

Mejora del sistema de extrusión de una
impresora 3D BCN3D Sigma

ETSEIB

UPC



Collado Fernández, Víctor

21 de octubre de 2016

Resumen

En el presente documento se estudia la posibilidad de presentar una alternativa a la actual configuración de la impresora 3D de tecnología FDM/FFF *BCN3D Sigma* desarrollada por la entidad *BCN3D Technologies*. En este sentido, se analiza la viabilidad de la migración al uso de filamento de 1,75 mm de diámetro y la mejora del sistema de tracción, tomando como alternativa en este último el uso de la tecnología *Double Drive Gear*. Además, se estudia de manera objetiva el impacto de la invención y explotación de este tipo de tecnología sobre la sociedad y, de manera breve, se presentan las diferentes tecnologías de fabricación aditiva existentes.

Este proyecto se ha desarrollado conjuntamente con la entidad *BCN3D Technologies*, por lo que goza del beneplácito de ésta y la verificación de las soluciones propuestas sobre los elementos en los que se basa el estudio.

Octubre 2016

Glosario

3DP *Three-dimensional Printing*. 5, 8, 9, 12

ABS Acrilonitrilo Butadieno Estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). 17, 18

BPM *Ballistic Particle Manufacturing*. 5

CAD *Computer-Aided Design*. 3, 4, 6, 8, 9, 11, 15

CAE *Computer-Aided Engineering*. 4, 6

CAM *Computer-Aided Manufacturing*. 4, 6

CN Control Numérico. 4

CNC *Computer Numerical Control*. 4

DMLS *Direct Metal Laser Sintering*. 5

FDM *Fusion Depositing Material*. 1, 5, 8, 15

FFF *Fused Filament Fabrication*. 1, 2, 8, 9, 15, 16, 18

HIPS Poliestireno de alto impacto (*High Impact Polystyrene*). 17, 18

IGS *Interactive Graphics System*. 4

LOM *Laminated Object Manufacturing*. 5, 9, 13, 14

MEF Método de los Elementos Finitos. 7

PLA Poliláctico (*Polylactic Acid*). 17, 19

PVA Alcohol de polivinilo (*Polyvinyl Alcohol*). 16, 18

RP *Rapid Prototyping*. 3–5, 10

SGC *Solid Ground Curing*. 5, 8, 10, 12

SLA *Stereolithography Apparatus*. 5, 8–10

SLM *Selective Laser Melting*. 5

SLS *Selective Laser Sintering*. 5, 8, 11, 12

Índice general

Glosario	III
1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	2
1.2. Alcance del proyecto	3
2. Estado del arte	5
2.1. Contextualización histórica	5
2.1.1. Historia de la impresión 3D	7
2.2. Una revolución tecnológica y filosófica	8
2.3. La filosofía <i>Open Source</i> y el proyecto <i>RepRap</i>	9
2.4. Tecnologías de fabricación aditiva actuales	10
2.4.1. <i>Stereolithography Apparatus</i> (SLA)	11
2.4.2. <i>Solid Ground Curing</i> (SGC)	12
2.4.3. <i>Selective Laser Sintering</i> (SLS)	14
2.4.4. <i>Three-dimensional Printing</i> (3DP)	15
2.4.5. <i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM)	16
2.4.6. <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF)	18
2.5. Materiales usados en la tecnología <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF)	20
3. La impresora <i>BCN3D Sigma</i>	25
3.1. Elementos de la impresora <i>BCN3D Sigma</i>	27
3.1.1. Extrusor	27
3.1.2. Cable Bowden	29
3.1.3. Hotend	30
3.1.4. Cama caliente	33
3.2. Dos tipos de extrusión	34
3.2.1. Extrusión Directa	34
3.2.2. Extrusión Bowden	34

4. Análisis crítico de la impresora	37
4.1. Detección de carencias	37
4.1.1. Diámetro del filamento	37
4.1.2. Sistema de tracción	39
5. Propuestas de solución	43
5.1. Diámetro del filamento	43
5.1.1. Adaptación del extrusor	43
5.1.2. Adaptación del Hotend	43
5.2. Sistema de tracción	45
5.2.1. Sistema <i>Double Drive Gear</i> de <i>BQ</i>	45
5.2.2. Sistema <i>Double Drive Gear</i> de <i>BondTech</i>	48
5.2.3. Comparación de resultados	49
6. Implementación de las soluciones propuestas	55
6.1. Itegración del Hotend de 1,75 mm de diámetro	55
6.2. Itegración del extrusor <i>BondTech</i>	57
6.3. Montaje de las soluciones	58
7. Estudio económico	61
7.1. Costes de obtención y fabricación de las mejoras	61
7.2. Previsión de consumo, estrategia comercial y beneficios	63
8. Estudio del impacto ambiental y social	67
8.1. Impacto asociado al uso de la tecnología de impresión 3D	67
8.2. Impacto asociado a la implementación y distribución de las soluciones propuestas	68
9. Estudio económico e impacto ambiental del presente proyec- to	71
9.1. Estudio económico	71
9.2. Impacto medioambiental	71
10. Conclusiones	73
Bibliografía	76
A. Planos	77

Índice de figuras

2.1. Esquema del proceso SLA. [1]	12
2.2. Ciclo del proceso <i>Solid Ground Curing</i> (SGC). [2]	13
2.3. Esquema del proceso <i>Selective Laser Sintering</i> (SLS). [2]	15
2.4. Esquema del proceso <i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM). [2]	17
2.5. Esquema del proceso FFF. [2]	19
3.1. Impresora <i>BCN3D Sigma</i>	27
3.2. Diseño <i>Computer-Aided Design</i> (CAD) del extrusor de la im- presora <i>Sigma</i> completo.	28
3.3. Diagrama del sólido libre de la abrazadera.	29
3.4. Disipador de calor enteramente fabricado en aluminio. [3]	31
3.5. Boquilla garganta con recubrimiento de Politetrafluoroetileno (PTFE) para filamento de 1,75 mm de diámetro. [4]	32
3.6. <i>Hotblock</i> de aluminio. [5]	33
3.7. Boquilla extrusora de latón de 0,4 mm de diámetro. [6]	34
3.8. Representación de la extrusión directa. [7]	35
3.9. Representación de la extrusión Bowden. [7]	35
4.1. Diseño en CAM del utillaje entre el filamento y el dinamómetro	40
4.2. Esquema del montaje del banco de pruebas.	41
4.3. Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de la máquina <i>Sigma</i> hasta su cese a una velocidad de extrusión de 40 mm/s.	42
5.1. Hotend adquirido del fabricante <i>E3D</i>	44
5.2. Sistema <i>Double Drive Gear</i> desarrollado por <i>BQ</i>	46
5.3. Detalle de las ruedas dentadas. [7]	46
5.4. Detalle de la pieza móvil para el ajuste del segundo eje. [7]	46
5.5. Detalle del bloque del extrusor sin los componentes.	47

5.6.	Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de BQ hasta su cese a una velocidad de extrusión de 40 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.	47
5.7.	Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de BQ hasta su cese a una velocidad de extrusión de 50 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.	48
5.8.	Sistema <i>Double Drive Gear</i> desarrollado por <i>BondTech</i>	49
5.9.	Detalle del sistema de acople del segundo engranaje de tracción del extrusor <i>Double Drive Gear</i> desarrollado por <i>BondTech</i>	50
5.10.	Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de <i>BondTech</i> hasta su cese a una velocidad de extrusión de 40 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.	50
5.11.	Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de <i>BondTech</i> hasta su cese a una velocidad de extrusión de 50 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.	51
5.12.	Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 40 mm/s.	51
5.13.	Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 50 mm/s.	52
5.14.	Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 40 mm/s.	52
6.1.	Comparación entre la construcción con la boquilla original del Hotend E3D y la boquilla de la máquina <i>Sigma</i> adaptada al diámetro de 1,75 mm.	56
6.2.	Carcasa del Hotend.	56
6.3.	Vista explosionada del utillaje de sujeción del Hotend a la carcasa.	57
6.4.	Integración del Hotend de E3D a la carcasa mediante el utillaje.	57
6.5.	Anclaje motor paso a paso - fondo de la máquina.	58
6.6.	Extrusor completo <i>BondTech</i> adaptado a la máquina <i>Sigma</i>	58
6.7.	Resultado de la integración de los elementos en la máquina <i>Sigma</i>	59
7.1.	Histórico de ránking de valoración de la calidad de impresión de abril 2016 a julio 2016. [8]	64

Índice de cuadros

2.1. Desarrollo histórico del RP y tecnologías relacionadas. [1] . . .	6
3.1. Especificaciones principales de la impresora 3D <i>BCN3D Sigma</i> (cedido por <i>BCN3D Technologies</i>)	26
3.2. Especificaciones del motor NEMA 17 60mm. [9]	28
7.1. Coste de obtención y fabricación de los componentes que in- tegran las mejoras.	62
7.2. Distribución y previsión de máquinas impresoras vendidas se- gún mercado.	63
7.3. Previsión del grado de aceptación de las vías de mejora según mercado.	64
7.4. Tabla de precios de ambos kits.	65
7.5. Estudio y resultados del beneficio económico	66
9.1. Tabla de costes derivados de las actividades para el desarrollo del proyecto.	72
9.2. Tabla del total de residuos plásticos generados.	72

Capítulo 1

Introducción

La tecnología de la fabricación aditiva está sufriendo hoy día una revolución de magnitudes extremas, que no viene dado solamente por el impacto que supone en la industria a nivel operativo, sino también por el cambio filosófico que plantea el uso de dicha tecnología y las consecuencias que derivan para la comodidad del ser humano.

Durante los últimos treinta años, múltiples invenciones relacionadas con la fabricación aditiva han surgido tanto por parte de los centros de investigación como por medio de la propia industria, siendo uno de los más notables el surgimiento de la impresión 3D mediante la tecnología *Fusion Depositing Material* (FDM) y su hermana gemela *Fused Filament Fabrication* (FFF), consistente en la fusión selectiva de un hilo plástico en un cabezal que deposita el material capa a capa, formando una geometría 3D.

Aprovechando la oportunidad que presenta el desarrollo de esta tecnología que, pese a la increíble evolución que ha sufrido durante los últimos diez años, aún muestra aspectos que se pueden trabajar con tal de ofrecer el máximo rendimiento, se ha propuesto realizar este proyecto conjuntamente con la *Fundació CIM*, uno de los centros tecnológicos por excelencia adscrito a la *Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech (UPC)* y su proyecto *BCN3D Technologies*, entidad que no solo actúa como distribuidora de impresoras 3D, sino que también destina sus esfuerzos al desarrollo de la tecnología de la fabricación aditiva y a la transmisión eficiente de los conocimientos adoptados.

Uno de los productos más laureados de la entidad *BCN3D Technologies* es la impresora 3D *BCN3D Sigma*, que usa el sistema FFF. La comercialización y el desarrollo de esta máquina supone uno de los puntos esenciales para la continuación de la vida de la propia entidad; es por ello que uno de los objetivos es tratar de maximizar su competencia en el mercado y ampliar el abanico de potenciales usuarios, ofreciendo una impresora completa

a cualquier nivel de uso.

1.1. Objetivos del proyecto

Este proyecto nace con la idea de elevar a una mayor categoría la impresora *BCN3D Sigma* a nivel cualitativo y ampliar el mercado, que está viviendo una gran expansión, con tal de generar mayores beneficios a la empresa.

Como la entidad tiene interés en lograr estos dos aspectos, la toma de decisiones se determina siguiendo la estrategia comercial de la empresa. Es por ello que desde un primer momento se ha seguido la directriz fijada relacionada con los dos aspectos descritos:

- Por un lado, para conseguir una mejora cualitativa de la impresión, se ha determinado el uso de un nuevo sistema de tracción del filamento: *Double Drive Gear*, frente al básico *Direct Drive Gear*.
- Con tal de conseguir la ampliación de mercado, se ha determinado la migración del uso de filamento de 3 mm de diámetro al uso de filamento de 1,75 mm de diámetro.

Con tal de cubrir estas necesidades, se deben definir los siguientes objetivos en el proyecto:

- Análisis del contexto actual frente a las tecnologías de fabricación aditiva.
- Estudio de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva, con especial atención a la tecnología que usa la impresora 3D a estudiar, con tal de lograr el conocimiento necesario para un posterior análisis.
- Análisis y presentación de la impresora 3D que ocupa el foco del proyecto.
- Estudio de viabilidad de posibles mejoras relacionadas con el sistema de extrusión de filamento y adaptación de los elementos al nuevo filamento de 1,75 mm de diámetro.
- Estudio del impacto económico sobre la empresa, con tal de valorar las soluciones propuestas.

1.2. Alcance del proyecto

La consecución de los objetivos descritos anteriormente se vendrán entonces encaminados por dos componentes principales. El primero de ellos será eminentemente bibliográfico, basado en la investigación sobre las tecnologías de fabricación aditiva. Por otro lado, el segundo componente tendrá un enfoque práctico y analítico, debido a que se basará en el estudio real y posterior mejora del sistema de extrusión de la impresora 3D *BCN3D Sigma* –disponible bajo el consentimiento de la entidad *BCN3D Technologies*, en sus instalaciones en el *Campus Universitario del Baix Llobregat-UPC*– y de la adaptación de los elementos esenciales para el uso de filamento de 1,75 mm de diámetro.

Por tanto, solamente se estudiarán estas dos directrices, dejando de lado otros aspectos relacionados con la impresión aditiva y que podrían ser susceptibles de mejora en otros ámbitos diferentes a la mecánica y el diseño, como lo son la electrónica o el estudio de materiales.

En definitiva, la conjunción de ambas partes resultará en un breve estudio de las tecnologías de fabricación aditiva y en la mejora del sistema de extrusión y migración a un nuevo filamento de la máquina mencionada, analizando también las vías de comercialización de las mejoras.

Capítulo 2

Estado del arte

Se conoce como fabricación aditiva al conjunto de técnicas y procesos que permiten fabricar objetos tridimensionales mediante la superposición de capas sucesivas de material. Con el avance de la tecnología en los últimos años se ha conseguido que esta materialización se produzca de manera cada vez más rápida y detallista, mediante la eficaz conversión de los modelos 3D elaborados en entornos de diseño asistido por ordenador (CAD) a instrucciones mecánicas que recibe la máquina impresora. La característica rapidez en que se pasa del modelo virtual al objeto físico ha hecho aparecer un nuevo concepto que atañe un gran impacto en los procesos de fabricación y la industria: el *Rapid Prototyping* (RP) o Prototipado Rápido. Esta tecnología permite reproducir de manera muy barata y en cuestión de horas modelos que mediante la fabricación con métodos tradicionales podrían ocupar hasta varios días o semanas.

2.1. Contextualización histórica

La tecnología de prototipado rápido no es una invención reciente de estos últimos diez años, aunque su mayor explotación y evolución así lo ha hecho parecer. Para comprender los conceptos que vienen relacionados con la fabricación aditiva, es necesario primero comprender los orígenes de la misma.

El desarrollo del RP está cercanamente relacionado con el desarrollo de las aplicaciones de los ordenadores en la industria. El decremento del precio de los ordenadores, especialmente de los ordenadores personales y mini-ordenadores, ha hecho cambiar la manera de proceder en los procesos industriales y ha espoleado el avance de un buen número de áreas relacionadas con la informática, como por ejemplo las áreas de *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) o *Computer Numerical Con-*

Año de invención	Tecnología
1770	Mecanización
1946	Primer ordenador
1952	Primera máquina-herramienta de Control Numérico (CN)
1960	Primer Láser comercial
1961	Primer Robot comercial
1963	Primer <i>Interactive Graphics System</i> (IGS) (versión inicial de CAD)
1988	Primer Sistema de Prototipado Rápido

Cuadro 2.1: Desarrollo histórico del RP y tecnologías relacionadas. [1]

trol (CNC).

Aunque parece claro que el RP no hubiese sido posible sin el desarrollo del CAD, otros avances en muchos otros campos han resultado también cruciales para la existencia de la fabricación aditiva, como por ejemplo los campos de la electrónica, materiales y sistemas de producción. El cuadro 2.1 traza el desarrollo histórico de las tecnologías más relevantes relacionadas con el prototipado rápido y la fecha estimada de invención.

El prototipado lleva existiendo desde que el ser humano empezara a desarrollar herramientas para mejorar su vida cotidiana. Sin embargo, el prototipado aplicado al producto empezaría siglos después, cuando éstos no eran demasiado sofisticados y el tiempo requerido de fabricación ocupaba de media unas cuatro semanas [10]. Con el uso más extendido del CAD/CAM y el *Computer-Aided Engineering* (CAE), a principios de la década de los 80 se entró en la era del Prototipado Virtual [1]. Con este nuevo concepto, se desarrollan las herramientas virtuales adecuadas, en entornos donde se pueden analizar las propiedades físicas de los modelos virtuales y además llevar a cabo numerosas iteraciones de los diseños con el hecho de cambiar ciertos parámetros en los modelos.

Actualmente, además de una mejora en los sistemas CAD/CAM/CAE, se dispone del RP— también llamado fabricación de escritorio (*desktop manufacturing*) por la comodidad y sencillez con la que se puede llevar a cabo la reproducción tridimensional de un modelo—, en el que se pueden fabricar productos tres veces más complejos que en la década de los 70 y en mucho menor tiempo [10].

2.1.1. Historia de la impresión 3D

La historia de la impresión 3D está básicamente arraigada a la invención de nuevas técnicas de fabricación 3D y publicación de patentes en posesión de empresas privadas, que poco a poco han ido constituyendo el tejido de lo que se conoce actualmente como *Rapid Prototyping*.

Pese a que la primera patente relacionada con tecnologías de RP fue publicada en mayo de 1980 por el Dr. Kodama, en Japón, no significó ésta el origen de la línea sucesoria de tecnologías de impresión 3D, debido a no haber conseguido un gran impacto en la sociedad. Dicho impacto no se consiguió hasta 1986, cuando la primera patente de la tecnología *Stereolithography Apparatus* (SLA) fue concebida por Charles Hull, que posteriormente fundó la empresa *3D Systems* y desarrolló la SLA-1, que obtuvo su primera venta en 1988.

Como suele ser habitual, al mismo tiempo en 1987 en la Universidad de Texas, Carl Deckard presentaría su primera patente sobre el proceso de *Selective Laser Sintering*. Esta patente fue finalmente concedida en 1989 y la tecnología SLS fue cedida a *DTM Inc.*, que más tarde fue adquirida por *3D Systems*. Fue también en 1989 cuando Scott Crump, co-fundador de *Stratasys Inc.*, presentó la patente sobre FDM, que fue entregada a *Stratasys Inc.* en 1992. De nuevo en 1989 se funda la empresa *Electro-Optical Systems (EOS)*, especializada en sistemas de fabricación aditiva, que en 1990 presentaría la impresora *STEREOS 400*, de tecnología SLA, y en 1995 la impresora *EOSINT M 250* de tecnología *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) [11].

Otras tecnologías y procesos de impresión 3D surgieron durante esa época, como la *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM) patentado por William Masters, *Laminated Object Manufacturing* (LOM) patentado por Michael Feygin, *Solid Ground Curing* (SGC) patentado por Itzhak Pomerantz y *Three-dimensional Printing* (3DP) patentado por Emanuel Sachs.

Ya durante la primera década del siglo XXI, *MCP Technologies* introdujo la tecnología *Selective Laser Melting* (SLM). A partir de la segunda mitad de la década, los esfuerzos se concentraron en dos vertientes específicas cuyo énfasis es más claro hoy en día. Por un lado existe la vertiente enfocada al mercado especializado y a la industria, creando y mejorando máquinas de alto coste y alta ingeniería para aplicaciones como la industria automovilística, aeroespacial, médica o joyera. Por otro lado, en cambio, existe la parte opuesta del espectro, en el que se pretende reducir al máximo el precio de la máquina, acercando así esta tecnología al mercado poco especializado mediante el desarrollo de impresoras fáciles de usar. Aun así, la gran parte de los fabricantes de sistemas de impresión 3D siguen estando enfocados a un mercado de aplicaciones industriales [12].

2.2. Una revolución tecnológica y filosófica

Los roles que juega la tecnología del prototipado en el proceso de desarrollo del producto son numerosos, entre ellos destacan la experimentación y aprendizaje, el testeo, la interacción y comunicación con el producto o la integración en los medios a estudiar. Además, es una herramienta potente para los equipos de desarrollo, en el que sirven de soporte mientras se diseña el producto.

En estos tiempos en que prima la rapidez y fidelidad con la que se hace realidad una nueva idea o concepto, la fabricación por adición ha sufrido un tremendo auge. El impacto en la industria es claro: se pueden ahorrar grandes cuantías tanto de dinero (que otrora se destinaban a cubrir tiempos de fabricación) como de esfuerzo (ya que las oportunidades de fabricación del modelo físico se veían reducidas por el ya mencionado coste y tiempo).

Sin embargo, es necesario también mencionar el impacto en la sociedad alejado de la industria. Actualmente existe una gran variedad de materiales compatibles con la impresión 3D, tales como plásticos, metales, cerámicas e incluso materiales orgánicos como la madera. Numerosos son los centros que dedican sus recursos a la investigación de nuevos materiales para ampliar este abanico, tales como textiles, tejidos nerviosos, alimentos o materiales aptos para la construcción de viviendas. Es en este momento cuando surge el nuevo paradigma al que se enfrenta el ser humano, en el que en un futuro próximo se podrá fabricar de manera fácil, económica y sin restricciones cualquier tipo de objeto imaginable. Por ende, cualquier persona con los recursos necesarios para manejar este proceso será capaz de satisfacer sus necesidades básicas sin necesidad de recurrir a intermediarios que proporcionen el producto final, permitiendo además la fácil customización.

Uno de los aspectos llamativos que acompaña a la tecnología de impresión 3D es el hecho de que, por parte de los organismos que la comercializan, existe un titánico esfuerzo para, efectivamente, acercar esta tecnología al usuario no especializado. Particularmente, la entidad para la que se colabora en este proyecto, *BCN3D Technologies*, define como uno de los objetivos básicos de su empresa el hecho de proporcionar no solamente el producto, sino el conocimiento adecuado para llevar a cabo la reproducción física de la idea del usuario; además de crear una interfaz de comunicación con la máquina muy intuitiva y manejable.

Aun así, existen limitaciones inevitables acerca del prototipado rápido, como por ejemplo la incapacidad de obtener datos fiables probando con un gran número de escenarios, sobre todo por lo que respecta al estudio de las propiedades físicas derivadas de la geometría del producto, y que herramientas de CAD/CAM/CAE logran obtener mediante, por ejemplo, un análisis

por el Método de los Elementos Finitos (MEF).

2.3. La filosofía *Open Source* y el proyecto *RepRap*

En efecto, se hace patente la intención por parte de los desarrolladores –tanto profesionales como *amateurs*– de hacer llegar a toda persona interesada los recursos y avances tecnológicos relacionados con la impresión 3D. Consecuentemente, un muy poco convencional fenómeno se produce entorno a esta tecnología: el concepto *Open Source*.

Este término inglés –traducido literalmente como *Recurso Abierto*– se usa para describir la compartición libre de recursos, sin ningún ánimo de lucro, para beneficiar a la comunidad y de esta manera todo individuo interesado en el recurso pueda acogerlo sin ningún tipo de violación de autoría. Como resulta ser común, una de las herramientas principales para dicha distribución de recursos abiertos es el uso de Internet y las redes sociales. El uso de estas herramientas ha podido dar lugar de manera rápida a una comunidad de usuarios hermanados por la libre compartición de conocimiento sobre la tecnología de impresión 3D. Por tanto, parece claro que el auge sufrido por la tecnología de impresión 3D es fruto también del apogeo vivido por la era de la información y las redes sociales.

Esta nueva filosofía, muy propia de la comunidad científica, pone de manifiesto una nueva generación de pensamiento que quiebra con el actual sistema que abusa de la propiedad intelectual, y abastece en un formato horizontal y libre el conocimiento obtenido. Uno de los proyectos más ambiciosos y que mejor ilustra esta nueva línea filosófica es el proyecto *RepRap*, iniciado en febrero de 2004 por Andrian Bowyer en Inglaterra.

