

TREBAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO Y MONTAJE DE UNA EXTRUSORA DE FILAMENTO
PARA EL RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE IMPRESIÓN
3D**



Autores: Álvaro Camacho Roldán y Joan Culleré Sandoval
Director: Ramón Jerez
Departamento Ingeniería Mecánica (EM)
Co-Director: Oriol Traver
Convocatoria: Enero 2017

Resumen

El presente proyecto contiene el diseño de una extrusora de filamento para impresoras 3D, a partir de pellets, en concreto de PLA. Además se pretende lograr un prototipo sencillo, de tamaño reducido, económico y fiable para un laboratorio de prototipos.

En este proyecto se explicará brevemente los materiales para impresión y el procesamiento de plásticos. Se pueden encontrar cálculos teóricos sobre la extrusión de plásticos, diseño de máquinas y termodinámica justificando el diseño del prototipo en cuestión. Asimismo explica detalladamente el funcionamiento de cada componente.

Se procura incentivar reciclaje del plástico además de la utilización de la impresión 3D, puesto que estas máquinas están en pleno crecimiento actualmente. Para potenciar esta incitación se contará con el soporte de piezas imprimidas en 3D que estarán incluidas en la misma máquina.

El diseño de este prototipo tendrá en cuenta conceptos clave de la extrusión de materiales y de la mecánica en general.

Resum

El present projecte conté el disseny d'una extrusora de filament per a impressores 3D, a partir de pellets, en concret de PLA. A més es pretén aconseguir un prototip senzill, de mida reduïda, econòmic i fiable per a un laboratori de prototips.

En aquest projecte s'explicarà breument els materials per a impressió i el processament de plàstics. Es poden trobar càlculs teòrics sobre l'extrusió de plàstics, disseny de màquines i termodinàmica justificant el disseny del prototip en qüestió. Així mateix explica detalladament el funcionament de cada component.

Es procura incentivar reciclatge del plàstic a més de la utilització de la impressió 3D, ja que aquestes màquines estan en ple creixement actualment. Per potenciar aquesta incitació es comptarà amb el suport de peces impreses en 3D que estaran incloses en la mateixa màquina.

El disseny d'aquest prototip tindrà en compte conceptes clau de l'extrusió de materials i de la mecànica en general.

Abstact

The present project contains the design of a filament extruder for 3D printers, from pellets, in particular PLA. It also aims to achieve a simple, small, economical and reliable prototype for a prototype laboratory.

This project will briefly explain the materials for printing and processing plastics. You can find theoretical calculations on the extrusion of plastics, machine design and thermodynamics justifying the design of the prototype in question. It also explains in detail the operation of each component.

We try to encourage plastic recycling in addition to the use of 3D printing, since these machines are currently growing. To promote this incitement will be supported by pieces printed in 3D that will be included in the same machine.

The design of this prototype will take into account key concepts of material extrusion and mechanics in general.

Agradecimientos

En primer lugar nos gustaría agradecer a nuestras respectivas familias, amigos y compañeros que nos han estado apoyando desde el principio hasta el final de desarrollo del proyecto, tanto en los mejores momentos como en los que nos supusieron más dificultades y nos dieron fuerzas para continuar motivados.

Queremos hacer mención también a nuestros tutores Ramón Jerez y Oriol Traver por el soporte mostrado y las ganas que pusieron para que este proyecto saliera adelante, sin sus guías, pautas y conocimientos nos hubiera sido imposible realizar esta entrega.

Finalmente, queremos recordar las empresas FAE y Bitron en las que los autores de este trabajo realizamos prácticas, puesto que nuestros correspondientes compañeros de oficina nos ofrecieron sus consejos.

Muchas gracias a todos.

Índice memoria

RESUMEN	3
RESUM	4
ABSTACT	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE MEMORIA	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Objetivos	12
1.2. Alcance	13
1.3. Motivación	13
2. PLANIFICACIÓN	14
2.1. Estructura de trabajo E.D.T.....	14
2.2. Tareas y duración	15
2.3. Diagrama de Gantt.....	17
3. ESTADO DEL ARTE	19
3.1. Impresión 3D	19
3.2. Materiales para la impresión 3D por extrusión.....	20
3.3. Procesado de plástico mediante extrusión	22
3.3.1. Partes extrusora de husillo.....	23
4. REALIZACIÓN TÉCNICA	31
4.1. Criterios generales	31
4.2. Análisis del proceso.....	31
4.3. Análisis de las propuestas iniciales	32
4.4. Diseño final.....	35
4.4.1. Extrusora.....	35
4.4.2. Sistema de refrigeración	41
4.4.3. Sistema de tensionado	42
4.4.4. Comprobación dimensionado.....	45
4.4.5. Sistema de control de velocidad de enrollado.....	46

4.4.6.	Bobinado.....	48
4.4.7.	Estructura de soporte y fijaciones.....	52
4.4.8.	Alojamientos y ajustes.....	54
4.4.9.	Electrónica	55
4.4.10.	Automatización.....	59
4.4.11.	Seguridad de máquina.....	63
5.	MANUFACTURACIÓN Y ENSAMBLAJE _____	65
6.	ESPECIFICACIONES DEL PROTOTIPO _____	66
7.	ACCIONES FUTURAS _____	67
8.	CONCLUSIONES _____	68
9.	BIBLIOGRAFÍA _____	69
9.1.	Bibliografía de consulta.....	69
9.2.	Bibliografía web	70

Índice de figuras

	Página
Figura 1 EDT del proyecto	15
Figura 2 Impresora Prusa i3	19
Figura 3 Partes de una máquina extrusora	23
Figura 4 Flujo de material en la tolva	24
Figura 5 Corte de sección del cilindro de la extrusora	25
Figura 6 Relación temperatura cilindro-longitud de fusión	26
Figura 7 Relación entre ángulo de filete-longitud de fusión, según tipo de filete	26
Figura 8 Perfil de velocidades del flujo de arrastre	28
Figura 9 Perfil de velocidades del flujo de presión	28
Figura 10 Perfil de velocidades del flujo total resultante	28
Figura 11 Posición del orificio de venteo en extrusoras	29
Figura 12 Diagrama del proceso	32
Figura 13 Diseño inicial de extrusora horizontal	33
Figura 14 Diseño inicial de extrusora vertical	34
Figura 15 Vista en conjunto de la máquina	35
Figura 16 Motor y acoplamiento con el husillo	36
Figura 17 Husillo	37
Figura 18 Sección frontal de la tolva	38
Figura 19 Sección lateral de la tolva	39
Figura 20 Sección de interior de la camisa	39
Figura 21 Detalle en sección del extremo de la camisa	40
Figura 22 Componentes del sistema de refrigeración hidráulica	42
Figura 23 Sección del sistema de sistema de empuje	43

Figura 24	Ejemplo de uso del sistema de tensionado	44
Figura 25	Componentes del sistema de tensionado	44
Figura 26	Sujeción del pie de rey	45
Figura 27	Componentes del sistema de medida	46
Figura 28	Sistema de control de velocidad de bobinado	47
Figura 29	Sección del sistema de control de velocidad del bobinado	48
Figura 30	Componentes de la transmisión motor- bobina	49
Figura 31	Sección sujeción bobina	50
Figura 32	Componentes del desplazamiento lateral en el bobinado	51
Figura 33	Husillo autoretorno	51
Figura 34	Sección del engranaje planetario	52
Figura 35	Estructura general de la máquina	53
Figura 36	Uniones mediante tornillería	53
Figura 37	Tolerancias placa rompedora, que permiten girar concéntrico y libremente el husillo	54
Figura 38	Dimensiones de los resaltes de los rodamientos 608-2Z de SKF	54
Figura 39	Arduino Mega 2560	55
Figura 40	Ramps 1.4	55
Figura 41	Termistor NTC 100k	56
Figura 42	Resistencia calefactora	56
Figura 43	Relé estado sólido	57
Figura 44	Controlador motor ST6600	57
Figura 45	Motor Nema 23 reducción 1:15	58
Figura 46	Controlador motor DRV8825	58
Figura 47	Final de carrera	58
Figura 48	LCD de control del prototipo	59

