



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA

TRABAJO FIN DE GRADO N° 1501_234

**EXTRUSOR DE FILAMENTO PARA RECICLAJE DE MATERIAL
DE IMPRESIÓN 3D DE BAJO COSTE**

**Dña. Nuria María Pérez Más
TUTOR: D. Ramón Rubio García**

FECHA: Julio de 2015

MEMORIA

INDICE

1.-	Objetivos y alcance del trabajo	7
1.1.-	Objetivos generales	7
1.2.-	Objetivos específicos	7
1.3.-	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	7
1.4.-	Planificación temporal	9
2.-	Estudios y análisis previos	12
2.1.-	Inicios de la impresión 3D	14
2.2.-	Tipos de impresoras	15
2.3.-	Funcionamiento de una impresora 3D FDM	17
2.4.-	Estado del arte	19
2.4.1.-	Reciclaje de plásticos	19
2.4.2.-	Obtención de filamento en fábricas	19
2.4.3.-	Modelos existentes de recicladoras	19
3.-	Alternativas	22
3.1.-	Análisis inicial	22
3.2.-	Obtener pellets	24
3.2.1.-	Opciones previas	24
3.3.-	Obtener filamento	27
4.-	Ingeniería básica	30
4.1.-	Trituradora	30
4.1.1.-	Cuchillas	32
4.1.2.-	Ejes	33
4.1.3.-	Caja	34
4.1.4.-	Arandelas	35
4.1.5.-	Engranajes	36
4.2.-	Extrusora	37
4.2.1.-	Cabezal	37
4.2.2.-	Cuerpo	38
4.2.3.-	Tornillo de Arquímedes	38
4.2.4.-	Alimentación	39
4.2.5.-	Motor	40
4.2.6.-	Acoplamiento motor-broca	40
5.-	Ingeniería de detalle	41
5.1.-	Trituradora	41
5.1.1.-	Cuchilla	41

5.1.2.- Ejes	42
5.1.3.- Arandela	43
5.1.4.- Arandela lateral	44
5.1.5.- Rodamiento	45
5.1.6.- Tapa gruesa	46
5.1.7.- Tapa externa	47
5.1.8.- Rejilla	48
5.1.9.- Tapa externa frontal	49
5.1.10.- Tapa lateral	51
5.1.11.- Laterales	51
5.1.12.- Engranajes	53
5.1.13.- Elementos de unión	54
5.1.14.- Llave de pipa acodada	55
5.2.- Extrusor	56
5.2.1.- Base de metacrilato	56
5.2.2.- Soporte de madera	57
5.2.3.- Termistor y resistencia	58
5.2.4.- Calentador	58
5.2.5.- Cabezal	59
5.2.6.- Cuerpo: Manguito y racores.	60
5.2.7.- Contratuercas	61
5.2.8.- Lámina	62
5.2.9.- Alimentador	62
5.2.10.- Broca	64
5.2.11.- Rodamiento y circlip	65
5.2.12.- Vaso	66
5.2.13.- Acoplamiento	67
5.2.14.- Soporte motor	67
5.2.15.- Motor	69
5.2.16.- Ventiladores	70
5.2.17.- Pilar	70
5.2.18.- Hardware y Software	72
5.3.- Ensamblaje final: Recicladora	74
6.- Líneas futuras	75
6.1.- Trituradora	75
6.2.- Extrusora	75
7.- Conclusiones	77
8.- Referencias	78

INDICE DE FIGURAS

Tabla 1. 1: Programación de tareas del proyecto	9
Figura 1. 1: Diagrama Gantt de la distribución temporal de las tareas.	11
Figura 2. 1: Proceso de laminado del modelo.	13
Figura 2. 2: Esquema de una impresora 3D de adición.	18
Figura 2. 3: Shredder de Thymark.	20
Figura 2. 4: Extrusora de Lyman.	20
Figura 2. 5: Extrusor italiano FelFil.	21
Figura 3. 1: Esquema del proceso.	23
Figura 3. 2: Impresora 3D Tumaker Voladora.	24
Figura 3. 3: Fundición del material para conseguir pellets.	25
Figura 3. 4: Hot wire cutter.	25
Figura 3. 5: Trituradora de madera.	26
Figura 3. 6: Extrusión de plásticos.	27
Figura 4. 1: Trituradora de dos ejes.	30
Figura 4. 7 Vista explosionada del diseño inicial de la trituradora.	31
Figura 4. 8 Ilustración del sistema de sujeción y triturado de piezas.	32
Figura 4. 9 Dos posiciones de las cuchillas para una sola chaveta.	32
Figura 4. 10 Eje con dos chavetas.	33
Figura 4. 11 Ensamblaje de la caja de rodamientos.	34
Figura 4. 12 Función de las arandelas entre cuchillas.	35
Figura 4. 13 Engranaje mecanizado para transmitir la potencia con chavetas.	36
Figura 4. 14 Tapón macho como cabezal del extrusor.	37
Figura 4. 15 Broca como tornillo de Arquímedes.	39
Figura 4. 16 Diseño inicial del alimentador.	39
Figura 5. 1: Diseño final de cuchilla.	41
Figura 5. 2: Eje.	42
Figura 5. 3: Arandela.	43
Figura 5. 4: Arandela contra engranaje.	43
Figura 5. 5: Arandela lateral.	44
Figura 5. 6: Rodamientos.	44
Figura 5. 7: Rodamientos SKF-6302.	45
Figura 5. 8: Rebaba de la tapa gruesa.	45
Figura 5. 9: Tapa gruesa.	46
Figura 5. 10: Tapa externa.	47
Figura 5. 11: Rejilla.	48
Figura 5. 12: La cabeza de los tornillos de unión de la rejilla con la tapa gruesa.	48
Figura 5. 13: Tapa externa frontal.	49
Figura 5. 14: Imagen explicativa de las dimensiones de la tapa externa frontal.	50
Figura 5. 15: Tapa lateral.	51
Figura 5. 16: Lateral.	52
Figura 5. 17: Posición relativa del lateral.	52
5. 1	53
5. 2	53
Figura 5. 18: Engranajes.	53
Figura 5. 19: Eje con sus componentes básicos.	54
Figura 5. 20: Llave de pipa acodada.	55
Figura 5. 21: Vaso hexagonal de la llave de pipa.	55
Figura 5. 22: Base de metacrilato.	56

Figura 5. 23: Soporte de madera.	57
Figura 5. 24: Termistor y resistencia.	58
Figura 5. 25: Calentador.	59
Figura 5. 26: Tapón macho ciego y Cabezal mecanizado.	59
Figura 5. 28: Tapón macho mecanizado y manguito.	61
Figura 5. 29: Sujeción horizontal del cuerpo con la lámina y la contratuerca.	61
Figura 5. 30: Lámina.	62
Figura 5. 31: Subconjunto de Sistema rotativo.	63
Figura 5. 32: Alimentador.	63
Figura 5. 33: Broca BM12x230.	64
Figura 5. 34: Circlip y rodamiento ya posicionado en el alimentador.	65
Figura 5. 35: Circlip y rodamiento axial.	66
Figura 5. 36: Vaso para la broca.	66
Figura 5. 37: Acoplamiento	67
Figura 5. 38: Diseño inicial del alimentador.	68
Figura 5. 39: Soporte motor.	68
Figura 5. 40: Escalón del Soporte motor.	68
Figura 5. 41: Motor Nema17.	69
Figura 5. 42: Ventilador.	70
Figura 5. 43: Pilar de impresión 3D.	70
Figura 5. 44: Proceso de taladrado.	71
Figura 5. 45: Diagrama de bloques para la programación.	72
Figura 5. 46: Conexiones de la placa de Arduino Megatronics V2.0.	73
Figura 5. 47: Interfaz de Repetier Host.	73
Figura 5. 48: Ensamblaje final.	74

1.- Objetivos y alcance del trabajo

1.1.- OBJETIVOS GENERALES

Este proyecto se centrará en el diseño de un sistema de reciclaje de plásticos para la obtención de filamento reutilizable por impresoras 3D.

1.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tratándose de un trabajo de reciclaje, se intentará seguir esta filosofía reutilizando componentes de una impresora comercial con ciertos fallos de fábrica que impiden su uso. Se reutilizará la estructura de aluminio y sus uniones, la placa de Arduino para implementar el programa que se requiera y su fuente de alimentación, los motores y acoplamientos, el termistor y la resistencia y las paredes de metacrilato.

También se procura que esta máquina tenga un coste lo más reducido posible con lo que se tendrá en cuenta a la hora de diseñar las características de los elementos. Esto es así ya que se quiere dirigir a un público amplio, como individuales nivel usuario con impresora 3D y pequeñas empresas que utilicen esta tecnología y que con toda probabilidad tengan un gran desperdicio de material.

Se pretende el reciclaje de piezas de impresión 3D que hayan salido defectuosas y, sobre todo, los soportes y partes sobrantes de las piezas que, hasta ahora, solo podían ser desechados.

1.3.- ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de 5 documentos: Memoria, Anexos, Planos, Presupuesto y Pliego de Condiciones.

El documento memoria está dividido en 8 capítulos. El primer capítulo, “Objetivos y alcance del trabajo” describe la finalidad de este proyecto de manera resumida, tanto sus objetivos con respecto al desarrollo de éste como a su estructura temporal. En el segundo capítulo, “Estudios y análisis previos”, se hará un estudio de mercado para conocer posibles máquinas ya existentes que puedan hacer de guía para encontrar una solución.

En el siguiente capítulo, “Alternativas”, las diferentes opciones a las que se haya llegado serán estudiadas y se elegirá una en concreto, que se definirá en el capítulo de “Ingeniería Básica”. En el capítulo posterior, “Ingeniería de Detalle”, se desarrollará con explicaciones precisas cada uno de los componentes y sus relaciones.

En el capítulo titulado “Líneas futuras” se comentarán ciertos aspectos susceptibles de cambio o mejora en caso de que no se busque un bajo coste. En “Conclusiones” se resume la solución adoptada y se comentan brevemente los puntos destacables. Finalmente, en el capítulo “Referencias” aparecen todas las reseñas y todos los documentos consultados.

En el documento Anexos hay 3 capítulos. El capítulo titulado “Materiales” describe el PLA y el ABS con sus propiedades principales. El siguiente, “Cálculos”, desarrolla numéricamente los cálculos que se han realizado para obtener datos desconocidos y realizar comprobaciones. Por último está el capítulo “Simulaciones”. Aquí se muestran imágenes de las simulaciones de varios elementos en SolidWorks y en CDF Autodesk y se describen los datos y los apoyos utilizados.

En el documento Planos aparecerá un índice con la relación entre planos y posteriormente los planos de las piezas diseñadas, no comerciales.

El documento Presupuesto desglosará cada componente y sus mediciones, y también se tendrá en cuenta el trabajo de la Ingeniería y el beneficio correspondiente.

Se incluye otro documento, el Pliego de Condiciones, para aclarar los posibles malentendidos a la hora de ejecutar el proyecto.

1.4.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL

A continuación se observa una tabla con el proyecto desglosado en sus tareas y duraciones correspondientes y un gráfico Gantt de su distribución en el tiempo.

Tabla 1. 1: Programación de tareas del proyecto

EDT	Tarea	Comienzo	Duración (días)
1	Estado del arte y estudio del mercado		
1.1	Impresoras 3D y funcionamiento	02/02/15	10
1.2	Soluciones ya existentes	05/02/15	10
1.3	Decisión de solución adoptada	16/02/15	1
2	Desmontaje de la impresora Tumaker	16/02/15	46
3	Desarrollo de la trituradora		
3.1	Ingeniería de desarrollo		
3.1.1	Prediseñado de elementos	17/02/15	10
3.1.2	Comprobaciones y simulaciones	17/02/15	10
3.1.3	Cambios en el diseño	27/03/15	3
3.2	Montaje		
3.2.1	Petición de oferta de corte láser	2/03/15	1
3.2.2	Llegada de piezas de corte láser	18/03/15	1
3.2.3	Petición de oferta de mecanizado	20/03/15	1
3.2.4	Petición de oferta elementos comerciales	20/03/15	1

3.2.5	Llegada de elementos comerciales	13/04/15	1
3.2.6	Mecanizado de piezas	29/04/15	2
3.2.7	Impresión de elementos	13/04/15	35
3.2.8	Ensamblaje	19/05/15	2
4	Desarrollo de la extrusora		
4.1	Ingeniería de desarrollo		
4.1.1	Prediseñado de elementos	02/03/15	15
4.1.2	Aprender a usar CDF Autodesk	09/03/15	7
4.1.3	Comprobaciones y simulaciones	16/03/15	8
4.1.4	Cambios en el diseño	24/03/15	60
4.2	Montaje		
4.2.1	Compra de elementos del cuerpo	14/04/15	3
4.2.2	Compra de elementos comerciales	24/06/15	1
4.2.3	Petición de oferta de mecanizados	20/05/15	1
4.2.4	Mecanizado de piezas	08/06/15	1
4.2.5	Ensamblaje de extrusora	15/06/15	3
4.2.6	Aprender a programar Arduino	25/05/15	20
4.2.7	Conexiones de la placa de Arduino	19/06/15	1
5	Redacción del proyecto	02/02/15	104

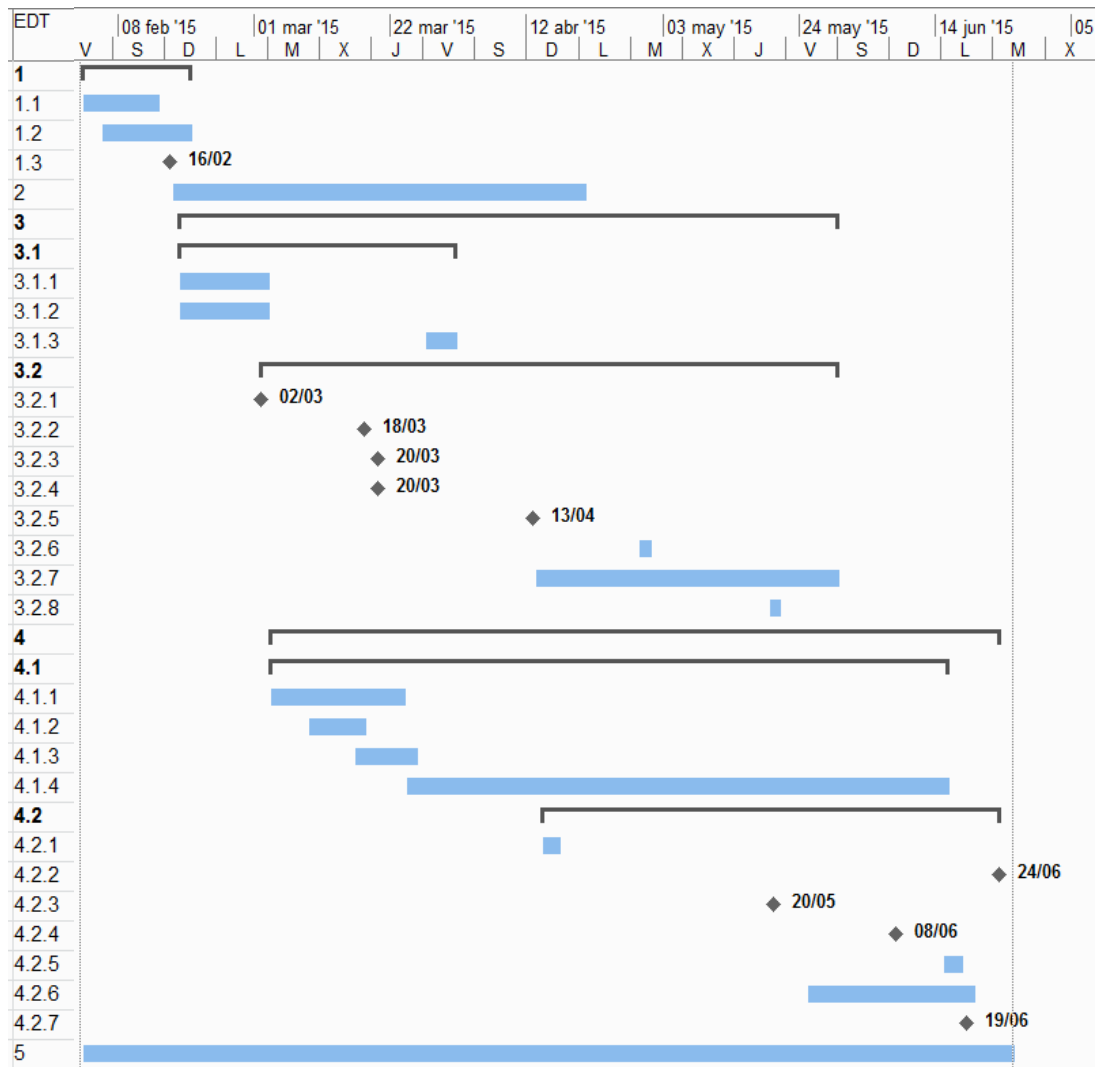


Figura 1. 1: Diagrama Gantt de la distribución temporal de las tareas.

2.- Estudios y análisis previos

Los procesos de fabricación consisten en un conjunto ordenado de operaciones que parten de un material en bruto y modifican su forma y propiedades hasta convertirla en una pieza elaborada con una utilidad.

Para llevar a cabo la fabricación de un elemento se han de seguir unos pasos: realizar un diseño previo, especificar las dimensiones y los materiales y, por último, elegir el procedimiento de fabricación más idóneo que de forma al material. Las técnicas más usuales son:¹

- Procedimientos de fabricación por deformación o moldeo: la forja o el soplado son ejemplos de estas prácticas. En ellas no se desperdicia ni se pierde el material con el que se trabaja.
- Procedimientos de fabricación por separación y corte: como el corte láser u otros tipos de tecnologías. Se desperdicia una parte del material de partida.

Hasta ahora los diseños que se realizaban tenían limitaciones puesto que se había de tener en cuenta el proceso de fabricación, tanto los procesos directos (plaquitas, taladros o matrices) como los indirectos (utillaje o refrigeración). Se había de tener en cuenta que los procesos de fabricación existentes fuesen capaces de realizar el modelo, evitando en lo posible lugares de difícil acceso en el caso de mecanizados o estrecheces en el caso del moldeo por fundición.

Como alternativa ha aparecido la impresión 3D. Las impresoras en 3 dimensiones son la auténtica revolución tecnológica y este mundo está creciendo por momentos. Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar impresiones de diseños en 3D, creando piezas o maquetas físicas, tangibles, de un diseño hecho por ordenador a partir de un filamento. No importa la complejidad del diseño y no se ha de tener en cuenta el proceso de fabricación necesario para realizar la pieza. Por ello tiene una amplia gama de aplicaciones.

