquilla (nozzle).

### **Nivelación**

Es el proceso de colocación de la plataforma de impresión con respecto a la boquilla de la impresora. Se realiza antes de comenzar la impresión ya sea de manera automática o con intervención manual del usuario.

### **Código abierto *Open-source***

Código abierto o libre. Software que no está sujeto por un copyright, patente, o registro de cualquier tipo sino por una licencia de uso, distribución, modificación y redistribución gratuita y libre.



**Pared** *Wall*

En un objeto tridimensional impreso por cualquier tecnología 3D, se refiere a los perímetros que siguen el contorno de la pieza. Todas las piezas disponen de una pared exterior y una o más paredes interiores,

**Pérdida de pasos (en un motor)**

Problema surgido cuando un motor intenta girar, pero se encuentra con mucha más resistencia y provoca la “interrupción” en el giro haciendo que vuelva al punto de partida.

**Plataforma de impresión** *Build plate*

También llamada base de impresión o cama de impresión. Es la superficie donde se deposita capa a capa el material impreso en 3D (independientemente de la tecnología de impresión usada) que conformará la pieza tridimensional.

**Post procesado**

Es el proceso por el que una pieza impresa en 3D se somete a diferentes tratamientos para su completo acabado. Estos pueden ser entre otros la eliminación de soportes de impresión, pintura, lijado, etc.

**Puente** *Bridging*

Cada parte de una impresión 3D en la que no existe un soporte que se sostenga y se extruye en el aire.

**Balsa** *Raft*

Estructura suplementaria depositada de manera adicional a la pieza en la base de impresión a fin de conseguir una mejor adherencia de la pieza a la base de impresión y evitar fallo de impresión.

**Ramps**

Conjunto de electrónica necesaria para el control de los procesos que se realizan en la impresora 3D.

**Relleno** *Infill*

Material depositado en el interior de una impresión 3D que varía dependiendo del material y características de la pieza deseadas.

**Resolución o altura de capa** *Layer height*

En impresión por extrusión, es la resolución de impresión (en micras) en el eje Z que hace referencia al grueso de la capa. Cuanto más pequeña es la altura de la capa, más tiempo es preciso para imprimirla y mayor será la calidad.

**Robot Paralelo Delta** *Delta Parallel Robot*

Robot de 3 grados de libertad compuesto por dos bases unidas por tres sistemas cinemáticos compuestos por paralelogramos. La base superior es fija, y la inferior realiza el movimiento siendo siempre paralela a la base.

**Soporte** *Support*

Estructura impresa durante la impresión de una pieza por FDM que sirve de soporte a fin de sostener los voladizos y partes salientes de un modelo.

**Termistor**

Sensor de temperatura ubicado en la boquilla que se cerciora de que la temperatura es la adecuada para fundir el filamento sin derretirlo.

**Velocidad de impresión** *Print speed*

Es la velocidad que alcanza la cabeza extrusora al desplazarse a por la plataforma de impresión durante la impresión del objeto. Esta velocidad se mide en milímetros por segundo (mm/s).

**Warping**

Fallo de impresión por contracción del material en la superficie de adhesión de la pieza.

## Abreviaturas, Siglas y Acrónimos

SIGLAS	SIGNIFICADO
<i>3DP</i>	Impresión tridimensional; Three-dimensional Printing
<i>ABS</i>	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
<i>AM</i>	Fabricación aditiva; Additive Manufacturing
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CAD</i>	Diseño asistido por ordenador; Computer-Aided Design
<i>DMSL</i>	Impresión por sinterizado directo de metal por láser; Direct Metal Laser Sintering
<i>FDM</i>	Modelado por Deposición fundida; Fused Deposition Modeling
<i>FFF</i>	Fabricación con Filamento Fundido; Fused Filament Fabrication
<i>GDL</i>	Grados De Libertad;
<i>MIT</i>	Instituto de Tecnología de Massachusetts
<i>NEMA (motor)</i>	National Electrical Manufactures Association; Asociación de Fabricantes Nacionales Eléctricos
<i>PETG</i>	Copoliéster de Polietileno Tereftalato Glicol; Polyethylene Terephthalate Glycol Copolyester
<i>PTFE</i>	Politetrafluoroetileno; Polytetrafluoroethylene
<i>PLA</i>	Ácido poliláctico; Polylactic Acid
<i>RepRap</i>	Prototipador replicante rápido; Replicating Rapid Prototyper
<i>RM</i>	Fabricación Rápida; Rapid Manufacturing
<i>RP</i>	Prototipado Rápido; Rapid Prototyping
<i>SCARA</i>	Robot de Montaje Selectivamente Adaptable; Selective Compliant Assembly Robot
<i>SFF</i>	Fabricación de sólidos de forma libre
<i>SHS</i>	Impresión por sinterizado selectivo por calor; Selective Heat Sintering
<i>SLA / SL / STL</i>	Estereolitografía; Stereo Lithography
<i>SLS</i>	Sinterización Selectiva por Láser; Selective Laser Sintering
<i>SW</i>	SolidWorks®

## 1. Interés y objetivos

### 1.1. Introducción

El avance tecnológico de los últimos años en la impresión 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*) ha permitido la impresión flexible de objetos sin grandes inversiones iniciales ni grandes requerimientos de instalaciones industriales. Esto ha llevado a la accesibilidad de la impresión 3D, visible a través del movimiento *Maker* surgido en 2009 y más notablemente tras la situación vivida estos últimos meses debido al nuevo Covid-19 para la fabricación de equipos de protección (EPI) y piezas clave que, como hemos visto, podían llegar a salvar vidas y paliar el desabastecimiento durante la crisis sanitaria.

Si nos remontamos a los primeros diseños de impresoras 3D domésticas, la impresora 3D FDM Prusa i3 supuso un antes y un después en el mundo de las impresoras 3D domésticas.

Basada en un sistema de robot cartesiano, se considera la impresora “madre” en el que se basan la mayoría de las impresoras 3D domésticas en la actualidad. Sin embargo, existe una limitación en este sistema de movimiento, dado que la base de impresión forma parte de unos de los ejes. Al moverse la base continuamente durante su funcionamiento, crea elevadas inercias, por lo que vemos restringida la velocidad de la máquina.

Además de esto, también se ve condicionado el uso de este tipo de máquinas para impresión de mayor volumen ya que, al ser la base de impresión de mayor tamaño, la máquina necesitará mover gran carga con la base de impresión.

Es bien sabido que existen otras cinemáticas de movimiento para estos tipos de máquinas. Tal es el caso de las impresoras tipo CoreXY, en los que soluciona el problema mencionado de la base de impresión trasladándola a un eje estático durante la impresión de cada capa. El hecho de que esto aumente en gran medida la complejidad de fabricación, el volumen de la máquina y el coste, es probablemente el principal motivo por el que el uso estas impresoras 3D cinemáticas alternativas no está tan extendido.

Si nos fijamos, en la industria existe otro tipo de cinemática de movimiento distinto a los expuestos anteriormente; el robot paralelo delta utilizado en los robots manipuladores de las cadenas de montaje.

La complejidad de fabricación de este último es considerablemente inferior al estar compuesto por menos partes móviles. El cuerpo del robot gestiona los 3 ejes cartesianos de manera independiente a la base de impresión, permaneciendo esta base estática durante todo el tiempo de impresión. De esta forma, se reduce al mínimo el factor limitante de las inercias, manteniéndose estas constantes independientemente del volumen de impresión.

Es más, al ser independiente añade otra característica a la máquina, ya que puede fabricarse de manera modular y adaptarse a distintos lugares de trabajo o incluso instalarse en líneas de producción, haciéndola accesible y asequible tanto para uso doméstico como para uso industrial.

Dada la eficiencia, bajo coste y adaptabilidad de las impresoras 3D basadas en robot paralelo delta, resulta interesante el desarrollo de un estudio experimental y comparativo con las impresoras clásicas basadas en un sistema de robot cartesiano, con la idea de poder solventar las limitaciones de las máquinas actuales.

## 1.2. Motivación personal

*“Elige un trabajo que te guste y no tendrás que trabajar ni un día de tu vida”  
(Confucio)*

Desde que tengo uso de razón, siempre me ha apasionado no solo la idea de poder crear cosas por mí mismo, sino la posibilidad de mejorar diseños de máquinas ya existentes a fin de poder conseguir mejor rendimiento, velocidad, calidad o, simplemente, abaratar costes.

Cuando hace ya más de cinco años, tuve la suerte de comenzar mi andadura en el mundo de la impresión y prototipado 3D, que permite la producción de originales de una forma relativamente accesible, rápida y económica, la idea de construir en un futuro mi propia máquina de impresión 3D con un diseño mejorado surgió prácticamente de manera automática en mi mente.

Unido a este hecho, debo decir que, el estudio a lo largo de la carrera universitaria de programas como AUTOCAD, CATIA y SolidWorks® como herramientas de diseño 3D, aumentaron tanto mis conocimientos como la ferviente inquietud por el aprendizaje del diseño y modelado 3D debido a la aplicación práctica que he podido hacer de estos programas a la hora de mejorar mis propios diseños y máquinas de impresión.

A su vez, considero que la ejecución de mi idea como proyecto académico final de grado, motivará a futuros alumnos a realizar su propio proyecto empírico o incluso pueda servir de base para el desarrollo de nuevos proyectos que amplíen la investigación y/o se animen a realizar mejoras de diseño de este robot paralelo.

Por todo ello, no creo que exista otro modo más gratificante que culminar esta etapa de mi vida personal y profesional, con un proyecto académico que consolide mi trayectoria de los estudios del Grado en Ingeniería Mecánica y aúne mi habilidad creativa para fabricar una máquina por

mí mismo desde cero, con la posibilidad de profundizar en la investigación de la impresión 3D y robot delta.

A propósito de esto y, a pesar de las diversas temáticas y conocimientos de ingeniería que este proyecto implica, he querido centrar el ámbito de mi trabajo en dos áreas: el diseño 3D con SolidWorks® y la fabricación y montaje de la máquina a fin de que pueda comprobarse visiblemente la efectividad del diseño y hacer una comparativa con otras máquinas con distinta cinemática. Posteriormente y al final del documento, propongo una serie de mejoras a fin de que se puedan realizar como proyecto futuro.

### 1.3. Justificación

La rápida proliferación y la creciente popularidad en los últimos años de la impresión 3D doméstica ha propiciado la inserción de la fabricación aditiva en el contexto profesional de pequeños y medianos productores que anteriormente solo podían ejercer la actividad de diseño y/o impresión 3D a modo de hobby y tenían que conformarse con ver reducidos sus márgenes de beneficio al depender de la fabricación industrial, con sus respectivos costes superiores y plazos de entrega. Este reciente y constante cambio está ayudando a cubrir un amplio hueco de mercado claramente visible con el hecho de que pequeñas y medianas empresas ya estén adquiriendo sus propias máquinas de impresión 3D a fin de producir sus propios diseños y fabricaciones. Tal es la acogida de esta tecnología que algunos ya lo tildan de “nueva revolución industrial”<sup>[1]</sup>.

Como se ha comentado previamente, esto es debido a la asequibilidad de estas máquinas, la versatilidad y los ámbitos o sectores de aplicación de la impresión 3D<sup>[2]</sup> (sanidad, fabricación de piezas para maquinaria industrial, estética, etc.)- así como el gran rango de productos que permite obtener junto con los diferentes materiales con los que se puede trabajar (con diferentes y amplios abanicos de resistencias y propiedades).

Todo esto hace que la investigación de mejoras en diseño 3D y el estudio de diferentes aplicaciones de la impresión aditiva sea mucho más atractiva por las múltiples ventajas ya comentadas en el presente documento.

El desarrollo de este proyecto surge como una oportunidad de ser de utilidad a cualquier persona, empresa o institución en la que intervenga cualquier tipo de maquinaria en la que se desee la rápida automatización con menor coste de procesos de fabricación, se precise imprimir piezas sueltas o se quiera incluir un robot “pick and place”, etc. en su línea de producción con bajo coste.

## 1.4. Objetivos

El presente trabajo final de Grado se ha realizado en el marco de la Ingeniería Industrial bajo la dirección y supervisión de los tutores Manuel Ángel Aguilar Torres y Fernando José Aguilar Torres, del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Almería, realizándose el desarrollo experimental de una impresora 3D utilizando un robot paralelo tipo delta como sistema de movimiento. Para ello, se pretende diseñar la máquina mediante SolidWorks®, para posteriormente fabricarla consiguiendo un diseño que permita a esta máquina autorreplicarse, siendo la mayor parte de sus piezas diseñadas e impresas mediante impresión 3D FDM.

Posteriormente a la fabricación de la máquina, se realizará un estudio comparativo entre impresoras 3D basadas en distinta robótica, realizando una serie de pruebas dirigidas a poder conocer su nivel de detalle y precisión dimensional de las impresiones.

Como objetivos secundarios, además de afianzar el uso de la cinemática paralela, se creará un diseño modular de la máquina, que permitirá hacerla independiente de la bancada de trabajo, para que con ello pueda ser instalada en distintos lugares o diferentes puntos de una cadena de producción.

A propósito de esto último, con el fin de aumentar su versatilidad y de dejar abierta una vía de desarrollo de este proyecto, se realizarán diferentes diseños del cabezal: fusor 3D, láser grabador/corte, pinza neumática, servo pinza, puntero de rotulación tipo plotter, convirtiendo así el robot, no sólo en una solución a las limitaciones de los modelos de impresoras expuestos anteriormente, sino en un robot multifuncional con distintas herramientas que aumentarán sus posibilidades en cualquier cadena de producción.

## 2. MARCO TEÓRICO (I): ESTADO ACTUAL DE LA IMPRESIÓN 3D FDM

A pesar de que este proyecto no tiene como objeto el estudio de la historia, evolución, materiales y tecnologías de la impresión 3D, a fin de enmarcar nuestro proyecto, se hace necesario contextualizar el ámbito del presente trabajo.

Así pues, se recoge a continuación un breve recorrido por el marco histórico, teórico y técnico de la impresión 3D y de la cinemática del robot paralelo con el fin de comentar aspectos de la historia relevantes y el estado actual tanto de la fabricación aditiva como de los robots de cinemática paralela a propósito del diseño y la fabricación de nuestra máquina.

### 2.1 Definición y origen.

Pese a que el tema ya es bastante popular gracias a la incipiente “domesticación” de la impresión 3D de los últimos años, comenzaremos definiendo el proceso de impresión 3D como un proceso de fabricación aditiva por el que, un objeto geométrico tridimensional diseñado por ordenador (CAD) se crea en una máquina impresora mediante la superposición de capas de material plástico.

Si nos remontamos al origen de la fabricación aditiva, podremos ver que ésta tiene su origen en la década de los 80 cuando, tras realizarse varios avances sobre el concepto de inyección de tinta, se materializó la posibilidad de realizar impresión con otros materiales. Esto fue posible con un hito remarcable en la historia de la impresión 3D: Gracias a Chuck Hull, presidente y cofundador de la empresa 3D Systems, se patentó la primera máquina de impresión capaz de generar prototipos mediante estereolitografía, es decir, -a grandes rasgos-, hacer posible la conversión de un archivo en formato STL<sup>[3]</sup> (por sus siglas en inglés *STereoLithography*) con la información geométrica de una pieza representada mediante diseño asistido por ordenador en 3D (CAD) en la base de entrada de los datos a una máquina de impresión 3D. Esto supuso la gran revolución de que, a partir de la información digital de un modelado 3D en ordenador, se puede hacer efectiva la creación de material real mediante diferentes métodos (o formas de impresión).

Hasta entonces y como es bien sabido, las principales técnicas para poder fabricar objetos eran básicamente tres: sustracción de materia hasta formar una pieza (esculpir, perforar, tallar, fresar, etc.), combinación de materiales mediante tejido o deformación de los materiales hasta conseguir la forma de la pieza deseada.



De manera totalmente contraria, la impresión aditiva o impresión 3D, crea una pieza por deposición de capas sucesivas a partir de un modelo 3D virtual. Es por esto que se habla de fabricación “aditiva”, pues se efectúa añadiendo materia que se solidifica capa por capa y va conformando el objeto final.

## 2.2 Prototipado Rápido vs Fabricación Aditiva.

Antes de continuar con el contexto teórico de la impresión 3D, se hace preciso hacer un inciso aclaratorio sobre terminología.

Comúnmente se ha extendido el uso de “Prototipado rápido” como sinónimo de fabricación aditiva. Siendo fieles a su significado, este término se utiliza de manera errónea ya que, como se ha descrito anteriormente, la fabricación aditiva es un tipo de proceso de fabricación, mientras que el prototipado rápido, parafraseando a Ian Gibson <sup>[4]</sup>, es el proceso de creación de un producto (o pieza) de manera rápida antes de su comercialización con el fin de comprobar su usabilidad, realizar mejoras, etc.

Cabe mencionarse que el término prototipado rápido no solo se usa en impresión 3D, sino que se usa extensamente en el ámbito de la fabricación (independientemente del tipo de fabricación utilizado).

Este término ha ganado reciente popularidad dentro del mundo de la fabricación aditiva y de la impresión 3D ya que, gracias a los últimos avances y múltiples ventajas de ésta última, hoy en día, han mejorado tanto las técnicas de prototipado rápido, que los productos resultantes del prototipado muchas veces están muy cerca de un producto final que, de un prototipo debido a la alta calidad, precisión y bajo coste de producción de los objetos fabricados.

El uso más o menos correcto del término como si se tratara de un sinónimo de fabricación aditiva, se debe a que estas piezas resultantes del “prototipado”, dadas las ventajas comentadas, muchas veces constituyen el objeto final en lugar de ser solamente un prototipo.

Dicho esto, y como dato curioso, comentar que la discusión sobre el término ha sido bastante extensa a lo largo de los años y evolución en la impresión aditiva. Tan extensa que la *American Society for Testing and Materials*<sup>[5]</sup>, tuvo que decidir sobre la aceptación de la terminología. Finalmente se tomó como término estándar el de “fabricación aditiva”, que puede utilizarse como sinónimo puesto que la fabricación aditiva supone un proceso en el que un modelo generado en 3D CAD puede ser fabricado de forma óptima sin necesidad de planificación ni realización de prototipos previos depositando material capa por capa y sin la creación de residuos.

### 2.3 Historia y evolución.

Si comparamos los años que han pasado desde lo que se puede determinar como el origen de la impresión aditiva o de la impresión 3D hasta la actualidad, veremos que la revolución, más que en la tecnología de impresión, ha sido en la evolución de los materiales aplicables (Figura 1).

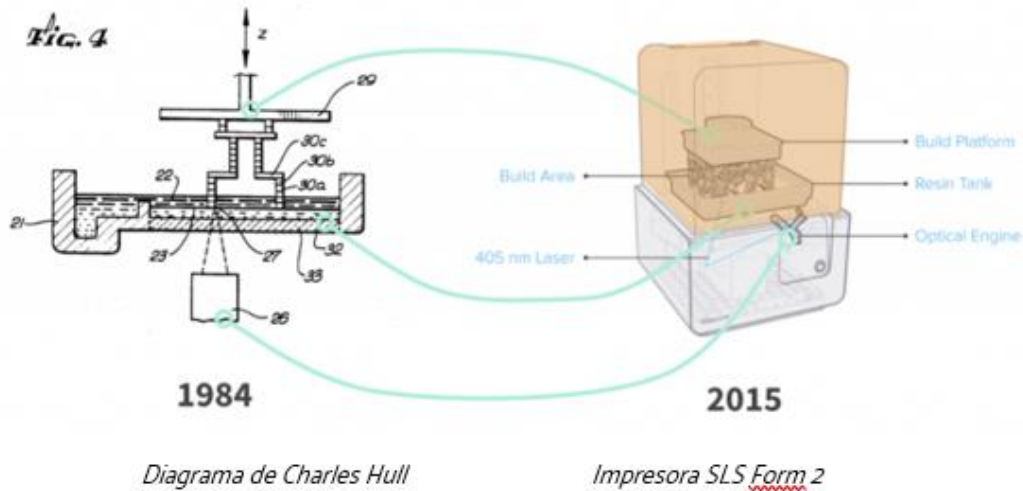


Figura 1: Diagrama de la impresora de Charles Hull vs. Impresora por Estereolitografía de 2015.

Fuente: [www.bitfab.io/es](http://www.bitfab.io/es)

Aunque la “Impresión 3D” como tal no comenzó a usarse hasta el siglo XXI, existen varios hitos que marcaron el origen y la evolución de esta tecnología revolucionaria. A continuación, y a modo de resumen explicativo, se exponen los hitos más llamativos que marcaron un antes y después en la evolución de la fabricación aditiva:

- ✓ 1859: El escultor François Willème inventa la primera tecnología de escaneado 3D mediante el uso de 24 cámaras para fotografiar simultáneamente a un mismo sujeto desde diferentes ángulos (Figura 2).

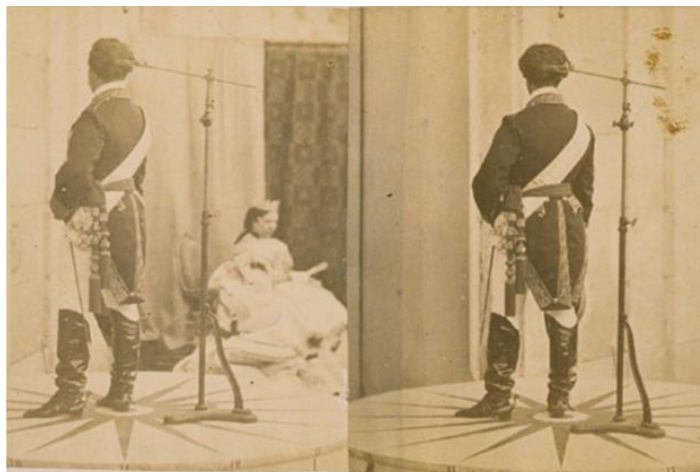


Figura 2: Experimento fotográfico del artista François Willème.

Fuente: [www.digitaltrends.es](http://www.digitaltrends.es)

- ✓ 1892 Joseph E. Blanter hace un acercamiento a la obtención de objetos en 3D de forma similar en el concepto de las impresoras actuales al realizar un método de creación de mapas topográficos en 3D utilizando un método de estratificación.
- ✓ 1981: Se crea un dispositivo (sin patentar) que endurecía polímeros fotosensibles mediante luz ultravioleta (Dr. Hideo Kodama) Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya (Japón).
- ✓ 1984: La recién creada 3D Systems desarrolla y presenta una patente del formato *Standard Triangle Language* (STL) que hace posible convertir diseños asistidos por ordenador (CAD) en 3D para su uso en estereolitografía.

Este formato, junto con los formatos Slice o SEC, pasó a ser la base de entrada de datos para la impresión 3D que permite convertir la información (bits) en materia real, permitiendo un prototipado rápido de costes muy reducidos y velocidades muy altas.

- ✓ 1986: Se aprueba la patente (Figura 3) de Chuck Hull, cofundador de 3D Systems Corporation, para el aparato de estereolitografía (SLA) y así denomina tanto al formato como al método tecnológico de Estereolitografía. Hoy en día, sigue siendo una de las técnicas más comunes.

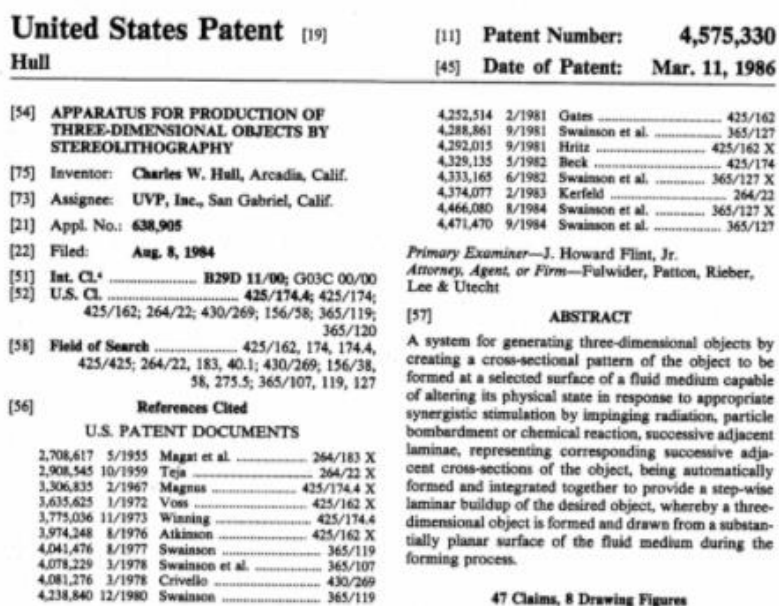


Figura 3: Imagen de la primera patente de impresión 3D por Charles Hull.

Fuente: [www.bitfab.io](http://www.bitfab.io)

El formato, básicamente, hace posible crear un objeto tridimensional mediante una simple imagen. Esto se hace mediante la triangulación o división de una superficie u objeto en una o más formas geométricas de forma que no quede ningún hueco entre ellas al igual que la técnica de un mosaico. Estos triángulos se describen pues en un sistema de coordenadas X-Y-Z mediante un software de diseño por ordenador especializado que almacena la posición de cada uno de los puntos de los triángulos.

Cuanto mayor es el número de triángulos, mayor definición tendrá la pieza.



*División en triángulos de un cubo*



*División de un modelo complejo*

*Figura 4: Ilustración del proceso de codificación de la información en formas geométricas.*

*Fuente: [www.3dfils.com/es](http://www.3dfils.com/es)*

- ✓ 1987: Carl Deckard desarrolla otra técnica alternativa de impresión: La sinterización selectiva por láser o SLS que, a diferencia de la técnica de Hull que usaba resina líquida, utiliza un haz de luz láser para unir y solidificar el polvo.  
No obstante, no será hasta el año 2006 cuando aparecen las primeras máquinas de impresión 3D SLS comerciales.
  
- ✓ 1989; S. Scott Crump (cofundador de Stratasys Inc.) y Lisa Crump, desarrollan y presentan la patente de otro tipo de tecnología: El modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés *Fused Deposition Modeling*).  
Esta técnica, -que es la que ocupa nuestro proyecto y se detallará en los siguientes apartados-, se basa en la fundición de filamentos de polímero para ser depositados, capa por capa, en una base de impresión creando un sólido tridimensional.  
Finalmente, la patente fue entregada a Stratasys Inc. en 1992.

En la misma época surgen otras tecnologías y técnicas de impresión como las: *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM), *Solid Ground Curing* (SGC) y *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Estas técnicas, aunque innovadoras, no han tenido quizás tanta aceptación como la estereolitografía y el modelado por deposición fundida.

- ✓ 1992: Aparecen en el mercado las primeras impresoras estereolitográficas de 3D System.
- ✓ 2009: Caduca la patente de Stratasys Inc. y, con ello, numerosas empresas entran en el mercado de impresión 3D, haciendo la impresión 3D y las máquinas más asequibles y accesibles al público en general.

A partir de aquí, -y como es comprensible-, la impresión 3D revolucionó prácticamente todas las industrias, llegando, por ejemplo, a trasplantarse de manera satisfactoria órganos impresos ya mediante el *bioprinting*. Ya estaba en marcha el camino hacia la llamada “Cuarta Revolución Industrial<sup>[6]</sup>” llegando a experimentar con la impresión 3D no sólo en ámbitos como la medicina regenerativa sino en la aeronáutica, el automovilismo e incluso en la gastronomía<sup>[7]</sup> o la construcción hasta llegar a hablar de la impresión 4D.

## 2.4 Movimiento RepRap, Movimiento Maker y DIY.

A pesar de que aún son muchos los detractores de esto, desde la invención de la escritura y a lo largo de toda la historia de la humanidad, ha quedado más que demostrado que la evolución del conocimiento y las ideas avanzan de forma más rápida cuando el conocimiento es compartido de manera libre en el conjunto de la sociedad. La impresión 3D, es una de las últimas muestras de esto, pues no fue hasta la liberación de las patentes y del inicio del movimiento RepRap, hasta que no se ha empezado a desarrollar y conocer exponencialmente la impresión 3D.

El origen de este movimiento que revolucionó el mundo de la impresión 3D tuvo lugar en el año 2004, cuando un profesor inglés de ingeniería mecánica de la Universidad de Bath (UK), Adrian Bowyer, inició el proyecto RepRap (acrónimo en inglés que alude a “*Replicated Rapid Prototype*”). Su objetivo no era otro que el de crear una impresora “autorreplicante”, i.e., capaz de replicarse a sí misma, imprimiendo sus propios componentes.<sup>[8]</sup>

Para esto, se utilizó la técnica FDM por ser la más económica y accesible para el público en general. Sin embargo, en el contexto de este movimiento, debido al estado de la patente FDM por Stratsys Inc, se estableció un término equivalente al FDM que se pudiera utilizar legalmente sin limitaciones legales. Surgió entonces el término *Fused Filament Fabrication* (FFF).<sup>[9]</sup>

Gracias a esta democratización de la impresión 3D y utilizando un software abierto al público<sup>[10]</sup> se diseñaron varias impresoras 3D RepRap, que se nombraron con los nombres de famosos biólogos de la evolución como Darwin o Mendel, por tratarse de un proyecto basado en la replicación y la evolución.<sup>[11]</sup>

A raíz de este movimiento, de la idea del código abierto y del abaratamiento del coste de las impresoras, a partir de la segunda década del siglo XXI, Makerbot, de la mano de Zach Smith, crea el código abierto para kits de impresión al estilo DIY (incluyendo las instrucciones, piezas, electrónica e incluso las herramientas necesarias para su montaje) para que el público en general pueda fabricar sus propias impresoras. Además, crean la plataforma gratuita *Thingiverse*<sup>[12]</sup> generando la biblioteca online más grande hasta entonces creada que permite a los usuarios enviar y descargar archivos imprimibles en 3D.

Una de las impresoras de código libre más conocida sería la Prusa y sus diferentes variantes, considerándose la Prusa i3, como se comentaba en la introducción del presente documento, la madre de las impresoras domésticas.

## 2.5 Ventajas de la impresión 3D.

Como decíamos anteriormente, en los últimos años, y en los últimos meses debido a la situación excepcional de la pandemia que se está viviendo a nivel mundial, ha habido un auge en la creación y venta de impresoras 3D debido al desarrollo de tecnologías *Open-Source* y a numerosas ventajas entre las que cabe destacar las siguientes:

- ✓ La impresión 3D, al significar un proceso de fabricación aditiva, a pesar de utilizar muy comúnmente materiales plásticos para la creación de las piezas, tiene menos impacto medioambiental y es más sostenible que otras formas de fabricación industrial (como sería el caso del modelado o fabricación por inyección).

Esto es debido, a grandes rasgos, a la reducción de residuos (por la posibilidad de trabajar sin moldes y al hecho de que se imprime solo el material necesario para la pieza); a la reducción en contaminación (y costes) de transporte, pues permite la fabricación in situ y sin necesidad de repeticiones (gracias al prototipado rápido) con gran variedad de materiales y complejidad en las formas de las piezas; y reduciendo la sobreproducción al

no tener que generar demasiado stock y poderse imprimir según demanda gracias a los bajos costes y tiempos de producción.

- ✓ La impresión 3D, dada la multitud de materiales de impresión disponibles y, sobre todo, a la complejidad de las formas de fabricación que admite (muchas de ellas imposibles para los tipos de fabricación convencionales), permite una personalización muy concisa y fácil de las piezas y del resultado final, pasando la figura del consumidor a un plano de prosumidor al ser participe éste último en el proceso de fabricación y significando un mayor nivel de satisfacción del proceso de compra.
- ✓ Se reducen significativamente los costes de fabricación, producción y comercialización gracias a los siguientes aspectos:
  1. Se hacen accesibles para cualquier usuario las técnicas de prototipado rápido (que antes sólo eran asequibles para grandes industrias) evitando la necesidad de repetir piezas por error, pruebas inconcluyentes, comprobación de viabilidad, etc.
  2. Lo que viaja es la información (archivos de información con el modelado 3D) y no la materia, por lo que, mediante el uso de la impresión 3D se puede diseñar globalmente para producir localmente (reduciendo costes de transporte del material de fabricación).
  3. El tiempo de comercialización es mucho menor, al poder ser la empresa la misma que fabrica, realiza las pruebas necesarias, optimiza, vuelve a fabricar y comercializa.
  4. La energía utilizada para la impresión 3D, aunque aún requiere de largas horas de impresión dependiendo de las piezas, suele ser mucho menor en comparación con la maquinaria industrial convencional, reduciendo considerablemente los costes de producción.

En esta misma línea, los materiales de impresión son significativamente más baratos (unido al hecho de que no necesitan ser transportados para iniciar la fabricación, ya que se almacena en bobinas (como es el caso de los materiales plásticos para impresión por deposición fundida) o botes (en el caso de las resinas y polvos). Con todo ello y en relación a la ventaja anterior, se minimiza entonces el riesgo y coste de introducir nuevos productos en el mercado dado que se requiere menos inversión inicial dando la opción a pequeñas y medianas empresas a entrar

en el mercado de nuevos productos, testarlos y, en base a los resultados, aumentar su línea de producción de aquellos productos que sí tengan gran aceptación.

5. La mano de obra utilizada para el manejo de la maquinaria de impresión 3D se reduce significativamente a la par que los costes en recursos humanos y los posibles accidentes laborales.

Dentro de esto, también cabe destacar que tanto el uso como el mantenimiento de las impresoras 3D actualmente patentadas no requieren de una formación demasiado específica que requieran nueva contratación de personal o especializaciones tras años e inversión económica de estudio.

Esto es debido a que las máquinas de impresión 3D para la industria se venden ya montadas y requieren un par de días de formación específica a la que puede atender cualquier operario.

En esta misma línea, es preciso también incidir en otra ventaja que supone la versatilidad de la impresión 3D, y es que permite el uso de ésta para industrias no especializadas en este ámbito. Así, por ejemplo, una gran empresa de la industria de la moda, puede incorporar a su mercado piezas elaboradas mediante impresión 3D sin necesitar de un cuerpo de ingenieros especializados en diseño asistido por ordenador e impresión 3D dado que pueden, en su lugar, encargar los proyectos de diseño a personal cualificado, y luego simplemente fabricar sus diseños en su misma línea de producción con la sola inversión de la maquinaria y material de impresión 3D.

Por otro lado, en caso de no tener la capacidad o la formación para el diseño en 3D, existe la posibilidad del escaneado 3D y también numerosas fuentes de información libre donde descargar prototipos para la impresión (como es el caso de las plataformas *Thingiverse*, *MyMiniFactory* y *Cults3D*, que contienen archivos listos para impresión (tanto de pago como gratuitos) con los que, salvo que se requiera una pieza con un diseño muy personalizado o específico, es totalmente válida para la fabricación y comercialización de muchas piezas.



## 2.6 Impresión 3D industrial vs. Impresión 3D doméstica.

Gracias a todo lo expuesto en el apartado anterior, hoy en día (y cada vez con mayor frecuencia) pueden encontrarse en el mercado, gran variedad de impresoras 3D que, normalmente, se clasifican atendiendo a diferentes características (según las técnicas de impresión utilizadas, según el material con el que se materializa la impresión, etc.). Como ya hemos comentado, nuestra impresora utilizará extrusión de termoplásticos y, atendiendo a su uso, dado el ámbito del presente proyecto, será una impresora de uso particular o doméstico.

Cabe mencionarse pues, una última clasificación de las impresoras por los usuarios de las mismas en impresoras de uso doméstico y de uso profesional (donde se incluyen las impresoras de uso profesional de escritorio adecuadas a líneas de producción más pequeñas). Las principales ventajas o características de ambos tipos de impresoras son:

- ✓ Impresoras profesionales: Tanto las de escritorio como las industriales tienen un mayor tamaño y coste si las comparamos con las de uso doméstico. Esto es debido a su alta calidad de impresión y precisión, a la mayor área de impresión disponible, elevada robustez y a la fiabilidad si se comparan con las domésticas. También cabe destacar que cuentan con mejor hardware y mejores especificaciones técnicas de velocidad o resolución de las piezas (espesor en micras de las capas de material depositado) para conseguir una mayor calidad y acabado en las piezas. Consecuentemente, el gasto o inversión inicial, el mantenimiento y los componentes (software personalizado normalmente, y especificaciones concretas), también es mucho mayor.

Mientras que una impresora profesional de escritorio suele tener una capacidad de impresión mayor a las domésticas y rondan precios de entre 2.500€ y 8.000€, una impresora profesional industrial (cuyo coste oscila entre los 40.000€ y 150.000€) puede llegar a imprimir tamaños reales a gran escala como es el caso de la Cincinnati Printer, que llegó a imprimir en 2015, un coche a tamaño real en tan solo 24 horas <sup>[13]</sup> (lo que supone una velocidad unas cien veces mayor que una impresora común).

Algunas de las impresoras industriales conocidas son Glacier Summit, Freeform PRO 75, Summit SLS 3D o uPrint SE Plus. Además del precio y los volúmenes de impresión, cabe mencionarse que en este caso sería difícil encontrar una impresora industrial con código abierto, dado que este se limita al ámbito de la impresión 3D doméstica.

Por otro lado, y en la misma línea, el abanico de impresoras industriales es muy amplio dado que en líneas de fabricación y empresas que sustituyen sus sistemas de fabricación convencionales por la fabricación aditiva o implementan la impresión 3D como complemento a su actual sistema de fabricación, pueden verse impresoras muy específicas con especificaciones y software personalizado.

Las impresoras profesionales, inicialmente, se adquirirían con el cometido del diseño, prueba e investigación de prototipos rápidos que se asemejaran al acabado del producto final. Sin embargo, -y como comentábamos anteriormente-, la evolución y avance en velocidad y calidad de impresión, y la reducción de costes de adquisición de máquinas de impresión 3D añadido a los bajos costes de fabricación, estas impresoras han logrado fabricar productos finales de mayor volumen y con mejores calidades y acabados que los tipos de fabricación tradicionales. De ahí que cada vez sean más comunes las impresoras de uso profesional de escritorio en el mercado de la impresión 3D, ya que supone una alternativa “intermedia” para muchas empresas y profesionales.

Inicialmente, estaban destinadas a la investigación y al diseño de prototipos rápidos con acabados físico-mecánicos similares al productor final. Sin embargo, gracias al progreso de esta tecnología en el mundo automovilístico, del mecanizado, de la medicina, de la alimentación..., se ha logrado fabricar productos finales de mayor volumen, con menor restricción de materiales y con acabados de alto detalle. Además, el hecho de contar con un software personalizado en la mayoría de ocasiones, el proceso de fabricación supone un ahorro de tiempo y dinero, con menor índice de errores que los procesos convencionales.

- ✓ Impresoras de uso doméstico o sobremesa: Con un volumen de impresión medio de 220x220x240 mm, cada vez son más comunes debido a los bajos costes de adquisición de máquinas y materiales, además del acceso libre a miles de documentos de conocimiento y diseño disponibles derivado del *Open Source*. El origen de este tipo de impresoras ha sido posible gracias al movimiento RepRap y Maker que hemos comentado anteriormente y a las impresoras con kit autoinstalable como la Prusa i3 y la Mendel Max<sup>[11]</sup>. En España, el movimiento RepRap ha tenido gran auge gracias a RepRapBCN y su impresora BCN3D<sup>[14]</sup>.

Sin embargo, dentro de esta clasificación existen impresoras domésticas autorreplicantes (inspiradas en el movimiento RepRap que tienen menor coste, pero implican mayor conocimiento por parte del usuario al respecto de montaje, funcionamiento, calibración, etc.); y las impresoras de escritorio comercializadas, que

aunque siguen teniendo menor coste que las profesionales, tienen mejores calidades, en su mayoría no requieren montaje y su manejo y mantenimiento no es tan complicado.

Las dimensiones, características y precios de las impresoras domésticas son muy variadas. A continuación, se expone una tabla comparativa (Tabla 1) con las impresoras de sobremesa más comunes en el mercado.

Al respecto de esta tabla, comentar que el abanico de impresoras domésticas abarca sobre todo la impresión por extrusión FDM o la tecnología Sinterización Selectiva por Láser (SLS). Dado que nuestra máquina utilizará tecnología FDM, se recogen solamente una selección de este tipo de impresoras.

Como se aprecia, dentro de la tecnología FDM, el rango de opciones sigue siendo muy amplio por lo que es de especial interés valorar todas las opciones disponibles antes de realizar la adquisición de una impresora puesto que su compra deberá depender del uso que le queramos dar. Así, como aspectos más destacables deberemos valorar el filamento que admiten (si queremos imprimir ABS, necesitaremos una cama calefactada, una cabina, tendrá mayor dificultad que el PLA, etc.); el peso y el volumen de la máquina para que se adecúe al espacio disponible y permita su fácil manejo o traslado en caso de ser necesario; y sobre todo, el código abierto de la máquina. En efecto, si no somos usuarios expertos, las máquinas autorreplicantes o las de código abierto, tienen una interfaz más complicada y la calibración de la máquina, el ajuste de la velocidad de impresión y la temperatura acorde al material de impresión puede suponer un gran reto si no somos usuarios experimentados en el tema.





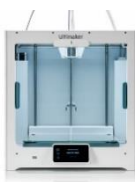
<b>MODELO</b>	<b>ENDER3</b>	<b>PREDATOR</b>	<b>PRUSA MK3s</b>	<b>SIGMA R19</b>	<b>Ultimaker S5</b>
<i>Compañía</i>	<i>Creality</i>	<i>Anycubic</i>	<i>Prusa Research</i>	<i>BCN3D Technologies</i>	<i>Ultimaker</i>
<b>Técnica de impresión</b>	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM
<b>Dimensión impresión</b>	220x220x250 mm	Ø370x455 mm	250x210x210 mm	210x297x210 mm	330x240x300 mm
<b>Dimensiones</b>	440x410x465 mm	1020x580x520 mm	550x400x500 mm	460x446x450 mm	495x585x780 mm
<b>Peso</b>	8,6 kg	19,2 kg	7 kg	21 kg	20,6 kg
<b>Extrusor</b>	Bowden	Bowden	Directo	Bowden	Bowden
<b>Impresión multimaterial</b>	NO	NO	SI*	SI	SI
<b>Min. Altura de capa</b>	100 µm	50 µm	50 µm	25 µm	20 µm
<b>Num. Cabezales</b>	1	1	1	2 IDEX	2
<b>Arquitectura</b>	Cartesiana	Delta Kossel	Cartesiana	Core XY	Cartesiana, ejes cruzados
<b>Diam. filamento</b>	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm	2,85 mm	2,85 mm
<b>Base calefactada</b>	Si	Si	Si	Si	Si
<b>Código abierto</b>	SI	NO	SI	NO	NO
<b>Precio</b>	249 €	519 \$	769 € kit	2.995 €	6.650 €
					

Tabla 1: Tabla comparativa entre diferentes impresoras de uso doméstico.

Fuente: elaboración propia

La creación mediante este proyecto de fabricación y diseño de RoPar3D, dada la limitación de tiempo y capacidad para producirla por el momento en un formato profesional, está enfocada a la creación de una impresora de uso doméstico modular a fin de que sea fácil de manejar y permita su traslado. De esta forma, también será más fácil y económica cualquier futura mejora que se le quiera realizar al diseño como, por ejemplo, algunas de las expuestas al final de la presente memoria.

## 2.7 Tecnologías de impresión 3D.

Aunque todas se basan en la fabricación aditiva, existen diversas tecnologías que posibilitan la creación de objetos tridimensionales a partir de un modelo diseñado por ordenador.

Si bien es cierto que las más comunes hoy en día son la estereolitografía y la tecnología de extrusión, existen diversas líneas de investigación al respecto de estas tecnologías y el ámbito de aplicación de cada una. Como se ha mencionado antes, la evolución de la impresión 3D en los últimos años se ha centrado principalmente en la búsqueda y creación de nuevos materiales compatibles con la impresión 3D más que en la búsqueda de nuevas tecnologías de fabricación aditiva. Así, por ejemplo, existen varias líneas de investigación acerca de la impresión 3D con cemento aplicada a la arquitectura, con comida aplicada a la gastronomía y a la alta cocina o incluso a la impresión con sangre o tejido para la bioimpresión en el ámbito de la medicina regenerativa.<sup>[15]</sup>

No obstante, la mayoría de estos proyectos en marcha, aún no ha llegado a comercializarse o a materializarse de forma que llegue al público. Quizás esto sea debido a la dificultad actual de una aplicación normativa que haga de “tabla rasa” para la estandarización y control de calidad de cualquier pieza fabricada mediante estos tipos de tecnología.<sup>[16]</sup>

Así pues, se recoge a continuación, en la tabla 2, una recopilación de los diferentes métodos de impresión que pueden utilizar las impresoras 3D basada en la normativa ISO/ASTM 52900, publicada en 2015, que tiene como objetivo estandarizar toda la terminología y clasificar los diferentes tipos de impresoras 3D con respecto de la tecnología de impresión utilizada.<sup>[17]</sup>

En el contexto de nuestro proyecto y de la impresión 3D de uso doméstico, nos centraremos en la fabricación por extrusión con la tecnología de Modelado por deposición fundida. Sin embargo, antes de centrarnos en ese proceso, comentaremos las tecnologías más usadas actualmente en el mundo de la impresión 3D y que disponen de más comercialización ya sea para uso doméstico o profesional.

PROCESO	TECNOLOGÍA USADA		MATERIA PRIMA	MATERIALES_COMPATIBLES
<b>EXTRUSIÓN</b>	Modelado por deposición fundida	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Filamento</li> <li>✓ Pellets</li> <li>✓ Varilla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Termoplásticos</li> <li>✓ Aleaciones eutécticas de metales</li> <li>✓ Alimentos</li> <li>✓ Cemento</li> </ul>
<b>GRANULADO</b> <i>(Fusión de lecho en polvo)</i>	Sinterizado selectiva por láser	SLS		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Termoplásticos</li> <li>✓ Materiales en polvo</li> <li>✓ Polvos cerámicos</li> </ul>
	Sinterizado láser directo de metal	LMD		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aleaciones de metal</li> </ul>
	Sinterizado selectivo por calor	SHL		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Termoplásticos en polvo</li> </ul>
	Fusión selectiva por láser	SLM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Polvo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Metales</li> </ul>
	Fusión por haz de electrones	EBM		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aleaciones de titanio</li> </ul>
	Proyección aglutinante	DSPC		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Yesos</li> </ul>
<b>HILADO</b>	Fabricación por haz de electrones	EBF3		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aleaciones de metal</li> </ul>
<b>LAMINADO</b>	Laminado de capas	LOM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Láminas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Papel</li> <li>✓ Película de plástico</li> <li>✓ Hoja de metal</li> </ul>
<b>FOTOPOLIMERIZADO</b>	Estereolitografía	SLA		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Polímeros fotosensibles</li> </ul>
	Fotopolimerización por luz ultravioleta	SGC	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Líquido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Polímeros fotosensibles</li> </ul>
	Procesamiento digital de luz	DLP		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Resina líquida</li> </ul>

*Tabla 2: Procesos y tecnologías utilizadas en fabricación aditiva.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Dentro del proceso de fusión de lecho en polvo, encontramos una de las tecnologías más comúnmente usadas hoy en día: **Sinterización selectiva por láser** (por sus siglas en inglés SLS Selective Laser Sintering): esta tecnología fue inventada, como veíamos anteriormente, poco después de la estereolitografía. Consiste en la creación de objetos tridimensionales mediante fusión de partículas en polvo o compuestos metálicos por medio del haz de luz de un láser CO<sub>2</sub>.

Para ello, antes de la impresión, el depósito del polvo y el área de impresión se calientan a una temperatura inferior a la de fusión del material en polvo. Tras esto, el calor del láser traza la geometría necesaria para la impresión, y con ello va fusionando selectivamente los materiales poliméricos sobre una plataforma que se sitúa dentro de la tina de polvo sobre la que se van fusionando y conformando las diferentes capas, (Figura 5).

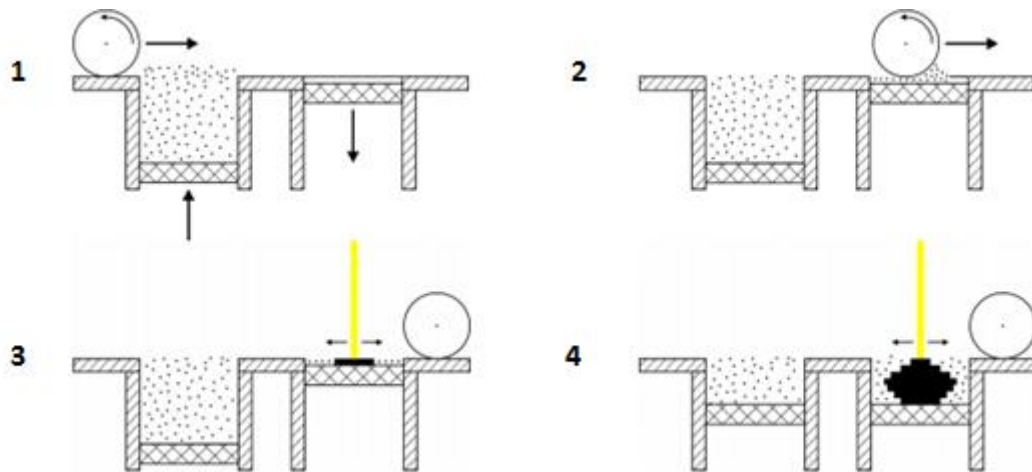


Figura 5: Proceso del sinterizado selectivo por láser.

Fuente: www.3Dnatives.com

Los materiales con los que se puede trabajar mediante esta tecnología son muy variados siendo los más comunes el nylon y compuestos de metales.

En el caso del uso de metales, se utiliza la tecnología de la **Sinterización Directa de Metal por Láser (DMLS o LMD)** <sup>[18]</sup>, otro tipo de granulado indicado para metales ya que permite obtener una densidad mayor de las piezas si se compara con el método utilizado en SLS. Con la tecnología DMLS, también se obtiene mejor resolución ya que las capas de la pieza son considerablemente más delgadas dado que las partículas del polvo tienen menor diámetro. La tecnología DMLS solo funciona con aleaciones de níquel, Ti64, etc. mientras que SLM puede usarse en metales de un solo componente como sería el aluminio.

Aunque es menos frecuente si lo comparamos con la tecnología anterior, ha cobrado considerable importancia el sistema de fabricación de objetos mediante **Laminado de capas**, (LOM por sus siglas en inglés correspondientes a Laminated Object Manufacturing). Este, se utiliza mucho en arquitectura y diseño ya que el producto resultante resulta muy atractivo debido a la capacidad de color completo.

El proceso es bastante sencillo: se utilizan láminas apiladas que se unen y van cortando para ir conformando la estructura 3D. Esto se realiza gracias a que la parte inferior de cada lámina de

papel, tiene un adhesivo que, al ser presionado con un rodillo, se pega a la lámina anterior mediante la aplicación de calor (Figura 6).