Figura 49	Graficet control temperatura	60
Figura 50	Graficet control motores extrusor y empuje	61
Figura 51	Control motor bobinadora	62
Figura 52	Peligrosidad por atrapamiento en polea	63
Figura 53	Peligrosidad por alta temperatura	63
Figura 54	Peligrosidad por descarga eléctrica	64
Figura 55	Peligrosidad por atrapamiento en engranajes	64
Figura 56	Prototipo extrusora de filamento	65

Índice de tablas

		Página
Tabla 1	Entregables del proyecto y responsables correspondientes	14
Tabla 2	Distribución de tareas y carga de trabajo	16
Tabla 3	Diagrama de Gantt del proyecto	18
Tabla 4	Tabla tecnologías impresión 3D	20
Tabla 5	Ventajas y desventajas de la extrusora horizontal	33
Tabla 6	Ventajas y desventajas de la extrusora vertical	34
Tabla 7	Tabla especificaciones prototipo	66

Índice de gráficos

		Página
Gráfico 1	Distribución de horas del proyecto	17

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el diseño y construcción del prototipo de una extrusora de filamento para impresión 3D, con la finalidad de obtener filamento a partir de pellets de PLA y de la reintegración en el proceso de material plástico residual de piezas defectuosas imprimidas en 3D. Esta extrusora debe ser capaz de extruir filamento, refrigerarlo, y almacenarlo en un carrete de impresora 3D.

El diseño de la extrusora debe ser fiable, económico y versátil siendo posible implementar en un futuro nuevos materiales. Finalmente se analizará los resultados obtenidos experimentalmente comparándolos con los resultados teóricos. Además este proyecto contará con toda la información necesaria para poder reproducir el prototipo y un análisis económico. Para conseguir la proposición final se fijaron metas secundarias a lo largo del desarrollo del proyecto, siendo las que mejor describen el procedimiento:

- a) Planificar el proyecto
- b) Investigar del proceso de extrusión
- c) Proponer ideas conceptuales del diseño para solucionar el problema
- d) Seleccionar el diseño más adecuado a los requerimientos.
- e) Calcular parámetros del prototipo.
- f) Optimizar el diseño seleccionado
- g) Realizar el modelo 3D del diseño y planos del mismo
- h) Comprar materiales
- i) Ensamblar y programar la máquina
- j) Calibrar la máquina para su correcto funcionamiento
- k) Validar el funcionamiento del proceso
- l) Comparar resultados teóricos y prácticos.

1.2. Alcance

El alcance de este proyecto es obtener un prototipo de extrusora de filamento de PLA a partir de pellets. Además contará con toda la documentación necesaria para poder reproducir el mismo prototipo y los cálculos teóricos necesarios para su diseño.

1.3. Motivación

La motivación de este proyecto surge a partir del gran impacto que han causado actualmente las impresoras 3D, las cuales parecen destinadas a tener una expansión exponencial y crecimiento de utilización en muchos ámbitos en el futuro. Con este proyecto se pretende hacer la impresión 3D más económica y en un futuro más sostenible. Debido a que el presente prototipo es el primer paso hacia una recicladora de plástico que producirá filamento a partir de un residuo. Esto va ligado a la idea de reciclar y los beneficios que suponen en la sociedad en cuanto a ahorro, y en el propio medio ambiente, debido a que ayuda a mantener más limpio el planeta.

2. Planificación

En esta sección se mostrara una descripción detallada de la planificación del proyecto de la extrusora de filamento. Para ello se detallara esquemáticamente las acciones generales del proyecto mediante una estructura de descomposición del trabajo (EDT), también conocida por su nombre en inglés *Work Breakdown Structure* o WBS. Después se definirá la duración del proyecto y todas las tareas a realizar. Del mismo modo se definirá la carga de trabajo para cada tarea y se le asignará un responsable y la cantidad de horas estimadas para cada ingeniero. Finalmente para mostrar de forma visual toda la planificación anterior se realizara un diagrama de Gantt.

2.1. Estructura de trabajo E.D.T.

En gestión de proyectos, una estructura de descomposición del trabajo (EDT), también conocida por su nombre en inglés *Work Breakdown Structure* o WBS, es una herramienta fundamental que consiste en la descomposición jerárquica, orientada al entregable, del trabajo a ser ejecutado por el equipo de proyecto, para cumplir con los objetivos de éste y crear los entregables requeridos, donde cada nivel descendente de la EDT representa una definición con un detalle incrementado del trabajo del proyecto.

Para definir la EDT se ha definido los entregables del proyecto. Los entregables del proyecto son toda aquella documentación y material entregado o presentado hasta la finalización del proyecto. Cada entregable tendrá un responsable y un ayudante. El responsable se hará cargo de la correcta realización y del mismo modo el ayudante se encargara de dar soporte en todo momento. Además cada entregable constara de sub entregables los cuales formaran la estructura de la EDT, a continuación se mostrara los responsables de cada entregable.

Nomenclatura	Entregable	Responsable
E1.	Memoria	Á.Camacho
E2.	Anexos	Á.Camacho
E3.	Planos	J.Culleré
E4.	Presupuesto	J.Culleré
E5.	Manual de usuario	J.Culleré
E6.	Prototipo	Á.Camacho / J.Culleré

Tabla 1: Entregables del proyecto y responsables correspondientes.

El primer nivel de la EDT del proyecto divide en prototipo y documentación. Siendo la primera todas aquellas tareas relacionadas con el prototipo y la segunda las tareas relacionadas con los documentos consecuentes del prototipo.

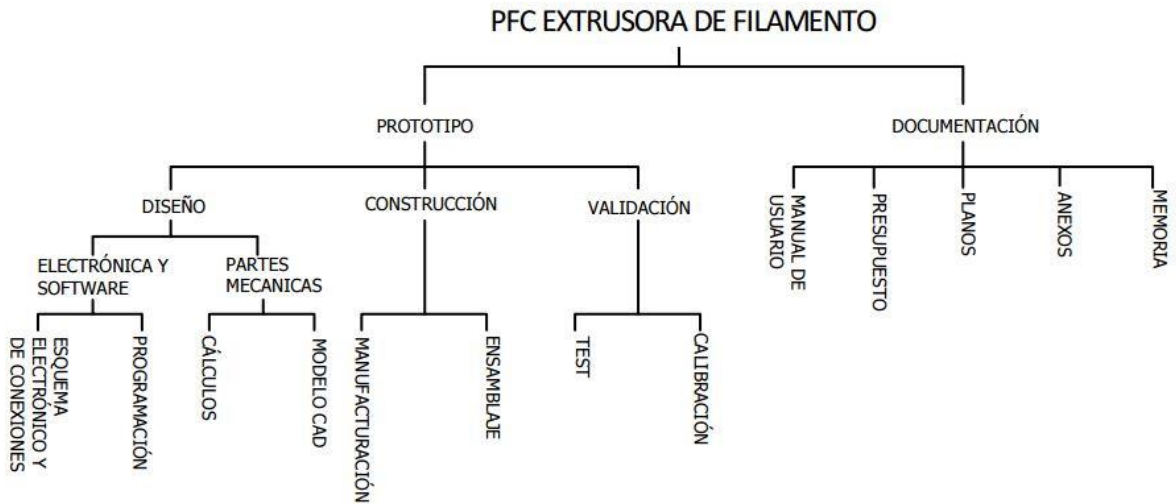


Figura 1: EDT del proyecto.