Es muy útil a la hora de materializar proyectos y comprobar de forma física el diseño prototipo, también sirven objetos caseros e incluso componentes espaciales, prótesis, órganos humanos, entre otros. Por ejemplo, el año pasado la propia NASA envió una de estas impresoras 3D a la Estación Espacial Internacional para que los astronautas puedan fabricar piezas que consideren necesarias en el espacio.²

Es lógico pensar que las impresoras sólo pueden alcanzar rangos pequeños de tamaño, pero no es así. Las dimensiones de impresión pueden ser tan grandes como se imagine y lo grande que sea el espacio de trabajo de la impresora, que depende de la geometría de ésta.

Las impresoras 3D usan múltiples tecnologías de fabricación. Desde el punto de vista del software, un modelo CAD es introducido en el programa y éste se encarga de dividirlo en capas automáticamente, es decir, laminarlo en lonchas horizontales.

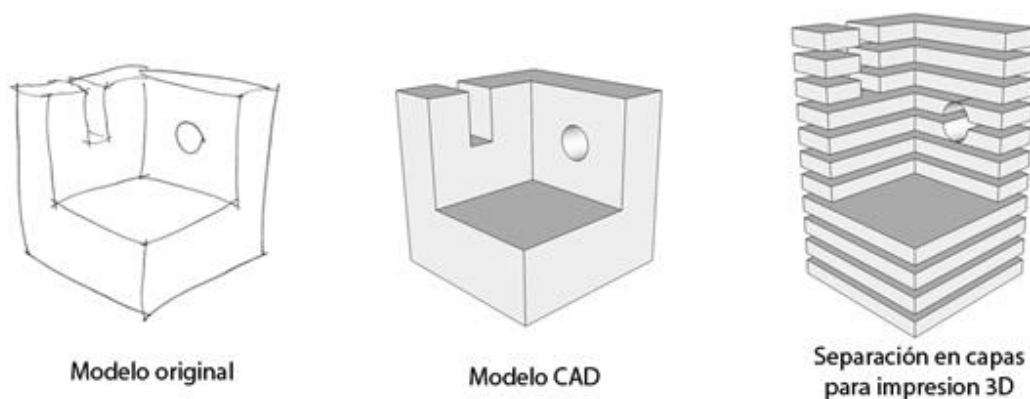


Figura 2. 1: Proceso de laminado del modelo.³

En la Figura 2.1 se observan los pasos que se siguen. La primera imagen es el boceto que se crea previamente. El siguiente paso es la creación del modelo con un programa de CAD en el ordenador, con medidas específicas. Finalmente, se introduce este modelo en un programa específico para impresoras 3D y el modelo se divide en láminas horizontales que la impresora irá creando una a una, una encima de otra hasta completar el modelo.

Sea cual sea la complejidad del modelo, éste siempre podrá ser laminado, con lo que no importará su complejidad, siempre será susceptible de ser fabricado gracias a esta tecnología.

Muchas empresas de fabricación aditiva están deseando ver una revolución en la forma de fabricar objetos e introducir la impresión 3D como una opción a considerar y no sólo como una tecnología a desarrollar. Su parte problemática se refleja en el coste ya no sólo de las máquinas en sí, sino también de los materiales. Algunas empresas como MakerBot se han dado cuenta de que disminuyendo el precio se amplía el mercado y las posibilidades de avanzar.

2.1.- INICIOS DE LA IMPRESIÓN 3D

Las primeras tecnologías de impresión 3D aparecieron a finales de 1980 y en aquella época se llamaban tecnologías de Prototipado Rápido (Rapid Prototyping, RP). Su nombre se debió a que estos procesos fueron originalmente concebidos como una manera más rápida, efectiva y menos costosa de crear prototipos en el desarrollo industrial.

El origen real de las impresoras 3D se encuentra en el año 1986, cuando aparece la primera patente de la tecnología de estereolitografía (SLA), de la que se hablará posteriormente. Pertenecía a Charles Hull, quien la inventó en 1983.

Simultáneamente Carl Deckard, de la Universidad de Texas, estaba desarrollando la tecnología de sinterizado láser (SLS) hasta 1987, cuando lo patentó.

En 1989 Scott Crump, co-fundador de la empresa Stratasys Inc., patentó la tecnología de modelado por deposición (FDM) y actualmente es el tipo de impresora básica que cualquier persona a nivel usuario podría permitirse tener en su casa.

A pesar de que inicialmente estas tecnologías iban a servir sólo para prototipado, rápidamente surgieron nuevas aplicaciones como Rapid Tooling (RT), Rapid Casting (RC) o Rapid Manufacturing (RM), es decir, creación de herramientas, moldes y productos finales directamente.

2.2.- TIPOS DE IMPRESORAS

Aunque el concepto de impresora 3D ya tiene su origen en los años 80, actualmente está cogiendo cada vez más y más fuerza y pronto podría ya utilizarse en multitud de industrias. El futuro de las impresoras es prometedor y ya el pasado año 2014 se ha incrementado la familiarización con ellas, además de que sus precios se están abaratando y se está haciendo posible aún más la extensión de esta innovadora y útil tecnología.

Existen diferentes tipos de impresoras 3D. A pesar de que todas utilizan el mismo sistema software de loncheado, la tecnología utilizada para llevar a cabo la impresión es diferente:⁴

- Impresoras 3D por Estereolitografía (SLA): Es la primera en aparecer. Un haz de luz ultravioleta se aplica sobre una resina líquida contenida en un cubo que es sensible a la luz. Esta luz solidifica la resina capa a capa mientras que la base que soporta la estructura se desplaza hacia abajo. Es una de las tecnologías más precisas y con mejor acabado superficial. Hay un pequeño desperdicio de material en el caso de que la estructura necesite soportes.
- Impresoras 3D de procesamiento de luz digital (DLP): es un proceso similar a SLA que trabaja con fotopolímeros. La diferencia principal es la fuente de luz, puesto que la DLP utiliza una fuente de luz convencional con un espejo deformable, aplicado a toda la superficie del baño del fotopolímero y realizando la impresión más rápido que la tecnología SLA. La ventaja con respecto a SLA es que no necesita más que un baño poco profundo de fotopolímero, puesto que en este caso el soporte se mueve hacia arriba.
- Impresoras 3D de sinterización selectiva por láser (SLS): sus siglas vienen del inglés Selective Laser Sintering. Nacida en los años 80, tiene ciertas características similares a la tecnología SLA pero la diferencia es que permite utilizar no solo resinas líquidas fotosensibles, sino una gran variedad de materiales en polvo (cristal, cerámica o nylon). Se utiliza un láser que impacta en el polvo, funde el material y se solidifica. Todo el material que no se utiliza y queda en el cubo podrá ser reutilizado, por lo que no se desperdicia nada. Estas dos últimas tecnologías tienen una mayor velocidad de impresión y mayor

precisión en sus piezas. Al utilizar una cama de polvo no necesita de soportes como en el caso del SLA.

- Impresoras 3D por inyección de material: su sistema es el más parecido a una impresora de tinta habitual, pero en lugar de inyectar gotas de tinta en papel, inyectan capas de fotopolímero líquido que se pueden curar en la bandeja de construcción con rayos UV. Esta tecnología posibilita la simultaneidad de diferentes materiales en un mismo objeto o impresión.

- Impresoras 3D por inyección de aglutinante (Binder jetting): el material inyectado es una especie de pegamento selectivamente depositado en una cama de polvo del material utilizado y se superpone una capa de polvo, quedando únicamente pegado el polvo que haya quedado sobre la capa de pegamento. Como se trata de una cama con polvo no se requerirá de soportes, como en el caso de la tecnología SLS.

- Impresoras 3D de deposición selectiva de láminas (SDL): es una tecnología desarrollada y fabricada por Mcor Technologies. Cada capa es una hoja de papel comercial y se encuentran pegadas entre ellas mediante un adhesivo selectivamente aplicado dependiendo de las zonas correspondientes al modelo 3D. Tras la aplicación de cada capa, el conjunto de capas ya pegadas es empujada contra una plataforma caliente para asegurarse que queda bien pegado. Luego, unas cuchillas cortan el perfil de la pieza a realizar capa a capa. Cuando el proceso finaliza, la siguiente capa es añadida.

- Impresora 3D por fundido por un rayo de electrones (Electron Beam Melting - EBM): propiedad de la compañía sueca Arcam, forma objetos a partir de polvo de metal, calentándolo con un rayo de electrones dirigido, con lo que se necesita que el proceso se realice en condiciones de vacío.

- Impresoras 3D de adición (Fused Deposition Modelling - FDM): también llamadas “de adición de polímeros”, cuyo funcionamiento se basa en el añadido de material fundido a imprimir capa a capa. Cada capa se endurece cuando es depositada en la cama. Estas son la mayoría de impresoras 3D caseras y las más comerciales: un filamento de plástico se introduce en el cabezal y se funde para imprimir el objeto capa a capa hasta conseguir el objeto completo.

Este proyecto se centrará en las impresoras 3D de adición. Al igual que las impresoras normales, también necesitan alimentación de material y en este tipo de impresoras el material de partida son plásticos en forma de filamento. El problema se da cuando, por cualquier evento, nos encontremos con una pieza que ya no se necesite o que esté mal impresa: desecharla sería desechar el material que se ha utilizado para imprimirla. Es de los tipos de impresora que más material desechable genera porque el filamento consumido (ya impreso) no puede reutilizarse inmediatamente como el polvo de la tecnología SLS o la resina líquida de la tecnología SLA.

2.3.- FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA 3D FDM

El comienzo de toda impresión 3D es un modelo digital tanto realizado mediante un programa CAD o mediante un escaneado de un objeto real. El modelo es posteriormente dividido en capas y convertido a un archivo legible por la impresora, como se ha visto en la Figura 2.1. La limitación de estas impresoras actualmente es la del tipo de materiales utilizables. Está extendida la práctica del uso de plásticos como el PLA y el ABS, pero se están desarrollando nuevos modelos con el fin de poder utilizar materiales más diversos como el Nylon o incluso comida.

El proceso consiste en la extrusión de plástico, ABS o PLA, en forma de filamento a través de un extrusor a alta temperatura para crear capa a capa la figura determinada. Gracias a esta tecnología se pueden imprimir objetos muy detallados y complejos, e incluso objetos ya montados, sin necesidad de montaje posterior, y listos para funcionar.

La cabeza o cabezal será el conjunto de extrusor y material alimentado. Irá conectado a un termistor y a una resistencia que controlarán la temperatura de extrusión del material. Además contará con un motor que irá empujando el filamento hacia el cabezal para alimentarlo.

Para entender mejor el funcionamiento de la impresora de adición se podrán observar en la siguiente figura sus partes principales.

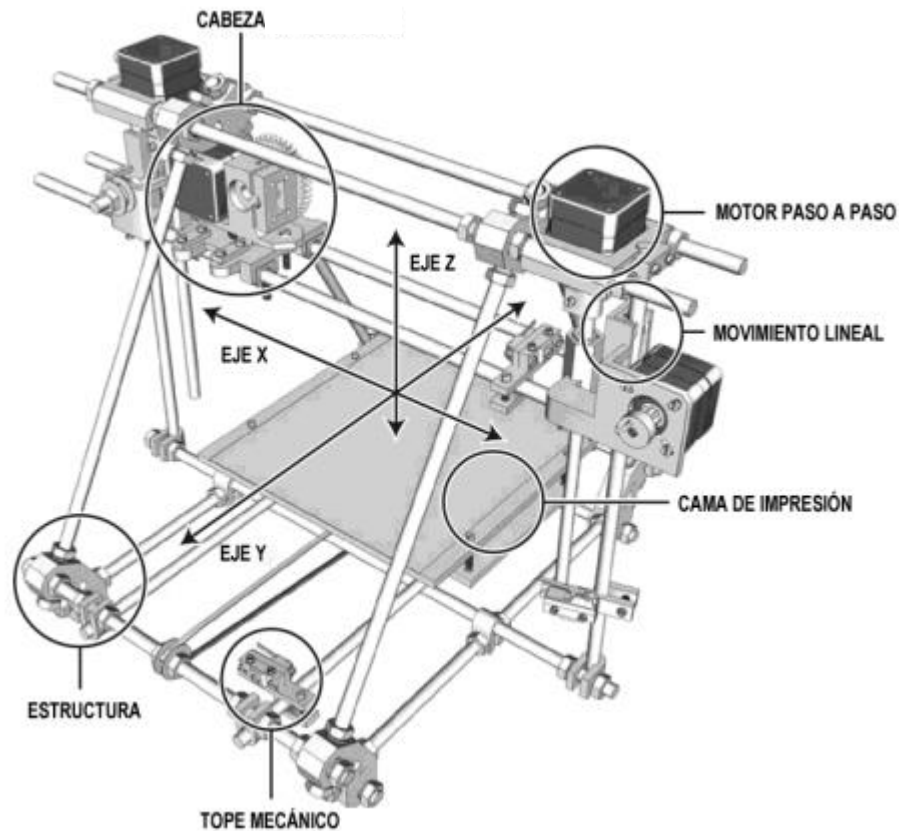


Figura 2. 2: Esquema de una impresora 3D de adición.⁵

Los ejes de movimiento de la cabeza son el eje X y el eje Z, es decir, el plano perpendicular al suelo, como se puede observar. En cambio el eje Y es el eje de movimiento de la cama de impresión. Cada eje tiene su propio motor paso a paso para moverse de forma independiente: mientras que el movimiento del eje X y del eje Y se combinan para crear una capa, el eje Z se encarga de cambiar la posición vertical del extrusor para moverse a la siguiente capa. Los movimientos rotacionales del motor se convierten en lineales con diferentes mecanismos como husillos o correas.

Sin embargo, se ha de saber que estas impresoras no son del tipo de equipo al que sólo tienes que encender para que funcione, sino que consta de muchos parámetros que se han de variar dependiendo de la impresión que se vaya a realizar para obtener un rendimiento óptimo. Los parámetros a variar pueden ser la densidad del relleno (entre 5% y 100%), el tipo de relleno (lineal, concéntrico, panel de abeja...) o la altura de cada capa, entre otros.

2.4.- ESTADO DEL ARTE

2.4.1.- Reciclaje de plásticos

Ahora que ya se conoce lo que es una impresora 3D y sus diferentes tecnologías, se procede a buscar información sobre el tema del reciclaje de plásticos.

El reciclaje de plásticos entendidos como residuos ha de procesarse para poder reutilizarlo posteriormente. Los plásticos son enviados a un centro de recuperación de materiales donde se ordenan por tipo de plástico. En esta instalación el plástico se limpia y se muele, obteniendo pequeños copos. Un depósito de flotación separa los plásticos de los residuos contaminantes en base a sus diferentes densidades y posteriormente se secan. Finalmente los copos se funden y filtran y se transforman en gránulos. Éstos se envían a las fábricas para poder ser transformados en nuevos productos.

2.4.2.- Obtención de filamento en fábricas

Como primer paso se estudiará cómo se obtiene el filamento mediante un proceso industrial. Se comienza con gránulos de PLA o ABS blanco claro. Posteriormente se someten a diferentes tratamientos para añadir color, dureza u otras propiedades. Tras estos procesos se secan dos horas entre 60°C y 80°C para evitar que se acumule humedad en el material, pues podría provocar la aparición de burbujas o irregularidades a la hora de crear el filamento. Se insertan estos gránulos en la extrusora, que se encontrará a 200°C, para obtener filamento. Cuando el material sale fundido por la boquilla se refrigera mediante un baño de agua. Finalmente todo el filamento atraviesa numerosos rodillos que lo tensan y lo doblan hasta llegar a una bobina, donde se enrolla y se empaqueta, listo para ser vendido.

2.4.3.- Modelos existentes de recicladoras

A continuación, y tras conocer el proceso industrial de obtención del filamento, se investiga sobre el reciclaje de plásticos más concreto, concerniente a este proyecto. Tras una búsqueda exhaustiva, se comparan los diferentes equipos encontrados y se comprueba que todos siguen el mismo esquema: obtener gránulos a partir del plástico a reciclar y posteriormente extruirlo mediante una boquilla cilíndrica.

Aquí se nombrarán algunos de los equipos que ya existen en la actualidad para reciclar plásticos y conseguir filamento para impresoras 3D.

El primer modelo encontrado fue el de Marcus Thymark, un ingeniero alemán. Este hombre crea un triturador con cuchillas y un eje hexagonal e incluso realiza una versión completamente montada con elementos de impresión 3D, como se observa en la siguiente imagen.

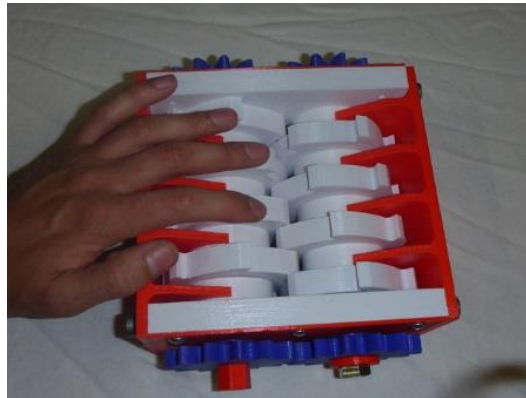


Figura 2. 3: Shredder de Thymark.

Se encontraron diferentes extrusoras que utilizaban pellets comerciales en lugar de material reciclado, pero realmente el fin es el mismo, con lo que sirvieron para encontrar una solución.

Ya que, en los comienzos las bobinas se vendían a precios elevados, pues productores se aprovechaban del hecho de que sólo sus propias bobinas servían, Hugh Lyman decide crear su propio filamento para su impresora 3D.



Figura 2. 4: Extrusora de Lyman.

Lyman es un hombre retirado que tiene un perfil en Thingiverse⁶ y numerosos diseños de su propia invención. Thingiverse es una página web en la que la gente puede compartir libremente sus diseños para que cualquier persona pueda realizarlos y mejorarlos. Él en concreto realiza 5 modelos para la misma extrusora, mejorando la tensión, la refrigeración y los controles, entre otros aspectos. La última versión se observa en la Figura 2.4.

Otro de los diseños que aparecieron fue el FelFil, un extrusor de filamento italiano creado por estudiantes de la Politécnica de Turin.