La iniciativa *RepRap* –término fruto de la unión de las palabras **R**eplicating **R**apid-prototyper– se basa en la construcción de la primera máquina auto-replicante de uso general de la humanidad [13]. La principal característica de este proyecto es que la máquina se desarrolla continuamente por la comunidad y, tal y como explica el pionero de este proyecto Andrian Bower, actúa como la simbiosis entre las flores polinizadoras y las abejas, en que las flores se reproducen gracias al trabajo de las abejas y que a su vez obtienen el beneficio del polen; en este caso, la impresora 3D asume el rol de las flores, donde el polen se asemeja con las piezas 3D reproducidas, y la comunidad el rol de las abejas [14]. Este modelo filosófico lo comparte un numeroso grupo de personas y empresas. Un ejemplo es, de nuevo, la empresa *BCN3D Technologies*, que proporciona mediante su página web los archivos de extensión

.sql¹ de todas las partes de la impresora que se pueden reproducir con una impresora 3D.

Con la llegada del concepto de la libre y fácil disposición de recursos, se ha evidenciado el acercamiento de la tecnología al uso doméstico. Hablar de fabricación aditiva ya no supone imaginar un entorno industrial, sino que un gran número de impresoras 3D se encuentran en domicilios particulares, donde los usuarios se dedican a modo de afición a trabajar sobre esta tecnología y reproducir sus ideas en objetos físicos. Pronto el uso de estas impresoras en el domicilio puede llegar a ser tan común como otros aparatos que en el momento de la invención estaban reservados para una reducida minoría y posteriormente resultaron de uso generalizado, tales como la máquina lavadora, el teléfono, la televisión, el ordenador e incluso la bombilla.

Otro aspecto que ha permitido potenciar el uso doméstico de la tecnología FFF/FDM es el bajo coste asociado tanto a la obtención de la máquina impresora como a los recursos para hacerla funcionar. De hecho, uno de los motivos por el que el coste de la máquina es bajo es debido precisamente a que usa el material en forma de filamento, siendo esta forma la más sencilla y barata de producir.

2.4. Tecnologías de fabricación aditiva actuales

Pese a que el uso doméstico parece haber sido copado por la tecnología FFF, siendo ésta la más barata por su funcionamiento, mantenimiento y customización, no hay que olvidar que existen otras tecnologías de fabricación aditiva de potente explotación. Estas tecnologías pueden estar basadas en diferentes técnicas de prototipado rápido: los sistemas *liquid-based*, los sistemas *solid-based* y los sistemas *powder-based*².

Aunque el número de distintos sistemas de prototipado rápido asciende a más de veinte, las más relevantes y maduras son descritas en las siguientes secciones, siendo éstas: *Stereolithography Apparatus* (SLA), *Solid Ground Curing* (SGC), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Three-dimensional Printing* (3DP), *Laminated Object Manufacturing* (LOM) y *Fused Filament Fabrication* (FFF).

¹Formato de archivo informático de diseño asistido por ordenador (*Computer-Aided Design* (CAD)), que define la geometría de objetos 3D mediante un mallado triangular de mayor o menor resolución. [15]

²*Liquid-based*: basados en líquidos.

Solid-based: basados en sólidos.

Powder-based: basados en polvo.

2.4.1. *Stereolithography Apparatus (SLA)*

Primeramente desarrollada por la empresa *3D Systems* en 1988 en California, se trata de una tecnología de tipo *liquid-based*.

Proceso

La tecnología SLA es capaz de construir modelos 3D directamente de un archivo *.stl* de CAD mediante el endurecimiento selectivo de una resina fotosensible con un láser. El endurecimiento de la resina viene dado por el proceso de polimerización, que constituye puentes entre pequeñas moléculas plásticas (monómeros) para formar largas cadenas de las mismas (polímeros), que finalmente deviene un sólido polímero reticulado. En este caso concreto, se habla de fotopolimerización, ya que el catalizador usado para conseguir esta reacción es un rayo de energía luminosa. La mayoría de máquinas que usan tecnología SLA, incluidas las desarrolladas por *3D Systems*, usan un rayo de luz del rango de longitud de onda de UV, aunque pueden existir algunas que usen rayos del rango de longitud de rayos gamma, rayos X, o del espectro visible.

Otro de los principios básicos para la construcción de modelos tridimensionales con esta tecnología es la construcción capa a capa. Para lograr este propósito, la unidad de control hace variar la altura de la plataforma y del modelo (figura 2.1) en movimientos de 0,025 mm hasta 0,5 mm de diferencia. El sistema de escáner óptico, controlado mediante un ordenador, direcciona el haz láser de forma que hace solidificar una área correspondiente al grueso de una capa de la resina. Una vez solidificada la sección completa de la capa correspondiente, la unidad de control sumerge el modelo lo suficiente para cubrir la superficie con otra fina capa de resina líquida. El ciclo se repite hasta la construcción completa del modelo, momento en el que se eleva el modelo del contenedor y se limpia el exceso de polímero con un flujo de aire barredor.

Ventajas e inconvenientes

El proceso de estereolitografía ofrece como principal ventaja la mejor calidad superficial comparado con los otros sistemas de RP. Asimismo, ofrece una gran competitividad en cuanto a precisión dimensional se refiere y una gran velocidad de producción de piezas.

También es capaz de reproducir con solvencia especificaciones de compleja construcción, como paredes verticales finas, esquinas afiladas o altas columnas. Además, la lista de resinas disponibles para este tipo de tecnolo-

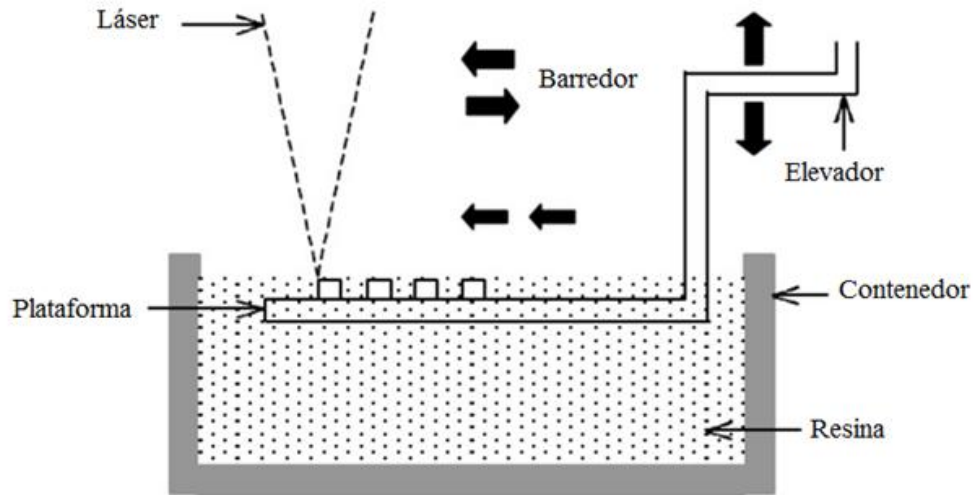


Figura 2.1: Esquema del proceso SLA. [1]

gía ha ido aumentando durante los últimos años, y se dispone de resinas de mejores características térmicas y resistencia.

El principal inconveniente de la tecnología SLA es la necesidad de requerimientos del post-proceso, ya que dependiendo del material es necesario también un secado en un horno especial con tal de mejorar sus características físicas. La resina fotosensible, además, puede llegar a ser de coste elevado, llegando a valores de entre 130€ y 175€ por litro. [16]

2.4.2. *Solid Ground Curing (SGC)*

Este tipo de tecnología, de tipo *liquid-based* fue desarrollada por *Cubital Ltd.* en 1991 en Alemania.

Proceso

Primeramente, un software específico, desarrollado también por la empresa propietaria de ésta tecnología llamado DFE (Data Front End), se encarga de generar digitalmente la imagen de cada una de las secciones horizontales del modelo (item A de la figura 2.2), que posteriormente configuraran cada una de las capas de las que derivará el objeto tridimensional. Cada una de estas imágenes es plasmada mediante ionografía sobre una placa de vidrio (item B) y revelada mediante un tóner electrostático (item C), creando una máscara con un perfil de alta calidad.

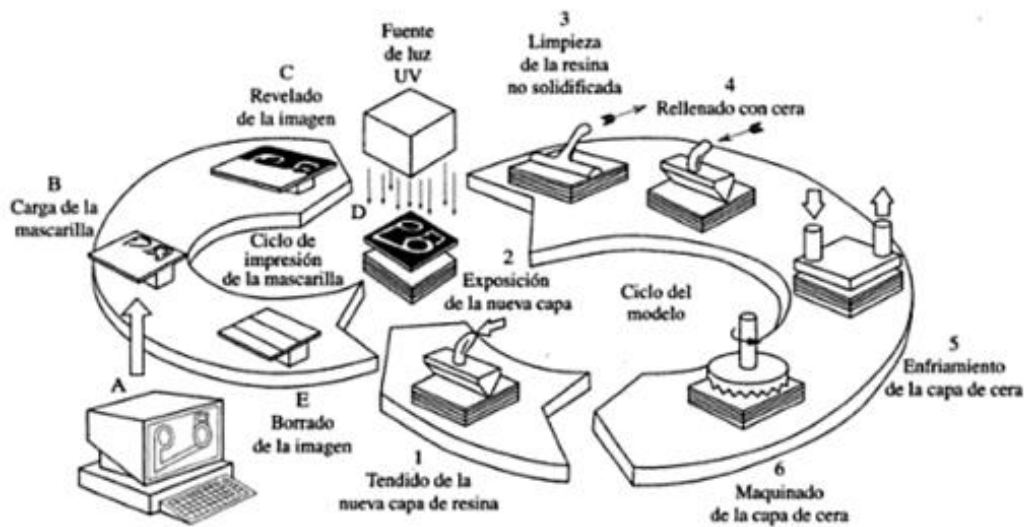


Figura 2.2: Ciclo del proceso SGC. [2]

Un haz de luz UV incide a través de la máscara sobre una fina capa de resina fotosensible, que se ha aplicado anteriormente (item 1), solidificando así la zona donde la luz incide y dejando líquida la zona de penumbra (item 2 y D). Una vez expuesto un tiempo bajo la luz, se retira la resina que ha quedado líquida (item 3) y se aplica una capa de cera que cubre la resina solidificada (item 4), que se prensa con una placa fría con el objetivo de rellenar los huecos y crear una capa sólida (item 5). Debido a que el grosor de la capa actual es mayor que el deseado, se fresa la superficie hasta la medida exacta para acoplar debidamente la siguiente capa de resina (item 6). De esta forma, el ciclo vuelve a empezar hasta generar finalmente la pieza tridimensional.

Ventajas e inconvenientes

La ventaja más significativa que se deduce de este tipo de tecnología es la admisión de fabricación de varios objetos a la vez, ya que mientras uno está en una estación del ciclo, los demás pueden ocupar las estaciones libres, suponiendo así una producción simultánea rápida sin necesidad de crear colas. Por otro lado, también es importante mencionar la rapidez con la que el material constituyente de la capa a trabajar solidifica, distinguiéndose así de la común solidificación punto a punto que se efectúa con el uso de otras tecnologías. Además, no es necesario el uso de elementos de apoyo estructural, puesto que la cera cumple este papel, haciendo posible la construcción de

elementos flotantes o grandes voladizos.

Por lo que hace a las propiedades físicas del material, cabe destacar que tiene una resistencia y estabilidad estructural altas, debido al completo solidificado simultáneo de toda la capa y por tanto la minimización de tensiones internas del sólido según se desarrolla su construcción.

En cuanto a inconvenientes, el principal es la necesidad de un espacio físico grande para la instalación de la máquina, limitando así su potencial mercado. Por otro lado, se produce deshecho de material en el proceso de fresado generando incapacidad de reciclado, además de la posible dificultad a la hora de retirar los restos de cera en geometrías estrechas como agujeros o esquinas.

2.4.3. *Selective Laser Sintering (SLS)*

La invención de ésta tecnología fue el objeto de fundación de la compañía *DTM Corporation* en 1987, absorbida más tarde por *3D Systems*. Se trata de una tecnología de tipo *powder-based*.

Proceso

El proceso para la fabricación del modelo físico, es de nuevo basado en la solidificación de un material capa a capa (figura 2.3). Primeramente, un software llamado *Vanguard* procesa el modelo virtual de CAD y genera digitalmente la sección del objeto que formará cada una de las capas. La primera sección es dibujada por un láser generador de calor de CO_2 , que hace solidificar una fina capa de polvo fusible extendida sobre la cama de dónde surgirá el objeto.

La interacción del rayo láser con el polvo fusible hace aumentar la temperatura del mismo hasta conseguir su fusión, de esta manera, las partículas acaban formando una masa sólida. La intensidad del haz de luz debe ser correctamente modulada con tal de fundir el polvo solamente en las áreas definidas por la geometría del objeto. Así, el polvo no solidificado sirve a su vez como soporte para las siguientes capas. Una vez finalizada la primera sección del objeto, se extiende una nueva capa de polvo fusible y el ciclo se repite hasta completar el objeto deseado, momento en el que se retira el polvo no solidificado y aparece el objeto tridimensional.

Ventajas e inconvenientes

De manera semejante a la tecnología SGC, las partes creadas en un entorno controlado permiten conseguir una gran estabilidad. Además, no se

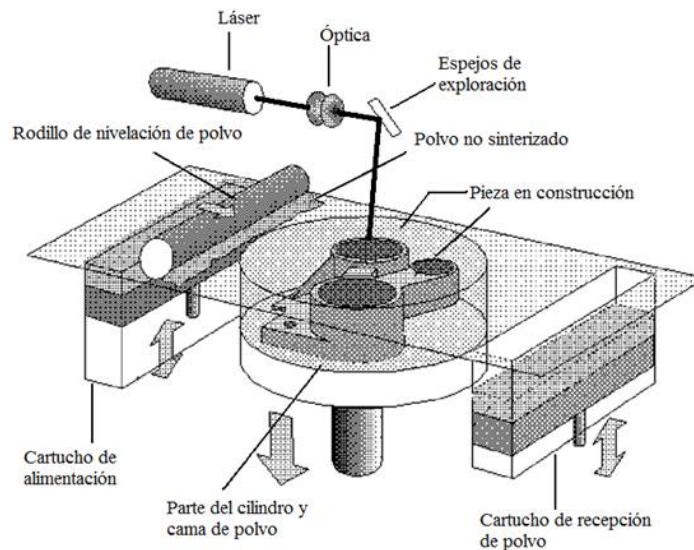


Figura 2.3: Esquema del proceso SLS. [2]

necesita elementos de soporte durante la creación del sólido, ya que el propio polvo actúa como tal, permitiendo la construcción de partes móviles o flotantes.

Es destacable también el amplio rango de materiales con el que se puede trabajar con esta tecnología, incluyendo nylon, policarbonatos, metales y cerámicos; que permite la creación de una gran variedad de piezas funcionales. Otro aspecto que hace de ésta tecnología una herramienta sencilla es el hecho de no necesitar procesos de post-solidificación ni de post-fabricación, más allá del habitual pulido de la superficie. [1]

2.4.4. *Three-dimensional Printing (3DP)*

Esta tecnología fue inventada y patentada en el prestigioso *Massachusetts Institute of Technology*, y cedida más adelante para un mayor desarrollo a la empresa *Z Corporation* en 1994. Se trata de una tecnología de tipo *powder-based*.

Proceso

La fabricación del material se elabora capa a capa, como es habitual en las técnicas de impresión 3D. Primeramente, se extiende un lecho de polvo, que es rociado según la geometría deseada por un líquido aglutinante colorante. Para producir los distintos colores del espectro, la máquina dispone de cuatro

colores básicos que puede combinar y aplicar a diferentes regiones de la pieza. Este líquido aglutinante fija las partículas de polvo, manteniendo las zonas secas sin fijar. De esta manera, el polvo sin aglutinar actúa como soporte para las siguientes capas del material. Una vez la sección se ha completado, el pistón donde yace el modelo y el polvo disminuye su posición en el eje z y una nueva capa de polvo se extiende sobre la superficie.

Este proceso se repite sección a sección hasta finalizar el objeto tridimensional, momento en el que retira el bloque de la cama y se aspira el exceso de polvo adherido a la pieza. Es necesario un post-proceso según la robustez estructural que se desee, como un sumergimiento en cera o una infiltración en el modelo con resina o uretano.

Ventajas e inconvenientes

Comparado con las tecnologías antes mencionadas, ésta es la más simple, versátil y semejante al funcionamiento de una impresora 2D tradicional. Debido al rápido solidificado de cada una de las capas, permite una gran velocidad de impresión. Además, un aspecto importante es la sencillez de operación a nivel de usuario no especializado, ya que solamente requiere de una atención especial el asegurar un nivel suficiente de polvo y de líquido aglutinante, que ofrece una gran paleta de colores sin necesidad de preparación previa. Por último, no se genera en absoluto material de deshecho, puesto que el polvo aspirado adherido al modelo es reutilizable en las siguientes impresiones.

Por lo que respecta a los inconvenientes, ésta tecnología no ofrece modelos estructuralmente robustos, de manera que limita su capacidad funcional; además de resultar un pobre acabado superficial, que requiere de un post-proceso para mejorar este aspecto. Por último, es importante comentar la escasa variedad de materiales con los que puede fabricar éste tipo de tecnología, limitando de nuevo su versatilidad funcional. [16]

2.4.5. *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

Esta tecnología, ahora en propiedad de *Cubic Technologies*, fue inventada por Michael Fygin en 1985. Se trata de una tecnología de tipo *solid-based*.

Proceso

Este proceso consta de tres fases: pre-proceso, construcción del modelo y post-proceso.

En el pre-proceso, como suele ser habitual en la fabricación aditiva, un software divide el modelo de CAD en múltiples secciones planas. En este

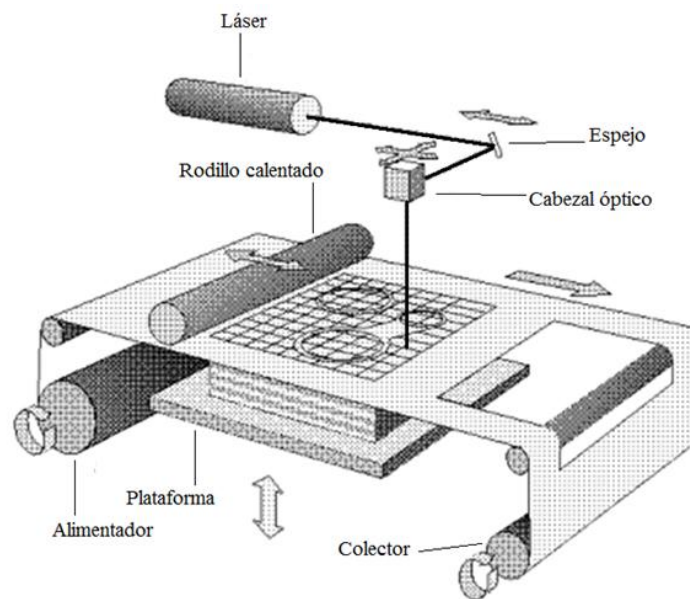


Figura 2.4: Esquema del proceso LOM. [2]

proceso el software tiene el nombre de *LOMSlice*, y además de seccionar el modelo, permite realizar otras modificaciones como escalar dimensiones, voltear o girar.

En la fase de construcción (figura 2.4) se dispone de diversas capas de material adhesivo que son secuencialmente depositadas una sobre la otra y cortadas mediante un rayo láser de CO_2 . El software *LOMSlice* se encarga de traducir estas imágenes en órdenes con el objetivo de guiar el láser cortante por los recorridos definidos. La potencia del rayo láser está calculada de forma precisa para garantizar un corte del grueso de una sola capa de material cada vez. Una vez cortada una capa del material adhesivo, se deposita otra fijándola a la anterior mediante la aplicación de calor de un rodillo calentado, y se vuelve a repetir el proceso hasta que el modelo está completamente construido.

En la fase de post-proceso se incluyen la separación de la pieza del material de soporte y los procesos de acabado superficial. Primeramente es necesario separar el bloque de material del la plataforma usando un martillo, un cuchillo de masilla o un alambre fino. Tras esto, se separan las paredes del bloque y usando las herramientas adecuadas se retira el material de soporte, que el láser también ha cortado en partes más pequeñas con tal de facilitar la extracción, hasta dar con el modelo. Una vez extraído el modelo, se pueden aplicar técnicas para mejorar el acabado superficial de la pieza según se desee, como pulido o pintado.

Ventajas e inconvenientes

Una de las ventajas principales de este tipo de tecnología, es la amplia gama de materiales con la que puede trabajar. Prácticamente cualquier material del que se pueda disponer en hojas puede ser usado, incluyendo papel, plásticos, metales, cerámicas y composites. Además, debido a que el proceso está basado en el corte en vez de en la deposición de material, el tiempo de construcción se ve reducido con respecto a otras tecnologías, ya que cuando se trabaja con piezas de gran grosor, no es necesario recorrer el interior de las secciones para su construcción, solamente la periferia.

Ofrece a su vez una gran precisión, alrededor de los 0,127 mm; esta precisión viene dada por el control del láser y de la cama donde descansan las sucesivas capas de material, controladas por un anillo cerrado de control que asegura su horizontalidad. También cabe destacar que no necesita estructuras de soporte durante la construcción.

En cuanto a inconvenientes, es mencionable la necesidad de ajustar de manera muy precisa la potencia del láser con tal de cortar nada más que la capa en cuestión. Por lo que hace a la estructura del material, este proceso no permite la construcción de paredes finas, especialmente en el eje vertical y, por otro lado, la integridad del prototipo depende únicamente de la calidad de la fijación entre las capas, resultando así el adhesivo un aspecto muy importante de esta tecnología. Por último, la extracción del material de soporte necesita una atención especial, puesto que se requiere de una técnica y herramientas muy concretas que, de hacerse incorrectamente, pueden llegar a dañar el prototipo o deformar su geometría.

2.4.6. *Fused Filament Fabrication (FFF)*

Esta tecnología de fabricación aditiva fue primeramente introducida por Scott Crump en 1988 bajo el nombre de *Fusion Depositing Material* (FDM) cuya empresa poseedora es *Stratasys Inc.*. Debido a que la tecnología FDM se encontraba protegida por patente, nació otra paralelamente que es en esencia similar y en la que se basa las impresoras llamadas *RepRap*: la tecnología FFF. Por tanto, se trata de la tecnología en la que está basada la impresora en la que se centrará este proyecto: la *BCN3D Sigma*. Se trata del tipo *solid-based*.

Proceso

De nuevo, la construcción del modelo se elabora capa a capa. Primeramente, el archivo de formato *.stl* que contiene el modelo geométrico del

diseño creado con CAD, es traducido mediante un software específico a órdenes de movimiento del carro en el que está colocado la boquilla. A su vez, se dispone de una bobina de material fundible en forma de filamento, que es traccionado mediante un motor, que usualmente se trata de un motor paso a paso, hacia la boquilla (Figura 2.5). Antes de que el filamento se extraiga, es calentado por una resistencia hasta la temperatura en la que alcanza un estado de semi-líquido. En este momento y mediante la presión que ejerce el material traccionado, el semi-líquido es depositado sobre una plataforma llamada cama caliente, que sirve de soporte. La boquilla, montada en el carro móvil, recorre tanto el contorno del modelo que se desea fabricar como su interior, rellenándolo de material dependiendo de la configuración escogida para su densidad.

Una vez se ha depositado y solidificado una sección del modelo, la cama caliente desciende en el eje vertical una distancia suficiente para asegurar el depositado óptimo del material sobre las sucesivas capas y sin colisiones. De esta forma, se va creando el modelo hasta su finalización, momento en el que se retira de la cama, listo para ejercer su funcionalidad. Si se desea un acabado superficial más liso –ya que la superficie queda con una textura rugosa formada por los finos filamentos de material– el modelo admite procesos como lijado y pulido.