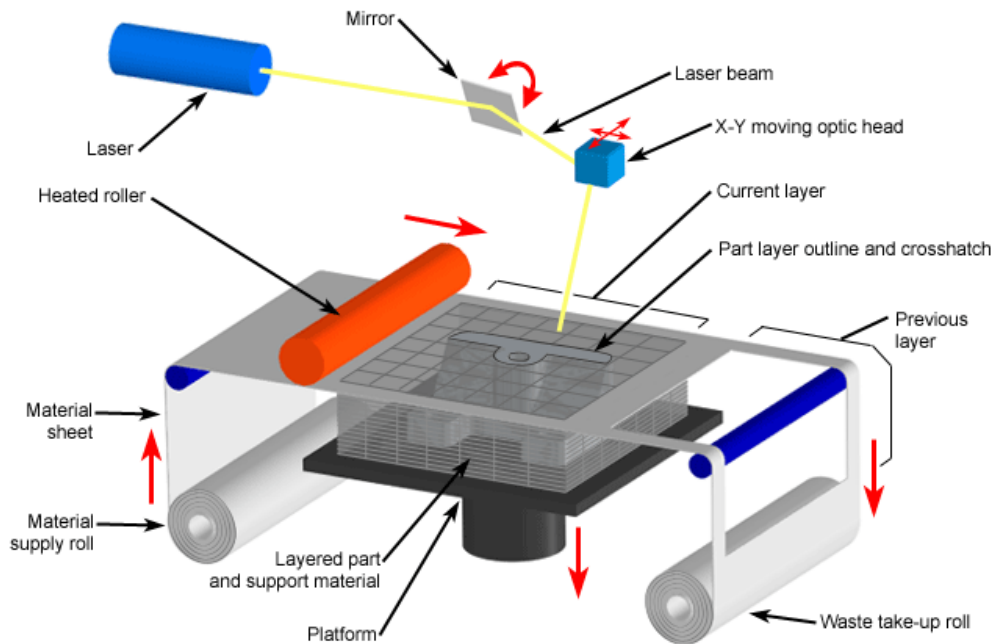


Figura 6: Proceso de fabricación por laminado (LOM).

Fuente: [www.custompartnet.com](http://www.custompartnet.com)

La **Estereolitografía (SLA)**, que, como se comentaba dentro del contenido sobre la historia y evolución de la impresión 3D, fue desarrollada por 3D Systems Corporation, fue la primera tecnología de impresión 3D comercializada y hoy en día, junto con la tecnología FDM, sigue siendo una de las tecnologías más populares tanto en el ámbito industrial como en el doméstico.

Consiste en la utilización de un haz de luz láser ultravioleta para solidificar resinas líquidas hechas de un material fotorpolímero (es decir, sensibles a la luz del láser), que solidifican al reaccionar frente a la proyección del láser UV, dando lugar a la fotorpolimerización (solidificación del material) y, con ello, a la creación de la cada sección o capa.

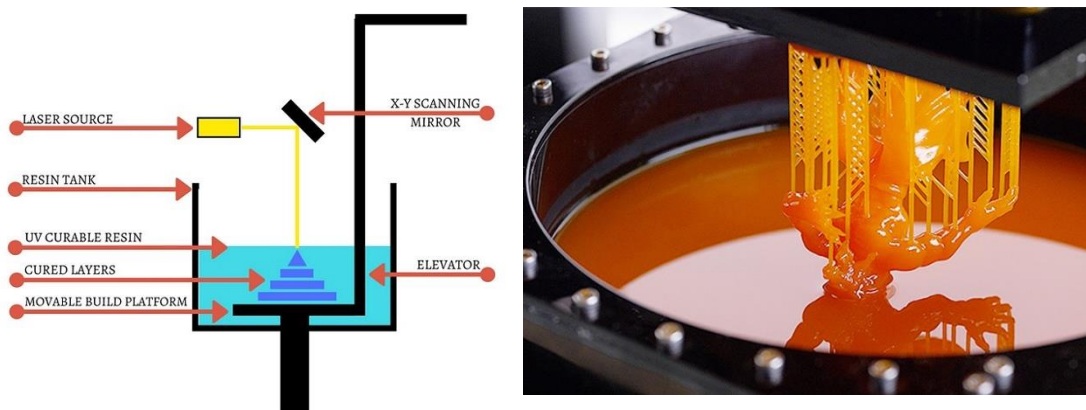
La resina se encuentra almacenada en un depósito dentro de la plataforma móvil, que hace las veces de base de impresión, situada a una altura igual al grosor de la primera capa, sobre la que solidificará el polímero fotosensible. El láser, se mueve en los ejes X-Y conforme a los datos introducidos para la realización de la pieza 3D. Conforme a esta información del modelado 3D, el láser va chocando con la superficie de la resina líquida que se desea endurecer. La zona que recibe el rayo UV se solidifica, mientras que la zona que no lo recibe, seguirá permaneciendo líquida.



Una vez finaliza la capa, el elevador de la plataforma se mueve en el eje Z (conforme al grosor que se precise) para comenzar la capa siguiente.

Si bien la tecnología utilizada en la estereolitografía obtiene una de las mejores precisiones en la pieza, la principal desventaja radica en que el proceso descrito anteriormente sobre su funcionamiento, hace necesario la incorporación de estructuras de soporte para los voladizos o recortes en la pieza, por lo que, estos, deben ser eliminados posteriormente, tras la finalización de la impresión, de manera manual.

A continuación, se exponen dos imágenes (Figura 7) a fin de ilustrar la explicación del funcionamiento de esta técnica de impresión:



*Figura 7: Proceso de impresión por SLA.*

*Fuente: [www.3dlink.me](http://www.3dlink.me)*

Esta técnica sigue siendo muy popular entre las impresoras actuales debido a que la tecnología de impresión utilizada permite obtener prototipos y piezas con mucha precisión.

Cuando el medio utilizado para solidificar la resina es una pantalla digital UV nos encontramos antes la tecnología DLP (Digital Light Processing). El procedimiento se está imponiendo en las impresoras de resina domésticas.

Una desventaja de esta tecnología es el post procesamiento posterior de la pieza, ya que requiere un lavado con alcohol isopropílico y un posterior curado con luz UV para su endurecimiento completo.

### Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Dada la facilidad de adquisición y el bajo coste de los materiales disponibles dentro de esta tecnología, la máquina que ocupa nuestro proyecto utiliza la fabricación aditiva por medio de extrusión de material, en concreto, utiliza la tecnología de modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés (Fused Deposition Modeling), en el que la fabricación de piezas a través de impresión se lleva a cabo superponiendo diferentes capas de diversos metales o plásticos fundidos entre sí.

Este filamento es extruido gracias a un extrusor que consigue la fusión del filamento gracias a poder elevar la temperatura a más de 200°C dependiendo del material de impresión elegido. Al calentar el filamento (sin llegar a derretirse) éste consigue pasar a tener consistencia semisólida para reducir su diámetro y así, ser extruido y superpuesto (capa a capa y de abajo a arriba) en la base de impresión. Una vez que la capa está concluida, la estructura se mueve hacia arriba o hacia abajo para la adición de la siguiente capa. El material extruido, se va solidificando y, capa tras capa, conforma el objeto sólido tridimensional.

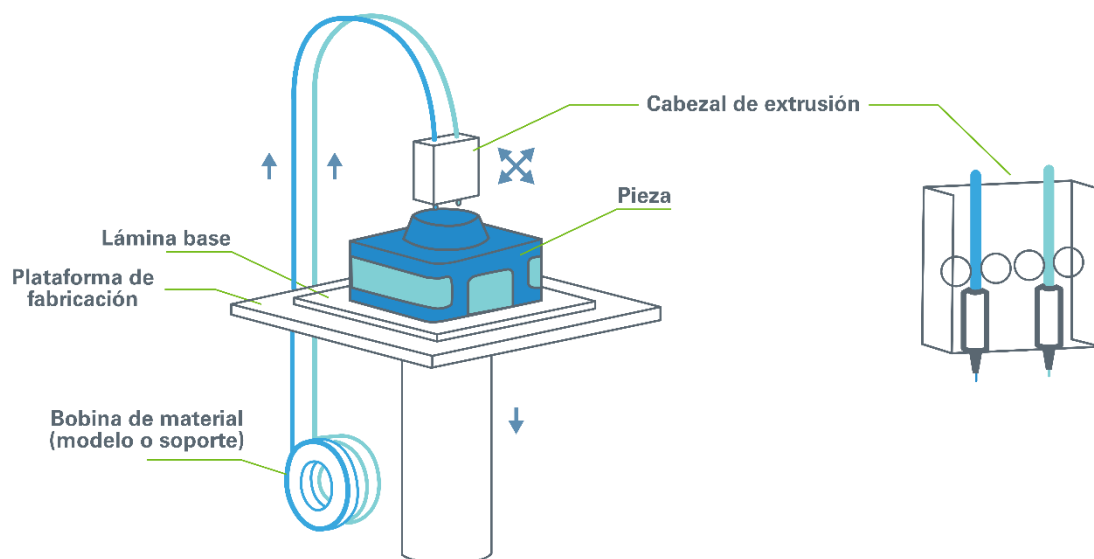


Figura 8: Proceso de fabricación por extrusión de material fundido (FDM).

Fuente: [www.mizaradditive.com](http://www.mizaradditive.com)

Tal como se aprecia en la imagen, el proceso es sencillo: El filamento es dirigido hacia el extrusor gracias a los mecanismos de los motores y los rodamientos, que accionan los engranajes que van suministrando la cantidad justa de filamento en cada momento en base a los parámetros establecidos.

Normalmente estas impresoras incorporan un ventilador para poder enfriar el filamento en la mitad del extrusor para que este no se funda antes de tiempo. Así, antes de su salida y no antes, el filamento se funde (sin llegar a derretirse) a la temperatura indicada (según la temperatura que requiera el material de impresión elegido) para posteriormente ser empujado reduciéndose el grosor del mismo y así salir por una boquilla y ser depositado en la cama de impresión formando cada capa.

Cabe mencionarse que, dependiendo del tipo de impresora, la base puede permanecer fija y ser la boquilla o cabezal el que se mueve en los 3 ejes, como es el caso de nuestra máquina o, por el contrario, el extrusor podría moverse en los ejes XZ, y la base de impresión en el eje Y (como en una impresora 3D típica cartesiana).

Como veremos en el apartado de la arquitectura y diseño, existen algunas variantes en las que la base puede moverse en los ejes XY y la base en el eje Z, como es el caso de las impresoras CoreXY.

### *MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D FDM*

Tanto en el ámbito industrial, como en el doméstico, uno de los principales factores a tener en cuenta antes de la adquisición de la máquina impresora (además del coste, funcionalidad, tamaño, etc.), es el tipo de material que usará esta máquina.

Como es lógico y acorde a las tipologías de impresión comentadas anteriormente, existen multitud de materiales de impresión (polvo, resinas líquidas, termoplásticos), cada uno con sus propiedades y su coste.

Como la impresora objeto de este TFG utiliza el método de impresión por FDM, nos centramos pues en los materiales que se pueden utilizar en el marco de esta tecnología elegida.

Los materiales más comunes para las impresoras por extrusión son el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Poliácido láctico (PLA), aunque también es posible usar otros termoplásticos y compuestos derivados de estos. Todos los materiales termoplásticos que utilizan este tipo de máquinas se presentan en formas de bobinas de filamento de diferentes diámetros, aunque en los últimos años se ha estandarizado el diámetro de 1.75mm frente al de 2.85mm. De manera adicional al ABS y PLA, hablaremos del PETG (Filamento de Polietileno) ya que también se trata de un filamento muy popular en la impresión 3D y es usado en nuestro proyecto de manera íntegra en la fabricación de las piezas impresas de la máquina.

- ✓ **ABS:** compuesto por tres componentes, con diferentes propiedades cada uno. Aunque actualmente su uso está en decadencia en el ámbito doméstico debido a su alto nivel de dificultad de impresión, también se trata un material común en impresión 3D ya que, es un material con muy buenas propiedades mecánicas. Además, se utiliza por la facilidad de post procesado ya que, permite mecanizarse y, además, admite tratado de la superficie con acetona que le confiere una aspecto liso y pulido.

La principal problemática a considerar sobre este material es el warping y el cracking, (puesto que, debido a las propiedades del material, se contrae al enfriarse). Por otro lado, un gran inconveniente de este material, que lo ha descartado para la realización del presente proyecto, es que emite gases nocivos por lo que requiere de mucha ventilación a la par que de una cama caliente y cabina para evitar la deformación al enfriarse.

- ✓ **PLA:** plástico biodegradable y reciclable. Se trata de un filamento muy resistente y fácil de imprimir, aunque de mayor fragilidad que el ABS. Lo bueno de este material es que la base de impresión no debe estar sometida a temperaturas tan elevadas de manera que se evita el warping o la deformación durante el enfriamiento, por lo que es acto para imprimir sin una base calefactada. En contraposición este material no permite ningún tipo de post procesado, ni superficial ni mecanizable. Por contra este material es que no admite temperaturas de trabajo elevadas en las piezas finales, ya que deforma con facilidad a partir de temperaturas ambiente cercanas a 50°C, por lo que es descartado para la utilización en la fabricación del prototipo RoPar3D.

- ✓ **PETG:** Es un material muy fácil de extruir y con buena calidad térmica ya que combina el PET con el compuesto líquido glicol que elimina los problemas de sobrecalentamiento y la fragilidad que presenta el PET cuando se sobrecalienta. Este material si es mecanizable pero sus propiedades tampoco admiten un procesado con tratamiento de la superficie. Para su correcta adherencia se requiere temperaturas de plataforma de impresión superiores a 60°C, sin embargo, no se requiere una cabina calefactada.

Al respecto de la impresión 3D, gracias a este compuesto, supone aglutinar la facilidad de impresión del PLA, con la fuerza y rigidez característica del ABS sin producir gases nocivos. Es por esto que, para la impresión de todas las piezas de RoPar3D, se ha optado por el uso de PETG.

A modo de comparativa ilustrativa, tabla 3, ya que no hay una estandarización de propiedades, se elabora la siguiente tabla con los datos técnicos de cada material (Tabla 3).

PROPIEDAD	MATERIAL		
	<u>ABS</u>	<u>PLA</u>	<u>PETG</u>
<b>Dificultad al imprimir</b>	Difícil	Fácil	Muy fácil
<b>Dureza</b>	Alto	Media	Alto
<b>Olor</b>	Si. Gases nocivos	No	No
<b>Veloc. Impresión</b>	Baja	Rápido	Rápido
<b>Resistencia térmica</b>	Máxima: ~70°C	Por debajo de 50°C	Máxima: 70°C
<b>Susceptible Warping</b>	Muy alto	Ninguno	Bajo
<b>Postprocesado</b>	Muy fácil	Difícil	Medio
<b>Elasticidad</b>	Bajo	Ninguno	Bajo
<b>Difícil de romper</b>	Si	No	Si

Tabla 3: Comparativa de propiedades técnicas de ABS, PLA y PETG.  
Fuente: Elaboración propia

### ARQUITECTURA DE LAS IMPRESORAS FDM

Como se ha visto hasta ahora, atendiendo a diferentes parámetros, las impresoras 3D se categorizan en diferentes tipologías. En el caso de las impresoras FDM, existe una clasificación en base a la arquitectura elegida. Cada una de ellas, permitirá diferentes movimientos de los ejes que le conferirán algunas características concretas como es el caso de las velocidades de impresión o inercias.

En la impresora, el extrusor, que está siempre orientado hacia la cama de impresión, i.e. hacia abajo, se puede mover con respecto a la base, en los 3 ejes dimensionales. Para ello, se pueden aplicar un sistema de coordenadas lineal, movimientos rotatorios, o incluso, una combinación de movimientos lineales y movimientos rotatorios.

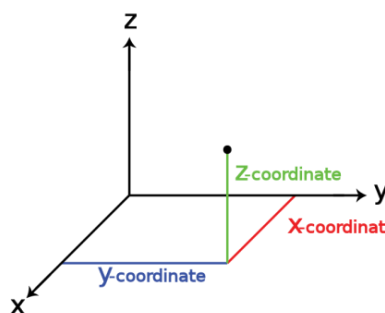


Figura 9: Eje de coordenadas.  
Fuente: Wikipedia

Aunque existen varias configuraciones posibles (arquitectura polar, arquitectura antropomorfa, estructura SCARA, etc.), a continuación explicaremos las configuraciones posibles más utilizadas en impresión FDM y que precisamente ocupan el ámbito de nuestro proyecto: arquitectura cartesiana y arquitectura basada en robot delta.

### Estructura cartesiana

Se trata del tipo de estructura más utilizada en las impresoras FDM comercializadas. Esta estructura utiliza un sistema de coordenadas cartesiano para moverse en las dimensiones horizontal (X), largo (Y) y vertical (Z) para determinar cómo moverse mediante movimientos lineales.

La principal ventaja de estas impresoras es su simplicidad en mecanismos y el software utilizado reduciendo así con ellos los costes. Esto es debido a que el movimiento de cada uno de los ejes, es obtenido solamente por un motor paso a paso. Quizás por ello sea la estructura más comercializada en impresoras FDM de uso doméstico ya que su simplicidad le lleva a poder detectar más fácilmente un fallo de movimiento, su calibrado es más sencillo, etc.

Otra ventaja destacable sería el hecho de que esta estructura permite montar estructuras que permitan realizar mucha fuerza en la punta como sería el caso de la mayoría de máquinas CNC de tres ejes, que montan este tipo de arquitectura.

Además, el acabado superficial de las impresiones suele ser mejor en comparación con las impresoras delta ya que, los ejes de la cartesiana son más rígidos y permiten menos errores mientras se mueve el cabezal de impresión.

En contraposición a todo esto, es cierto que el esfuerzo del motor es mayor al tener que mover tanto el cabezal como la estructura que lo soporta en lugar de compartir el esfuerzo con varios motores como es el caso de las impresoras delta.

Atendiendo al tipo de guías, existen tres tipos de impresoras cartesianas (Figura 10):

- ✓ **Cartesiana XZ:** El cabezal se mueve en el eje X y guía del eje X se sujeta en el Z. La base de impresión se mueve en el eje Y. Constructivamente, se trata de la forma más sencilla y económica. Sin embargo, aunque las inercias en X quedan absorbidas por el puente que sustenta el eje Z, la base, al moverse en Y, generan inercias en este eje.

- ✓ **Cartesiana XY:** En este tipo de estructura, el cabezal de impresión se desplaza en el plano horizontal (X y Y), y la base de impresión sube y baja, moviéndose en el plano Z. Existen diferentes formas de sujetar las guías de la impresora, pero todas van a requerir un chasis en forma de caja para sujetar las guías. Es por este montaje por lo que esta arquitectura garantiza más firmeza.

El sistema CoreXY es todavía bastante experimental y no está tan comercializado como las impresoras cartesianas XZ. Se trata de una arquitectura donde el cabezal de impresión se mueve en el plano XY, mientras que se sujeta con dos poleas a dos motores a la vez, que combinan los esfuerzos y reparten las inercias cuando mueven el cabezal.

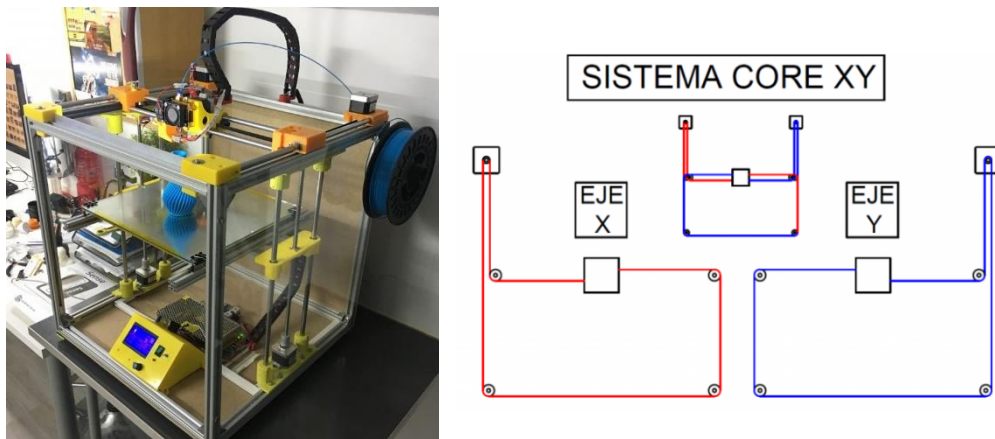


Figura 10: Impresora CoreXY. y Sistema de movimiento impresora CoreXY.

Fuente: [www.javierarnedo.com](http://www.javierarnedo.com)

El hecho de que no se haya desarrollado mucho este tipo de estructura en la impresión 3D puede residir en que el sistema de movimiento con los dos motores requiere que la estructura de este tipo de sistema debe ser muy firme. De igual modo, los motores, correas y poleas que se montan deben ser de gran calidad dado que se requiere rigidez suficiente para aguantar el peso y evitar inercias durante la impresión. Esto hace que el coste de materiales y el mantenimiento sea mucho mayor a la par que dificulta en gran medida el calibrado correcto de la máquina. Todo esto hace pensar que los costes y dificultad aplicadas no compensan las ventajas obtenidas y por ello no las impresoras con sistema CoreXY, no están tan extendidas en el mercado.

- ✓ **Cartesiana XYZ:** En este caso la base de impresión permanece fija y se mueven el cabezal de impresión y los ejes que lo soportan en los planos X, Y y Z. Este tipo de configuración normalmente solo se utiliza para impresión 3D de grandes dimensiones como es el caso de las impresoras que utilizan hormigón. Esto se debe a que las inercias generadas en tipo de movimiento son mucho mayores a las dos tipologías anteriores por lo que, a pequeña escala, no se utiliza.



*Figura 11: Tipos de impresoras de arquitectura cartesiana.*

*Fuente: www.capasobrecapa.com*

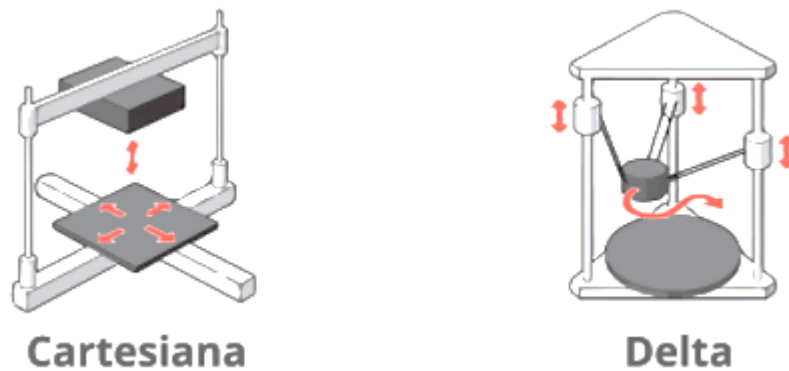
### Estructura Delta

La arquitectura delta es muy utilizada en la industria hoy en día para la implementación en robots. Como se comenta a lo largo del documento y como explicaremos, esto se debe principalmente a su rapidez de impresión y amplia capacidad de movimiento del extrusor por todo el volumen de impresión.

Como se aprecia en la Figura 11, esta estructura monta tres guías verticales dispuestas de forma triangular en las que se sujetan tres rieles con tres brazos articulados que se mueven hacia arriba y abajo por las guías. El cabezal de impresión se encuentra suspendido por los tres brazos que lo sujetan y mueven. Así, el movimiento, también basado en las coordenadas XYZ, se obtiene mediante la subida o bajada de las sujeciones de los brazos a las guías verticales permitiendo el posicionamiento del extrusor en todo el espacio de impresión disponible<sup>[19]</sup>. Para ello, a modo de ejemplo, si se desea mover el extrusor hacia arriba, se moverían simplemente los tres brazos a la vez hacia arriba en las sujeciones a las guías verticales. En caso de que el extrusor precise moverse hacia un lado, subirá uno de los brazos articulados a la vez que bajarían los otros dos.



La cama, normalmente de forma circular o hexagonal, permanece estática otorgando una mayor precisión a la impresión. Como puede verse en la Figura 12, su volumen de impresión es más vertical que horizontal por lo que puede imprimir piezas más altas que las impresoras cartesianas, pero se encuentran limitadas por el diámetro de la base de impresión. Esta impresora es ideal pues para impresión de objetos cilíndricos y altos.



*Figura 12: Impresora 3D cartesiana vs. Impresoras 3D delta.*

*Fuente: [www.bitfab.io](http://www.bitfab.io)*

Aunque este sistema de movimiento es más complicado que el sistema de movimientos cartesiano, pues cada punto del espacio tiene una combinación concreta de los ángulos de estos brazos, la principal ventaja es que el esfuerzo del movimiento está repartido siempre entre los tres motores que monta por lo que el cabezal de extrusión puede moverse con mucha mayor rapidez que en el caso de las impresoras cartesianas. Es por esto, que el cabezal de impresión debe ser lo más ligero posible (a diferencia que las impresoras cartesianas) para evitar cualquier inercia ya que, al ser una estructura donde el cabezal de impresión “cuelga”, hay que reducir toda parte no esencial que añada inercias en el efector.

Así pues, debido a esto, su principal ventaja es que consigue una mayor precisión que las cartesianas, como se verá posteriormente en el apartado comparativo de la impresión.

En esta misma línea, este tipo de arquitectura, al ser más complejo, precisa de más horas de montaje por lo que, se dificulta el mantenimiento y cambio de piezas en caso de ser preciso.

Dentro de la cinemática delta, la mayoría de impresoras comerciales o DIY son lineales, es decir, tienen la configuración de brazos y guías explicada anteriormente y aunque consiguen que el cabezal de impresión pueda moverse por todo el volumen de impresión, los rieles de los brazos, siguen moviéndose solamente en el plano vertical Z.

Sin embargo, para nuestro diseño conceptual montaremos una estructura delta rotativa por la que, además de los tres brazos, se incluyen tres antebrazos que van sujetos a un eje superior a fin de hacer la impresora aún más rápida y reducir inercias. Como se verá en el apartado de Diseño y Fabricación del presente documento, nuestra máquina monta este tipo de estructura a fin de otorgarle más rapidez, calidad de impresión y, sobre todo, que la estructura de nuestra máquina siga siendo independiente del cabezal de impresora 3D a fin de poder diseñar e implementar otros cabezales sin necesidad de modificar la estructura original de la máquina.



Figura 13: Diseño impresora 3D basada en robot paralelo tipo delta.

Fuente: Elaboración propia

Dado que, -como se ha ilustrado-, las cinemáticas comentadas tienen diversas ventajas y desventajas, a continuación, resumimos en la Tabla 4, una comparativa de las estructuras cartesianas, delta y CoreXY.

PARÁMETRO	<u>CARTESIANA</u>	<u>DELTA</u>	<u>COREXY</u>
<i>Velocidad impresión</i>	+	+++	++
<i>Calibración</i>	+++	+	++
<i>Precisión</i>	++	+++	++
<i>Volumen de impresión</i>	++	+	+++
<i>Tamaño Impresora</i>	+	++	+++
<i>Inercias generadas</i>	+++	+	++

Tabla 4: Tabla comparativa impresoras 3D cartesianas, delta y coreXY.

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla anterior, las impresoras 3D delta, obtienen una alta definición en la calidad de las piezas impresas ya que son más precisas a la hora de colocar capa sobre capa si se compara con una Impresora 3D de estructura cartesiana. A su vez, lo hace más rápido, como se verá en el apartado comparativo de impresiones realizadas en nuestra máquina con respecto a las realizadas en las otras impresoras 3D cartesianas.

Por otro lado, en contraposición a las cartesianas, en la estructura delta no se producen saltos de pasos de motor (*backlash*) dado que las correas se tensan constantemente y no se hace preciso su supervisión constante.

Por último, como ventaja destacable, comentar que el hecho de que la base de impresión permanezca estática en las impresoras delta, elimina cualquier inercia generada en los otros dos tipos de impresora con los que se compara.

### 3. MARCO TEÓRICO (II): ESTADO ACTUAL ROBOT PARALELO DELTA

#### 3.1 Origen y definición hitos.

Aunque si nos remontamos siglos atrás, desde la creación de los autómatas, pasando por el robot industrial paralelo construido por Willard Pollard, la plataforma paralela inventada por el Dr. Eric Gough en 1940, han existido lo que hoy conocemos por “robot” [20]. Sin embargo, los robots paralelos como los conocemos hoy día, no fueron bautizados con el nombre de Robot Delta hasta 1985, cuando su inventor, el doctor en robótica paralela de Raymond Clavel (*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*) [21], ideó el uso de paralelogramos para construir una estructura robusta paralela enfocada a la manipulación robótica. [22]

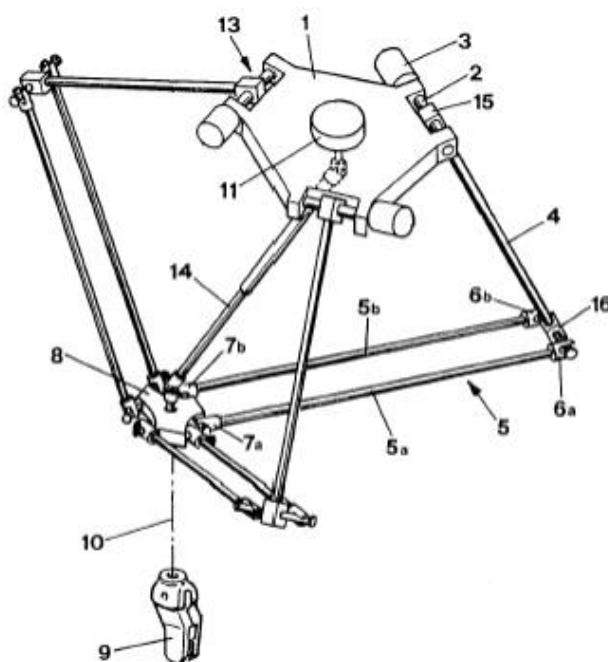


Figura 14: Diagrama robot paralelo. Fuente: Patente US. N°(4,976,582)

Un robot Delta es un robot paralelo que tiene dos plataformas: una fija y otra móvil que se conectan entre sí por tres cadenas cinemáticas separadas por ángulos de  $120^\circ$ . A diferencia de las impresoras con estructura delta, donde hablábamos de brazos, en el caso de los robots paralelos delta, cada cadena cinemática está formada por dos eslabones (el brazo y el antebrazo) junto con tres articulaciones esféricas pasivas.

En la base fija sostiene tres articulaciones mecánicas. Los ejes de estas articulaciones forman un triángulo equilátero plano. La plataforma está conectada con cada unidad por dos enlaces formando un paralelogramo. El objetivo de usar los paralelogramos es restringir

completamente la orientación de la plataforma móvil. En consecuencia, el efector final sólo tendrá tres movimientos de sólo traslación.

Pese a que el espacio de trabajo con el que cuentan este tipo de robots es relativamente reducido, su principal ventaja es que, al contar con una cinemática con una mínima carga móvil, nos permite alcanzar unas grandes aceleraciones en la máquina, siendo el tipo de robot idóneo para operaciones de tomar y colocar objetos (robot pick and place).<sup>[23]</sup>

### 3.2 Uso actual.

Hoy en día, el funcionamiento de este tipo de robot es de una funcionalidad Pick and Place como robot manipulador (Figura 15), lo podemos encontrar en diversas partes de cadenas de producción ya sea para empaquetar o para clasificar y colocar elementos. Este sería el caso, por ejemplo, de los robots ABB, que son utilizados en industria de automatización gracias a su gran velocidad de desplazamiento y rendimiento lo que lo hace idóneo para los altos volúmenes requeridos de producción.



*Figura 15: Robot paralelo en línea de producción.*

*Fuente: [www.sick.com](http://www.sick.com)*

Por otro lado, la precisión característica del tipo de cinemática de estos robots, a la par que la escasa inercia, también le hace ser un gran aliado en la industria farmacéutica y médica por las aplicaciones que puede tener para trabajos muy precisos llegando incluso a utilizarse en cirugías<sup>[24]</sup> en la industria electrónica.

Parece razonable que este tipo de tecnología se aplique al mundo de la impresión 3D a fin de poder utilizar sus ventajosas características en aras de producir impresoras más rápidas y precisas.

Este tipo de robot, en la actualidad, permanece sin competidores en el ámbito de los robots de transferencia rápida. Como se mostrará en los siguientes apartados de la presente memoria de TFG, la implementación de los robots paralelos delta a las impresoras 3D, conferirán a la impresora de las características de este tipo de robots, con la funcionalidad de la fabricación por FDM.

## 4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y CRONOGRAMA

### 4.1. Fases del proyecto.

La memoria del presente proyecto está comienza con unas páginas de agradecimiento y posteriormente se estructura en base a las diferentes fases que se han ido llevando a cabo para el diseño y fabricación del robot paralelo. A saber:

✓ **Fase inicial:**

Aunque como se ha comentado anteriormente en la motivación del proyecto que la idea inicial de fabricar mi propia impresora 3D ya estaba latente, en esta fase inicial, se ha tomado la decisión de realizar este proyecto personal como punto culmen de mi carrera universitaria.

Una vez tomada la decisión no solo de diseñar el robot, sino de fabricarlo, se valoró la idea de escoger a los profesores Manuel Ángel Aguilar Torres y Fernando José Aguilar Torres como director y codirector respectivamente, dado que considero son los más cercanos a la temática del proyecto y afines a los conocimientos que en él voy a aplicar.

Tras aprobar ellos el tema elegido y, el siguiente paso en esta fase, fue la consulta de bibliografía sobre el tema para conocer más detalles sobre el estado actual y avances de la cinemática característica de los robots paralelos.

Como se verá en el posterior cronograma, esta fase inicial comenzó en octubre 2019 aunque el diseño del robot no comenzó hasta abril 2020 debido a razones profesionales, ya que no era posible dedicar demasiadas horas diarias al proyecto.

En esta fase también se ha llevado a cabo un proceso de toma de decisiones y búsqueda de fuentes de información con el fin de hacer la máquina modular,

*brainstorming* acerca de las mejores opciones posibles para la elección de los materiales de la estructura y elaboración de boceto a mano alzada de la idea inicial de la máquina para poder hacer mi idea visible y trabajarla para mejorarla.

- ✓ **Análisis técnico-mecánico:** Estudio de la arquitectura de los elementos mecánicos del robot para el diseño de la impresora. Se estudiarán tanto los elementos del sistema robótico como su implementación para la fabricación con una impresora 3D.
- ✓ **Diseño en 3D utilizando SolidWorks®:** Partiendo del estudio anterior, se diseñará un prototipo de robot paralelo que cumpla con los objetivos del diseño. Por otro lado, se realizarán una serie de iteraciones utilizando la optimización topológica en el diseño de los brazos delta.
- ✓ **Prototipado de la máquina usando impresión 3D:** Se fabricarán las partes realizadas en la fase de diseño mediante impresión FDM.
- ✓ **Creación de la lista de materiales, selección y justificación de componentes:** Se hace una lista con los materiales necesarios para la construcción de la máquina, una comparativa de proveedores disponibles con sus precios de cada material y plazos de entrega. Una vez tomada la decisión de compra, se elaborará un presupuesto de los materiales y se realizan los pedidos de materiales.
- ✓ **Electrónica y programación:** En esta parte se detallará la parte electrónica de la máquina. Se instalará el sistema de alimentación, motores, sensores, cableado y placa electrónica. Además, se instalará el firmware elegido: Klipper junto con una interfaz web de control: Octoprint.
- ✓ **Puesta en marcha:** Arranque y calibración de la máquina con diversas pruebas para la puesta a punto de los diferentes elementos. Comprobación de la electrónica y prueba de impresión para dejar la maquina lista para imprimir.
- ✓ **Estudio comparativo entre tipos de impresoras:** Mediante la impresión de modelos patrón en ambas maquinas se realizará un cotejo visual de calidad, tolerancia dimensional y tiempos de impresión entre ambas.

- ✓ **Elaboración de la memoria TFG:** Aunque la redacción del índice y comienzo de toma de referencias bibliográficas comenzó en abril 2020, he dedicado más horas diarias en agosto a la redacción del mismo dado que mi enfoque ha sido la fabricación de la máquina y prueba de la misma para intentar conseguir la mejor calidad de impresión posible y el calibrado óptimo de la máquina.

#### 4.2 Cronograma.

A fin de poder ilustrar la planificación llevada a cabo para el proyecto, se presenta a continuación un diagrama de Gantt que expone el tiempo empleado para las diferentes etapas y tareas del proyecto.

A este respecto, destacar que, como este proyecto se centra no solo en el diseño, sino en la fabricación de la máquina, la fase de fabricación y diseño son las etapas que más tiempo han tomado.

FASE	TOTAL HORAS
<b>MEMORIA TFG</b>	128h
<b>FASE INICIAL</b>	39h
<b>ANALISIS TECNICO-MECANICO</b>	48h
<b>DISEÑO CON SOLIDWORKS</b>	129,50h
<b>PROTOTIPADO</b>	225h
<b>ELECCION Y PROVISIONAMIENTO DE MATERIALES</b>	24h
<b>ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN</b>	40h
<b>PUESTA EN MARCIA</b>	20
<b>ESTUDIO COMPARATIVO</b>	16h
<b>TOTAL</b>	<b>669,50h</b>

Tabla 5: Cómputo de horas por fase TFG.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla anterior (Tabla 5), el tiempo dedicado a este proyecto ha sido de 669,50 horas, teniendo en cuenta que, debido a la realización de las prácticas extracurriculares, he dedicado una media de entre 2 a 6 horas al día a este proyecto.



FASE	ACTIVIDAD	OCTUBRE 2019		Noviembre 19 -	ABRIL	MAYO	JUNIO				JULIO				AGOSTO				
		SEMANA 3	SEMANA 4	Marzo 20	SEMANA 4		SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	
		L M X J V S D L M X J V S D	L M X J V S D L M X J V S D		L M X J V S D		L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D	L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D	L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D	L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D L M X J V S D									
0. FASE INICIAL	Redacción memoria TFG	■	■	■	■														
	Elección del tema	■	■	■	■														
	Elección Director	■	■	■	■														
	Búsqueda información e investigación	■	■	■	■														
	Boceto inicial	■	■	■	■														
	Elaboración Diagrama Gantt	■	■	■	■														
1. ANALISIS TÉCNICO-MECÁNICO	Cálculo de parámetros del robot con Marginally Clever Robots																		
	Análisis de los resultados de los cálculos y estudio de las variables																		
	Cálculo y toma de decisiones (parámetros máquina.)																		
2. DISEÑO CON SOLIDWORKS®	Cálculo y selección de los parámetros constructivos en base a la resolución																		
	Diseño de la estructura y forma del robot																		
	Diseño cuerpo, brazo, antebrazo, efector, etc. Diseño de los elementos sustentantes y elementos accesorios																		
3. PROTOTIPADO DE LA MÁQUINA CON IMPRESIÓN 3D	Selección de materiales y parámetros de impresión																		
	Impresión de piezas																		
	Postprocesado de piezas y cotejo visual																		
	Fabricación de la estructura de prueba																		
	Montaje y verificación																		
	Corrección errores y optimización de piezas																		
4. LISTA DE MATERIALES Y SELECCIÓN DE COMPONENTES	Finalización de la estructura con elementos accesorios																		
	Selección y justificación de materiales y componentes de la máquina																		
	Comparativa de proveedores, precios y plazos de entrega																		
5. ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN	Prevision de gastos																		
	Compra y recepción de los materiales																		
	Elaboración y construcción de la electrónica de la máquina (cableado, alimentación, etc. Elección del firmware / toma de contacto																		
6. PUESTA EN MARCHA	Klipper																		
	Instalacion programa Klipper y familiarizacion																		
	Puesta a punto del perfil de impresión y programación de la máquina																		
8. ESTUDIO COMPARATIVO	Arranque inicial de la máquina y comprobación de electrónica																		
	Calibración de la máquina y puesta a punto																		
	Prueba de impresión y pequeños ajustes y calibraciones de la máquina para optimizar la impresión																		
	Impresión de los modelos patrón con RobPar 3D																		
	Impresión modelos 3d con AKP y AMB																		
	Estudio comparativo entre impresoras																		

Tabla 6: Cronograma TFG.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 5.1 Materiales.

Los materiales utilizados para el presente proyecto varían dependiendo de las diferentes fases de éste. Así, los materiales utilizados para la construcción del prototipo de robot paralelo, RoPar3D, se detallan en el próximo capítulo de la memoria del proyecto, dentro del diseño y la fabricación dado que se hace una justificación de los materiales elegidos.

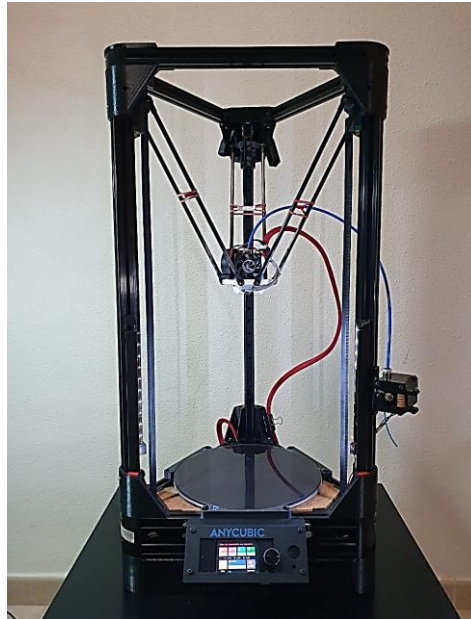
El resto de los materiales utilizados, ya sean físicos o herramientas software se han clasificado acorde a su tipología:

#### Herramientas informáticas.

- ✓ Software CAD SolidWorks®: Debido a su popularidad y a la familiarización y experiencia adquirida por cuenta propia y durante mis estudios de grado, el programa utilizado para el diseño durante todo el proyecto ha sido SolidWorks® 2018 y más concretamente el módulo SolidWorks® Simulations para el estudio de elementos finitos, el estudio topológico y análisis estático de las piezas.
- ✓ Paquete Microsoft Office 365™: Conjunto de herramientas ofimáticas. Concretamente se ha utilizado la herramienta PowerPoint y Microsoft Word.
- ✓ GanttProject: Software gratuito online empleado para realizar diagramas de Gantt al ser muy útil para poder realizar una planificación acorde a las diferentes fases precisas para la elaboración y posterior redacción del proyecto.
- ✓ Firmware Klipper<sup>[25]</sup>: sistema híbrido de control de impresión 3D compuesto por una Raspberry Pi® y una placa electrónica de control esclavo con el fin de no tener limitaciones en la potencia de cálculo.
- ✓ Octoprint: Software libre que permite, junto con el firmware Klipper, monitorizar y gestionar de forma remota (a través de una interface web) la impresora 3D utilizando una Raspberry Pi.
- ✓ Simplify3D: Software laminador diseñado para poder importar un modelo diseñado por ordenador desde archivos .stl y .obj para enviarlo a una impresora 3D.

### Máquina 3D materiales y pruebas de impresión.

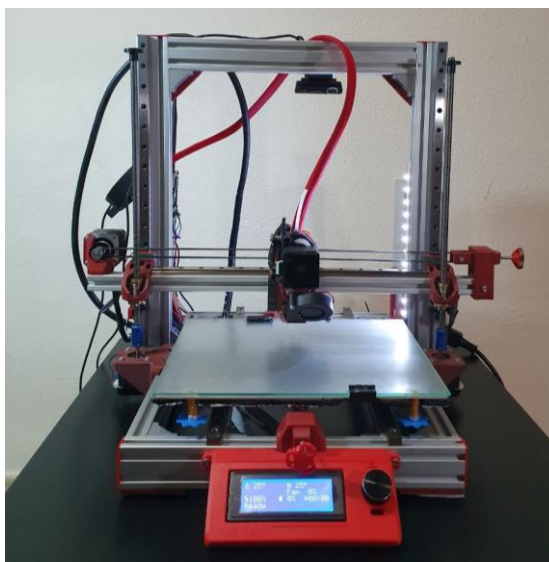
- ✓ Impresora Anycubic Kossel Plus (AKP): Se trata de la impresora 3D de tipo delta lineal (Figura 16) utilizada en el presente proyecto en la fase de construcción y fabricación de RoPar3D y en la fase de estudio comparativo cualitativo de las pruebas de impresión.



*Figura 16: Anycubic Kossel Plus.*

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Impresora Cartesiana diseño propio (AM8): Se trata de la impresora 3D de tipo cartesiano (Figura 17) utilizada en el presente proyecto en la fase de construcción y fabricación de RoPar3D y en la fase de estudio comparativo cualitativo de las pruebas de impresión.



*Figura 17: AM8, cartesiana diseño propio.*

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Materiales de impresión: Para la impresión tanto de las piezas de RoPar3D como para las pruebas de impresión y posterior comparativa, se han utilizado 2 bobinas de filamento:
  - Bobina PETG transparente:  
Bobina PLA azul: Se recomienda para imprimir piezas que sufren estrés mecánicamente
  - Laca fijadora 3DLAC: Spray fijador con la función de garantizar la sujeción de la primera capa de impresión a la base de la impresora para que no se originen fallos indeseados.
  
- ✓ Piezas de calibración: En esta misma fase, se han impreso diversas piezas de calibración en PLA con RopPar3D y con la impresora Anycubic y AM8.

#### Otros materiales.

Para montaje y calibración de la máquina se han utilizado las siguientes herramientas:

- Destornillador.
- Llaves Allen.
- Calibre Digital.
- Multímetro digital.
- Útiles de corte impresos<sup>1</sup>.
- Sierra de corte.
- Crimpadora.
- Alicates de corte.
- Soldador de estaño.

---

<sup>1</sup> Se ofrece mayor detalle y diseño en los apartados 6 (Prototipado) y en el Anexo III de la presente memoria de TFG.

## 5.2 Metodología.

La impresora 3D creada en el presente proyecto es un prototipo de máquina que, dado que unifica la estructura delta con la cinemática de robot paralelo, no tiene gran bibliografía concisa a este respecto debido a que, aunque existe bibliografía de esta temática por separado, no hay prototipos comercializados que incluyan ambas características y los que existen son experimentales como para tener una extensa información al respecto (de ahí el interés de los objetivos del proyecto).

Es por esto por lo que, aunque se han aplicado los conocimientos adquiridos e investigados de ambas ideas (método inductivo), la técnica empleada en el presente proyecto ha sido un método totalmente experimental mediante ensayo heurístico de “prueba-error”.

Dado que de las investigaciones previas se deduce que no existe ahora mismo, en forma de publicación o modelo comercial, un proyecto que unifique ambas ideas, el proyecto consistirá en probar la alternativa de unir la idea de una impresora 3D con estructura modular que esté basada en la cinemática de un robot de brazos paralelos a fin de obtener mejores resultados que las arquitecturas y cinemáticas convencionales.

Una vez elaborada la planificación temporal y estudiadas las teorías y barajado las posibles problemáticas que puedan surgir, se procederá a probar esta alternativa para verificar mediante diversas pruebas, hasta qué nivel supone una mejora en el diseño esta idea.

Para ello se diseñará y fabricará desde cero una máquina impresora 3D basada en robot paralelo delta optimizando su diseño y rehaciendo las piezas necesarias tras un estudio topológico. Después, una vez esté acabada la fabricación de nuestra máquina, a la que he llamado RoPar3D (acrónimo de Robot Paralelo de Impresión 3D), se realizarán diversos test basados en la impresión de varias piezas 3D (de menor a mayor complejidad) en las 3 máquinas (dos impresoras 3D del alumno y la máquina creada para el proyecto), a fin de hacer una comparativa de los parámetros y resultados obtenidos en cada una.

Antes de proceder a la fase de diseño, cabe destacar que la metodología aplicada ciertamente no es el método óptimo en cuanto a tiempo y esfuerzo. Sin embargo, esta metodología se ha combinado con la puesta en práctica de la teoría estudiada durante el grado y la investigación realizada para el proyecto a la par que se ha dedicado mucho tiempo a la fase de diseño donde mediante el uso de SolidWorks® Simulations se ha hecho incisión en el estudio topológico a fin de optimizar las piezas (aligerándolas sin perder rigidez) y en el estudio estático para valorar las fuerzas que recibe la pieza y así realizar un diseño que evite deformaciones y considere los puntos de concentración de las tensiones.

## 6. DISEÑO Y FABRICACIÓN.

### 6.1 Análisis técnico-mecánico.

Una vez estudiada la arquitectura del robot paralelo delta, es el momento de analizar los puntos clave para poder realizar un diseño del robot fabricado a partir de fabricación aditiva. Uno de los objetivos de nuestro diseño es poder conseguir una resolución de máquina de al menos 0,02 mm en los ejes, siendo esta la resolución más común que podemos encontrar en las impresoras 3D FDM.

Por otra parte, y como se comentaba en los objetivos del proyecto y acorde al pensamiento del movimiento RepRap, partimos del objetivo de que podamos autorreplicar la maquina usando una maquina madre igual para la producción de todas sus piezas impresas. Sería interesante ya que se pudieran producir maquinas en serie utilizando para ello la propia máquina. Para ello, debemos tener en cuenta, sobre todo, las dimensiones máximas de las distintas piezas para que no superen en ningún caso el volumen de impresión de la máquina.

Con el fin de optimizar el tiempo en el análisis, -y dado que el cometido de este proyecto no es el cálculo de los parámetros ni el análisis de la cinemática de un robot delta sino su implementación a una impresora 3D-, haré uso de la herramienta online “Marginally Clever Robots” <sup>[26]</sup>, que nos será de gran ayuda en el cálculo de los parámetros del robot.

Será de especial interés tener en consideración una serie de variables en este paso: por un lado, las dimensiones del robot y, por otra parte, el actuador del motor, que es una variable crítica en la resolución final de la máquina que nos dará la resolución de giro final en el brazo.

En cuanto al cuerpo del robot se compone de 4 elementos constructivos diferenciados:

- ✓ **BASE o CUERPO:** Su función no es otra que sujetar el robot a la estructura de la máquina, sobre él irán montados los brazos del robot y sus actuadores. Los parámetros a tener en cuenta sobre este elemento son el tamaño de los motores, las medidas de los brazos y los elementos de sujeción a la estructura.

Deberá tener unas dimensiones que nos permitan albergar los motores paso a paso, sujetar los brazos, pero sin tener un tamaño en exceso para que pueda ser impresa en el volumen de trabajo de la impresora.

- ✓ **BRAZO:** Une el cuerpo del robot con el antebrazo, sobre él se inicia la actuación del motor. Será una parte íntegramente impresa, por lo que estamos limitados a una dimensión máxima para nuestro volumen de trabajo.

- ✓ **ANTEBRAZO:** Une el brazo con el efector, se compone de dos varillas que trabajan a una distancia paralela en todo momento, de ahí el nombre de “robot paralelo”. Su longitud nos da el parámetro de distancia de antebrazo  $re$ .
- ✓ **EFECTOR:** Se trata del extremo del brazo y sustenta la herramienta de trabajo del robot, el cabezal de impresión en nuestro caso. Para el cálculo de la cinemática contiene una de las dimensiones necesarias, el *radio de efector*  $e$ , siendo uno de los parámetros característicos también para la programación en el firmware de la máquina.