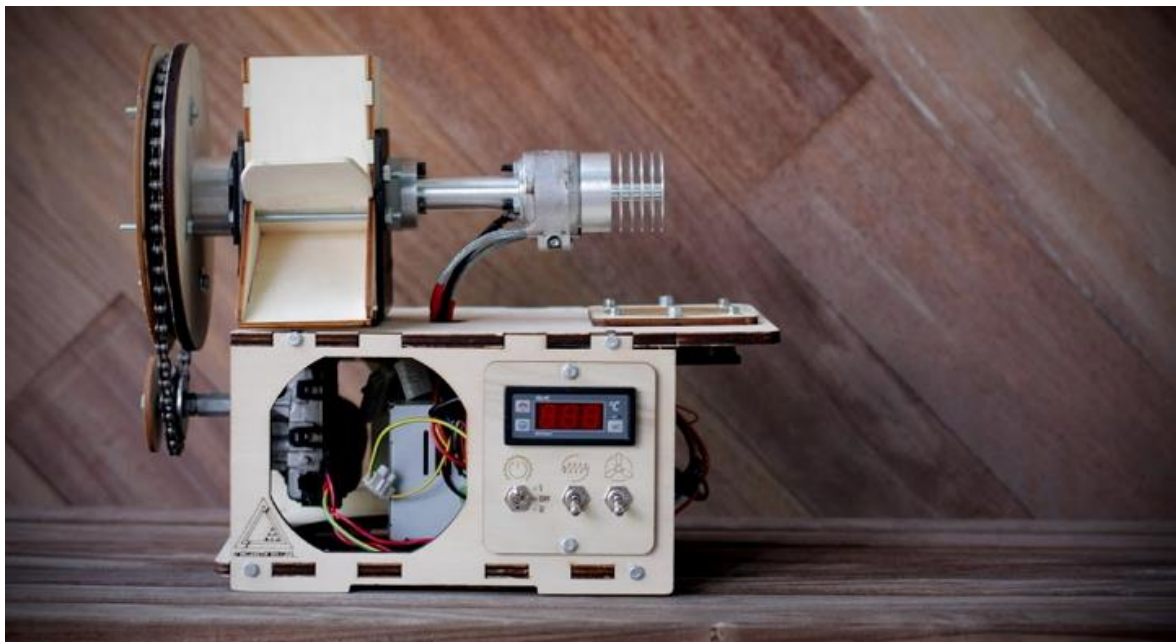


Figura 2. 5: Extrusor italiano FelFil.

El equipo de estudiantes comenta que se inspiraron en los extrusores industriales para crear su diseño. Es capaz de reciclar cualquier termoplástico cuyo punto de fusión no supere los 300°C. El extrusor utiliza componentes de bajo coste como el motor de un ventilador o la cadena de una bicicleta.

Otros diseños como el de Filamaker o Filabot siguen el esquema de calentar y extruir, con lo que se procede a buscar alternativas para encontrar una solución propia.

3.- Alternativas

3.1.- ANÁLISIS INICIAL

Tras realizar una investigación de mercado y comprobar el estado del arte se encontraron diversas soluciones, todas con varios puntos en común: se introducen pellets o trozos pequeños del material plástico en una tolva, se empujan mediante un tornillo sin fin y se calientan cuando se acercan a la salida para fundirlo y crear el filamento. Esta técnica está basada en la técnica de extrusión de plásticos, pero para que esto pueda llevarse a cabo, se necesita que el plástico a reciclar se encuentre en trocitos pequeños.

Inicialmente se contempla la posibilidad de fundir las piezas y extruir directamente el filamento, es decir, en lugar de usar pellets como en la extrusión común, se utilizan directamente las piezas a reciclar. Esta solución daría ciertos problemas con respecto a la gran energía utilizada para mantener a altas temperaturas tanta cantidad de material y también con respecto a las dificultades que aparecerían para aplicar la presión necesaria en la boquilla. En los subapartados siguientes se desarrolla con mayor precisión.

Para solucionar esto, se decide finalmente dividir el proyecto en dos partes:

- ♦ La primera se centrará en la obtención de pequeños trozos de plástico, parecidos a pellets, a partir de piezas susceptibles de ser recicladas. Éstas serían piezas impresas tanto en PLA como en ABS, los materiales termoplásticos más utilizados en el mundo de la impresión 3D.
- ♦ Esta segunda parte se encargará de transformar los pellets conseguidos en la primera parte en un filamento de sección circular continua. En este caso se intentará conseguir un diámetro de filamento para impresoras que necesiten 3 mm de diámetro, pues éstas son las que la empresa posee.

En la siguiente imagen se observará un esquema del proceso que se pretende seguir para obtener el filamento a partir de piezas de impresión 3D defectuosas.

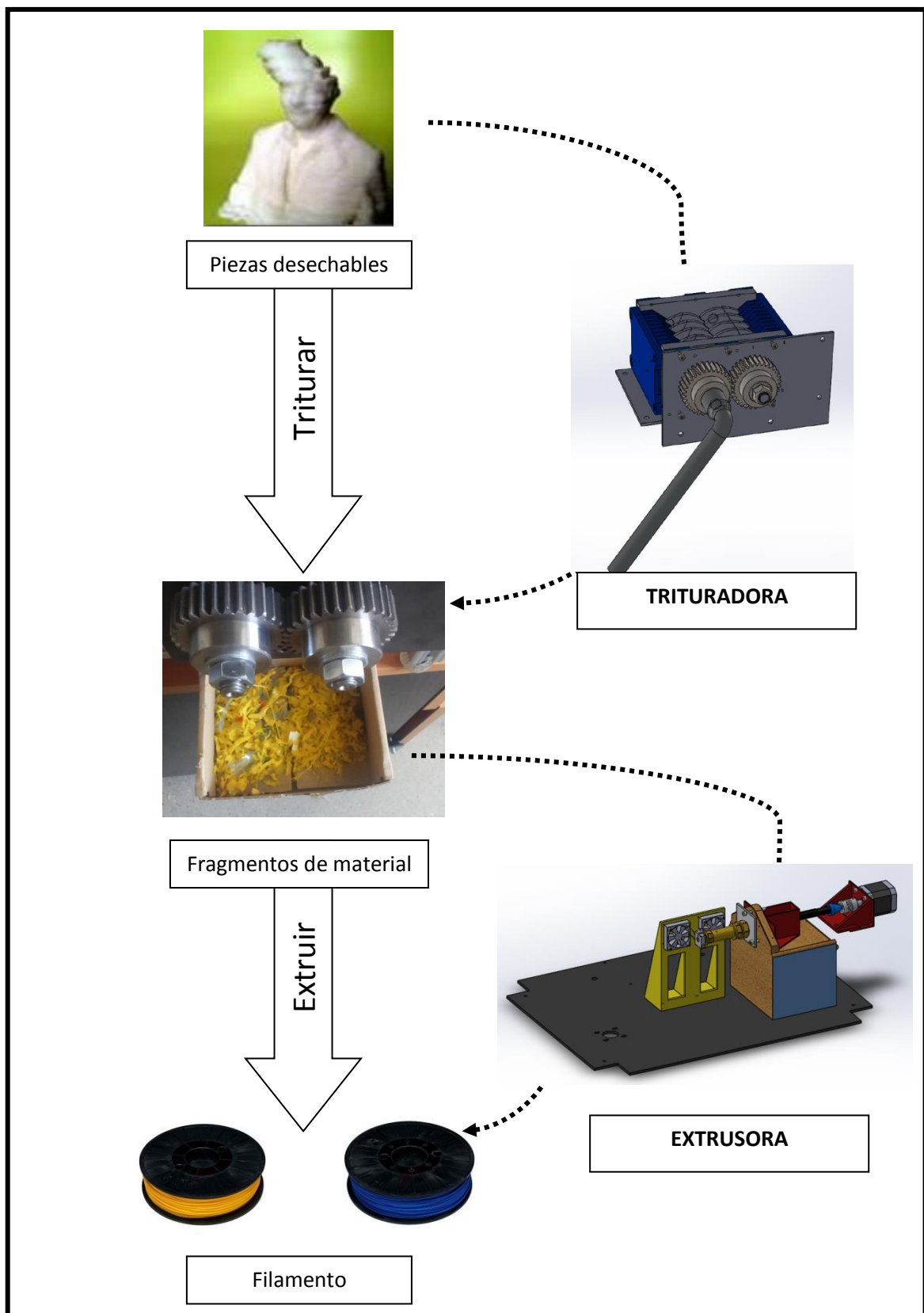


Figura 3. 1: Esquema del proceso.

Para su construcción, se utilizará la estructura de una antigua impresora 3D comercial: Tumaker Voladora, como la que se puede apreciar en la siguiente imagen.



Figura 3. 2: Impresora 3D Tumaker Voladora.

Se realiza un estudio profundo sobre los materiales y las técnicas ya existentes referentes al tema que se está tratando con el fin de familiarizarse con ello y que sea más fácil comprender los fenómenos que ocurren en los materiales y los cambios que se introducen en estas técnicas

Este apartado está dividido en dos partes: la primera describe las diferentes opciones para conseguir pellets encontradas y descartadas y el motivo, y la segunda parte muestra la técnica que se va a seguir en el proceso de extrusión del filamento.

3.2.- OBTENER PELLETS

Para conseguir los pellets o trozos de plástico a partir de piezas completas se tuvieron en cuenta diferentes ideas que se cuentan a continuación.

3.2.1.- Opciones previas

Ya que el objetivo es conseguir trozos pequeños de plástico, se contempló la posibilidad de fundir las piezas en una especie de tolva, dejar que el propio material se

extruyese hacia abajo por su propio peso y cortarlo con una cuchilla a medida que sale, según la configuración de la Figura 3.3.

Ésta sería una buena opción, pues los pellets que conseguiríamos serían más homogéneos en tamaño, con lo que el procesado posterior en la extrusora tendría un mejor acabado. Pero calentar el material a la temperatura necesaria consumiría demasiada energía, y se ha de recordar que en este proyecto prima el bajo coste.

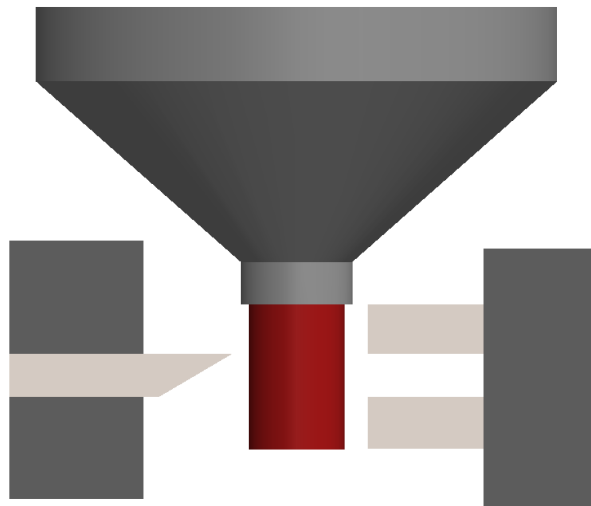


Figura 3. 3: Fundición del material para conseguir pellets.

Otra opción que se consideró fue el uso de un hilo caliente cortador (Hot wire cutter) como el usado para cortar porexpan y otros materiales, pero en configuración de red. Esto también constituiría un problema de consumo energético, con lo que se descartó.

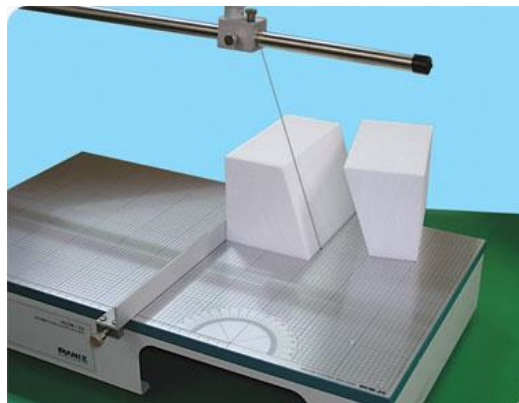


Figura 3. 4: Hot wire cutter.

Para evitar la necesidad de corriente eléctrica, se pensó en maneras mecánicas de trocear las piezas, es decir, aplicando fuerzas externas.

Se planteó una guillotina para seccionar el material manualmente, pero llevaría demasiado trabajo y su eficiencia sería demasiado baja.

La última opción, que será la elegida y explicada en el apartado de cálculos, se basa en las trituradoras ya existentes, tanto agrícolas como forestales o de obra pública. Éstas tienen un sistema que consiste en la rotación de un cilindro con cuchillas afiladas que empujan el material contra una superficie fija, como se puede comprobar en la Figura 3.5.

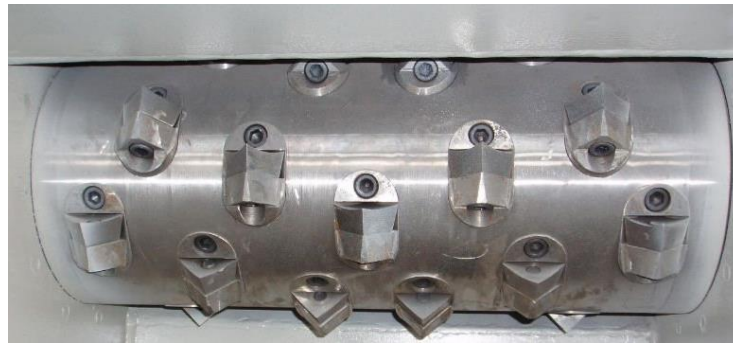


Figura 3. 5: Trituradora de madera.

Más adelante se desarrollará esta configuración y los cambios que se han realizado para adaptarlos a la aplicación actual.

3.3.- OBTENER FILAMENTO

En este apartado no hubo discusión: ambos materiales, PLA y ABS, son termoplásticos, con lo que se conseguirá el filamento utilizando un método basado en su procesamiento por fundición. Es el método más sencillo para poder obtener un diámetro constante a pesar de que necesite una fuente de alimentación para calentar el material. De todas formas y tratándose de dar forma a un plástico, será inevitable el proceso de calentamiento.

Para explicar los principios del procesamiento por fundición de los termoplásticos, se añade la Figura 3.6, que muestra el esquema general de este proceso, la extrusión.

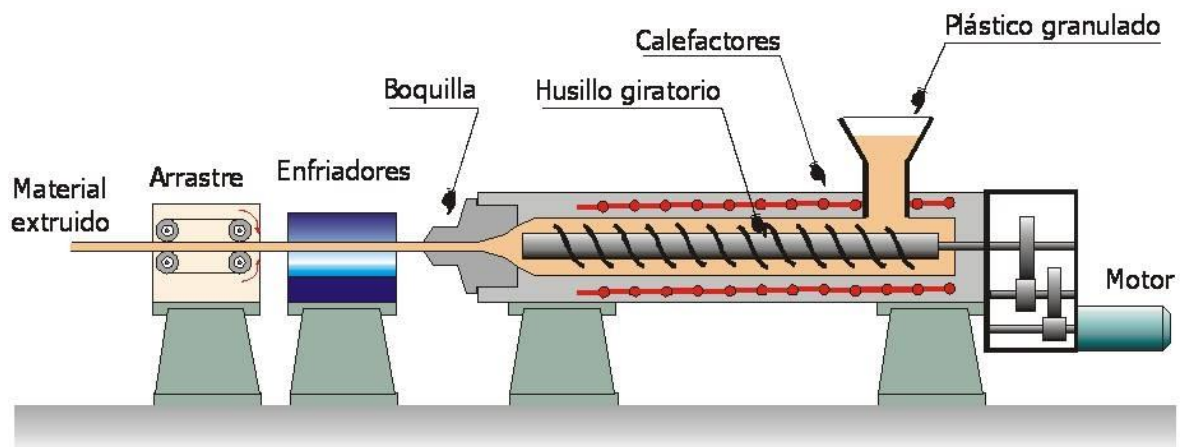


Figura 3. 6: Extrusión de plásticos.

Debido a que la extrusora de este proyecto basará su funcionamiento en una extrusora comercial de gran tamaño, se ampliarán a continuación las partes que lo conforman y su actividad, así como sus diferentes configuraciones.

A partir de esta información se desarrollará la ingeniería básica de la extrusora, utilizando elementos comerciales análogos a los del extrusor real que realicen las mismas funciones, pero más simples para conseguir abaratar el coste de la compra.

El proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido pasa a través de una boquilla para producir un perfil continuo y, en principio, longitud indefinida. El material entra en la extrusora en forma sólida, generalmente en forma de gránulos, y sale en estado fundido.

Un tornillo de Arquímedes gira en el interior de un cilindro o cuerpo calentado mediante resistencias eléctricas. En el otro extremo del cuerpo, donde no se encuentra la zona de alimentación de material sólido, un cabezal con una boquilla de salida de geometría definida permite que el producto se extruya con el perfil buscado.

Durante el transporte del material a lo largo del cuerpo existen dos fuerzas de fricción: la superficie del tornillo y la superficie interna del cuerpo. La fricción con la pared interna del cuerpo es la que empuja al material a continuar, mientras que la fricción con el tornillo es la que impide avanzar, según el modelo de Darnell y Mol en 1956.⁷ Es decir, cuanto mayor rugosidad tenga la pared interna del cuerpo y menor la del tornillo, más fácil será el transporte del material. Si el filete del tornillo es simple y no doble se mejora también el transporte ya que se genera menor fricción.

Cuando todas las partículas han fundido se supone que es porque hay llegado al cabezal. Este flujo se modela mediante tres tipos distintos:

- El flujo de arrastre o fricción, debido a la fricción del material con el tornillo y con las paredes del cilindro, principal responsable del movimiento del material desde la tolva hasta la salida.
- El flujo de presión o de retroceso, opuesto al anterior y debido a la diferencia de presión entre la tolva y el cabezal de la máquina, originada por la restricción que impone la boquilla.
- El flujo de pérdida o de fugas, entre el cilindro y el filete del tornillo, también opuesto al flujo de arrastre y originado por el gradiente de presión.

Como ya se ha mencionado, se producen cambios de forma y tamaño tras extruir el material, por ello las boquillas se diseñan de manera que estos cambios se vean compensados. Hay tres factores principales que provocan estos cambios:

- Tensionado: a medida que el material sale de la extrusora, un sistema que generalmente consiste en rodillos mantiene el material tenso. Esto hace que se reduzca un poco el tamaño del material. Además, los productos no circulares pueden sufrir cambios de forma por el estirado.

- Relajamiento: el material está sometido a grandes deformaciones y tensiones (esfuerzos normales) en la zona previa a la salida, por lo que, debido a su naturaleza viscoelástica, se relaja conforme sale por la boquilla. Esto provoca un hinchamiento del material.

- Enfriamiento: un material fundido se contrae cuando se enfría, reduciendo su tamaño y aumentando su densidad. Los plásticos semicristalinos se contraen más que los amorfos y, en cualquier caso, el método, velocidad y homogeneidad del enfriamiento condicionan la microestructura del material.