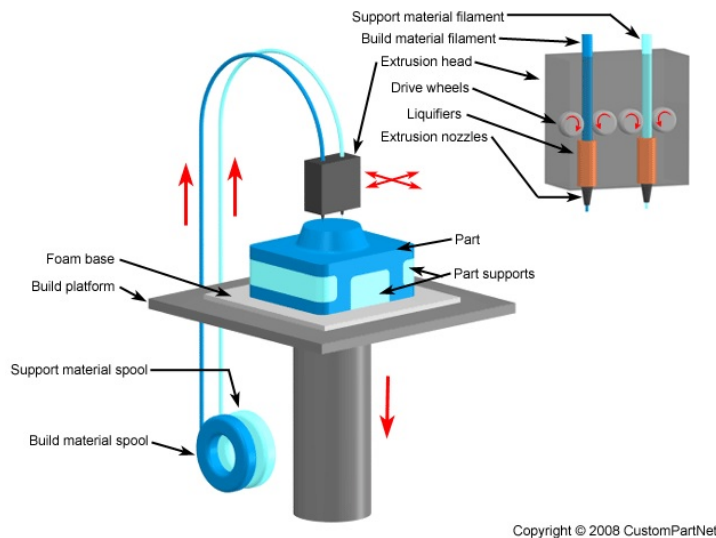


Figura 2.5: Esquema del proceso FFF. [2]

Ventajas e inconvenientes

Una ventaja muy poderosa de este tipo de tecnología es la capacidad de fabricación de piezas totalmente funcionales, muy útil cuando se requiere el desarrollo de un producto que necesita prototipos para su testeo funcional. Por otro lado, permite un fácil cambio de material, ya que el filamento se encuentra enrollado en bobinas fáciles de manejar y puede ser cargado rápidamente para su uso. Además, el material de soporte para la fabricación de piezas con voladizos puede llegar a ser muy fácil de extraer, ya que actualmente existe material a base de alcohol (Alcohol de polivinilo (*Polyvinyl Alcohol*) (PVA)) soluble en agua. Por último, no se produce un malgasto de material excesivo más que el existente en el material de soporte, ya que todo se aprovecha para la construcción directa del modelo.

En cuanto a inconvenientes, hay que remarcar que se trata de un proceso lento en cuanto a construcción, ya que el cabezal debe recorrer la sección con tal de realizar el relleno para piezas sólidas; de todas formas, se ha trabajado duramente estos últimos años para aumentar la velocidad de movimiento del cabezal, ya sea reduciendo peso como mejorando la respuesta de los motores. Por otra parte, si no se tiene un buen control de la temperatura a la que el material es extruido o una buena electrónica que se encargue de la óptima transmisión de información, se pueden dar deformaciones del modelo o atascos en la boquilla.

2.5. Materiales usados en la tecnología FFF

Los materiales usados en este tipo de tecnología deben cumplir con una serie de especificaciones con tal de poder ser utilizados en un entorno óptimo. Estas especificaciones son, por ejemplo, que se puedan disponer en filamentos flexibles, que sean semi-fusibles en un rango de temperaturas que se puedan alcanzar con los elementos de la impresora y que sean solidificados en un tiempo adecuado para no hacer de la construcción un proceso lento. Actualmente, se dispone de una gama de materiales considerablemente extensa, en su mayoría compuesta por termoplásticos; aun así, parece que las posibilidades de ampliación de materiales que esta tecnología admite no están aún extintas, permitiendo investigar y explotar otras posibilidades con mucho potencial. Es por ello que existe un importante esfuerzo por parte de empresas y centros de investigación con tal de ampliar este abanico de materiales, y en el que se están consiguiendo resultados cuanto menos sorprendentes.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) (ABS)

Es uno de los plásticos más usados en la impresión 3D. No es biodegradable, pero tiene propiedades físicas muy valoradas como su tenacidad, dureza y rigidez, además de su resistencia química y resistencia a la abrasión; sin embargo, sufre con la exposición a rayos UV.

Es soluble en acetona y su densidad es de $1,05 \text{ g/cm}^3$. Requiere una temperatura de cabezal de unos $240 \text{ }^\circ\text{C}$ y de bandeja de unos $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Un famoso ejemplo de objeto construido con este material son las piezas de *LEGO*.

Poliácido láctico (*Polylactic Acid*) (PLA)

Es otro de los plásticos de más uso en la impresión 3D y de uso más sencillo que el anterior. Este compuesto es biodegradable y usualmente se obtiene de almidón de maíz. La textura de las piezas construidas con este material no es tan suave al tacto como el ABS, pero son más brillantes y las esquinas o geometrías estrechas tienen un mejor acabado.

Es un material algo más denso que el anterior, de entre $1,2 \text{ g/cm}^3$ y $1,4 \text{ g/cm}^3$. La temperatura necesaria para trabajar de manera óptima es de unos $210 \text{ }^\circ\text{C}$ en el cabezal y unos $60 \text{ }^\circ\text{C}$ en la bandeja.

En ambos casos se puede encontrar una amplia paleta de colores, que van desde el crudo natural hasta dorados y plateados. Además se pueden encontrar variedades con propiedades especiales como colores fosforescentes –que brillan en la oscuridad–, o fluorescentes –que brillan al exponerlos bajo luz UV–. También existe un reducido número que cambia de color según la temperatura e incluso variedades que conducen la electricidad. [17]

Poliestireno de alto impacto (*High Impact Polystyrene*) (HIPS)

El poliestireno es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados en el mundo. El HIPS es un material muy parecido al ABS, y requiere los mismos perfiles de temperatura. Como éste, tiene un mal comportamiento a la luz UV y tiene una densidad de $1,04 \text{ g/cm}^3$. Destacan también sus características con respecto a higiene y resistencia tanto mecánica como térmica. La temperatura de extrusión adecuada es de unos $235 \text{ }^\circ\text{C}$.

Una de las características más interesantes de este material es su disolución completa ante la aplicación de D-Limoneno, un líquido a base de agua y carbono. Dado que el ABS no interactúa con éste líquido, es interesante el uso del HIPS como estructura de soporte. Se trata del mismo material usado

en las cubiertas de CD/DVD y embalajes en la industria de procesamiento de alimentos.

Alcohol de polivinilo (*Polyvinyl Alcohol*) (PVA)

Se trata de un polímero sintético, de excelentes propiedades adhesivas y emulsionantes. Tiene alta resistencia a la tracción y alta flexibilidad, siendo así un material apto para el prototipado rápido con tecnología FFF. La densidad de este material es de $1,19 \text{ g/cm}^3$ y su temperatura de extrusión se encuentra entre los $160 \text{ }^\circ\text{C}$ y $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

Su uso en tecnologías FFF está básicamente limitado a ejercer de material de soporte para la construcción de partes flotantes o voladizas, ya que una de sus más ventajosas propiedades es su completa disolución ante el agua, evitando así el uso de otros productos de precio más elevado.

Nylon de Taulman

Este tipo de compuesto está formado por la combinación de elastómero termoplástico con una base de nylon (copolímero). Esta combinación permite que el material sea altamente flexible, con una gran durabilidad y una gran unión entre las capas. Además, su acabado superficial tras la impresión es suave al tacto. La densidad de este compuesto es de $1,15 \text{ g/cm}^3$ y la temperatura de extrusión es de $230 \text{ }^\circ\text{C}$ en el cabezal y de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ en la cama.

Otros compuestos especiales

Como se ha comentado anteriormente, uno de los campos interesantes dentro de este tipo de tecnología es el desarrollo de nuevos materiales. En este aspecto, la empresa junto con la que se desarrolla este proyecto, *BCN3D Technologies*, trabaja con proveedores de filamento, como *ColorFabb*, que actualmente además de ofrecer los compuestos tradicionales, dispone de una serie de compuestos experimentales con acabados y propiedades interesantes. Unos ejemplos son:

WoodFill: compuesto por un 30 % de fibra de madera de pino reciclada y un 70 % de filamento PLA. La temperatura de impresión es de entre $195 \text{ }^\circ\text{C}$ y $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

CorkFill: compuesto por una combinación de PLA y partículas de corteza de corcho. La temperatura de impresión es de entre $210 \text{ }^\circ\text{C}$ y $230 \text{ }^\circ\text{C}$.

BambooFill: compuesto por un 20% de fibra de bambú reciclada y un 80% de filamento PLA. La temperatura de impresión es de entre 195 °C y 220 °C.

BronzeFill: compuesto por filamento PLA con aditivos de partículas de bronce. Una vez impreso y pulido, ofrece un acabado brillante como el bronce. La temperatura de impresión es de entre 195 °C y 220 °C.

CopperFill: compuesto por filamento PLA con aditivos de partículas de cobre. Aún se encuentra en una fase experimental y hay ciertos aspectos que deben mejorar para su uso más extendido. Su peso es tres veces mayor que el filamento sin aditivos. La temperatura de impresión es de entre 195 °C y 220 °C.

BrassFill: por último, este filamento está compuesto por PLA y partículas de latón. Es ligeramente más blando que el filamento BronzeFill y CopperFill, por lo que hay que tener especial cuidado en su manipulación. De nuevo, la temperatura de impresión oscila entre los 195 °C y 220 °C.

Capítulo 3

La impresora *BCN3D Sigma*

La impresora 3D *BCN3D Sigma* es una impresora basada en la iniciativa *RepRap* que usa la tecnología FFF. Se trata de la segunda generación de impresoras de este tipo que desarrolla la empresa creadora de éstos modelos: *BCN3D Technologies*, relevando así la primera generación de impresoras llamadas *BCN3D+*. Se trata de una impresora de escritorio profesional, pero que a su vez no requiere una gran especialización o una técnica desarrollada del usuario, siendo éste un aspecto muy buscado por las empresas comerciantes. Por otro lado, permite una calidad de extrusión enormemente alta, gracias a la altura de capa de 0,05 mm –capaz de imprimir 20 capas de material por cada milímetro de modelo–, que consigue reproducir una alta precisión de detalle. Otra arma importante de esta impresora es su sistema de doble extrusor independiente (IDEX), que permite mejorar los resultados obtenidos al ser capaz de combinar dos materiales o dos colores sin necesidad de detener el proceso. Esto es posible ya que cada extrusor imprime el material que lleva acoplado, mientras que el otro permanece inoperativo, evitando así que ningún resto de material fundido caiga sobre la pieza impresa.

Actualmente la impresora y los elementos de la que se compone está configurada para trabajar con un filamento de 3 mm de diámetro. En el mercado actual existe también como medida estándar el filamento de 1,75 mm de diámetro, siendo éste un estándar muy usado en las impresoras de origen estadounidense, mientras que el de 3 mm es más usado en las impresoras de origen europeo. En la siguiente sección se estudiarán las características de cada uno de los estándares de diámetro para el filamento.

En el cuadro 3.1 se presentan las especificaciones principales que definen la impresora.

Tecnología de fabricación	FFF
Tecnología de extrusión	Independent Dual Extruder (IDEX)
Volumen de impresión	210x297x210 mm
Alto de capa	0,05-0,35 mm (con una boquilla de 0,4 mm)
Resolución de posicionamiento	Eje X: 0,675 mm Eje Y: 0,012 mm Eje Z:0,001 mm
Temperatura máxima del extrusor	280°C
Temperatura máxima de la cama caliente	115°C
Diámetro del filamento	3 mm
Materiales compatibles	PLA ABS PVA Nylon Composites
Consumo de energía eléctrica	300 W
Firmware	Específico de <i>BCN3D Sigma</i> (basado en <i>Marlin</i>)
Pantalla	Táctil LCD de 3,5"
Boquilla	<i>BCN3DNozzle v3</i> de metal
Electrónica	<i>BCN3D Electronics</i> (6 ejes)
Filosofía	<i>Open Source</i>

Cuadro 3.1: Especificaciones principales de la impresora 3D *BCN3D Sigma* (cedido por *BCN3D Technologies*)

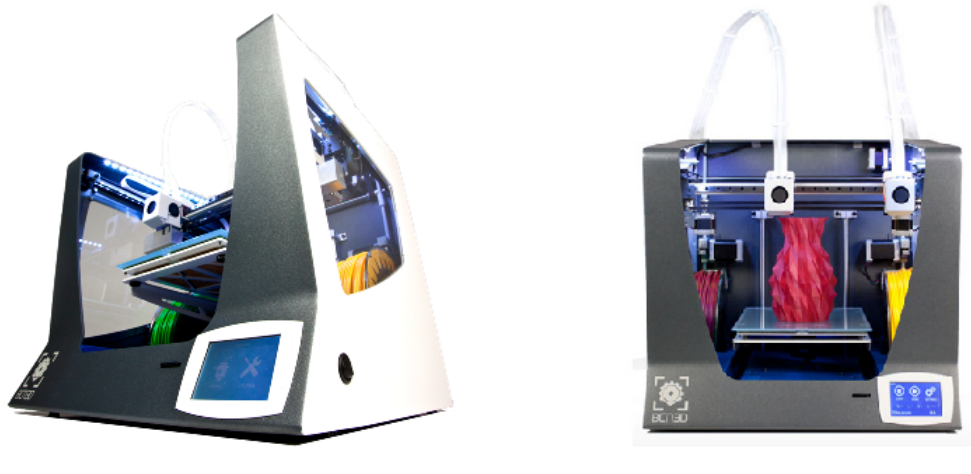


Figura 3.1: Impresora *BCN3D Sigma*.

3.1. Elementos de la impresora *BCN3D Sigma*

En esta sección, se describirán los elementos constructivos más relevantes de ésta impresora, comunes también en otras que usan la tecnología FFF.

3.1.1. Extrusor

El extrusor es el elemento que se encarga de traccionar el filamento de material procedente de la bobina hacia el cabezal impresor. Es uno de los elementos operativos más importantes que constituyen la impresora, ya que un mal funcionamiento o una calibración de presión errónea puede llegar a romper el filamento o, en caso de ejercer poca tracción, hacer que patine consiguiendo una mala alimentación de material y por tanto afectando a la calidad final del producto impreso.

El extrusor (figura 3.2), a su vez, está compuesto por varios elementos:

Motor paso a paso

El motor es el elemento que se encarga de transmitir el empuje a los engranajes que traccionan el filamento. Suele tratarse de un motor de tipo paso a paso¹, que viene controlado por la electrónica de la impresora y su movimiento es sincronizado con la necesidad de impresión.

¹Un paso en un motor paso a paso equivale a una fracción de giro que, dependiendo de la resolución del motor en cuestión, puede ser de mayor o menor magnitud.

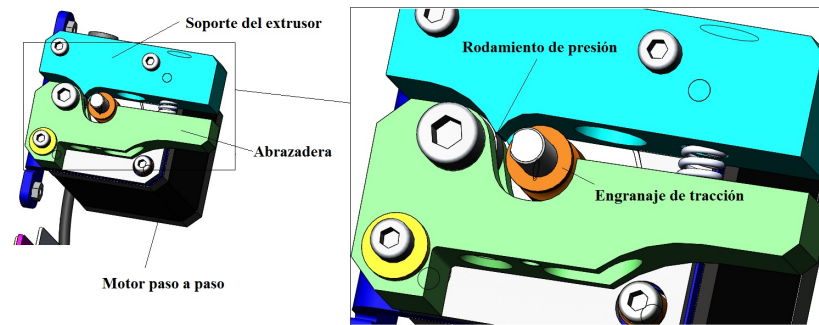


Figura 3.2: Diseño CAD del extrusor de la impresora *Sigma* completo.

El motor que usa la impresora *BCN3D Sigma* es el modelo NEMA 17 60 mm. La denominación NEMA se refiere al dimensionado estándar de la base metálica del motor definido por la *National Electrical Manufacturers Association*, cuya cifra 17 corresponde con el tamaño de 1,7 x 1,7 pulgadas (43,2 x 43,2 mm) de base del marco. La cifra de 60 mm se refiere a la longitud del motor, siendo esta la de más magnitud del modelo NEMA 17. En el siguiente cuadro (Cuadro 3.2) se especifican sus características.

Par de mantenimiento²	65 Ncm
Voltaje medio	4,05 V
Diámetro del eje	5 mm
Ángulo de paso	1,8° (200 pasos por revolución)

Cuadro 3.2: Especificaciones del motor NEMA 17 60mm. [9]

Engranaje de tracción

Se trata del engranaje que va montado sobre el eje del motor paso a paso. Dispone de dientes o marcas longitudinales en su contorno con la finalidad de aumentar la engranación con otros elementos. Normalmente no tiene contacto directo con el filamento, y sólo se encarga de transmitir el movimiento del motor a los demás sistemas de tracción. No obstante, en el caso de la impresora *BCN3D Sigma*, solo se dispone de un solo engranaje montado sobre el eje del motor con el contorno estriado que mantiene contacto directo con el filamento.

Rodamiento de presión

Esta pieza juega un papel importante en lo que a tracción se refiere, ya que se encarga de presionar el filamento atrapándolo contra el engranaje con contacto con el filamento. De nuevo, si el contacto contra la superficie del rodamiento de presión no está bien parametrizado, ocurrirán fallos de tracción, peligrando el funcionamiento adecuado de la impresora pudiendo causar atascos o la rotura del filamento. Es uno de los aspectos que más potencial de estudio ofrece con tal de mejorar la tracción.

Soporte del extrusor

El soporte del extrusor es el elemento estructural que sirve como unión entre los elementos funcionales encargados de la tracción y el motor paso a paso.

Tiene practicado un conducto que sirve de guía por el que circula el filamento procedente de los engranajes traccionadores hacia el cable Bowden.

Abrazadera

Este elemento estructural es el encargado de fijar el rodamiento de presión en la posición requerida. La abrazadera es ligeramente móvil debido a que su único punto de anclaje es un espárrago que actúa como eje, y su posición viene controlada por la acción de la fuerza ejercida por un muelle, que hace presionar el rodamiento contra el engranaje de tracción. (Figura 3.3).

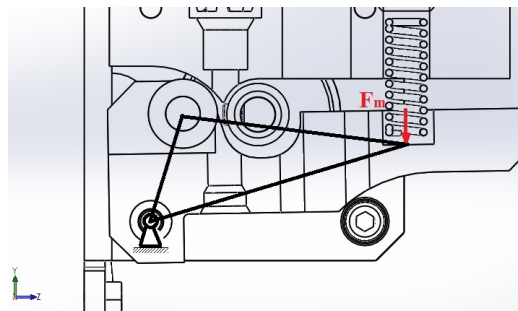


Figura 3.3: Diagrama del sólido libre de la abrazadera.

3.1.2. Cable Bowden

El cable de sistema Bowden es un tipo de cable mecánico flexible que se usa para dirigir por su interior el filamento de material de un punto a otro de

la impresora. En el mundo de la impresión 3D, este cable está fabricado en PTFE, más conocido por el nombre comercial Teflón, de forma que además de ofrecer sus propiedades flexibles –útil para abastecer el filamento a piezas móviles como el carro del cabezal–, ofrece también sus propiedades aislantes, ya que es bien conocido que este material es un gran aislante térmico y eléctrico. Otras de las propiedades que han hecho extender el uso de este material en el RP son sus propiedades impermeables, de manera que mantiene en buen estado el filamento que circula por su interior, su baja reacción ante cualquier sustancia, de manera que no se degrada con el uso y con el tiempo, y además ofrece un bajo coeficiente de rozamiento, permitiendo un fácil deslizamiento del filamento.

El uso de este elemento supone una de las distinciones entre diferentes tipos de extrusión en el entorno de la tecnología FFF, según si se utiliza o no, explicados más adelante.

3.1.3. Hotend

El Hotend es otro de los elementos más importantes que conforman la estructura mecánica de una impresora 3D básica. Se trata del elemento encargado de recibir el filamento de material sólido y transmitir la temperatura adecuada para hacerlo pasar al estado de semi-líquido deseado. Recibe este nombre por su significado en inglés, ya que la palabra proviene de los términos *Hot* y *End*: terminación caliente.

Está formado por diversos elementos:

Disipador de calor

Se trata de un tubo vertical, que puede estar enteramente fabricado en metal o, por el contrario, tener algunas piezas de materiales no metálicos como PTFE (Teflón) que, por acción de su contorno aleteado, consigue mantener a baja temperatura el filamento que circula por su interior con el objetivo de no causar su fundición con premura. Además, evita a su vez que la temperatura no afecte a otros elementos estructurales como el cable Bowden o el extrusor (en caso de encontrarse estos elementos integrados en un mismo bloque junto al Hotend).

Lo más habitual es que el disipador y las aletas estén fabricados en aluminio, ya que además de su conductividad térmica típica de los metales, se trata de un material ligero (Figura 3.4).

Hotend. El grosor de este recubrimiento también está diseñado en función de las características de funcionamiento, ya que puede alterar de manera considerable la afectación por la temperatura del filamento dada su alta resistencia térmica. Además de estos motivos térmicos, el PTFE se usa para facilitar el deslizamiento del filamento por su interior (Figura 3.5).

Este componente sirve además de unión entre el dissipador de calor y el bloque de aluminio.

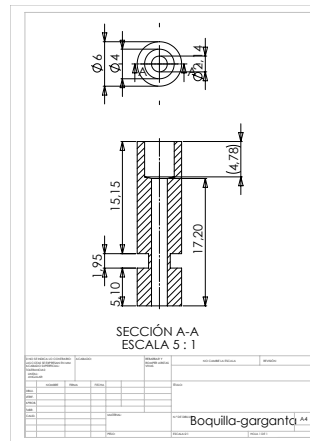


Figura 3.5: Boquilla garganta con recubrimiento de PTFE para filamento de 1,75 mm de diámetro. [4]

Hotblock

Se trata de un bloque de aluminio alojado en la base del dissipador con diversas perforaciones para alojar otros elementos funcionales como la resistencia eléctrica calorífica, el termistor y la unión entre la boquilla garganta y la boquilla extrusora (Figura 3.6).

En este bloque es donde se da la energía calorífica para producir la fundición al estado de semi-líquido del material en el interior de la boquilla extrusora, por lo que se encuentra a alta temperatura. Su construcción suele ser en aluminio para garantizar una temperatura homogénea en todo su volumen.

Boquilla extrusora o *nozzle*

Es el último elemento mecánico del Hotend y es donde se produce la fundición del material, además de ser el elemento encargado de depositarlo sobre la plataforma de construcción. Usualmente está fabricado en latón,



Figura 3.6: *Hotblock* de aluminio. [5]

por ser un metal maleable que presenta menos irregularidades en las paredes internas para evitar la adhesión del material fundido en ellas. Se trata de un conducto acabado en forma de cono, con una salida de menor diámetro que el filamento. Es el lugar donde el material se acumula antes de salir al exterior, por tanto, sus dimensiones deben estar perfectamente diseñadas conforme la velocidad de extrusión y el grado de liquidez del material, para así evitar atascos o, por el contrario, un flujo excesivo. Los diámetros de boquilla más comunes en el mundo de la impresión 3D van de 0,2 mm a 0,6 mm, siendo la de 0,4 mm la más utilizada y la que monta por defecto la impresora *BCN3D Sigma* (Figura 3.7).

3.1.4. Cama caliente

Se llama cama caliente a la superficie dónde el filamento es depositado. En el caso de la impresora *BCN3D Sigma* se trata de una superficie que se desplaza en el eje Z y que, además, no se encuentra anclada a la estructura para así facilitar la extracción del modelo una vez construido, puesto que queda firmemente adherido. Está construida en vidrio amorfo, ya que este material ofrece una conductividad térmica baja para evitar temperaturas altas en zonas donde no se produce calentamiento, de esta manera a la hora de extraerla de la estructura no se producen quemaduras al usuario.

La cama es calentada por la electrónica de la máquina a una temperatura seleccionada según el material de trabajo, pero que suele encontrarse entorno a los 60 °C.