Otros de los parámetros a tener en cuenta para el cálculo de las medidas y dimensiones del robot paralelo, es la altura de máquina. Esta cota precisará la distancia entre la base y la superficie de impresión del robot.

Por otro lado, para definir completamente la resolución de la máquina tenemos un parámetro que, no solo forma parte de los elementos constructivos si no que, viene definido también por los motores, es decir, de los pasos por vuelta. Los pasos por vuelta o giro dependen de 2 factores:

- Los pasos de los motores. Un motor estándar tiene una resolución de  $1,8^\circ$  por paso, i.e., en una vuelta completa de motor constaría de 200 pasos. Sin embargo, este parámetro podemos subdividirlo gracias a los controladores de los motores pudiendo llegar a subdividir cada paso en 256 micropasos”, aunque sea perdiendo par motor”. Por lo tanto, tenemos un rango de entre 200 pasos por vuelta para un motor a paso completo hasta 51200 para una configuración con 256 micropasos. En nuestro caso se opta por un punto intermedio para tener margen en caso de requerir mayor resolución.
- La relación de transmisión entre motor y brazo. Podemos variar la resolución de salida incorporando en el diseño una relación de transmisión reductora entre rueda/piñón. Con el fin de no aumentar demasiado el tamaño de la rueda una relación aceptable estará en torno a 1:5.

*Cálculo de los pasos por vuelta:*

- (p) Motor Nema 17: 1,8° por paso
- (mp) Controlador paso a paso: subdivisión 16 a 256 micropasos (64)
- (r) Relación de transmisión motor/brazo: 1:5

$$\text{Pasos por vuelta} = \frac{\left(\frac{360}{\text{gradosmotor}} * \text{micropasos}\right)}{\text{relaciontransmisi3n}}$$

$$\text{Pasos por vuelta} = \frac{\left(\frac{360}{1,8} * 64\right)}{1/5} = 64000$$

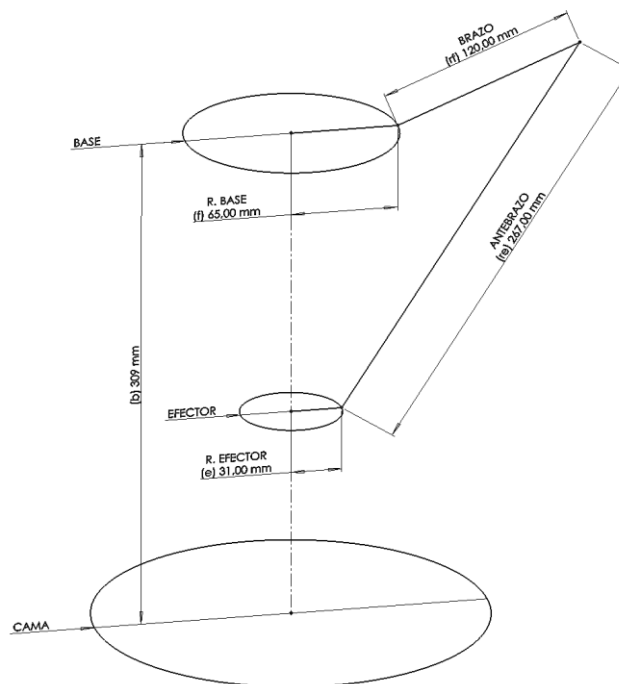


Figura 18: Diagramas cotas RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Tras la selección de los parámetros constructivos para cumplir nuestro objetivo de resolución tenemos los siguientes resultados en la (Tabla 7):



ELEMENTOS	PARÁMETROS
<i>Radio cuerpo (f)</i>	65mm
<i>Longitud de brazo (rf)</i>	120mm
<i>Longitud de antebrazo (re)</i>	267mm
<i>Radio efector (e)</i>	31mm
<i>Distancia de cuerpo/base a cama (b)</i>	309mm
<i>Pasos por vuelta</i>	64000
<i>Cubo rectangular inscrito</i>	X= -81.164 a 81.164mm Y= -81.164 a 81.164mm Z= -309 a -146.672mm
<i>Ángulo límite de giro de motor</i>	Theta 1= -63.2 a 60.15 Theta 2= -69.18 a 64.08 Theta 3= -69.18 a 64.08
<i>Centro</i>	(0,0,-227.836)
<i>Origen</i>	(0,0,-233.318)
<i>Resolución</i>	±0.014mm

Tabla 7: Parámetros constructivos.

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de estos parámetros, cumplimos con el requisito de dimensiones máximas de fabricación además de obedecer al mínimo de resolución de máquina. No obstante, hay que tener en cuenta también, que estamos considerando el uso de 64micropasos, pudiendo alcanzar los 256 siendo estos 4 veces superior en resolución.

## 6.2 Diseño en 3D utilizando SolidWorks®.

Partiendo el estudio anterior realizado, se ha diseñado un prototipo de robot paralelo que cumpla con los objetivos del diseño y de una estructura que los sustente mediante el uso de SolidWorks®<sup>[27]</sup>.

Esta parte de diseño es la que más tiempo ha tomado ya que durante el desarrollo del prototipo se han ido realizando pruebas y diseñando los componentes de una manera dinámica implementando mejoras con forme avanzaba el diseño.

6.2.1 Diseño estructura.

Como se comentaba al principio del documento, una de las principales ventajas de este tipo de robot es la independencia entre robot y estructura. Así con ello, un mismo robot se puede adaptar a distintas estructuras sin variar ningún elemento constructivo de él. Por ello, para nuestra impresora 3D será necesario adaptar la estructura al prototipo de robot sabiendo de antemano que, durante el proceso de diseño, tendrá severos cambios, pero que la estructura inicial, independientemente del cabezal colocado, será permanente.

Con el fin de que no tenga un efecto negativo sobre la calidad de impresión, la estructura deberá ser rígida a la vez que adaptable y apta para un prototipado de elementos potencialmente cambiantes durante su fabricación y puesta a punto.

Para poder cumplir con estos requisitos expuestos, se ha optado por el uso de perfilería de aluminio extruido (Figura 19) ya que se trata de un material liviano que se puede trabajar fácilmente y que, a su vez, permite la colocación en la totalidad de su superficie de elementos acoplados y permitiendo con ello, un gran nivel de adaptabilidad a los requisitos de la maquina y ante posibles futuros cambios.

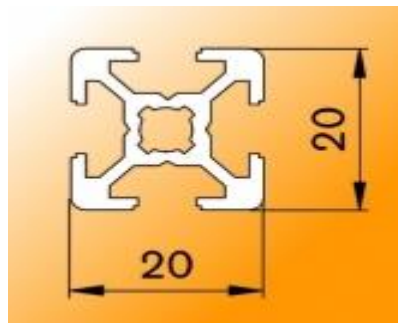


Figura 19: Perfil aluminio estructural Motedis - 20x20 Tipo-B Ranura 6.

Fuente: [www.motedis.com](http://www.motedis.com)

Una vez solucionada la elección del material para la estructura, nos ocupamos ahora del diseño de la estructura del prototipo RoPar3D. Para ello, tenemos que partir de dos puntos clave: la forma del robot y el volumen de impresión de este.

En cuanto a la forma, éste se compone de 3 brazos paralelos principales separados 120° entre sí. Por lo tanto, la planta de la estructura se asemeja más a un triángulo que a un rectángulo. Utilizando esta forma geométrica podemos insertar nuestro robot entre un triángulo equilátero siendo los brazos perpendiculares a cada uno de los lados.



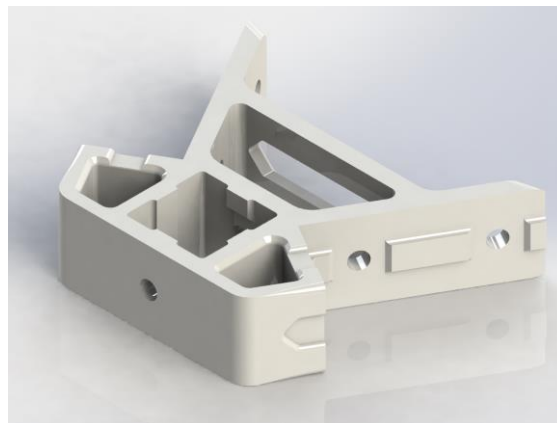
*Figura 20: Representación del volumen de trabajo del robot paralelo ABB IRB360 FlexPicker.*

*Fuente: [www.new.abb.com](http://www.new.abb.com)*

Además de esto, en cuanto al volumen, como podemos observar en la anterior (Figura 20), no tiene una forma geométrica definida si no que se compone de la intersección de las 3 circunferencias que dibujarían cada brazo. Una manera de resolver este problema sería considerando un volumen de impresión cilindro vertical.

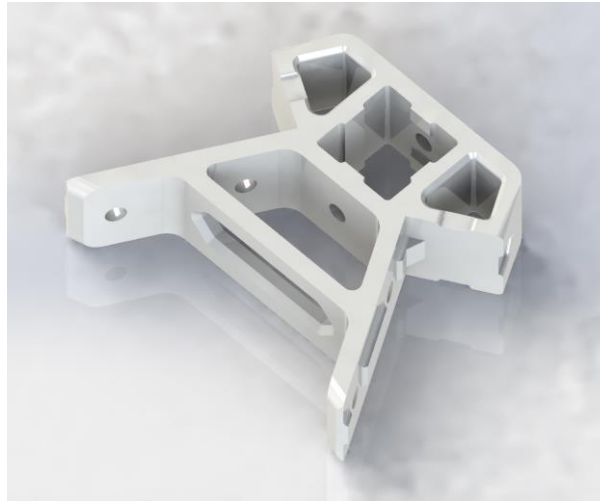
Partiendo de estas dos premisas anteriores, con este tipo de estructura nos adaptamos al volumen de impresión de los robots delta.

Como particularidad de nuestro robot delta, se presenta la problemática de que, al acoplarlo en la estructura, los brazos sobresalen del área de impresión. Como solución a esto, se ha colocado cada brazo de manera perpendicular a los lados del triángulo base de estructura. De este modo, utilizando los criterios comentados se ha procedido a crear un elemento que una la estructura diseñado utilizando SolidWorks®.



*Figura 21: Diseño pieza esquinera.*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 22: Diseño pieza esquinera mediante SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 23: Diseño esquinera de la torre.  
Fuente: Elaboración propia.*

Al ser el soporte clave que conforma la estructura de la máquina, la esquinera de las torres son una de las piezas más importantes de la estructura, y con ello, lo será su diseño. Su cometido es unir las torres verticales en perpendicularidad con los perfiles de los lados de los triángulos formando un ángulo estructural de 60° entre ellos.

Cabe mencionarse que, en el diseño, como se puede ver en la (Figura 21) - Diseño pieza esquinera mediante SolidWorks®, se ha incorporado una ranura sobresaliente extruida con el mismo ancho del perfil para promover el autoalineado de la pieza en su montaje.

Los taladros de los tornillos, con un diámetro de 4,5mm, dan una tolerancia para montaje correcta usando tornillería M4. En el diseño, se ha tenido en cuenta esto y, por ello, se ha realizado el diseño específico que tenga fácil acceso a cada cabeza del tornillo para su correcto y fácil montaje.

La estructura global de perfilera de aluminio incluyendo el soporte del cuerpo del robot -que se comentará más adelante-, con las esquineras de las torres quedaría pues, como se muestra a continuación (Figura 24):

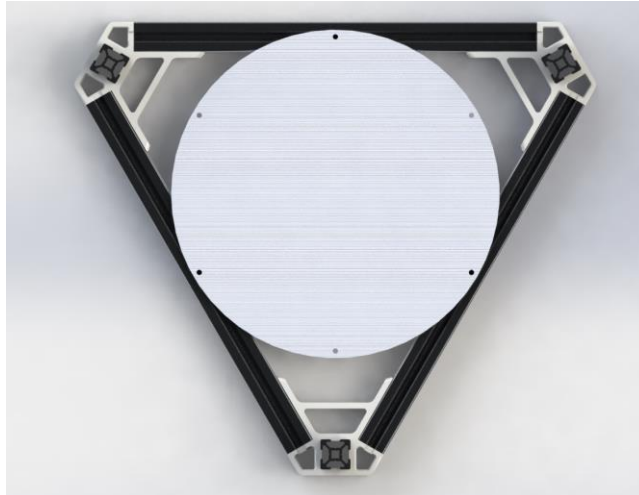


*Figura 24: Estructura prototipo RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Las cotas de los perfiles se han diseñado partiendo del volumen de impresión obtenido en el apartado 5.1.

Se ha decidido diseñar partiendo de una base cilíndrica de impresión con un diámetro supuesto de 220mm (Figura 25). Como se detallará en apartados posteriores de este documento, el diámetro final será 240mm con la adición de un cristal sobre dicha cama caliente.



*Figura 25: Base de impresión prototipo RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el soporte del cuerpo del robot, se ha optado por el diseño de 3 elementos de perfilería de aluminio en cruz unidos entre sí por un elemento de unión impreso (Figura 26). Estos, están unidos a su vez a la estructura mediante tres pequeñas escuadras de aluminio siguiendo la estética y material de la perfilería.



*Figura 26: Detalle de la estructura con el soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D*

*Fuente: Elaboración propia.*

La altura total de la estructura es de 500mm, suficiente para poder modificar cotas entre base y superficie de impresión si fuera necesario posteriormente en las siguientes fases de diseño. Los perfiles de los lados de los triángulos son de 270mm, una medida que nos permite montar una cama circular de 220mm de diámetro y además evitar interferencias con el cabezal de impresión durante el funcionamiento.

## 6.2.2 Diseño robot prototipo RoPar3D.

### Cuerpo prototipo

El cuerpo del robot es la primera pieza de nuestro puzzle. Para su diseño se partió de un triángulo inicial con las distancias del radio base y se ha ido creando todo el diseño partiendo de él.

El radio base es uno de los parámetros que definen al robot y por tanto un base sobre la que empezar el diseño (Figura 27).

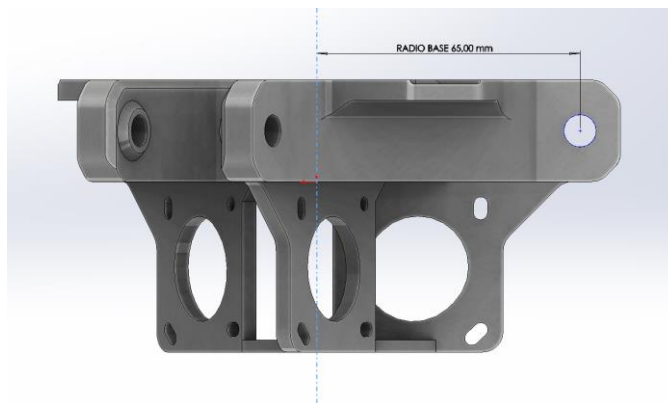


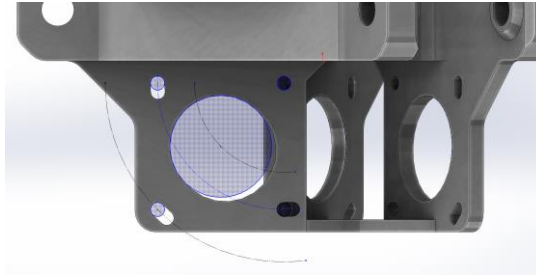
Figura 27: Cota radio base del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se empezó a diseñar en paralelo el brazo del robot para tener una dimensión de las medidas que tendría el hombro y poder así dimensionar un eje acorde a dicho brazo. Finalmente, y para poder hacer uso de rodamientos 608, se diseñó teniendo en cuenta la incorporación de un perno de 8mm.

Para seguir con el diseño del primer prototipo del cuerpo, el siguiente paso era la incorporación de los soportes de los motores nema 17. Estos motores tienen una distancia entre tornillos de 31mm, y requieren de un orificio central para facilitar su montaje incluso con la polea anclada al eje.

Uno de los problemas encontrados en esta parte de diseño, fue la incorporación de un elemento tensor para las correas. Para no dificultar el diseño con más elementos impresos y seguir así una filosofía que facilite su fabricación en FDM, se ha optado por el diseño de un tensor mediante el uso de la pivotación del motor sobre uno de los tornillos, como se puede observar en la (Figura 28). Durante el montaje tan solo tendremos que pretensar la correa y apretar el motor.



*Figura 28: Sistema tensor del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

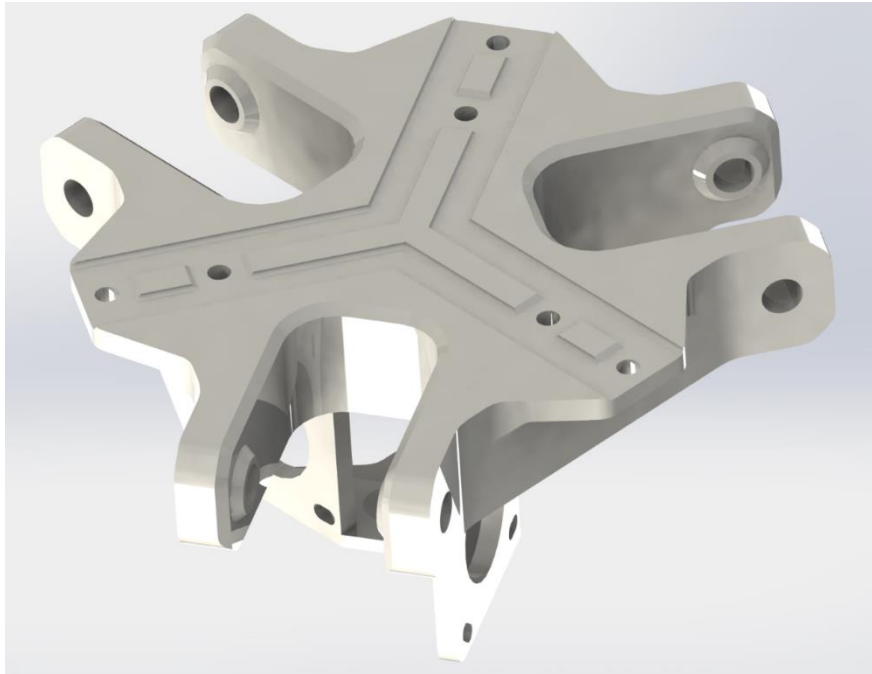
Otro de los planteamientos de diseño del cuerpo, fue el anclaje a la estructura. Una desalineación en el montaje produciría un desplazamiento de los ejes XY con respecto a la base de impresión a la hora de imprimir. Para evitar esta problemática, se ha diseñado un ranurado extruido en la base del robot (Figura 30) para ir ligeramente encastrado en el perfil de aluminio, promoviendo así el correcto autoalineado del cuerpo a la estructura durante su ensamblaje.



*Figura 29: Detalle del soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*





*Figura 30: Detalle del soporte del cuerpo del robot del prototipo RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### **Rediseño - Cuerpo robot**

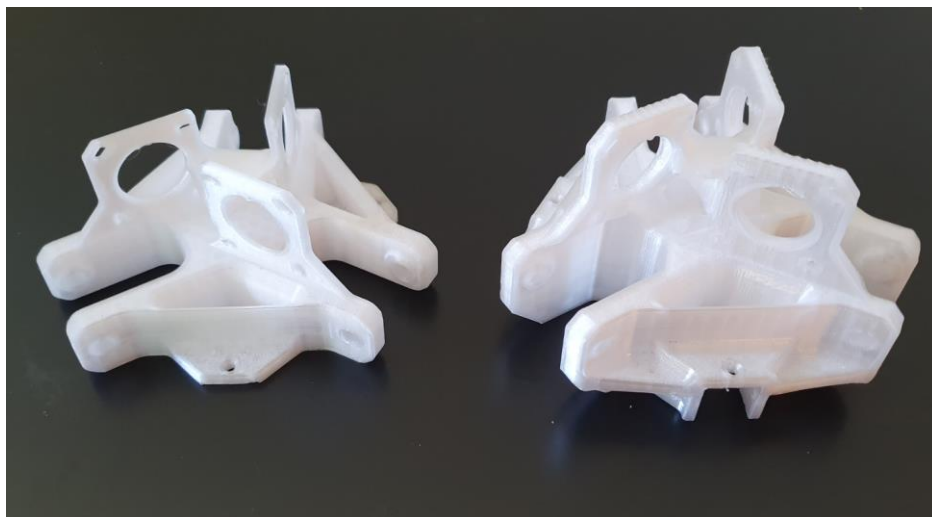
Una vez llevada a cabo la fase de pruebas con el prototipo del robot, se han observado algunos fallos de diseño por lo que, se ha profundizado más en el diseño para optimizarlo en distintos detalles entre los que cabe mencionar los siguientes:

El problema observado tras la fabricación del primer prototipo de la base del robot se detectó en el soporte de los motores, los cuales flexaban al aplicar tensión en la correa del motor. Esto suponía un defecto que se traducía en una tensión irregular en la correa durante los cambios de sentido de giro del motor impidiendo el giro uniforme de la polea dentada. Además, no permitía ajustar la tensión deseada en la correa.



*Figura 31: Diseño cuerpo RoPar3D.  
Fuente: elaboración propia*

Para solventar el problema se ha optado por aumentar el espesor de la pared, pasando de 4 mm a 7 mm (Figura 33). Esto se ha hecho teniendo en cuenta la longitud de los tornillos elegidos para la máquina, con el fin de evitar un sobrecoste adicional (e imprevisto) en unos tornillos más largos y porque, al aumentar la sección de la pared de impresión, se evita cualquier interferencia con el brazo del robot durante su giro. En la siguiente fotografía (Figura 32) podemos ver una comparativa real entra ambos cuerpos de robot.



*Figura 32: Comparativa real Cuerpo prototipo y Cuerpo final.  
Fuente: Elaboración propia.*

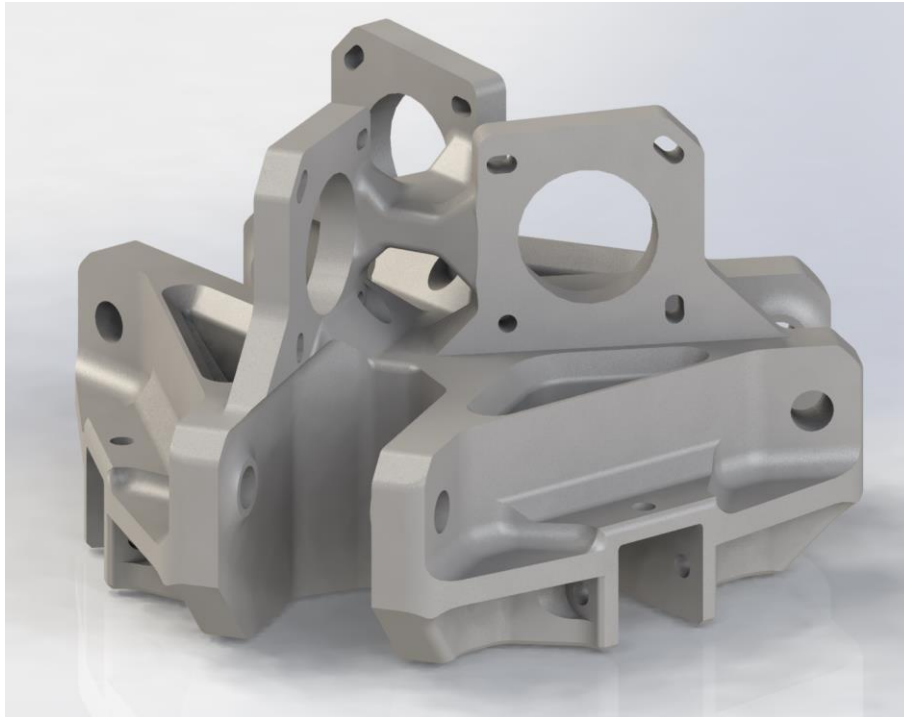


Figura 33: Render diseño cuerpo final del robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Para la validación del diseño también se ha realizado un estudio comparativo de los resultados de las simulaciones utilizando SolidWorks®. Para el caso de las tensiones en el soporte de motor (Figura 34 y 35) podemos observar en los siguientes gráficos que hemos conseguido una reducción de tensiones máximas de un -30,8 %.

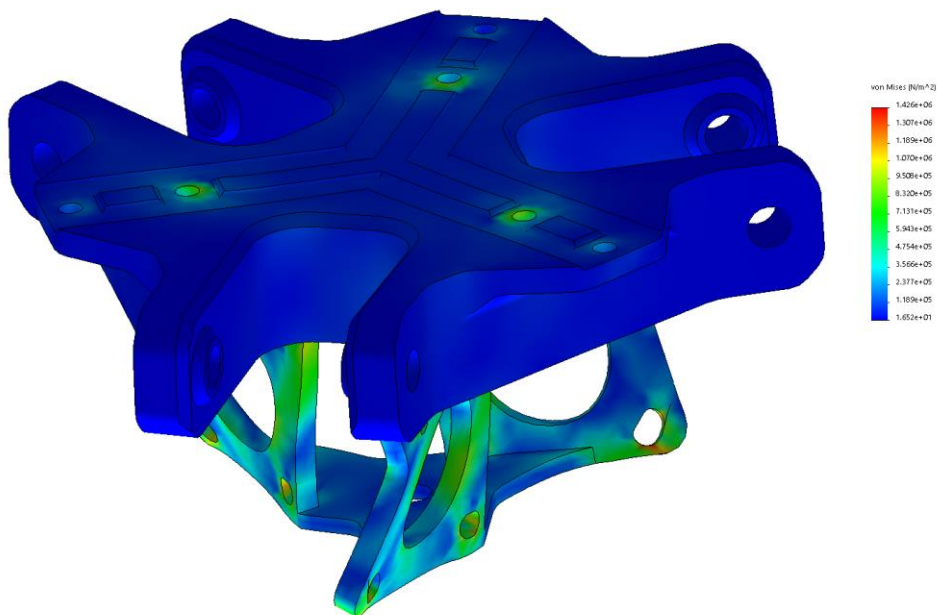


Figura 34: Resultado estudio tensiones cuerpo prototipo robot.

Fuente: Elaboración propia.

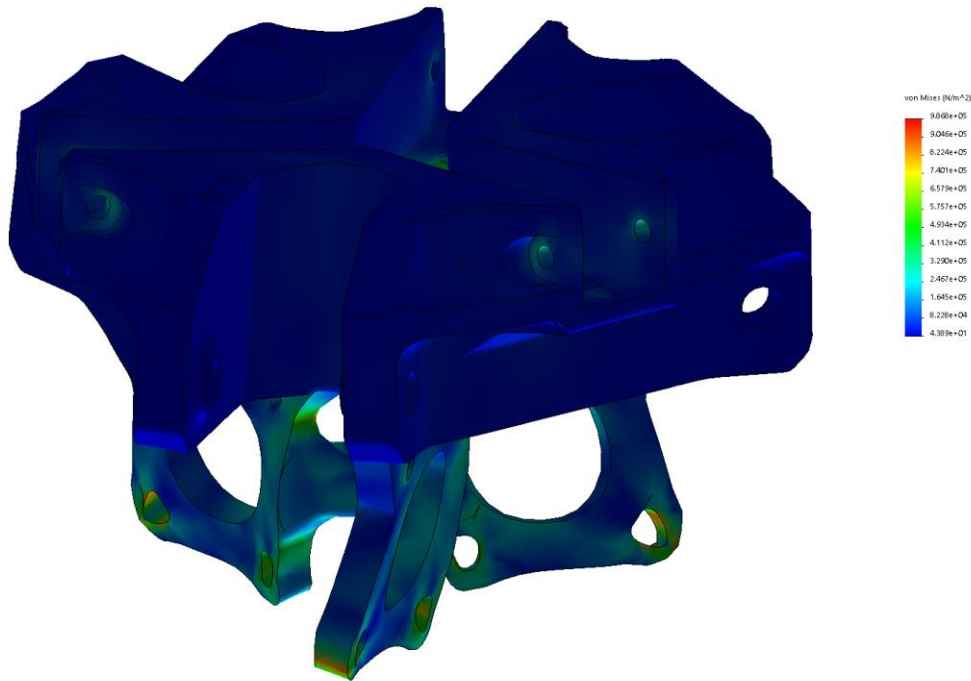


Figura 35: Resultado estudio tensiones cuerpo final robot.  
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los desplazamientos máximos en la zona de soporte del motor (Figura 36 y 37) se ha pasado de un desplazamiento máximo en el prototipo de  $3,263 \cdot 10^{-2}$  mm a un desplazamiento máximo de  $7,754 \cdot 10^{-3}$  mm, lo que supone una reducción de -76,25%, lo cual supone un enorme cambio en el comportamiento.

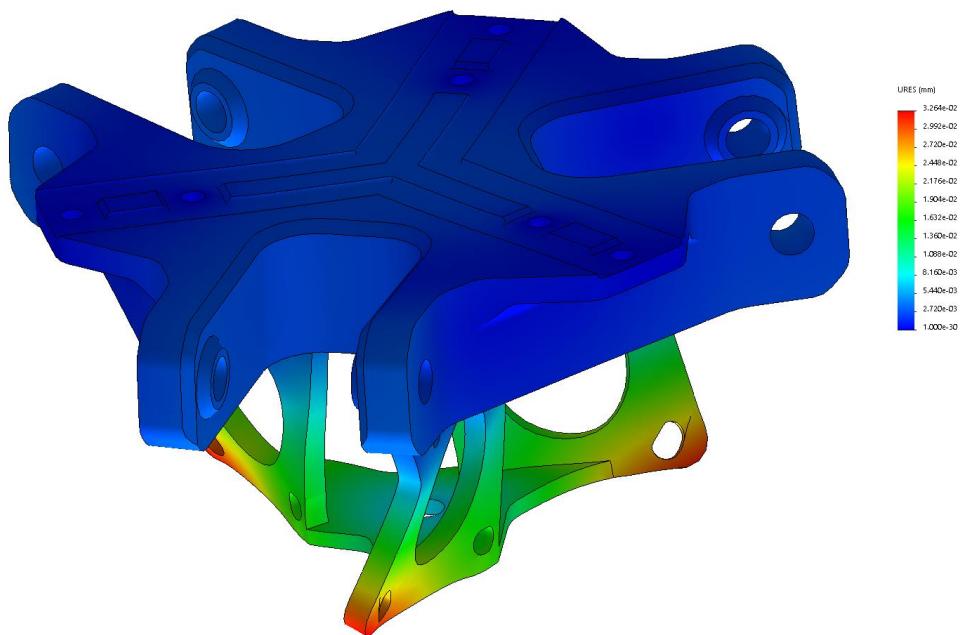


Figura 36: Resultado estudio desplazamientos cuerpo prototipo robot.  
Fuente: Elaboración propia.

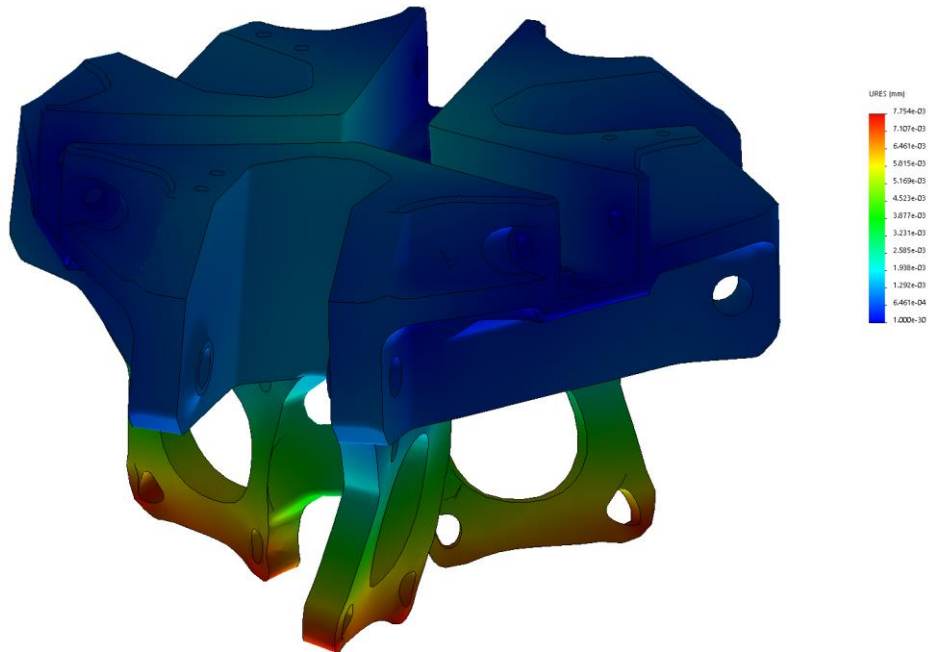


Figura 37: Resultado estudio desplazamientos cuerpo final robot.

Fuente: Elaboración propia.

De manera adicional, para aumentar aún más la rigidez del conjunto de soportes de motores, se han incrementado los espesores de la pared intermedia que los une, así como de los chaflanes que unen estos con el cuerpo base de la pieza.

En esta parte del diseño también se han afinado las cotas de la parte del tensor pivotante del motor, para aumentar el espesor de la pared de las ranuras de los tornillos, ya que, en el prototipo podía quedar algo escaso.

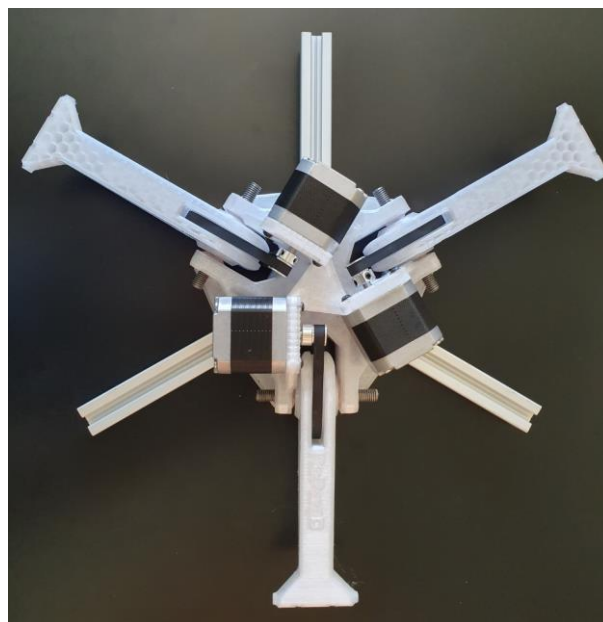
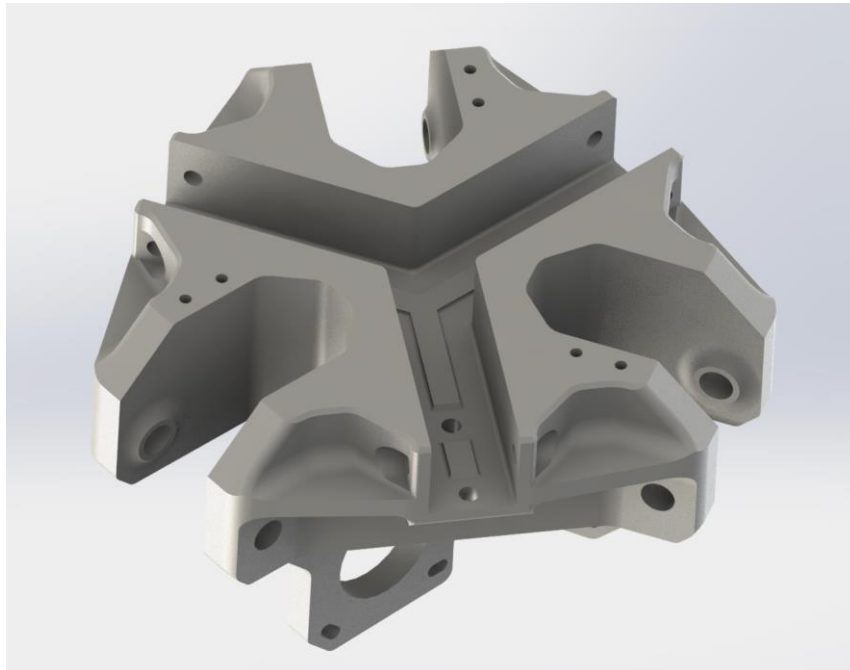


Figura 38: Ensamblaje real cuerpo y brazos robot con motores.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto a las mejoras en la pieza; contamos con una modificación de la unión de la base a la estructura. El prototipo contaba con la unión a los perfiles de la estructura a través de 6 pernos todos ellos desde la cara inferior de la cruz que sujeta el robot (Figura 39). Para el diseño final de RoPar3D, ha modificado la forma del cuerpo de tal forma que el cuerpo del robot abraza a los perfiles en 3 de sus caras y no solo en una como sucede en el prototipo. Esto se traduce en que, de los 6 pernos originales, se pasa a 12 pernos. Además, al tener el cuerpo del robot encastrados de tal manera los perfiles de aluminio, será menos propenso a errores de montaje estructurales y añadirá con ello más rigidez al conjunto.



*Figura 39: Render diseño final unión cuerpo del robot RoPar3D.*

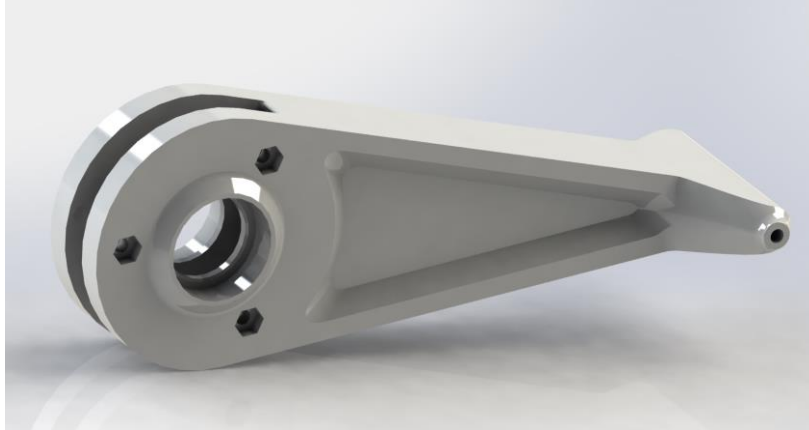
*Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, se han añadido unos taladros para la incorporación de un nuevo soporte para los finales de carrera que va a ir incorporado en el propio cuerpo, haciendo de este modo independiente el cero máquina del robot de la posición dentro de la estructura de éste, por lo que cumplimos uno de los propósitos del diseño inicial de este TFG de hacerlo modular e independiente de la estructura con el fin de hacerlo adaptable.



## Brazo

Este apartado es el más importante dentro del diseño del robot dado que es el elemento que iniciará el movimiento de todo el mecanismo a la par que comanda el giro de los motores y mantiene el paralelismo de los antebrazos.

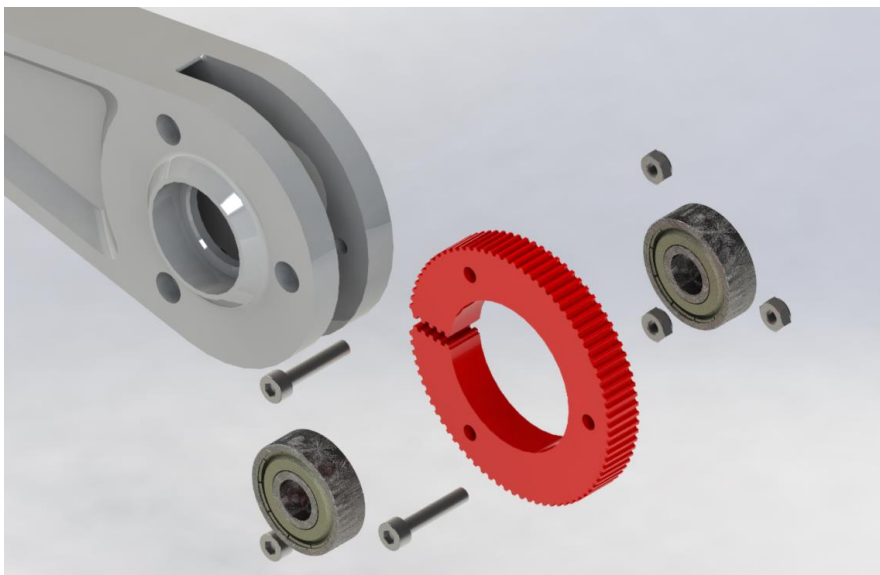


*Figura 40: Diseño del brazo prototipo robot del prototipo RoPar3D.*

Fuente: Elaboración propia.

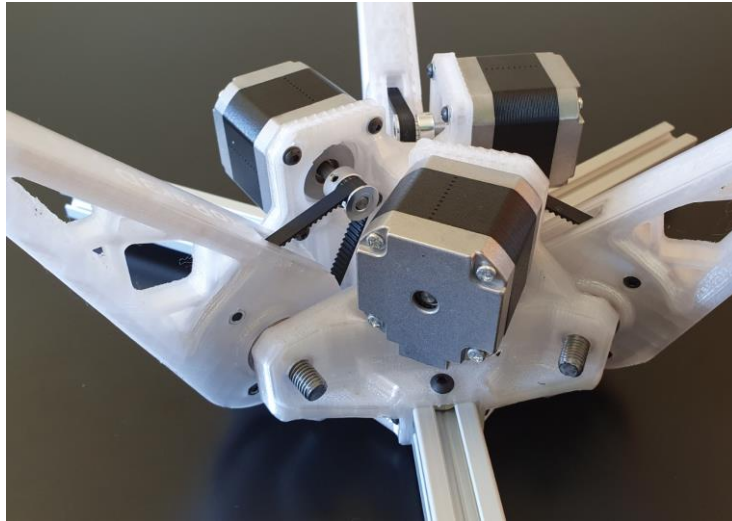
Partimos para el diseño de los parámetros del robot ya decididos en el apartado 6.1, como son la longitud de brazo y la relación de transmisión. Otros a tener en cuenta serán la distancia entre rotulas que dará el paralelismo con el efector y el diámetro para los rodamientos del eje de giro del brazo.

Para el diseño del brazo del robot, se ha comenzado por la cota de longitud de brazo, (rf) 120mm, que nos otorga la distancia entre el eje de giro del brazo y el eje de giro de la unión con los antebrazos, siendo uno de los parámetros característicos del robot.



*Figura 41: Vista explosionada del sistema de engranaje del brazo prototipo robot RoPar3D.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 42: Detalle cuerpo con brazos y motores.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el eje del brazo, se ha optado por el uso de un perno de 8 mm (Figura 42) de longitud no roscada para su unión al cuerpo para que sirva de eje de giro para ir montado sobre rodamientos de bolas 608RS ABEC 9. Dos rodamientos van colocados en ambas caras del brazo, alojado en unos zócalos especialmente diseñados para que apoyen sobre la pista exterior del rodamiento.

De este modo, al apretar el perno de unión este estará en contacto con la cara interna del rodamiento evitando así cualquier holgura que pueda producirse en el rodamiento.



*Figura 43: Detalle rueda prototipo izquierda y rueda final derecha.*

*Fuente: Elaboración propia.*



Por otro lado, se pretende que el brazo integre la rueda dentada independiente que dará la relación de transmisión deseada 1:5. Para ello, se ha tomado como base el diseño del perfil de la correa GT2 y se ha diseñado una rueda dentada con el número de dientes necesario para conseguir la relación de transmisión, (Figura 43). En cualquier caso, el diseño abierto permite optar por una rueda con otro número de dientes sin tener que cambiar el brazo por completo, tan solo la rueda dentada permitiendo posibles futuras mejoras y cambios.

Este engranaje, se une al brazo a través de 3 pernos M3 de 16mm, los cuales tienen diseñados unos zócalos que los empotran en el propio cuerpo del brazo.

A su vez, se encarga de sujetar los extremos de la correa para facilitar el montaje en el motor.

### **Cálculo relación de transmisión rueda dentada.**

Para lograr la relación de transmisión deseada de 1:5 partimos de que el piñón del motor cuenta con un total de 16 dientes. Para calcular el número de dientes necesario en la rueda dentada del brazo aplicamos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Datos:} \\ i &= 1:5 \\ Z_e &= 16 \\ i &= \frac{Z_e}{Z_s} \end{aligned}$$

$$0,2 = \frac{16}{Z_s} \rightarrow Z_s = \frac{16}{0,2} = 80$$

$$Z_s = 80 \text{ Dientes}$$

Por lo tanto, tendremos que diseñar una rueda dentada con un total de 80 dientes para cumplir la relación de transmisión 1:5. Para ello tendremos que basarnos en la especificación del diseño de las correas GT2 (Figura 44) que vamos a usar para poder crear el diseño de la envolvente del perfil del diente.

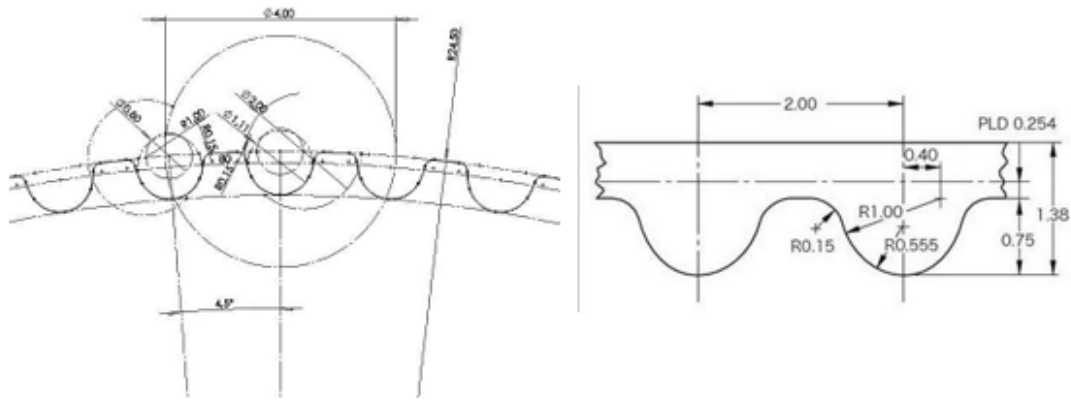


Figura 44: Croquis envolvente del diente en rueda dentada y perfil de correa GT2.

Fuente: Elaboración propia.

Tras la generación de la envolvente del perfil para el dentado, se ha creado una ranura, también con dentado, para la sujeción de la correa en la rueda (Figura 45). Se ha incorporado el taladrado de los 3 pernos pasantes de unión con el brazo. A modo adicional se ha rebajado el material de la pieza con unos cortes acanalados, como podremos ver en el apartado de prototipado, rigidizando así aún más el modelo.



Figura 45: Render diseño rueda dentada 80 dientes para correa GT2.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la parte de la unión con los antebrazos, se ha diseñado un terminal de la pieza con un ancho de 51mm que corresponde con el ancho en el otro extremo, en el efector. Para la unión de las rotulas de los antebrazos con el brazo, se ha optado por el uso de un perno M3 de 25mm el cual lleva una tuerca insertada en el propio diseño.

Para la masa restante del cuerpo, se ha procedido a realizar un ensayo de elementos finitos con la herramienta de simulación de SW para tener una imagen de la distribución de tensiones en

la pieza y con el cometido de realizar una optimización que, además de un aspecto más ligero, intente reducir peso y ahorrar impresión sin perder rigidez. Para ello primero tenemos que conocer las cargas a las que estará sometido:

### Calculo fuerza máxima en extremo de brazo.

Para calcular la fuerza máxima en el extremo del brazo que puede soportar el mecanismo, debemos tener en cuenta el par ejercido por el motor en el eje de este.

Para ello tenemos que trasladar el par en el eje motor (M1) al eje del brazo (M2) a través de la relación de transmisión.

El par en el eje motor lo obtenemos de las especificaciones del motor, en nuestro caso para el motor nema 17 42HD4027-01 tenemos un par de retención de 0,4Nm.

Para trasladar el par del eje motor al eje de brazo utilizamos las ecuaciones fundamentales de relación de transmisión.

$$\frac{M_1}{r_1} = \frac{M_2}{r_2} \rightarrow \frac{M_2}{M_1} = \frac{r_2}{r_1} = i$$

Como conocemos los valores de la relación de transmisión (i) y del par motor en el eje motor (M1), solo nos queda despejar:

$$\frac{M_2}{M_1} = i$$

$$M_2 = \frac{M_1}{i} = 0,4 * 0,2 = 2 Nm$$

Una vez obtenido el par en el eje de giro del brazo, pasamos a dibujar el diagrama de solido libre (Figura 46) del brazo para identificar las fuerzas:

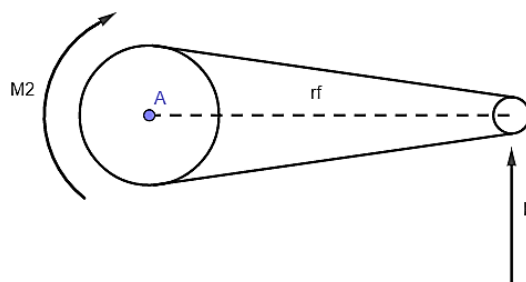


Figura 46: Diagrama solido libre brazo.

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando las ecuaciones de equilibrio de momento en el punto A:

$$\sum M_a = 0$$

$$M_2 - F * r_f = 0 \rightarrow F = \frac{M_2}{r_f}$$

$$F = \frac{2 \text{ Nm}}{0,12 \text{ m}} = 16,67 \text{ N}$$

Esta fuerza es la que aplicada en el extremo del brazo contrarrestaría la ejercida por el par motor, por lo tanto, la fuerza que produciría un fallo durante el movimiento (perdida de pasos).

Una vez que conocemos la fuerza máxima que nos produciría un fallo, podemos utilizarla para realizar un ensayo de simulación de carga estática en SW y ver cómo se comporta el brazo.