El diseño de la máquina que consiga filamento a partir de trozos de material sólido se basará en las extrusoras comerciales.

4.- Ingeniería básica

4.1.- TRITURADORA

En la Introducción se ha comentado que el objetivo perseguido se conseguirá dividiendo el proceso en dos partes. Ya se han explicado en Estudios previos los materiales que se van a utilizar (ABS y PLA), y las propiedades pertinentes, relacionadas con el proyecto y necesarias para el diseño del proyecto, tanto de la trituradora como de la extrusora.

Este apartado se centrará en la explicación y los cálculos necesarios para el diseño de la Trituradora, la primera parte del proceso. El primer paso será la explicación del diseño conceptual, comentando las partes principales de la máquina a construir. Más tarde se hablará de la resistencia y de los materiales a utilizar.

Como ya se había comentado en el apartado de Estudios previos, la opción elegida es el molino triturador, similar a las trituradoras de madera. Pero el mecanizado del cilindro es demasiado complejo e implicaría una gran pérdida de material, con lo que se buscan alternativas para solucionar este problema. Existen unas trituradoras que consisten en unas cuchillas enfrentadas que giran sobre dos ejes respectivamente, como se puede apreciar.



Figura 4. 1: Trituradora de dos ejes.

Pero este diseño es demasiado grande para las piezas que se van a necesitar triturar. Se considera la posibilidad de diseñar una trituradora de longitud variable, pero se trata de una máquina única y sin el propósito de comercialización en cadena, con lo que los posteriores diseños se podrán adaptar al tamaño de piezas a triturar exigiendo aumentando la longitud de los ejes y el número de cuchillas. Este prediseño está basado en el modelo descrito anteriormente en la Figura 2.3.

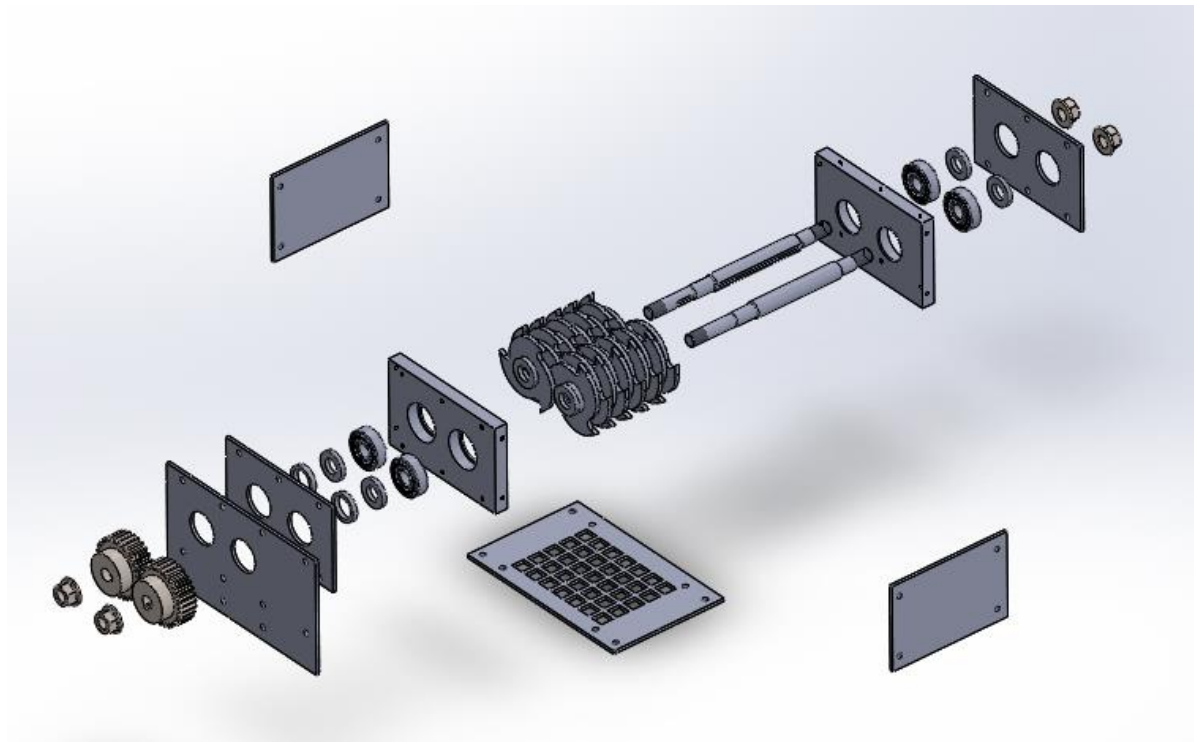


Figura 4. 7 Vista explosionada del diseño inicial de la trituradora.

En la Figura 4. 7 se aprecia la vista explosionada del diseño inicial de la trituradora, en la que las siguientes explicaciones se basarán, además del apartado de planos, donde aparece más detalladamente el diseño general e individual por pieza.

Ya que se trata de Ingeniería básica, se hablará de los rasgos más generales de las piezas principales, pasando a las especificaciones y cálculos en la parte de Ingeniería de detalle.

4.1.1.- Cuchillas

Principalmente, el diseño consta de unas cuchillas con filos enfrentados con el fin de sujetar la pieza a medida que giran sobre su eje central. En la imagen se puede ver cómo, si las cuchillas siguen girando, los extremos se clavan en la pieza, evitando así que se escape y empujándola hacia abajo.

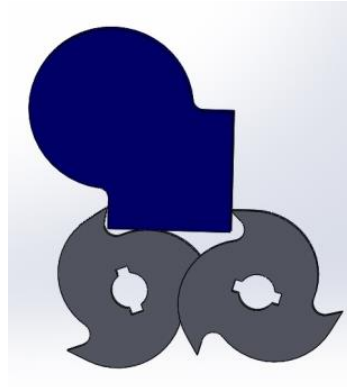


Figura 4. 8 Ilustración del sistema de sujeción y triturado de piezas.

El número de cuchillas dependerá del ancho de cada una y de la longitud de la caja donde irán acopladas.

En la propia imagen también se observa el agujero interno por donde pasará el eje y los chaveteros. Se tienen dos chaveteros enfrentados con el fin de realizar sólo un modelo de cuchilla y dos posiciones relativas respecto al eje, que tendrá solo una chaveta.

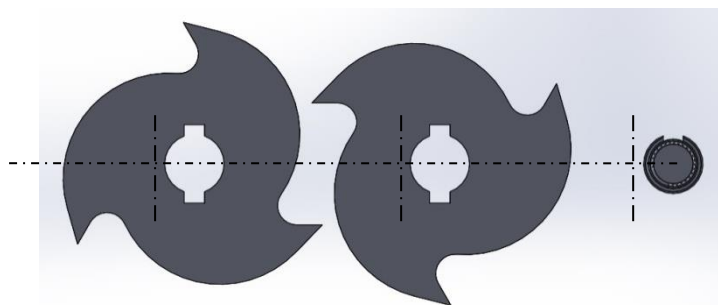


Figura 4. 9 Dos posiciones de las cuchillas para una sola chaveta.

4.1.2.- Ejes

Las dimensiones principales de un eje son sus diámetros y sus longitudes. A parte, se tienen características extra, como pueden ser los radios de acuerdo, las chavetas o las roscas.

El diámetro que soportará a las cuchillas se adaptará al diámetro interior diseñado en éstas. Además, se ha considerado que el eje gire con las cuchillas para hacer un diseño más fácil, en lugar de hacer que las cuchillas girasen sobre el eje, pues en este caso todas se moverán con un solo input de momento y una chaveta por eje. Así que habrá una chaveta que una el eje con todas las cuchillas, y se buscará alguna manera de introducir el esfuerzo para que los ejes giren.

La longitud de la zona donde irán las cuchillas dependerá del número de cuchillas a colocar.

Otro diámetro importante es aquel que servirá como apoyo. En este caso habrá dos, e irán colocados sobre rodamientos para ayudar al giro del eje y evitar rozamientos. Es la mejor opción, pues las velocidades a las que va a girar el eje son muy bajas, ya que se recuerda que el input será mecánico, por esfuerzo mecánico del operario. Con esto, la longitud del rodamiento también condicionará la longitud de estas zonas.

En los extremos se roscan los ejes con el fin de apretar las cuchillas y evitar desalineaciones entre ellas, pues provocaría rozamiento y desgaste, debilitando las cuchillas y haciéndolas más propensas a fractura. Aprovechando la rosca, se usarán las tuercas para encajarlas con una llave de tubo acodada y hacerlas girar.

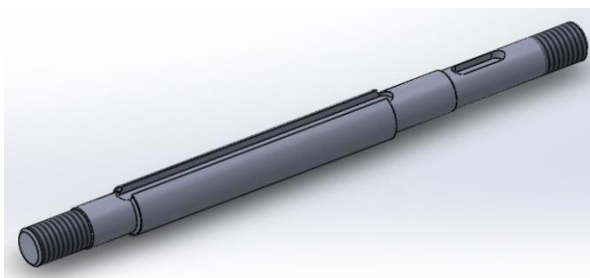


Figura 4. 10 Eje con dos chavetas.

4.1.3.- Caja

Todos estos elementos irán colocados dentro de la caja, que será un sub-ensamblaje. Esto es debido a que es más fácil y barato mecanizar todas las caras por separado y más tarde unir las, que mecanizar la caja a partir de una sola pieza, además de que el ensamblaje se complicaría.

Este sub-ensamblaje consta de dos tapas gruesas, dos tapas externas y dos tapas laterales, además de una rejilla inferior.

En las tapas gruesas irán acopladas los rodamientos, de ahí su nombre, pues el ancho de estas tapas será el mismo que el de los rodamientos. Aprovechando este hecho, se usa como estructura principal, donde irán unidos el resto de elementos de la caja, es decir, tendrá agujeros roscados donde encajarán los tornillos que permitan la unión entre piezas.

La función de las tapas externas es la de retener a los rodamientos en su posición adecuada, evitando la actuación directa de alguna fuerza axial, a pesar de que teóricamente no deba haber. Tal y como se observa en la figura, la tapa gruesa tiene un agujero pasante mecanizado con un borde adaptado a las dimensiones del anillo exterior del rodamiento.

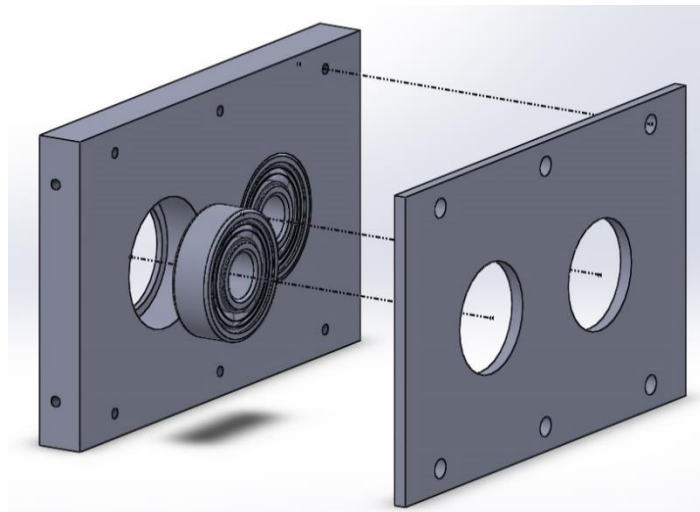


Figura 4. 11 Ensamblaje de la caja de rodamientos.

Las tapas laterales darán una mayor estabilidad y cohesión a todo el sub-ensamblaje y sobrellevará poco esfuerzo, pues será absorbido axialmente por el eje que, como ya se ha mencionado, irá roscado en los extremos.

La tapa externa frontal se diseña con el fin de unir la caja a la estructura metálica que se va a utilizar. Requiere también de aperturas pues los ejes sobresaldrán de la estructura para facilitar el giro con la llave de tubo.

Por último, la rejilla también es un elemento de sujeción de la caja a la estructura, y se le impone una segunda función como filtro para los elementos triturados simplemente haciendo unos cortes para formar una rejilla.

4.1.4.- Arandelas

Éstas se utilizan como elementos separadores de las cuchillas pues, como ya se ha comentado anteriormente, los ejes van roscados en sus extremos con el fin de apretar las cuchillas y evitar desalineaciones en el giro. Pero esto por sí sólo no basta, por eso se recurre a las arandelas.

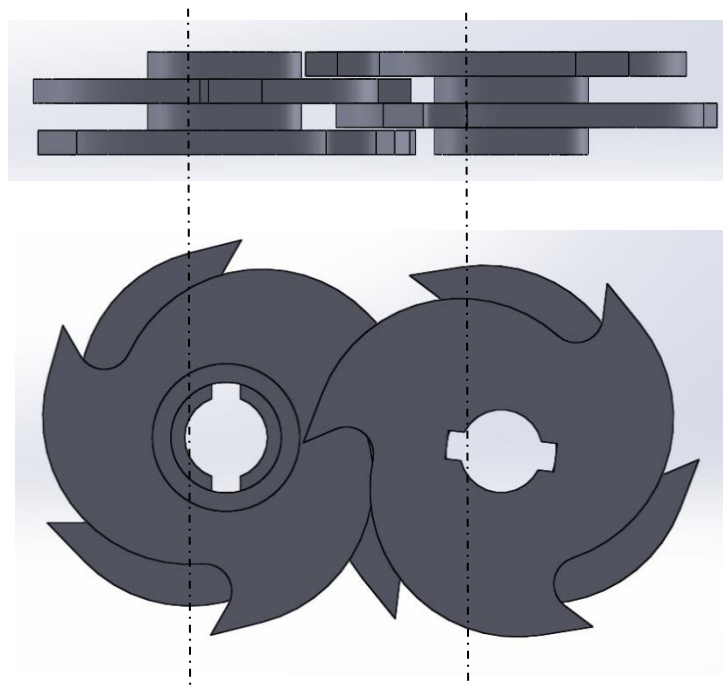


Figura 4. 12 Función de las arandelas entre cuchillas.

La función de las arandelas será pues la separación homogénea de las cuchillas para evitar desgaste en éstas y la distribución uniforme de la presión.

Para sus dimensiones principales, se utilizará un ancho ligeramente superior que el de las cuchillas para evitar rozamientos por los inevitables errores en las medidas. Además contarán con un diámetro interno que no entorpezca la actuación de la chaveta y un diámetro externo que no se cruce en el giro de la cuchilla opuesta.

4.1.5.- Engranajes

Se utilizarán engranajes como método de transmisión de potencia entre ambos ejes. Para ello se tendrá en cuenta la distancia entre ejes que se impondrá y el diámetro que se requiere. Para transmitir el giro del engranaje al eje, se usará otra chaveta, con lo que se tendrá en cuenta para el diseño final del eje y para el posterior mecanizado de los engranajes.

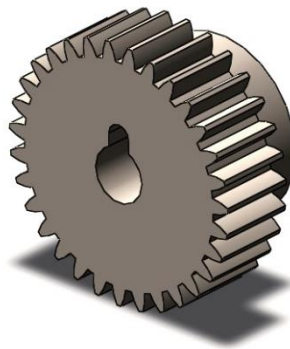


Figura 4. 13 Engranaje mecanizado para transmitir la potencia con chavetas.

4.2.- EXTRUSORA

Como ya se ha comentado en Estudio previos, el funcionamiento de este equipo se basará en las extrusoras e inyectoras convencionales. Su base teórica también se ha explicado previamente, con lo que el diseño básico de cada pieza irá de acuerdo a las especificaciones planteadas.

Las partes básicas serán el cabezal, el canal, el tornillo de Arquímedes, la alimentación y el motor.

4.2.1.- Cabezal

El cabezal será una pieza colocada al final del canal con una apertura de un diámetro específico para obtener el filamento de 1.75 mm. Tendrá un perfil interno que propicie la presión necesaria para que el material fluya de manera continua y homogénea.

Se utilizará un tapón macho de rosca que posteriormente se taladrará para obtener la apertura mencionada. El perfil interno ya cuenta con una disminución progresiva de diámetro, con lo que reduce el mecanizado de la pieza. Cuenta también con una rosca macho, que será útil para unirla con el canal o cuerpo.

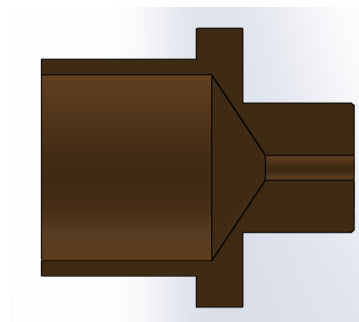


Figura 4. 14 Tapón macho como cabezal del extrusor.

En la figura se puede apreciar el perfil interno con el que cuenta y el agujero que se pretende realizar, por donde saldrá el material extruido en forma de filamento. En el apartado de cálculos se hablará sobre el diseño.

4.2.2.- Cuerpo

La función de este elemento es el de hacer de canal para que el tornillo de Arquímedes pueda empujar el material hacia el cabezal con facilidad. El requisito primordial es que se pueda unir de alguna manera segura al cabezal, para evitar que el plástico caliente se desborde por la juntura y provoque algún daño. Es decir, se precisa de un extremo de rosca hembra de la misma medida que la rosca macho del cabezal.

Además, el tornillo de Arquímedes tiene que poder caber dentro del cuerpo, con lo que su diámetro interno deberá ser del mismo diámetro pero con cierta holgura para facilitar el giro.

Para una mayor facilidad a la hora de introducir material dentro del cuerpo, se podría buscar un perfil interno cónico de pendiente no muy pronunciada, con lo que la presión sobre el material crecería paulatinamente. Se recuerda que se prefiere una alta rugosidad en la pared interna, pues ayuda al transporte del material.

El plástico se debería pre-tratar a temperaturas de 80°C para eliminar agua que pudiese quedar ocluida de la humedad del ambiente. En caso de que no se realice esta tarea, el cuerpo debería tener un orificio de venteo, cuya distancia al cabezal y su diámetro deberían ser estudiados para realizarlo justo donde el plástico está a altas temperaturas pero aún a presión atmosférica para evitar que rebose.

El cuerpo se tratará probablemente de un sub-ensamblaje, pues es muy difícil encontrar una sola pieza comercial con tantas especificaciones, sin tener que diseñarla y mecanizarla en taller, una opción mucho más cara.

4.2.3.- Tornillo de Arquímedes

Esta pieza se encarga de empujar el material alimentado (pellets de plástico) de forma lineal utilizando un movimiento de giro, es decir, sigue el mismo principio que el tornillo de Arquímedes. Dependiendo del sentido de giro, empujará el material de forma lineal hacia el cabezal o hacia el otro extremo, con lo que se ha de girar el motor en el sentido propicio.