Figura 3.7: Boquilla extrusora de latón de 0,4 mm de diámetro. [6]

3.2. Dos tipos de extrusión

3.2.1. Extrusión Directa

Este tipo de extrusión se caracteriza por no usar cable *Bowden*, y es el sistema utilizado por la impresora *BCN3D+*, la antecesora de la que se estudia en este proyecto.

El extrusor está montado directamente sobre el carro del cabezal (figura 3.8), por lo que su construcción es más sencilla, recomendada para usuarios que se inician en la impresión 3D. El filamento de material es introducido por la parte superior del extrusor y atrapado por el mecanismo traccionador. Por el otro extremo, el filamento pasa directamente a la boquilla, pasando previamente por el Hotend. Por tanto, el conjunto extrusor está formado por una sola pieza que incluye el motor paso a paso, el Hotend, el ventilador y la boquilla, de manera que el conjunto está montado de forma integral y compacta.

3.2.2. Extrusión Bowden

Por otro lado, existe la extrusión de tipo *Bowden*, que en su construcción se incluye el cable de este tipo (figura 3.9). Es el que monta la impresora *BCN3D Sigma*.

En este sistema, el extrusor se encuentra alojado en una parte fija de la estructura de la máquina y el filamento es conducido mediante el cable *Bowden* hasta el Hotend y la boquilla, que se encuentran del mismo modo

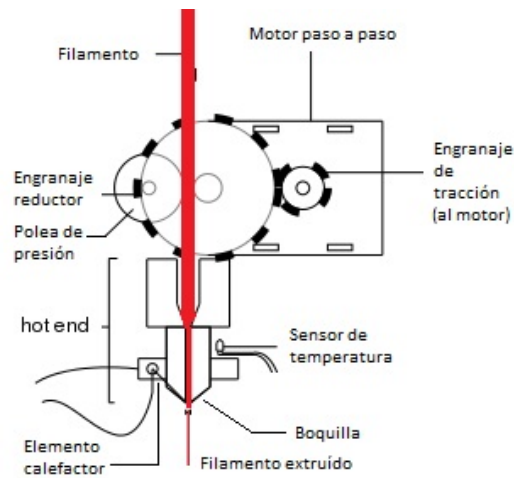


Figura 3.8: Representación de la extrusión directa. [7]

que en la extrusión directa alojados sobre el carro móvil. El uso de este sistema permite reducir el peso sobre el carro, por lo que se desplaza con menos dificultad y requiere menos energía, logrando así una mayor velocidad de impresión además de una reducción del tamaño.

Por contra, es un sistema algo más complejo y requiere de un mayor conocimiento del funcionamiento en caso de avería, por lo que va dirigido a usuarios con algo más de experiencia sobre la impresión 3D.

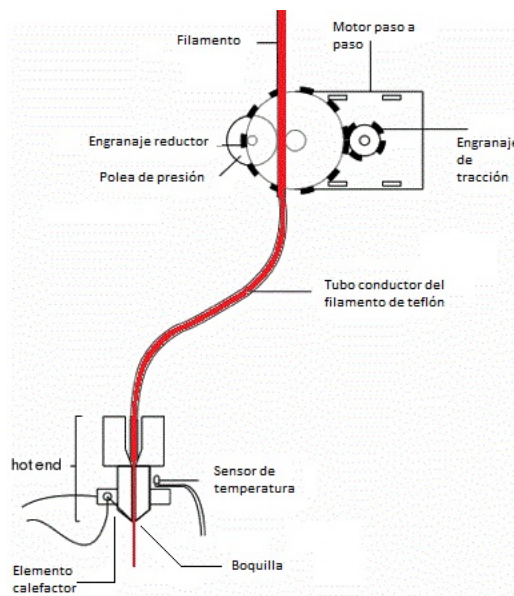


Figura 3.9: Representación de la extrusión Bowden. [7]

Capítulo 4

Análisis crítico de la impresora

4.1. Detección de carencias

Tomando posición desde otro punto de vista más crítico con respecto a los aspectos mecánicos de la impresora, es posible analizar sus carencias con tal de establecer un plan de mejora. Es importante tener en cuenta que, pese a que una gran parte de los recursos de los que dispone la compañía se destina a la investigación de nuevos avances tecnológicos relacionados con el mundo de la impresión, el objetivo principal es satisfacer la demanda existente en el mercado de las impresoras de escritorio con tal de obtener ingresos y asegurar la vida de la compañía. Por ello, por cada recurso dedicado a la mejora de un aspecto, hay que tener en cuenta el balance que supone el coste de la investigación con los ingresos potenciales de dicha mejora, y la aceptación del mercado con respecto a ésta.

En esta sección se analizarán las carencias mecánicas de la máquina con respecto a la satisfacción del mercado para, posteriormente, establecer un plan de mejora para solventarlas.

4.1.1. Diámetro del filamento

Una de las principales carencias que presenta la impresora *BCN3D Sigma* es que sus elementos solamente están configurados para el trabajo con filamento de 3 mm de diámetro, dejando así sin cubrir una gran parte del mercado. Por tanto, resulta interesante para los objetivos de la empresa desarrollar la adaptación de los elementos a una configuración para trabajar con filamento de 1,75 mm de diámetro con tal de expandir su mercado de venta.

No existe una clara definición entre cuál de los dos estándares para el diámetro de filamento es mejor al uso, puesto que las variables que entran

en juego para definir un análisis teórico son muy difíciles de controlar y medir, además de no suponer diferencias claras de aspectos importantes como el rendimiento o el consumo de la máquina en general. Por ello, los diferentes resultados funcionales se vienen definiendo solamente por su contenido empírico, siendo solamente respaldado por la intuición lógica derivada de la experiencia con sistemas de fabricación, explicados a continuación:

Control del caudal de material

Una de las principales ventajas que aporta el uso de filamento de 1,75 mm de diámetro con respecto al de 3 mm es un mayor control del caudal depositado. Esto se debe a que para extruir el mismo volumen de material, se necesita una longitud lineal de filamento mayor, suponiendo esto el uso de una cantidad mayor de pasos que debe efectuar el motor que aporta un mayor control sobre el giro, y así sobre el caudal.

Degradación del material

Además, debido a que el filamento de 1,75 mm emplea menor tiempo en ser extruído en la parte de la boquilla, se produce una menor degradación derivada de la exposición a alta temperatura. Este aspecto es difícil de estudiar además de ser un aspecto poco relevante, puesto que a nivel práctico no se aprecia ninguna diferencia con respecto a la calidad de impresión con el uso de uno u otro diámetro.

Esfuerzos internos

Por otro lado, con el uso del filamento de 1,75 mm de diámetro, es necesaria una fuerza de empuje menor por parte del motor. Esto es debido a que para reducir el área del filamento hasta el diámetro de la boquilla –del orden de 0,4 mm–, se necesita un esfuerzo menor que el necesario para reducir a ese mismo diámetro el de 3 mm de diámetro.

Velocidad

Con respecto a la velocidad a la que el cabezal deposita el filamento sobre la cama, se consigue que sea mayor con el uso de filamento de 3 mm de diámetro. Esto se debe a que una mayor sección de filamento está expuesta al mismo tiempo a la temperatura, con lo que no es necesario esperar tanto tiempo –siempre hablando de pequeñas fracciones de segundo– a que el material alcance la temperatura de trabajo.

Resistencia a la flexión

Por último, debido a la amplia sección del filamento de diámetro de 3 mm, resulta una mayor resistencia a la flexión que con el uso de filamento de 1,75 mm. Esto contribuye a que la rotura por flexión del filamento sea menos arriesgada y, por tanto, se deriva un mayor abanico de materiales especiales –como el *WoodFill*, *BrassFill* o *CopperFill*–, que tienen unas características delicadas.

4.1.2. Sistema de tracción

Otro de los aspectos funcionales más importantes que certifican la calidad de una impresora es el correcto funcionamiento del sistema de tracción.

Por un lado, uno de los problemas más comunes es el exceso de fuerza ejercida por el engranaje reductor contra el rodamiento de presión, que provoca el impedimento de un avance regular del filamento, pudiendo llegar a quedar aprisionado y provocando el desgaste del filamento por la acción de las ruedas dentadas contra sus paredes. Por otro, puede darse el efecto contrario y que, debido a una presión insuficiente, el filamento no quede correctamente atrapado por las dos ruedas y no circule hacia el Hotend. En el peor de los casos, este problema puede dar lugar a una obturación de material fundido solidificado en el interior del conducto del Hotend y la boquilla, que precisaría el desmontaje y la limpieza de los mismos, requiriendo así una habilidad especial por parte del usuario.

Test en el banco de pruebas

Con tal de establecer un parametrizado sobre la calidad de la tracción ejercida por el sistema de extrusión actual, se ha preparado un test en un banco de pruebas. El banco de pruebas simula la construcción de un sistema de extrusión. Para la parametrización de la calidad de tracción se tomarán como datos la carga soportada –que se leerá mediante un dinamómetro– y la efectividad de la transmisión de la tracción por parte del motor. Para la comunicación con el extrusor, se usará la interfase PronterFace.

En una primera instancia, las pruebas se realizaron sin tener en cuenta la regulación del elemento Driver. Este componente electrónico es el encargado de transmitir las órdenes y la potencia al motor paso a paso con tal de asegurar su buen funcionamiento, y cuya regulación del límite de voltaje de trabajo permite modificar la potencia suministrada al motor. Al poco tiempo, fue evidente la importancia de esta regulación, ya que jugaba un papel importante con respecto a la tracción del filamento:

- Por un lado, es necesario calibrar el Driver de manera que transmita la suficiente potencia al motor –traducido en un mayor par–, con tal de conseguir sostener un valor de fuerza elevado, puesto que si tiene un par reducido, se perderá calidad de tracción porque el motor no será capaz de transmitir la fuerza.
- Por otro lado, si transmite un valor demasiado elevado de potencia, el motor será capaz de sostener la fuerza cuando ésta sea elevada, pero no será capaz de avanzar pasos al mismo ritmo que se ejecuta la orden –este fenómeno es conocido como pérdida de pasos– que derivará en un calentamiento del eje y a su vez un ablandamiento del filamento a su paso por el extrusor. Este hecho es crítico, ya que entonces el filamento se deformará a su paso por las ruedas dentadas y provocará una mala calidad de tracción, llegando a resbalar.

Por estos dos motivos, es necesario encontrar un valor de calibración del Driver que garantice un valor suficientemente elevado de potencia, pero que no influya en la temperatura del filamento.

El banco de pruebas está conformado por:

- Base de conglomerado para ejercer los agujeros pasantes necesarios para anclar los elementos.
- Dinamómetro: de donde se tomará la lectura de la fuerza resistida por el elemento traccionador del extrusor. Se usará el modelo Versa 77 del fabricante Proseale. [19]
- Muelle para transmitir el movimiento del filamento al dinamómetro. De esta manera se transmite la fuerza de forma más progresiva sin afectar a la lectura del dinamómetro.
- Utillaje diseñado para unir el muelle y el filamento sometido a la prueba. El filamento se presiona mediante un tornillo M10x35 mm.(Figura 4.1)

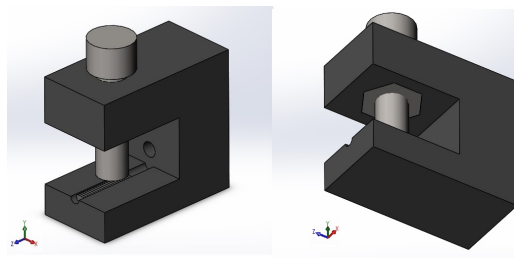


Figura 4.1: Diseño en CAM del utillaje entre el filamento y el dinamómetro

- Extrusor a realizar la prueba de tracción. Para anclarlo a la base se ha utilizado el propio *holder* que se incorpora en la impresora *Sigma*. En el caso de los extrusores que se someterán al mismo test en capítulos siguientes, se ha diseñado un utillaje exclusivo.
- Electrónica. Con tal de dar la potencia eléctrica al conjunto y establecer la comunicación entre la interfaz usada en el ordenador y las órdenes ejecutadas. Un elemento destacable es el Driver de potencia.

El montaje finalizado sigue el esquema de la Figura 4.2.

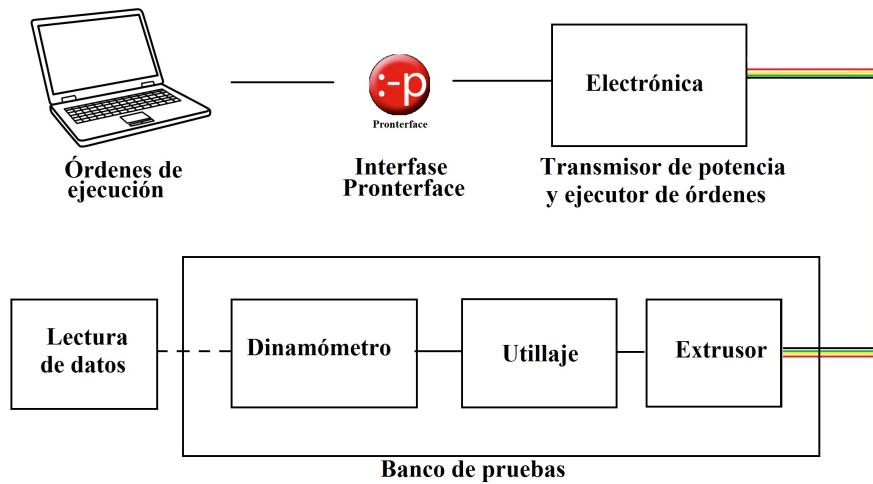
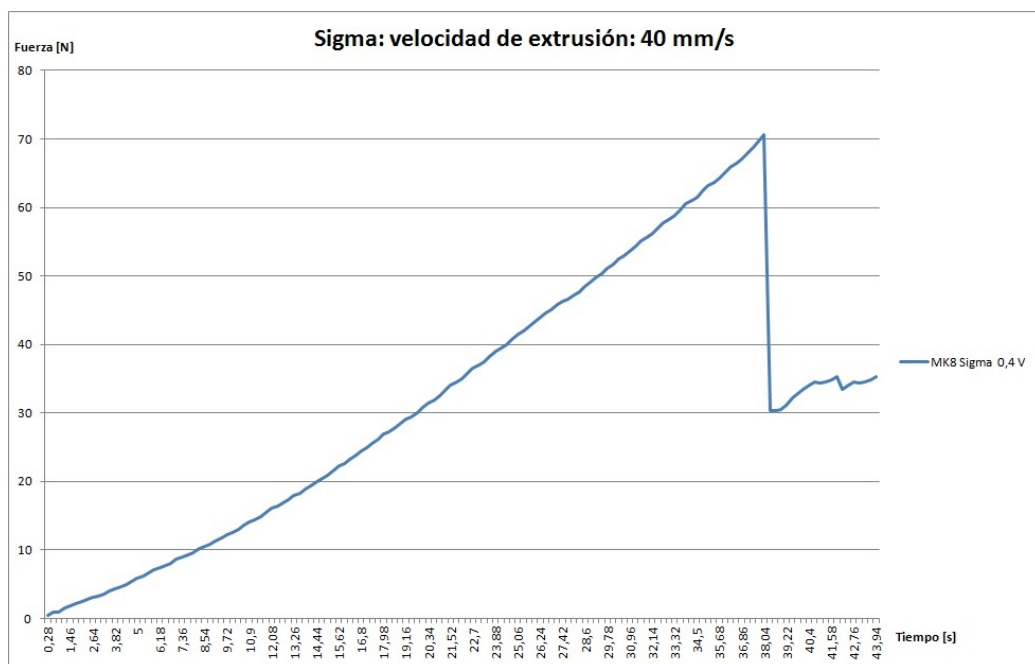


Figura 4.2: Esquema del montaje del banco de pruebas.

Teniendo en cuenta este aspecto, se realizará el test a una velocidad de tracción estándar de 40 mm/s, que es a la que trabaja el extrusor de la máquina *Sigma* en condiciones nominales. Asimismo, el valor óptimo de calibración del Driver es a una limitación de 0,4 V. Con esta configuración, se presenta una evolución representada en la Figura 4.3.

En el valor límite, el filamento acaba patinando sobre el sistema de tracción, indicando una mala calidad a valores medios de resistencia. La fuerza límite de presión que ejerce el sistema de tracción sobre el filamento ha acabado resultando de aproximadamente 70 N.



Capítulo 5

Propuestas de solución

5.1. Diámetro del filamento

Como se ha comentado en la sección anterior, es un aspecto de gran importancia la migración a filamento de diámetro de 1,75 mm con tal de ampliar el negocio y cubrir el mercado de las impresoras 3D. Por esta razón, queda dentro del marco de mejoras de la impresora 3D la adaptación de sus sistemas al uso de este nuevo diámetro.

Es importante asegurar el rendimiento adecuado de los elementos funcionales cuando se use filamento de diámetro 1,75 mm. Por ello, el extrusor y el Hotend –incluyendo en éste último todos sus componentes– deberán ser sustituidos o redimensionados para trabajar con esta configuración.

5.1.1. Adaptación del extrusor

Este componente es también motivo de estudio en la vía paralela que sigue este proyecto con respecto a la mejora del sistema de tracción. Por este motivo, cuando se trabaje sobre esa propuesta de mejora, se hará sobre un extrusor ya adaptado al filamento de 1,75 mm de diámetro.

5.1.2. Adaptación del Hotend

Este es el segundo componente más crítico que necesita ser redimensionado para trabajar de manera adecuada. Para lograrlo, es necesario modificar las dimensiones de los conductos, la disposición y dimensión de las aletas del disipador de calor y la configuración de los elementos electrotérmicos.

El proceso de diseño y estudio de un nuevo Hotend puede ser una tarea costosa en lo que a recursos de tiempo, personal y disposición de herramientas se refiere. Además, hay que asumir también el coste asociado a la producción

en serie de este elemento, obligando por otra parte a mantener dos líneas de fabricación en paralelo. Por esta razón, desde la empresa se ha querido trabajar por el momento con componentes Hotend disponibles en el mercado. De esta forma, primeramente se evalúa el grado de integración en el mercado de la mejora y el grado de satisfacción por parte de los usuarios, para posteriormente tomar una decisión y plantear el desarrollo de un Hotend de diseño propio.

La empresa por excelencia en el desarrollo de componentes para impresoras 3D de tecnología FFF, la inglesa *E3D*, ha obtenido buenas valoraciones por parte de la comunidad *RepRap* en cuanto a eficacia y versatilidad de sus productos. Así, se ha optado por obtener el Hotend para filamento de 1,75 mm de diámetro mediante la compra de este elemento a la empresa *E3D*, siendo este el modelo v6 HotEnd Full Kit - 1.75 mm Universal (24 V). (Figura 5.1). [20]



Figura 5.1: Hotend adquirido del fabricante *E3D*.

5.2. Sistema de tracción

Con tal de mejorar el sistema de tracción y cubrir esa demanda en el mercado, se deben estudiar las posibles vías por las que se puede solucionar este problema. Actualmente muchas compañías presentes en el mercado disponen de sus propios sistemas de tracción, dando lugar a una gran variedad de configuraciones para este elemento y que se definen como una mejora con respecto a la tracción *Direct Drive Gear* que monta la impresora *BCN3D Sigma*.

Uno de los sistemas más interesantes y que está teniendo una gran aceptación de las masas en el mercado por su sencillez y la notable mejora en los resultados con respecto a tracción del filamento, es el sistema *Double Drive Gear*. Esta propuesta incorpora un segundo engranaje acoplado al de tracción original, en el que el filamento es empujado por ambas ruedas por igual, evitando así los problemas existentes relacionados con la calibración de la fuerza del rodamiento de presión.

A continuación se evaluará el grado de mejora de dos sistemas de este tipo disponibles en el mercado con respecto al actual sistema *Direct Drive Gear*.

5.2.1. Sistema *Double Drive Gear* de *BQ*

Uno de los fabricantes de impresoras 3D FFF más reconocidos en el mercado europeo, *BQ* con su impresora-emblema *Hephestos*, ha logrado un gran éxito con la integración de este sistema de tracción en sus máquinas.

Con el objetivo de estudiar la eficacia de este sistema y la interpretación que ha realizado *BQ* para la adaptación a sus impresoras, se ha realizado la compra de este extrusor con tal de aplicar métodos de ingeniería inversa mediante su desmontaje (Figura 5.2). [21]

El extrusor cuenta con dos ejes de tracción, donde en cada uno de ellos se encuentran solidarias dos ruedas dentadas. La transmisión de la rotación del eje del motor se realiza mediante las ruedas dentadas inferiores, que mantienen el contacto en todo momento; por otro lado, las ruedas dentadas superiores son las encargadas de traccionar el filamento a través de la estructura del extrusor (Figura 5.3).

Uno de los ejes es el correspondiente al del motor paso a paso, mientras que el otro se encuentra sostenido por un elemento móvil (Figura 5.4) anclado a la estructura del extrusor y cuya calibración de la presión puede definir el usuario, que puede ajustar la distancia entre las ruedas que traccionan el filamento para que ejerza mayor o menor presión sobre él (Figura 5.5). Se puede apreciar la guía por donde circula el filamento, que se encuentra sin



Figura 5.2: Sistema *Double Drive Gear* desarrollado por *BQ*.



Figura 5.3: Detalle de las ruedas dentadas. [7]

paredes laterales para permitir el contacto necesario con las ruedas dentadas.

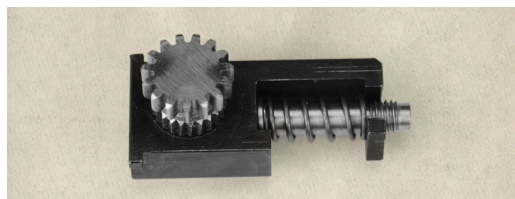


Figura 5.4: Detalle de la pieza móvil para el ajuste del segundo eje. [7]

Para disponer de datos evaluables con tal de parametrizar los aspectos de mejora, se ha sometido el sistema al mismo banco de pruebas al que se probó el sistema propio de la impresora *BCN3D Sigma*.

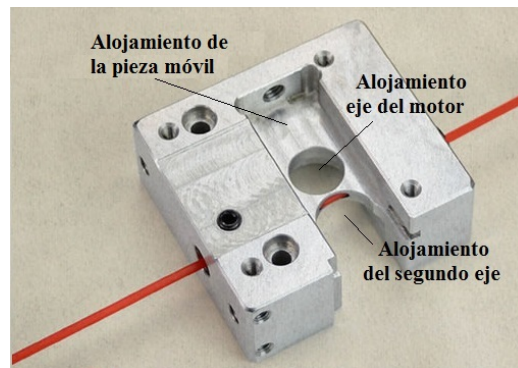


Figura 5.5: Detalle del bloque del extrusor sin los componentes.

Test en el banco de pruebas

Siguiendo con las directrices marcadas en el test del extrusor de la impresora *BCN3D Sigma* con el filamento de 3 mm de diámetro, se realizarán las pruebas teniendo en cuenta la calibración del voltaje del elemento Driver y definiendo dos velocidades del extrusor estándar para la impresora: de 40 mm/s y 50 mm/s.

El motor paso a paso solamente ha podido arrancar con una calibración del elemento Driver de 0,5 V y 0,6 V. Para otras regulaciones, la potencia transmitida era demasiado leve o demasiado elevada, dando lugar en esta última a un sobrecalentamiento de este elemento. Ejecutando las pruebas, se han obtenido los valores representados en la Figura 5.6 y la Figura 5.7:

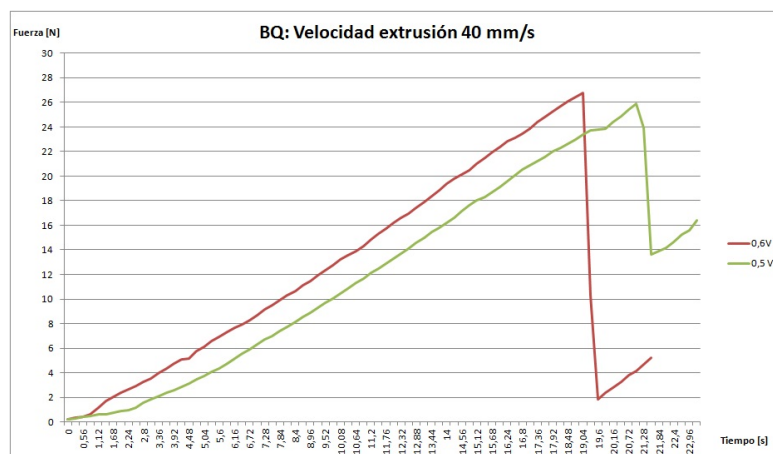


Figura 5.6: Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de BQ hasta su cese a una velocidad de extrusión de 40 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.