### Simulación

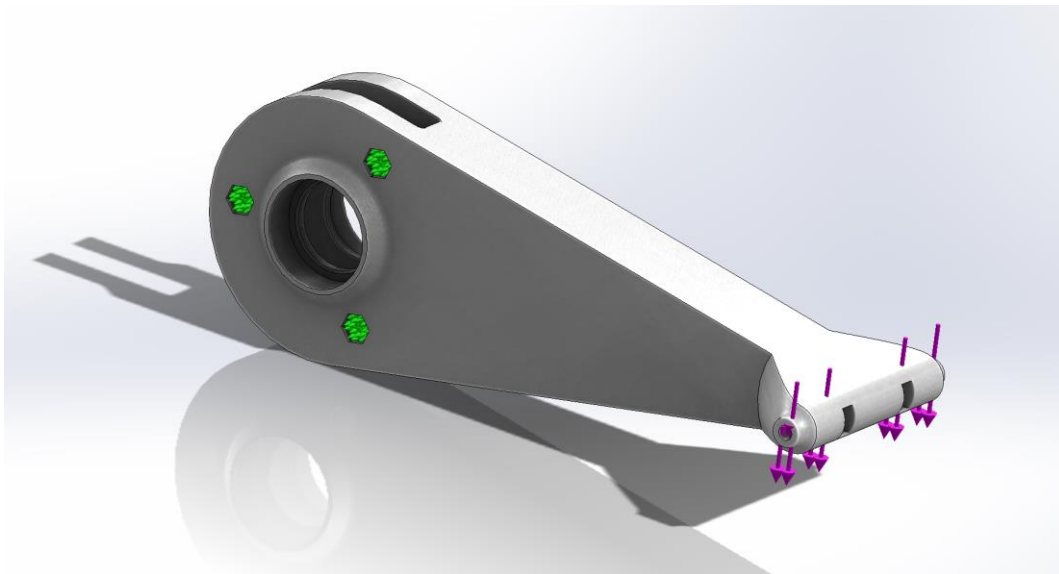


Figura 47: (Cargas)Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Se le han aplicado unas sujeciones fijas en los pernos, además de una carga perpendicular al plano de giro en el eje de unión con los antebrazos donde estarán aplicadas las cargas durante su funcionamiento (Figura 47). Tras realizar el ensayo, se han obtenido los siguientes resultados:

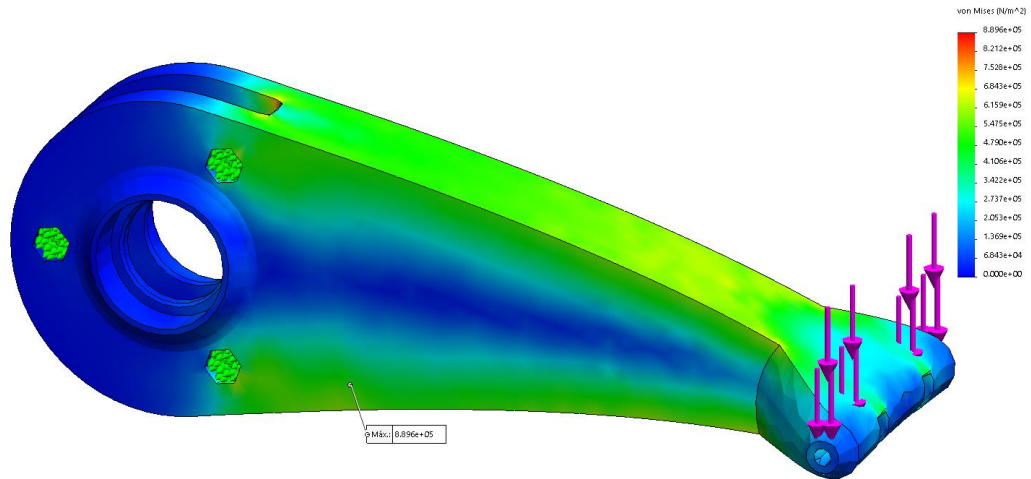


Figura 48: (Tensiones- VonMises). Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.  
Fuente: Elaboración propia.

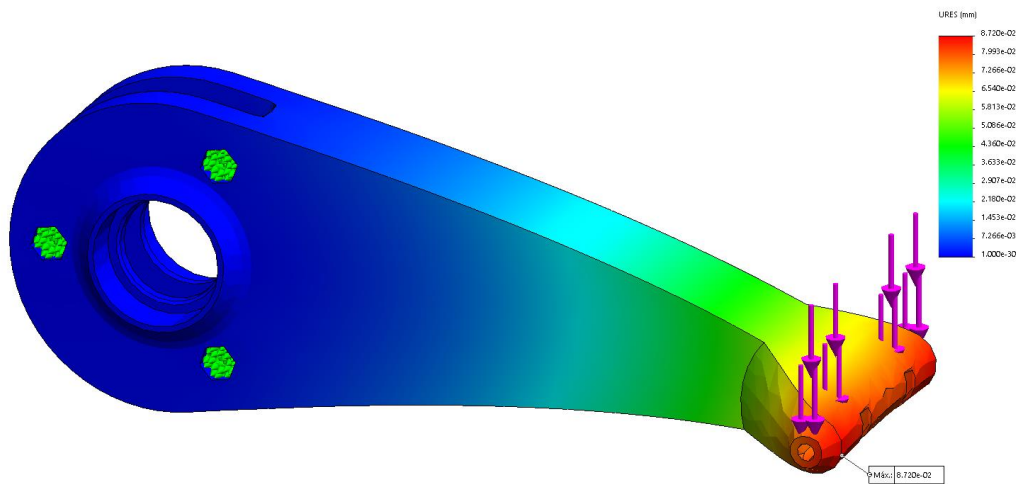


Figura 49: (Desplazamientos - URES (mm)). Ensayo de elementos finitos del brazo prototipo robot RoPar3D.  
Fuente: Elaboración propia.

Como dato relevante, se puede observar en la imagen de distribución de tensiones (Figura 48) estas se concentran en las cara inferior y superior del brazo. Nos puede dar una idea de por donde recortar material.

Masa = 118.59 gramos  
 Volumen = 83512.88 milímetros cúbicos  
 Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 46.01  
 Y = 0.14  
 Z = 10.01

Otro dato a tener en cuenta es el centro de masa del modelo: nos interesa que este lo más centrado al eje de giro del brazo para reducir las inercias que se generaran durante los cambios de dirección en su funcionamiento.

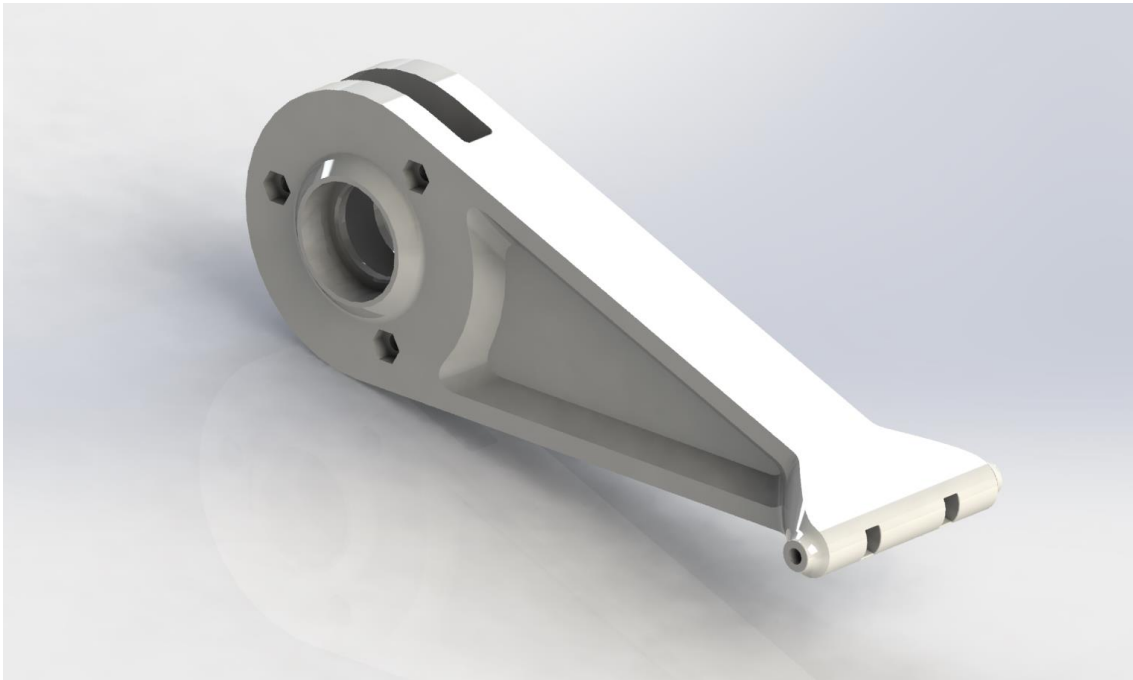


Figura 50: Segunda Iteración del diseño del prototipo del brazo de robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Tras estas conclusiones, se ha decidido crear un rebanado de las caras laterales para reducir peso y por lo tanto inercias (Figura 50). Que nos han dado los siguientes resultados en simulación de carga a través de SW:

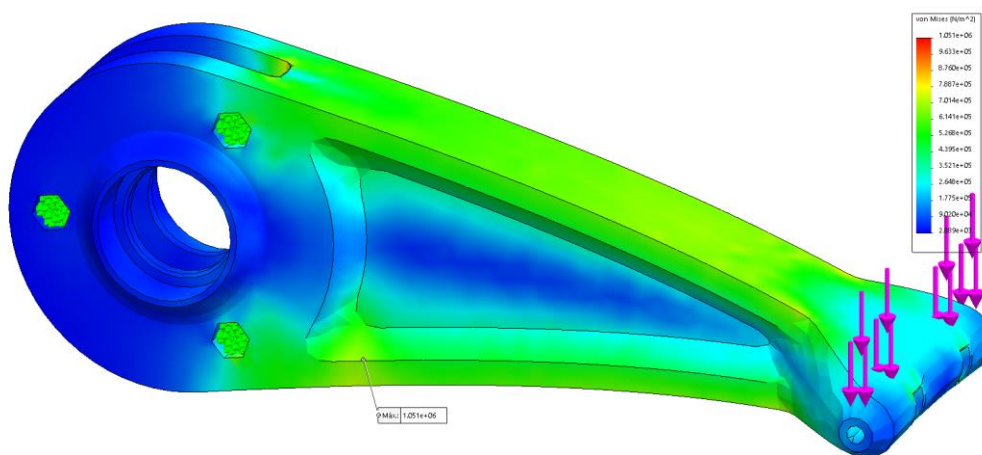


Figura 51: (Tensiones-VonMises). Ensayo de elementos finitos segunda iteración del brazo prototipo robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

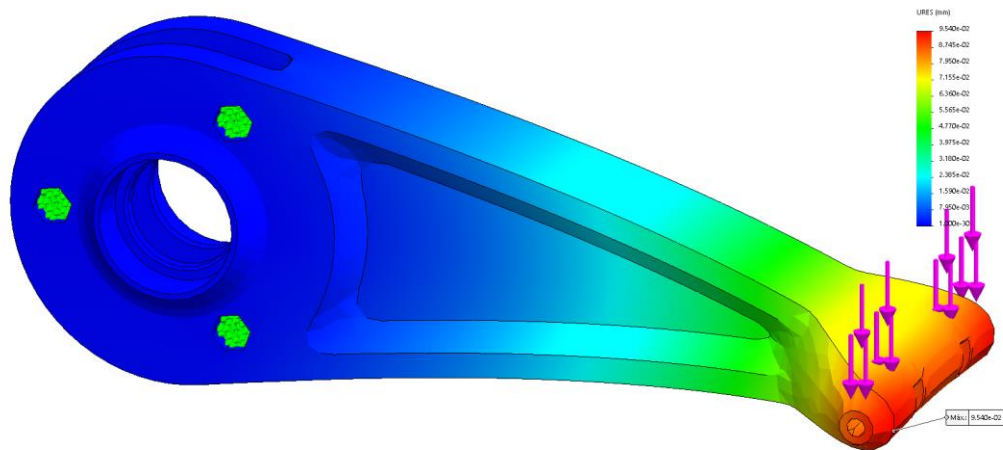


Figura 52: (Desplazamientos – URES (mm)). Ensayo de elementos finitos segunda iteración del brazo prototipo robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los resultados con los obtenidos en el primer diseño del brazo podemos concretar qué; en cuanto a las tensiones máximas (Figura 51) se han incrementado en un 18,2%, sin embargo, los desplazamientos máximos (Figura 52) solo se han incrementado en un 9,4%.

Masa = 103.05 gramos

Volumen = 72571.69 milímetros cúbicos

Centro de masa: ( milímetros )

X = 44.60

Y = 0.16

Z = 10.01

En cuanto a la reducción de peso lograda, hemos pasado de 118,59 gramos a 103,05 gramos, lo que supone una reducción de 13,1%. Además, hemos logrado desplazar el centro de masa hacia el eje de giro 1,41 mm. Por lo que en general es una optimización satisfactoria.

Este diseño es el que se ha utilizado durante las pruebas de prototipado de la maquina y que podemos ver ensamblado en la siguiente imagen (Figura 53):



Figura 53: Ensamblaje RoPar3D prototipo SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.

Con el cometido de cumplir con uno de los propósitos del TFG, que pretendía realizar un análisis topológico para optimizar el elemento más crítico de nuestro robot, partiendo del prototipo anterior del brazo del robot, se ha realizado un ensayo topológico en SolidWorks® buscando una reducción de peso del 10% y limitando las caras a tratar a las formadas por las laterales del brazo.

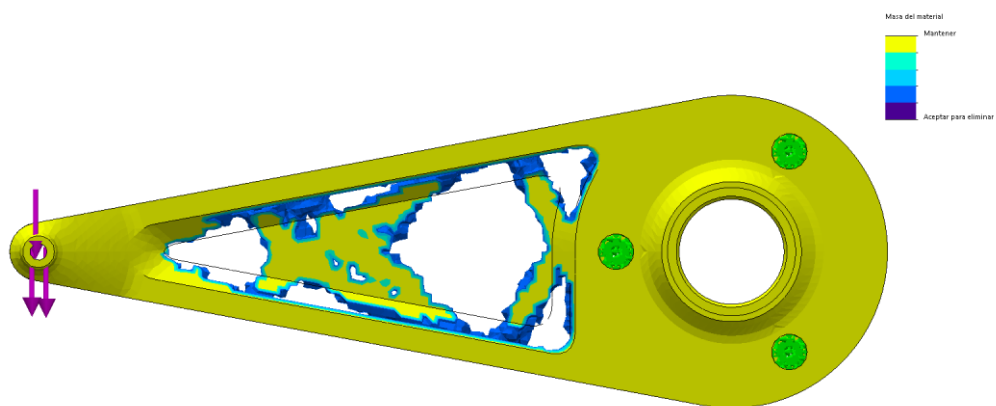


Figura 54: Tercera Iteración del diseño del prototipo del brazo de robot RoPar3D tras ensayo topológico.  
Fuente: Elaboración propia.

Tras los resultados arrojados por el ensayo topológico en nuestro brazo del robot (Figura 54) podemos observar las zonas que se nos sugieren a mantener y a eliminar. Con esta información se procede a la aproximación manualmente mediante extrusión de corte en el lateral de la pieza para eliminar el material sugerido, que se asemeja a un entramado estructural que corresponderían con las líneas de tensión que recorren el modelo. Lo que finalmente ha resultado en el siguiente diseño:



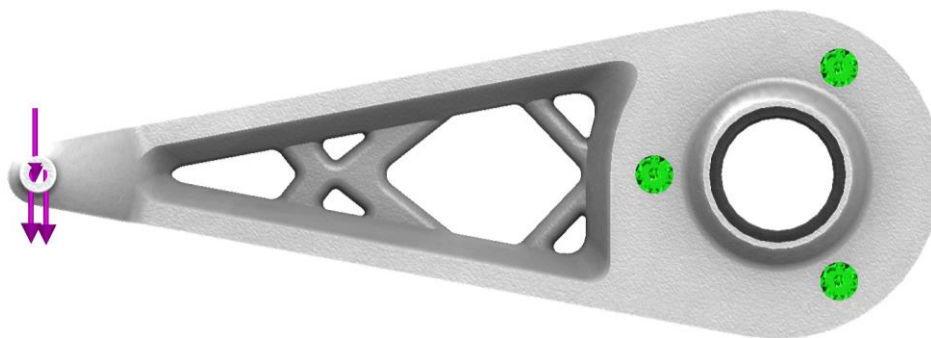


Figura 55: Tercera Iteración del prototipo brazo de robot RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado en la optimización del diseño (Figura 55) se han conseguido finalmente las siguientes propiedades en el modelo:

Masa = 89.63 gramos  
 Volumen = 63117.94 milímetros cúbicos  
 Centro de masa: ( milímetros )  
 X = 43.39  
 Y = 0.15  
 Z = 10.01

Se ha conseguido una reducción de masa en el modelo final optimizado topológicamente hasta los 89,63 gramos, lo que supone una reducción de un 24,42% frente al diseño inicial que podemos ver en la tabla 8 comparativa:

PROPIEDADES	ENSAYOS		
	<u>1º ITERACIÓN</u>	<u>2º ITERACIÓN</u>	<u>3º ITERACIÓN</u>
<b>MASA (g)</b>	118,59	103,05	89,63
<b>REDUCCIÓN (%)</b>	-	-13,1	-24,42

Tabla 8: Comparativa reducción de masa.

Fuente: Elaboración propia.

Además, se ha mejorado aún más el centro de masa, quedando todavía más desplazado hacia el centro de giro situado en X 0mm. Pasando desde el modelo inicial situado en la cota X 46,01 mm a una cota X 43,39 mm en el modelo final.

Volvemos a realizar un estudio de simulación sobre el diseño final para poder valorar mejor los resultados del modelo (Figura 56 y 57):

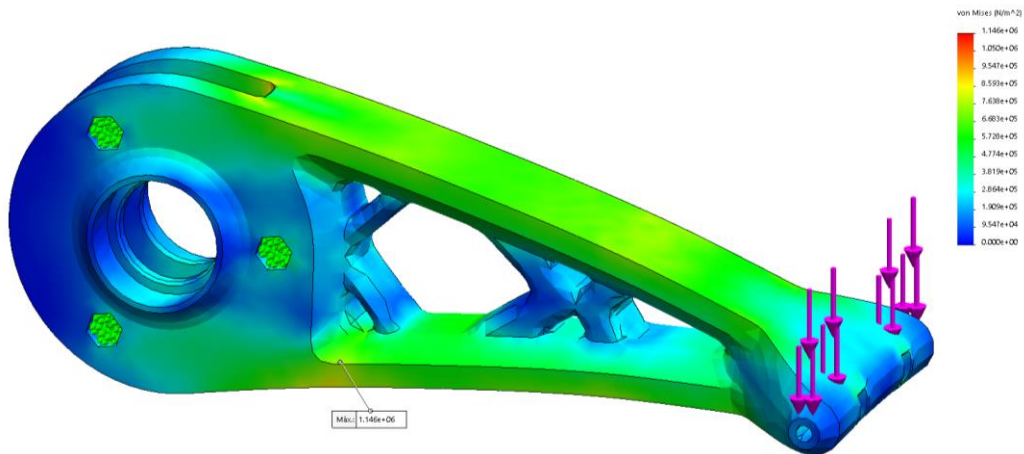


Figura 56: (Tensiones-VonMises). Ensayo de elementos finitos tercera iteración del brazo robot RoPar3D.  
Fuente: Elaboración propia.

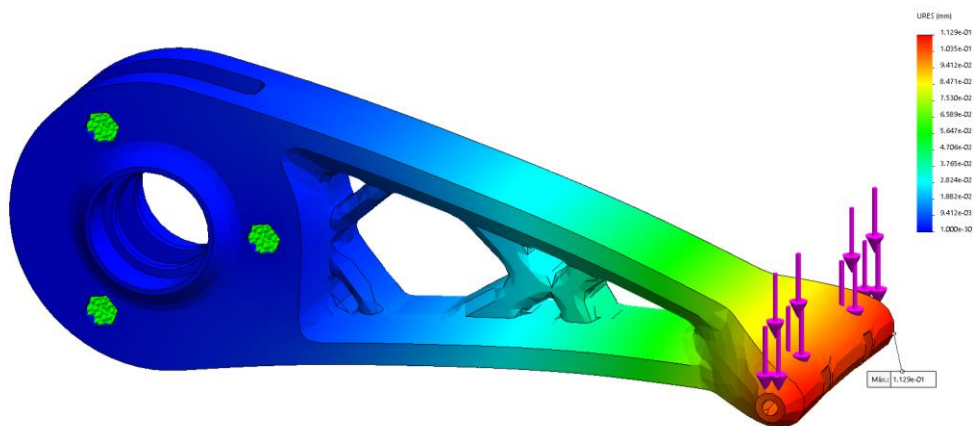


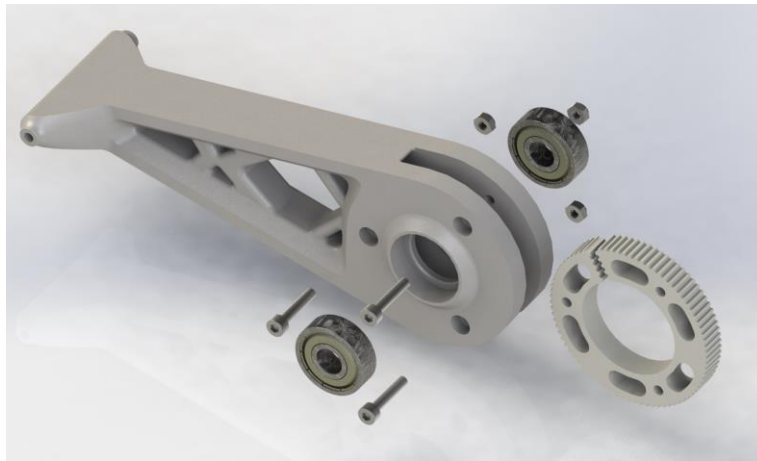
Figura 57: (Desplazamientos - URES (mm)). Ensayo de elementos finitos tercera iteración brazo robot RoPar3D.  
Fuente: Elaboración propia.

Para valorar mejor los resultados de la simulación con respecto a las de los anteriores diseños se ha creado la siguiente tabla:

PROPIEDADES	ENSAYOS		
	<u>1º ITERACIÓN</u>	<u>2º ITERACIÓN</u>	<u>3º ITERACIÓN</u>
<b>TENSIÓN (N/m<sup>2</sup>)</b>	8,896e5	1,051e6	1,146e6
<b>VARIACIÓN (%)</b>	-	18,2	28,8
<b>DESPLAZAM. MAX (mm)</b>	8,720e-2	9,540e-2	1,129e-1
<b>VARIACIÓN (%)</b>	-	9,4	29,4

Tabla 9: Comparativa simulaciones.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 observar que el porcentaje de desplazamientos con respecto al primer diseño se ha elevado aún más que con respecto a las tensiones máximas. Esto puede parecer que está comprometiendo el diseño de la pieza. Sin embargo hay que tener en cuenta que SW realiza la simulación para un material solido uniforme, aunque las piezas se van a fabricar mediante fabricación aditiva lo que supondrá unas propiedades finales distintas en la pieza, que debido a las características propias del tipo de fabricación no supondrán una reducción de las propiedades si no que las aumentaran, al concentrar el material de la piezas en las zonas de tensiones y no en un relleno difuso de material que no es susceptible a soportar cargas.



*Figura 58: Vista explosionada ensamble brazo RoPar3D.*

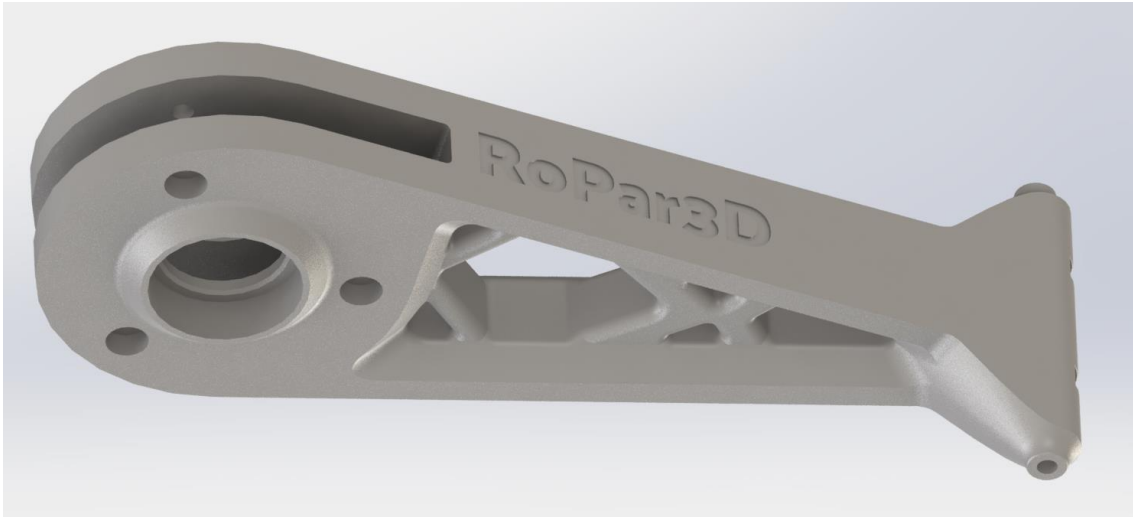
*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 59: Ensamblaje real del brazo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Como elemento final y a modo de personalización de la máquina, se ha añadido un logotipo en el brazo del robot (Figura 60) el cual quedará visible en los brazos durante el estado de cero maquina en la impresora. Para introducir el logotipo de RoPar3D se ha recortado una profundidad de 0,16mm, que coincide con la altura de capa de impresión, para que en el resultado final se note el contraste de brillo en la pieza.



*Figura 60: Logo en brazo RoPar3D.*

Fuente: Elaboración propia.

### **Efactor**

Es la parte final de los brazos del robot, en él terminan los antebrazos paralelos y sobre él va montado el cabezal de impresión (Figura 61). En este elemento se ha optado por una opción comercial fabricada en aluminio, ya que al ir montado en la boquilla de impresión está expuesta a altas temperaturas lo que provocaría problemas en caso de un diseño fabricado por impresión.



*Figura 61: Ensamblaje conjunto efector SolidWorks®.*

Fuente: Elaboración propia.

En el efector encontramos dos parámetros principales (Figura 62) en su diseño que afectan a la cinemática de nuestra máquina. Por un lado, el ancho entre antebrazos, o distancia entre  
 Diseño y fabricación de impresora 3D basada en robot paralelo tipo Delta – RoPar3D

rotulas, que tiene que coincidir con el ancho en el otro extremo, en el brazo. Esta distancia es la que mantiene el paralelismo entre las varillas y nos permite movimientos en un mismo plano.

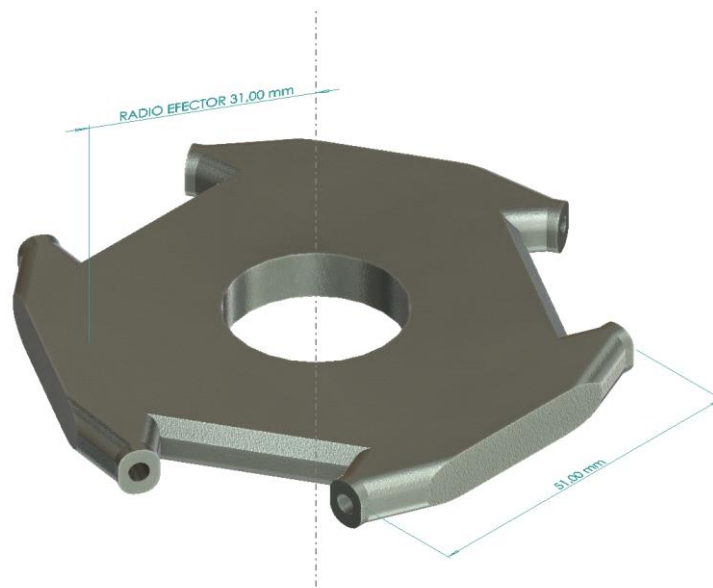


Figura 62: Modelo 3D efector con parámetros característicos .

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, está el parámetro radio efector, que es la cota entre el eje central del efector y el eje de giro de las rotulas. Este parámetro se usa para la calibración dimensional en el firmware.

### Finales de carrera

Para facilitar las pruebas con el prototipo se ha decidido diseñar unos pequeños soportes impresos para la colocación de los microswitch de los finales de carrera sobre los perfiles superiores de la estructura (Figura 63) en los cuales llega el recorrido máximo de los brazos.



Figura 63: Detalle ensamblaje final de carrera prototipo SolidWorks®.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente tras las pruebas con el prototipo se decidió rediseñar los finales de carrera para cumplir con el propósito del diseño inicial de hacer modular e independiente el robot de la estructura. De este modo se ha creado un soporte que va anclado al cuerpo del robot unido a él por dos pernos M3 (Figura 64).



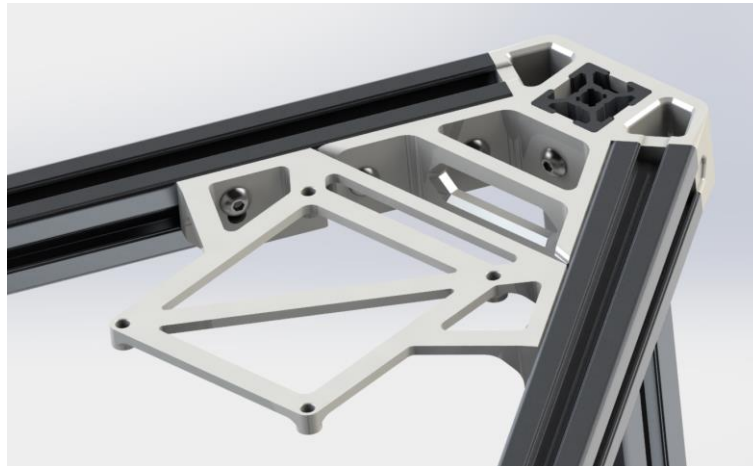
*Figura 64: Detalle ensamblaje final de carrera SolidWorks®.*

*Fuente: Elaboración propia.*

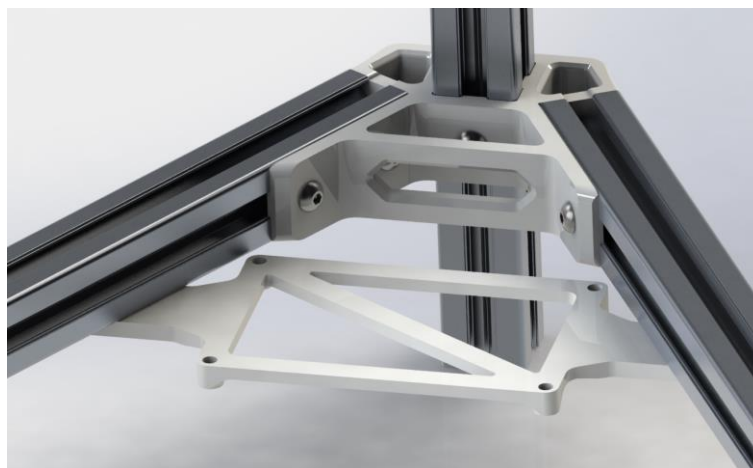
### **Elementos de soporte**

Para poder albergar en la estructura los componentes electrónicos se han diseñado soportes para cada uno con el objetivo de un fácil acceso para su manipulación y un diseño sencillo de producir por impresión 3D. El diseño de cada soporte ha ido enfocado en la impresión por FDM, buscando superficies planas para su fácil adhesión a la plataforma y extrusiones verticales que no presenten problemas a la hora de imprimir. Estos soportes se pueden ver en las siguientes (Figuras 65, 66, 67 y 68).





*Figura 65: Diseño soporte electrónica SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 66: Diseño soporte placa SBC - Orange Pi (mini pc) SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 67: Diseño soporte mosfet externo cama caliente SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.*

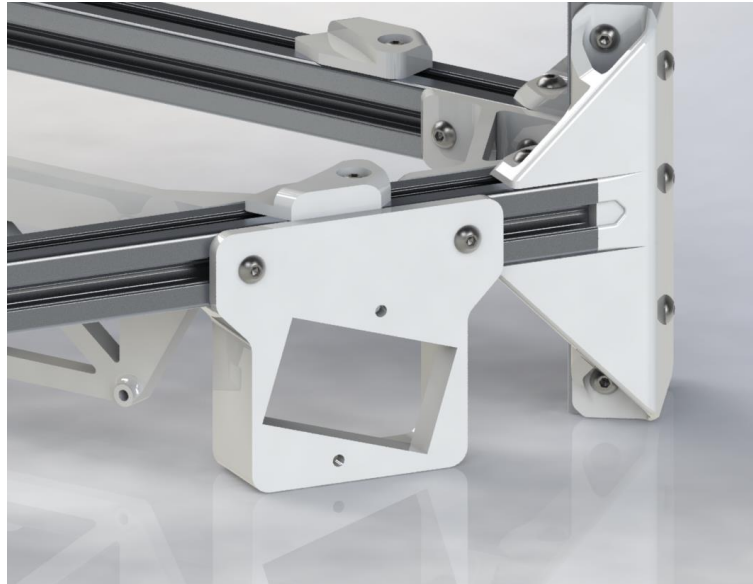


Figura 68: Diseño soporte conector interruptor de alimentación SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.

### Soportes cama de impresión

Como se comentaba en apartados anteriores, en el diseño final se ha implementado una cama de cristal de  $\varnothing 240\text{mm}$  que ira apoyada sobre la cama caliente de  $\varnothing 220\text{mm}$  (Figura 69). De esta manera hemos aumentado el área de impresión final dando así un margen de seguridad para imprimir en los límites de la plataforma. Para unir ambas partes se han implementado unos soportes los cuales fijan a presión el cristal para su fácil retirada entre impresiones.

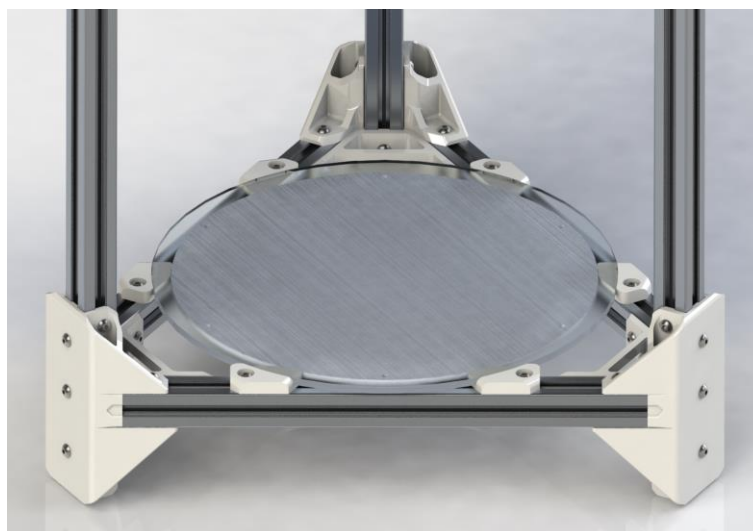


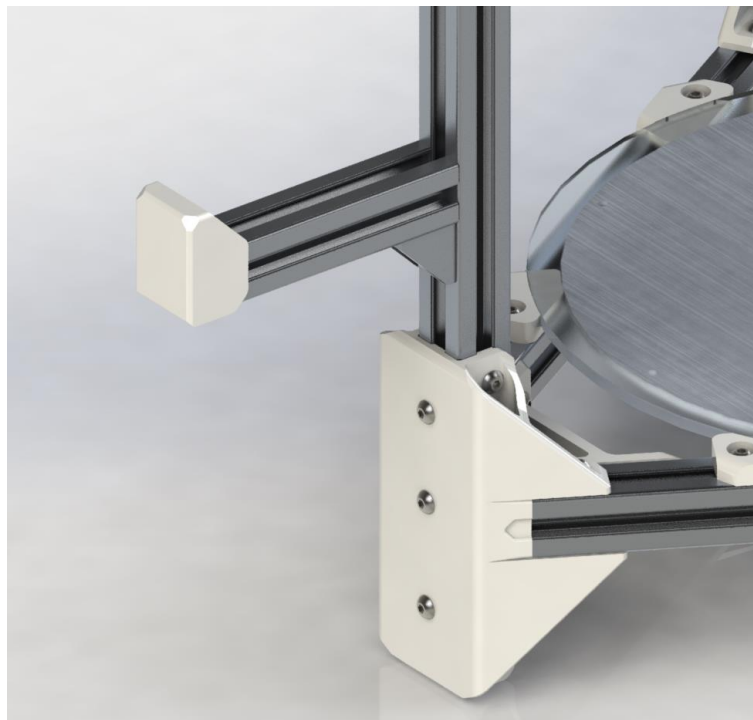
Figura 69: Ensamblaje plataforma de impresion SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.



### Soporte bobina

La bobina de filamento siempre es un elemento que estará presente durante el uso de la máquina, por ello se ha decidido integrar el portabobinas en la propia estructura para reducir el número de elementos independientes.

Siguiendo el estilo de las escuadras del soporte del robot, el soporte consta de una sección de perfil de aluminio de 120 mm unida al perfil vertical de la estructura de la máquina por una escuadra de aluminio, colocado justo debajo del extrusor (Figura 70). Un detalle que consigue un diseño sencillo a la par que funcional.



*Figura 70: Soporte portabobinas SolidWorks®.*

Fuente: Elaboración propia.

## REFUERZOS ESTRUCTURALES

Tras las primeras pruebas con el prototipo se reconocieron en la estructura algunas vibraciones no deseadas durante los movimientos rápidos del cabezal de la máquina, tras revisar la procedencia se observó que las esquineras no añadían la suficiente rigidez a la estructura por lo que se decidió añadir refuerzos. Se planteo hacer una nueva esquina con el refuerzo ya integrado, pero tras un primer planteamiento se verificó que no era posible crear el refuerzo sin crear un modelo que no requiriera soportes para su impresión. Por lo que, para ahorrar material y tiempo, además de facilitar su impresión, se decidió crear unos refuerzos a estas esquineras que fuesen montados sobre ellas y abrazando a su vez los perfiles verticales, dando así mayor rigidez a la esquinera en conjunto como podemos ver en la (Figura 71).



*Figura 71: Refuerzos de esquineras SolidWorks®.*

Fuente: Elaboración propia.

## Escuadras

Siguiendo con la filosofía de rigidizar aún más con aportes de elementos impresos, se optó por añadir una escuadra de apoyo a la escuadra de aluminio. Aunque esta última al ser de aluminio resulta más rígida, solo tenía un punto de apoyo en cada perfil, por lo que no presenta la suficiente sujeción para impedir la rotación. De este modo se ha diseñado una escuadra a 90° que una perpendicularmente ambos perfiles (Figura 72). Estas escuadras tienen un ranurado interior que favorece el alineado de la escuadra durante el montaje.

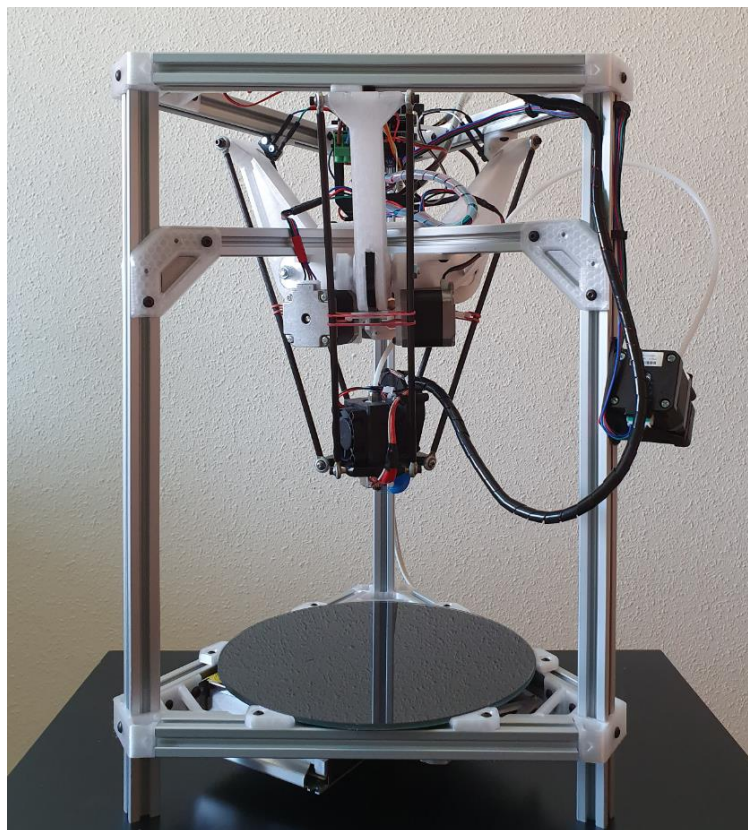


*Figura 72: Escuadras SolidWorks®.*

Fuente: Elaboración propia.

### **Presentación diseño prototipo**

A continuación, se presenta en la (Figura 73) la impresora RoPar3D en su primera versión de prototipo funcional.



*Figura 73: RoPar3D primer prototipo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

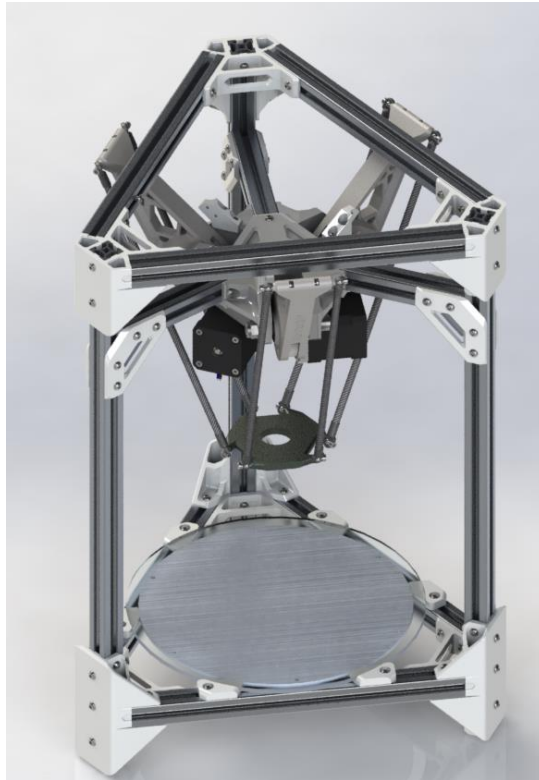
### **Presentación diseño final**

Tras el proceso de rediseño e incorporación de nuevas piezas, el resultado final del prototipo RoPar3D lo podemos ver en la (Figura 74).



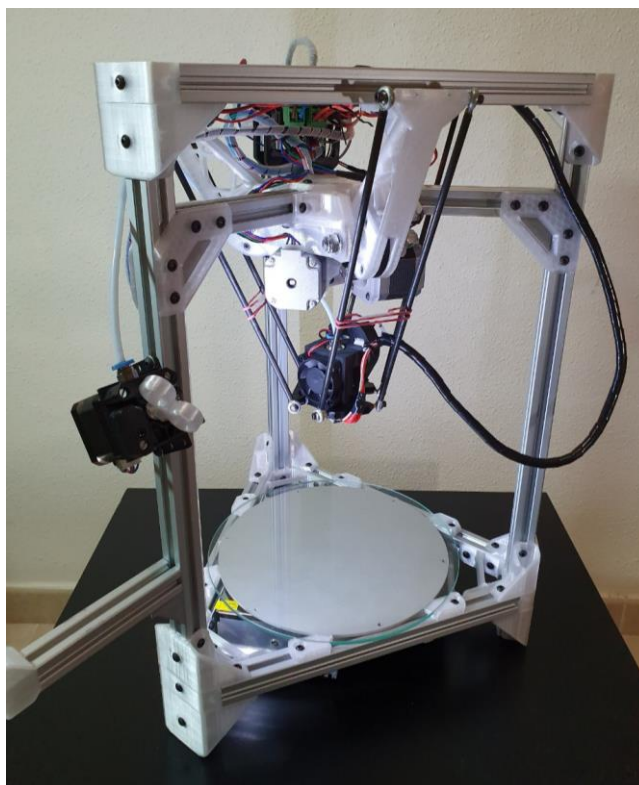
*Figura 74: Vista 1 Ensamblaje RoPar3D final en SolidWorks®.*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 75: Vista 2 Ensamblaje RoPar3D final en SolidWorks®.  
Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, tras el montaje el aspecto de RoPar3D es el siguiente (Figura 76):



*Figura 76: RoPar3D prototipo final.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 6.3 Prototipado de la máquina usando impresión 3D.

Como se ha comentado anteriormente, para la fabricación de las piezas impresas de la máquina, se han empleado dos impresoras 3D para acelerar el proceso de fabricación. El material utilizado ha sido filamento PETG, como se ha justificado en los apartados anteriores.

Lo primero para poder imprimir es transformar nuestro diseño de SolidWorks® a código máquina. Para ello existen los llamados fileteadores, un software que procesa del modelo 3D y lo transporta a una ruta a seguir para ser impreso por la máquina. Estas rutas se estratifican en capas, de ahí lo de filetear o laminar.

No obstante, estos programas no hacen uso de los modelos 3D en formato sólido sino que emplean los llamados STL, que son modelos 3D formados por triángulos. Así que tendremos que transformar nuestros diseños de SW a formato STL. Para ello SW permite ajustar la tolerancia de salida ya que al pasar 3D formado de triángulos la calidad del modelo final dependerá del número de triángulos totales.

Finalmente acabaremos con un archivo en formato “.gcode”, que no es más que un archivo de texto plano donde vienen las líneas de código máquina a ejecutar por la impresora 3D.

El software empleado para realizar este proceso es Simplify3d. Uno de los laminadores más estables que hay actualmente, con un agradable entorno visual y unos resultados de impresión precisos.

Para ello tendremos que ajustar un perfil de impresión con los parámetros de la máquina y los del filamento a imprimir. Previamente a la fabricación del prototipo se ha trabajado en el afinamiento del perfil de impresión para ambas máquinas con el filamento PETG elegido. Los parámetros que han dado como resultado y que a partir de ahora llamaremos “parámetros comunes de impresión” son los siguientes:



PARÁMETROS COMUNES DE IMPRESIÓN	
<i>Diseño de boquilla</i>	0.4mm
<i>Ancho de extrusión</i>	0,48mm
<i>Multiplicador de extrusión</i>	1,00
<i>Altura de capa</i>	0,2mm
<i>Nº Capas superiores</i>	6
<i>Nº Capas inferiores</i>	6
<i>Nº Perímetros</i>	4
<i>Tª Boquilla</i>	235°C
<i>Tª Plataforma impresión</i>	64°C
<i>Velocidad impresión</i>	60mm/s
<i>Porcentaje de relleno</i>	20%
<i>Refrigeración de capa</i>	15%

Tabla 10: Parámetros comunes de impresión.

Fuente: Elaboración propia.

Estos son los parámetros base sobre los que, en caso de ser necesario, se hará alguna modificación por requisitos de la pieza para su viabilidad a la hora de imprimir, y así lo indicaremos para cada pieza.

### Brazo

El diseño del brazo es uno de los elementos más complejos ya que no se ha podido optimizar completamente para su diseño en impresión FDM. Presenta un voladizo en la zona de vaciado interna que puede suponer un problema a la hora de imprimir. Para mitigar este problema, se ha reducido la altura de capa a 0,16 mm para crear escalones con un avance menos pronunciado (Figura 77).

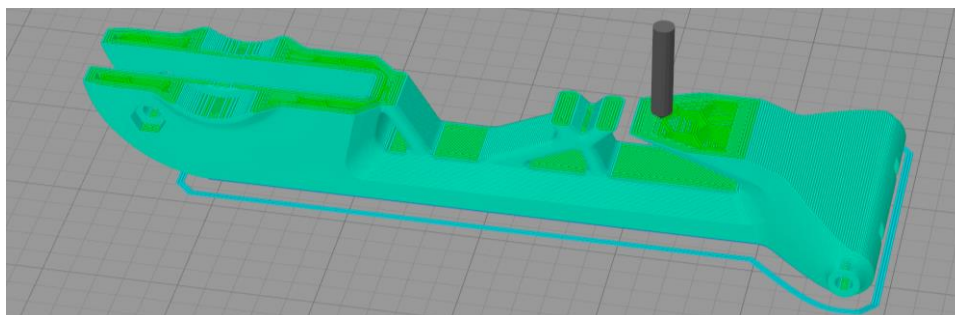


Figura 77: Vista por capas detalle relleno brazo RoPar3d mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

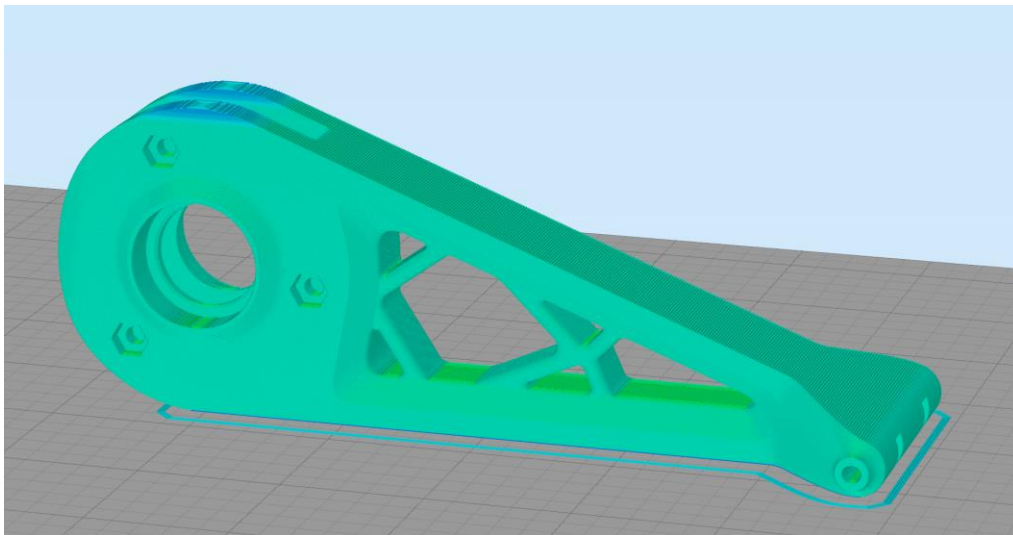


Figura 78: Vista por capas brazo RoPar3D mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

El resto de la pieza no presenta mayor inconveniente a la hora de su fabricación en FDM, ya que tiene una generosa capa plana que aportara una gran adherencia con la plataforma de impresión (Figura 78). Los alojamientos para los rodamientos es una forma geométrica que no supone gran problema y son capaces de cerrar bien las capas superiores.

Las estadísticas de impresión del brazo son las siguientes:

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
4h 28min	6h 7min	56,00 g	1,21 €

Tabla 11: Tiempo, materia y coste prototipado Brazo.

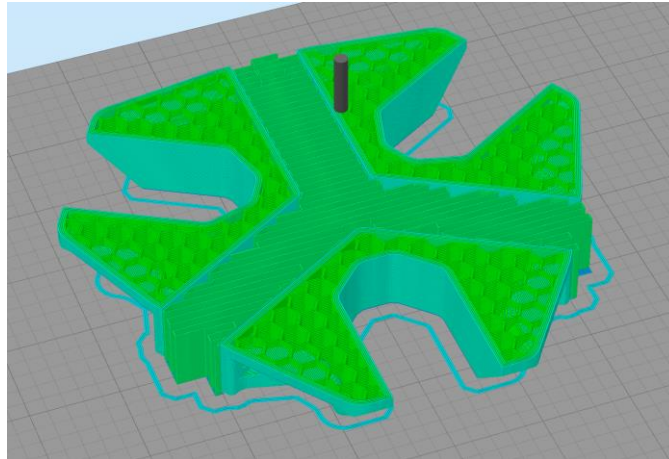
Fuente: Elaboración propia.