Como ya se ha mencionado, su diámetro ha de encajar con cierta holgura dentro del cuerpo. Su longitud deberá ser mayor que la longitud del cuerpo, pues además de la zona de transición y de dosificado, está la zona de alimentación, que se encuentra fuera del canal para proveer al tornillo de material.



Figura 4. 15 Broca como tornillo de Arquímedes.

Inicialmente se considera el utilizar una broca, buscando en catálogo para encontrar brocas largas, de canal profundo y resistente a altas temperaturas. La broca que se observa en la imagen es el modelo CAD de una broca para taladrar madera BM12x230 de Blue-Master, pues tiene un recubrimiento de óxido negro, bastante económico y resistente a altas temperaturas y a la corrosión, además de que también actúan como lubricante.

4.2.4.- Alimentación

La alimentación es la zona donde se verterán los pellets y de donde el tornillo los recogerá para meterlos dentro del cuerpo hasta el cabezal. Se diseñará de manera que no queden pellets sin recoger, con una curvatura inferior del diámetro del tornillo.

Como tendrá una geometría compleja, pero no requiere de altas temperaturas, se podrá obtener en impresión 3D. Se buscará un separador aislante para que no llegue el calor del cuerpo por conducción al alimentador y lo derrita.

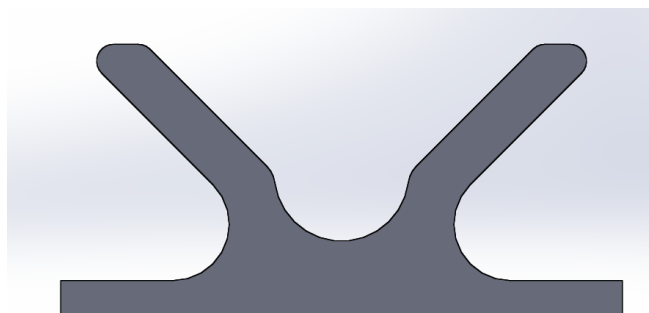


Figura 4. 16 Diseño inicial del alimentador.

Este diseño se desecha por requerir de soportes en la impresión.

4.2.5.- Motor

En la máquina anterior, la trituradora, se había considerado que un operario se encargase de insertar el par para producir el giro. En este caso, para que el giro sea constante y que el material tenga un empuje homogéneo, se utilizará un motor en lugar de una fuerza mecánica externa, pues una persona no puede provocar un giro a una velocidad angular constante en el tiempo. Los cálculos del motor se desarrollarán en los anexos de la extrusora.

4.2.6.- Acoplamiento motor-broca

Para poder transmitir el par del motor se requerirá de un acoplamiento que una su eje con la broca a girar. Esto implica que deberá poder realizar una sujeción suficiente para evitar deslizamiento entre ejes.

Además, sería conveniente que pudiese absorber desalineaciones tanto axiales como radiales puesto que el alimentador, donde irá sujeto el motor, está impreso en 3D y existen probabilidades de imprecisión en el montaje.

5.- Ingeniería de detalle

5.1.- TRITURADORA

5.1.1.- Cuchilla

Las cuchillas serán los elementos giratorios cuyos filos se encargarán de triturar directamente el material, con lo que se le aplicarán unos esfuerzos considerables. Debido a la geometría que tienen y al número que se necesitan (20 cuchillas), se recurre al corte por láser.

Su geometría se basa en unas cuchillas ya existentes, del modelo del Thymark. El diseño final es una modificación de este último para poder enganchar piezas de mayor dimensión, incrementando la curvatura y la excentricidad del filo.



Figura 5. 1: Diseño final de cuchilla.

En la imagen se observa que los filos son tangentes a las circunferencias que los forman, pues esto da una mayor consistencia al diseño. Esto se demuestra en el apartado de simulaciones de los anexos.

Como ya se ha mencionado antes, irán unidas a un eje mediante chavetero.

5.1.2.- Ejes

Este ensamblaje contará con dos ejes exactamente iguales. Ambos serán de acero de alta resistencia F125 normalizado, cuyo límite elástico es de 820 MPa.

Tendrán diferentes diámetros para adaptarse a las diferentes solicitaciones. La parte media de los ejes sujetará las cuchillas, con lo que irá mecanizada para poder colocar un chavetero. Tanto el diámetro como la chaveta han de tener las medidas correctas para poder introducir las cuchillas.



Figura 5. 2: Eje.

Los diámetros de los extremos corresponderán al interior de los rodamientos, pues tienen que encajar mediante interferencia. Así se consiguen los ejes biapoyados con capacidad de giro a bajo rozamiento.

En la imagen se observa que en los extremos está roscado. Esto es para apretar las cuchillas y unir todos los elementos de forma axial, evitando que los elementos puedan moverse y acabar soltándose, lo que podría suponer un peligro para el usuario.

Otra chaveta se encarga de sujetar radialmente al engranaje. Se colocan engranajes para que los ejes se muevan a la vez pero en sentidos opuestos. El diámetro interno del engranaje es mejor que el diámetro interno del rodamiento, por ello se necesita otra reducción en el eje.

Todas las reducciones de diámetro deberán llevar un radio de acuerdo que siga las especificaciones de la Norma UNE 18132:1978.

Las chavetas y sus dimensiones deberán cumplir también una norma, la Norma UNE 17102-1:1967.

La descripción detallada de sus dimensiones se encuentra en el Anexo Cálculos y las demostraciones en el Anexo Simulaciones.

5.1.3.- Arandela

La arandela se utilizará entre cuchillas para separarlas y evitar el rozamiento, utilizando un ancho ligeramente superior al de las cuchillas. Se realizan en impresión 3D puesto que, a pesar de la mala respuesta a cizalladura de estas piezas, las propiedades mecánicas a compresión son buenas.



Figura 5. 3: Arandela.

Además no sólo se utilizará para separar las cuchillas sino que se requerirá un par más, una por cada eje. Transmite la presión entre los rodamientos y los engranajes, puesto que estos últimos necesitan una arandela de diámetro interno suficientemente grande como para que su chaveta no choque. En la figura se puede observar la arandela, el elemento azul que rodea al eje. El chavetero no llega hasta ella, pero se tiene en cuenta que éste es un diseño conceptual y que puede haber ciertos errores que lleven a una interferencia no deseada.

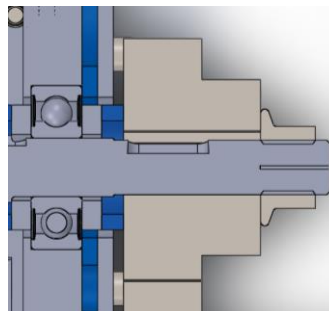


Figura 5. 4: Arandela contra engranaje.

5.1.4.- Arandela lateral

Estas arandelas son creadas especialmente para transmitir la presión axial a los rodamientos. Tienen el mismo diámetro exterior de las arandelas puesto que van a estar en contacto directo y así se obtiene una mayor superficie de apoyo, pero un diámetro interno menor.



Figura 5. 5: Arandela lateral.

Las arandelas anteriores no se podían utilizar para los rodamientos, pues su zona de contacto tenía un diámetro menor que el diámetro interno de la arandela. Se puede ver en la siguiente imagen:

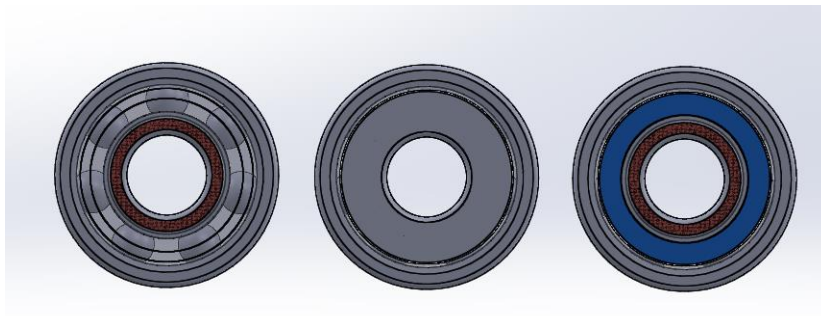


Figura 5. 6: Rodamientos.

El primer rodamiento no tiene arandela. La zona señalada en rojo es la zona de contacto. Como se habrá observado, con la arandela lateral se cubre esta zona, mientras que con la arandela simple, esta zona sigue quedando descubierta, es decir, no hay contacto. Por ello es necesaria la existencia de la arandela lateral en ambos lados de los rodamientos. Al haber dos ejes habrá cuatro rodamientos de apoyo, dos por eje, con lo que habrá 8 arandelas laterales en total.

5.1.5.- Rodamiento

Los rodamientos son los apoyos de los ejes. Tendrán un diámetro interno correspondiente con el diámetro extremo del eje e irán unidos por interferencia en las tolerancias de mecanizado.



Figura 5. 7: Rodamientos SKF-6302.

La carga radial máxima a soportar en estática es de 5400N, valor que no se va a alcanzar con la aplicación referida, y no va a sufrir apenas fuerza axial, con lo que este rodamiento es válido.

Su diámetro externo irá acoplado a los agujeros mecanizados de la tapa gruesa, que tendrán una profundidad igual que el rodamiento, además de una rebaba final que ayudará a sujetarlo axialmente. Esto se observa en la Figura 5.8. Para fijarlos axialmente del otro lado, se utilizará una tapa externa que tendrá unos agujeros cuyo diámetro sea igual que el diámetro interior del anillo exterior del rodamiento.

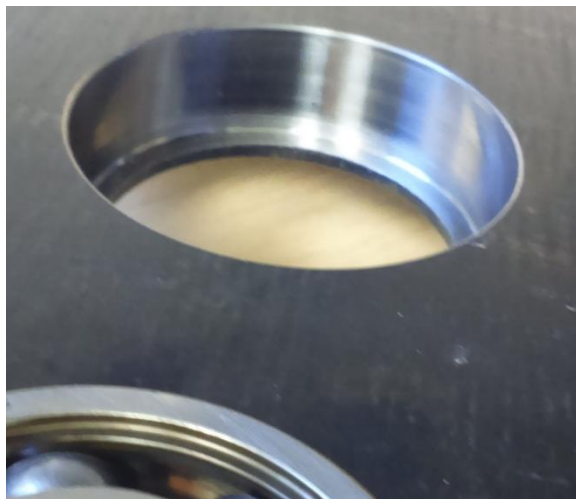


Figura 5. 8: Rebaba de la tapa gruesa.

5.1.6.- Tapa gruesa

Habrà dos tapas gruesas, una por cada extremo de los ejes para poder colocar los rodamientos anteriormente explicados. Tendrán dos agujeros pasantes con una rebaba para sujetarlos en una dirección axial, como ya se ha comentado en el apartado de rodamientos. La distancia que habrá entre los agujeros será la misma que haya entre ejes. Su valor influye directamente en el diámetro externo de las arandelas, como ya se ha comentado en la ingeniería básica en la Figura 4. 12 Función de las arandelas entre cuchillas.), pues se ha de evitar que la cuchilla roce a la arandela en su trayectoria de giro. Esta distancia entre centros también habrá de tenerse en cuenta para escoger los engranajes, pues el diámetro primitivo ha de ser equivalente a este valor.

Asimismo contará con seis agujeros roscados repartidos uniformemente en la parte frontal para unir la tapa externa, que sujetará axialmente el rodamiento en la otra dirección. También cuenta con un par de agujeros roscados por la parte de abajo para ser unido a la rejilla, y ésta a su vez a la estructura. Tendrá otros cuatro agujeros roscados, dos por cada lateral, para unir las tapas laterales a la trituradora. Todos los agujeros serán de métrica M4 y profundidad de 10 mm.



Figura 5. 9: Tapa gruesa.

Es una pieza cortada por haz láser debido a su geometría de perfil continuo. Posteriormente se ha mecanizado en el taller para realizar las roscas y los diámetros donde irán colocados los rodamientos.

5.1.7.- Tapa externa

Esta tapa irá colocada sobre la tapa gruesa para sujetar axialmente los rodamientos. Tendrá las mismas dimensiones principales que la tapa gruesa, es decir, los seis agujeros por donde pasarán los tornillos a los agujeros roscados y las dos aperturas para que puedan pasar los ejes a través de ellas.



Figura 5. 10: Tapa externa.

Se realiza en impresora 3D ya que no va a soportar demasiados esfuerzos porque, como ya se ha comentado, no habrá una fuerza axial elevada. Estas tapas se colocarán solamente como seguro.

El perfil no es exactamente el mismo que la tapa gruesa. Esto se debe a que se ha intentado suprimir todo el material posible de la pieza con el fin de disminuir el material usado, a la vez que evitar que sea muy endeble. De todas formas esta pieza irá comprimida entre dos planchas de acero y, como ya se ha dicho anteriormente en el apartado de las arandelas, las piezas de impresión 3D soportan muy bien los esfuerzos a compresión o esfuerzos en la dirección de impresión.

Estas tapas irán colocadas por la parte externa de la tapa gruesa e irán en contacto con el anillo externo de los rodamientos.

5.1.8.- Rejilla

La rejilla ya es un elemento de sujeción intermedio entre la trituradora y la estructura de aluminio, con lo que a la hora de diseñarse ya se ha tenido en cuenta que va a tener que unirse de forma segura a ambos elementos.

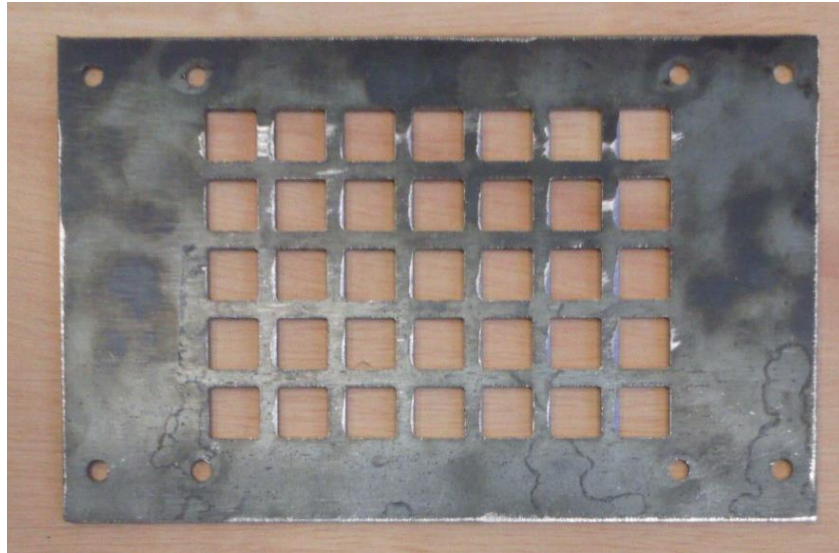


Figura 5. 11: Rejilla.

Será una placa cortada a laser que tendrá unos agujeros para los tornillos. Los que la unan a la estructura tendrán la cabeza por encima, y los tornillos que la unan a las tapas gruesas de la trituradora, tendrán la cabeza por debajo. Esto dificulta el diseño, puesto que se tienen que alinear los agujeros para que las cabezas de tornillo que están por debajo de la placa no choquen contra el perfil de la estructura e impidan que la rejilla se apoye en las barras. En la siguiente imagen se aprecia mejor esta explicación.

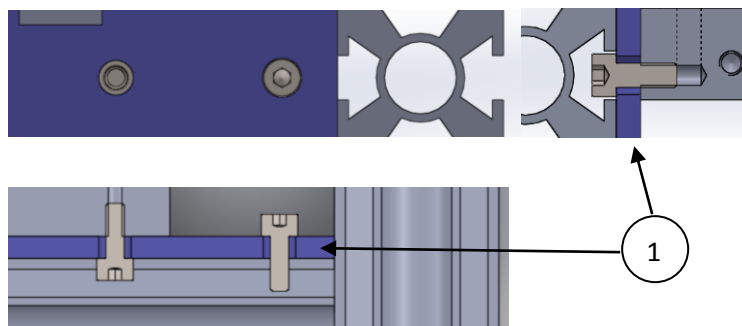


Figura 5. 12: La cabeza de los tornillos de unión de la rejilla con la tapa gruesa.

El elemento 1 es la rejilla. En la vista de planta se puede observar que los tornillos están alineados, tanto los que unen la rejilla a la estructura (derecha con la cabeza del tornillo hacia arriba) como los que la unen a la trituradora (izquierda con la cabeza del tornillo hacia abajo). Estas posiciones se ven claramente en la vista de alzado seccionada.

En la vista de perfil seccionada se aprecia que la cabeza del tornillo se puede introducir en el hueco del perfil de la barra, de ahí el requisito de alineación de los agujeros con la ranura del perfil. Si hubiese alguna desalineación con respecto a la ranura, la cabeza del tornillo chocaría contra los perfiles de la estructura e impediría que la rejilla se apoyase en ellos.

5.1.9.- Tapa externa frontal

Éste es otro elemento de unión entre todo el ensamblaje de la trituradora y la estructura, con lo que se habrá de diseñar de acuerdo a ambos componentes.



Figura 5. 13: Tapa externa frontal.

Como se puede observar, los dos agujeros de la derecha y los tres de abajo están destinados para unir este elemento con la estructura mediante tornillos de métrica M4. Se tendrá en cuenta que la alineación de los tornillos es muy importante por lo que ya se había comentado en el apartado anterior: los tornillos deben penetrar por la ranura del perfil de la estructura, si no será imposible que se pueda unir a ella.

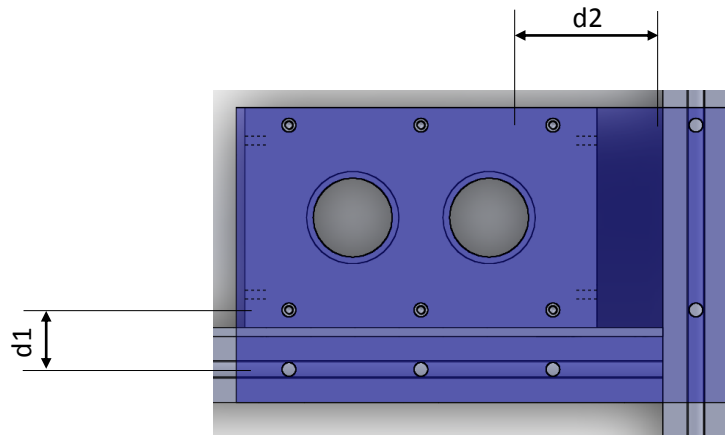


Figura 5. 14: Imagen explicativa de las dimensiones de la tapa externa frontal.