2.2. Tareas y duración

La duración del proyecto de un total de 20 semanas a partir del 12 de setiembre de 2016. Teniendo en cuenta el tiempo disponible se estima que cada componente del grupo puede dedicar un máximo de 350 horas admitiendo cierto margen de seguridad.

Para poder cumplir con los plazos de entrega es necesaria una estimación de la carga de trabajo en las diferentes fases del mismo. Del mismo modo también es necesaria la estimación de los recursos para llevar a cabo esas tareas.

A continuación se muestra una tabla con las tareas del proyecto, los responsables para cada tarea y los recursos Joan Culleré (J.C) y Álvaro Camacho (Á.C). Además en porcentaje el recurso dedicado para completar una tarea.

WBS	Tarea	Carga de trabajo (h)	Responsable	Recursos
E1.1	Diseño			
1.1.a	Modelo CAD	150	J.C	Á.C[40%] J.C[60%]
1.1.b	Cálculos	150	Á.C	Á.C[60%] J.C[40%]
1.1.c	Esquema eléctricos	40	Á.C	Á.C[60%] J.C[40%]
1.1.d	Programación	20	J.C	Á.C[40%] J.C[60%]
E1.2	Construcción			
1.2.a	Manufacturación	14	J.C	Á.C[50%] J.C[50%]
1.2.b	Ensamblaje	30	Á.C	Á.C[50%] J.C[50%]
E1.3	Validación			
1.2.a	Calibración	20	Á.C	Á.C [50%] J.C[50%]
1.2.b	Test	20	J.C	Á.C [50%] J.C[50%]
E2	Documentación			
2a	Memoria	50	Á.C	Á.C[65%] J.C[35%]
2b	Anexos	50	Á.C	Á.C[60%] J.C[40%]
2c	Planos	80	J.C	Á.C[30%] J.C[70%]
2d	Presupuestos	8	J.C	Á.C[35%] J.C[65%]
2e	Manual de usuario	8	J.C	Á.C[50%] J.C[50%]

Tabla 2: Distribución de tareas y carga de trabajo.

Analizando con detalles la tabla anterior se puede apreciar la siguiente distribución de horas en el proyecto.

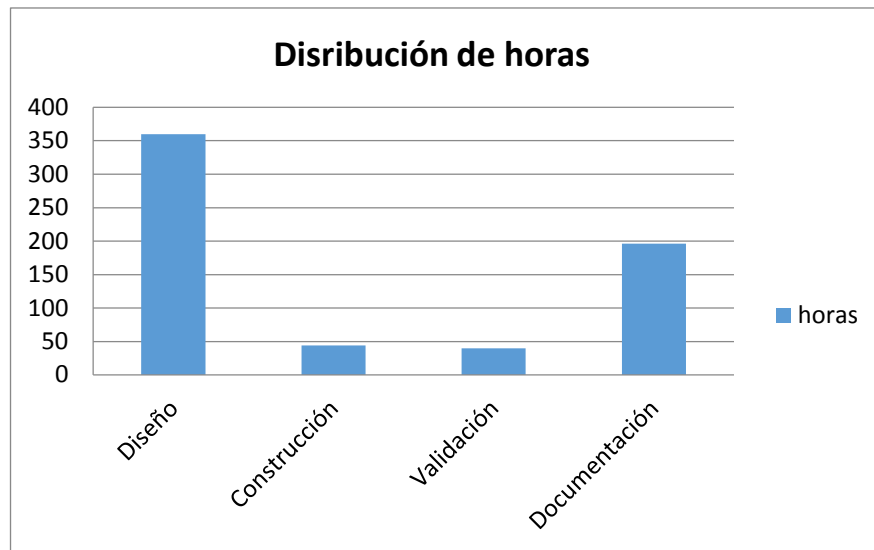


Gráfico 1: Distribución de horas del proyecto.

2.3. Diagrama de Gantt

A continuación se muestra la duración prevista para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado mediante un diagrama de Gantt. A pesar de esto, el Diagrama de Gantt no indica las relaciones existentes entre actividades.

Primeramente empezará el proyecto mediante el diseño del mismo, a mitad del diseño se empezaran a manufacturar las primeras piezas como medida para optimizar el tiempo. Una vez acabado el diseño se empezara la documentación del proyecto, en paralelo puede observar el ensamblaje y validación del prototipo.

Tareas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diseño																				
1.1a Modelo CAD/Concepto	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█									
1.1b Cálculos		█	█	█	█	█	█	█	█	█										
1.1c Esquema eléctricos				█	█	█	█	█	█	█										
1.1d Programación											█	█	█							
Construcción																				
1.2a Manufacturación					█	█	█	█	█	█	█									
1.2b Ensamblaje														█	█					
Validación																				
1.2a Calibración																	█			
1.2b Test																		█		
Documentación																				
2a Memoria												█	█	█	█	█	█			
2b Anexos																	█	█	█	█
2c Planos												█	█	█	█	█				
2d Presupuestos																				█
2e Manual de usuario																			█	

Tabla 3: Diagrama de Gantt del proyecto

3. Estado del arte

En el presente apartado se introduce la impresión 3D y se especifican los diferentes tipos de impresión 3D disponibles actualmente en el mercado. Además se detallaran los diferentes materiales para la impresión por extrusión. Finalmente se describirá el procesado de plásticos mediante extrusión y las partes de una extrusora.

3.1. Impresión 3D

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Estas máquinas son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores de producto, la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de montaje. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D, pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto.



Figura 2: Impresora Prusa i3 (<http://reprap.org/>)

Un gran número de tecnologías están disponibles para la impresión 3D sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que las diferentes capas son usadas para crear piezas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, por ejemplo sinterizado de láser

selectivo (SLS) y modelado por deposición fundida (FDM), mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados con diferentes tecnologías. En el caso de manufactura de objetos laminados, delgadas capas son cortadas para ser moldeadas y unidas juntas. A continuación se muestra una tabla con las tecnologías de impresión.

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (por ejemplo PLA, ABS), HDPE, metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	fotopolímero

Tabla 4: Tabla tecnologías impresión 3D

3.2. Materiales para la impresión 3D por extrusión

El material para crear las piezas debe ser termoplástico, cuyas propiedades destacan por fundirse a altas temperaturas y solidificarse al enfriarse en contacto con el aire. Por este motivo la gama de materiales lo suficientemente adecuados como para imprimir en tres dimensiones con ellos es relativamente escasa, los más utilizados hoy en día son tanto ABS como PLA, sin embargo en este apartado se describirán brevemente las peculiaridades de los más relevantes actualmente.

- **ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estierno)**

Tal como se ha comentado anteriormente, es uno de los más utilizados para impresión 3D, puesto que es un plástico que presenta ventajas como una gran dureza, resistencia a los

golpes, a la abrasión y a elementos químicos. No es biodegradable, sin embargo sufre si es expuesto a rayos ultravioleta. Además presenta una textura suave con respecto al PLA.

El rango de temperaturas para el correcto funcionamiento en la impresión es de 230-240°C en la boquilla y 85-110°C la cama calefactora.

- **PLA (Ácido Poliláctico)**

Es el otro gran tipo de material más empleado actualmente, a diferencia del ABS es biodegradable (fundamentalmente en contacto con agua y óxido de carbono) puesto que conserva un origen natural, ya que se adquiere a partir de almidón de maíz, por este motivo es apto para la impresión de objetos en contacto con alimentos. Su resistencia no es tan alta como la del ABS, sin embargo resulta una elección más que correcta si la pieza no es sometida a grandes esfuerzos. En el aspecto estético, visualmente no logra una suavidad como el ABS, pero se adapta mejor a ángulos de esquinas que puedan contener las piezas imprimidas.

Para que la impresora funcione con PLA, la temperatura de trabajo de la boquilla debe ser entre 200 y 220°C, y no es necesaria una cama calefactora para su uso.