### Cuerpo

Esta impresión ha sido la que más tiempo ha tomado en comparación a todo el conjunto, con un total de tiempo de impresión real de más de 18horas.

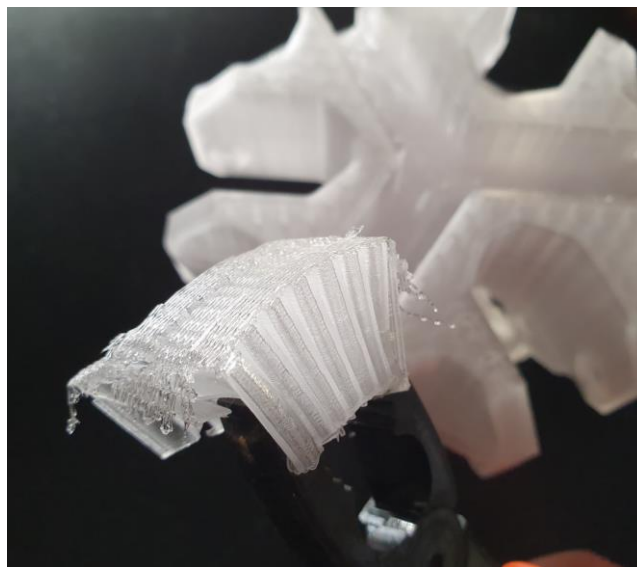
Debido a la forma de la pieza, ha sido necesario incluir soportes para poder imprimir las partes que quedaban sin material sustentante en la zona de la unión del cuerpo con el perfil de aluminio (Figura 79). Debido a esto ha necesitado postprocesado posterior para eliminar dichos soportes (Figura 80). El resto de los parámetros de impresión son los comunes.





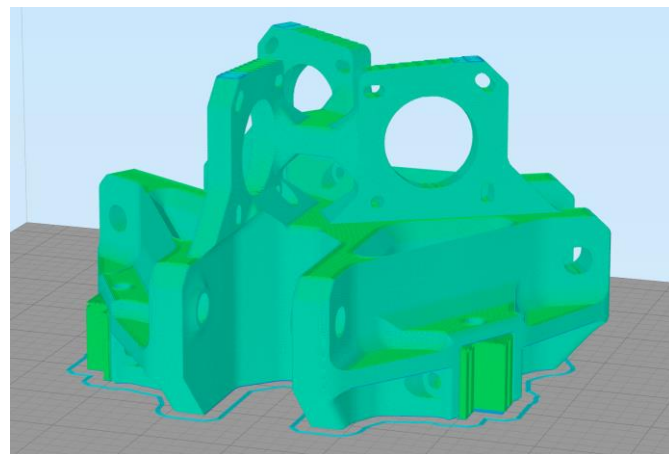
*Figura 79: Vista por detalle relleno y soportes cuerpo robot mediante Simplify3D®.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 80: Postprocesado, retirada de soportes de impresión del cuerpo robot.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 81: Vista por capas cuerpo robot mediante Simplify3D®.*

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
14h 22min	18h 39min	239,34 g	5,18 €

Tabla 12: Tiempo, materia y coste prototipado Cuerpo.

Fuente: Elaboración propia.

### Esquineras

Las esquineras fueron diseñadas para estar formadas por una base plana y un perfil en extrusión vertical (Figura 82) esta es una de las formas para imprimir que menos problemas presenta en máquinas FDM. Como punto a revisar, se ha verificado que el número de paredes creaba una pared maciza y no se componía de un relleno irregular que podría crear una rigidez menor en la pieza. La pieza presenta también un pequeño puente que une la apertura entre ambos lados. Sin embargo, las impresoras han sido calibradas para ser capaces de salvar estas pequeñas superficies unidas entre dos puntos sin mayor problema.

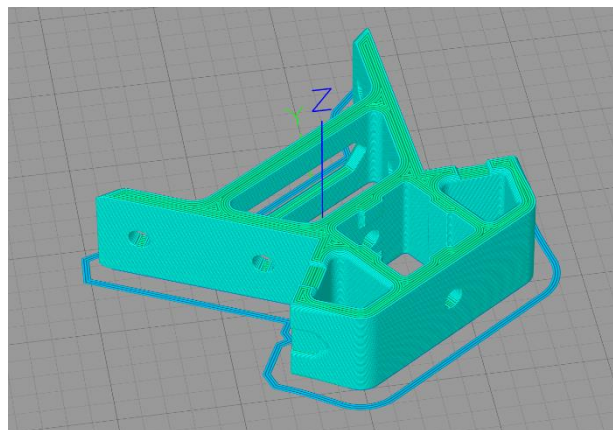


Figura 82: Vista por capas esquinera mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
2h 0min	2h 19min	28,50 g	0,62 €

Tabla 13: Tiempo, materia y coste prototipado Esquinera.

Fuente: Elaboración propia.

### Refuerzo esquinera

Para el caso del refuerzo de la esquinera ocurre lo mismo que para la esquinera, la pieza se compone de una cara plana y paredes verticales que son perfectas para este tipo de impresión, (Figura 83). Además, por la posición de impresión las capas quedan paralelas a la dirección de los esfuerzos por lo que es la posición optimizada para mayor resistencia. Se han utilizado los parámetros comunes de impresión verificando también que las paredes quedaban unidas por material sólido y no tenían parte de relleno.

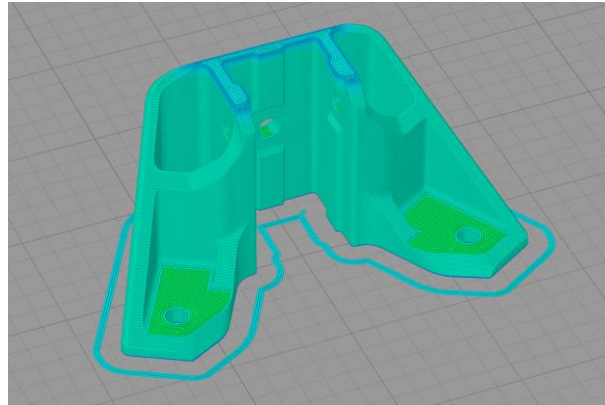


Figura 83: Vista por capas refuerzo esquinera mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

- Modelo de 40 mm

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 36min	2h 03min	24,77 g	0,54 €

Tabla 14: Tiempo, materia y coste prototipado Refuerzo esquinera 40mm.

Fuente: Elaboración propia.

- Modelo de 50mm

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 58min	2h 29min	31,22 g	0,67 €

Tabla 15: Tiempo, materia y coste prototipado Refuerzo esquinera 50mm.

Fuente: Elaboración propia.

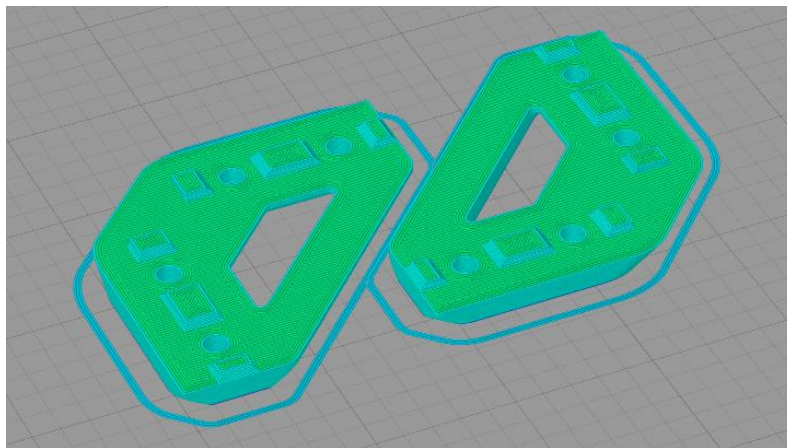


*Figura 84: Refuerzos de esquinera.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### **Escuadras (x2)**

Las escuadras soportan la carga en un plano paralelo al de su dimensión mayor, por ello la forma correcta para su mayor resistencia es la de con la cara exterior plana hacia la base de impresión. En esta posición tenemos que revisar el porcentaje de relleno ya que un porcentaje de relleno demasiado bajo no sería capaz de sustentar de manera correcta las capas superiores. Para evitar esto, y ya que es un refuerzo estructural, se ha incrementado el porcentaje de relleno. Para su impresión se ha optado por imprimir en parejas (Figura 85) utilizando los parámetros comunes mencionados al inicio del apartado con la variación del relleno mencionado.



*Figura 85: Vista por capas pareja de escuadras mediante Simplify3D®.*

*Fuente: Elaboración propia.*

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 9min	1h 29min	17,49 g	0,37 €

Tabla 16: Tiempo, materia y coste prototipado Escuadras.

Fuente: Elaboración propia.

### Soportes plataforma de impresión

Los soportes de la base de impresión son 6 unidades en total. Ya que son elementos de tamaño reducido y de un tiempo corto de impresión, se han impreso de una vez (Figura 86). Su geometría es sencilla y no requieren ninguna configuración especial. Los parámetros de impresión son los comunes.

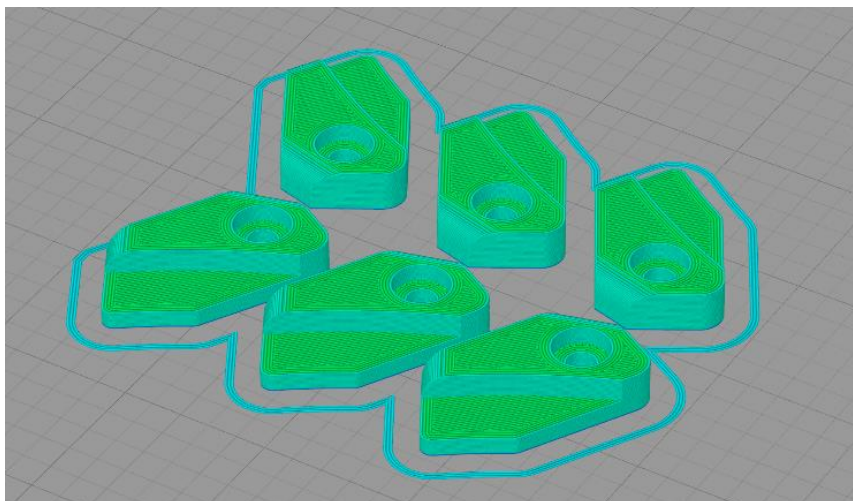


Figura 86: Vista por capas soportes para plataforma de impresión mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 13min	1h 36min	20,3 g	0,44 €

Tabla 17: Tiempo, materia y coste prototipado Soportes plataforma impresión.

Fuente: Elaboración propia.

**Rueda GT2 80t**

La rueda requiere una mayor precisión en la pared exterior, ya que es la zona que va a estar en contacto con la correa, detalle en (Figura 87). Por ello se han impreso en tandas individuales, para evitar cualquier posible desperfecto superficial en los movimientos de viaje entre piezas. Además, se ha reducido la altura de capa a 0,16mm tanto, así como la velocidad a 45mm/s para ganar uniformidad en la pared.

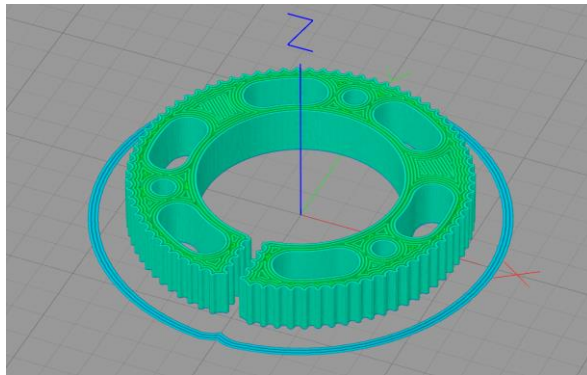


Figura 87: Vista por capas rueda dentada mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
48min	1h 6min	7,24 g	0,15 €

Tabla 18: Tiempo, materia y coste prototipado Rueda dentada GT2.

Fuente: Elaboración propia.

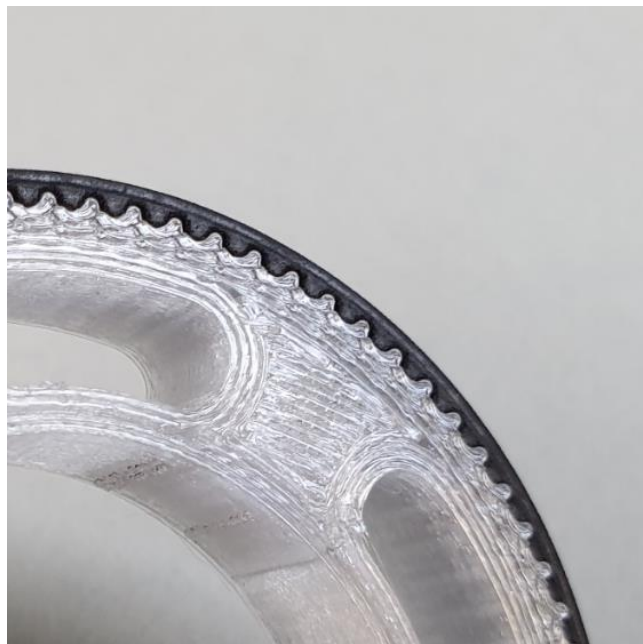


Figura 88: Detalle engrane de diente en correa.

Fuente: Elaboración propia.



### Soporte final de carrera

Los soportes del final de carrera, aunque tienen una forma irregular fueron diseñados con una pared plana mayor para ser colocada en la base de impresión, además esta cara es paralela a la aplicación de las cargas, ventaja que ya se comentó anteriormente (Figura 89). Esta pieza presenta también unos pequeños voladizos en los alojamientos de la cabeza de los pernos pero que no han supuesto mayor problema a la hora de imprimir. La configuración del fileteador ha mantenido los parámetros comunes.

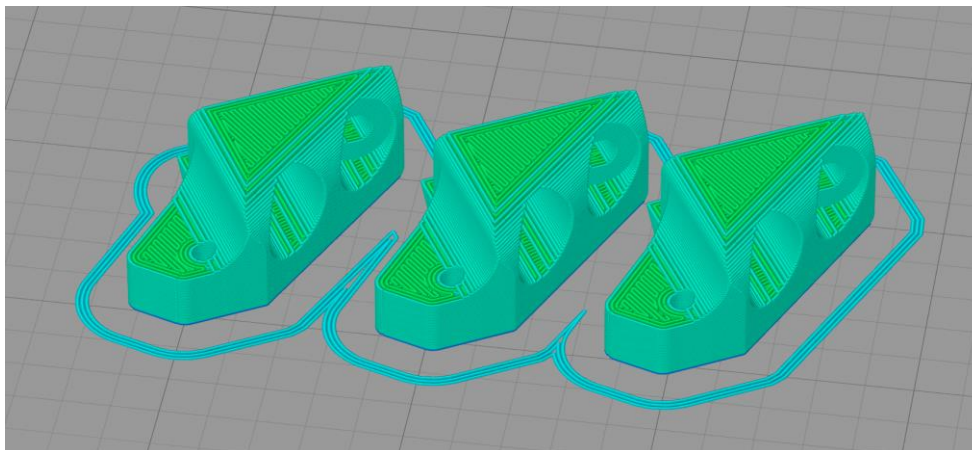


Figura 89: Vista por capas soportes final de carrera mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
44min	1h 10min	10,55 g	0,22 €

Tabla 19: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte finales de carrera.

Fuente: Elaboración propia.

### Soporte electrónica

Para el diseño de todos los soportes a estructura se ha seguido la filosofía de buscar una cara plana mayor para su adhesión a la base y sobre la que extruir verticalmente los elementos de unión (Figura 90). Así pues, para la impresión del soporte de la electrónica solo ha sido necesario mantener los parámetros comunes de impresión.

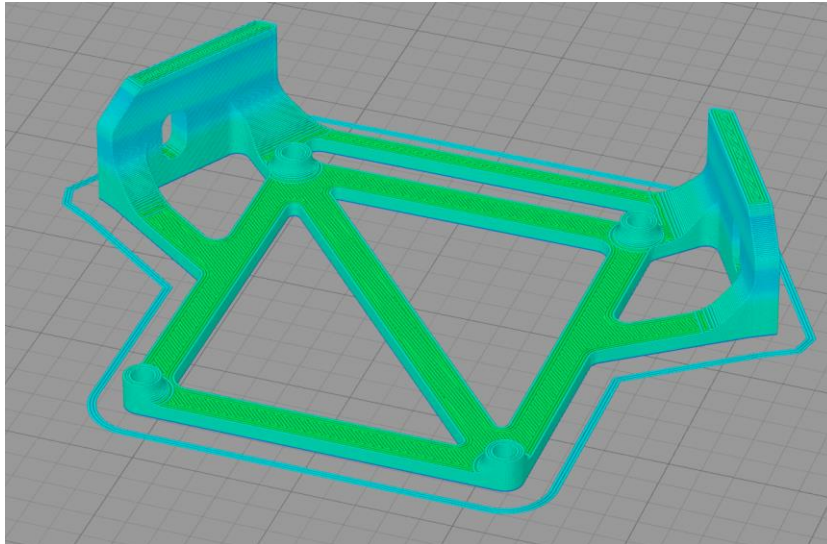


Figura 90: Vista por capas soporte electrónica mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 1min	1h 26min	14,31 g	0,31 €

Tabla 20: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

### Soporte Orange pi

Para este caso ocurre lo mismo que para el soporte de la electrónica, está diseñado de tal manera que encontramos una cara plana que está enfocada a la base para su perfecta adherencia (Figura 91) por lo que no encontramos ningún problema para su impresión por FDM. Se han usado los parámetros comunes para PETG.

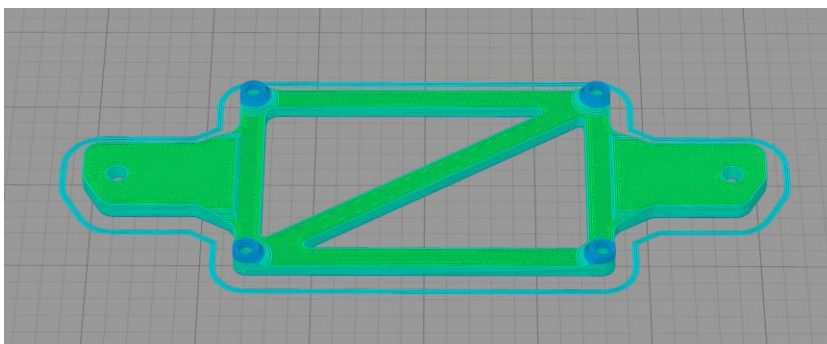


Figura 91: Vista por capas soporte Orange Pi mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.



TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
50min	1h 8min	13,23 g	0,29 €

Tabla 21: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Orange Pi PC.

Fuente: Elaboración propia.

### Soporte Mosfet

Este soporte tiene la peculiaridad de que hay que imprimirlo en vertical, ya que no tiene ninguna cara plana que pueda hacer de soporte. En esta posición presenta un voladizo y un puente superior (Figura 92). Sin embargo, el perfil de fileteado esta ya optimizado para este tipo de elementos. Los parámetros finalmente han sido los comunes de fileteado.

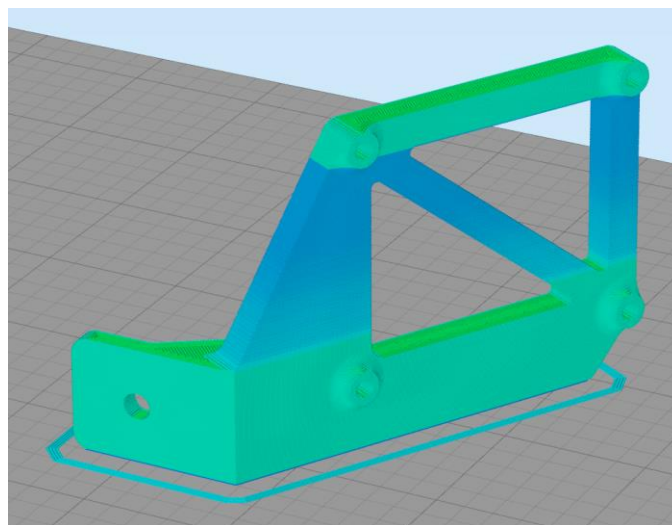


Figura 92: Vista por capas soporte mosfet mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 24min	1h 48min	20,21 g	0,44 €

Tabla 22: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Mosfet.

Fuente: Elaboración propia.

### Soporte conector interruptor alimentación

Este soporte, aunque más voluminoso que los anteriores ha sido diseñado también de una manera optimizada para su impresión en FDM, presenta una gran superficie plana para su adhesión a la plataforma y las paredes extruidas son todas verticales (Figura 93). Se han usado los parámetros comunes para impresión de las piezas.

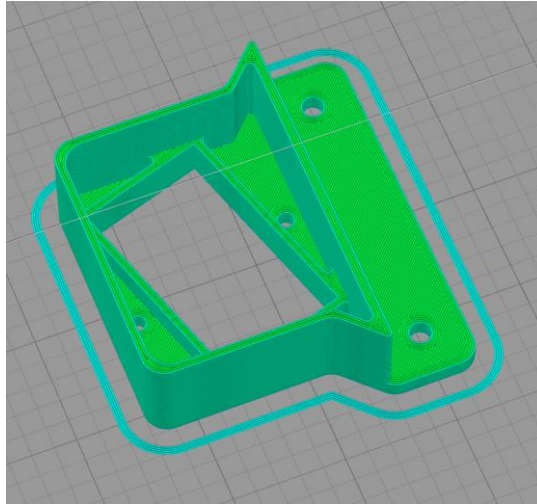


Figura 93: Vista por capas soporte interruptor alimentación mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1h 34min	1h 54min	27,56 g	0,60 €

Tabla 23: Tiempo, materia y coste prototipado Soporte Interruptor alimentación.

Fuente: Elaboración propia.

### Accesorio final de porta bobinas

Este elemento, al igual que el resto de los soportes, presenta una forma sencilla para su impresión en FDM, Figura 94) por lo que han sido utilizados los parámetros comunes del perfil de fileteado.

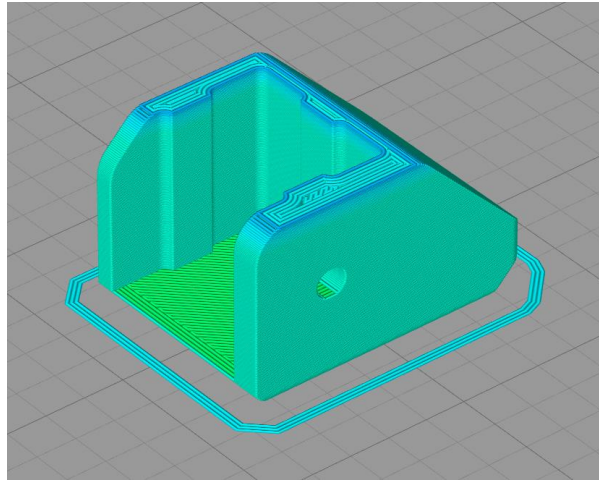


Figura 94: Vista por capas accesorio final del porta bobinas mediante Simplify3D®.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ESTIMADO	TIEMPO REAL	MATERIAL (g)	COSTE (€)
43min	61min	9,66 g	0,21 €

Tabla 24: Tiempo, materia y coste prototipado Tapa portabobinas.

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: se han impreso además elementos accesorios tales como sujeta cables, clips de racors, portaleds... que no han sido desglosados dado que son elementos prescindibles y no forman parte del diseño propio de este TFG.

## DESGLOSE TOTAL DE TIEMPO REAL Y COSTE DE IMPRESIÓN

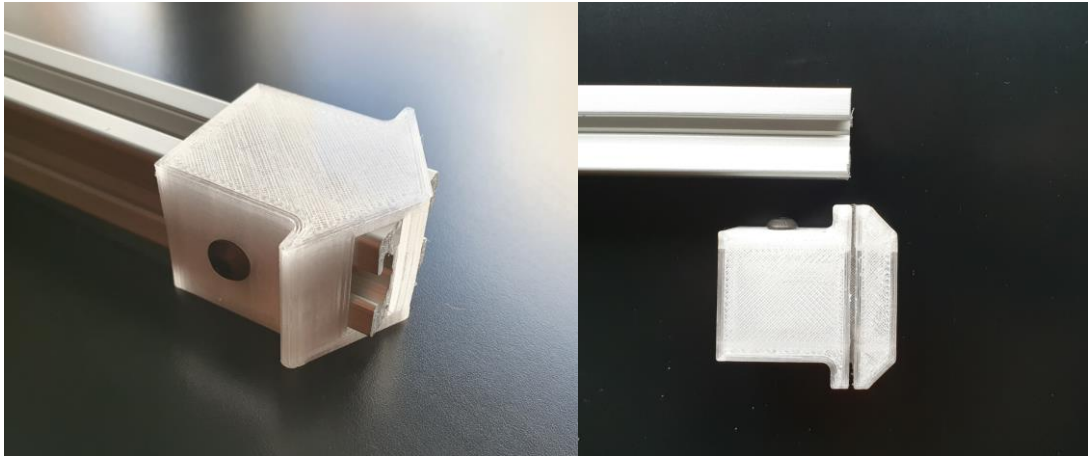
ELEMENTO	Cant.	Tiempo (min)	Coste eléctrico /u (€)	Coste eléctrico TOTAL (€)	Material (g)	Coste material /u (€)	Coste material TOTAL (€)
<i>Brazo</i>	3	367	0,137625	0,412875	56	1,21 €	3,63 €
<i>Cuerpo</i>	1	1119	0,419625	0,419625	239,34	5,18	5,18 €
<i>Esquinas</i>	6	139	0,052125	0,31275	28,5	0,62	3,72 €
<i>Refuerzo 40mm</i>	6	123	0,046125	0,27675	24,77	0,54	3,24 €
<i>Refuerzo 50mm</i>	3	159	0,059625	0,178875	31,22	0,67	2,01 €
<i>Escuadras</i>	3	89	0,033375	0,100125	17,49	0,37	1,11 €
<i>Soportes plataforma</i>	1	96	0,036	0,036	20,3	0,44	0,44 €
<i>Rueda GT2</i>	3	66	0,02475	0,07425	7,24	0,15	0,45 €
<i>Soportes final carrera</i>	1	70	0,02625	0,02625	10,55	0,22	0,22 €
<i>S. electrónica</i>	1	86	0,03225	0,03225	14,31	0,31	0,31 €
<i>S. Orange Pi</i>	1	68	0,0255	0,0255	13,23	0,29	0,29 €
<i>S. Mosfet</i>	1	108	0,0405	0,0405	20,21	0,44	0,44 €
<i>S. Conector Interruptor</i>	1	114	0,04275	0,04275	27,56	0,6	0,60 €
<i>Acc. Porta Bobinas</i>	1	61	0,022875	0,022875	9,66	0,21	0,21 €
<b>TOTAL ELÉCTRICO</b>				<b>2,001375 €</b>	<b>TOTAL MATERIAL</b>		<b>21,85 €</b>
<b>COSTE TOTAL PROTOTIPADO</b>							<b>23,85€</b>

Tabla 25: Desglose costes prototipado.

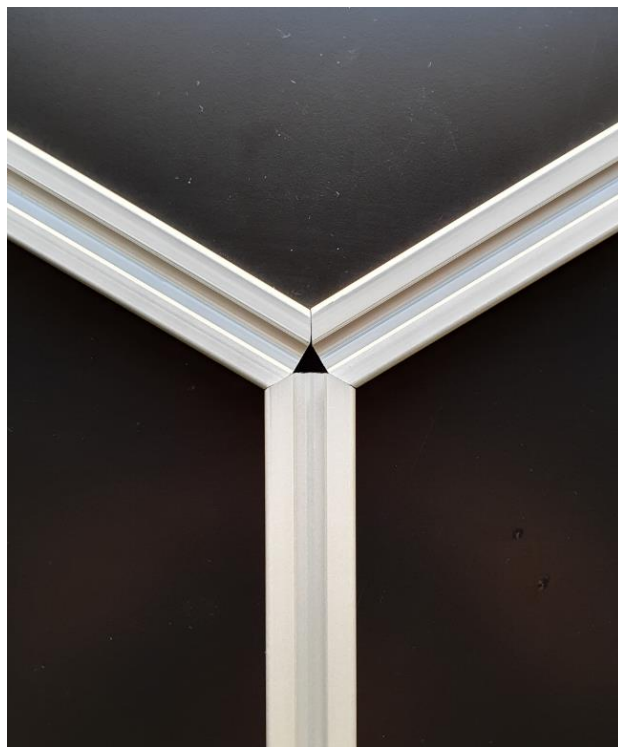
Fuente: Elaboración propia.

## UTILLAJE IMPRESO

Dentro del prototipado no solo encontramos la parte de fabricación directa de las piezas impresas de la máquina, sino que también se han elaborado útiles herramienta para la fabricación de la estructura como se puede ver en la (Figura 95). En concreto se han elaborado una herramienta de corte para abordar los diferentes ángulos que debían mantener los perfiles, ayudando así al correcto corte para su ensamblaje de manera precisa como vemos en la (Figura 96).



*Figura 95: Útiles de corte para perfiles por prototipado rápido.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 96: Detalle ensamblaje perfiles tras corte.  
Fuente: Elaboración propia.*

## 6.4 Creación de la lista de materiales (BOM) y selección de componentes.

Antes de abordar la lista de material, se realizará una justificación previa de aquellos componentes que requieran una mención precisa.

### Componentes Mecánicos

#### Rodamientos

Para permitir el correcto movimiento de rotación de los brazos en los ejes se ha decidido utilizar un doble rodamiento de bolas en cada brazo (Figura 97).

Para su selección se ha tenido en cuenta el ancho del eje del brazo, 8mm en nuestro caso, de entre el listado de opciones disponibles de rodamientos para este diámetro interno nos encontramos con un rodamiento muy común que se usa en diversas aplicaciones del día a día y es fácil de localizar en tiendas no especializadas, el rodamiento 608.



Figura 97: Rodamientos 608RS.

Fuente: Elaboración propia.

Con un diámetro interno de 8 mm y uno externo de 22 mm, se adapta perfectamente a las dimensiones del brazo.

Dentro de las opciones disponibles para este tipo de rodamiento se ha seleccionado el tipo de rodamiento con encapsulado RS, ya que no va a estar trabajando en ambientes violentos. En cuanto a la tolerancia, se ha seleccionado un rodamiento ABEC9 (Figura 98) que nos proporciona la menor tolerancia y por lo tanto la mayor precisión de giro en el rodamiento.

	ABEC	ISO 492
Degree of precision 	ABEC 1	Class 6X/ O
	ABEC 3	Class 6
	ABEC 5	Class 5
	ABEC 7	Class 4
	ABEC 9	Class 2

Figura 98: Tabla de tolerancias según tipo de rodamiento.

Fuente: [www.globalspec.com](http://www.globalspec.com)

### **Polea GT2 16T**

La polea dentada se encarga de transmitir el par del eje motor a la correa. Entre las impresoras 3D es la más común el tipo de correa dentada GT2 con un ancho de 6mm. Para cumplir con la relación de transmisión se ha optado por una polea dentada de 16 dientes. Necesitaremos 3 en total, una por motor.

Queda por descontado que el tipo de correa que vamos a utilizar será la GT2 de 6mm de ancho.

### **Extrusor**

El encargado de empujar nuestro filamento hasta el hotend es el extrusor, en este caso he optado por un extrusor directo común MK8 funcionando en sistema bowden, por lo que el extrusor quedará fijo en la estructura y mandará de manera remota el filamento a través de un tubo de teflón PTFE.

### **Tubo de teflón**

Para las características de nuestro filamento, y conjunto extrusor/hotend, se ha seleccionado un tubo de PTFE de sección interna 2 mm y externa 4 mm, que trabaja anclado a los racors colocados en el hotend y extrusor.

### **Cristal 240mm**

Para imprimir necesitamos una superficie de impresión, la cual debe tener la mayor planitud posible y que aporte una buena adherencia de la pieza. Una de las soluciones más comunes es la de utilizar una base de cristal como superficie de impresión, la cual nos aporta las características requeridas. Además, combinada con el uso de spray adhesivo nos proporciona una superficie con una adherencia adecuada para la impresión de PLA sin cama caliente. Además se trata de un elemento de fácil higienizado entre impresiones.

Finalmente se ha optado por la utilización de un cristal de mayor diámetro del supuesto en un principio, pasando de 220mm a 240mm para aprovechar mejor el área de impresión del robot.

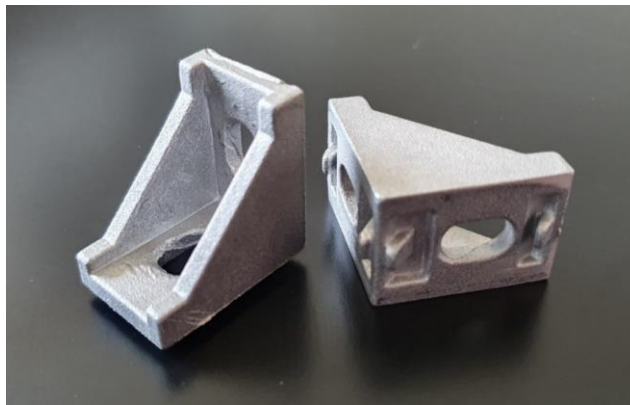
### **Perfil aluminio**

Como se comentó en la parte del diseño e la estructura, se requiere una estructura modular que fuese adaptable ante posibles cambios además de liviana para poder trabajar con ella fácilmente. Para cumplir con estos requisitos se ha optado por una opción muy común en la industria, que son los perfiles de aluminio extruido ranurado.

Partiendo del tamaño de la maquina finalmente se ha decidido fabricar con perfil de tipo 20x20 T-slot, de ranura 6mm. Los que nos permite usar tuercas tipo T-Nut que se pueden insertar en la estructura incluso después del montaje de esta, por lo que nos brindan más opciones de modularidad y permiten cambiar elementos de lugar de manera más sencilla.

### **Escuadras de aluminio**

Dentro del mundo de la perfilería estructural hay distintos accesorios para el montaje de estos elementos, uno de ellos son las escuadras de aluminio de fundición. Estas están ya adaptadas para los distintos tipos de perfiles de aluminio. En este caso se han seleccionado escuadras de aluminio de 90° (Figura 99) con un ranurado que permite utilizar la tornillería M4 elegida. Con ellos conseguimos de una manera fácil montar los perfiles de forma perpendicular, como necesitamos en la cruz de sustentación del cuerpo del robot.



*Figura 99: Escuadras aluminio 20mm.*

Fuente: Elaboración propia.

### **Varillas antebrazos**

Se ha optado por una solución comercial en cuanto a los antebrazos. Son uno de los elementos importantes dentro de la cinemática del robot. Manteniendo el paralelismo entre ellos crean los movimientos planos en el efector. Por lo tanto, una fabricación errónea de ellos supondría errores durante el funcionamiento de la máquina.

Se ha seleccionado un conjunto formado por 12 varillas de carbono con rotulas en los extremos, para tornillos M3 tal y como corresponde con el diseño de los brazos.



## Componentes eléctricos

**Conjunto controlador electrónica robot**

Uno de los componentes más importantes de la electrónica es el “cerebro” del robot para poder gestionar el movimiento de los motores, así como el control de salidas y entradas de señal en la máquina. Con el particular sistema cinemático que usamos en el proyecto nos encontramos con la necesidad de gestionar una gran cantidad de cálculos por segundo para el correcto posicionamiento de los motores en su compleja ecuación de posición. Para ello, como se ha comentado anteriormente, se va a emplear en la máquina un firmware híbrido que nos traslada todos estos cálculos hasta un pequeño PC que hace de maestro. Sin embargo, debemos tener una placa electrónica esclava que sea capaz de gestionar dicha información a tiempo.

MCU	Rate
pru (shared memory)	5K
stm32f042 (CAN)	18K
atmega2560 (serial)	23K
sam3x8e (serial)	23K
at90usb1286 (USB)	75K
samd21 (USB)	223K
stm32f103 (USB)	355K
sam3x8e (USB)	418K
lpc1768 (USB)	534K
lpc1769 (USB)	628K
sam4s8c (USB)	650K
samd51 (USB)	864K
stm32f446 (USB)	870K

*Tabla 26: Comandos por segundo en diferentes controladores utilizando Klipper.*

Fuente: Klipper.

En la Tabla 26 se muestra un listado de diferentes controladores soportados por el firmware Klipper y su capacidad de transmisión de órdenes por segundo. A mencionar, el modelo atmega2560 (serial) es el controlador más común utilizado en las impresoras 3D domésticas, concretamente es el que encontramos en un Arduino Mega (8bits) junto una placa expansora llamada Ramps. Sin embargo, este controlador no es capaz de soportar correctamente la demanda que requiere una cinemática delta por ello se ha descartado. En los últimos tiempos se está empezando a ver en el mercado una siguiente generación de controladores con 32bits

y que incorporan una comunicación directa por USB, eliminando así el puerto serial que actúa como un cuello de botella en la transmisión de las órdenes.

En cuanto a estas placas se ha popularizado el microcontrolador “Ipc1768”, el cual admite los firmwares más comunes de código abierto para impresoras 3D. Además, se encuentran dentro de las placas asequibles contando además con una muy buena tasa de transmisión de ordenes por segundo.

Entre las placas controladores que montan este microcontrolador encontramos la llamada Re-ARM, una placa con formato de Arduino Mega pero con un microcontrolador actual que nos permitirá seguir usando las placas de expansión Ramps.

Las placas expansoras Ramps ha evolucionado desde las primeras que se desarrollaron. Actualmente monta mejores componentes, bornes de alimentación y brindan más opciones de configuración. En concreto con la última versión disponible en el mercado, la Ramps 1.6 Plus, tenemos la opción de comunicar los controladores de los motores con el firmware para poder configurar una serie de parámetros que explicare más adelante.

Dicho esto, para la electrónica finalmente se ha utilizado una placa Re-ARM<sup>[28]</sup> de 32bits, que incorpora el microcontrolador Ipc1768 a 100mhz, junto a la última versión de la placa Ramps 1,6 plus. Conjunto que podemos ver en la (Figura 100).

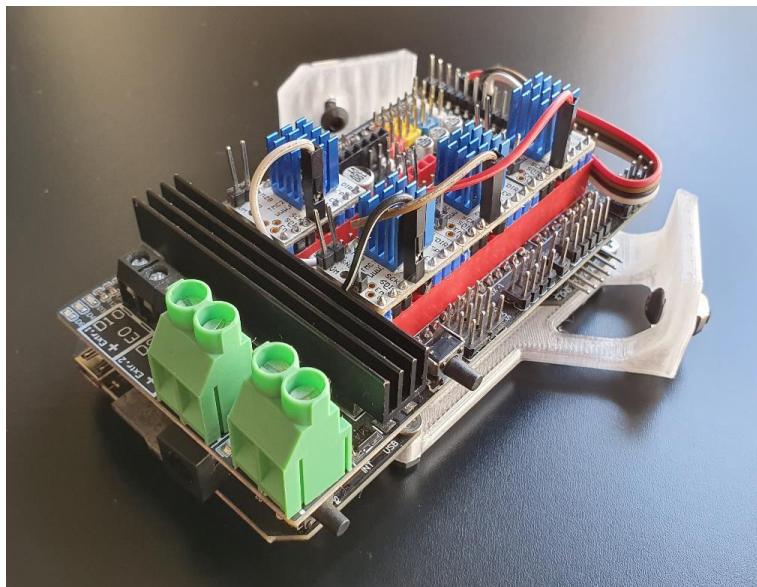


Figura 100: Conjunto controlador electrónica; Re-ARM / Ramps 1.6+ / TMC2130.

Fuente: Elaboración propia.

Para los controladores de los motores se han seleccionado los controladores Trinamics TMC2130<sup>[29]</sup>, los cuales son capaces de alcanzar subdivisiones de pasos del motor de hasta 256 micropasos.

Esta característica es una de las bases que empleamos para alcanzar la resolución deseada en el diseño, requiriendo alcanzar al menos 64 micropasos. Para la configuración de esta característica, es necesario que el controlador de motor este comunicado través del protocolo SPI con la placa electrónica, la cual es capaz de hacerlo en la placa Ramps1.6+ seleccionada de manera más sencilla. Esta comunicación consta de 4 cables, 3 de ellos comunes que van incorporados internamente en la placa y un pin individual independiente para cada controlador de motor que podemos ver en la (Figura 100).

Por otra parte, estos controladores son capaces de suministrar 1,2 A RMS a los motores, los cuales se pueden gestionar a través del propio firmware gracias a la comunicación por SPI, finalmente han sido tarados a 0,7A.

Como dato, estos controladores tienen la peculiaridad de eliminar por completo las altas frecuencias que producen resonancia audible en los motores, haciendo la maquina prácticamente silenciosa, por lo que es más conveniente para su uso de escritorio.

Por contra, los tmc2130 requieren de disipación activa para su correcto funcionamiento, ya que generan más calor que un controlador de motor normal, como puede ser una Allegro A4988.

### **Mi pc servidor de impresión**

Como ya se ha mencionado el firmware hace uso de dos partes de necesarias para el funcionamiento. Ya tenemos la parte esclava con el controlador de electrónica, ahora nos falta el ordenador maestro. Se suele hacer uso de una Raspberry Pi como mini ordenador de control, aunque hay en el mercado opciones económicamente más asequibles no por ello menos potentes que solo requieren dedicar algo más de tiempo a la programación. Así finalmente se ha optado por la utilización como mini ordenador/ placa SBC, una Orange Pi PC <sup>[30]</sup> (Figura 101) con una CPU ARM de cuatro núcleos a 1,6Ghz de procesador junto a 1GB de RAM de memoria. Con estas características es más que suficiente para correr el servidor de impresión Web, Octoprint, así como el firmware Klipper, sin problema alguno.

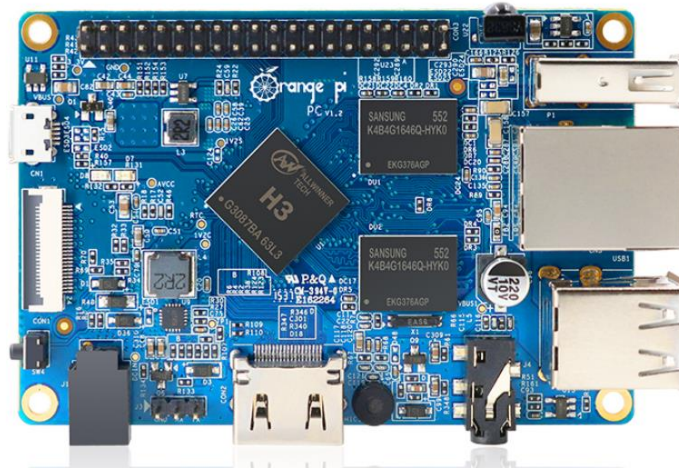


Figura 101: Orange Pi PC.

Fuente: [www.orangepi.org](http://www.orangepi.org)

Para su puesta en marcha será necesario el uso de una fuente de alimentación de 5V y 2A con un conector DC, así como el de una memoria microSD que albergará el sistema operativo Linux Debian.

### Motores paso a paso

Los motores paso a paso más empleados, por su tamaño, en las impresoras 3D de escritorio, son los Nema 17. En nuestro caso se han seleccionado los motores Nema 17 modelo 42HD4027-01 (Figura 102 y 103) con las siguientes características:

*Tamaño: 42\*42\*40mm*

*Peso: 275 g/unidad*

*Ángulo de paso: 1,8 °*

*Par de sujeción: 400mN.m*

*Voltaje nominal: 3,3 V*

*Corriente nominal: 1,5 a*

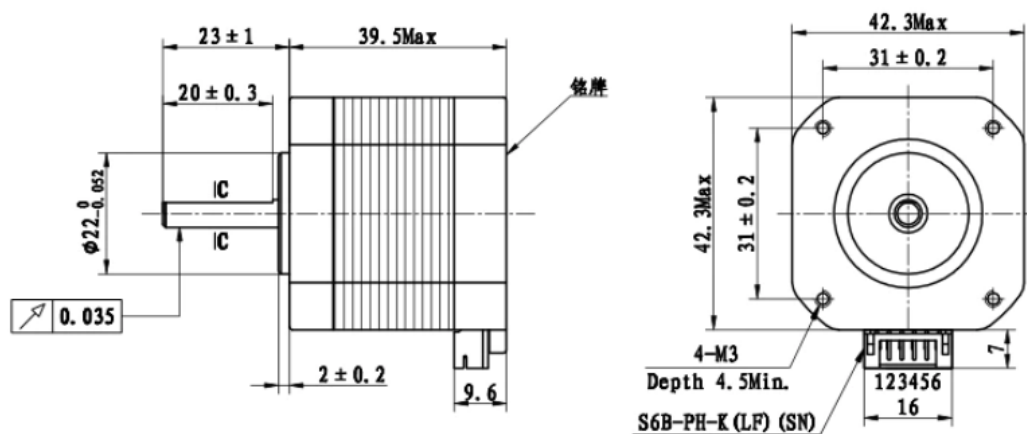


Figura 102: Diagrama motor paso a paso.

Fuente: [www.createc3d.com](http://www.createc3d.com)

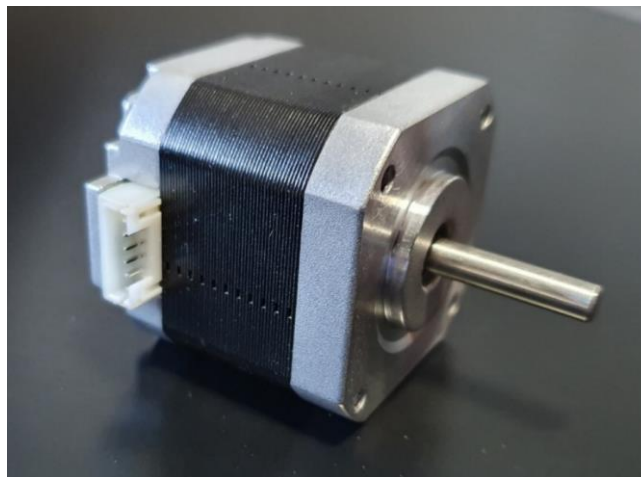


Figura 103: Nema 17 mod. 42HD4027-01.

Fuente: Elaboración propia

### **Finales de carrera**

Los finales de carrera son los encargados de definir el origen en la máquina. En cinemáticas delta cobra mayor importancia que en otras, ya que el definir el origen de cada brazo, se está definiendo así la inclinación del ángulo de la cama no solos los offset en los ejes XYZ. Por ello se ha optado por utilizar finales de carrera de gran precisión, en concreto el modelo SS-5GL del fabricante Omron.

### **Cartucho calentador/Termistores**

Se han utilizado el conjunto de cartucho calefactor común en impresoras 3D de escritorio, un cartucho calefactor cerámico de 12v y 40W. Para los sensores de temperatura, se utilizan termistores NTC 100k.

### **Cama caliente**

Para la plataforma calefactada se ha seleccionado una cama caliente circular MK3ALU de  $\varnothing 220\text{mm}$  y 3mm de espesor, que está formada por una plataforma de aluminio con una resistencia integrada. Con una potencia de 120W, para 12V.

### **Mosfet externo**

Aunque la placa controladora ya consta de un mosfet dedicado para gestionar la potencia para alimentar la cama, se ha decidido la incorporación de un mosfet externo de 20A para así poder repartir la carga. De este modo la placa controladora queda liberada de 120W, 10A, por lo que se reduce considerablemente la carga en el cable de alimentación, repartiendo la carga de la impresora así en una línea hacia electrónica y otra línea dedicada para la cama caliente, la cual alcanza  $\frac{1}{2}$  de la totalidad de potencia de la fuente de alimentación. Lo podemos llamar así como un elemento de seguridad.

### Conector alimentación

Para realizar una instalación más conveniente de la alimentación en la maquina se ha decidido incorporar un conector de alimentación con interruptor y porta fusible (Figura 104). Siendo así un elemento de seguridad y añadiendo practicidad con el interruptor para el uso de la máquina.



Figura 104: Conector interruptor alimentación.

Fuente: Elaboración propia.

### Ventilador Radial

En ciertos materiales es necesario el uso de un ventilador para enfriar la capa conforme va depositándose. En nuestro caso, con el efector elegido, montamos un ventilador de flujo axial de turbina con unas medidas de 40\*10 mm y un consumo de 0,08 A.

### Ventilador Axial

Se han empleado ventiladores axiales de 40mm, necesarios para la ventilación del disipador del hotend V5 así como la refrigeración de la placa electrónica. Estos ventiladores tienen un consumo individual de 0,10 A.

### Sensor de nivelación

El firmware nos permite una nivelación de la cama automática a través de distintos sensores que detectan la distancia hasta la cama. La mayor parte de opciones disponible para estos sensores, van montados permanentemente en el cabezal de impresión con un cierto desfase en el plano XY hasta la boquilla. Este desfase en una cinemática delta produciría un error en las medidas que se traduciría en un error en la calibración de inclinación del plano de la cama, por lo que no es la mejor opción. Además, al ir montado en el efector de manera permanente nos sumaría inercias no deseadas. Es por esto que para las cinemáticas de tipo delta Kossel existen unos sensores de palpación de membrana que van montados directamente sobre la boquilla

en el proceso de calibración (Figura 105) añadiendo así un offset nulo en el plano XY y de apenas una décima en el eje Z. Siendo esta la mejor opción para la calibración de nuestra RoPar3D.

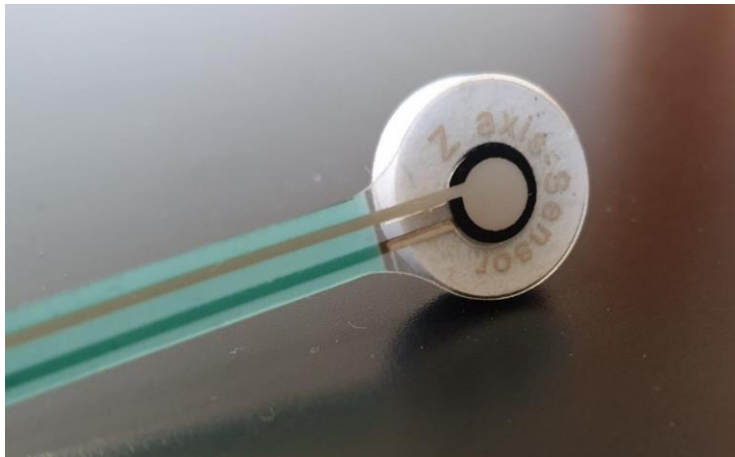


Figura 105: Sensor de nivelación.

Fuente: Elaboración propia.