En esta figura se ha impuesto transparencia en la tapa externa frontal para poder observar mejor el porqué de sus medidas. Los dos agujeros de la derecha y los tres de la fila inferior están alineados con la estructura. Los otros seis agujeros y las aperturas de los ejes están alineados con los de la tapa gruesa.

La distancia entre estos dos subgrupos de características viene impuesto por la rejilla. La rejilla en el dibujo es el elemento que está entre la tapa gruesa y la barra horizontal de la estructura.

La distancia de la fila inferior de tornillos ($d1$) tendrá en cuenta que la tapa gruesa se apoya en la rejilla y no en la barra directamente. Esto quiere decir que la distancia tendrá en cuenta el espesor de lámina de la rejilla.

La distancia de la columna de tornillos de la derecha ($d2$) tendrá en cuenta el largo de la rejilla puesto que ésta tiene una posición límite, la que se observa en la figura. No puede desplazarse más a la derecha, es decir, disminuir $d2$ puesto que chocaría contra la barra vertical de la estructural.

Esta vista es la vista frontal de toda la estructura. Por aquí saldrán los extremos de los ejes donde irán colocados los engranajes, puesto que ésta es la cara que da al exterior y los engranajes también darán al exterior para poder girarlos mediante una llave de tubo que posteriormente se comentará.

5.1.10.- Tapa lateral

La tapa lateral se coloca como elemento de seguridad ya que sirve para evitar dejar los filos de las cuchillas libres por zonas peligrosas para el operario donde puede que apoye la mano. Además, es otra forma de unión de las dos tapas gruesas que asegura la estructura. Se realiza en impresión 3D puesto que no recibirá apenas esfuerzos.



Figura 5. 15: Tapa lateral.

Se encuentra reforzado por las zonas de unión de los tornillos y tiene cierta holgura para evitar posibles desalineaciones de los agujeros a la hora de imprimir. Además cuenta con un hueco para evitar que la cabeza del tornillo sobresalga lateralmente.

La muesca interior irá dirigida hacia dentro, hacia las cuchillas, ya que ahí irán colocados los laterales. En el apartado siguiente, los laterales, se explica su función con más detalle, puesto que estos dos componentes se han diseñado paralelamente.

5.1.11.- Laterales

Los laterales son, al igual que las arandelas, elementos separadores de las cuchillas pero también tienen otra función: barren cualquier material que haya podido quedar entre las cuchillas, obligándole a despegarse de éstas y a descender a través de la rejilla. En la siguiente figura se puede ver su geometría.

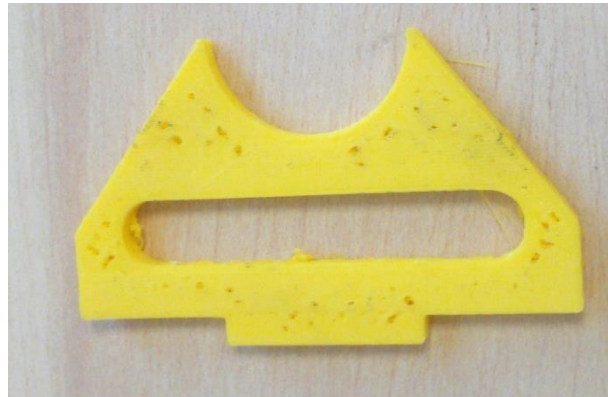


Figura 5. 16: Lateral.

Para diseñarlo se ha tenido en cuenta que las arandelas han de poder girar libremente, sabiendo que pueden existir desalineaciones puesto que su diámetro interno es mucho mayor que el del eje.

Estos elementos están fijados axialmente ya que irán entre las cuchillas, pero se ha de buscar una forma de impedir el movimiento de giro con respecto al eje o para evitar que pueda salir hacia arriba por el empuje del material atascado entre cuchillas. Se diseña un saliente lateral que irá encajado en la muesca de la tapa latera que se comentó antes para conseguirlo.

Como será impreso en 3D, se realizan huecos en el perfil para ahorrar material.



Figura 5. 17: Posición relativa del lateral.

5.1.12.- Engranajes

Los engranajes son elementos comerciales. Se observan catálogos y se buscan ruedas dentadas que puedan ser correctas para la distancia entre ejes, d_{ejes} . Para escoger engranajes se ha de tener en cuenta que la suma de los dos radios primitivos de las dos ruedas dentadas que se van a acoplar tiene que ser igual a la distancia entre sus ejes. En este caso se buscan dos ruedas dentadas del mismo tamaño, es decir, que no exista reducción para que ambos ejes giren a la vez. Esto implica que se necesitan dos ruedas dentadas de diámetro primitivo igual a la distancia d_{ejes} .

$$R_{primitivo\ 1} + R_{primitivo\ 2} = d_{ejes} \quad 5.1$$

$$\text{Si } R_{primitivo\ 1} = R_{primitivo\ 2} \rightarrow 2 \cdot R_{primitivo} = D_{primitivo} = d_{ejes} \quad 5.2$$

Se escoge un par de módulo $m=2$ y diámetro primitivo 62 mm. También contará con un agujero interno que se habrá tenido en cuenta a la hora de diseñar el eje, pues será éste el diámetro que deberá tener en la zona donde vaya acoplado el engranaje.

Posteriormente se utiliza una fresa para realizar un chavetero de acuerdo con la chaveta del eje destinada a la transmisión de potencia. Este chavetero se mecaniza por la zona de los dientes para facilitar la transmisión y evitar momentos torsores en el elemento.



Figura 5. 18: Engranajes.

5.1.13.- Elementos de unión

El este ensamblaje se cuenta con diferentes tipos de unión y diversas metas: unión, posicionamiento o transmisión de potencia.

El eje cuenta con una zona roscada en cada extremo, como ya se había mencionado, y una tuerca irá ensamblada en esa parte para fijar la unión de todos los componentes.

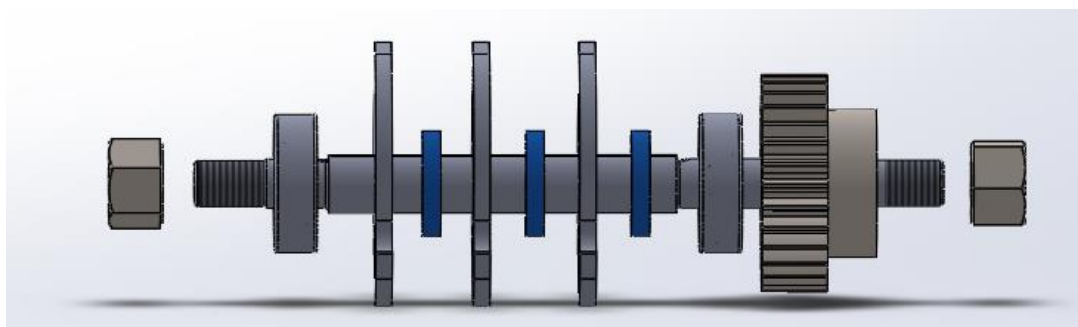


Figura 5. 19: Eje con sus componentes básicos.

En la figura se observa esquemáticamente cómo se distribuyen los elementos básicos acoplados al eje. Para simplificar el dibujo se han eliminado cuchillas y arandelas pero el ensamblaje real tendría a todos los componentes en contacto superficial directo con los contiguos. Las tuercas de los extremos pretenden incrementar la presión de contacto y asegurar el ensamblaje, es decir, que no se desplacen axialmente.

Los tornillos utilizados se han ido mencionando a través de toda la ingeniería de detalle en cada elemento que se ha utilizado. Básicamente se han utilizado para unir todas las tapas del ensamblaje y para unir éste con la estructura.

Las chavetas usadas son chavetas paralelas. Una va destinada a la unión de las cuchillas con el eje. El chavetero se extiende más de lo estrictamente necesario para asegurar que a las cuchillas de los extremos también les corresponda parte de la chaveta y que no queden libres. La otra chaveta sirve como unión entre el eje y el engranaje para transmitir potencia.

5.1.14.- Llave de pipa acodada

El último elemento de la trituradora es la llave de pipa. Esta llave se utiliza como palanca para introducir el torque necesario.



Figura 5. 20: Llave de pipa acodada.

Se utiliza una llave de pipa acodada puesto que su extremo acaba en forma de vaso hexagonal, perfecto para encajar con la tuerca del extremo del eje que se ha mencionado antes.

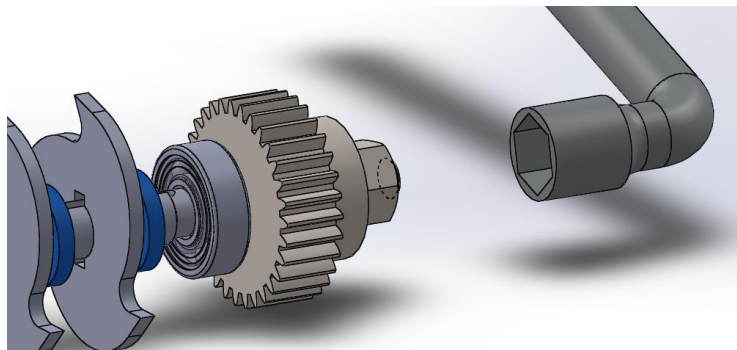


Figura 5. 21: Vaso hexagonal de la llave de pipa.

Como se puede observar en la Figura 5.21, el vaso encaja con la tuerca y se puede comenzar a girar la llave. Teóricamente estas llaves sirven para apretar tuercas, es decir, que avancen por la zona roscada de un eje o tornillo, pero en este caso la tuerca no puede seguir atravesando la rosca pues están el resto de componentes bloqueando el avance. Por ello, el giro de la palanca provocará el giro del eje a la vez que la tuerca y se conseguirán mover así las cuchillas para conseguir los trozos de plástico.

5.2.- EXTRUSOR

En este apartado se comentarán las consideraciones y cálculos realizados en la segunda parte del proceso general. De manera simplificada, ésta consiste en la fundición de los pellets del polímero para conseguir un filamento de sección circular constante. Para lograr esto, el proceso se basará en la ya conocida extrusión, de la que se ha hablado anteriormente en el apartado de Estudios previos.

5.2.1.- Base de metacrilato

La base de metacrilato es una parte de la impresora Tumaker Voladora, con agujeros ya realizados para la unión de ésta con la estructura y para otros elementos. Estos agujeros se aprovecharán para no tener que realizar modificaciones en la base. En el apartado de planos se pueden comprobar todas las medidas de los agujeros.

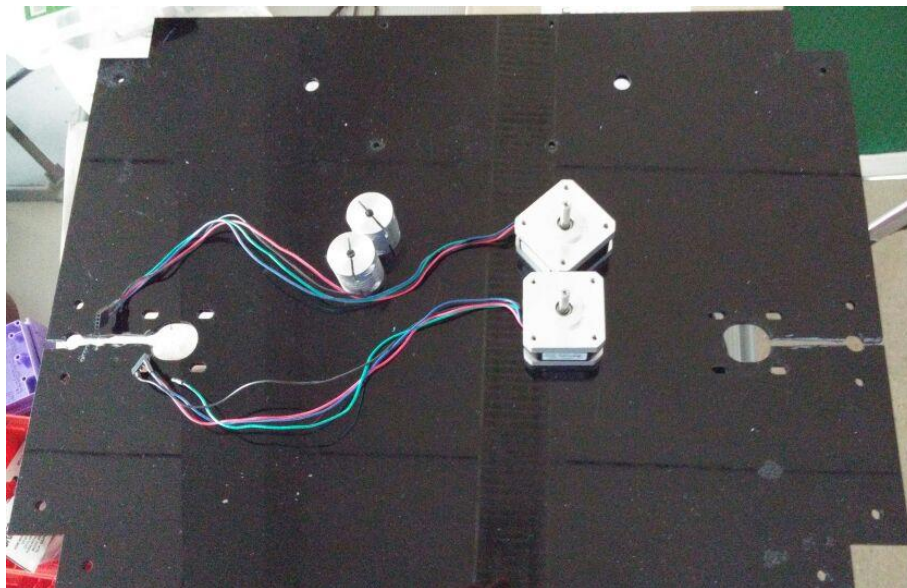


Figura 5. 22: Base de metacrilato.

En la figura se pueden apreciar estos agujeros. Los motores de la imagen eran unos de los elementos acoplados a la base y esos agujeros se aprovecharán para sujetar el soporte de madera.

Esta base es suficiente, puesto que no va a sufrir grandes esfuerzos de flexión ya que sólo va a llevar acoplado el extrusor, cuyo peso total no traspasa los 2 kg.

5.2.2.- Soporte de madera

El soporte de madera es una cajita de madera prefabricada. No es un modelo estandarizado, con lo que en posteriores diseños se habrá de adaptar el alimentador al soporte pertinente.

Es una caja de madera robusta, lo suficiente para sujetar en voladizo el cuerpo del extrusor. Como no es un modelo estándar no se han podido realizar simulaciones, con lo que se ha comprobado experimentalmente.



Figura 5. 23: Soporte de madera.

La tapa superior servirá de apoyo para el alimentador, para conseguir una mayor superficie de soporte. Además se aprovechará el agujero de la imagen para usarlo como canal entre el alimentador y el cuerpo de la extrusora.

Se utiliza un soporte de madera en lugar de un soporte total de impresión 3D ya que el extrusor puede llegar a alcanzar temperaturas altas que derripan el material o que lo deformen. La madera servirá como un aislante entre el cuerpo de latón, buen conductor del calor, y el alimentador de PLA, susceptible de derretirse o deformarse.

5.2.3.- Termistor y resistencia

Estos elementos son necesarios para alcanzar la temperatura deseada. El termistor es el encargado de la medición de la temperatura de la zona con la que esté en contacto. La resistencia aumenta su temperatura cuanto mayor es el voltaje que se le aplica.

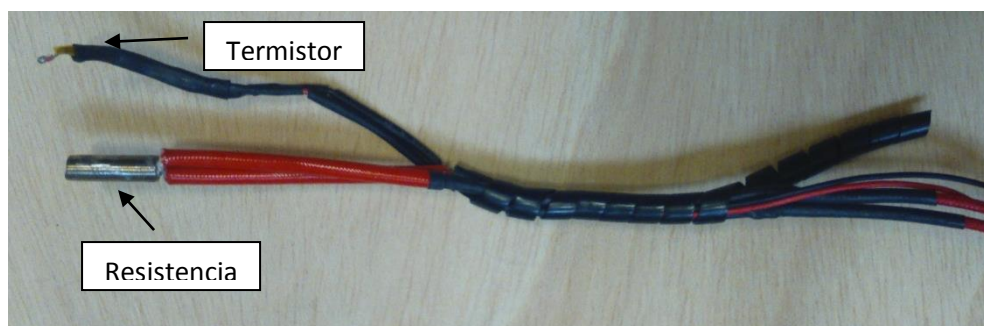


Figura 5. 24: Termistor y resistencia.

El termistor es un dispositivo semiconductor que se comporta como una resistencia con un coeficiente de temperatura de resistencia alto y es muy sensible a altas temperaturas. Los termopares se designan con una letra dependiendo del material que contengan, especificando así su sensibilidad o coeficiente térmico (MV/°C). En este caso se utilizará un termistor tipo K, basado en Níquel y resistente a la corrosión. Tiene un rango de aplicación de temperaturas muy amplio: entre -40 y 375°C.

La resistencia es una resistencia que soporta un máximo de 24V y será alimentada con un voltaje de 12V como máximo, variando dependiendo de la temperatura que se pretenda alcanzar.

5.2.4.- Calentador

El calentador será un elemento en contacto con el cabezal para calentarlo y llevarlo a la temperatura requerida. Por sí solo no lo hará, requerirá tener acoplada la resistencia de la que se ha hablado anteriormente. Además necesitará ajustar el termistor para que mida la temperatura del cabezal y así poder regular el voltaje de la resistencia. El termistor no irá directamente unido a la resistencia, para evitar que se pueda fundir en caso de error.

Además llevará un agujero para introducir el cabezal del extrusor y un tornillo de ajuste para evitar movimiento entre las dos piezas. Todas estas características se pueden observar en la siguiente figura.



Figura 5. 25: Calentador.

Sabiendo cuál es su función se utilizará un material que sea buen conductor del calor y se requiera menor voltaje y, por ello, menos energía para calentar el cabezal. En este caso se hará una analogía con los cabezales de las impresoras 3D y se utilizará aluminio. Es un material que conduce bien la temperatura y que soporta las temperaturas a las que va a ser sometido.

5.2.5.- Cabezal

En la Figura 5.26 se observa la diferencia entre el tapón macho ciego inicial y el cabezal mecanizado.

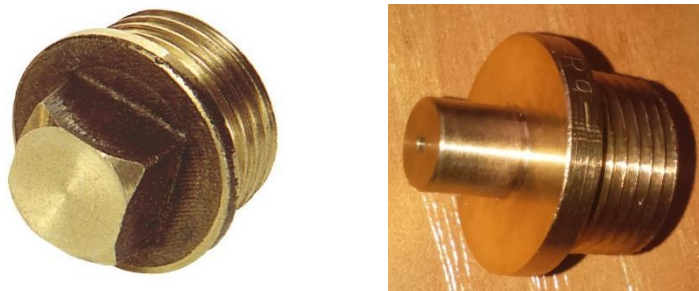


Figura 5. 26: Tapón macho ciego y Cabezal mecanizado.

El primero tiene la cabeza cuadrada y no tiene agujero. En cambio el segundo ha sido mecanizado para conseguir una cabeza redonda para realizar de forma más sencilla el mecanizado y acoplamiento del calentador y ayudando a un mayor contacto entre superficies para una mejora en la transmisión del calor por convección.

Además se realiza un taladrado de 1,6 mm para obtener un filamento de 1,75 mm aproximadamente. Esto se hace ya que, contrariamente a lo que se pueda pensar en un primer momento, el plástico se expande al salir del cabezal. También se contrae por la disminución de temperatura, pero causa un mayor efecto la diferencia de presión. Es mucho mayor la presión en el interior del cabezal que la presión atmosférica que sufre en su salida, con lo cual esta menor presión permite que el material se expanda.

Se habría de estudiar en profundidad qué tamaño de agujero sería el óptimo para cada tipo de material, con lo que se podría considerar una línea futura de investigación.

5.2.6.- *Cuerpo: Manguito y racores.*

El cuerpo tiene como finalidad conducir el material transportado por la broca hasta la punta donde se calentará y se extruirá como filamento.

En la Figura 5. 27 se observan todos los elementos que constituyen el cuerpo. Inicialmente se iba a utilizar directamente el manguito, sin racores. Pero el canal sería demasiado corto para disipar el calor.



Figura 5. 27: Manguito, racores y contratuerca.