- **HIPS (Poliestireno de Alto Impacto)**

Es un material muy similar al ABS, de hecho el rango de temperaturas de uso es exactamente el mismo. Por este motivo se utiliza como material de soporte en espacios huecos y en estructuras en voladizo de piezas imprimidas con ABS, previniendo la deformación del objeto.

- **PET (Tereftalato de polietileno)**

Material con características térmicas de uso en impresoras 3D parecidas a las del PLA, destaca su transparencia y resistencia a los impactos. Normalmente se utiliza para envases o botellas.

- **Laywoo-d3**

Material compuesto de plástico (PLA por ejemplo) y un porcentaje de madera reciclada. La textura es semejante a la madera al enfriarse. Para su funcionamiento se debe imprimir de 180 a 245°C, y dependiendo de la temperatura de trabajo empleada, el color del producto variará, siendo más oscuro a cuanto más temperatura se imprima. No necesita cama calefactora.

- **Nylon**

Es uno de los materiales más complicados para imprimir una pieza en tres dimensiones, puesto que presenta un gran problema de adhesión a la bandeja. Además absorbe humedad fácilmente, por lo que necesita un secado previo de entre 3 y 4 horas. Sin embargo tiene otros aspectos positivos como una gran resistencia, flexibilidad, transparencia, y resistencia a la temperatura. La temperatura de extrusión es de 225-245 °C. No necesita cama calefactora.

- **Filaflex**

Es un material de impresión desarrollado en España, cuya capacidad de alargamiento antes de la rotura es de 700%. Se venden en bobinas de 250-500 gramos a diferencia de los anteriores plásticos comentados (se venden normalmente en bobinas de 1kg).

La temperatura de extrusión es de 215-245°C. No necesita cama calefactora.

- **Ninjaflex**

Elastómero similar a Filaflex, sin embargo la capacidad de alargamiento es menor. Aun así presenta una gran posibilidad de alargamiento y deformación.

La temperatura de extrusión es de 210-225°C, mientras que la de la plataforma calefactora entre 20 y 50 °C.

3.3. Procesado de plástico mediante extrusión

Se entiende por extrusión de plástico el proceso de conformado de los polímeros al hacer pasar el material en estado semifundido a través de una sección determinada, adaptando su forma a dicha sección. Es una tecnología habitualmente utilizada para la producción de tubos, láminas, películas, recubrimientos de alambres, cables eléctricos, etc.

Existen diferentes tipos de extrusoras, aunque las más utilizadas son las de pistón y las de husillo. Las de pistón se basan en un cilindro en el que en el interior se deposita el material, el cual es empujado hacia un extremo mediante un pistón, obligando al plástico a salir con la forma del orificio del extremo del cilindro. Este tipo de extrusoras son menos utilizadas, debido a la poca producción de material que se consigue con ellas. Por el contrario, aquella en la que se consigue una mayor producción (debido a la posibilidad de introducir material constantemente) y flexibilidad en cuanto a aplicaciones es la de husillo (posibilidad de controlar de una mejor manera el material consumido, añadir materiales para que sean mezclados...), por lo que es la que se emplea con gran frecuencia y la que se diseñará en este proyecto. A continuación se describe en profundidad el sistema de extrusión con husillo convencional.

3.3.1. Partes extrusora de husillo

En la figura 3 se muestran las partes principales de forma esquemática de una extrusora de husillo. El conjunto se compone de un motor (1), el cual entrega la potencia necesaria a la máquina para ponerla en marcha, seguido de una etapa de reducción (2) en la que tal y como su propio nombre indica, reduce la velocidad de salida del motor para adaptarla a una adecuada para una correcta extrusión de material. Para ello se añade un acoplamiento (3) entre el eje de la etapa de reducción y el husillo (5), el cual transportará por la camisa cilíndrica (6) el material que el usuario de la máquina inserte mediante la tolva (4). En este proceso de transportado, el material se funde gracias a la incorporación de resistencias calefactoras (7) alrededor de la camisa, cuya temperatura es controlada, en ocasiones, con ventiladores (8). Una vez el material ha sido transportado a la parte extrema final de la extrusora, el cual viene homogeneizado gracias al trabajo de giro del husillo, más adelante se filtra y se pasa de tener un flujo con tendencia giratoria a otra lineal gracias al plato rompedor (9), finalmente el material es expulsado hacia el exterior por el dado (10), el cual le dará la forma que deseamos.

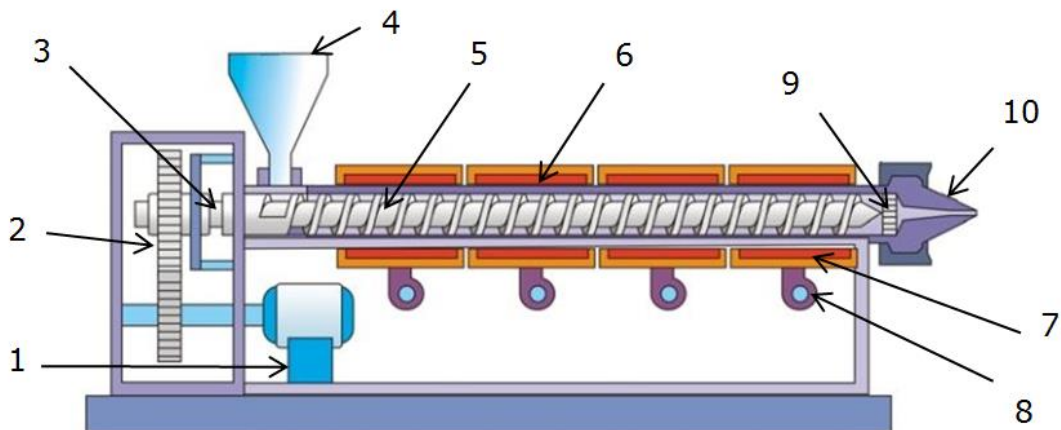


Figura 3: Partes de una máquina extrusora (Beltrán y Marcilla, 2012: 104)

Una extrusora se puede dividir en varias zonas las cuales están comprendidas entre el material en forma de gránulos hasta el filamento.

- **Transporte del material sólido (zona de alimentación)**

Esta zona engloba tanto la introducción del material en la tolva como la primera parte del transporte por el interior del cilindro, durante todo el proceso el componente se encuentra en estado sólido.

En primera instancia, el transporte se efectúa por la tolva mediante gravedad, es decir, por el propio peso del material. La tolva generalmente tiene forma de embudo de manera que facilita el proceso de llenado cuando el usuario aloja los gránulos en su interior, cuando esto sucede de manera considerada como correcta se dice que hay flujo en masa, sin embargo en ocasiones puede haber problemas de estancamiento del material ya sea por los laterales de la tolva, donde pasaríamos a tener flujo de embudo, u otro fenómeno llamado flujo de puente, en el que el material en estado sólido adquiere un flujo poco eficiente y queda obstruido en la parte de la garganta de la extrusora, debido a que se forma una especie de “arco” en la parte comentada.

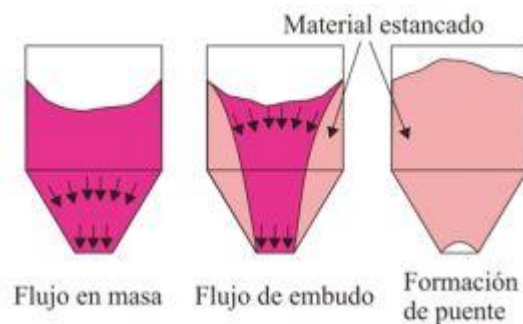


Figura 4: Flujo de material en la tolva (Beltrán y Marcilla, 2012: 117)

Cuando el material fluye de forma adecuada por la tolva, llega al centro de la extrusora, coincidiendo con el husillo, el cual debe estar ya en funcionamiento, girando a una velocidad determinada. Por lo que el material comienza a ser transportado ya no por gravedad, si no por arrastre del propio husillo, además en este momento el material empieza a calentarse producto del calor producido por las resistencias. La distancia de la zona de alimentación en el husillo depende del diseño del mismo, en concreto, de su longitud máxima.