### Cable alimentación principal

Para la selección de la sección del cable de alimentación se procedido primeramente a dimensionar el consumo total de la electrónica, que se refleja en la siguiente líneas:

**Motores:** Según datos del modelo 3,3V nominal y 1,5 A de máxima, un total de 4 motores incluyendo los tres brazos y el extrusor.

$$P_m = 4 * V * I = 4 * 3,3V * 1,5A = 19,8W \quad (1)$$

**Electrónica:** Valor registrado por mediciones propias:

$$P_e = 7,7W \quad (2)$$

**Iluminación LED:** Tira de iluminación led 3538SMD, 6W/m, longitud utilizada 250mm:

$$P_{led} = 1,5W \quad (3)$$

**Ventiladores:** Los ventiladores axiales tienen un consumo de 0,10 A, utilizamos dos de ellos, mientras que le ventilador radial tiene un consumo de 0,08 A.

$$P_v = V * I = 0,28A * 12V = 3,36 W \quad (4)$$

**Calefactor (hotend):** El calefactor nos proporciona directamente el valor de potencia:

$$P_{he} = 40W \quad (5)$$

**Cama caliente (hotbed):** La cama caliente viene ya con la potencia indicada:

$$P_{hb} = 120W \quad (6)$$



Lo que nos da una potencia total de maquina:

$$P_{total} = 192,36 W$$

O lo que es lo mismo, una intensidad total de 16,03 A. Como ya se ha comentado anteriormente. Para repartir la carga se ha separado el consumo de la cama caliente en una línea independiente, por lo que los consumos en cada línea quedarían:

Para la línea de electrónica, llamada Linea1, tomamos los valores (1, 2, 3, 4 y 5), quedando una intensidad total de línea:

$$I_{L1} = 6,03 A$$

Para la línea de cama caliente, llamada Linea2, tomamos el valor (6), quedando una intensidad:

$$I_{L2} = 10 A$$

Como podemos comprobar, la línea de mayor carga es la línea L2, la correspondiente a la cama caliente. Repartiendo de este modo la carga queda mejor equilibrada entre líneas de cable. Partiendo de estos valores nos vamos a la (Figura 106) del reglamento electrotécnico de baja tensión (REBT), para ver la sección de cable a seleccionar:

Tabla 1. Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C. N.º de conductores con carga y naturaleza del aislamiento

			3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
A		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes											
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
B		Conductores aislados en tubos en montaje superficial o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC			3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
B2		Cables multiconductores en tubos en montaje superficial o empotrados en obra		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR			2x XLPE o EPR			
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared				3x PVC	2x PVC			3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
E		Cables multiconductores al aire libre. Distancia a la pared no inferior a 0,3D					3x PVC		2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo. Distancia a la pared no inferior a D						3x PVC				3x XLPE o EPR	
G		Cables unipolares separados mínimo D								3x PVC		3x XLPE o EPR	
		mm <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cobre		1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
		2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
		4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
		6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
		10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
		16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
		25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
		35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206
		50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
		70				149	160	171	188	202	224	244	321
		95				180	194	207	230	245	271	296	391
		120				208	225	240	267	284	314	348	455
		150				236	260	278	310	338	363	404	525
	185				268	297	317	354	386	415	464	601	
	240				315	350	374	419	455	490	552	711	
	300				360	404	423	484	524	565	640	821	

Figura 106: Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT).

Fuente: BOE



Según la (Figura 106)<sup>[31]</sup>, como podemos ver en la fila C para cables directamente sobre la pared con aislante PVC utilizando una sección de  $1,5 \text{ mm}^2$  tenemos una intensidad admisible de 16 A que es muy superior a nuestra intensidad máxima en línea que corresponde con la Línea2 siendo 10 A, cumplimos con el dimensionamiento para ambas líneas.

Por lo tanto, la sección de cable utilizado para la Línea 1 y 2 respectivamente es de  $1,5 \text{ mm}^2$ .

### **Fuente de alimentación**

Partiendo de los resultados obtenidos en la sección anteriores, tenemos una potencia total máxima de máquina de 192,36W. En condiciones normales el consumo será inferior, ya que no es común calentar hotend y hotbed al mismo tiempo mientras los motores están en marcha, teniendo en cuenta que una vez llegan a la temperatura de trabajo se regulan a través de pulsos y no es un consumo constante. Dicho esto, y para tener un margen de potencia, se ha optado por la utilización de una fuente de alimentación de 12V y 240W, modelo S-240-12.

### **Material de impresión**

Otro elemento necesario es el material de impresión. El robot técnicamente se va a construir casi en su totalidad con elementos impresos y a su vez va a necesitar material para imprimir durante los ensayos.

Entre los diversos materiales disponibles para imprimir hoy en día en las impresoras FDM, cómo y se ha comentado, se encuentran PLA, PETG y ABS, cada uno con distintas propiedades que los hacen mejor opción en determinados usos.

En nuestro caso, para la fabricación de las piezas del robot necesitamos un material que tenga unas buenas propiedades mecánicas y a la vez sea capaz de soportar temperaturas relativamente altas. De las opciones disponibles quien mejor cumple estos requisitos es el ABS, sin embargo, es el más complejo de imprimir, dando muchos problemas al intentar imprimir en impresoras sin cabina. Ya que vamos a necesitar prototipar rápidamente muchas piezas no hemos querido depender de la incertidumbre en los posibles errores de impresión con este material por lo que lo hemos descartado. Por otro lado, el PLA también ha sido descartado directamente ya que presenta problemas de deformación al someterse a esfuerzos permanentes y temperaturas ambiente cercanas a los  $50^\circ\text{C}$ .

De este modo el más equilibrado entre resistencia mecánica, resistencia a la temperatura ambiente y facilidad de impresión, es el PETG, que es material que he optado para utilizar en la fabricación de la impresora RoPar3D.

En cuanto al material para las piezas de pruebas, me he decantado por el PLA, ya que además de ser el más sencillo de imprimir es un material que tiene un buen acabado superficial, propiedad que nos interesa para poder identificar los resultados de impresión de manera más directa.

### BOM

El listado de costes de cada elemento y unidades se desglosará a continuación en tres tablas según su ámbito.

#### Material mecánico

PARTE MECÁNICA				
ELEMENTO	OBSERVACIONES	PRECIO / UD.	CANTIDAD	TOTAL
<i>Correa GT2</i>		1,75 €	1	1,75 €
<i>Cristal 240mm</i>		7,00 €	1	7,00 €
<i>Ejes M8 roscados</i>		6,00 €	1	6,00 €
<i>Escuadras aluminio</i>	4/u	1,87 €	1	1,87 €
<i>Extrusor MK8</i>		6,00 €	1	6,00 €
<i>M4*8mm</i>		2,78 €	2	5,56 €
<i>Perfil aluminio</i>	20x20 T-Slot ranura 6mm	8,09 €	4	32,36 €
<i>Polea GT2 16T</i>		0,32 €	3	0,96 €
<i>Rodamientos 608rs abec9</i>	6/u	12,99 €	1	12,99 €
<i>T-nuts</i>		4,18 €	2	8,36 €
<i>Tornillos M3 16mm</i>		0,75 €	1	0,75 €
<i>Tornillos M3 25mm</i>		0,75 €	1	0,75 €
<i>Tubo teflon</i>		1,45 €	1	1,45 €
<i>Tuercas freno M8</i>	6/u	3,59 €	1	3,59 €
<i>Tuercas M3</i>		0,75 €	1	0,75 €
<i>Varillas con rotulas</i>	Antebrazos	14,38 €	1	14,38 €
<b>TOTAL</b>				<b>104,52€</b>

Tabla 27: Desglose materiales mecánicos.

Fuente: Elaboración propia.

PARTE ELECTRÓNICA				
ELEMENTO	OBSERVACIONES	PRECIO / UD.	CANTIDAD	TOTAL
<i>Cable alimentación 1,5mm<sup>2</sup></i>		2,00 €	1	2,00 €
<i>Cable mini-USB</i>		1,65 €	1	1,65 €
<i>Cable toma alimentación</i>		1,99 €	1	1,99 €
<i>Cables jst hx2.5</i>	4/u	2,90 €	1	2,90 €
<i>Cama caliente</i>		12,00 €	1	12,00 €
<i>Conectores Faston</i>		1,00 €	1	1,00 €
<i>Faja cables</i>		1,80 €	1	1,80 €
<i>Finales de carrera</i>		1,03 €	3	3,09 €
<i>Fuente 5v</i>		8,09 €	1	8,09 €
<i>Fuente alimentación 12v 240W</i>		20,00 €	1	20,00 €
<i>Hot End V5</i>	Incluye bloque calentador y termistor	4,65 €	1	4,65 €
<i>Interruptor alimentación</i>		2,80 €	1	2,80 €
<i>MicroSD 4GB</i>		3,00 €	1	3,00 €
<i>Mosfet</i>		3,20 €	1	3,20 €
<i>Motores</i>		9,00 €	4	36,00 €
<i>Orange Pi PC</i>		18,04 €	1	18,04 €
<i>Ramps 1.6+</i>		7,28 €	1	7,28 €
<i>RE-ARM</i>		18,85 €	1	18,85 €
<i>Sensor nivelación</i>		2,65 €	1	2,65 €
<i>TMC2130</i>		5,13 €	4	20,51 €
<i>Turbina Radial 40mm</i>		0,84 €	1	0,84 €
<i>Ventilador axial 40mm</i>		0,75 €	2	1,50 €
<i>Leds 3528smd</i>		1 €	1	1,00 €
<b>TOTAL</b>				<b>174,84 €</b>

Tabla 28: Desglose materiales electrónicos.

Fuente: Elaboración propia.

**Material de impresión**

<b>MATERIALES DE IMPRESIÓN</b>				
<b>ELEMENTO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>PRECIO / UD.</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>TOTAL</b>
<i>PETG 1,75mm 1Kg</i>		20,90 €	2	41,80 €
<i>PLA 1,75mm 1Kg</i>		24,87 €	1	24,87 €
<b>TOTAL</b>				<b>66,67€</b>

*Tabla 29: Desglose material de impresión.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede apreciar, la parte que genera un mayor coste es la electrónica, si bien es cierto que la parte mecánica de la impresora también podría ser considerada el material impreso empleado quedando balanceado el presupuesto entre ambas partes.

Aunque el presupuesto en la fase inicial del proyecto era algo más reducido, he considerado invertir algo más de dinero añadiendo algunos elementos que aportan seguridad, así como otros que añaden funcionalidad que en un principio se plantearon como mejoras futuras, para una apuesta segura. Por ello, el coste total de la fabricación de la máquina en cuanto a materiales se refiere es el de la Tabla 30.

<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	
<i>Material Mecánico</i>	104,52 €
<i>Material Electrónico</i>	173,84 €
<i>Material de Impresión</i>	66,67 €
<b>TOTAL</b>	<b>346,03€</b>

*Tabla 30: Presupuesto total.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Al respecto del coste de la máquina, además de el de optimizar la compra de materiales en base a los plazos de entrega, mi objetivo principal no era otro que “seguir en la línea” de adaptabilidad y versatilidad de mi diseño con el fin de que, dado su bajo coste de fabricación, la construcción del robot e incluso sus posibles cambios y mejoras, sean accesibles y asequibles.

## 6.5 Electrónica y programación.

En esta parte se detallará la parte electrónica de la máquina. Se instalará el sistema de alimentación, motores, sensores, cableado y placa electrónica.

Electrónica y programación van de la mano ya que el firmware de control de la impresora 3D que podamos emplear dependerá del tipo de placa que utilicemos, a la hora de elegir la electrónica se tuvo en cuenta este aspecto para poder abarcar el mayor número de opciones disponibles.

Con respecto a los firmwares disponibles para nuestra maquina encontramos el más común y utilizado en impresoras 3D que es Marlin. También otras opciones menos conocidas como RepRapFirmware, Smoothieware o Klipper.

### **Marlin**

Es el firmware de control de impresoras 3D más extendido. Su filosofía open source ha hecho que sea fácil de implementar y adaptar a prácticamente cualquier máquina. Sin embargo, aunque tiene soporte para cinemáticas tipo delta hacen referencia solo a las de tipo delta lineal y no a las tipo delta rotativa como es el caso de nuestro prototipo Ropar3D. Por lo tanto, la primera opción es descartada.

### **RepRapFirmware.**

Este firmware se empleaba principalmente en las placas Duet, sin embargo, ha sido portado recientemente a las placas con SOC LPC1768 como es el caso de nuestra placa electrónica. Este firmware está optimizado para electrónicas 32bits y además incluye un ligero servidor web para el control de máquina. En cuanto a la compatibilidad con cinemáticas delta rotativas está implementada, pero en una fase muy temprana de desarrollo. Por lo que podríamos encontrar errores durante el funcionamiento de la maquina producidos por un software inestable. Además, tampoco tiene implementadas algunas opciones como el autocalibrado de máquina para dicha cinemática. Por lo que finalmente también ha sido descartado.

### **Smoothieware.**

Este firmware es otro desarrollado especialmente para placas 32bits con SOC LPC1768 como el utilizado en nuestra máquina. Además, implementa la cinemática rotativa por lo que sería una de las opciones a tener en cuenta para el uso en nuestra máquina. Sin embargo, este firmware lleva un tiempo con el desarrollo congelado. La idea del proyecto es servir de base para seguir con el desarrollo de este tipo de cinemática por lo que en un primer momento descartamos esta opción.

**Klipper.**

A diferencia de los anteriores que se componen solo del firmware trabajando en la propia placa de la electrónica independientemente este se compone de dos partes; por un lado la placa de electrónica sirve de esclavo, tomando valores de sensores, actuando salidas de potencia y controlando la posición de motores, por otro lado encontramos la placa maestra donde trabaja la parte de cálculo del firmware sobre un PC Linux. De este modo la potencia de cálculo queda muy por encima de la obtenida mediante el empleo de una placa con microcontrolador como procesador de movimientos, la cual es una parte crítica en nuestra cinemática por su complejidad en el cálculo de posicionamiento.

Además, al servirnos de apoyo en el PC nos encontramos con un completo servidor de impresión Web, Octoprint, el cual nos permite un control total de la máquina desde nuestro navegador en el PC.

En cuanto a la implementación de la cinemática delta rotativa, ha sido realizada recientemente a la vez que se empezó a plantear el desarrollo de este TFG, incluso con opciones como el autonivelado y calibración avanzada. Klipper ha tenido una evolución en su desarrollo que destaca sobre los demás firmware gracias a no encontrar limitaciones en un microcontrolador para cálculos como encontramos en los otros firmwares. Por ello es una apuesta firme para utilizar en nuestra RoPar3D que sienta bases firmes para seguir trabajando conjuntamente en el desarrollo de este tipo de máquinas.

Para la instalación del conjunto tenemos que empezar con la puesta en marcha de nuestro PC Linux, en nuestro caso nuestra SBC Orange Pi PC. Se ha instalado el sistema operativo Armbian sobre el que se ejecutará nuestro software de impresión web, Octoprint (Figura 107), y nuestro firmware de máquina Klipper, trabajando conjuntamente. En este TFG no se van a explicar detalladamente los pasos de instalación ya que no forman parte del ámbito de estudio, sino en la parte de programación de los parámetros de máquina y del control de esta.

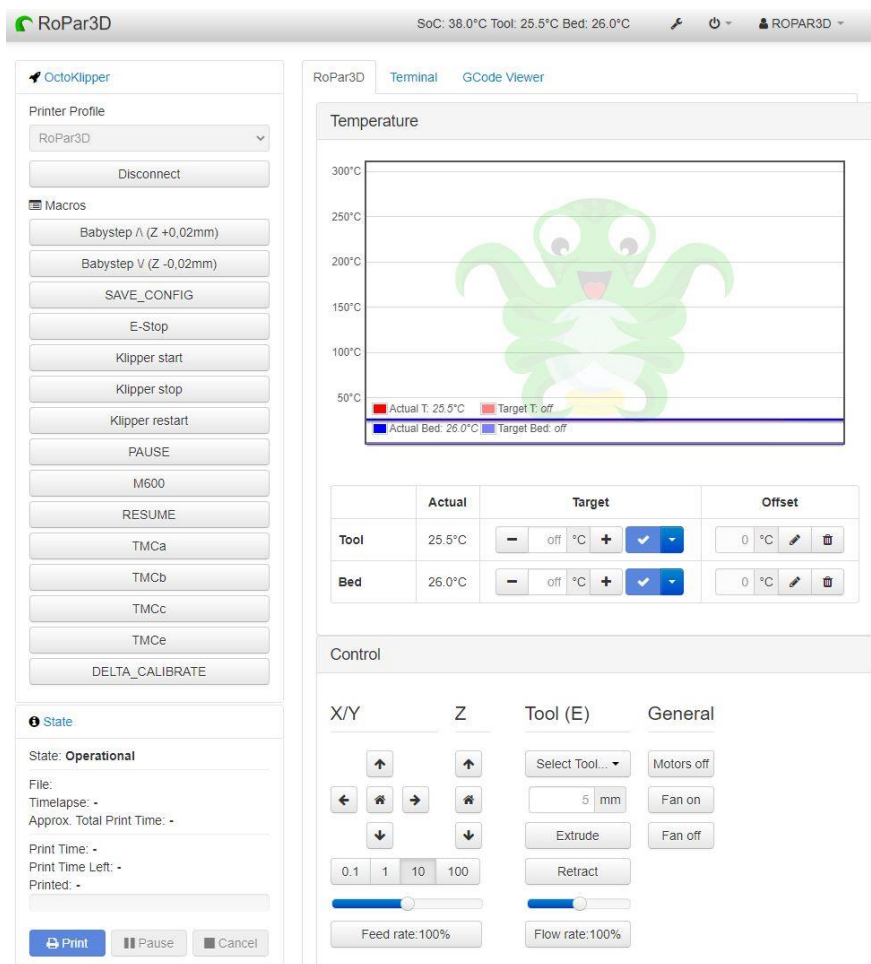


Figura 107: Control web de maquina Octoprint.

Fuente: Elaboración propia.

Para la programación de maquina en Klipper tenemos que editar el archivo de configuración llamado “printer.cfg”. En este apartado encontramos una ventaja de uso al ser un archivo de texto plano fácilmente editable y que no requiere volver a flashear el controlador por lo que ahorraremos un gran tiempo en esta fase. Klipper nos aporta en su documentación programaciones base para distintas cinemáticas y archivos de ejemplo para la nomenclatura de asignación de pines en distintas placas.

La programación de maquina va de la mano de la configuración de pines de salida y entrada. Para ello hemos utilizado los diagramas de pines de nuestra placa Re-ARM / Ramp1.6+ para elaborar un diagrama de nuestras conexiones en uso como podemos ver en la siguiente (Figura 108).

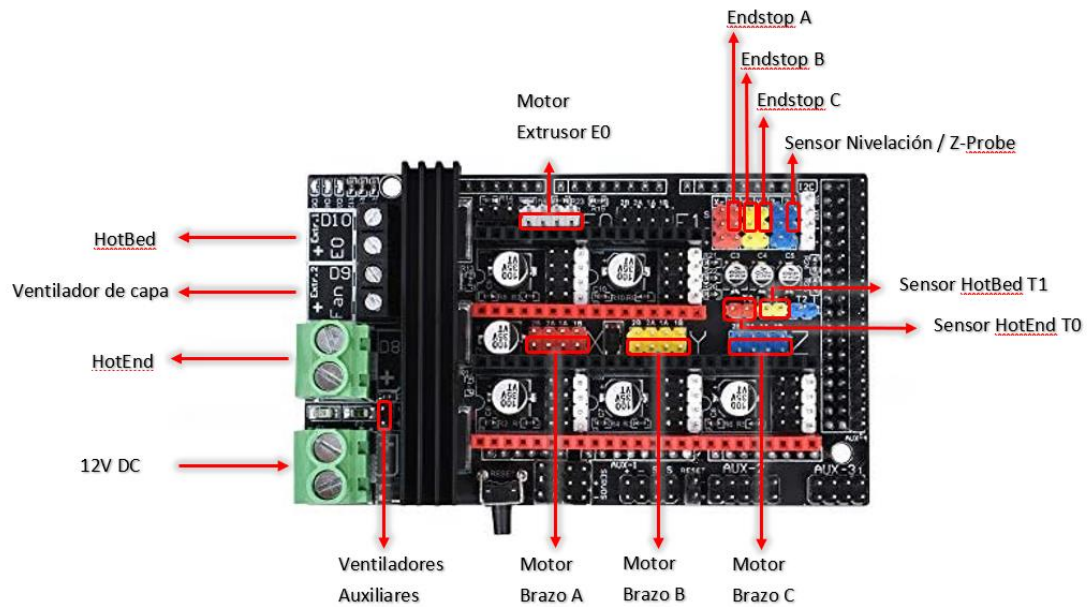


Figura 108: Conexiones placa.  
Fuente: Elaboración propia.

Con el diagrama ya podemos conectar físicamente los componentes en la placa electrónica y proceder posteriormente a la programación en el firmware.

A continuación, se recogen algunos de los parámetros característicos que encontramos en la programación de la máquina, en el ANEXO II, podremos encontrar el archivo de programación de máquina completo, printer.cfg.

**step\_distance:**

Este parámetro regula la distancia de avance en cada paso, es decir, lo que se mueve el brazo en cada pulso de motor en radianes. Para su cálculo, tendremos que aplicar la siguiente fórmula:

$$Step\ Distance = 2 * \pi * \frac{(GradosMotor/360^\circ)}{\frac{Micropasos}{RelacionTransmisi3n}}$$

$$Step\ Distance = 2 * \pi * \frac{\left(\frac{1,8}{360}\right)}{\frac{64}{5}} = 0.000098174770424\ rad$$

**position\_endstop:**

Este parámetro define la posición del final de carrera como la altura entre la boquilla y la cama en el momento en que son pulsados los finales de carrera. Nos define la altura máxima de impresión. Tendremos que medir la altura e indicarla para una primera puesta en funcionamiento, posteriormente este valor se autoconfigurara tras el calibrado automático.



**upper\_arm\_length:** 120.000

Longitud en mm de los brazos del robot, en nuestro caso corresponde con el valor “ $r_f = 120\text{mm}$ ” que podemos ver en la (Figura 18).

**lower\_arm\_length:** 267.000

Longitud en mm de los antebrazos del robot, en nuestro caso corresponde con el valor “ $r_e = 267\text{mm}$ ” que podemos ver en la (Figura 18).

**shoulder\_radius:** 33

Radio resultante de restar el radio Base al radio Efector, en mm. (Figura 18).

$$\text{Shoulder radius} = f - e$$

$$\text{Shoulder radius} = 65 - 31 = 34 \text{ mm}$$

**shoulder\_height:**

Distancia en mm desde la base del robot hasta la cama menos la altura entre la boquilla y el efector. En nuestro caso 280mm.

## 6.6 Puesta en marcha.

Esta fase crucial pone a prueba todo lo llevado a cabo hasta el momento. Lo primero es verificar mecánicamente que todo está atornillado y anclado a la máquina, se revisa uno a uno cada tornillo, y se verifica manualmente el correcto movimiento de los brazos como estaba previsto, intentando identificar algún posible fallo.

Tras la verificación de la parte mecánica se procede a el revisado del cableado y la correcta polaridad de cada cable, además se vuelve a verificar que cada salida corresponde con su componente para evitar cualquier posible fallo eléctrico que dañe algún componente.

Una vez verificados ambos apartados se procede a la conexión de alimentación de máquina. Paso siguiente verifico la comunicación del firmware Klipper con la placa controladora de la máquina, y procedo con las verificaciones de la máquina.

En un primer lugar tenemos que verificar manualmente el estado de los finales de carrera como podemos ver en la (Figura 109). Estos tienen un estado binario en su lógica de funcionamiento, cerrados o abiertos, esta configuración se puede cambiar en el propio final de carrera conectando en los distintos terminales, en cualquier caso, podemos también invertir esta lógica desde el firmware. Sin embargo, visto desde el lado de la seguridad los finales de carrera deben

conectarse como normalmente cerrado, así en el caso de un fallo de conexión del final de carrera la maquina detectaría que esta disparado ese sensor y no actuaría el motor, evitando así cualquier accidente.

```
Send: M119
Recv: a:open b:open c:open
Recv: ok
[...]
Send: M119
Recv: a:TRIGGERED b:TRIGGERED c:TRIGGERED
Recv: ok
[...]
```

*Figura 109: Estados de final de carrera.*

Fuente: Elaboración propia.

Tras verificar que los finales de carrera funcionan correctamente, procedemos a verificar que el sentido de giro de los motores es el correcto, en este caso solo existe el método de prueba y error.

Tras ello se procede al movimiento en vacío de la máquina para comprobar que se mueve en el sentido de los ejes tal y como se espera. En caso contrario habrá que hacer actuar el paro de emergencia y proceder a invertir la dirección de giro en la programación.

El siguiente paso es el de la calibración. Desde el terminal de comandos, lanzaremos el comando DELTA\_CALIBRATE. Se utiliza una sonda de membrana colocada en el nozzle, que actúa como un interruptor al entrar en contacto la boquilla contra la cama. Una de las ventajas de esta sonda es el offset en la calibración siendo 0 en X/Y y de apenas 0.1mm en Z, por lo que no añade un error significativo en la toma de medidas con respecto a la cota real de la boquilla. Tras el proceso de calibración el firmware nos dará los nuevos valores de alturas de cada final de carrera y la altura compensada del efector (Figura 110).



```
Recv: // Working on calibration...  
Recv: // stepper_a: position_endstop: 132.710831 angle: 30.000000  
Recv: // stepper_b: position_endstop: 134.245893 angle: 150.000000  
Recv: // stepper_c: position_endstop: 134.166284 angle: 270.000000  
Recv: // shoulder_radius: 34.000000 shoulder_height: 281.337826
```

*Figura 110: Proceso de calibración automático.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez calibrada la cinemática de la máquina se calibra el extrusor. Para ello tenemos que verificar que la distancia real que extruye corresponde con la solicitada. Hacemos extruir una distancia desde nuestro control de máquina para posteriormente medir la distancia real que ha extruido y tomar la medida con el pie de rey. En caso de ser errónea, se procede a compensar los pasos del motor del extrusor.

Antes de iniciar la impresión se comprueban que el resto de la parte de electrónica funciona correctamente, en el caso del ventilador de la boquilla caliente y el ventilador de capa, ya que en caso contrario podría producir atascos al fundirse el material a lo largo de la garganta. También es conveniente realizar un proceso de auto calibrado del controlador PID de la boquilla para conseguir una temperatura estable en la impresión (Figura 111).

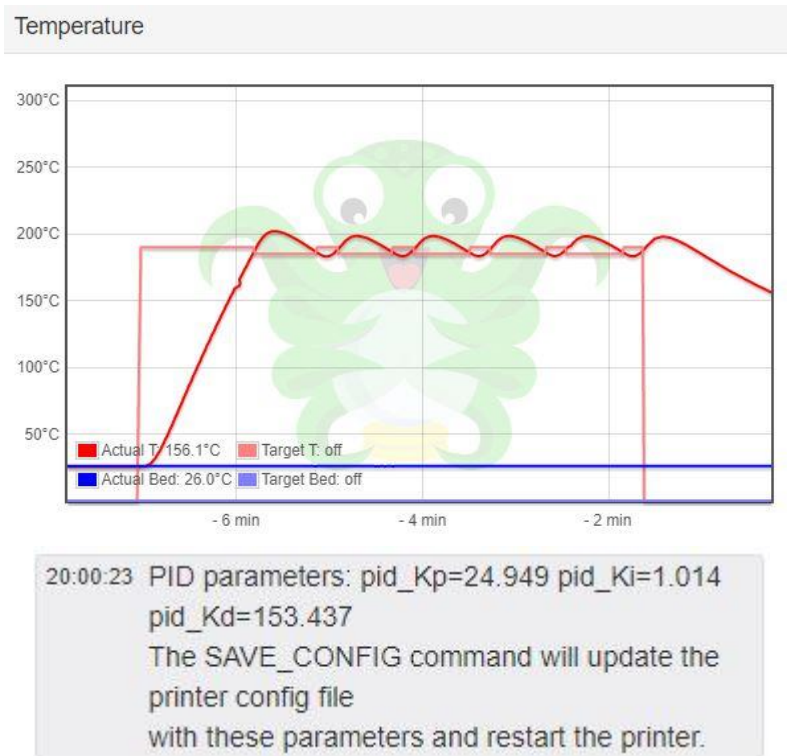


Figura 11: Proceso de calibración de PID.

Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar los pasos anteriores se procedió a la impresión de una primera pieza de prueba (Figura 112).



Figura 112: Resultados de impresión de prueba RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

## 6.7 Estudio comparativo entre tipos de impresoras.

En este apartado se realizará un estudio cualitativo entre distintos tipos de impresoras 3D, para tener una referencia comparativa entre los distintos tipos de cinemáticas y su resultado de impresión, a través de la comparativa de distintas piezas impresas que destacaran ciertos aspectos en la impresión.

Para ello se han seleccionado cuatro modelos distintos, que se han impreso con los mismos parámetros de velocidad y temperatura en cada máquina para luego realizar una comparativa cualitativa sobre los resultados. Se ha valorado la precisión dimensional, tiempo de impresión y acabado superficial.

### TEST 1: Cubo XYZ

El cubo XYZ<sup>[32]</sup>, es considerado uno de los modelos a imprimir básicos para la verificación de una máquina. No solo nos indica en las caras cada eje para verificar que pueda ocurrir algo en dicha dirección, sino que además tiene un tamaño concreto de 20x20x20mm lo cual nos servirá para la verificación de la precisión dimensional de cada máquina.

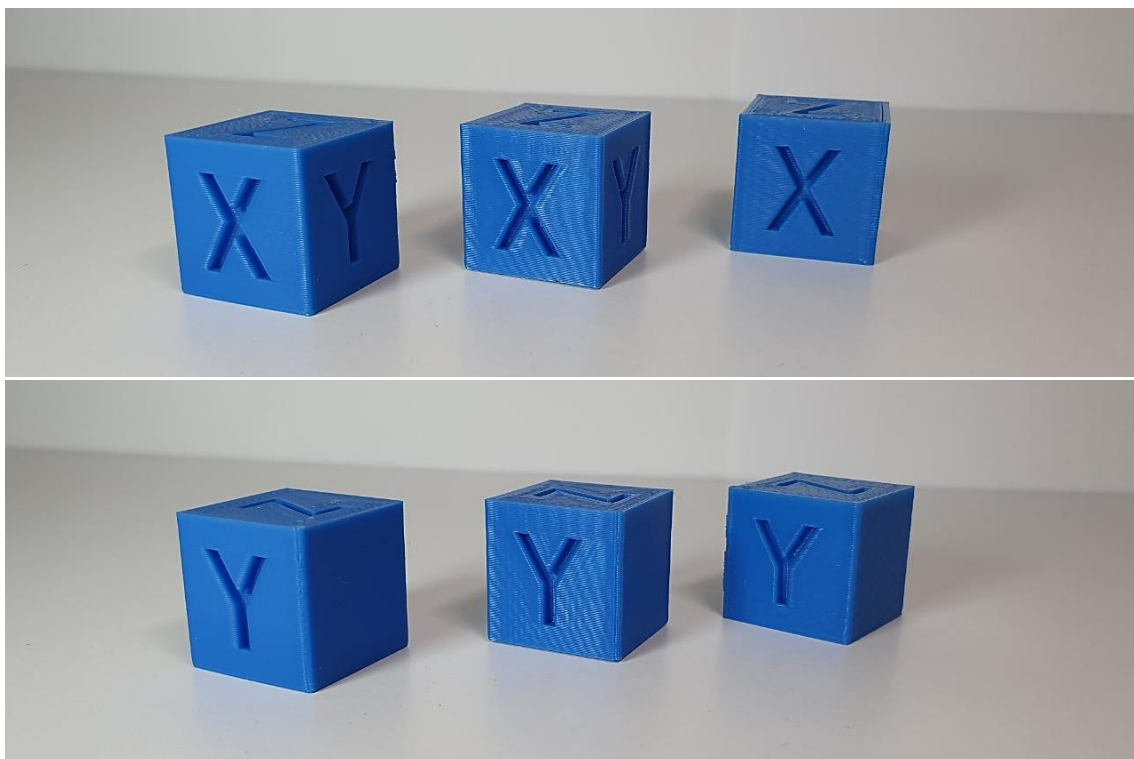


Figura 113: Cubo de calibración XYZ: AKP / AM8 / RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la (Figura 113), para el caso de los cubos impresos en las maquinas AKP y RoPar3D las aristas son bien definidas y no presenta ningún reborde pronunciado. En el caso de la AM8 podemos ver como existe un reborde en las aristas verticales y en las formadas por las letras. Además, en la AM8 podemos ver un ligero patrón de brillo a la derecha de X e Y,

este tipo de fallo se denomina Ghosting, es debido a las inercias y prácticamente imposible de eliminar en cinemáticas cartesianas, podemos ver que no aparece en el resto de los cubos.



Figura 114: Mediciones cubo XYZ impreso en RoPar3D.

Fuente: Elaboración propia.

MÁQUINA	EJE	MEDIDA (mm)	ERROR
<b>AKP</b>	X	20,12	0,6 %
	Y	20,14	0,7 %
	Z	20,08	0,4 %
<b>AM8</b>	X	19,94	-0,3 %
	Y	19,91	-0,5 %
	Z	20,04	0,2 %
<b>RoPar3D</b>	X	20,04	0,2 %
	Y	20,02	0,1 %
	Z	20,05	0,25 %

Tabla 31: Resultados mediciones Cubo XYZ en cada máquina y su error.

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en la Tabla 31, en todos los casos existe una pequeña desviación con la medida real del modelo. Hay que tener en cuenta que el cubo mide 20x20x20 mm. Entre los errores de las maquinas, podemos observar que la mayor desviación la encontramos en la AKP, mientras que la impresora más precisa dimensionalmente es RoPar3D.

## TEST 2: Benchy

El barco “Benchy”<sup>[33]</sup> se ha popularizado mucho en el mundo de las impresoras 3D domesticas como ejemplo de impresión lograda tras una máquina afinada. Parece un diseño sencillo, pero integra una gran cantidad de detalles que hacen sufrir al perfil de impresión, sacando a relucir fallos fácilmente. Por ello es un buen ejemplo para comparar entre máquinas.



*Figura 115: Benchy: AKP / AM8 / RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Como podemos ver en la (Figura 115), el resultado final en las máquinas es muy similar. Se puede llegar a apreciar algo de falta de control de extrusión en las zonas de la ventana en el caso de AKP y RoPar3D, debido a usar un sistema de extrusión bowden en contraposición al directo en la AM8. En el caso del Benchy de RoPar3D, encontramos un patrón de brillo en la proa del barco, que se volverá a observar en los siguientes pruebas.

## TEST 3: Jarrón

Los jarrones tienen la particularidad de imprimirse de manera continua. Son los únicos elementos que se imprimen con la opción de “modo vaso”, lo que produce un hilo de filamento continuo que va depositándose en espiral sobre sí mismo ascendiendo progresivamente en el eje Z sin dan saltos de capa. Por eso el resultado final muestra fallos que vienen de desalineaciones de capas producidas por la mecánica, dejando a un lado problemas de extrusión por mal configuración de retracciones o desplazamientos por mala configuración del flujo. En este caso testaremos con el jarrón FLUID de Josef Prusa<sup>[34]</sup>.





*Figura 116: Jarrón: AKP / AM8 / RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la (Figura 116) podemos ver como en el acabado final para cada máquina la diferencia más notable es el brillo. En el caso de la AKP la pieza tiene un brillo mate muy notable, puede ser debido a una diferencia entre la temperatura real de la boquilla con respecto a la temperatura marcada, lo que produce este acabado distinto en la pieza. Para el caso de la RoPar3D, encontramos un brillo mucho más pronunciado. En cualquier caso, el resultado final es similar entre máquinas, a pesar de las diferencias de brillo.

#### TEST 4: Búho

Otra figura muy común entre los primeros modelos para imprimir en impresora 3D, es el Búho<sup>[35]</sup>, que ha sido modificado en numerosas ocasiones para añadirle accesorios. En este caso Compararemos el búho clásico entre las máquinas.



*Figura 117: Búho: AKP / AM8 / RoPar3D.*

*Fuente: Elaboración propia.*



Como podemos observar en la (Figura 117), repetimos lo observado en otras piezas, para la AKP encontramos un acabado mate que hace no resaltar los detalles de las capas. Entre los resultados de la AM8 y RoPar3D, encontramos un acabado muy similar. En todos los casos vemos pequeños desperfectos en las partes altas de las piezas, al ser muy pequeñas, el tiempo de impresión de capa se ve reducido y se tiende a sobrecalentar.

## COMPARATIVA DE TIEMPOS

IMPRESORA	TEST 1 CUBO XYZ		
	<i>Tiempo Estimado (min)</i>	<i>Tiempo Real (min)</i>	<i>Diferencia (%)</i>
<b>ROPAR3D</b>	17	22	29,4
<b>AM8</b>	19	28	47,37
<b>AKP</b>	18	21	16,6
	TEST 2 BENCHY		
	<i>Tiempo Estimado (min)</i>	<i>Tiempo Real (min)</i>	<i>Diferencia (%)</i>
<b>ROPAR3D</b>	53	64	20,75
<b>AM8</b>	45	72	60,00
<b>AKP</b>	61	66	8,20
	TEST 3 BUHO		
	<i>Tiempo Estimado (min)</i>	<i>Tiempo Real (min)</i>	<i>Diferencia (%)</i>
<b>ROPAR3D</b>	44	59	34,1
<b>AM8</b>	44	70	59,09
<b>AKP</b>	45	56	21,4
	TEST 5 JARRÓN		
	<i>Tiempo Estimado (min)</i>	<i>Tiempo Real (min)</i>	<i>Diferencia (%)</i>
<b>ROPAR3D</b>	117	127	8,54
<b>AM8</b>	81	105	29,63
<b>AKP</b>	106	111	4,72

Tabla 32: Tiempos de impresión por máquina para los diferentes modelos.

Fuente. Elaboración Propia.

Como podemos observar en la tabla 32, la diferencia entre el tiempo real y el estimado, que nos propone el fileteador, varían notablemente. Sin embargo, podemos concretar que la desviación es mayor en la cartesiana. Siendo la Kossel la que menos desviación produce, seguida más de cerca de la RoPar3D.

Estas desviaciones se producen por las diferencias de aceleraciones, tiempos de viaje y parámetros de control del perfil de velocidades que incorpora el firmware. Podemos ver que como se postuló en el inicio de este TFG, las cinemáticas delta son más rápidas que las de tipo cartesiano.

Cabe destacar que RoPar3D es un prototipo y aún existe margen de mejora donde poner a punto aún más la mecánica, pudiendo lograr incluso mejores tiempos.

## 7. COMPETENCIAS.

Durante el desarrollo del presente TFG tanto en la parte teórica como en la de diseño y posterior fabricación de Ropar3D, se ha debido hacer uso de una serie de competencias básicas y específicas.

### 7.1 Competencias básicas.

Las competencias generales adquiridas se pueden resumir en haber aplicado los conocimientos que he adquirido a lo largo de mis estudios en el Grado de Ingeniería Mecánica para ponerlo en práctica y crear algo por mí mismo, que sea de utilidad en el ámbito de la ingeniería y en el ámbito educativo a la vez que resuelva una problemática dentro del área de estudio en cuestión.

Destacaremos pues las siguientes aptitudes básicas:

- Durante la planificación del proyecto, estimación y cálculo de tiempos y de manera general en todo el proyecto, se han puesto de manifiesto las capacidades y conocimientos de la asignatura Oficina Técnica y Proyectos. También a la hora de la redacción de la memoria TFG, donde se añade también la capacidad para comunicar de forma efectiva información, ideas, problemas y soluciones al público (tanto especializado, como no especializado en el ámbito del proyecto).

*Competencias básicas aplicadas<sup>[36]</sup>: CB1, CB2, CB3, CB4 y CB5.*

*Competencias transversales y/o específicas aplicadas: CT1, CT2, CT3, CT4, CR12*

- Durante la etapa de diseño, se ha demostrado poseer y comprender conocimientos del campo de estudio de la Teoría de Mecanismos y Máquinas, puesto que en primer lugar se ha hecho una investigación sobre el estado actual y cálculo reacciones y esfuerzos de la cinemática de los robots con su mecanismo de brazos paralelos para posteriormente ponerlo en práctica al realizar la fabricación de la máquina con este tipo de cinemática. Además, se han realizado cálculos relativos al ámbito de la ingeniería mecánica y se han aplicado también los conocimientos aplicados en Metrología y

Calidad Industrial a la hora de tomar medidas y verificar las cotas de los elementos mecánicos del robot.

De igual modo, también en la etapa del diseño del proyecto, se han implementado tanto los conocimientos adquiridos por cuenta propia como los adquiridos en la asignatura de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) al utilizar el software SolidWorks®.

Al respecto de la asignatura Diseño Asistido por Ordenador, añadir que también se han aplicado sus contenidos en la simulación a través de cálculo de elementos finitos a la hora de llevar a cabo el análisis y la optimización topológica del diseño de las piezas de Ropar3D.

Al respecto de la toma de decisiones de la compra de materiales eléctricos y durante el montaje de la parte eléctrica de Ropar3D (sobre todo para el cálculo de sección de cableado), se ha puesto en práctica los conocimientos aprendidos en las asignaturas de Electrónica Básica, Instalaciones Eléctricas, Teoría de Circuitos y Máquinas Eléctricas.

Por último, dentro de las competencias adquiridas en las diferentes asignaturas de la formación del grado, se hace preciso nombrar también las competencias que se han puesto en práctica y desarrollado en la parte de la robótica del proyecto. A saber:

- Se ha aplicado gran contenido de lo estudiado en Automatización Industrial, a la hora de tener que familiarizarme con la robótica industrial y con la robótica que decidí implementar en el robot.
- Se han puesto en práctica varios de los temas aprendidos en Cálculo y Diseño de Máquinas I y Cálculo y Diseño de Máquinas II sobre todo a la hora del diseño de los elementos mecánicos del robot.
- En cuanto al código máquina empleado en los movimientos del robot, se hace evidente que se han hecho aplicando los contenidos estudiados en Fabricación Industrial.

*Competencias básicas aplicadas: CB1, CB2, CB3, CB5.*

*Competencias transversales y/o específicas aplicadas: CT5, CT8, CB1, CB2, CB5, CRI4, CRI7, CTEM2, CTEM8, CTEQ2.*

## 7.2 Competencias Curriculares Transversales (CCT).

Parafraseando a María Moliner (2007) en su “Diccionario del uso del español”, innovar es introducir novedades en alguna cosa; es sinónimo de cambiar, descubrir, explorar, inventar y reformar. Dicho con otras palabras: innovar es la capacidad de dar respuesta satisfactoria a las necesidades personales y organizativas modificando procesos para aportar un nuevo valor (TFG).

Adquirir esta competencia, supone aportar ideas y planteamientos originales con capacidad de autocritica para plasmar en una o varias ideas soluciones a problemáticas que se han originado (CT1, CT2, CT3, CT4, CB1).

Este proyecto plantea la idea innovadora de juntar la impresión 3D por fabricación de deposición de filamento fundido (FDM), con la idea de un robot de brazos paralelos a fin de aglutinar las ventajas de ambas ideas en una máquina completamente operativa y funcional. Con ello, se han planteado las problemáticas surgidas (tanto las previstas como las imprevistas) para hacer una comparativa y juicio (CB3) de los resultados obtenidos (UAL1, UAL3, UAL5).

Otras competencias transversales<sup>[36]</sup> adquiridas y puestas de manifiesto en el presente proyecto son:

- Para la elaboración del *Abstract* en el presente proyecto, se pone de manifiesto los conocimientos de inglés adquiridos durante mis estudios de Grado en Ingeniería Mecánica y reforzados por motivación personal. Además, durante la consulta de bibliografía y fuentes de información, la mayor parte de los documentos, se encontraban redactados en inglés.

Nótese también a este respecto, el manejo de la lengua inglesa en toda la terminología relativa a la impresión 3D, nomenclaturas y siglas y vocabulario sobre electrónica.

*Competencias transversales aplicadas: UAL7.*

*Competencias específicas aplicadas: CT10*

- Por otro lado, aparte de la redacción de este documento, una vez se exponga este proyecto y se defienda su memoria, se ratificará la competencia y habilidad de poder transmitir información, ideas, juicios, problemáticas encontradas y soluciones a un tribunal de expertos en la lengua materna. También se ha elaborado un glosario y listado de abreviaturas a fin de servir de apoyo a cualquier lector no especializado en el tema.

*Competencias transversales aplicadas: UAL3, UAL4, UAL5, UAL8, UAL9*

*Competencias específicas aplicadas: CT1, CT2, CT3, CT4, CT8*

- Durante todo el proceso de elaboración de este proyecto se han utilizado diversas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en primer lugar, en la fase de documentación e investigación del ámbito del trabajo. Seguidamente, en el diseño 3D y en la puesta en marcha y uso del firmware Klipper. Por ello, y como es tan común hoy en día, se puede afirmar con certeza que el uso de las TIC ha sido una de las herramientas principales utilizadas para la elaboración de este proyecto.

*Competencias transversales aplicadas: UAL2*

*Competencias específicas aplicadas: CT3, CT4, CT10*

### 7.3 Competencias Específicas.

En lo relativo a las competencias específicas<sup>[37]</sup>, aunque durante la formación académica y a través del conjunto de asignaturas y prácticas se han ido adquiriendo todas ellas, durante la creación de este proyecto y redacción de la memoria, se ha hecho mayor incisión en:

- CT1. Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
- CT3 Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
- CT5 Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
- CB1. Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.

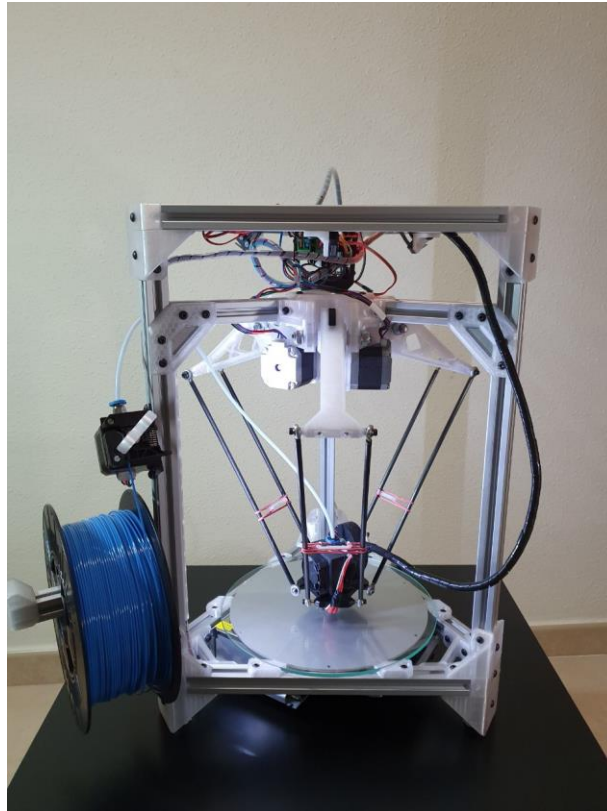
A fin de evitar la reiteración de las competencias ya comentadas con anterioridad, se han escrito las siglas correspondientes a otras competencias específicas que se han aplicado en el presente proyecto que van estrechamente ligadas a otras competencias básicas y/o transversales, aparecen detalladas o entre paréntesis en los dos apartados anteriores tras cada competencia básica o transversal.

Por último, aunque como se puede observar, las competencias aplicadas y adquiridas durante la elaboración de todo el proyecto han sido numerosas, no puedo dejar de señalar los resultados a nivel personal. Este proyecto me ha permitido:

- Realizar un proyecto personal, relacionarlo con el ámbito profesional y llevarlo a cabo satisfactoriamente en los plazos y de la manera prevista.
- Ampliar extensamente las aptitudes de búsqueda, proceso y selección o síntesis de la información.
- Mejorar y afianzar el manejo de diversas herramientas TIC y, sobre todo, del software SolidWorks® y del software de programación de la máquina Klipper.
- Aprender a gestionar mi tiempo de manera eficaz y acorde a una planificación, siendo capaz de reorganizarme en base a los problemas e imprevistos surgidos.
- Ganar confianza en mí mismo a la hora de identificar problemas y en mi capacidad de juicio a la hora de tomar decisiones para la resolución eficaz de éstos.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Grosso modo, el resultado final de este proyecto es una máquina impresora 3D de cinemática de brazos paralelos completamente operativa y funcional. A continuación, se presenta una fotografía (Figura 118) de la impresora terminada tras todos los procesos y el optimizado comentados en el documento.



*Figura 118: Ropar3D - Impresora 3D basada en robot paralelo tipo Delta.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 8.1 Diseño de las piezas en SolidWorks®.

En general, en cuanto al diseño 3D realizado por ordenador, el resultado ha sido bastante satisfactorio dado que el programa dispone de una amplia variedad de herramientas que facilitan el diseño y ensamblaje de las piezas y, además, proporciona datos exhaustivos acerca del peso, material necesario para la construcción, etc. que fueron fundamentales a la hora de realizar el optimizado de las piezas.

### 8.2 Construcción de Ropar3D.

La fabricación de la máquina, pese a ser la fase del proyecto que más tiempo ha tomado, ha sido la más satisfactoria. Al haber elegido perfilaría de aluminio, al ser más ligera y adaptable facilita la unión de los perfiles de la máquina.

De igual modo, la arquitectura del robot fabricado, al ser independiente, admite la posibilidad de añadir nuevos cabezales futuros.

Si bien es cierto que la construcción de la máquina es la fase que más he podido disfrutar, cabe destacar también que, al tratarse de un proyecto técnico experimental que no se basa solo en el diseño sino en la fabricación real de la máquina, y, pese a haber estudiado y aplicado toda la información acerca de la impresión 3D y la robótica de cinemática paralela, conforme el proyecto ha ido avanzando, la envergadura de la fabricación de la máquina ha supuesto un gran reto personal y profesional.

Conforme el proyecto y la fabricación de Ropar3D avanzaba, se fue verificando la problemática real de la cuestión planteada. Y es que, a pesar de que la información y bibliografía disponible sobre ambos temas es muy extensa, existen algunos aspectos en los que se carece de documentación detallada que unifique las dos ideas claves de este proyecto: robot paralelo e impresión 3D. Es por ello que, en el momento de la puesta en práctica de lo expuesto en el proyecto, ha sido cuando han ido planteándose las problemáticas a resolver.

Un ejemplo claro de esto y que dificultó la construcción de la estructura de Ropar3D, fue la necesidad de fabricar mis propios útiles de corte para poder cortar la perfilera según el diseño planeado. Estos útiles de corte se han detallado en el apartado 6.3 del presente proyecto. Como se menciona, este caso concreto supuso que se hiciera preciso diseñar igualmente los útiles de corte e imprimirlos para poder realizar el montaje de la máquina.