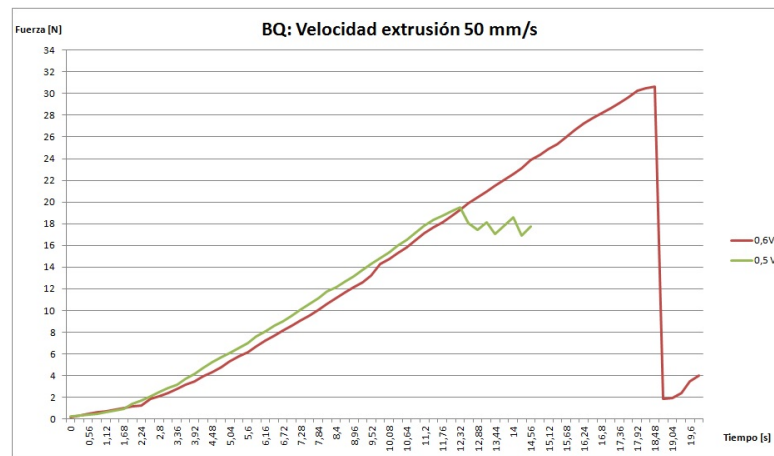


Figura 5.7: Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de BQ hasta su cese a una velocidad de extrusión de 50 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.

5.2.2. Sistema *Double Drive Gear* de *BondTech*

Otra de las adaptaciones del sistema *Double Drive Gear* que ha logrado una gran aceptación en la comunidad *RepRap* es la que ha desarrollado la empresa sueca *BondTech*, dedicada a la comercialización de piezas de recambio para impresoras 3D (Figura 5.8). [22]

El concepto desarrollado sigue los mismos patrones que el sistema de *BQ*, con el uso de una pieza móvil que ejerce de soporte del segundo eje y cuya presión sobre el filamento es regulable por el usuario. Esta vez, la pieza móvil que sustenta el segundo engranaje de tracción rota sobre un eje para ajustar la distancia sobre el eje del motor (Figura 5.9).

Test en el banco de pruebas

De nuevo, con tal de evaluar el grado de mejora introducida con este extrusor, se ha sometido el sistema al banco de pruebas. De nuevo, se han efectuado pruebas para velocidades de extrusión estándar de 40 mm/s y 50 mm/s. Este motor ha admitido unas regulaciones del elemento Driver más diversas, siendo éstas de 0,4 V a 0,7 V.

Los resultados que se han obtenido para las pruebas son los mostrados en la Figura 5.10 y la Figura 5.11:



Figura 5.8: Sistema *Double Drive Gear* desarrollado por *BondTech*.

5.2.3. Comparación de resultados

Extrusor *BQ* y *BondTech*

Como se puede observar en la Figura 5.12 y la Figura 5.13, los resultados obtenidos con el extrusor fabricado por *BondTech* superan con creces los obtenidos con el extrusor fabricado por *BQ*. Además, admite una regulación más variada de potencia, permitiendo una fácil adaptación a las necesidades del usuario.

Durante las pruebas, no solamente se ha observado una mayor tracción –reflejado en unos valores de fuerza mayores–, si no que además el control del flujo de filamento ha sido más regular –reflejado en una tendencia más lineal en todas las potencias–.

Es importante comentar que la regulación óptima de potencia es la conseguida con una limitación de voltaje de 0,5 V en el Driver. Esta regulación presenta un valor límite de fuerza menor a las regulaciones de 0,6 V y 0,7 V, pero en cambio, como se puede observar en la gráfica obtenida para la velocidad de extrusión de 50 mm/s (Figura 5.11), presenta una caída de fuerza mucho más tenue en el momento de cese de continuidad de tracción del



Figura 5.9: Detalle del sistema de acople del segundo engranaje de tracción del extrusor *Double Drive Gear* desarrollado por *BondTech*.

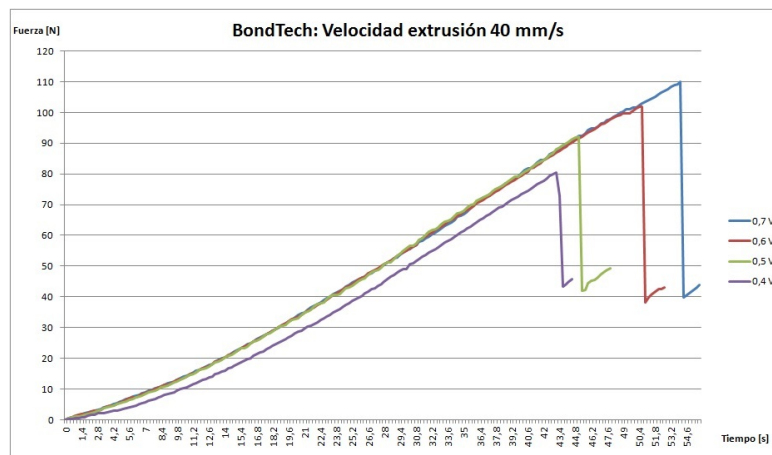


Figura 5.10: Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de BondTech hasta su cese a una velocidad de extrusión de 40 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.

filamento. Esto es interesante a la hora de trasladarlo a las condiciones de impresión, ya que puede ser más útil garantizar que en caso de resbalamiento no sea de una magnitud tan grande para no interferir en el flujo de filamento,

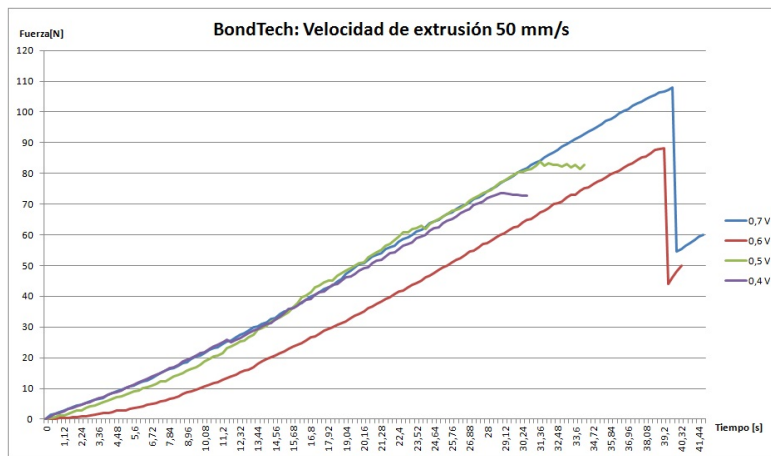


Figura 5.11: Evolución de la fuerza soportada por el extrusor de *BondTech* hasta su cese a una velocidad de extrusión de 50 mm/s para diferentes regulaciones de voltaje.

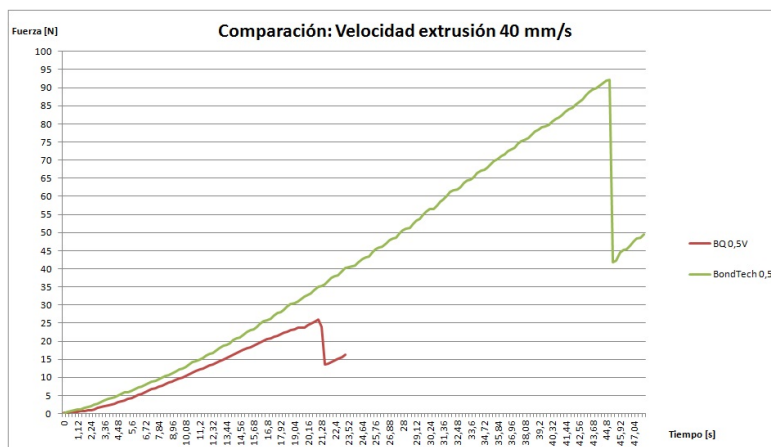


Figura 5.12: Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 40 mm/s.

antes que garantizar que el extrusor soporte valores de fuerza elevados.

Por otro lado, para el extrusor BQ, se ha escogido la regulación de 0,5 V por los mismos motivos: una caída de fuerza de menor magnitud en el momento de falla, pese a cumplir con unos valores de soporte de fuerza menores que con la regulación de 0,6 V.

Con estos resultados, se puede determinar que de entre los dos extrusores valorados, el fabricado por *BondTech* es el que mejores resultados obtiene con respecto a la tracción.

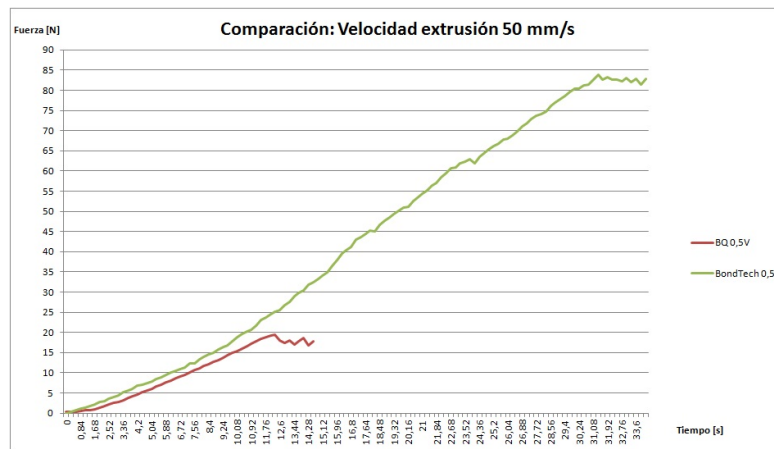


Figura 5.13: Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 50 mm/s.

Extrusor *BondTech* y extrusor *BCN3D Sigma*

Una vez escogido el extrusor fabricado por *BondTech*, es importante determinar si la mejora de la tracción se hace patente con la inclusión de este extrusor frente al que monta actualmente la impresora de estudio *BCN3D Sigma*, de sistema *Direct Drive Gear*.

Usando los mismos resultados obtenidos en ambos casos en el test de pruebas, se obtiene la comparativa mostrado en la Figura 5.14

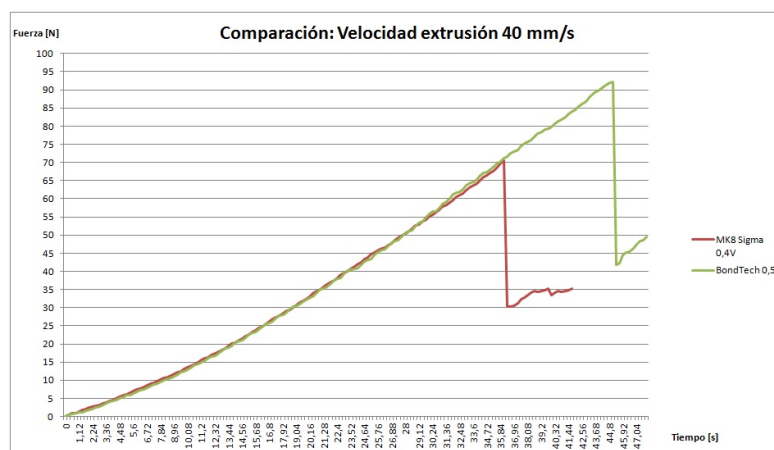


Figura 5.14: Comparación de las fuerzas soportadas por los extrusores con la regulación de potencia más adecuada para una velocidad de 40 mm/s.

Se puede determinar que el extrusor fabricado por *BondTech* se ajusta mejor a la necesidades que se objetan en este trabajo, consiguiendo unos

valores de tracción mejores que los obtenidos con el otro extrusor. Por tanto, se trabajará la integración de éste en la máquina *Sigma*.

Capítulo 6

Implementación de las soluciones propuestas

Es necesario ahora adaptar las soluciones propuestas al entorno de la máquina. En este aspecto, es importante asegurarse de realizar la implementación con el mínimo impacto económico posible en el proceso de fabricación de la máquina, es decir, que las soluciones deben quedar integradas en la máquina de manera que se obligue a modificar lo menos posible los demás elementos, como los estructurales o la configuración del software.

6.1. Itegración del Hotend de 1,75 mm de diámetro

Por un lado, uno de los elementos que requieren la integración en la máquina es la del Hotend de diámetro de 1,75 mm. Como ya se ha comentado, se tratará de aprovechar los mismos componentes que ya usa la máquina.

Con tal de no cambiar ni tan si quiera la configuración del software para el calibrado de posicionamiento de la boquilla, se mantendrá el nuevo Hotend –de largada más corta que el nativo de la impresora Sigma– a la misma altura con respecto la cama que la que mantiene la Sigma. Mediante el uso del programa de CAD *SolidWorks* de *Dassault Systems*, se ha trabajado el diseño de esta integración.

Primeramente, con tal de ajustar la calibración de la distancia, se ha optado por utilizar una boquilla con las mismas dimensiones que la que monta la *BCN3D Sigma*, pero adaptada a las características del diámetro de 1,75 mm. Además, se utilizará también el mismo *Hotblock* que la de la máquina *Sigma*. El resultado es el mostrado a continuación en la figura siguiente (Figura 6.1).

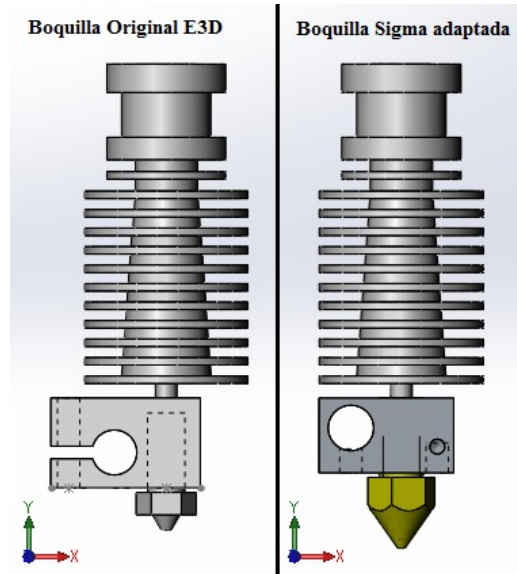


Figura 6.1: Comparación entre la construcción con la boquilla original del Hotend E3D y la boquilla de la máquina *Sigma* adaptada al diámetro de 1,75 mm.

Por otro lado, para anclar el Hotend E3D a la carcasa original (Figura 6.2), ha sido necesario el diseño y fabricación de un utillaje adaptador. Este utillaje debe ser fácilmente montable y desmontable para permitir al usuario una flexibilidad a la hora de combinar impresiones de filamento 1,75 mm y 3 mm de diámetro. El diseño final es el que se muestra en las figuras siguientes (Figura 6.3 y Figura 6.4).

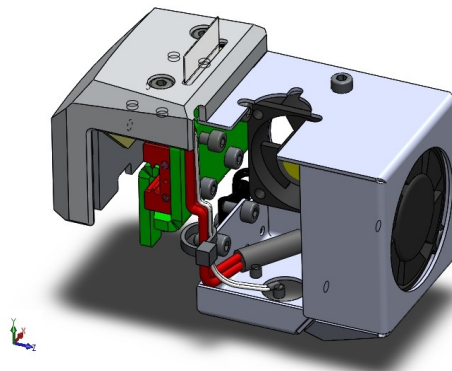


Figura 6.2: Carcasa del Hotend.

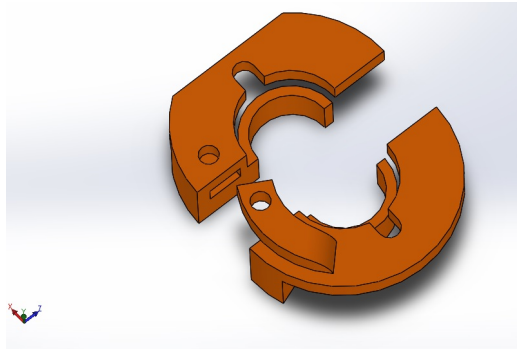


Figura 6.3: Vista explosionada del utillaje de sujeción del Hotend a la carcasa.

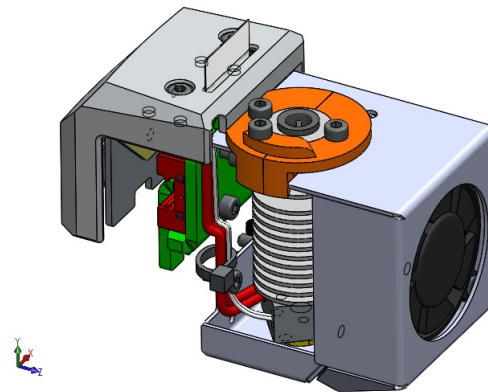


Figura 6.4: Integración del Hotend de E3D a la carcasa mediante el utillaje.

6.2. Integración del extrusor *BondTech*

El otro elemento a integrar fruto de la mejora de tracción es el extrusor *BondTech*. Para la integración de este elemento solamente ha sido necesario modificar la pieza metálica que sirve como anclaje entre el extrusor y el fondo de la máquina. Se trata de una chapa de aluminio de 3 mm de grosor troquelada y doblada. En este aspecto no se cambiará el material ni el proceso de elaboración, para mantener una estandarización y flexibilidad del proceso actual frente a las nuevas soluciones propuestas. Sin embargo, para trabajar la integración de este elemento, primeramente se elaborará un prototipo de PLA mediante impresión 3D.

De nuevo, con tal de evitar la realización de nuevos agujeros al fondo o modificaciones que puedan requerir complicaciones a la hora de sustituir el extrusor original al nuevo, se han aprovechado los agujeros ya hechos en el metal para la sujeción del extrusor de la *Sigma*. Como resultado, la nueva

sujeción tiene el aspecto mostrado en la Figura 6.5.

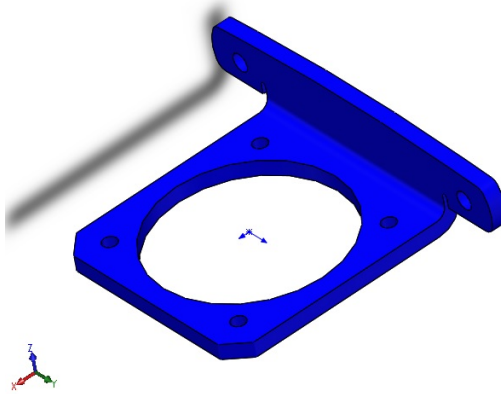


Figura 6.5: Anclaje motor paso a paso - fondo de la máquina.

Por último, el extrusor completo queda configurado tal y como se muestra en la Figura 6.6.

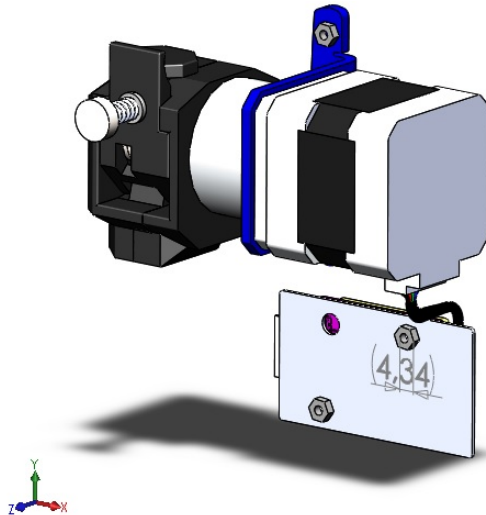


Figura 6.6: Extrusor completo *BondTech* adaptado a la máquina *Sigma*.

6.3. Montaje de las soluciones

Una vez fabricados los componentes necesarios, por último queda integrarlos físicamente en la máquina. En el programa de CAD *SolidWorks* se

puede apreciar el resultado final, mostrado en la Figura 6.7.

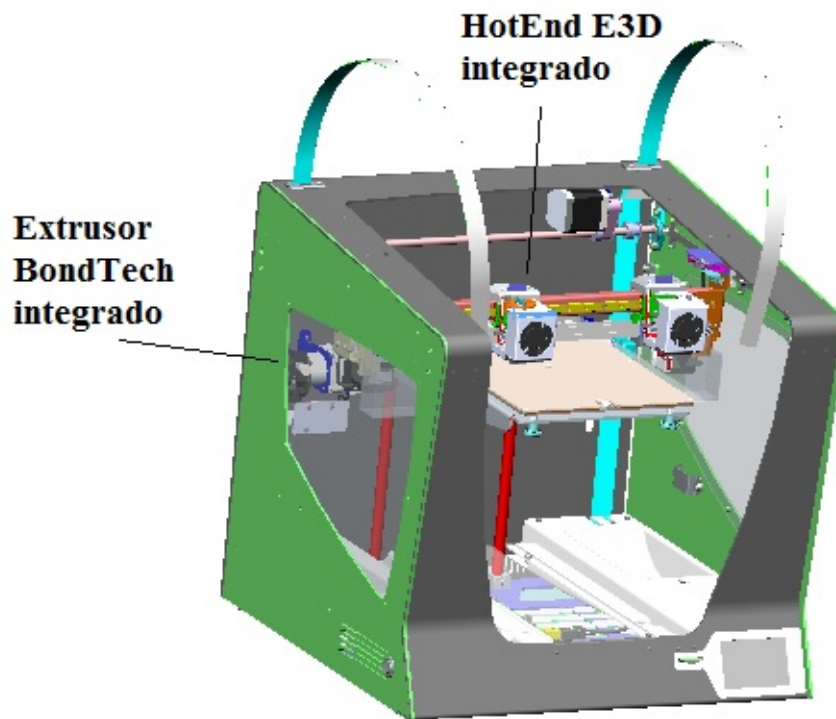


Figura 6.7: Resultado de la integración de los elementos en la máquina *Sigma*.

Capítulo 7

Estudio económico

Una vez definidos los componentes que integrarán el nuevo cuerpo de la impresora *BCN3D Sigma*, adaptándola al filamento de 1,75 mm de diámetro y mejorando su sistema de extrusión, el objetivo es poder darle salida al mercado para generar el máximo beneficio para la entidad *BCN3D Technologies*.

Una de las estrategias comerciales que suelen dar mejores resultados es la que da la opción a los usuarios poseedores de una máquina *Sigma* de adquirir un kit de mejora con los nuevos componentes. Como éstos han sido diseñados para modificar lo menos posible el resto de partes de la máquina, esta opción cobra aun más sentido, debido a que permite instalar las mejoras de manera sencilla y la integración sobre la máquina es perfecta. Esta es la vía que ha optado escoger la dirección de la entidad. Queda en manos del estudio realizado en este proyecto de qué manera se configurará este kit.

7.1. Costes de obtención y fabricación de las mejoras

Con tal de escoger la estrategia con la que se maximizará el beneficio, primero es necesario conocer los costes asociados a la obtención y fabricación de los componentes que darán lugar a la mejora de prestaciones de la máquina, listados en el Cuadro 7.1. Para el cálculo del coste de los productos que se obtienen mediante fabricación propia se han incluido los costes asociados a la obtención de materia prima, la mano de obra y el uso de las instalaciones.