- **Fusión (zona de transición)**

Una vez el material empiece a fundirse debido a las resistencias calefactoras situadas alrededor del cilindro y del propio rozamiento del material con los componentes de su entorno, se entenderá que es la zona de transición.

Las primeras partículas que empiezan a fundirse del plástico son las más próximas a la superficie interna del cilindro, pues son las más cercanas a la fuente térmica. El material se funde hasta alcanzar un ancho igual a la holgura entre la pared del cilindro y el filete. Debido al movimiento rotatorio del husillo se crea una diferencia de presión en el interior de la extrusora, siendo mayor en el extremo por el que sale el material, como consecuencia aparece un incremento de velocidad del material fundido en sentido opuesto a la dirección

de flujo, el cual es recogido por los filetes en la zona conocida como “pozo” y que se sitúa delante de los mismos, el material recircula en esta zona y empuja a los gránulos sólidos a la parte trasera del siguiente filete, este fenómeno además, produce que al compactarse el material sólido parte del aire que existe entre en él sea expulsado dirección la tolva.

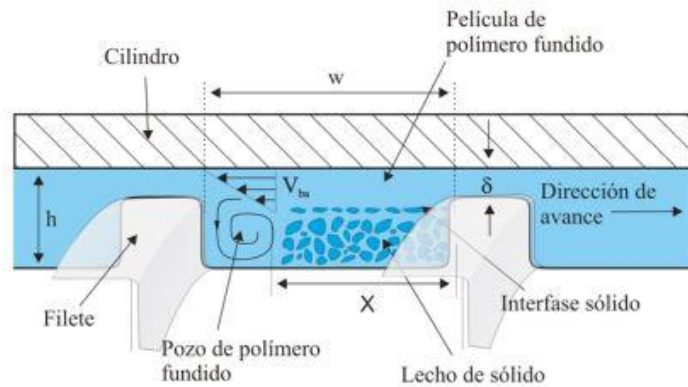


Figura 5: Corte de sección del cilindro de la extrusora (Beltrán y Marcilla, 2012: 123)

Conforme el material avanza por la extrusora sigue fundiéndose, de manera que en cada instante de tiempo aumenta el caudal de material fundido en el pozo y queda menos material sólido, hasta que finalmente todo el polímero se encuentra fundido en su totalidad. En cuanto a la velocidad de fusión, es decir, la rapidez con que se consigue la fusión total de material, parece lógico pensar que puede reducirse de dos maneras:

- Aumentando la velocidad de giro del husillo, produciendo un mayor rozamiento del material con el husillo y el cilindro y por lo tanto un calor extra.
- Aumentando la temperatura de los calefactores.

Sin embargo en el primer caso aumentando las revoluciones a la que gira la máquina se produce una mayor cantidad de material puesto que este circula a mayor velocidad por el interior de la extrusora, y es por este mismo motivo que encontrándose menos tiempo expuesto a temperatura y fuerzas viscosas el material puede llegar a no fundir, o fundir parcialmente.

Por otra parte, aumentando demasiado la temperatura, sobre todo para polímeros especialmente sensibles a cambios de viscosidad con el calor, debido a que la temperatura será mayor, la viscosidad del material disminuirá considerablemente, reduciendo así también las fuerzas viscosas que existían anteriormente y consiguiendo una fusión más tardía.

Por ello es importante conseguir un equilibrio entre velocidad de giro y temperatura, obteniendo una longitud de fusión mínima (longitud del cilindro en el que se funde

totalmente el polímero) tal y como se muestra en la figura 6, en la que se representa la curva de longitud de fusión en función de la temperatura, a una velocidad de giro constante.

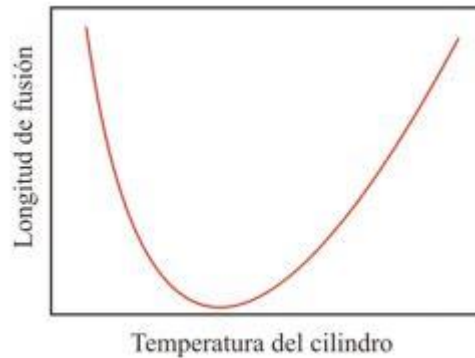


Figura 6: Relación temperatura cilindro-longitud de fusión (Beltrán y Marcilla, 2012: 125)

Otro factor que afecta a la longitud de fusión es la inclinación de los filetes, en función de este parámetro varía de forma considerable el tiempo que tarda el material en fundirse, tal y como se aprecia en la figura 7, en la que se puede apreciar además el ángulo óptimo es el de un filete a 90°. Por otra parte, para conseguir un buen transporte del material se emplean normalmente ángulos de 20-30°.

Otra manera de optimizar el proceso de fusión es utilizar filetes múltiples (lo cual también se podrá ver en la figura 7), puesto que la película de material fundido entre el filete y el cilindro es menor existirá una mayor presión. Sin embargo empeoran el transporte de material por lo que no es la mejor solución.

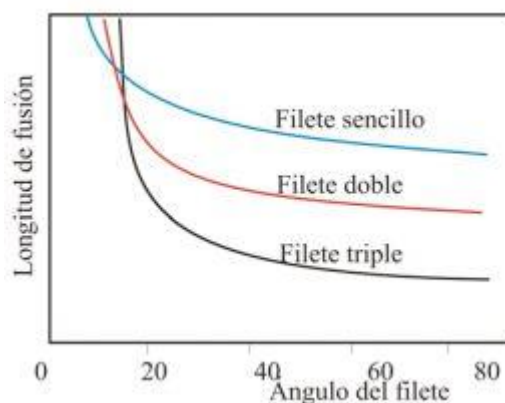


Figura 7: Relación entre ángulo de filete-longitud de fusión (Beltrán y Marcilla, 2012: 126)

Un importante parámetro para que la fusión se lleve a cabo lo mejor posible es, como se ha comentado anteriormente, la holgura entre el filete y el cilindro, esta debe ser lo más

pequeña posible, para ello se reduce la profundidad de dicho canal aumentando el diámetro del husillo entre la zona de alimentación y la zona de dosificación, la diferencia entre estos diámetros es conocida como relación de compresión. Esta geometría permite aumentar la presión del material conforme avanza por la extrusora, de manera que se comprime, aumentando la transferencia de calor y la cizalla, fundiéndose progresivamente. Cabe destacar que puede producirse un taponamiento del material aún sólido en el interior de la máquina si dicha compresión se efectúa demasiado rápido.

- **Transporte del material fundido (zona de dosificación)**

En esta zona el material ya se ha fundido completamente, y su única función es transportar el polímero, desde el punto en el que empieza la zona hasta la salida de la extrusora, además de la homogeneización del mismo mediante el giro del husillo, por este motivo la holgura entre el cilindro y los filetes vuelve a ser constante ya que no es necesario un incremento de presión.

En una extrusora se consideran tres tipos de flujos en la zona de dosificación, pues el material ya ha sido procesado y homogeneizado:

- a) Flujo de arrastre: Aquel provocado por el giro del tornillo, producido debido al rozamiento del material con el cilindro y el husillo, es el flujo que más afecta al sistema.
- b) Flujo de presión: Componente de flujo que se opone a la dirección de avance del material, provocado por la diferencia de presión entre los extremos de la máquina.
- c) Flujo de pérdida: Como en el caso anterior, también se opone al flujo de arrastre, y hace referencia a las pérdidas de material entre juntas de la máquina, su valor es mucho más pequeño que los dos anteriores por lo que puede llegar a ser despreciable en la mayoría de casos.