Se nombran de izquierda a derecha: racor $\frac{1}{4}''$ - $\frac{1}{4}''$, manguito $\frac{1}{4}''$ - $\frac{1}{4}''$, racor $\frac{1}{4}''$ - $\frac{1}{2}''$, contratuerca $\frac{1}{2}''$. Se añaden racores para alargar el canal de transporte y además servir como aletas de disipación de calor. Se aprovecha este hecho para utilizar racores que incrementen el diámetro interno del canal progresivamente para ayudar al material a entrar.

En la siguiente figura se observa el manguito ya unido al cabezal, como irá finalmente en el ensamblaje.



Figura 5. 28: Tapón macho mecanizado y manguito.

5.2.7.- Contratuerca

Para unir el cuerpo al resto del ensamblaje se utiliza una contratuerca que irá roscada al otro lado de la lámina de sujeción. Como la lámina irá sujeta al soporte de madera, el cuerpo se mantendrá en horizontal.

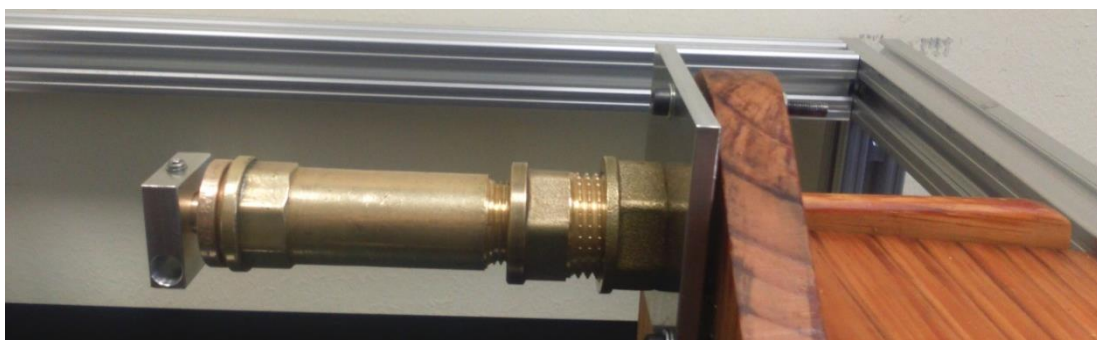


Figura 5. 29: Sujeción horizontal del cuerpo con la lámina y la contratuerca.

En esta figura se puede ver con mayor claridad la explicación y las posiciones relativas de todos los elementos. La contratuerca se posiciona en la parte posterior de la lámina roscada al último racor.

5.2.8.- Lámina

La lámina es la unión entre el cuerpo y el soporte de madera. Tiene un agujero en el medio que le permitirá pasar la rosca de $\frac{1}{4}$ " del último racor, y será estrecha de manera que no tome mucho espacio de la rosca del racor y la contratuerca se pueda unir. Se observa en la Figura 5.29.

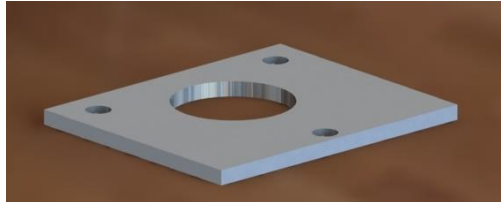


Figura 5. 30: Lámina.

La lámina irá sujeta al soporte de madera mediante tres tornillos, cuyos huecos se ven en la Figura 5. 30. Estos huecos no coinciden sólo con los agujeros del soporte sino que también habrán de coincidir con los del alimentador que se describen en el siguiente apartado.

Como se pretende que sea lo más estrecha posible, se hará un estudio mediante elementos finitos para comprobar hasta qué punto es seguro hacerlo estrecho. La simulación se encuentra detallada en el Anexo Simulaciones.

5.2.9.- Alimentador

El Alimentador es el elemento que almacenará el material troceado alrededor de la broca para que ésta pueda arrastrarlo por el cuerpo hasta el cabezal. Se observa la geometría especial de la zona de alimentación, pues tiene las paredes inclinadas y apenas se deja hueco entre el “suelo” del alimentador y la broca para evitar que el material se quede estancado.

En la siguiente imagen se ve que la broca queda al ras de la parte inferior del alimentador.

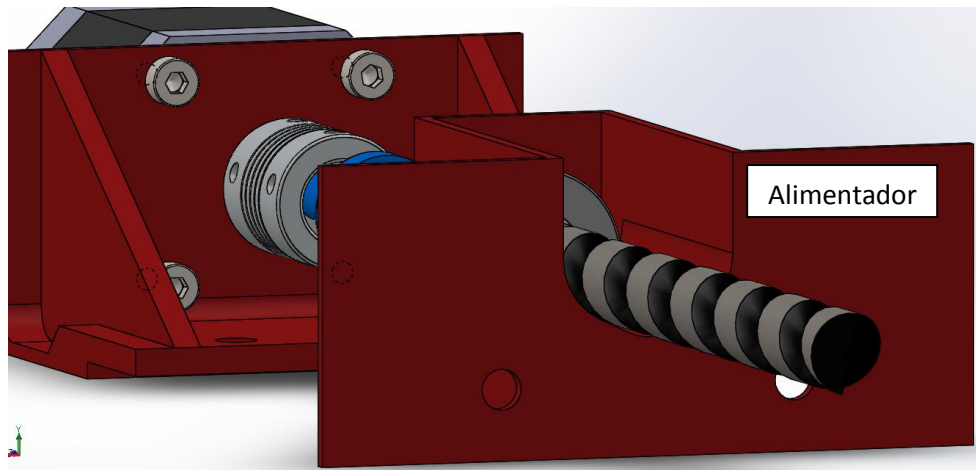


Figura 5. 31: Subconjunto de Sistema rotativo.

Debido a las imprecisiones de la impresión 3D y a la probable inclinación del eje de la broca durante el giro se ha tenido que realizar un postprocesado. Se ha limado la parte inferior del alimentador ya que hacía interferencia con la broca en su giro. Con esto se consigue que exista un juego entre los dos elementos y que la broca gire mejor.



Figura 5. 32: Alimentador.

También se observa que el canal del alimentador acaba, dejando paso a una sección constante y redonda más amplia. Esto se ha realizado así para dejar hueco al rodamiento axial y al circlip que irá colocado en la broca.

De esta manera la fuerza axial que ejerza la presión del cabezal sobre la broca será absorbida por el rodamiento axial y éste a su vez por la pared del alimentador, evitando que la absorba el motor, pues podría dañarlo.

Cuenta con unos agujeros que servirán para unirlo al soporte de madera. Se busca que estén a la altura de los agujeros ya realizados para sujetar la lámina y aprovechar el mismo tornillo.

El agujero por donde pasa la broca será ligeramente mayor que 12 mm, como el diámetro de la propia broca.

5.2.10.- Broca

La broca se utilizará como tornillo sin fin o de Arquímedes, es decir, transportará el material troceado desde el alimentador hasta el cabezal, donde será extruido. Tiene un diámetro de 12 mm, que será ligeramente menor que el diámetro interno del cuerpo, es decir, del manguito. Está escogida del catálogo Blue Master y es el modelo BM12x230, que tiene sólo un canal de revolución.

Esta broca está recubierta de óxido negro, que ayudará al deslizamiento del material y evitará la corrosión, además de que ayuda a la broca a soportar muy altas temperaturas.



Figura 5. 33: Broca BM12x230.

Girará a la vez que el motor, que irá controlado por el Arduino, y además se ha de saber que tiene que girar en el sentido correcto para que el material avance y no retroceda.

Su cola o final no es cilíndrico sino hexagonal con lo que no se podrá utilizar directamente un acoplamiento, se habrá de buscar otra solución.

5.2.11.- Rodamiento y circlip

El circlip se coloca en la ranura de la broca, la que separa la zona del cuerpo de la cola, es decir, el cuello. Esta zona tiene un diámetro de 11mm, inferior al de la broca, con lo que se utiliza un circlip de esa medida.

El rodamiento axial 51101 del catálogo SKF tiene un diámetro interno de 12 mm. La función de este rodamiento es el de facilitar el giro de la broca al motor. Esto se debe a que cualquier empuje axial provocado por la presión del cabezal se verá absorbido por el rodamiento y no habrá apenas rozamiento contra un elemento fijo como es en este caso la pared del alimentador. Esta explicación se entenderá mejor observando la Figura 5.34.

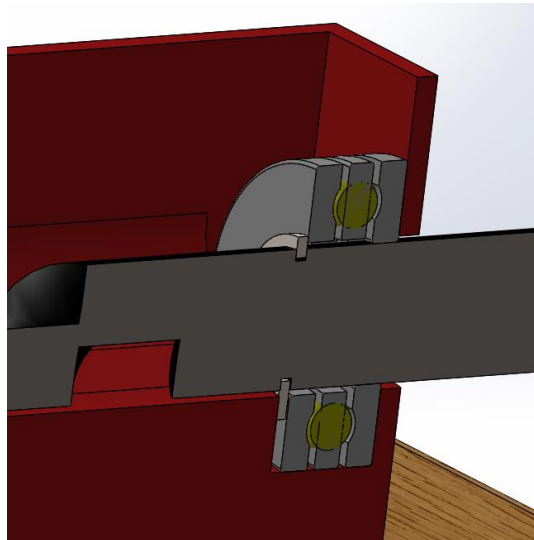


Figura 5. 34: Circlip y rodamiento ya posicionado en el alimentador.

Al tratarse de un rodamiento axial, uno de los anillos tiene un diámetro ligeramente menor para hacer interferencia y ajustar con el eje, y el otro ligeramente mayor para que haya un juego y permita girar. Por eso el que tiene el diámetro mayor ha de ir colocado contra la pared, y el que crea el ajuste irá colocado justo al lado del circlip.

Las medidas del rodamiento se tienen en cuenta al diseñar el alimentador, ya que el su ancho axial influirá tanto en el hueco que se ha de dejar para el rodamiento como en el largo de todo el alimentador.

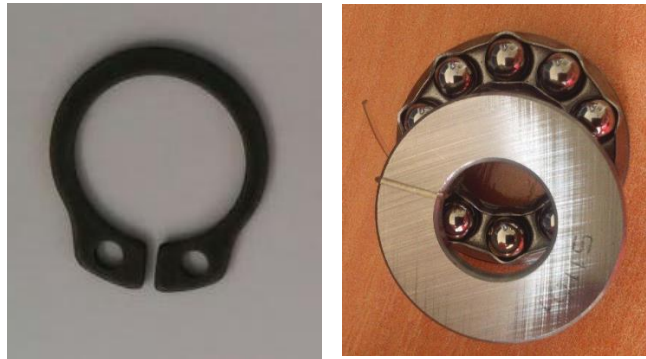


Figura 5. 35: Circlip y rodamiento axial.

Se observa en la Figura 5. 35 que el rodamiento axial se separa, con lo que se ha de tener especial cuidado para no perder ninguna de las partes que lo componen.

5.2.12.- Vaso

El vaso es una pieza de impresión 3D que servirá para la unión entre la broca y el acoplamiento y éste, a su vez, al motor. Se ha creado esta pieza para poder ensamblar la broca ya que el final de ésta es hexagonal, no cilíndrico, y el acoplamiento directamente no lo agarraría adecuadamente, habría deslizamiento. Un extremo es cilíndrico y será el que irá unido al acoplamiento. El otro extremo tiene un hueco en forma hexagonal que encaje en la broca.



Figura 5. 36: Vaso para la broca.

Este elemento se hubo de imprimir dos veces. Inicialmente se había impreso con las medidas exactas pero se ha de tener en cuenta que el plástico se expande al ser impreso, con lo que los elementos no encajaban. Se hubo de disminuir el diámetro inferior y ampliar el hexágono.

5.2.13.- Acoplamiento

El acoplamiento hará de unión entre el vaso, que sujeta a la broca, y el motor, que provoca el giro. No se utiliza directamente sobre la broca ya que, como se ha comentado anteriormente la cola de la broca no es cilíndrica sino hexagonal y provocaría Se utiliza un acoplamiento flexible de la página Huco Dynatork⁸. De todas formas es un acoplamiento reutilizado de la impresora Tumaker Voladora.

Se utilizará un acoplamiento flexible ya que así se absorberán las desalineaciones radiales que pudiera haber.



Figura 5. 37: Acoplamiento

Un diámetro interno es de 5 mm para el motor y otro de 8 mm para el vaso. Irá sujeto mediante tornillos de métrica M3, ya que cuenta con agujeros transversales ya roscados.

5.2.14.- Soporte motor

Inicialmente se tenía la idea de realizar el Alimentador y el Soporte motor en una sola pieza impresa en 3D, como se muestra en la Figura 5.38.

Pero finalmente se separan en dos elementos diferentes para evitar posibles desalineaciones a la hora de imprimir. Al ser dos elementos independientes no existen tolerancias dimensionales o geométricas, difíciles de cumplir en este tipo de impresoras 3D. Cualquier desalineación del eje será absorbida por el acoplamiento.

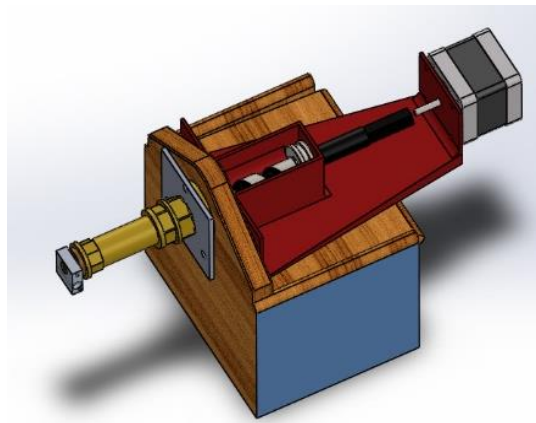


Figura 5. 38: Diseño inicial del alimentador.

La función de este elemento es la de sujetar el motor a la estructura y que pueda hacer girar a la broca. Para asegurar mejor la pieza se diseñan dos nervios.



Figura 5. 39: Soporte motor.

Los agujeros por donde pasan los tornillos que sujetarán al motor se encuentran por debajo del perfil de aluminio de la estructura, por ello cuenta con un escalón que permitirá salvar esta distancia. La siguiente imagen ilustra mejor esta explicación.

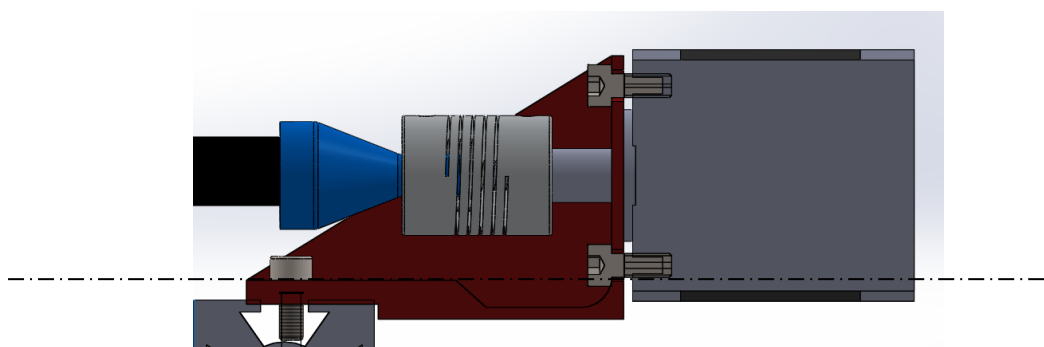


Figura 5. 40: Escalón del Soporte motor.

Si no se descende el nivel, es decir, si no hubiese escalón, los tornillos inferiores del motor no entrarían. La opción de subir el motor tampoco es factible ya que se desalinearían los ejes y se habrían de realizar un gran número de modificaciones en las piezas anteriores.

5.2.15.- Motor

Una de las formas de energía más utilizadas en la actualidad es la energía eléctrica, y por ello se han desarrollado una gran cantidad de dispositivos para transformar esta forma de energía en otra. Los motores se encargan de transformar la energía eléctrica en energía mecánica de rotación. Los motores paso a paso están compuestos por dos partes: una fija llamada estator y una móvil llamada rotor. El estator se encarga de generar el flujo principal mientras que el rotor reacciona a la excitación del estator, produciendo el movimiento de rotación.

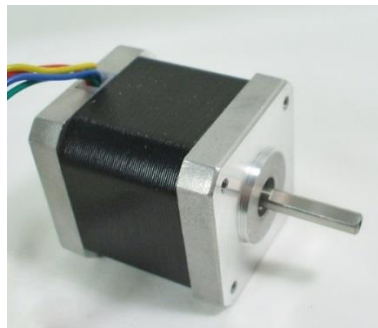


Figura 5. 41: Motor Nema17.

A diferencia de los servomotores tradicionales, los motores de pasos tienen la principal ventaja de asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de formas continua, con velocidad variable, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. Además, son muy ligeros, fiables y fáciles de controlar, pues el control se realiza en bucle abierto, sin necesidad de feedback, pues cada estado de excitación del estator es estable.

En la placa de Arduino se conecta a los pines correspondientes al motor del extrusor, el cual es el que se mueve de manera continua en una impresión, mientras que los motores de los ejes cambian continuamente de sentido de giro. Cuenta con un par de 0.33 Nm, suficiente para los esfuerzos que sobrellevará, calculados en el Anexo Cálculos.

5.2.16.- Ventiladores

Se utilizarán dos ventiladores para un mismo fin, el de mejorar la refrigeración. Uno de ellos apuntará a la punta del cabezal, justo a la salida del filamento, para enfriar el filamento más rápidamente. El otro apuntará al cuerpo para ayudarlo a mantenerse frío. Esto se hace ya que se está realizando una imitación del cabezal de las impresoras, que cuenta con un Cold End. Tiene que estar frío para evitar que se funda material antes de llegar a la punta, arriesgándose a que se quede atascado.

Se reutilizan los ventiladores que usaba la impresora Tumaker Voladora.



Figura 5. 42: Ventilador.

5.2.17.- Pilar

Para sujetar los ventiladores a la altura del extrusor se diseña el Pilar. La siguiente imagen muestra el elemento ya impreso.



Figura 5. 43: Pilar de impresión 3D.

Este elemento es el más grande con diferencia y, por ello el que más tiempo de impresión ha tomado. Inicialmente se había diseñado de tal manera que la impresión duraba 10 horas. Con el fin de rebajar el tiempo y el uso de material se rediseñó, quedando como modelo final el de la Figura 5.43. De ahí la gran apertura de la que consta en mitad del cuerpo.

Además se hacen agujeros a la altura necesaria para que pasen los tornillos correspondientes a los ventiladores y se deja un hueco en el medio para dejar pasar el aire a través de las aspas.