Extrusor

Fabricante	Modelo	Precio ud. (€)
<i>BondTech</i>	QR 1,75 Universal	79,52
	Subtotal:	79,52

HotEnd

Fabricante	Modelo	Precio ud. (€)
<i>E3D</i>	v6 HotEnd Full Kit - 1.75 mm Universal (24 V)	39,48
	Subtotal:	39,48

Fabricación de componentes

Componente	Material	Precio fab. (€)
Boquilla 1,75 mm	Latón	3,04
<i>Extruder-Stepper Holder</i>	Plancha aluminio 3 mm	2,67
Utillaje HotEnd-Carcasa	PLA+ material soporte	3,58
	Subtotal:	9,29

Otros componentes

Componente	Modelo	Precio ud. (€)
Tubo de PTFE (800 mm)	<i>Axon-Cable</i> GSTD/30 M 2mm Ø - 4mm Ø	2,4 (3€/ m)
Tornillería	2 uds. DIN912 M3x8 mm	0,05
Hembra	1 ud. DIN934 M3	0,01
Caja de cartón	N/D	1,78
	Subtotal:	4,24
	Total:	132,53

Cuadro 7.1: Coste de obtención y fabricación de los componentes que integran las mejoras.

Mercado	Distrib. ventas	Unidades vendidas	Previsión uds. venta	Total mercado
EEUU	40 %	400	1.200	1.600
Resto	60 %	600	1.800	2.400
	Total:	1.000	3.000	4.000

Cuadro 7.2: Distribución y previsión de máquinas impresoras vendidas según mercado.

7.2. Previsión de consumo, estrategia comercial y beneficios





















Este coste de 132,53€ es el coste asociado a la elaboración del kit completo para la migración a diámetro 1,75 mm y la mejora de extrusión. En esta fase del proyecto, y puesto que el precio de venta aumentará considerablemente con tal de lograr beneficios económicos notables, es momento de estudiar la estrategia comercial en función de la previsión de consumo en un futuro y la aceptación de las mejoras.

Como se ha comentado en secciones anteriores, el mercado de las impresoras 3D de escritorio se encuentra dividido en dos partes. Podemos encontrar el mercado estadounidense, cuya preferencia es el uso de filamento de 1,75 mm de diámetro; mientras que en el resto del mundo no existe una diferencia claramente definida, aunque es más común el uso de filamento de diámetro de 3 mm. En relación a la mejora de extrusión, solamente los usuarios que hayan experimentado con la máquina y precisen una mejora en sus sistemas de tracción serán los interesados en esta solución. Con esta información, es posible elaborar un estudio de negocio valorando la previsión de ventas de máquinas impresoras y de aceptación de cada una de las vías de mejora.

Actualmente existen alrededor de 1.000 unidades de impresoras del modelo *BCN3D Sigma* vendidas en el mundo, de las cuales el 40 % se encuentran en Estados Unidos y el resto, un 60 %, en el resto del mundo, según datos proporcionados por la entidad *BCN3D Technologies* (Cuadro 7.2). En los próximos años hasta el fin de venta de este modelo, se tiene la previsión de triplicar este número, en base a la demanda y buena acogida que está sufriendo esta impresora, tal y como recoge la página web de referencia *3dhubs.com* (Figura 7.1). [8]

Y en cuanto a la aceptación de las dos vías de mejora, se puede realizar el estudio del Cuadro 7.3.

Con estos datos, parece ser una opción interesante sacar al mercado dos

Abril 2016 Desktop Printers					Mayo 2016 Desktop Printers				
Printer Model	# Reviews	Technology	Print Quality Rating	Example	Printer Model	# Reviews	Technology	Print Quality Rating	Example
1  BCN3D SIGMA	103	FDM	★★★★★ 4.89		1  BCN3D SIGMA	129	FDM	★★★★★ 4.89	
2  Form 2	147	SLA + DLP	★★★★★ 4.81		2  Form 2	239	SLA	★★★★★ 4.83	
3  PowerSpec 3D Pro	210	FDM	★★★★★ 4.79		3  PowerSpec 3D Pro	220	FDM	★★★★★ 4.78	
4  CEL Robox	347	FDM	★★★★★ 4.78		4  Zortrax M200	1583	FDM	★★★★★ 4.78	
5  Zortrax M200	1440	FDM	★★★★★ 4.78		5  QBD Bot Hadron	181	FDM	★★★★★ 4.77	





















Junio 2016 Desktop Printers					Julio 2016 Desktop Printers				
Printer Model	# Reviews	Technology	Print Quality Rating	Example	Printer Model	# Reviews	Technology	Print Quality Rating	Example
1  BCN3D SIGMA	166	FDM	★★★★★ 4.87		1  BCN3D SIGMA	200	FDM	★★★★★ 4.9	
2  Form 2	369	SLA	★★★★★ 4.83		2  Form 2	531	SLA + DLP	★★★★★ 4.8	
3  PowerSpec 3D Pro	235	FDM	★★★★★ 4.79		3  PowerSpec 3D Pro	251	FDM	★★★★★ 4.8	
4  QBD Bot Hadron	230	FDM	★★★★★ 4.77		4  Rostock MAX V2	124	FDM	★★★★★ 4.8	
5  Cubicon Single	115	FDM	★★★★★ 4.77		5  QBD Bot Hadron	242	FDM	★★★★★ 4.8	

Figura 7.1: Histórico de ranking de valoración de la calidad de impresión de abril 2016 a julio 2016. [8]

Mejora	Mercado	Grado de aceptación	Uds. según aceptación
Migración a 1,75mm	EEUU	15 %	240
	Resto	5 %	120
Mejora tracción	EEUU	10 %	160
	Resto	10 %	240

Cuadro 7.3: Previsión del grado de aceptación de las vías de mejora según mercado.

tipos de kits de mejora. Uno de ellos contendrá ambas soluciones: la migración a diámetro de filamento 1,75 mm y la mejora de tracción; mientras que el otro kit contendrá solamente la mejora de tracción con la integración del extrusor fabricado por *BondTech* adaptado a diámetro de 3 mm, manteniendo la configuración actual. Este extrusor tiene el mismo coste que el estudiado en este proyecto de 79,52 €.

De esta manera se consigue que aquellos usuarios que acepten la migración a 1,75 mm, y que se posiciona como la alternativa de mayor grado de aceptación, pasen por adquirir también la mejora de tracción. Así, y puesto que este kit tendrá un precio más elevado, el beneficio a la empresa es mayor. Cabe decir que este grado de aceptación del 15 % puede verse modificado por el hecho de incluir además la mejora de tracción y su consecuente precio

Kit	Coste prod. (€)	Precio de venta (€)
Migración + Tracción	132,53	249,00
Tracción	83,97	159,00

Cuadro 7.4: Tabla de precios de ambos kits.

elevado, pero por el momento se mantendrá esta hipótesis. Por otro lado, para aquellos usuarios solo interesados en la mejora de tracción, se consigue mantener el valor del 10 % de grado de aceptación, salvando así la parte del mercado que no está interesada en la migración. De nuevo, este valor puede verse alterado, ya que se puede descartar de la estadística aquellos usuarios que ya hayan adquirido el kit de migración a 1,75 mm y mejora de tracción, pero de nuevo, podemos considerar esta hipótesis como válida.

Es el momento de pactar un precio de salida al mercado para ambos kits. La dirección de la entidad ha decidido establecer un precio de venta aproximadamente el doble del coste de elaboración. Por este motivo, se selecciona un precio de venta de 249,00€ para el kit de mejora completo y de 159,00€ para el kit de mejora de tracción (Cuadro 7.4). Con tal de calcular ahora el beneficio económico fruto de esta estrategia, primero hay que considerar los canales de distribución presentes para hacer llegar las mejoras a los usuarios. En este sentido y por la experiencia obtenida durante los últimos años, sabemos que el 100 % de los productos vendidos en EEUU se realizarán mediante un distribuidor comercial, que goza de un descuento del 70 % del precio oficial de venta del producto. Sin embargo, para el resto del mercado, la proporción se distribuye de manera equitativa a 50 % mediante distribuidor y 50 % mediante la propia entidad *BCN3D Technologies*. En el Cuadro 7.5 se muestra el estudio y los resultados del beneficio económico.

Así pues, con esta primera aproximación de lo que se convertirán en ventas, se espera un beneficio económico de 37.474,98 € para el seno de la compañía. Cabe destacar la ausencia de mano de obra para la instalación de cada uno de los kits, ya que esta viene dada por el usuario que recibe el producto. Aun así, sí que es cierto que se requiere un trabajo de empaquetamiento y embalaje que, debido a que por el momento y hasta que haya una previsión de pedidos de mayor volumen se mantendrá una relación de preparación bajo demanda – i.e. sin stockaje –, se incluirá en la línea de embalaje ya existente en la compañía para otros productos, resultando la carga de trabajo de dimensiones reducidas y por tanto, el coste despreciable.

Kit migración + tracción

Tipo de venta	Uds. venta	Precio venta ud. (€)	Ganancia
Normal	60	249,00	14.940,00
Distribuidor	300	178,63	53.589,78
Ganancias totales:			68.529,78
Coste:			47.710,80
Beneficio:			20.818,98

Kit tracción

Tipo de venta	Uds. venta	Precio venta ud. (€)	Ganancia
Normal	120	159,00	19.080,00
Distribuidor	280	111,30	31.164,00
Ganancias totales:			50.244,00
Coste:			33.588,00
Beneficio:			16.656,00

Total Beneficio:	37.474,98 €
-------------------------	--------------------

Cuadro 7.5: Estudio y resultados del beneficio económico .

Capítulo 8

Estudio del impacto ambiental y social

Por lo que respecta al impacto ambiental y social, el estudio puede definirse por dos vías:

- Estudio del impacto asociado al uso de la tecnología de impresión 3D FDM/FFF.
- Estudio del impacto asociado a la elaboración de las soluciones propuestas.

8.1. Impacto asociado al uso de la tecnología de impresión 3D

En los últimos años se ha hecho patente una clara tendencia de la sociedad a disminuir el impacto ambiental de las actividades humanas. Siguiendo esta línea se encuentra el uso moderno de la tecnología de impresión 3D, que busca postularse como una alternativa respetuosa con el medio ambiente en la fabricación de productos.

Es por tanto un objetivo integrado en el uso de esta tecnología la disminución tanto del gasto energético como de la generación de residuos. Esta disminución no viene solamente asociada al origen y reciclabilidad de los materiales de los que se componen las máquinas y los que emplea para la fabricación de productos, sino que también presenta un menor índice de impacto frente a otras tecnologías de fabricación.

El material usado por estas máquinas para la fabricación de productos, que comúnmente se trata de PLA o ABS de origen plástico, es un material biodegradable y reutilizable (al tratarse de materiales termoplásticos), con

lo que la generación de residuos es mínima. Es por ello que si bien es cierto que en la mayoría de los casos para conseguir el producto final se desechan muchos productos fruto de pruebas fallidas, estos pueden ser recuperables y en consecuencia el impacto se minimiza. Así, el único desecho asociado a los materiales usados es cuando es necesario material de apoyo para geometrías en voladizo.

Por otro lado, por lo que respecta al consumo energético, sí que presenta un rendimiento que puede llegar a ser mejorable. Actualmente la energía es de origen eléctrico, y se usa en su mayoría para producir energía térmica empleada para la fusión del material plástico. En este aspecto, una gran parte de esta energía es desaprovechada, y los 300W de potencia media que usa una impresora de escritorio representa un consumo energético importante. Pese a ello, sigue siendo una gran disminución frente a otras tecnologías de mayor consumo –siempre hablando en producciones de series cortas–, como puede ser el uso de una máquina-herramienta CNC.

Además, se trata de una tecnología limpia que, al parecer, no emite gases ni partículas contaminantes al ambiente. Sin embargo, están saliendo a la luz nuevos estudios, como el llevado a cabo por el Instituto Tecnológico de Illinois, en Chicago que, según cita el profesor Brent Stephens [23], se produce una emisión de hasta 20 mil millones de partículas ultrafinas por minuto en el caso del PLA y de hasta 200 mil millones en el caso del ABS, que pueden depositarse en los pulmones y el torrente sanguíneo, planteando así riesgos para la salud.

Por último, es destacable mencionar la reducción de emisiones relacionadas con el transporte de productos de la industria a las superficies comerciales, ya que tal y como parece estar evolucionando esta tecnología, la fabricación de productos se produce a escala doméstica.

8.2. Impacto asociado a la implementación y distribución de las soluciones propuestas

Por lo que respecta a este apartado, el impacto ambiental de las actividades relacionadas con la elaboración y distribución de las soluciones propuestas puede beber de diferentes fuentes.

Una de las actividades que se espera generará más impacto negativo sobre el medio ambiente es la que viene relacionada con el transporte de los productos. Este aspecto afectará tanto a los productos elaborados que se reciben en la compañía –como el extrusor, el Hotend y hasta las bobinas de filamento adquiridos–, como a los productos finales. En este sentido, es necesario siem-

pre un medio de transporte para lograr la distribución de estos materiales a los clientes, acarreado así gastos energéticos y emisión de polución.

El consumo total de filamento de material PLA para la elaboración de la sujeción para el kit que contiene la migración a filamento 1,75 mm es de 4 gramos, correspondiente a 0,47 m de filamento de 3 mm (el usado para la impresión de este elemento). Para la construcción de este elemento, es necesario un trabajo de la máquina de 19 minutos, que conlleva un consumo energético de 342 kJ según las prestaciones de la máquina. Extrapolando este cálculo a la producción de la previsión de venta de todas las unidades del kit que incluye la migración a diámetro 1,75 mm, con un total de 360, supone un consumo de plástico PLA de 115,3 kg –o el equivalente a 115 bobinas de filamento– y un consumo energético de 123,12 MJ.

Por último, es mencionable además el consumo energético derivado de la fabricación del *Extruder-Stepper Holder*, elaborado mediante una máquina CNC. Sin embargo, en este proyecto no se ha llegado a trabajar con este tipo de máquina para poder determinar así los tiempos de puesta en marcha, funcionamiento y la generación de residuos fruto del trabajo mecánico.

Capítulo 9

Estudio económico e impacto ambiental del presente proyecto

Analizando por último las actividades asociadas a la elaboración del presente proyecto, se estudiará el aspecto económico y el impacto ambiental.

9.1. Estudio económico

Desde el inicio del proyecto hasta su conclusión se ha computado un trabajo efectivo de 325 horas. A razón de un coste de 8€/h, el coste total en concepto de mano de obra resulta de 2600€.

Por otro lado, para la realización de los test en el banco de pruebas para el estudio del sistema de tracción, se desarrollaron varios prototipos, impresos mediante la impresora *BCN3D Sigma*, dando lugar a pérdidas económicas en concepto de residuos plásticos y consumo eléctrico, y que finalmente en su mayoría no fueron de utilidad. Además, también se realizó la compra del dinamómetro modelo Versa 77 y se consumió energía eléctrica para el funcionamiento de la electrónica del banco de pruebas. Los otros demás componentes del banco de pruebas, como por ejemplo elementos de tornillería, el muelle o la tabla de DM que sirve como base son elementos reciclados. Todos los costes vienen especificados en el Cuadro 9.1.

9.2. Impacto medioambiental

Fruto de estas mismas actividades, se han producido residuos de material plástico y consumos energéticos. Estos residuos, sin embargo y como ya se ha comentado, resultan ser reciclables debido al origen termoplástico del material. El cómputo total de residuos se especifica en el Cuadro 9.2.

Costes derivados de la impresión

Uds.	Componente	Metros de filamento (m)	Tiempo de impresión	Precio (€)
1	Anclaje <i>BondTech</i>	4,28	2h25min	5,14
1	Anclaje <i>BQ</i>	4,42	2h31min	5,38
1	Anclaje motores	7,86	4h25min	8,87
1	Sujeción filamento	4,38	2h31min	4,94
-	Filamento crudo	1	-	0,09
Subtotal:				24,42

Costes de compra

Uds.	Componente	Modelo	Precio (€)
1	Dinamómetro	Proseale Versa 77	32,00
2	Baterías 1,5 V	Duracell AA	1,29
Subtotal:			33,29
Total:			57,71

Cuadro 9.1: Tabla de costes derivados de las actividades para el desarrollo del proyecto.

Uds.	Componente	Gramos de filamento
1	Anclaje <i>BondTech</i>	34,86
1	Anclaje <i>BQ</i>	36,00
1	Anclaje motores	64,00
1	Sujeción filamento	36,00
-	Filamento crudo	8,14
Total:		143

Cuadro 9.2: Tabla del total de residuos plásticos generados.

Capítulo 10

Conclusiones

La tecnología de impresión 3D evoluciona día tras día gracias al esfuerzo de la comunidad con tal de sacar el máximo partido a los beneficios que ofrece. Tras el estudio de este proyecto y la inmersión en este mundo de la impresión tridimensional, se ha hecho patente este esfuerzo, pudiendo observar, analizar y formar parte del tejido social que se ha formado entorno a ella.

En el grueso del proyecto se ha estudiado la impresora desarrollada por *BCN3D Technologies*, la *BCN3D Sigma*, detectando las carencias que la dirección de la entidad enumeraba como premisa al estudio. De esta forma, se ha llegado a la consecución de los objetivos, logrando sacar a la luz dos vías de mejora que harán obtener beneficios tanto a la entidad como a la comunidad *RepRap*, mejorando la calidad de las impresiones y manteniendo así el progreso de la técnica y de la tecnología. Además, se ha definido la estrategia comercial de estos productos con tal de maximizar el beneficio económico de la entidad y ayudar a la prolongación de su vida.

Si bien es cierto que quedan muchos aspectos susceptibles de mejora en otros aspectos que juegan un papel fundamental en este tipo de impresoras y lejos del alcance de este proyecto, como lo son el control mediante la electrónica, el estudio de nuevos materiales, la mejora de las propiedades mecánicas de los productos elaborados o la gestión de residuos y mejora de rendimiento energético, dejamos la puerta abierta a nuevos estudios que hagan seguir creciendo esta tecnología. Quién sabe si la humanidad está topando con una invención que cambie la manera de trabajar en muchos de los aspectos que esta tecnología puede aportar beneficios, como ya empieza a vislumbrarse en campos como la medicina –con respecto a la fabricación de prótesis y reconstrucción de tejido–, la construcción o la industria textil. Un servidor, personalmente, espera y desea que las impresoras 3D jueguen este papel clave en la sociedad para ayudar a desarrollar así un futuro en el que los intereses que nos mueven se centren en las personas.

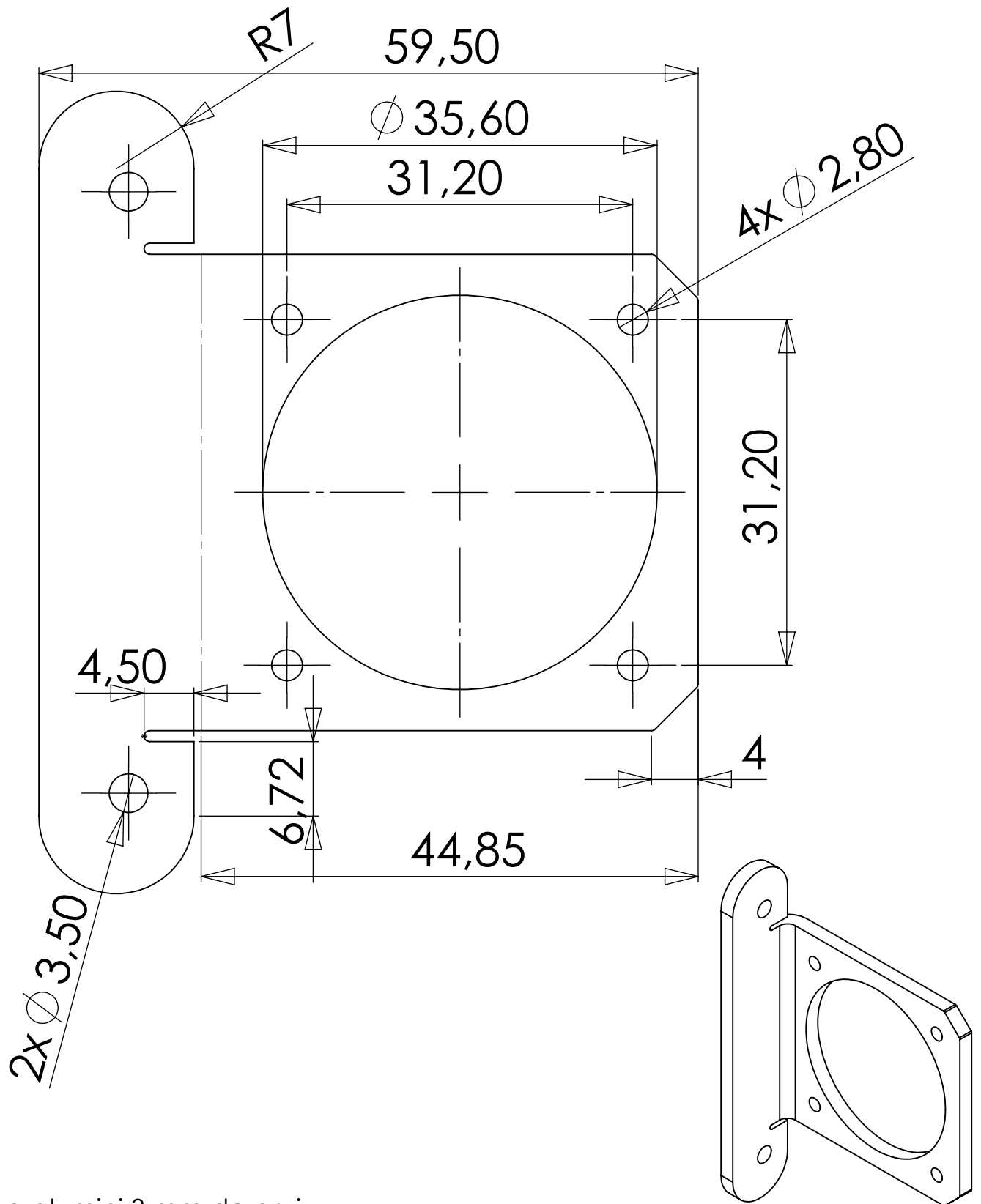
Bibliografía

- [1] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2010.
- [2] R. Infante Martín, “Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido.” 2012.
- [3] 3dsmart, “Disipador Hotend All-Metal,” 2016.
- [4] 3DBranches, “Boquilla garganta M6x26 para 1,75mm filamento,” 2016.
- [5] Ultimaker Inc., “Bloque calentador de aluminio,” 2016.
- [6] Bigwidelogic, “How to clean out clogged makerbot and other 3D Printer nozzles,” 2016.
- [7] J. Rodríguez, “Así funciona la extrusión en las impresoras 3D,” 2014.
- [8] 3dhubs, “3D Printing Industry Trends Q3-2016 | 3D Hubs.”
- [9] RepRapWiki, “NEMA 17 Stepper Motor,” 2016.
- [10] J. Metelnick, “Society of Manufacturing Engineers Technical Paper.” 1991.
- [11] A. Surel, “EOS : e-Manufacturing Solutions,” 2009.
- [12] 3D Printing Industry, “History of 3D Printing: The Free Beginner’s Guide,” 2014.
- [13] B. T. Wittbrodt, A. G. Glover, J. Laureto, G. C. Anzalone, D. Oppliger, J. L. Irwin, and J. M. Pearce, “Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers,” *Mechatronics*, vol. 23, pp. 713–726, sep 2013.
- [14] A. Bowyer, “RepRap,” 2009.

- [15] Ennex Corporation, “Fabbers.com,” 1993.
- [16] K. Cooper, *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [17] D. Buron, “Impresión 3D: Qué materiales usar y dónde comprarlos,” 2013.
- [18] R. Muquillaza, “Motores paso a paso.” 2006.
- [19] Versa77, “Dinamometro digital portátil Versa 77.”
- [20] E3D, “v6 HotEnd Full Kit - 1.75mm Universal (with Bowden add-on) (24v).”
- [21] BQ, “Kit de extrusión HeatCore DDG.”
- [22] BondTech, “QR 1.75 Universal - Bondtech AB.”
- [23] B. Stephens, P. Azimi, Z. El Orch, and T. Ramos, “Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers,” *Atmospheric Environment*, vol. 79, pp. 334–339, nov 2013.