## 9. VIABILIDAD ECONÓMICA.

Además de los costes comentados dentro del apartado de listado de materiales, para exponer la viabilidad económica del presente proyecto, hay varios aspectos que se deberían también incluir a fin de una visión industrial de fabricación del presente proyecto. A saber:

- Costes derivados de la investigación, el concepto, diseño y posterior fabricación y montaje de la máquina.

A este respecto, habría que tener en cuenta las horas invertidas por el alumno en el proyecto. Si partimos de lo expuesto en la sección de Cronograma y diagrama de Gantt, deberíamos descontar la fase inicial (puesto que en el caso de fabricar RoPar3D de manera industrial, este apartado no se llevaría a cabo).

Con ello, nos quedarían 630,5 horas de trabajo. Contando con el salario estimado de un ingeniero en plantilla que puede llegar a cobrar entre 10 y 12€/hora, contaríamos con 6305€ de coste añadido.

- Costes derivados de licencias y softwares utilizados. En este caso, partiremos de la idea de que la empresa ya dispondría de las licencias contratadas de uso de SOLIDWORKS. Una licencia de uso de SOLIDWORKS se estima cuesta 6600€ por lo que, en caso de no contar con ella, sería de especial interés añadir estos costes al presupuesto ya que influirían como inversión inicial para llevar a cabo el diseño y fabricación de nuestra máquina.

- Costes de la máquina. Se dividen en varios apartados:

- o Coste de materiales de producción por FDM.

Como se comentaba anteriormente, el coste total de las piezas de RoPar3D que se han fabricado mediante impresión FDM, es de 23,85€ teniendo en cuenta el coste fijo de electricidad en su impresión el de material de impresión.

- o Costes de materiales eléctricos y electrónicos.

Al este respecto, nuestros costes en materiales eléctricos ha sido 174,84€, en materiales mecánicos ha sido 104,52€. Sin embargo, este coste, en caso de llevarse a cabo un proceso de fabricación en serie, podría verse reducido notablemente dado que la empresa probablemente cuente con mejores precios al poder tener proveedores de estos elementos al por mayor.

Si tenemos en cuenta todo lo mencionado anteriormente, una estimación de presupuesto de la fabricación a nivel industrial de RoPar3D sería como sigue:

<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	
<i>Salario Ingeniero</i>	6.305 €
<i>Licencia SOLIDWORKS</i>	6.600 €
<i>Material Electrónico y Mecánico</i>	279,36 €
<i>Costes de impresión FDM</i>	23,85 €
<b>TOTAL</b>	<b>13.208,21 €</b>

Tabla 33: Presupuesto viabilidad económica.

## 10. VIABILIDAD AMBIENTAL.

Si bien es cierto que la mayoría de impresoras FDM funcionan con filamento de plástico considerándose este aspecto como la mayor desventaja de la impresión 3D por FDM a nivel ambiental, se debe considerar que existen algunos filamentos que son reciclables como es el caso del PETG utilizado en la construcción de RoPar3D.

Por lo tanto, a la hora de mantenimiento y repuestos de RoPar3D, a pesar de que la parte mecánica y electrónica no es reciclable, las piezas impresas podrían ser recicladas. Además, se pueden volver a imprimir repuestos de estas piezas in situ, mediante el uso de la misma máquina por lo que no solo ahorraríamos en costes de fabricación, sino evitaríamos los costes y contaminación inherentes al transporte de las piezas.

Por otro lado, además del PETG, la máquina está prevista para utilización de PLA como material de impresión, siendo este un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, que se encuentran principalmente en el maíz.

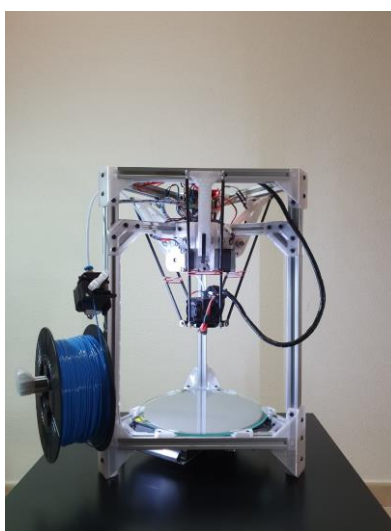
En contraposición a esto, en caso de querer utilizar el ABS como material de impresión, además de tener en cuenta que este material produce gases nocivos durante su extrusión, tendríamos que considerar la gestión de residuos de este material que, aunque es reciclable, no se trata biodegradable como es el caso del PLA.

También hay que tener en cuenta la vida útil de los materiales impresos. Algunas de las piezas están sometidas a más desgaste físico o por fatiga que otras, por lo que se debe igualmente considerar en este apartado que se requerirá una mayor frecuencia de repuestos.

## 11. CONCLUSIONES.

### 11.1 Conclusiones.

No solo con el diseño sino con la fabricación propia y desde cero de RoPar3D, sentamos un precedente en cuanto a innovación de tecnología de prototipado rápido ya que quizás nuestro concepto de impresora 3D y la fabricación aditiva, podrán ligarse más fácilmente a las líneas de producción debido a la modularidad que presenta esta máquina donde se pueden utilizar distintos cabezales si se llegan a desarrollar en futuras líneas de investigación y con ello, con una misma máquina, cambiando el cabezal, podrán realizarse múltiples tareas (impresión 3D, corte, pinza para robot pick and place, etc.).



*Figura 119: RoPar3D final con bobina.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Aunque como desventaja ya se ha comentado el requisito de destreza y experiencia en su uso, el manejo de los software y firmware con código abierto permite trabajar gratuitamente y con mayor libertad y sin las limitaciones de uso que presentan otros programas, permitiéndonos la creación de una máquina totalmente personalizable que posibilita su futura mejora sin necesidad de cambiar la programación de la máquina.

Además, la utilización del servidor web de impresión, Octoprint, facilita el control en remoto de RoPar3D al poder controlarla incluso desde el móvil, demostrando una verdadera ventaja de uso de este firmware.

En cuanto a los postulados originales, hemos podido verificar que:

- Velocidad: las impresoras con cinemática Delta presentan tiempos de impresión menores, por lo que son más rápidas.

- Precisión: en los resultados obtenidos RoPar3D ha conseguido los parámetros de impresión más precisos con un error menor en la desviación de medida.
- Acabado: las piezas han resultado con un exceso de brillo que resaltaba ciertos patrones en las caras de las piezas. Se necesita un esfuerzo adicional para resolver este punto.

Los resultados obtenidos confirman que la cinemática delta es un camino acertado a seguir para el futuro desarrollo de nuevas máquinas de impresión 3D FDM

La cesión de RoPar3D al área de Expresión Gráfica en la Ingeniería, gracias a la sugerencia y asistencia de D. Manuel Ángel Aguilar Torres, permitirá que el proyecto sea usado en el ámbito académico como instrumento de aprendizaje en la materia de Diseño Asistido por Ordenador, pero también puede permitir a alumnos de otras ingenierías, debido a las numerosas posibilidades de futuras líneas de investigación que quedan abiertas y cualquier posible mejora en la electrónica, diseño o implementación de nuevos cabezales.

## 11.2 Conclusiones personales

El desarrollo de este trabajo final de Grado aplicando la metodología experimental ha permitido alcanzar los objetivos planteados aplicando no solo la teoría e investigación sino aplicando la práctica a la hora de realizar la construcción desde cero de una máquina para su posterior análisis.

El uso de técnicas de impresión 3D, permite la profundización en las competencias adquiridas durante el grado a la vez que una mayor motivación y satisfacción del alumno al ser capaz de planear, desarrollar y fabricar un producto final visible y tangible.

## 11.3 Proyección de futuro.

Ha quedado demostrado que, sin lugar a duda, la impresión 3D ya representa una revolución tanto industrial como social debido a la reducción de costes y accesibilidad a la par que la mejora de calidad e innovación en cuanto a la incorporación de nuevos materiales de impresión.

En el ámbito industrial, la revolución prevista del proceso de fabricación por adición es indudablemente impactante por el simple e innovador hecho de que mediante la impresión 3D se podrán obtener piezas imposibles de fabricar mediante las tecnologías tradicionales de fabricación comentadas en el marco teórico del presente proyecto. Este hecho, unido a las evidentes ventajas en cuanto a la versatilidad, la reducción de costes y tiempos de montaje; la

reducción de residuos (al tratarse de un método aditivo que solo imprime lo que se precisa y sin necesidad de moldes de producción); la posibilidad de reducir niveles de stock ya que existe la opción de fabricar rápidamente bajo demanda; y la posibilidad de detección temprana de errores.

El hecho pues de crear una máquina de impresión 3D que disponga de una cinemática de robot paralelo en lugar de una cartesiana, con las ventajas que se han mostrado a lo largo del proyecto, no hace más que demostrar que la investigación y desarrollo de este ámbito promete triunfar en la implementación industrial.

#### 11.4 Propuestas de mejora.

El presente proyecto, dado que aborda un tema en continua ebullición, se plantea como un documento abierto a posibles futuras mejoras y líneas de investigación.

Las cualidades del sistema modular RoPar3D, teniendo en cuenta que tanto el ámbito de la robótica como el de la impresión 3D son un entorno muy cambiante, abren un abanico de diferentes posibilidades para su desarrollo y mejora.

A continuación, se presentan algunas propuestas que han ido conformándose conforme se desarrollaban las diferentes fases del proyecto cuando iban surgiendo nuevas posibilidades en la toma de decisiones o conforme a las ventajas o limitaciones que se han observado tras la fabricación y puesta a prueba de RoPar3D.

##### 11.4.1 Cartelas en los perfiles

Una vez que el diseño está cerrado se puede replantear la construcción de la estructura. Se ha comprobado que los perfiles de aluminio presentan cierto grado de flexión aun con los refuerzos estructurales instalados.

Para evitar este fenómeno no deseado se plantea la idea de fabricar unas pletinas de chapa plegada que unan las esquinas completamente de manera vertical (Figura 120). De tal manera que con esta nueva estructura se presenta una mayor rigidez en el conjunto estructural.



*Figura 120: RoPar3D con cartelas instaladas.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 11.4.2. Cabezal láser.

Dentro de las capacidades del robot se puede plantear la idea de llevarlo más allá de solo el uso de impresora 3D. El efector se puede rediseñar para la incorporación de ciertos accesorios para ampliar el abanico de usos.

Una de estas opciones es la incorporación en el efector de un cabezal láser de grabado. Estos elementos tienen unas dimensiones similares a las del hotend y es factible la implementación en nuestro efector. Además, por la característica de la máquina de tener una plataforma de impresión fija nos permite poder plantearnos este uso. Por otro lado, la electrónica es capaz de cambiar la salida de un calentador para mandar la señal al del controlador láser, quedando solo por introducir el cogido maquina específico para dicho control de láser.

#### 11.4.3. Pinza hidráulica / Pinza de vacío para implementación robot “pick and place”.

Otra Línea de trabajo futura de investigación, partiendo del postulado del apartado anterior, sería desarrollar un cabezal con una servo-pinza o pinza hidráulica para poder transformar la impresora 3D en un robot “Pick and Place”.

Esta línea de investigación, de resultar satisfactoria, podría suponer un gran avance en los sistemas de líneas de producción, pero también requeriría la adaptación de RoPar3D a un formato mayor para que esto fuera posible.

#### 11.4.5 Cubierta para tapar los motores y la parte electrónica.

Por otro lado, sería interesante plantear la opción de añadir unas cubiertas en la zona de electrónica superiores e inferior, protegiendo así a estos componentes más delicados. Sin embargo, se tendría que pensar en la opción de incorporar ventilación para evitar el sobrecalentamiento.

La adición de esta cubierta conseguiría también mejorar el aspecto (componente estética) de la impresora.

#### 11.4.6 Doble extrusión.

Dado que en RoPar3D contamos con un sistema de extrusión bowden en la que el extrusor es independiente de la boquilla, se puede hacer uso del segundo zócalo libre para extrusor con el que contamos en la placa electrónica, para implementar un extrusor adicional en la máquina. Consiguiendo así la opción de imprimir en dos colores o el uso de filamento soluble para la impresión de los soportes. En este aspecto tendríamos que contar con añadir en el presupuesto el coste adicional del motor, extrusor y controlador del motor, además tendríamos que modificar la parte del bowden para incorporar un accesorio en “Y” de entrada en el hotend.

## BIBLIOGRAFIA

- <sup>[1]</sup> Yanes, J. La impresión 3D metálica, la nueva revolución industrial, Comunidad de divulgación BBVA Opendmind; (2018). Recurso en línea disponible a través de: [www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/la-impresion-3d-metalica-la-nueva-revolucion-industrial](http://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/la-impresion-3d-metalica-la-nueva-revolucion-industrial)
- <sup>[2]</sup> Redacción Interempresas. La integración de la impresión 3D en procesos de fabricación industrial;(2020). Recurso en línea disponible a través de: [www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/265701-La-integracion-de-la-impresion-3D-en-procesos-de-fabricacion-industrial.html](http://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/265701-La-integracion-de-la-impresion-3D-en-procesos-de-fabricacion-industrial.html)
- <sup>[3]</sup> Chakravorty D., STL File Format (3D Printing) – Simply Explained. (2019), All3DP. Disponible en línea través de: [www.all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/#pointtwo](http://www.all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/#pointtwo)
- <sup>[4]</sup> Ian Gibson, D.W.R., Brent Stucker, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. 2009: Springer. 460.
- <sup>[5]</sup> ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, in Active Standard ASTM F2792 12a2012, ASTM International.
- <sup>[6]</sup> Impresión 4D: ¿la Cuarta Revolución Industrial? Blog Innovación Iberdrola, disponible a través de: [www.iberdrola.com/innovacion/que-es-la-impresion-4d](http://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-la-impresion-4d)
- <sup>[7]</sup> Estudiantes de Industriales fabrican una impresora 3D de chocolate (2015), Destacados UPCT. Artículo disponible a través del siguiente enlace: [www.upct.es/destacados/cdestacados.php?ubicacion=general&id\\_buscar=5487](http://www.upct.es/destacados/cdestacados.php?ubicacion=general&id_buscar=5487)
- <sup>[8]</sup> RepRap Open Source 3D Printer, United Diversity. Video a través de YouTube disponible en: [www.youtube.com/watch?time\\_continue=68&v=FUB1WgiAFHg&feature=emb\\_logo](http://www.youtube.com/watch?time_continue=68&v=FUB1WgiAFHg&feature=emb_logo)
- <sup>[9]</sup> FFF vs. FDM – What’s the real difference?, 3D Printer Power, Disponible a través de: [www.3dprinterpower.com/fff-vs-fdm/](http://www.3dprinterpower.com/fff-vs-fdm/)
- <sup>[10]</sup> D. Holland, G. O’Donnell y G. Bennett: Open Design and the Reprap Project 27th International Manufacturing Conference, GMIT, Galway, Ireland, 1-3 September 2010, V. Butler, K. Kelly, P. Delassus, and G. Mac Michael, 2010, 97 – 106. Trinity’s Access to Research Ar. Disponible a través de: [www.tara.tcd.ie/handle/2262/41053](http://www.tara.tcd.ie/handle/2262/41053)
- <sup>[11]</sup> RepRap [www.reprap.org/](http://www.reprap.org/)



- [12] Biblioteca Online Makerbot Thingiverse, Makerbot 2009, Disponible a través de: [www.thingiverse.com/about](http://www.thingiverse.com/about)
- [13] Top 12 con los mejores vehículos impresos en 3D, Feb 2017, 3D Natives, disponible a través de: [www.3dnatives.com/es/top-12-vehiculos-impresos-en-3d-02022017/](http://www.3dnatives.com/es/top-12-vehiculos-impresos-en-3d-02022017/)
- [14] BCN3D+ imprimiendo una escultura de siete metros, Blog BCN3D, disponible en: [www.bcn3d.com/es/bcn3d-imprimiendo-una-escultura-de-siete-metros/](http://www.bcn3d.com/es/bcn3d-imprimiendo-una-escultura-de-siete-metros/)
- [15] Almada-Lobo, F. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management JIM*, 3, 4 (2015) 16-21.
- [16] Lipson, H. y M. Kurman, (2013), *Fabricated: The new world of 3D Printing*. John Wiley & sons, Inc.
- [17] Crump, S.S., Apparatus and Method for creating Three-Dimensional Objects, in United State Patent Office 1989, Stratasys Inc: United States of America. p. 15.
- [18] Chandrashekar, A., (2014), "3D Printing and Digital Fabrication" 3DP4E, (recurso en línea) Disponible a través de Googlebooks
- [19] Sánchez, A., (2015), "Impresoras 3D Cartesianas vs. impresoras 3D Delta". Artículo en línea disponible a través de: [www.diwo.bq.com/impresoras-3d-cartesianas-vs-delta/](http://www.diwo.bq.com/impresoras-3d-cartesianas-vs-delta/)
- [20] Aracil, R., Sabater, J.M., (2006), "Robots Paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro". Disponible a través de: [www.researchgate.net/publication/28141949\\_Robots\\_Paralelos\\_Maquinas\\_con\\_un\\_Pasado\\_para\\_una\\_Robotica\\_del\\_Futuro](http://www.researchgate.net/publication/28141949_Robots_Paralelos_Maquinas_con_un_Pasado_para_una_Robotica_del_Futuro)
- [21] Clavel R., (1989). "Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère". *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 23 (6), pp, 501-519.
- [22] Rey L, Clavel R (1998) "A General Overview and History of Parallel Robots". 1. Internationales Parallelkinematik-Koologium IPK98, ETHZ, CH-Zürich, 4th of June.
- [23] González Roldán, F.; Vargas Jimenez, J.A., (2013), "Diseño de un sistema de movimiento de ejes complejos: Robot Paralelo Tipo Delta" Tesis Ingeniería Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia. En línea disponible a través de: [www.researchgate.net/publication/329874723\\_Robot\\_paralelo\\_tipo\\_Disenio\\_de\\_un\\_sistema\\_de\\_movimiento\\_de\\_ejes\\_complejos\\_Robot\\_paralelo\\_tipo\\_Delta](http://www.researchgate.net/publication/329874723_Robot_paralelo_tipo_Disenio_de_un_sistema_de_movimiento_de_ejes_complejos_Robot_paralelo_tipo_Delta)
- [24] Sánchez-Alonso, R.E., Castillo-Castañeda, E., González-Barbosa, J.J., Balmaceda-Santamaría, A.L., (2015), "Análisis del desempeño cinetostático de un robot paralelo tipo Delta reconfigurable". Recurso en línea disponible en: [www.reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1405774315000074?token=D42AFB91D4D892FD5](http://www.reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1405774315000074?token=D42AFB91D4D892FD5)

[1B3EBoEA92EB5FF71E9BD140781811FB0DEF4E74E78DDCABE5FoEFEE86C6E6769C7BF3C57D8AD6E](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248865)

- [25] Firmware libre de impresión 3D Klipper disponible a través de: [www.klipper3d.org](http://www.klipper3d.org)
- [26] Herramienta calculo parámetros robot delta disponible en línea a través del enlace: [www.marginallyclever.com/other/samples/fk-ik-test.html](http://www.marginallyclever.com/other/samples/fk-ik-test.html)
- [27] Aguilar Torres, F. J., 2012. Apuntes de la asignatura Diseño Asistido por Ordenador. Material de uso interno disponible a través de la plataforma de la UAL, Almería: Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería.
- [28] Ficha técnica, esquemas y modelo 3d Re-Arm. Disponible a través de: [www.panucattdevices.freshdesk.com/support/solutions/folders/1000226299](http://www.panucattdevices.freshdesk.com/support/solutions/folders/1000226299)
- [29] Controladores Trinamics TMC2130, Detalle de producto disponible a través de: [www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2130/](http://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2130/)
- [30] MiniPc de Software libre Orange Pi, [www.orangepi.org/orangepipc/](http://www.orangepi.org/orangepipc/)
- [31] Reglamento electrotécnico de baja tensión, Tabla 1, ITC-BT-19: [www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/Si\\_Ambito.aspx](http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/Si_Ambito.aspx)
- [32] Archivo de impresión 3D Cubo de calibración XYZ disponible en: [www.thingiverse.com/thing:1278865](http://www.thingiverse.com/thing:1278865)
- [33] Archivo de impresión 3D Benchy disponible en: [www.thingiverse.com/thing:763622](http://www.thingiverse.com/thing:763622)
- [34] Archivo de impresión 3D Jarrón disponible en: [www.thingiverse.com/thing:1330212](http://www.thingiverse.com/thing:1330212)
- [35] Archivo de impresión 3D Jarrón disponible en: [www.thingiverse.com/thing:18218](http://www.thingiverse.com/thing:18218)
- [36] Competencias de carácter básico para los títulos de Grado. R.D. 1393/2007, 29 de octubre. Disponible en: [www.ual.es/estudios/grados/presentacion/objetivos/2910](http://www.ual.es/estudios/grados/presentacion/objetivos/2910)
- [37] Competencias específicas para el título de Grado en Ingeniería Mecánica. Disponible en: [www.ual.es/application/files/3315/8202/2186/competencias-esp-mecanica.pdf](http://www.ual.es/application/files/3315/8202/2186/competencias-esp-mecanica.pdf)

## **ANEXOS**

ANEXO I. PLANOS

ANEXO II. Archivo de configuración de máquina (printer.cfg)

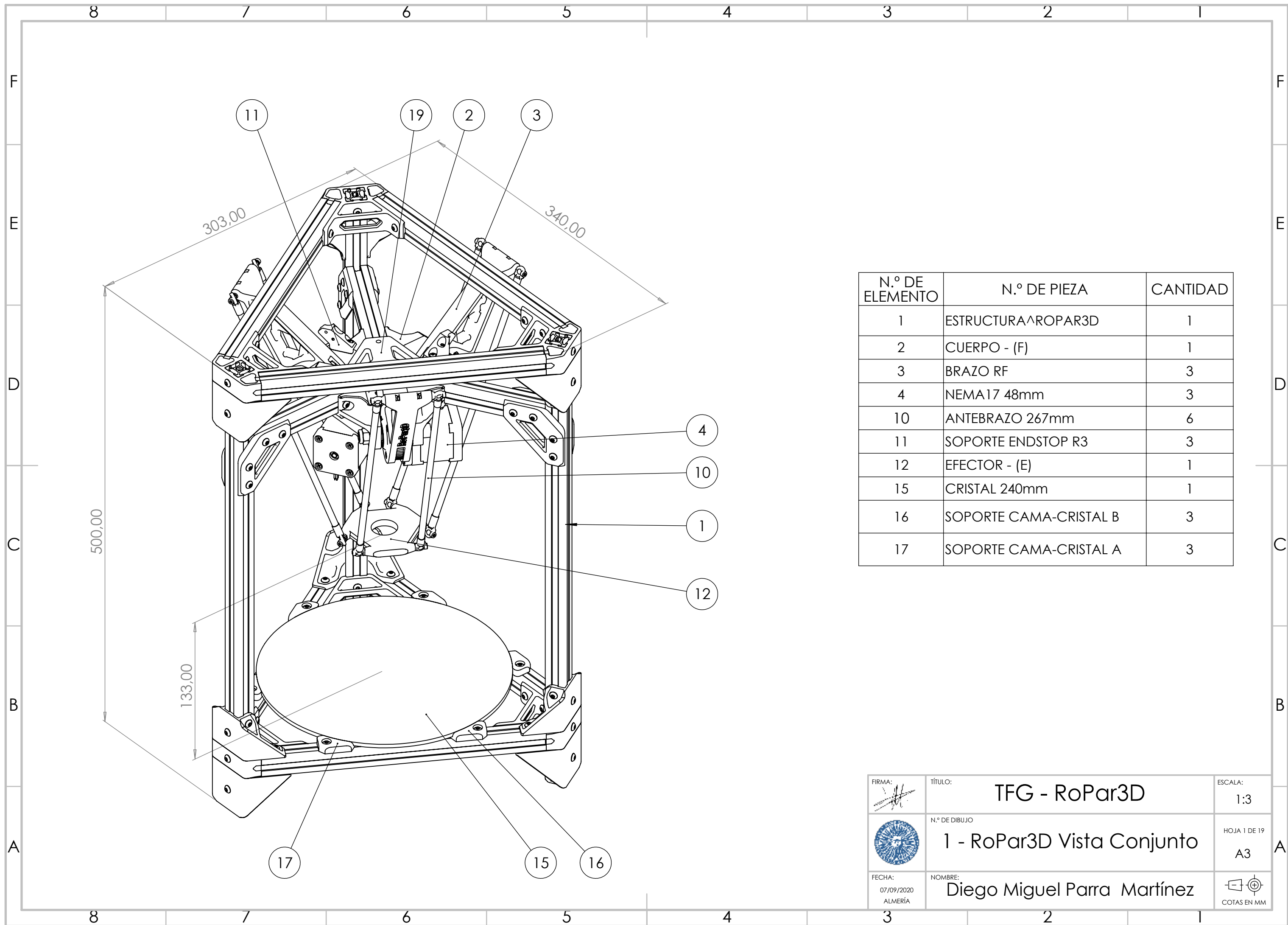
ANEXO III. PLANOS ÚTILES CORTE

## ANEXO I. PLANOS

En este anexo se recogen las distintas piezas que componen el diseño de RoPar3D. Estos planos contienen las cotas de dimensión principales, ya que los diseños contienen superficies de forma libre con cotas variables almacenadas en el fichero 3D para su futura reproducción vía mecanizado o impresión 3D.

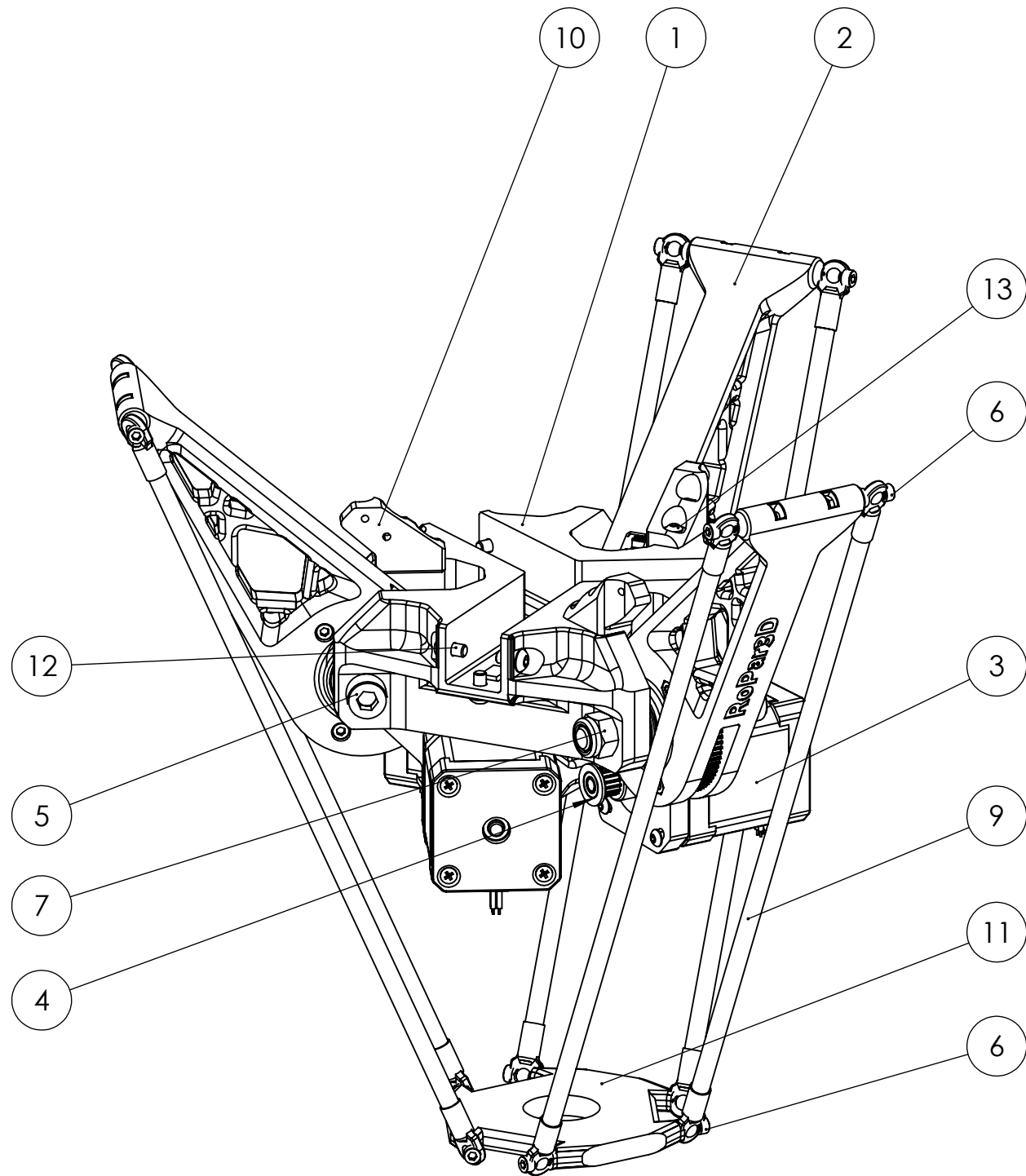
Contenido:

- 1 - RoPar3D Vista Conjunto
- 2 - RoPar3D Robot
- 3 - RoPar3D Estructura
- 4 - Ropar3D Brazo
- 5 - Cuerpo
- 6 - Brazo
- 7 - Antebrazo
- 8 - Efecto
- 9 - Esquinera
- 10 - Refuerzo Esquinera
- 11 - Escuadra central
- 12 - Escuadra
- 13 - Rueda GT2-80T
- 14 - Soporte Endstop
- 15 - Soporte Cristal 240mm
- 16 - Soporte OPI PC
- 17 - Soporte Re-ARM
- 18 - Tapa Portabobina
- 19 - Clip Cables



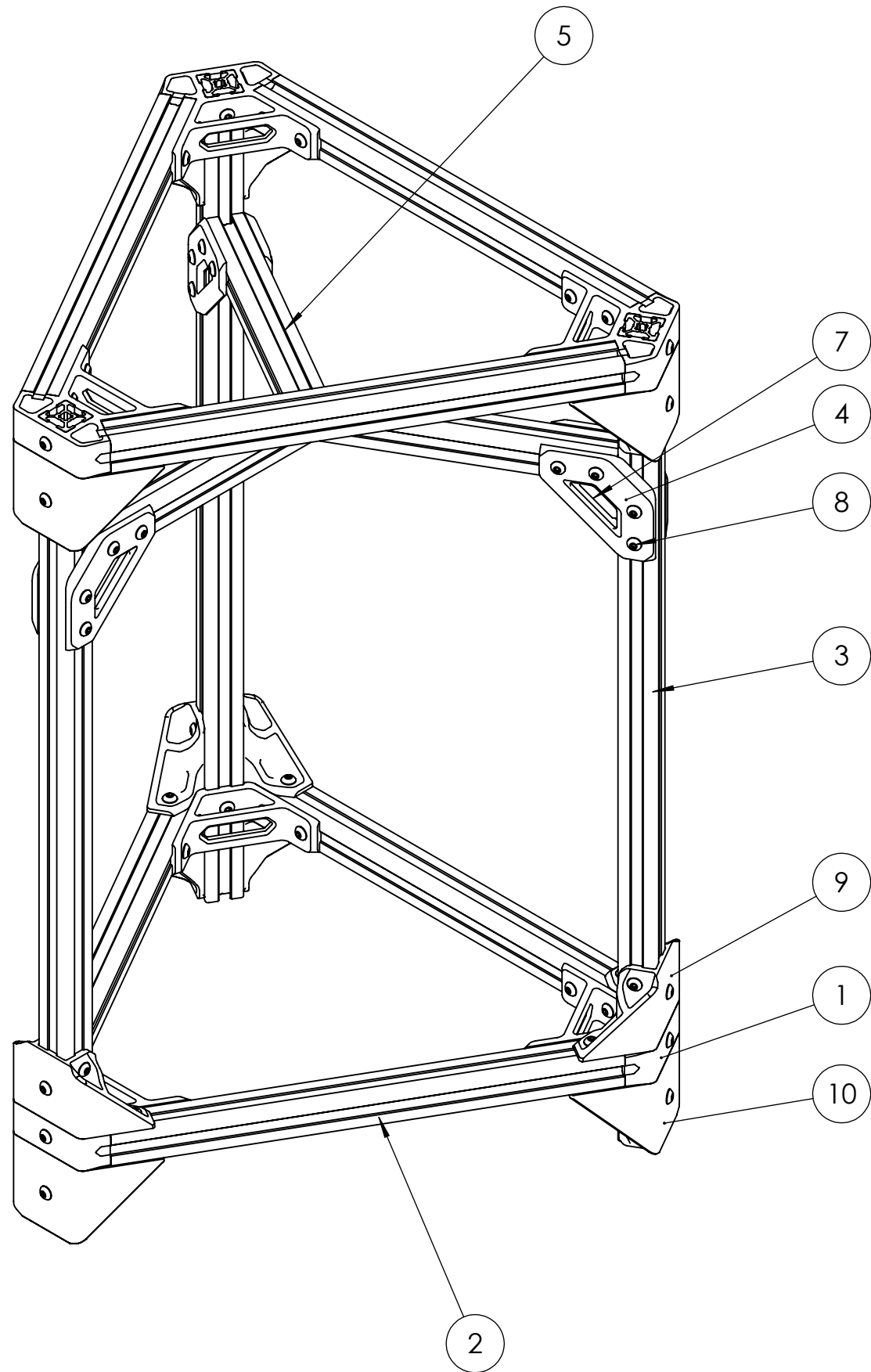
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	ESTRUCTURA^ROPAR3D	1
2	CUERPO - (F)	1
3	BRAZO RF	3
4	NEMA17 48mm	3
10	ANTEBRAZO 267mm	6
11	SOPORTE ENDSTOP R3	3
12	EFECTOR - (E)	1
15	CRISTAL 240mm	1
16	SOPORTE CAMA-CRISTAL B	3
17	SOPORTE CAMA-CRISTAL A	3

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:3
	N.º DE DIBUJO <b>1 - RoPar3D Vista Conjunto</b>	HOJA 1 DE 19 A3
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM



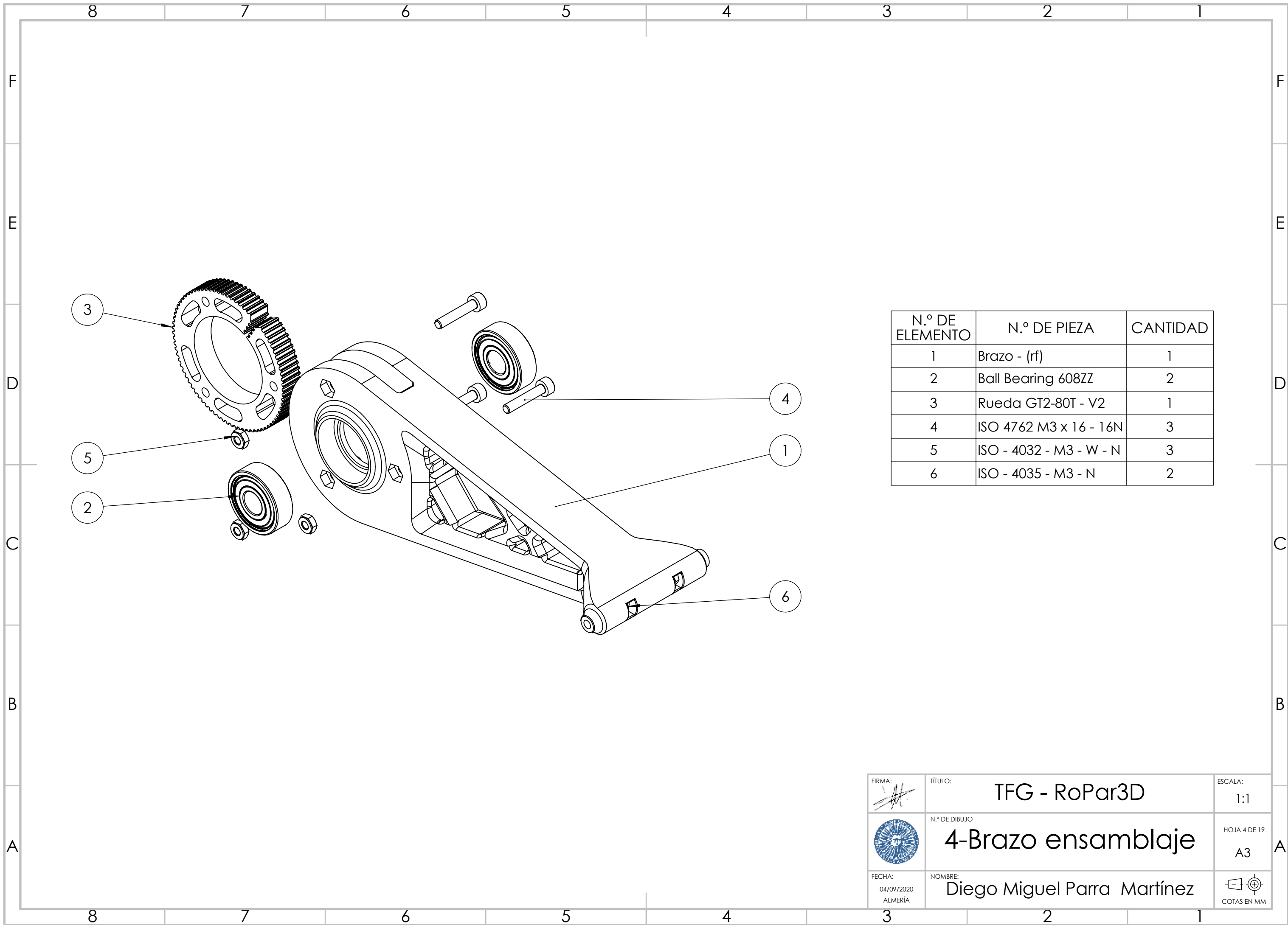
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cuerpo - (f)	1
2	Brazo RF	3
3	Nema17 48mm	3
4	GT2_16T	3
5	ISO 4762 M8 x 60 - 28N	3
6	ISO 4762 M3 x 25 - 25N	12
7	ISO 7040-M8-N	3
9	Antebrazo 267mm	6
10	soporte endstop R3	3
11	efector - (e)	1
12	ISO 7380 - M4 x 8 - 8N	12
13	ISO 7380 - M3 x 10 - 10N	18

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>2 - RoPar3D Robot</b>	HOJA 2 DE 19 A3
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

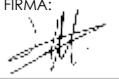

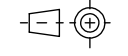


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Corner	6
2	300mm 270mm 20x20 T-SLOT	6
3	500mm 250mm 20x20 T-SLOT - copia	3
4	escuadra 90	6
5	200mm 250mm 20x20 T-SLOT	3
7	Escuadra fundicion - 2020	3
8	ISO 7380 - M4 x 8 - 8N	111
9	Escuadron 20x20	3
10	Escuadron 20x20 50mm	6

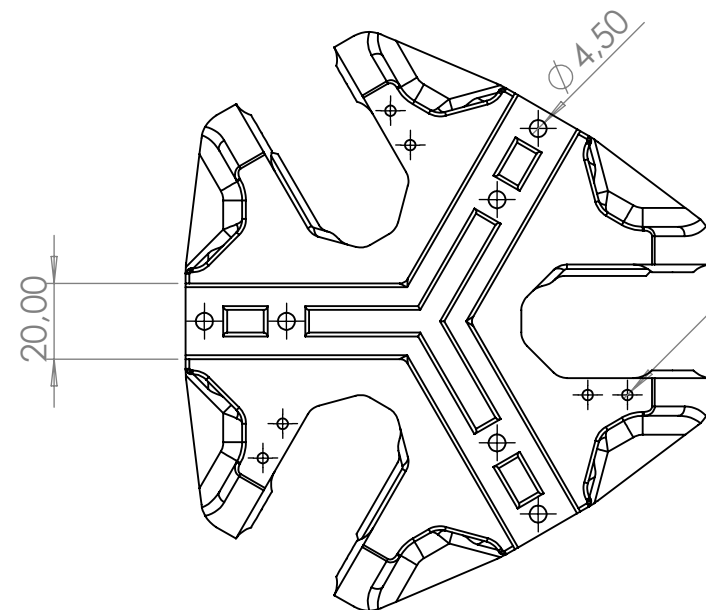
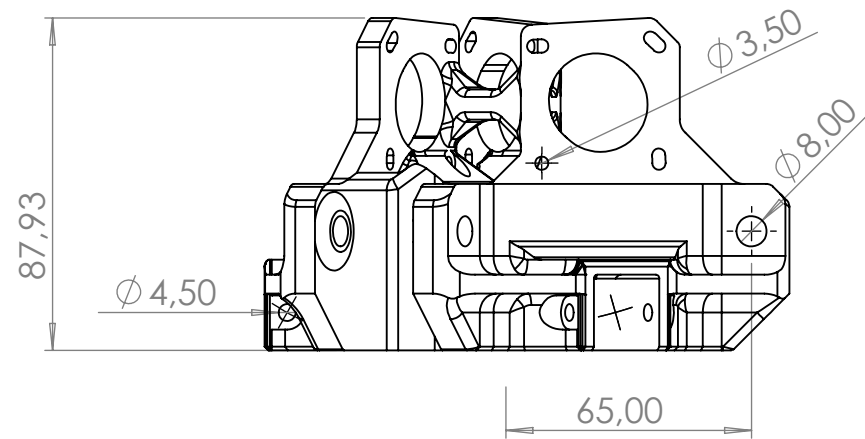
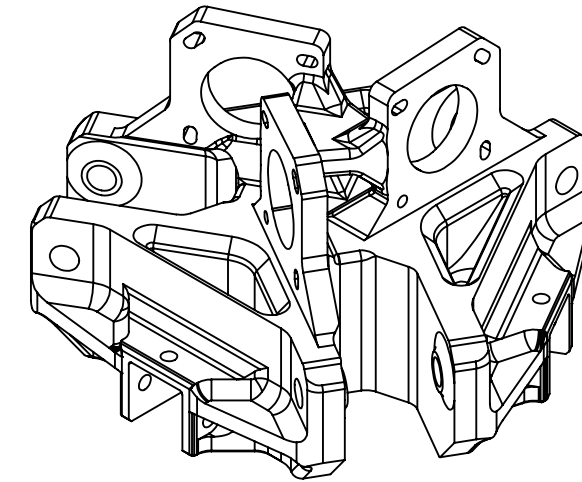
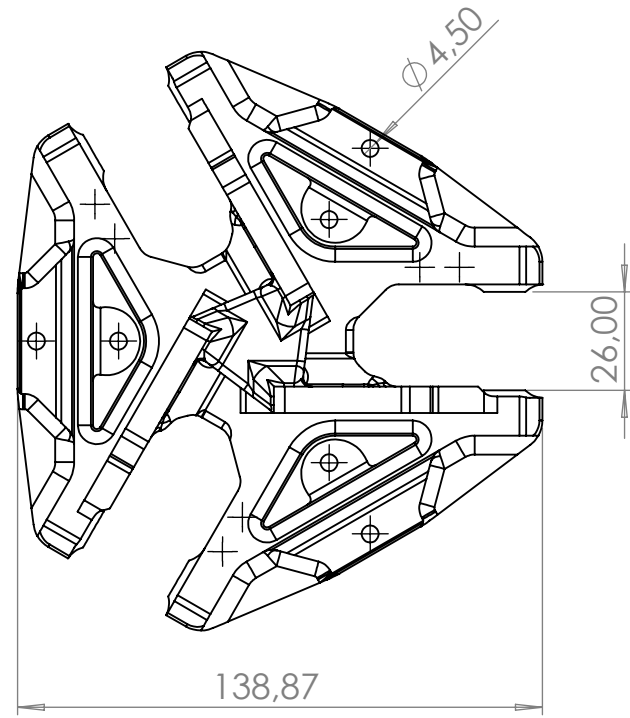
FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:3
	N.º DE DIBUJO <b>3 - RoPar3D Estructura</b>	HOJA 3 DE 19 A3
FECHA: 08/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Brazo - (rf)	1
2	Ball Bearing 608ZZ	2
3	Rueda GT2-80T - V2	1
4	ISO 4762 M3 x 16 - 16N	3
5	ISO - 4032 - M3 - W - N	3
6	ISO - 4035 - M3 - N	2

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:1
	N.º DE DIBUJO <b>4-Brazo ensamblaje</b>	HOJA 4 DE 19 A3
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

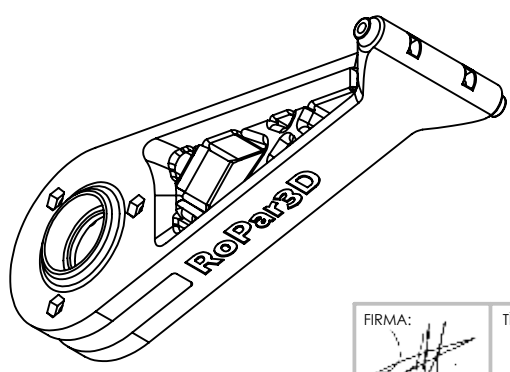
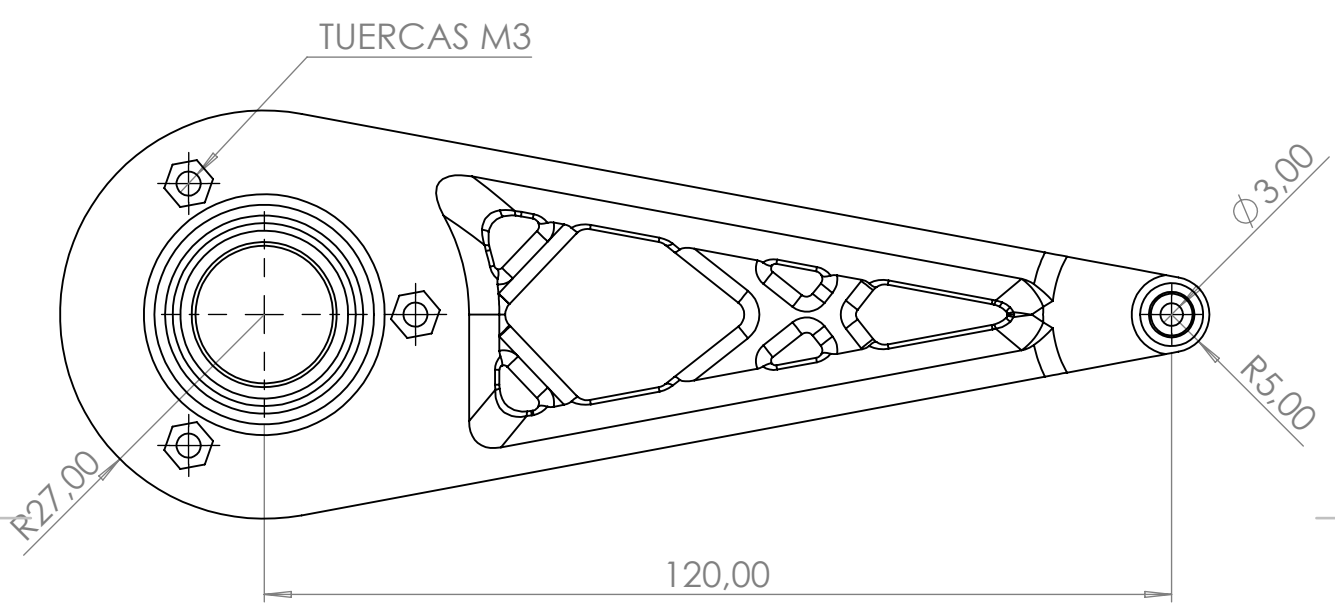
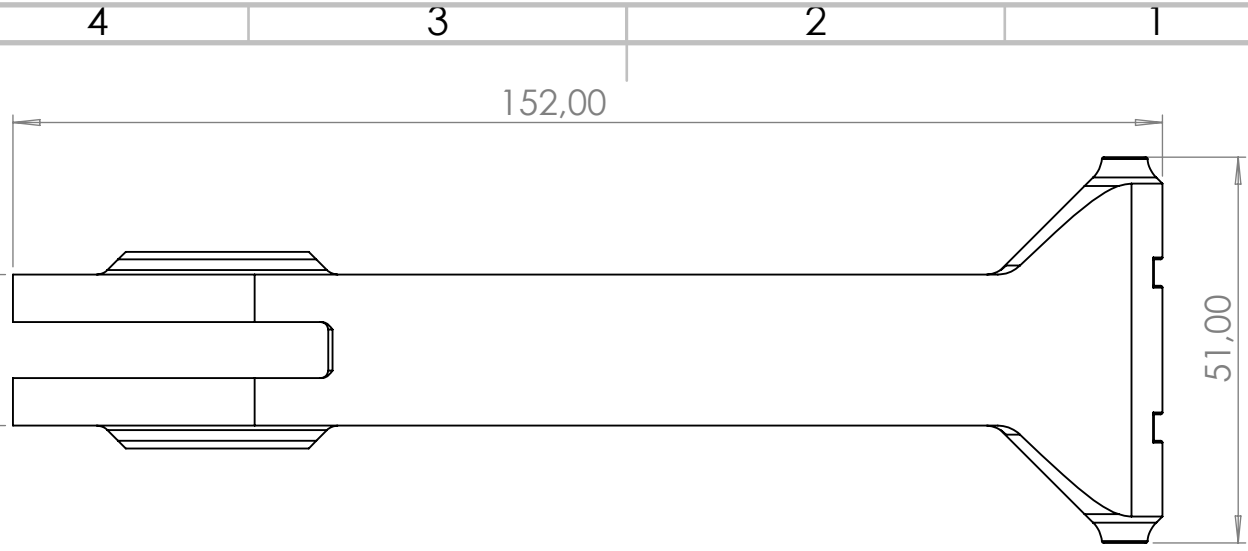




PARA ROSCAR M3  
 $\varnothing 2,80 \nabla 6,00$

Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>5 - Cuerpo - (f)</b>	HOJA 5 DE 19 A3
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA: 	TÍTULO:	TFG - RoPar3D	ESCALA:	1:1
	N.º DE DIBUJO: 	6 - Brazo - (rf)		HOJA 6 DE 19 A4
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: Diego Miguel Parra Martínez		 COTAS EN MM	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