En las figuras 8, 9 y 10 se muestran de manera esquemática los perfiles de velocidades de los flujos de arrastre, presión y el resultante o total de la extrusora, siendo este último la suma algebraica de los tres tipos de flujo y aquel que obtendrán una vez el material sale por el dado extrusor.

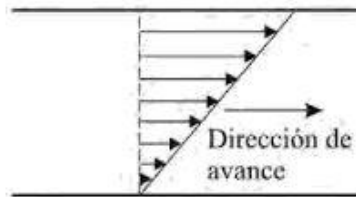


Figura 8: Perfil de velocidades del flujo de arrastre (Beltrán y Marcilla, 2012: 128)

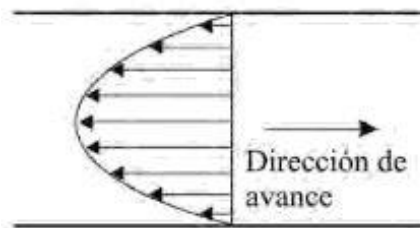


Figura 9: Perfil de velocidades del flujo de presión (Beltrán y Marcilla, 2012: 128)

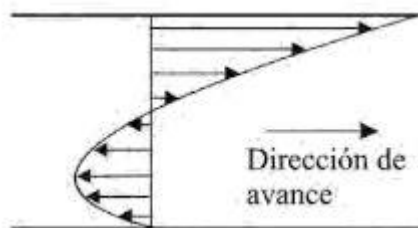


Figura 10: Perfil de velocidades del flujo total resultante (Beltrán y Marcilla, 2012: 128)

- **Desgasificado**

Algunos tipos de plásticos pueden conservar en ellos componentes volátiles (normalmente hidrocarburos), los cuales se definen como aquellos que tienen una gran facilidad en convertirse en gas, a la temperatura en que trabajan las extrusoras es posible que este efecto puede se produzca, por lo que afecta negativamente en el proceso. No es recomendable que existan en la extrusión otros materiales conjuntamente con el que se quiere trabajar, ni bolsas de aire en su interior, puesto que se aumentaría la porosidad, la calidad del polímero al ser extruido se reduciría. Por ello, en estas situaciones se incorpora un orificio de venteo sobre el cilindro por el que estos gases o el propio aire escape por dicha abertura. En ocasiones puede salir, además del gas, el propio material, esto sucede cuando la velocidad existente dentro del cilindro es muy alta, o cuando el área del orificio es pequeña, aumentando la fuerza de presión y consiguiendo arrastrar el material hacia el exterior, en

estos casos la solución pasa por aumentar la sección del orificio, añadir más entradas de venteo, reducir la velocidad del husillo, o reducir la producción de la extrusora.

En estos casos además, el tornillo tiene un diseño especial, tal como se muestra en la figura 11, para que únicamente exista salida de gases y no de material extrusor, esto se consigue con el siguiente patrón de proceso: zona de alimentación, zona de transición (aumento del diámetro del husillo y fusión del material), descompresión (diámetro constante del husillo y orificio de venteo), segunda etapa de transición (nueva compresión del material ya fundido y desgasificado para recuperar la presión adecuada para la extrusión).

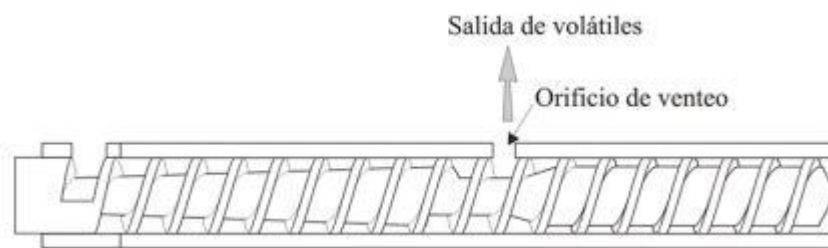


Figura 11: Posición del orificio de venteo en extrusoras (Beltrán y Marcilla, 2012: 137)

- **Filtrado y conformado**

Una vez el material es transportado a la parte extrema de la extrusora gracias a la zona de dosificación, es necesario un filtrado del mismo, mediante el plato rompedor (placa de acero perforada) y una rejilla junto a este. Con la combinación de ambos elementos se consigue evitar el paso de polvo o de material parcialmente fundido, además de eliminar la tendencia giratoria del flujo, pasando a tener un flujo lineal.

Llegados a este punto, el material obtenido se encuentra fundido, desgasificado, homogeneizado y filtrado, la reducción de sección del interior del dado ayuda a aumentar la velocidad del fluido por el conducto, y gracias a la presión ya existente es empujado hacia el orificio de la boquilla, donde adquiere la forma de la sección diseñada al pasar por esta.

Cuando el proceso se realiza a temperatura y velocidad constante el plástico es de las mismas dimensiones a lo largo de su sección, si se aumenta o reduce alguno de estos factores no se obtiene un resultado constante y por lo tanto, no es de una buena calidad, por este motivo es importante controlar la mejor manera posible estos dos parámetros. Además este fenómeno también puede producirse si el incremento de diámetro en el interior del dado se da de manera brusca, puesto que

el material se vería sometido a una gran aceleración, teniendo unas altas velocidades, y por lo tanto pasaríamos de tener flujo laminar a flujo turbulento, a esto se le llama efecto dado.

Otro de los problemas más comunes que pueden aparecer en este punto de la extrusión es la conocida como piel de tiburón, ocurre debido a que la velocidad de flujo que existe en las

partes más próximas a las paredes del interior del dado son de un valor reducido, por lo que las partículas que pasan de tener esta velocidad a la que tiene todo el material a la hora de salir por la boquilla, sufren una enorme aceleración, produciendo altos esfuerzos de tracción y la posibilidad de rotura del material, provocando irregularidades en la superficie de este y por lo tanto, una disminución notoria de la calidad del producto.

Además, en el momento preciso en que el material sale por la boquilla, este experimenta un incremento brusco de temperatura, y debido a las propiedades visco elásticas de los polímeros, estos tienden a dilatarse, expandiéndose, a este fenómeno se le llama relajación, por consiguiente los tamaños de las boquillas se diseñan adaptándose a estas dilataciones.

Posteriormente, la refrigeración del plástico extruido es necesaria debido a que el material sale a alta temperatura y en un estado gomoso, por lo que es importante conseguir una determinada solidificación del material para que a la hora de tensionarlo y recogerlo no se produzcan grandes desviaciones en la dimensión de la sección a lo largo del plástico extruido.

- **Tensionado y bobinado**

Una vez el polímero ya es extruido es preciso tensionarlo con el objetivo de ser bobinado, aunque de forma general se usa como guías rodillos, por lo que es prácticamente inevitable modificar en cierta medida la dimensión del producto final. Finalmente el material se bobina obteniendo así un rollo de material extruido.

4. Realización técnica

4.1. Criterios generales

A la hora de realizar el diseño se han tenido en cuenta una serie de criterios generales que respetan criterios técnicos, la situación del proyecto y los ingenieros involucrados en él. Los criterios generales de diseño son:

- Prototipo económico: los componentes no deben superar los 1000€.
- Maximizar los componentes imprimidos en 3D.
- Aplicar en la medida de lo posible la normativa de seguridad de máquinas.
- Limitar sus dimensiones y peso: El prototipo debe ser transportable.
- Diseñar un prototipo con una larga vida útil.
- Cumplir recomendaciones de los fabricantes en las fichas técnicas de cada uno de los componentes comerciales, pueden consultarse el anexo 3.
- Aplicar conocimientos de ingeniería.
- Diseño versátil, de fácil regulación y capaz de implementar nuevos materiales y mejoras en un futuro.