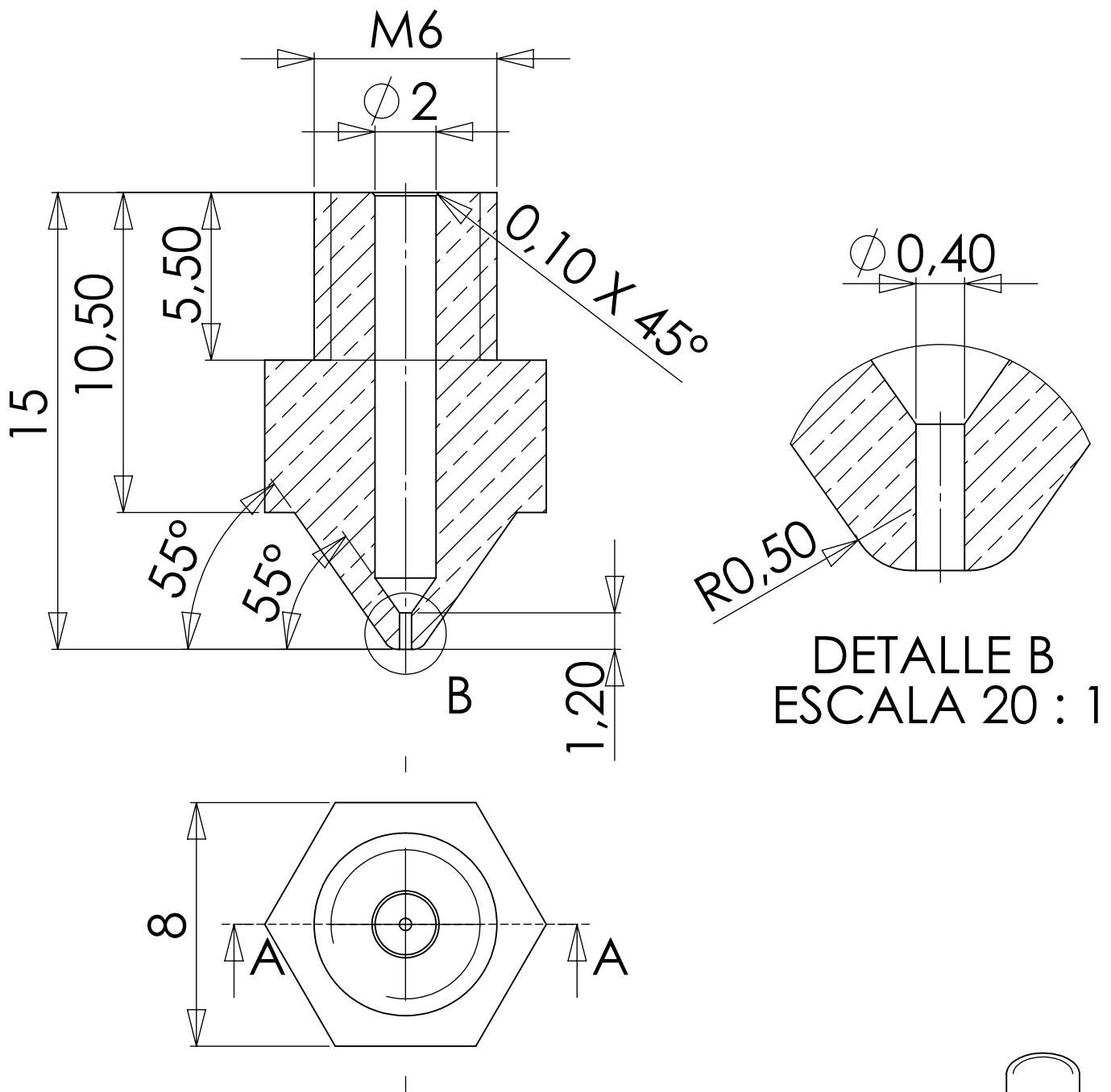
Apéndice A

Planos



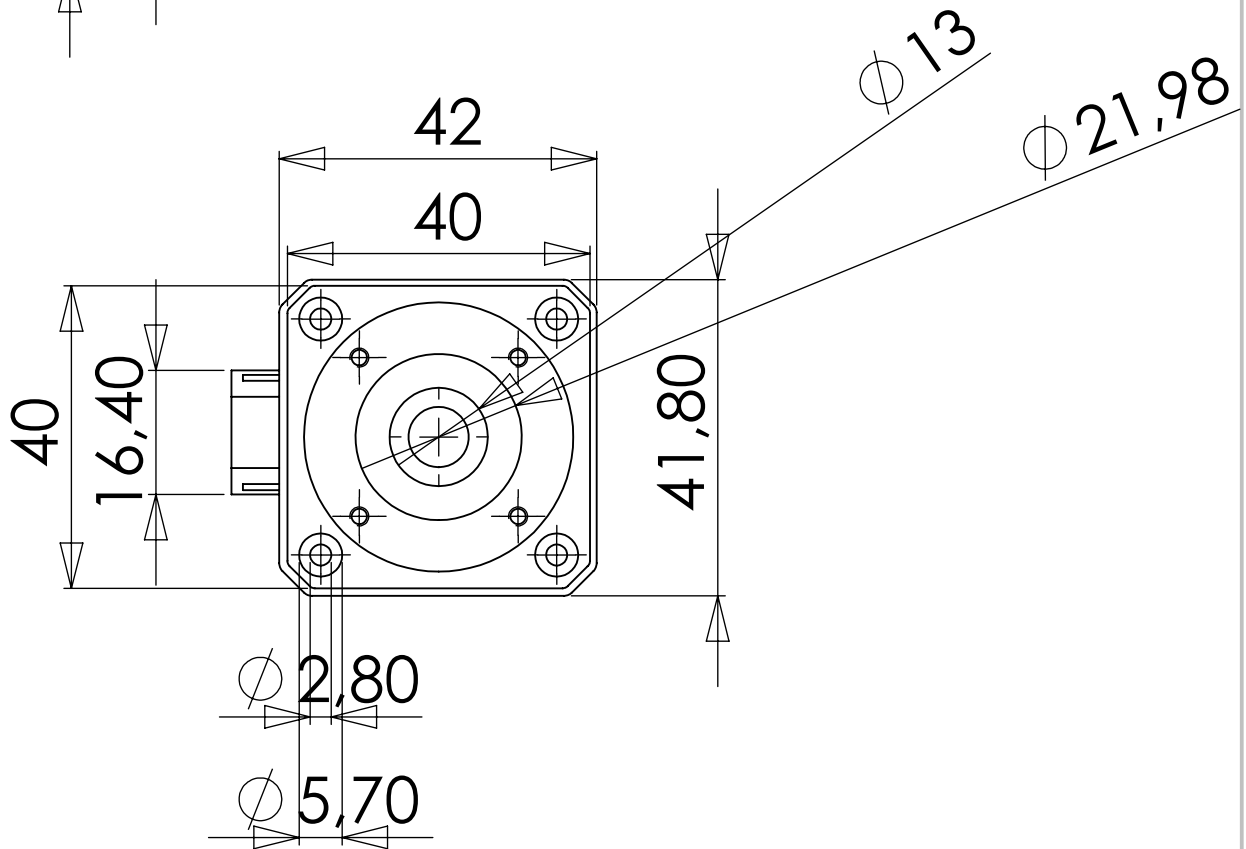
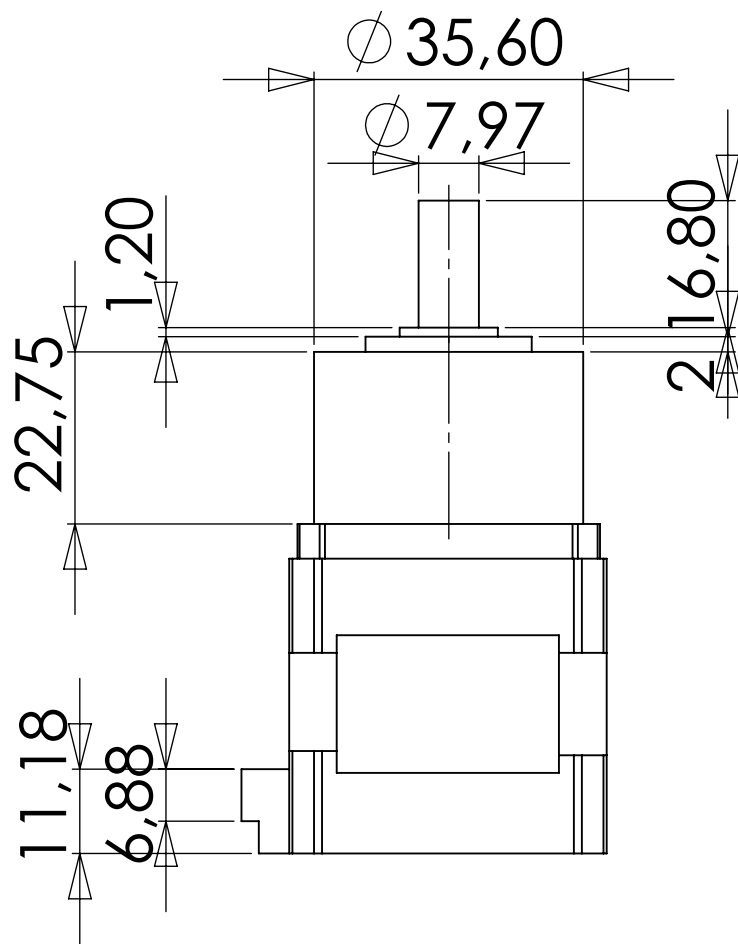
Xapa alumini 3 mm de gruix

1	Alumini	46 x 73 x 17	SW301G 600 Bleu Sablé	
Quant.	Material	Mides màx.	Recobriments	
Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M	Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168	Rugositat mínima general Ra=6.3	Títol: Extruder Stepper Holder BT	
Format full A4			Contacte	
Escala 2:1			Autor: Víctor Collado Fernández	Data: 03/10/2016



DETALLE B
ESCALA 20 : 1

1	Llautó	9,24 x 15		
Quant.	Material	Mides Màx.		
Toleràncies dimensionals generals segons DIN 7168-M	Toleràncies geomètriques generals segons DIN 7168	Rugositat mínima general Ra=6.3	Títol: Nozzle modificada 1,75	
Format full A4		Contacte:		
Escala 5:1		Autor: Victor Collado Fernandez	Data: 26/09/2016	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

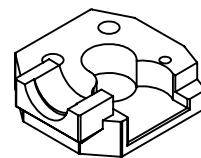
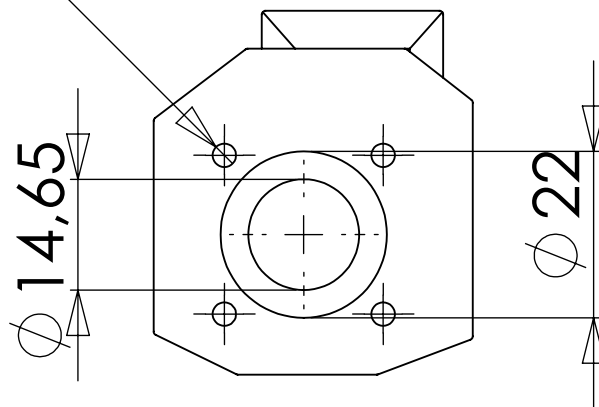
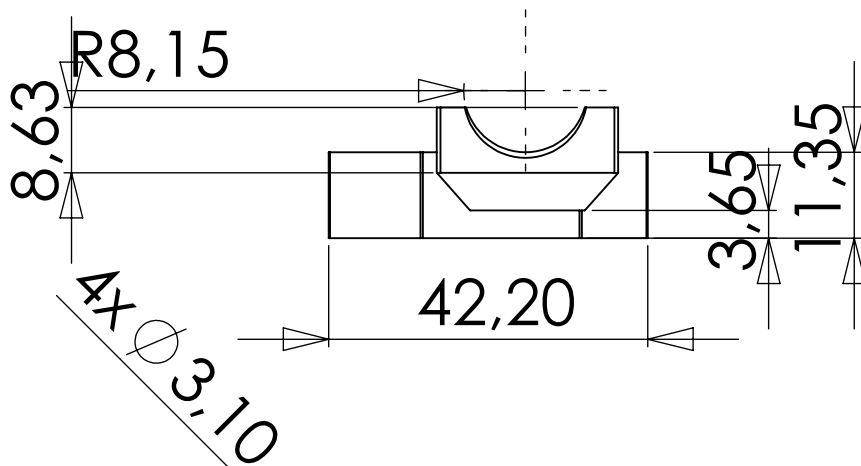
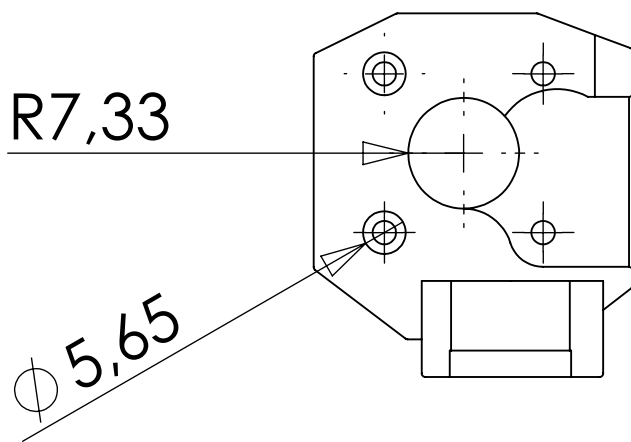
REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:	<h1>MotorBT</h1>	A4
N.º DE DIBUJO		
ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

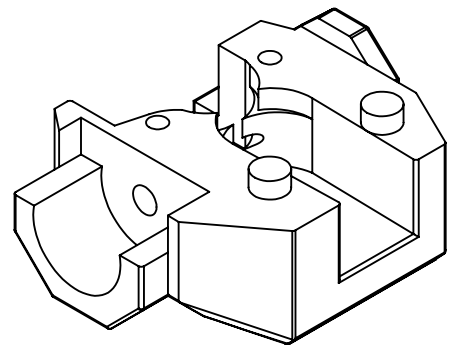
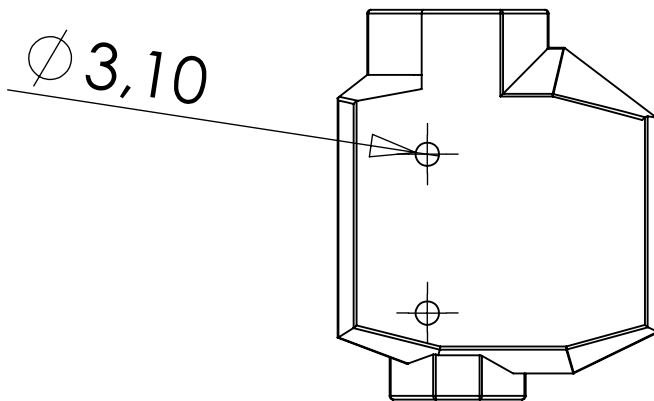
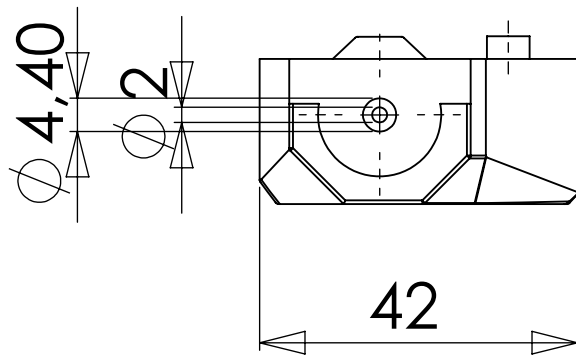
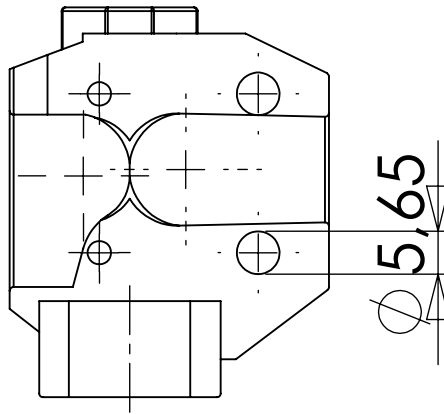
N.º DE DIBUJO

SoporteInferior

A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

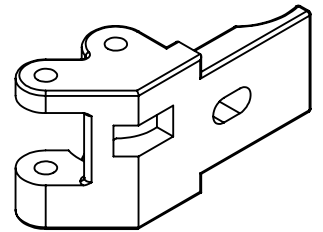
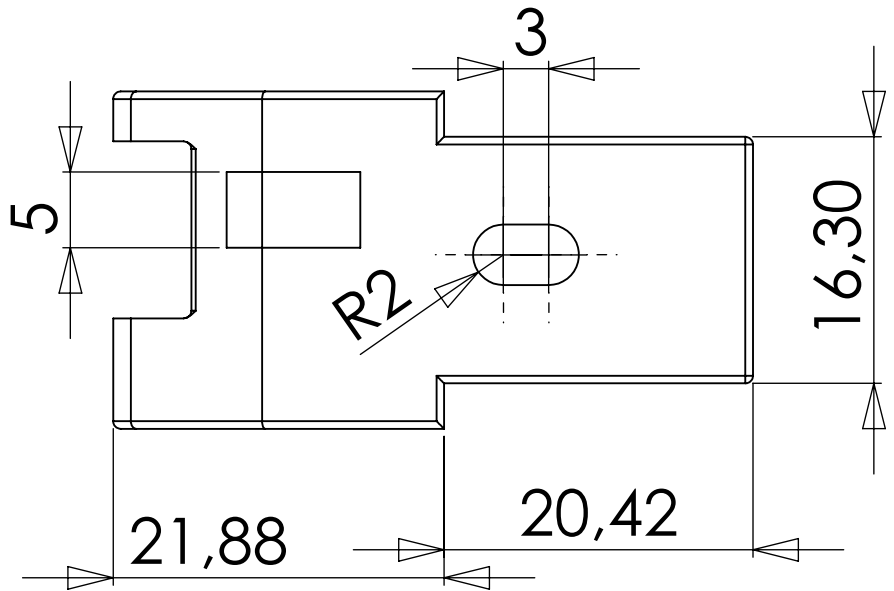
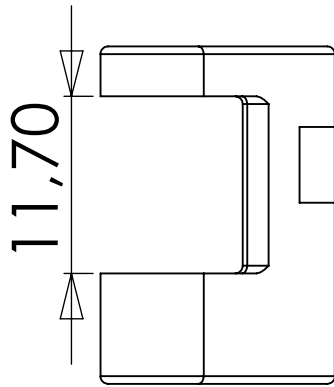
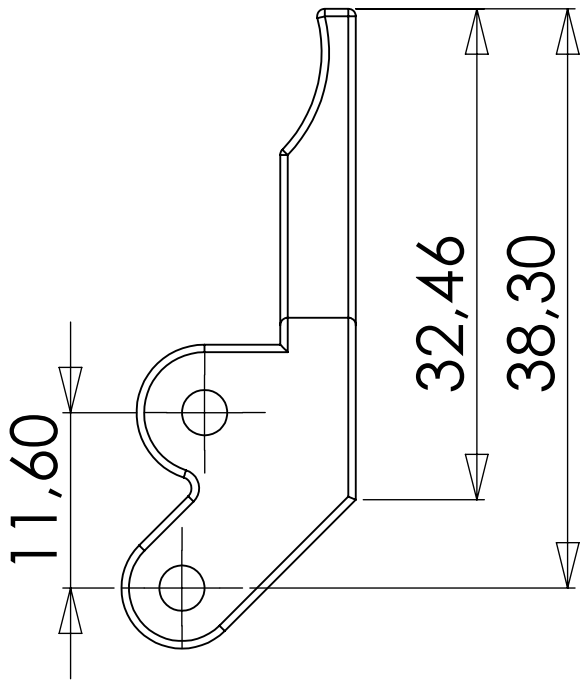
N.º DE DIBUJO

SoporteSuperior2

A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

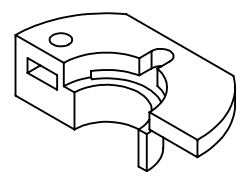
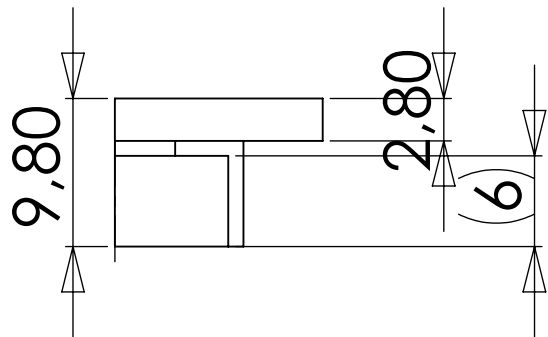
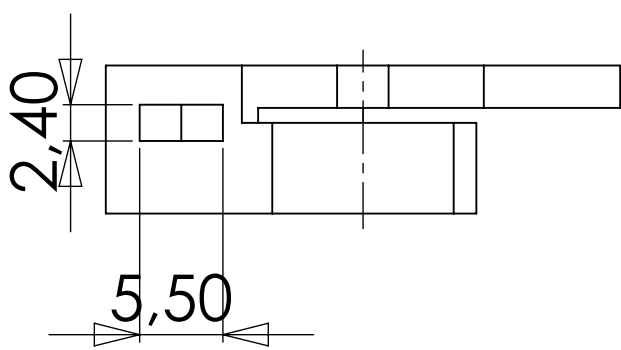
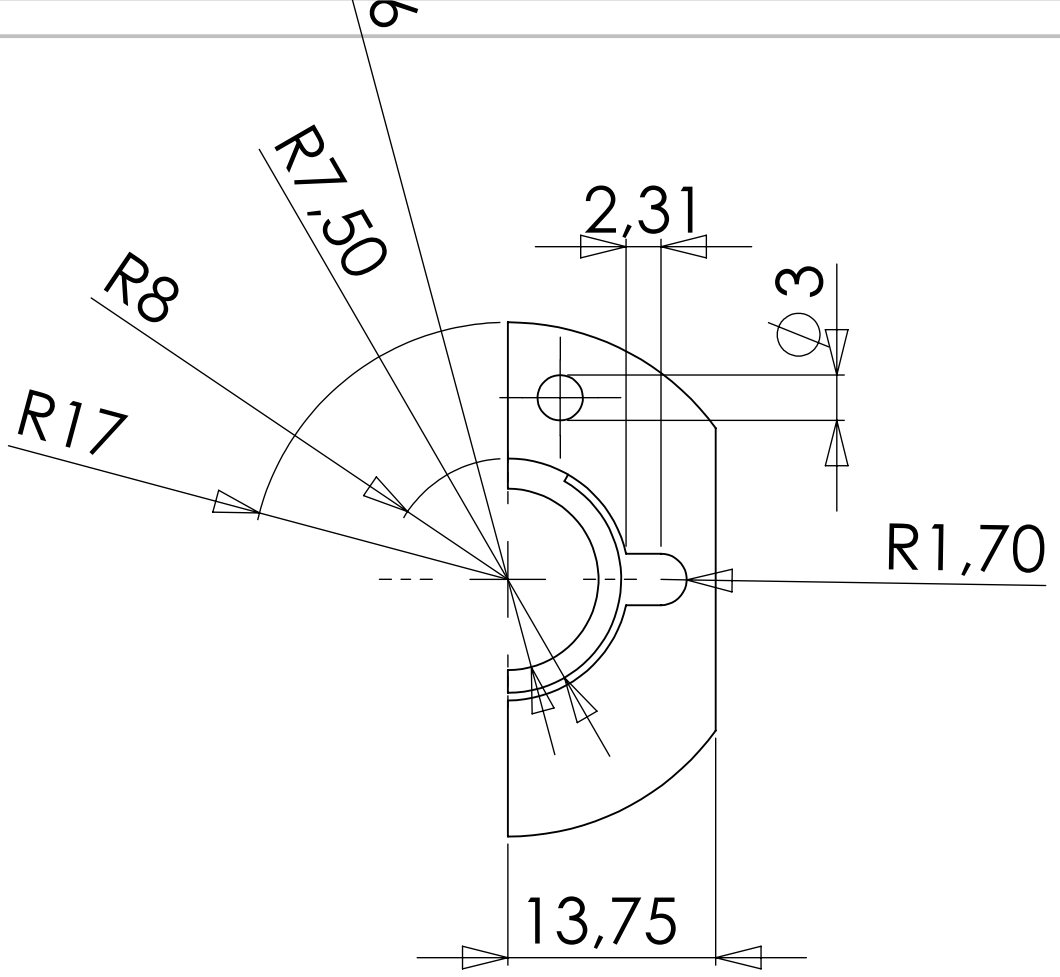
REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