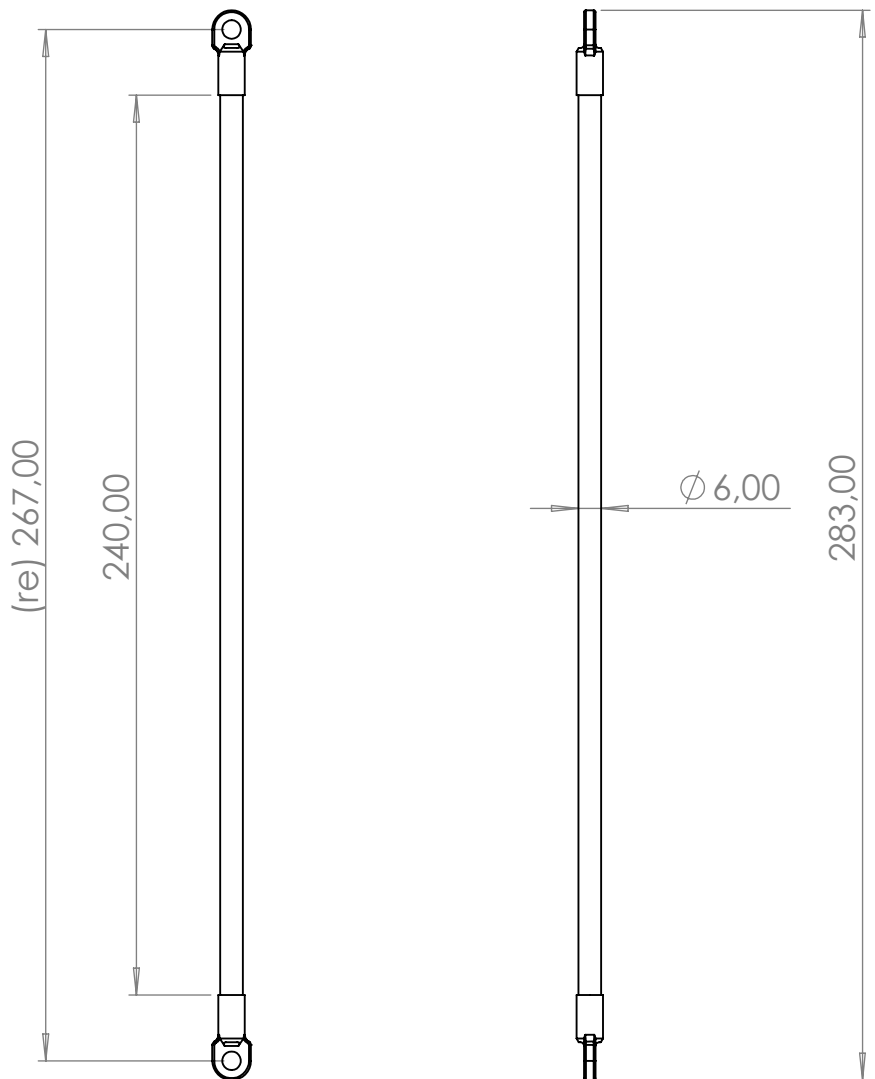
C

B

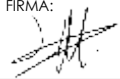

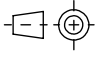
B

A

A



Material	FIBRA /ALU
Cantidad	6

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>7 - Antebrazo 267mm</b>	HOJA 7 DE 19 A4
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

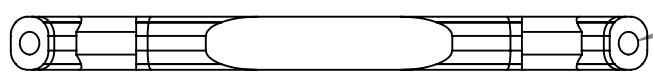
4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

R1,50

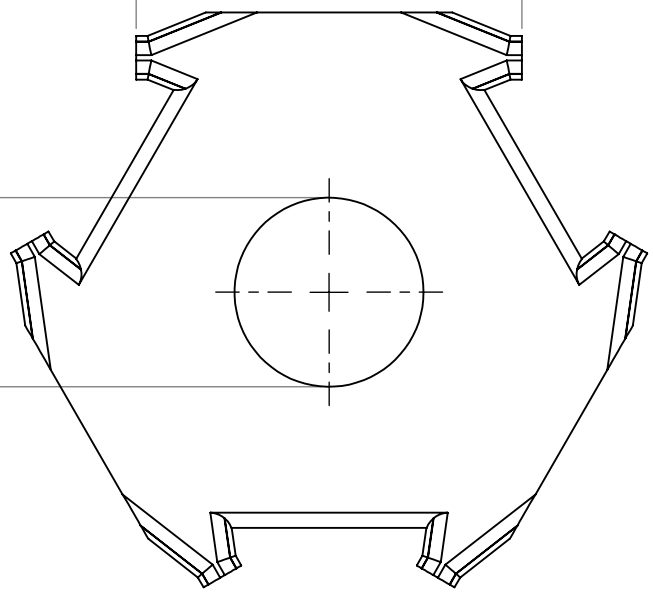


E

E

51,00

Ø 25,00

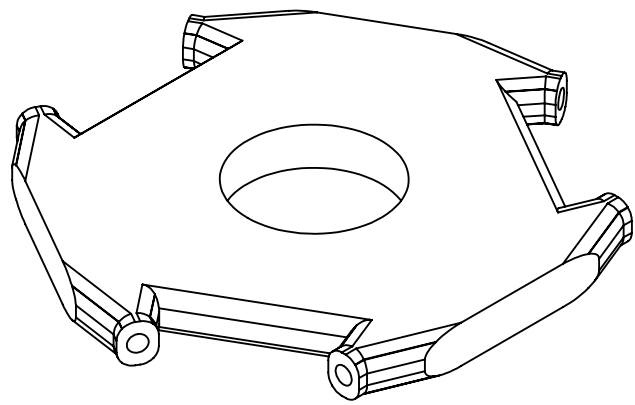


D

D

C

C



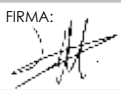


B

B

Material	ALU
Cantidad	1

A

A

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:1
	N.º DE DIBUJO <b>8 - efector - (e)</b>	HOJA 8 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

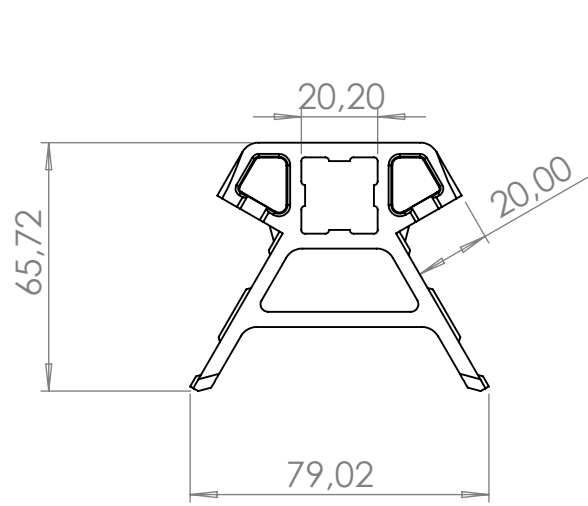
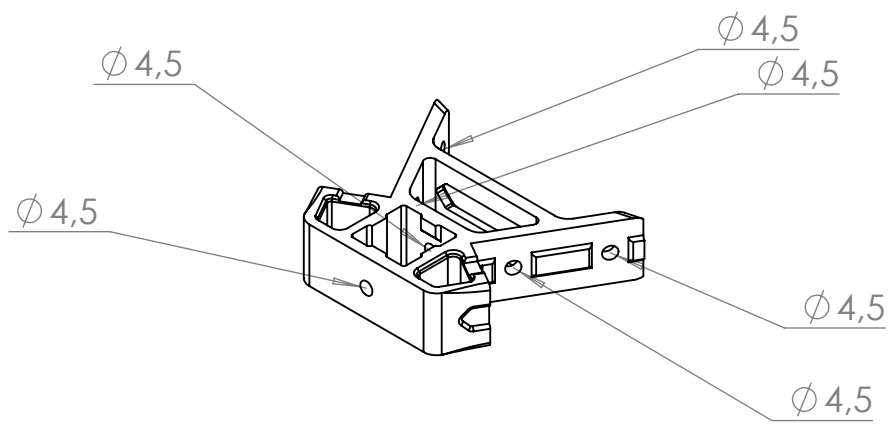
C

B

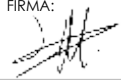

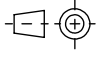
B

A

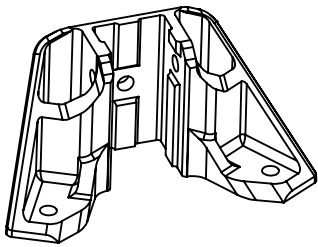
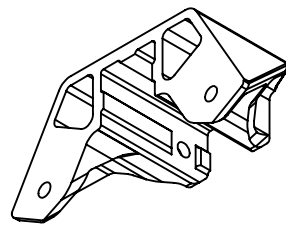
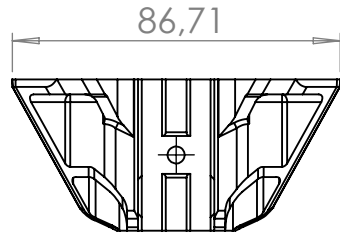
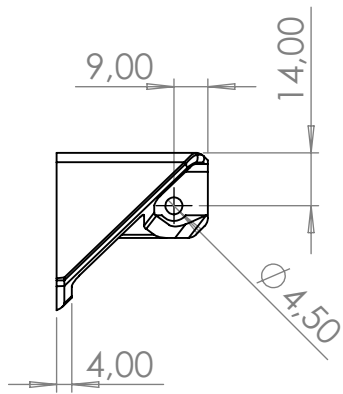
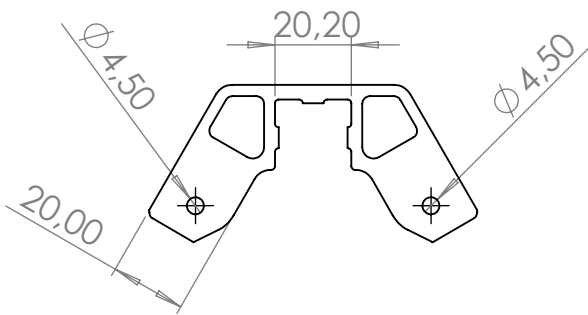
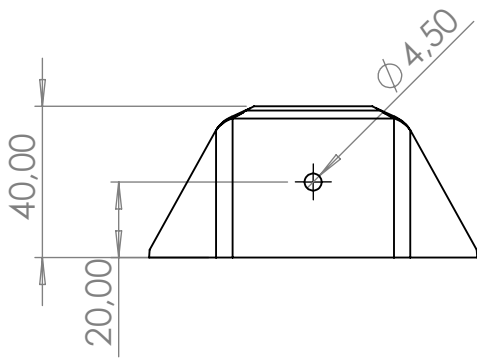
A



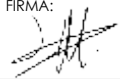

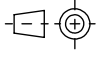
Material	PETG
Cantidad	6

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>9 - Corner</b>	HOJA 9 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1



Material	PETG
Cantidad	6

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>10 - Refuerzo Esquinera</b>	HOJA 10 DE 19 A4
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

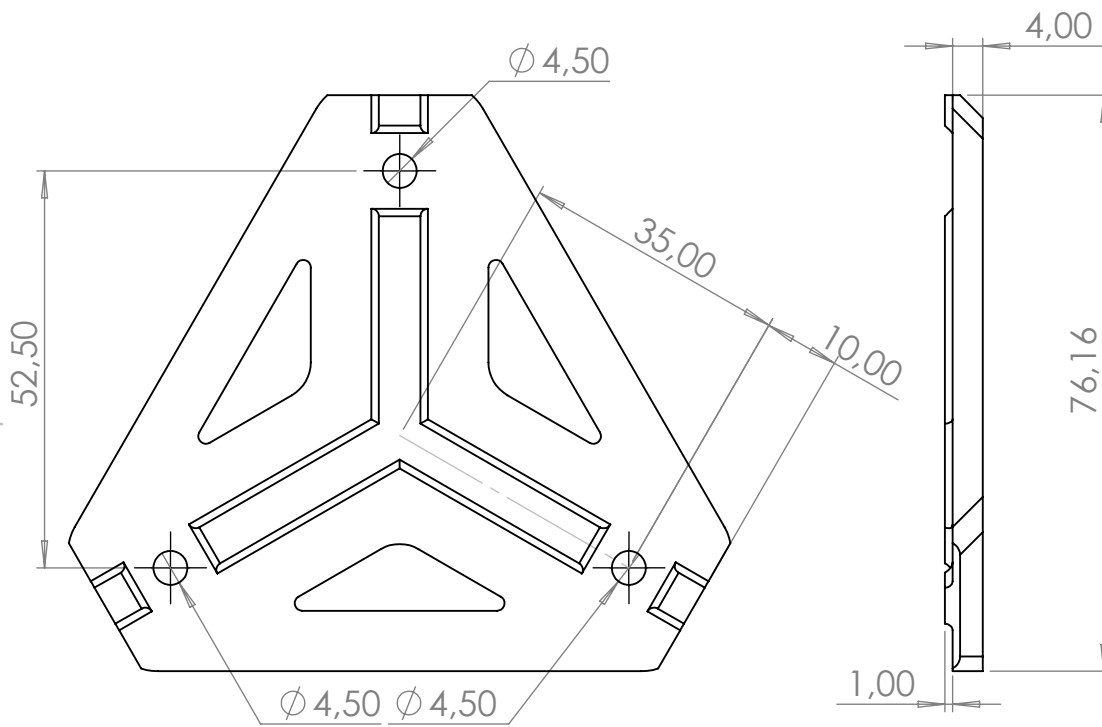
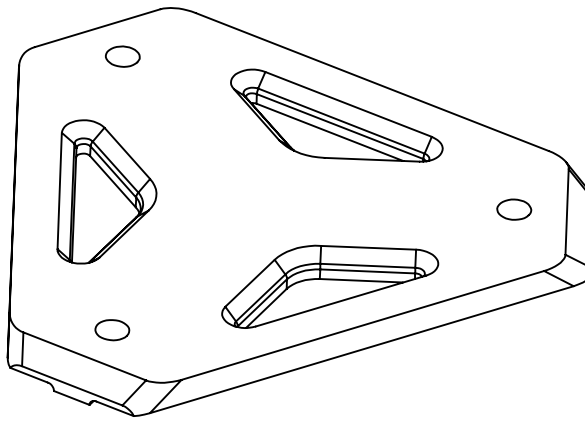
C

B

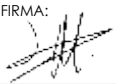

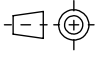
B

A

A



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:1
	N.º DE DIBUJO <b>11 - Escuadra central</b>	HOJA 11 DE 19 A4
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

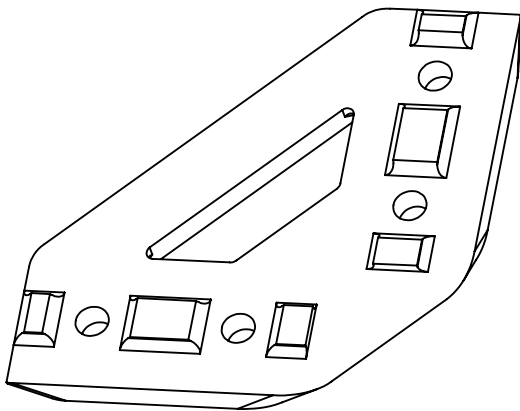
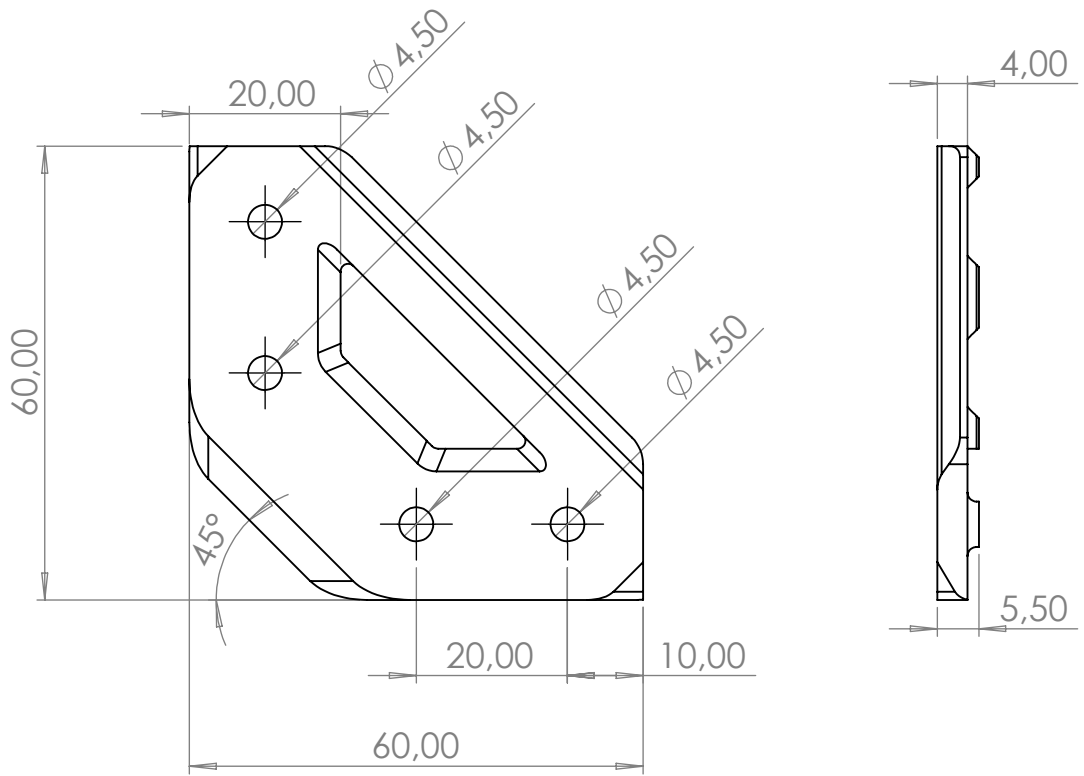
C

B


B

A

A



Material	PETG
Cantidad	6

FIRMA:  


TÍTULO:  
**TFG - RoPar3D**

ESCALA:  
 1:1



N.º DE DIBUJO  
**12 - Escuadra 90º**

HOJA 12 DE 19  
 A4

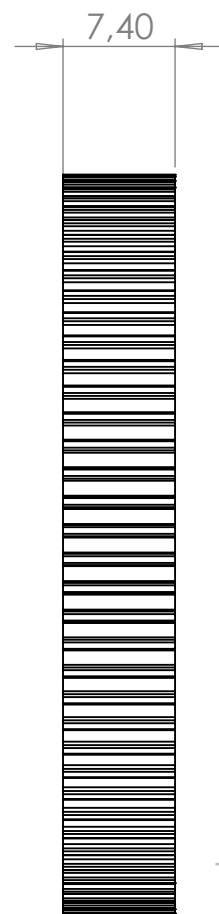
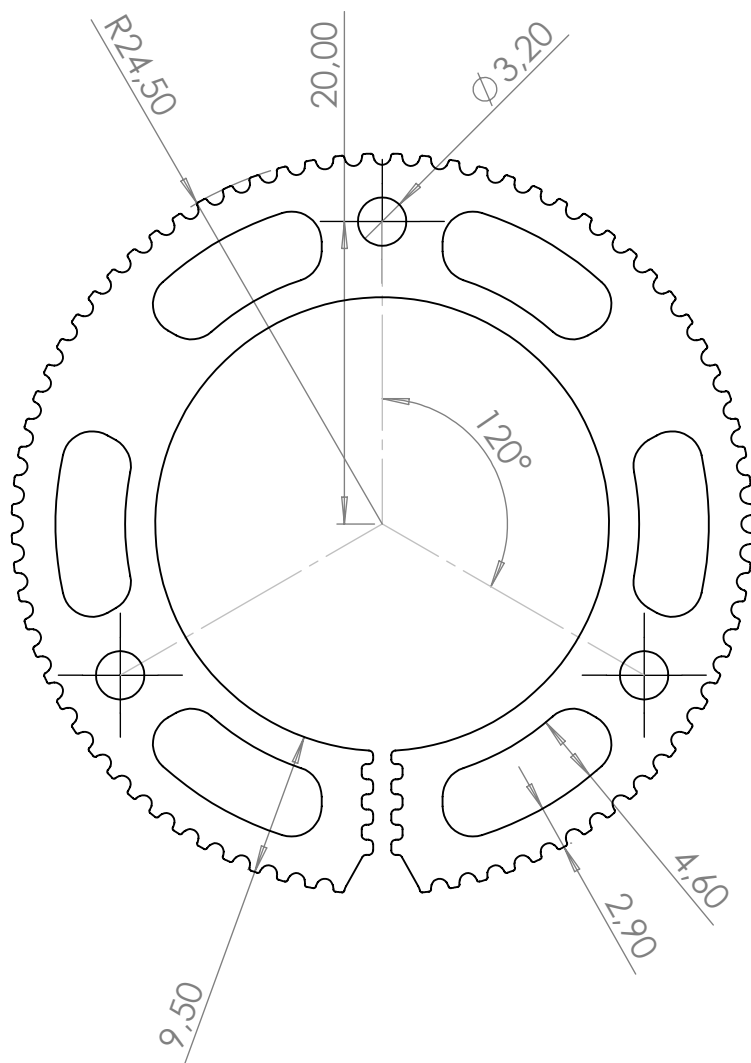
FECHA:  
 07/09/2020  
 ALMERÍA

NOMBRE:  
**Diego Miguel Parra Martínez**



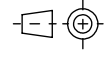
  
 COTAS EN MM

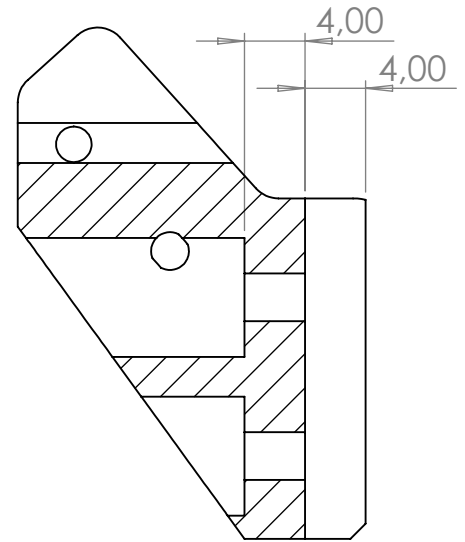
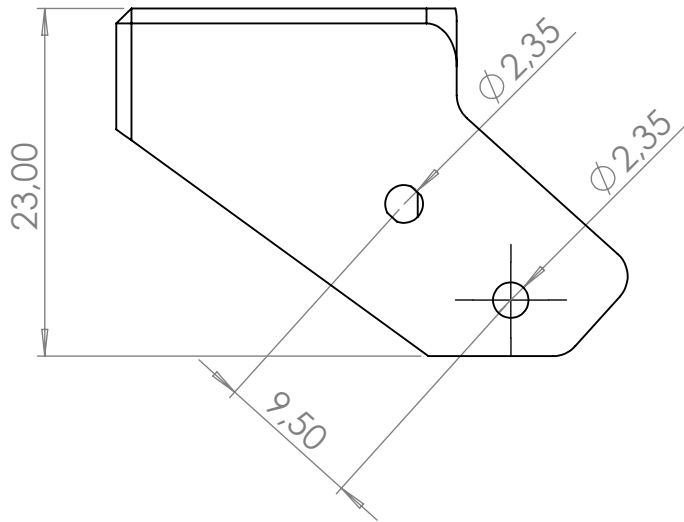
4 3 2 1



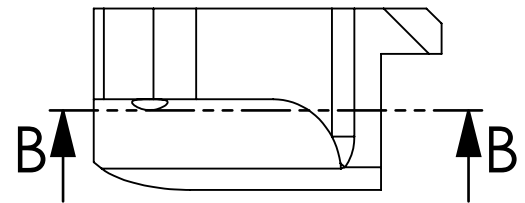
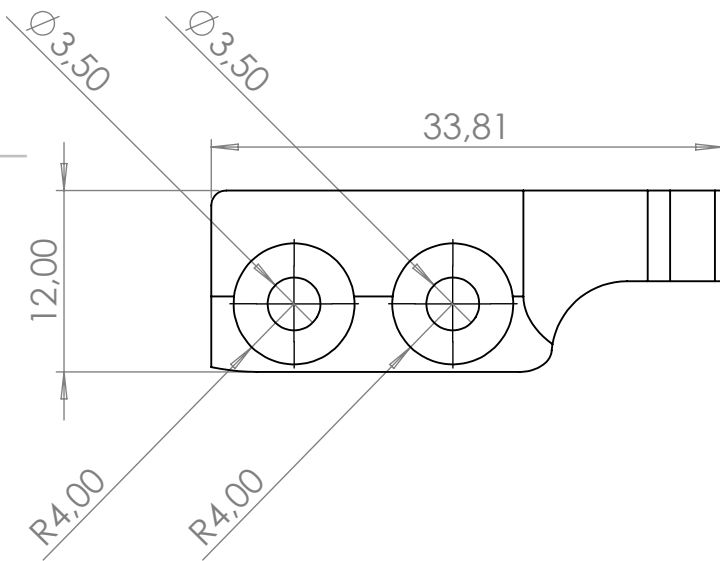


Material	PETG
Cantidad	3


FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 2:1
	N.º DE DIBUJO <b>13 - Rueda GT2-80T - V2</b>	HOJA 13 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM



SECCIÓN B-B



Material	PETG
Cantidad	3

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 2:1
	N.º DE DIBUJO: <b>14 -Soporte Endstop</b>	HOJA 14 DE 19 A4
FECHA: 07/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

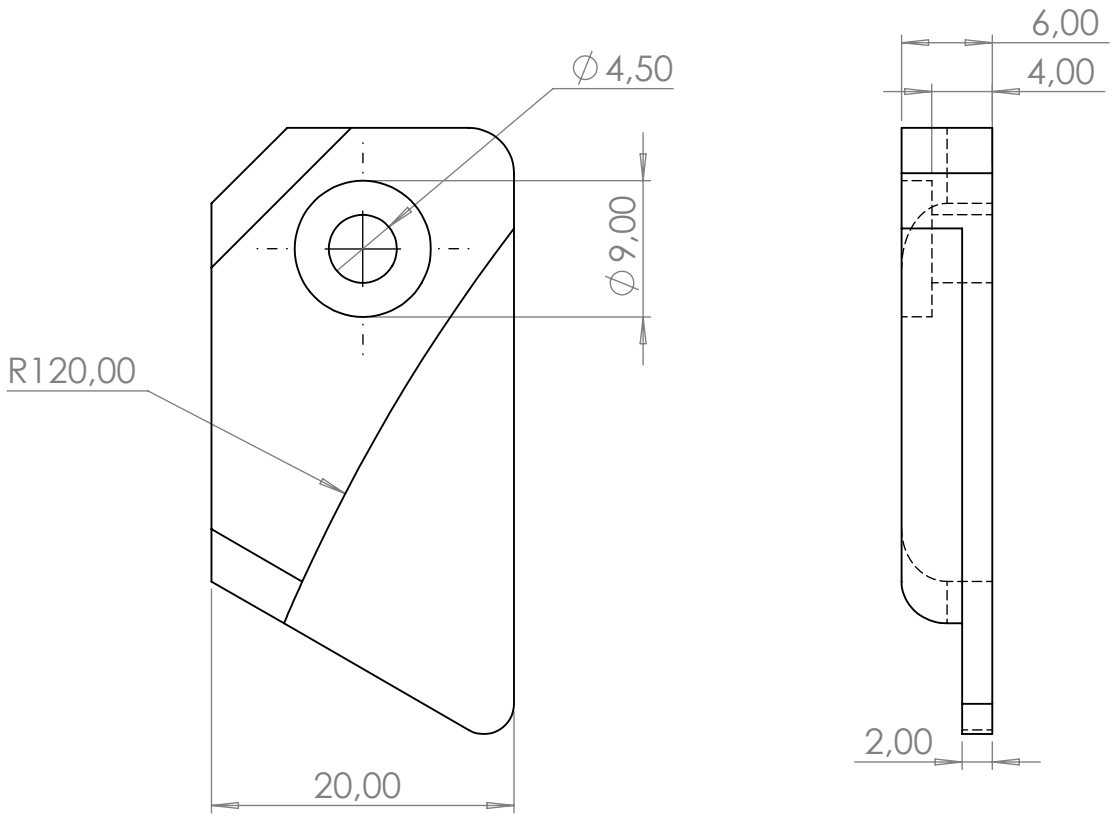
C

B

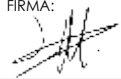

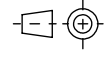
B

A

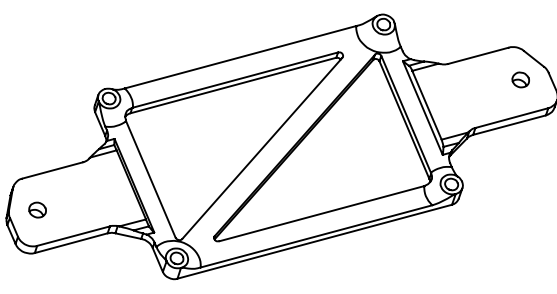
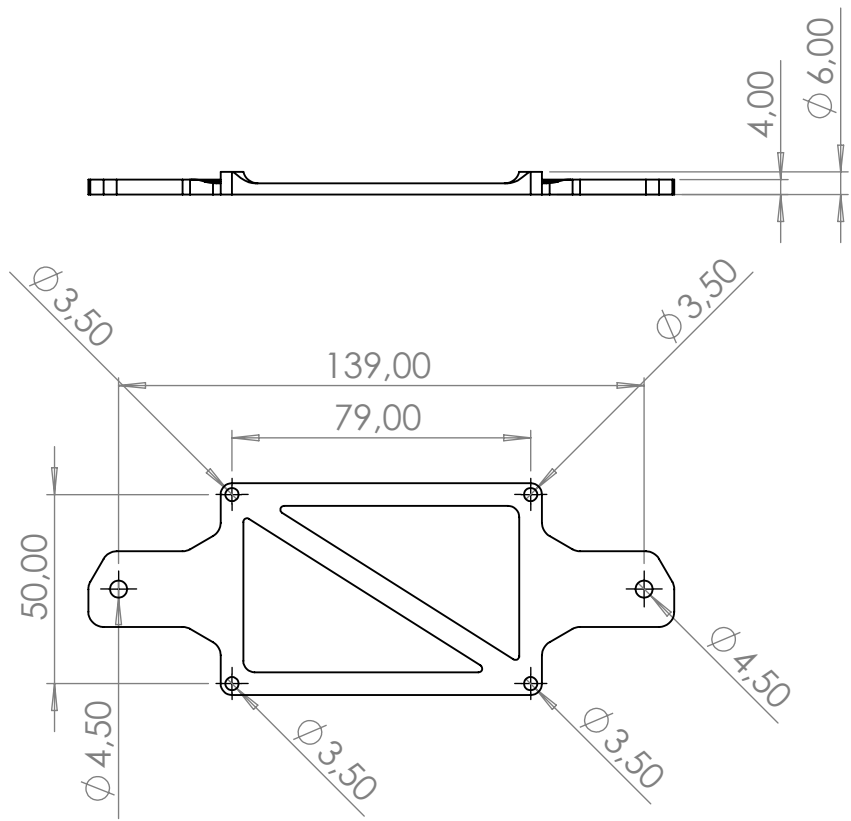
A



Material	PETG
Cantidad	6

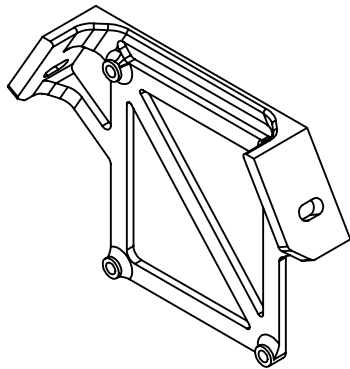
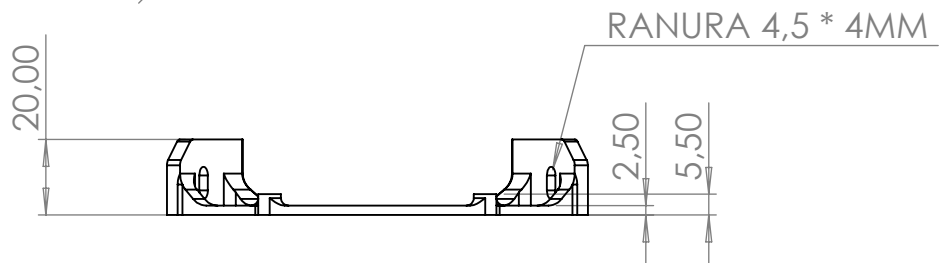
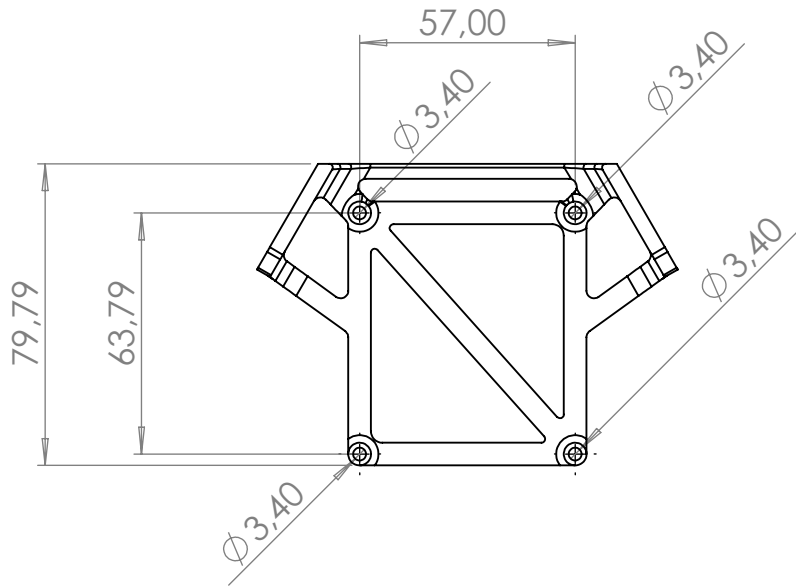
FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 2:1
	N.º DE DIBUJO <b>15 - Soporte cristal 240mm</b>	HOJA 15 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1




Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:2
	N.º DE DIBUJO <b>16 - Soporte OPI PC</b>	HOJA 16 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA:



TÍTULO:

TFG - RoPar3D

ESCALA:

1:2



N.º DE DIBUJO

17 - Soporte Re-ARM

HOJA 17 DE 19

A4

FECHA:

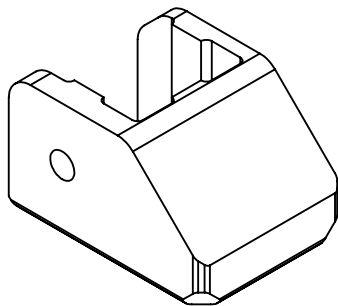
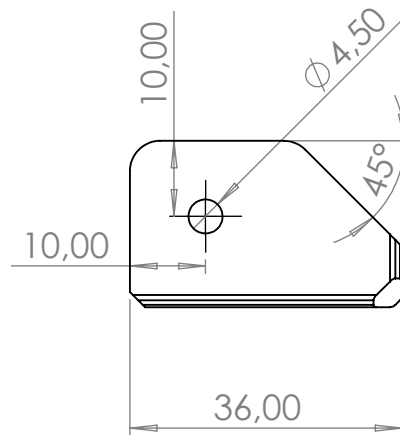
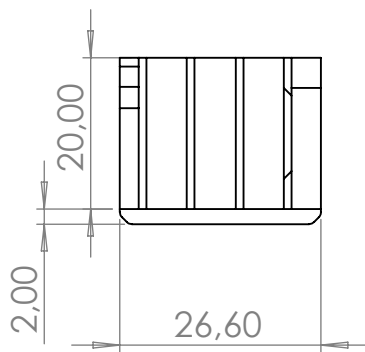
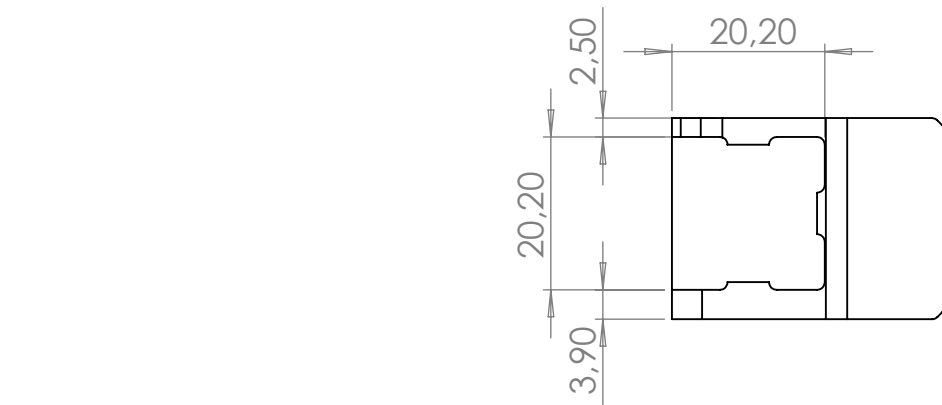
04/09/2020  
ALMERÍA

NOMBRE:

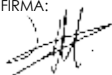
Diego Miguel Parra Martínez



COTAS EN MM



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA:  


TÍTULO:  
**TFG - RoPar3D**

ESCALA:  
 1:1



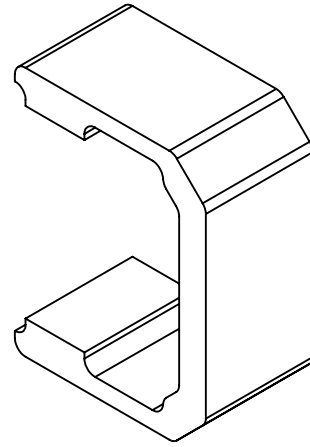
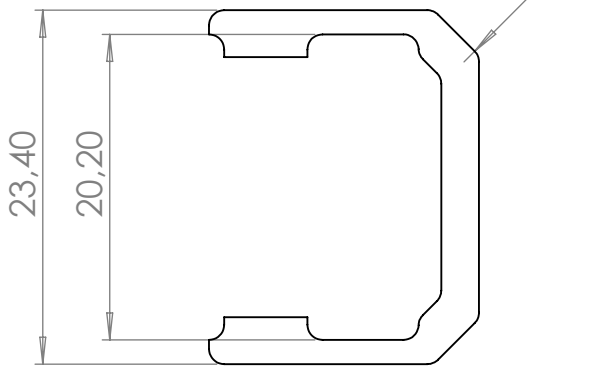
N.º DE DIBUJO  
**18 - Tapa de portabobina**

HOJA 18 DE 19  
 A4

FECHA:  
 07/09/2020  
 ALMERÍA

NOMBRE:  
**Diego Miguel Parra Martínez**





Material	PETG
Cantidad	8

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 2:1
	N.º DE DIBUJO <b>19 - Clip cables</b>	HOJA 19 DE 19 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

## ANEXO II. Archivo de configuración de máquina (printer.cfg)

```
#####
###          RoPar3D          ###
#####

#      Klipper config for RoPar3D prototype

#####
# MOTORS
#####

[stepper_a]
step_pin: P2.1
dir_pin: !P0.11
enable_pin: !P0.10
#64 micropasos
step_distance: 0.000098174770424
endstop_pin: ^!P1.25
homing_speed: 20
position_endstop: 133
upper_arm_length: 120
lower_arm_length: 267

[stepper_b]
step_pin: P2.2
dir_pin: !P0.20
enable_pin: !P0.19
#64 micropasos
step_distance: 0.000098174770424
endstop_pin: ^!P1.26
position_endstop: 133

[stepper_c]
step_pin: P2.3
dir_pin: !P0.22
enable_pin: !P0.21
#64 micropasos
step_distance: 0.000098174770424
endstop_pin: ^!P1.27
position_endstop: 133

#####
# EXTRUDER // BED
#####
```



```

[extruder]
step_pin: P2.0
dir_pin: P0.5
enable_pin: !P0.4
step_distance: 0.01153
nozzle_diameter: 0.400
filament_diameter: 1.750
heater_pin: P2.7
sensor_type: ATC Semitec 104GT-2
sensor_pin: P0.23
control: pid
pid_Kp: 25.247
pid_Ki: 1.072
pid_Kd: 148.640
min_temp: 0
max_temp: 250
min_extrude_temp: 160
max_extrude_only_distance: 150

[heater_bed]
heater_pin: P2.5
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: P0.24
control: watermark
min_temp: 0
max_temp: 80

#####
# COOLING
#####

[fan]
pin: P2.4

#####
# PORT
#####

[mcu]
serial: /dev/serial/by-id/usb-Klipper_lpc1768_13C0FF0E870829AFF6A1A25AC72000F5-if00

#####
# MACHINE
#####

[printer]

```

```
kinematics: rotary_delta
max_velocity: 300
max_accel: 1000
max_z_velocity: 120
minimum_z_position: -50
shoulder_radius: 34
shoulder_height: 285
```

```
[delta_calibrate]
radius: 60
```

```
[probe]
pin: ^!P1.28
z_offset: -0.16
speed: 2.0
samples: 3
samples_result: median
```

```
[bed_mesh]
speed: 50
mesh_radius: 60
```

```
#####
# TMC
#####
```

```
[tmc2130 stepper_a]
cs_pin: P1.9
spi_software_sclk_pin: P0.15
spi_software_mosi_pin: P0.18
spi_software_miso_pin: P0.17
microsteps: 64
interpolate: True
run_current: 0.7
hold_current: 0.5
stealthchop_threshold: 999
```

```
[tmc2130 stepper_b]
cs_pin: P1.15
spi_software_sclk_pin: P0.15
spi_software_mosi_pin: P0.18
spi_software_miso_pin: P0.17
microsteps: 64
interpolate: True
run_current: 0.7
hold_current: 0.5
stealthchop_threshold: 999
```

```

[tmc2130 stepper_c]
cs_pin: P1.16
spi_software_sclk_pin: P0.15
spi_software_mosi_pin: P0.18
spi_software_miso_pin: P0.17
microsteps: 64
interpolate: True
run_current: 0.7
hold_current: 0.5
stealthchop_threshold: 999

[tmc2130 extruder]
cs_pin: P1.0
spi_software_sclk_pin: P0.15
spi_software_mosi_pin: P0.18
spi_software_miso_pin: P0.17
microsteps: 16
interpolate: True
run_current: 0.55
hold_current: 0.4
stealthchop_threshold: 200

#####
# END
#####

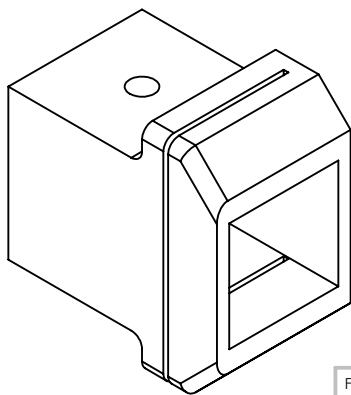
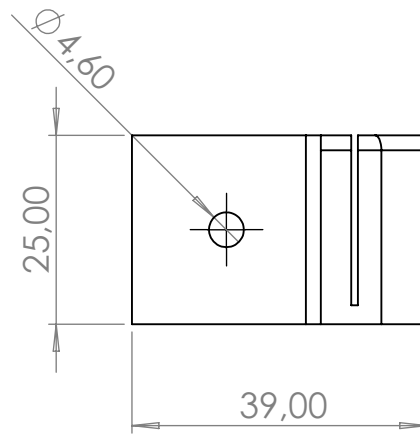
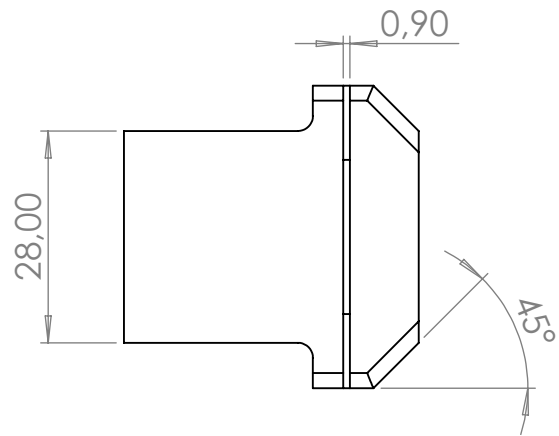
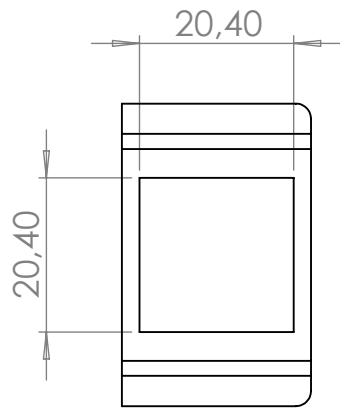
```

## ANEXO III. PLANOS ÚTILES DE CORTE

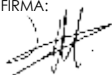
En este anexo se recogen las distintas piezas de utillaje, diseñadas para la fabricación de RoPar3D. Estos planos contienen las cotas de dimensión principales, ya que los diseños contienen superficies de forma libre con cotas variables almacenadas en el fichero 3D para su futura reproducción vía mecanizado o impresión 3D.

Contenido:

- 1 - Útil de corte 2020 RECTO
- 2 - Útil de corte 2020 ÁNGULO



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA:  


TÍTULO:

TFG - RoPar3D

ESCALA:

1:1



N.º DE DIBUJO

Útil de corte 2020

HOJA 1 DE 2

A4

FECHA:  
 04/09/2020  
 ALMERÍA

NOMBRE:

Diego Miguel Parra Martínez



4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

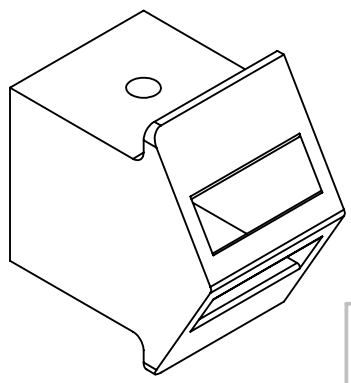
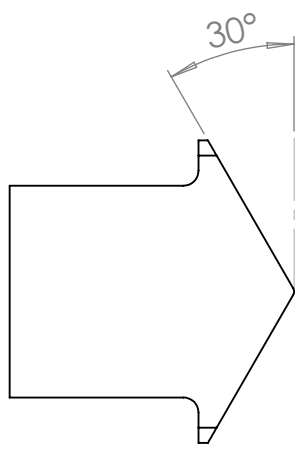
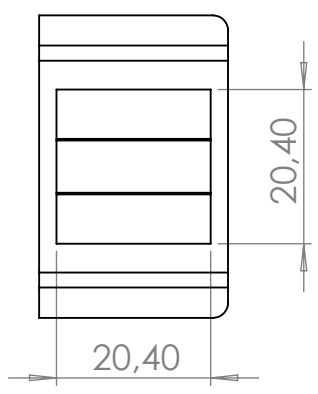
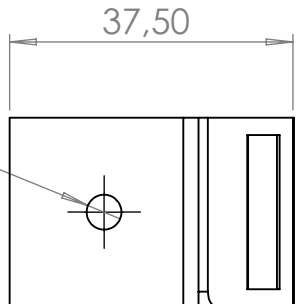
C

B

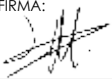


B

A

A



Material	PETG
Cantidad	1

FIRMA: 	TÍTULO: <b>TFG - RoPar3D</b>	ESCALA: 1:1
	N.º DE DIBUJO <b>Útil de corte 2020 ÁNGULO</b>	HOJA 2 DE 2 A4
FECHA: 04/09/2020 ALMERÍA	NOMBRE: <b>Diego Miguel Parra Martínez</b>	 COTAS EN MM

4 3 2 1



El presente proyecto experimental tiene como objetivo el diseño y la fabricación de una impresora 3D con la cinemática de un robot paralelo delta con el fin de testar y comparar esta cinemática con la de impresoras 3D clásicas basadas en un sistema de robot cartesiano.

Para ello, primeramente, se ha llevado a cabo la investigación del estado actual de la impresión aditiva y de la cinemática del robot paralelo delta para este tipo de máquina.

Posteriormente, y basándose en estos conocimientos adquiridos, se desarrolló un diseño de robot paralelo delta optimizado para que fuera factible su fabricación mediante impresión aditiva FDM.

Consecuentemente, se realizó una estructura de soporte de este robot en un formato de impresora 3D de escritorio buscando optimizar el diseño y la rigidez del mismo, creando de esta forma una máquina modular compacta de escritorio y de bajo coste.

El proceso de diseño se llevó a cabo mediante SolidWorks® para después proceder a la impresión de las piezas de la máquina mediante impresión 3D FDM a modo de impresora autorreplicante. Paralelamente, se realizó la compra de los materiales del resto de elementos para el posterior montaje de la máquina.

Finalizada la fabricación del robot, se procedió a la puesta en marcha de la máquina. Se inició la calibración, tras lo que se comienza a testar la máquina para ver los resultados y funcionamiento de esta, identificando las posibles problemáticas que puedan surgir.

En una fase posterior, se procedió a comparar cualitativamente los resultados de impresión de esta máquina con los de otros tipos de cinemática para valorar los resultados y la ventajas y desventajas del uso de este tipo de cinemática paralela en la impresión 3D.

Finalmente, y tras las conclusiones, se proponen una serie de mejoras y futuros proyectos aplicables al prototipo inicial.

**Palabras clave:**

*Tecnología 3D, Impresión 3D, Fabricación aditiva, RepRap, Máquina autorreplicante, Modelado por deposición fundida (FDM), Prusa i3, Klipper, Raspberry Pi, Prototipado 3D, Prototipado rápido, ABS, PLA, PETG, Extrusión de material, Robot paralelo, Delta, SolidWorks®, Máquina de cinemática paralela, Optimización topológica, SolidWorks® Simulations.*



The main objective of the current experimental project is present the design and fabrication of a of a 3D printer based upon the kinematics of the delta parallel robot in order to test and make a comparison between this type of kinematics and the commonly used cartesian robot system.

To this end, it Will first be necessary to make a research on the current state of additive printing along with a background research on delta parallel robots kinematics. Subsequently, and taking into consideration the knowledge gained, an optimized parallel robot was designed with the aim of ensure the effective fabrication using FDM additive printing.

For that purpose, and in order to optimize the design and stiffness of the machine, a support structure for the robot was constructed using the standard configuration of a desktop 3D printer and consequently, creating a modular low-cost compact desktop machine.

The design phase was made through the use of SolidWorks® to later print the pieces of the machine using FDM technology, acting then, as a self-replicating 3D printer machine. At the same time, it was necessary to buy those parts that couldn't be 3D printed.

Once the robot fabrication was completed, the start-up and calibration processes were conducted. After that, a machine test was done in order to verify the results of the machine operation and identify any potential problems which may arise.

At a later stage, a qualitative comparison between this machine printing results and other kinematics 3D printers to evaluate the printed pieces to be able to assess the advantages and disadvantages of the usage of parallel kinematics in 3D printing.

Lastly, and after the conclusions, a series of future suggested improvements that are applicable to the initial prototype, are proposed.

**Keywords:**

*3D Technology, 3D printing, Additive manufacturing, RepRap, Self-replicant machine, Fused Deposition Modelling, Prusa i3, Klipper, Raspberry Pi, 3D prototyping, Rapid prototyping, ABS, PLA, PETG, Material extrusión, Parallel robot, Delta, SolidWorks®, Parallel kinematic machine, Topological optimization, SolidWorks® Simulations.*