Como la base de metacrilato no contaba con unos agujeros propicios para ello, se han realizado con un taladro tomando las medidas correctas previamente, punteando sobre las marcas y taladrando posteriormente con una broca de 6 mm.



Figura 5. 44: Proceso de taladrado.

En este caso para realizar los taladros se cubrió la placa de Arduino para evitar que el polvo o las virutas procedentes del proceso de taladrado la dañasen.

5.2.18.- Hardware y Software

Inicialmente se consideró utilizar una placa Arduino UNO⁹ para controlar el proceso y comenzar la programación desde cero siguiendo este esquema de bucle cerrado. Es decir, aumentar el voltaje introducido en la resistencia (y así su temperatura) hasta que el termistor recibiese el voltaje correspondiente (es decir, leyese la temperatura buscada). En ese momento se encendería el motor que comenzaría la alimentación de material y los ventiladores.

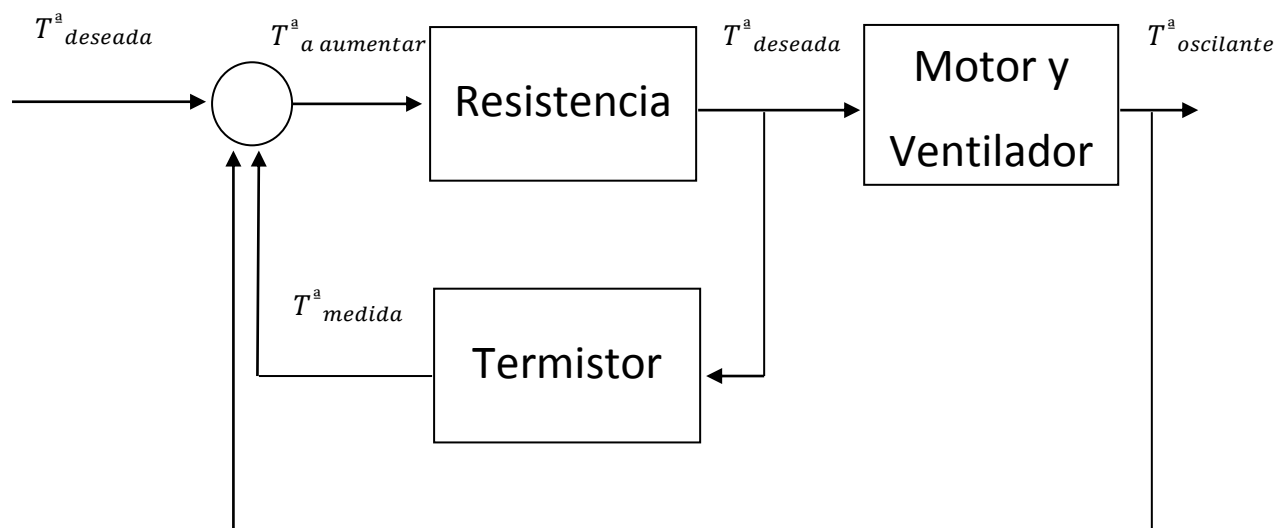


Figura 5. 45: Diagrama de bloques para la programación.

Pero finalmente se decidió utilizar también la placa y el controlador de la propia impresora que se está reutilizando, la impresora Tumaker Voladora. La placa que utiliza la Voladora es Megatronics V2, una placa cuyas entradas/salidas están configuradas para el uso de la impresora 3D como motores de los ejes X, Y, Z, motores del extrusor, finales de carrera, termistores, ventiladores variables, resistencias para calentar el HotEnd y la cama, entre otros, y el controlador de la placa es un Arduino Mega 2560. Para controlar la tensión de los motores se utiliza un Stepper, también conocido como Pololu o Driver. Su fuente de alimentación externa es de 12V y hasta 18A. Además, tiene la opción de conectarse mediante USB y SDcard.

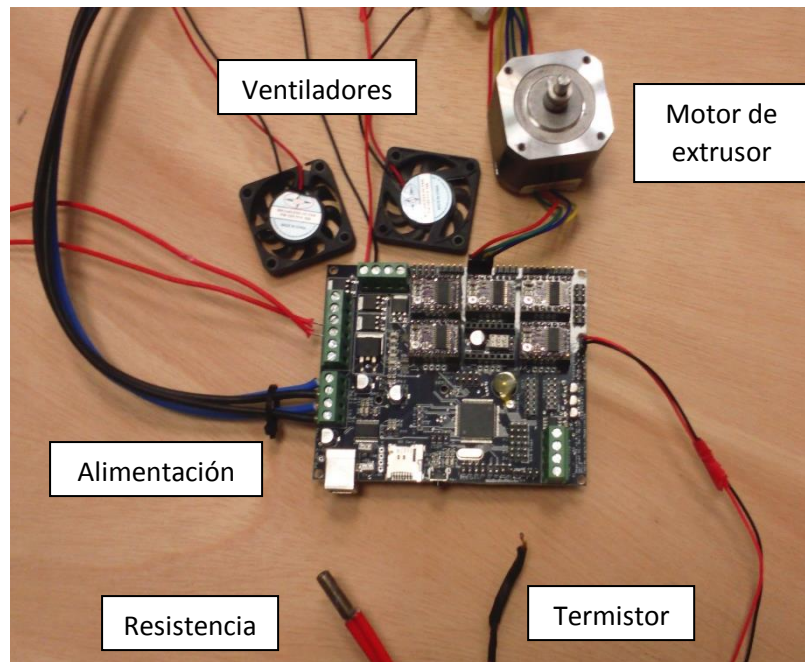


Figura 5. 46: Conexiones de la placa de Arduino Megatronics V2.0.

El firmware es un bloque de instrucciones de máquina para propósitos específicos. El firmware utilizado por la Voladora es uno abierto llamado Marlin, pero con muchas modificaciones y ajustada a la Voladora. El firmware es un programa de lenguaje C y se carga en el micro controlador Arduino Mega 2560. Esto se ha hecho ya que de esta manera la placa podrá ser controlada como una impresora 3D. Es decir, con el programa Repetier Host, que controla todos los outputs de la placa (motores, ventiladores y temperatura), se podrá controlar la extrusora de la misma manera que la impresora.

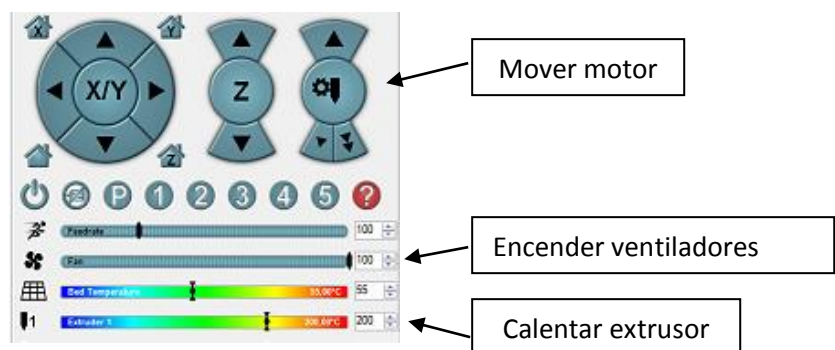


Figura 5. 47: Interfaz de Repetier Host.

5.3.- ENSAMBLAJE FINAL: RECICLADORA

El ensamblaje total cuenta con las dos máquinas anteriormente descritas y con la estructura de la impresora Tumaker Voladora. Esta última está formada por perfiles de aluminio extruido 30x30, descritas sus longitudes y el número de cada uno de ellos en los planos.

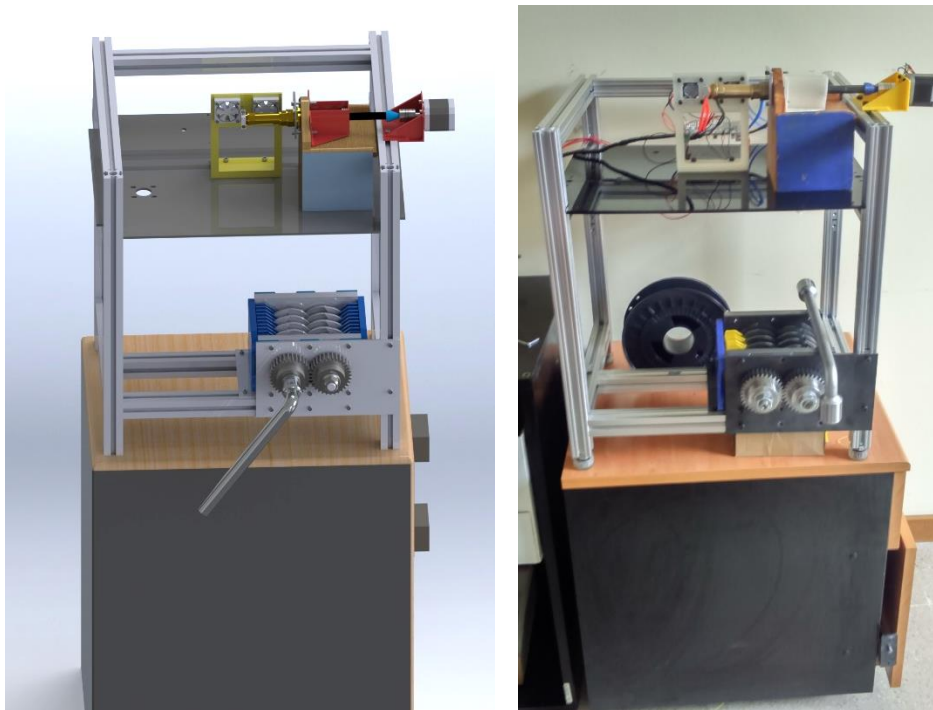


Figura 5. 48: Ensamblaje final.

Éste es el resultado final del desarrollo del proyecto, tanto la versión virtual como la versión real.

Se finaliza este trabajo con comentarios sobre posibles líneas futuras de desarrollo que mejoren la calidad del producto a obtener, el filamento, y unas conclusiones sobre el proyecto en su conjunto.

6.- Líneas futuras

Debido a que este trabajo se centra más en el bajo coste que en la calidad, se han pasado por alto ciertos aspectos que harían de éste un diseño mucho más completo y mejorado pero que, como desventaja, encarecería mucho el proyecto.

6.1.- TRITURADORA

Esta máquina podría ser mejorada en el caso de que se usase un elemento que empujase las piezas hacia las cuchillas. Esto mejoraría la trituradora en dos aspectos: la seguridad y la eficiencia.

Con un elemento por la parte superior empujando la pieza se evitaría que ésta saltase de las cuchillas pudiendo provocar algún daño en su trayectoria o en el momento de recolocarla entre las cuchillas. Con respecto a la eficiencia, un elemento que sujetase la pieza remediaría el tiempo que se pierde cuando la pieza salta y se ha de recolocar.

También se podría añadir un tren de engranajes que ayudase a disminuir el esfuerzo requerido por el operario para hacer girar las cuchillas.

6.2.- EXTRUSORA

La extrusora podría añadir ciertos elementos que mejorasen la extrusión del filamento y evitasen problemas que se pueden dar durante su funcionamiento.

Para mejorar la refrigeración de los ventiladores se podría utilizar un canal de ventilación alrededor del cuerpo para dirigir toda la corriente de aire, evitando que el material alimentado se funda antes de llegar al cabezal.

Otra opción para una alimentación de material autónoma sería el uso de una tolva.

Unos rodillos tensores podrían colocarse a la salida del filamento. Serían de un material elástico y girarían controlados por la placa de Arduino, ayudando así al control del diámetro y tensando el filamento para una mayor homogeneidad interna.

También se podría añadir una bobina giratoria que fuese enrollando el filamento alrededor de ella, evitando un posterior manejo del filamento para almacenaje que llevase demasiado tiempo.

Esta extrusora está diseñada para funcionar en un rango muy amplio de temperaturas y velocidades. Para obtener un filamento óptimo se habrá de realizar una investigación sobre los diámetros obtenidos y su calidad modificando estas dos variables, temperatura y velocidad. Se ha de tener en cuenta además que no sólo existen diferencias entre diferentes materiales sino también en un mismo material con diferentes colores.

Con respecto al tema de la diversidad de materiales también se podría tener en cuenta el diámetro del agujero del cabezal y su geometría interna y estudiar cuáles serían los factores óptimos para cada material y color.

7.- Conclusiones

La finalidad de este proyecto era reutilizar material de impresión 3D para reconvertirlo en filamento.

Para conseguir este objetivo se utilizaron dos máquinas, una trituradora para conseguir pequeños trozos de material, y una extrusora para obtener el filamento a partir de esos pequeños trozos.

La ventaja de este proceso es que se evita la pérdida de casi el 100% del material que antes se desechaba. El inconveniente es su coste. En el documento presupuesto se observa que la máquina en su conjunto asciende a los 747.67 € teniendo en cuenta sólo los materiales comprados (IVA incluido).

Existen impresoras 3D en el mercado por un precio alrededor de 500 €, y cada bobina de 1 kg cuesta sobre 20 €, con lo que para amortizarse la recicladora se deberían haber desechado 38 bobinas enteras (120 m/bobina), que se traduce en una gran cantidad de piezas. Por ello se concluye que este proyecto se destinaría a pequeñas empresas y no a consumidores directamente, puesto que estos últimos tardarían en recuperar la inversión demasiado tiempo, ya que no se espera que desechen demasiado material.

8.- Referencias

-3D invasión, tu tienda de impresoras 3D en Canarias. [en línea] <http://3dinvasion.com/>
[Consulta 22/06/15]

-3D printing. [en línea] <http://3dprint.com/76594/felfil-open-source-extruder/> [Consulta 26/06/15]

-Arazo Urraca, J.L. Inyección de termoplásticos. Ed. Plastic Communication, S.L., 1999.

-Bahco. Catálogo de llaves de pipa.

-Bioplastics webpage. [en línea]. Bio-plastics.org. [Consulta 22/02/15]

-Blog de electrónica y telecomunicaciones Don Bosco [en línea]. Disponible en:
<http://elektronikadonbosco.blogspot.com.es/2013/11/caracteristicas-de-una-impresora-3d.html> [Consulta 3/05/15]

-Blue Master. Catálogo de Brocas.

-Bricolaje - Herramientas (I) – Llaves fijas [en línea]. Disponible en:
<http://www.moto125.cc/f125cc/kymco/item/755-brico-1-llaves-fijas> [Consulta 17/03/15]

-Brydson, J.A. Plastics Materials. Ed. Butterworths, 1989.

-CDF Autodesk [programa] Versión 2015.

-City of Plastics. Tienda australiana [en línea] <http://www.cityplastics.com.au/materials-abs/> [Consulta 16/02/15]

- Corte y perforación por láser [en línea]. Disponible en: <http://www.es.trumpf.com/>
[Consulta 21/02/15]
- Cuenca, Fernando D. Motores Paso a Paso. Universidad Nacional de Cuyo, 2007.
- Direct Industry, El Salón Online de la Industria, Bahco, Llave de tubo [en línea].
Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/bahco/llave-tubo-cromo-11555-562017.html> [Consulta 17/03/15]
- El Reciclaje. Reciclaje de plástico [en línea] <http://elreciclaje.org/content/reciclaje-de-pl%C3%A1stico> [Consulta 25/02/15]
- IkasLab, Tumaker. [en línea] <http://www.ikaslab.org/es/project/como-ponerle-un-segundo-cabecal-a-una-voladora-v2/24/publication/76> [Consulta 18/06/15]
- Imprimalia 3D. Portal líder de la impresión 3D en español [en línea]
<http://www.imprimalia3d.com/services/voladora> [Consulta 04/04/15]
- Kaye&Laby. Tables of physical and chemical constants [en línea].
http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_3/2_3_7.html [Consulta 15/05/15]
- Kaiser, Asif Ali; Qayyum, Yasir and Rafiq, Rehman. Rheological properties of ABS at low shear rates: Effects of phase heterogeneity. University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan.
- Rees, Herbert. Mold Engineering. Ed. Hanser, 2002.
- Revised Thermocouple Reference Table. [en línea]
<http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z204-206.pdf> [Consulta 26/05/15]

-Sensores de temperatura. [en línea]

<http://proton.ucting.udg.mx/temas/control/memo/MEMO.html> [Consulta 18/06/15]

-SKF. Catálogo de rodamientos.

-SolidWorks [programa] Versión 2014.

-Suriñach, S. et al. La calorimetría diferencia de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales. Vol.31, Num.1. Universitat Autònoma de Barcelona, 1992.

-Taladros, información. Brocas. [en línea] <http://taladros.info/Brocas.html> [Consulta 20/04/15]

-The free beginner's guide to 3D printing. [en línea] <http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf> [Consulta 20/06/15]

-Tienda BricoGeek. Motor Nema17 [en línea] <http://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html> [Consulta 04/05/15]

-Zapp Automation Ltd Web shop. Power transmission. [en línea] <http://www.zappautomation.co.uk/>. [Consulta 25/04/15]

[UNE 157001] Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

[UNE 17102] Chavetas paralelas. Serie normal.

[UNE 7200] Documentación técnica de productos.

[UNE 22768-1] Tolerancias generales: Tolerancias para dimensiones lineales y angulares sin indicación individual de tolerancias.

¹Procedimientos de fabricación. Tecnología Industrial I. [en línea] https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2012/02/introduccion_y_sin_perdida_material.pdf [Consulta 05/06/15]

²Periódico ABC, sección Ciencia, “La NASA lanzará en 2014 la primera impresora 3D al espacio.” [en línea] <http://www.abc.es/ciencia/20130930/abci-nasa-lanzara-2014-primera-201309301437.html> [Consulta 08/04/15]

³Tecnología 2014, Impresoras 3D. [en línea] <https://actualidadinformaticaisae.wordpress.com/impresoras-3d/> [Consulta 08/04/15]

⁴Impresoras 3D, tipos de impresoras 3D. [en línea] <http://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/> [Consulta 08/04/15]

⁵BlackBlog. Impresión 3D y Activismo de Mercado. [en línea] <http://www.blackblog.es/impresion-3d-activismo/> [Consulta 20/06/15]

⁶Thingiverse. Hugh Lyman, [en línea] <https://www.thingiverse.com/hlyman/designs/> [Consulta 05/04/15]

⁷Collyer, A.A. y Utracki, L.A. Polymer Rheology and Processing. Ed. Elsevier Science Publishers LTD, 1990.

⁸Huco Dynatork. A flywheel coupling to suit every pump and engine [en línea] <http://www.huco.com/products.asp?p=true&cat=113> [Consulta 20/06/15]

⁹Arduino. [en línea] <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno> [Consulta 28/06/15]