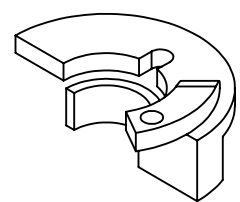
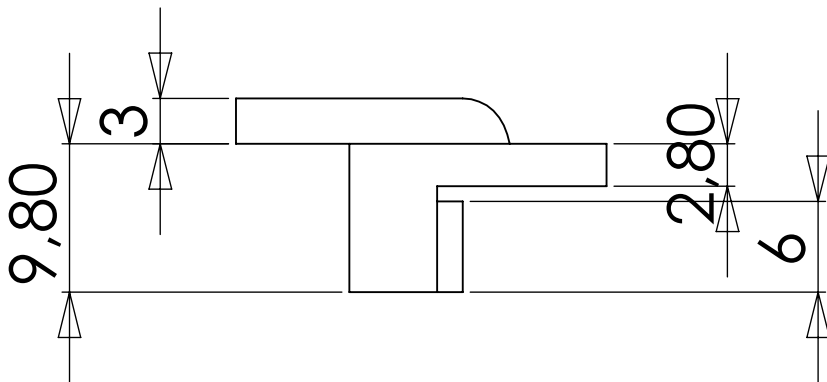
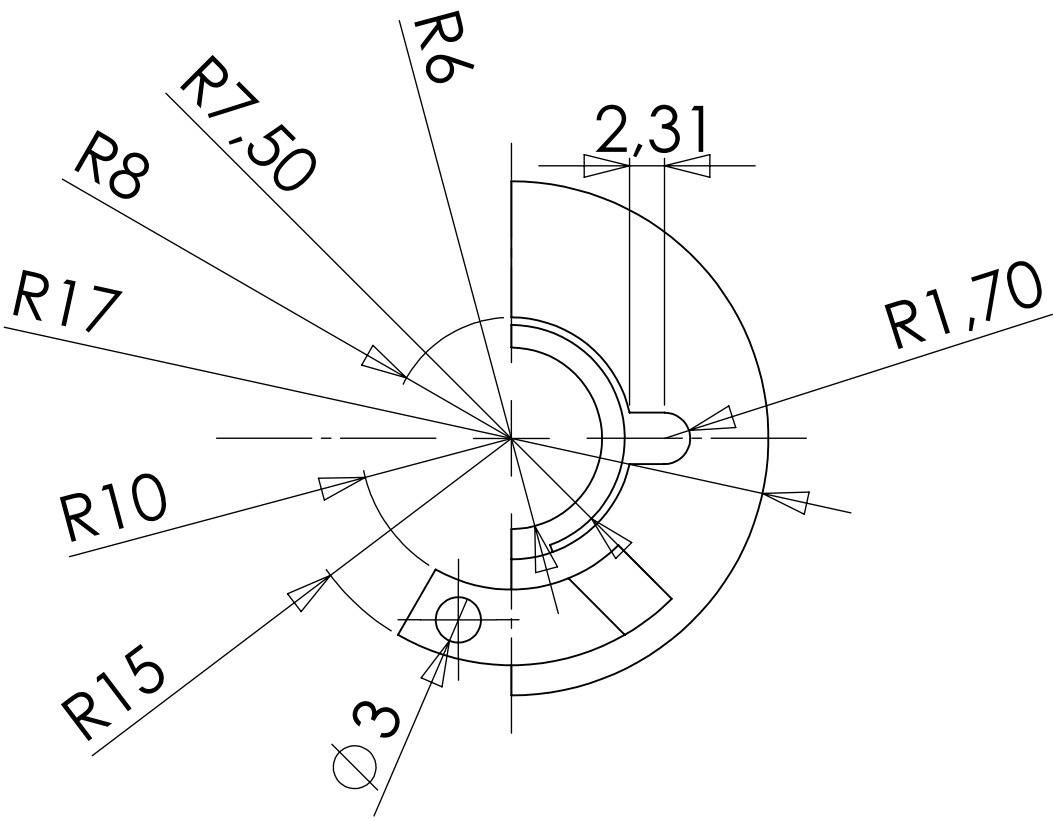
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	Pieza_Movil
ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
	A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		MATERIAL:			
FABR.		CALID.		PESO:		ESCALA:2:1		HOJA 1 DE 1	

N.º DE DIBUJO Sujecion Upper-Hotend Ref A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

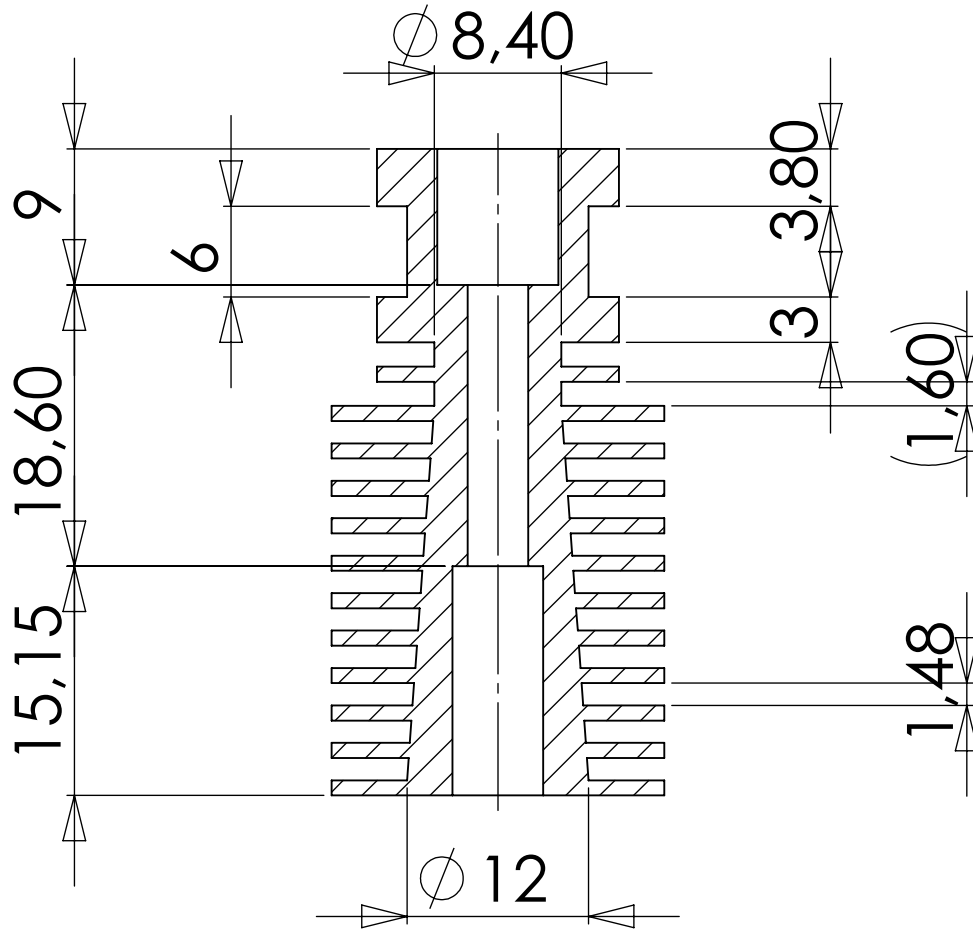
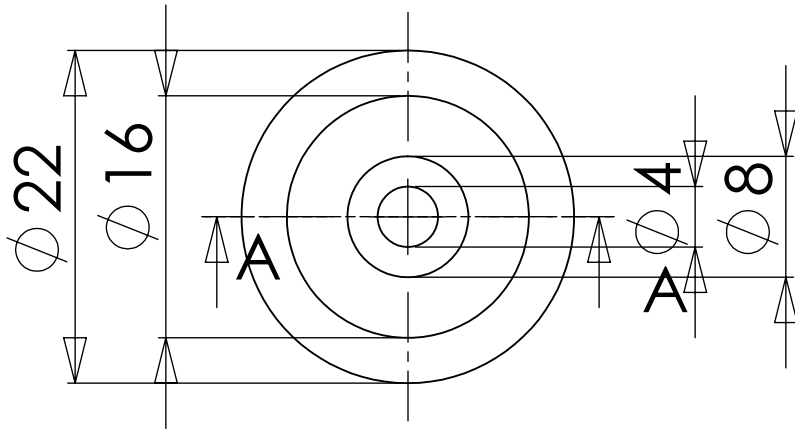
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				
				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:

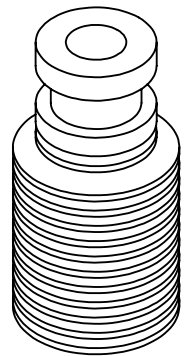
N.º DE DIBUJO: **Sujecion Upper-Hotend Right**

ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1



SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

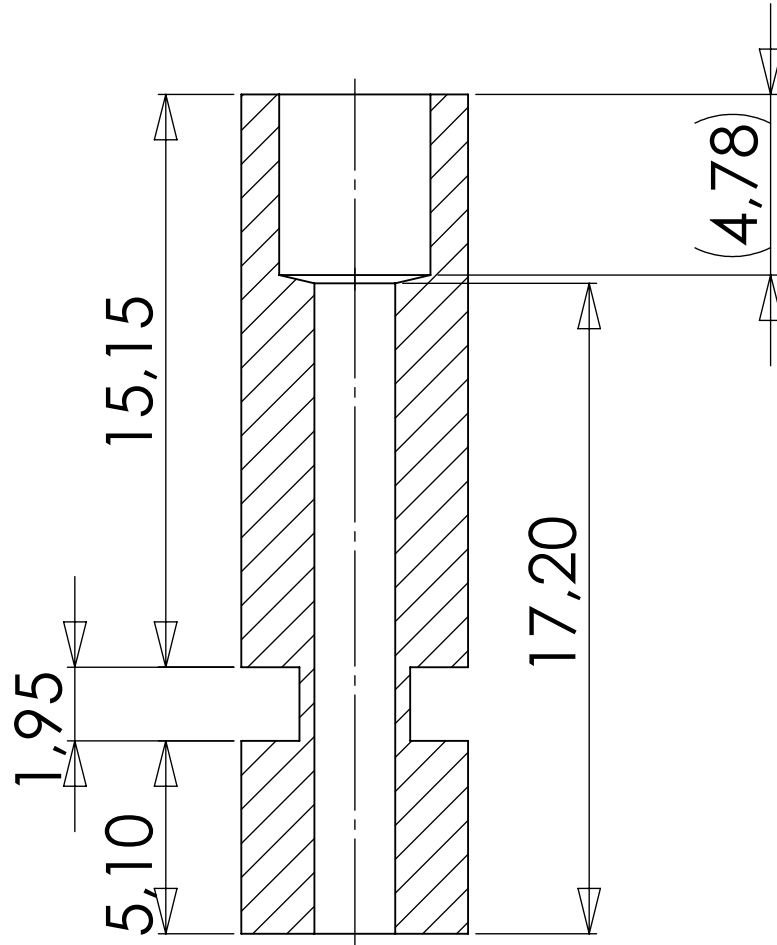
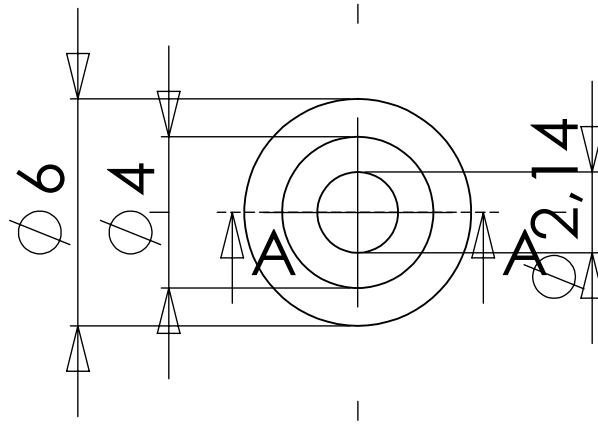
REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:		
N.º DE DIBUJO	Disipador	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	



SECCIÓN A-A
ESCALA 5 : 1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

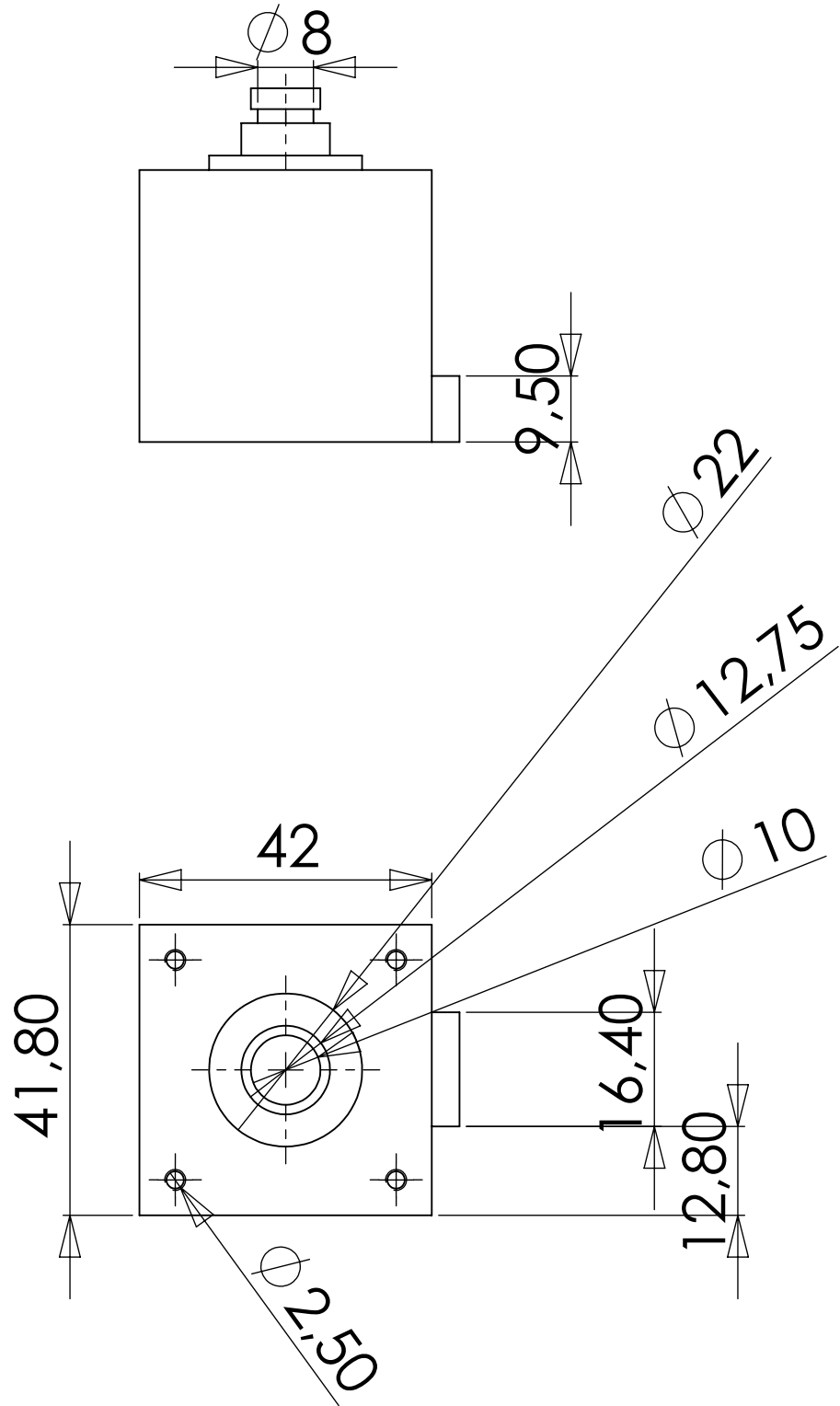
REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				
				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:	Boquilla-garganta	A4
N.º DE DIBUJO:		
ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

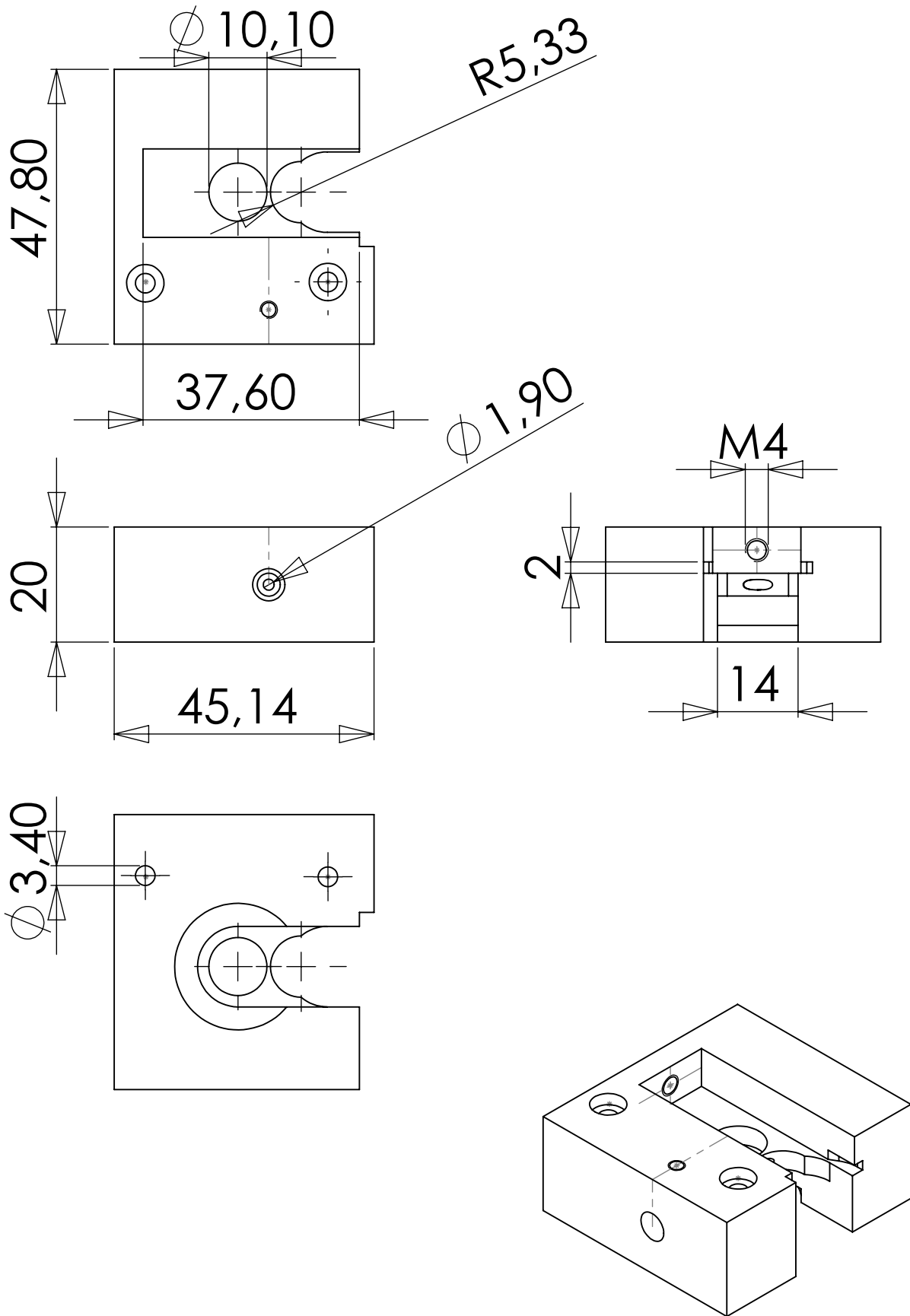
REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	MotorBQ
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1
	A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

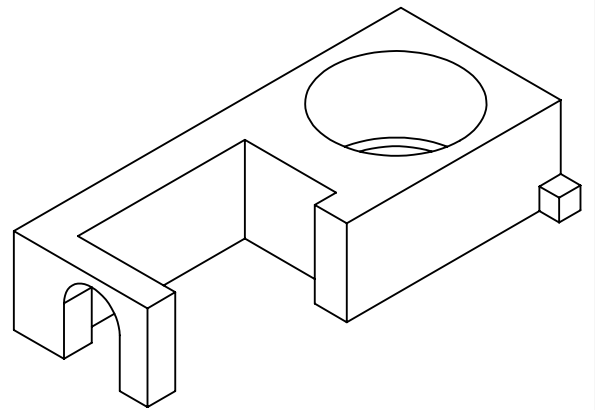
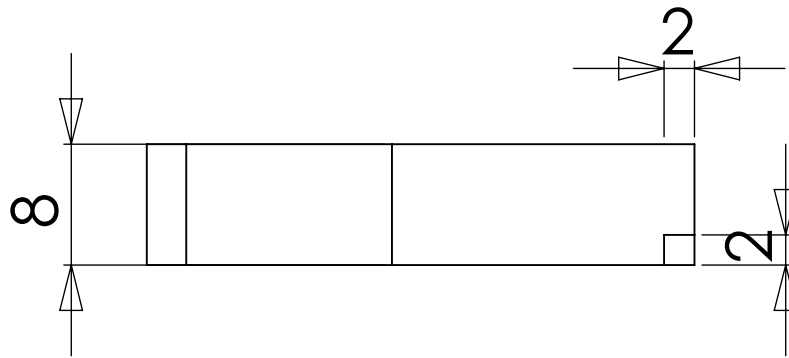
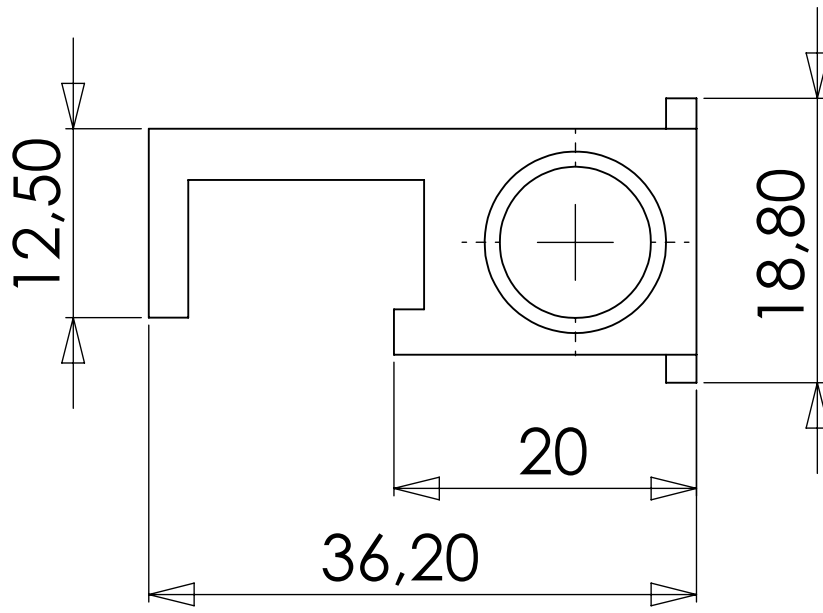
REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				
				MATERIAL:
				PESO:

TÍTULO:		
N.º DE DIBUJO	BloqueBQ	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

SoporteGear

A4

ESCALA:2:1

HOJA 1 DE 1