4.2. Análisis del proceso

El diagrama del proceso del prototipo de la extrusora detalla todas las operaciones realizadas por el mismo. Cada una de estas operaciones debe cumplir los criterios de diseño y respetar la calidad del producto final.

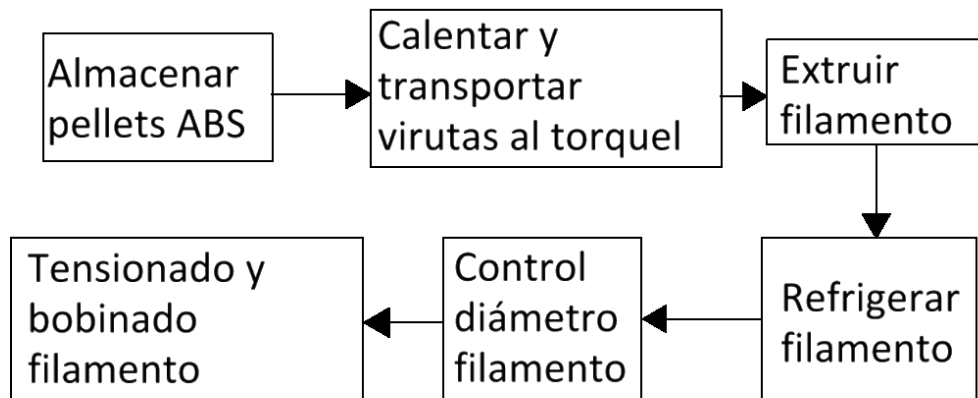


Figura 12: Diagrama del proceso

4.3. Análisis de las propuestas iniciales

A partir de los estudios teóricos y los criterios generales de diseño se prediseñaron dos extrusoras. La primera realizar una extrusión horizontal con husillo y la segunda una extrusión por presión con pistón en vertical, a continuación se realiza brevemente una descripción expone ventajas e inconvenientes de cada una de ellas:

- **Extrusora horizontal**

Su funcionamiento se basa en hacer girar un husillo en el interior de un cilindro calefactado mediante resistencias tipo abrazadera, este posee un agujero pasante a lo largo de su cuerpo con el objetivo de alojar dicho husillo. El accionamiento del giro de los componentes se consigue gracias a un motor situado a una altura adecuada para, mediante engranajes, transmitir la potencia del motor a un eje, el cual va acoplado al husillo por el efecto de un acoplamiento elástico para evitar posibles vibraciones en el mismo.

En el cilindro calefactado existe un orificio por el que se introduce la tolva, destinada a recibir el material de entrada. Asimismo, el cilindro es aislado térmicamente con una material aislante para concentrar el calor en el interior del mismo y que este sea utilizado a calentar el material y no el ambiente. Además de disponer de unos soportes para mantener fija la extrusora a bancada.

Finalmente, este diseño consta de un sistema de enrollamiento del hilo, accionado por otro motor y sistema de transmisión de potencia simétricos al anterior comentado, en el que esta vez se penetra en el acoplamiento elástico un cilindro destinado a bobinar el material.

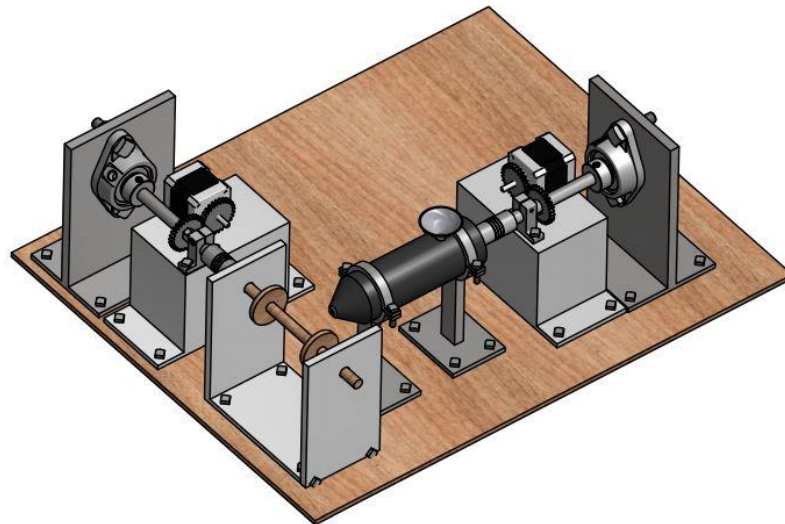


Figura 13: Diseño inicial de extrusora horizontal

Ventajas:
Diseño común
Facilidad en la alimentación de la extrusora
Diseño ergonómico
Desventajas:
Enrollamiento poco práctico
Dimensiones
Dificultad cálculos

Tabla 5: Ventajas y desventajas de la extrusora horizontal

- **Extrusora vertical**

La segunda elección se fundamenta en una en la unión de un pistón y un mecanismo de biela-manivela (el cual es accionado por un motor), en el que conseguimos un desplazamiento lineal, haciéndolo trasladar por el interior de un cilindro en el que se habría introducido y calentado previamente los gránulos de PLA (mediante resistencias abrazaderas) presionando dicho material y obligándolo a salir por el extremo del cilindro con la forma de la sección fabricada, es decir, en forma de cable.

El sistema de biela-manivela se consigue gracias a la actuación de una barra perforada que actúa como guía. En este caso el motor debe ser programado para girar media vuelta de la

pieza cilíndrica de la figura 14 para presionar hasta la base el material, y volver por el mismo camino de manera que no se ocasionasen colisiones entre componentes.

El cilindro va sujetado a bancada mediante barras verticales con tornillería y aislado térmicamente de la misma manera que en el anterior diseño.

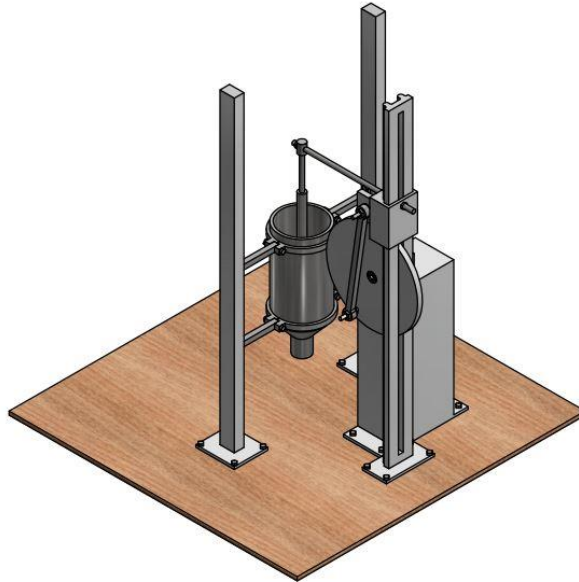


Figura 14: Diseño inicial de extrusora vertical

Ventajas
Pocos elementos
Diseño compacto.
Diseño novedoso
Desventajas:
Gran dificultad de enrollamiento del PLA obtenido sin modificar su geometría.
No homogenización del material
No garantía de cumplir con la presión requerida

Tabla 6: Ventajas y desventajas de la extrusora vertical

4.4. Diseño final

Debido a las ventajas y desventajas presentadas por ambos diseños finalmente se decidió escoger como solución final la extrusora de husillo horizontal, pues cumple con más seguridad el objetivo marcado. Se trabajó para optimizarla, disminuyendo sus desventajas al máximo, añadiendo sistemas de refrigeración, tensionado, comprobación dimensional y mejorando el bobinado. Cada una de las secciones por las cuales será tratado el PLA extruido se muestra en la imagen siguiente y es explicada a continuación con detalle:

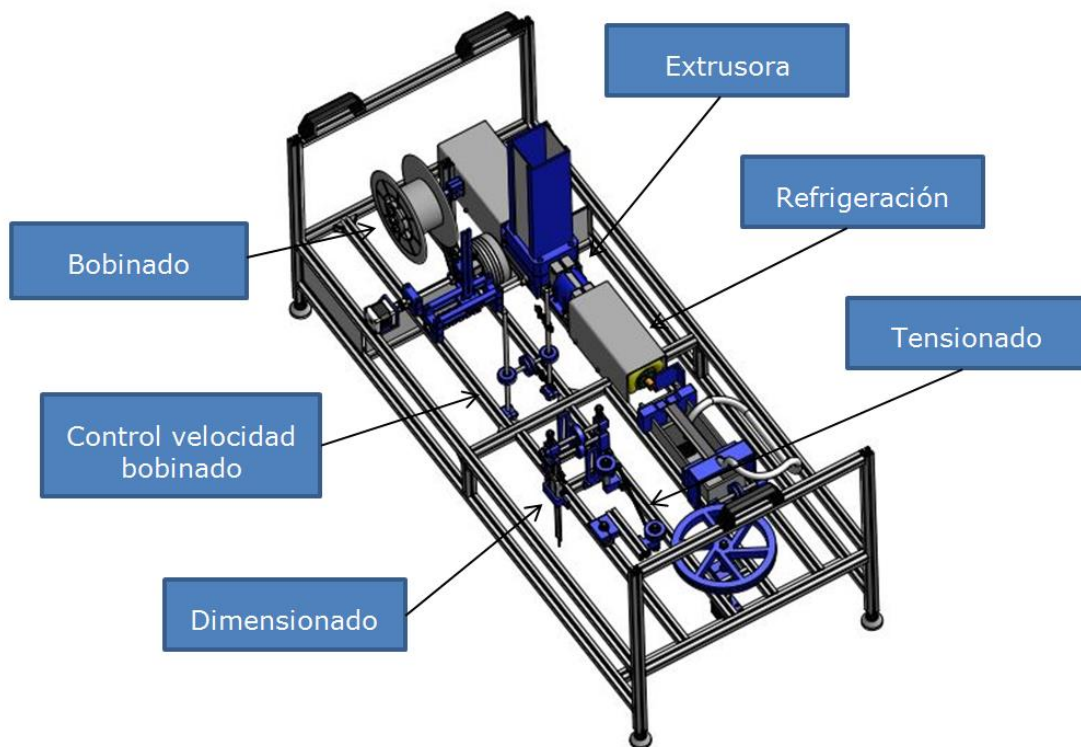


Figura 15: Vista en conjunto de la máquina

4.4.1. Extrusora

Para poder cumplir el objetivo final la parte esencial del procesamiento del material es la extrusión, por ello se especifica a continuación el diseño de la máquina extrusora que permitirá dicho propósito.

La máquina se compone básicamente de un motor que la acciona, y hace girar al husillo, el cual permite la mezcla y transporte de material, la tolva por la que se introduce el PLA, y el cilindro o camisa el cual contiene el husillo citado, a parte de la boquilla la cual da la forma de cable a los pellets introducidos una vez han sido procesados.

Analizando más concretamente los componentes empleados para el correcto funcionamiento del proceso, cabe destacar la incorporación de un acoplamiento imprimido en 3D entre el eje del motor y el husillo, el cual ayuda a transmitir la potencia del motor al husillo. Además, debido a que el material del mismo es de plástico y no ofrece una gran resistencia, puede actuar como limitador de par en caso de que algún gran momento torsor actuase en el sistema, como por ejemplo el atascamiento del husillo por material residual sólido, el husillo no sería capaz de girar mientras que el motor sí, provocando una fractura en el acoplamiento, de manera que se evitaría que este par fuera transmitido al motor, previniendo posibles daños sobre el mismo, aunque por otra parte el motor seleccionado incorpora limitador de par por sí mismo. Es importante proteger el motor de estos posibles fallos puesto que sin él sería imposible accionar la máquina, además suelen ser de los componentes más caros. El motor se sujeta a la estructura de aluminio general de la máquina mediante un soporte imprimido en 3D y tornillería.

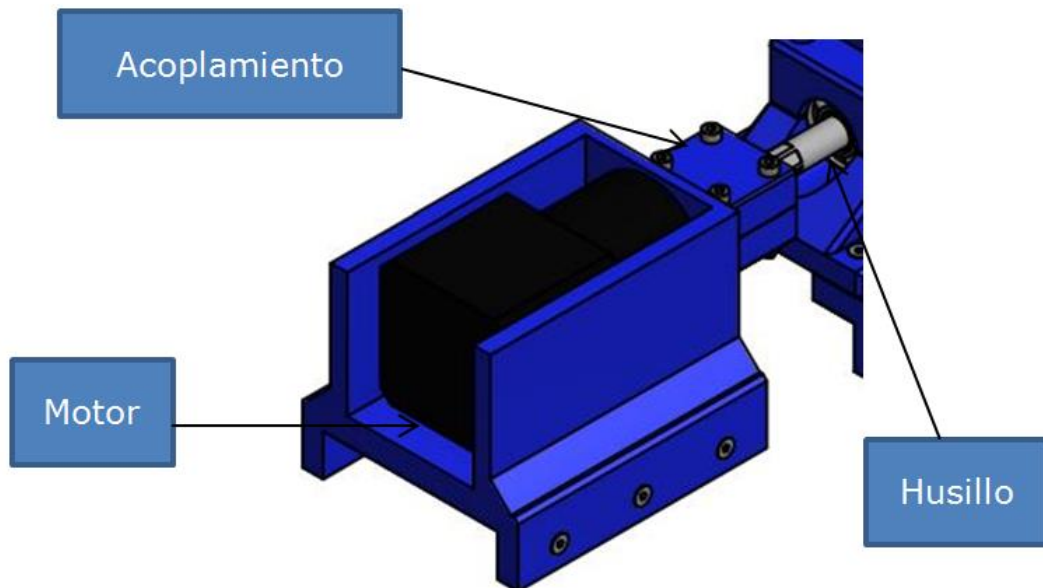


Figura 16: Motor y acoplamiento con el husillo

El husillo empleado es de diámetro constante, a diferencia de los utilizados normalmente en este tipo de procesos, debido a la limitación económica a la hora de realizar el proyecto, y por el hecho de ser un primer prototipo de la máquina, pues esta se podría mejorar en un futuro (véase el capítulo 7: “acciones futuras”), puede ver también en concreto las especificaciones del husillo en el anexo 3). Las diferencias que hay entre los dos tipos de husillos de cara al proceso de extrusión se encuentran en la presión generada en el interior de la camisa, será menor en el diseño de nuestra máquina, sin embargo, suficiente como para que se realice el proceso.

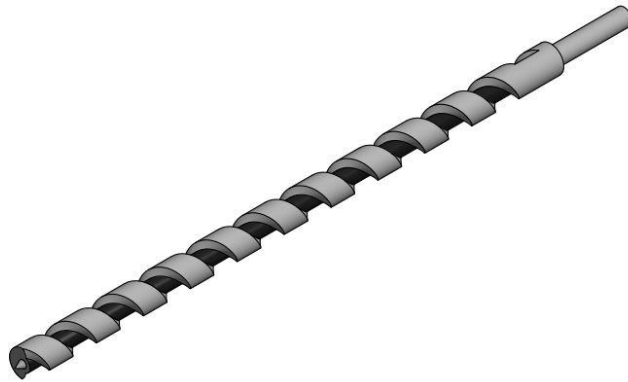


Figura 17: Husillo

La tolva por la que se introduce el material está dividida en dos secciones, por una parte consta de chapas rectangulares de metacrilato transparente, un material económico, fácil de encontrar, y con unas propiedades mecánicas adecuadas para la función que ha de cometer, por el cual, debido a su translucidez, podrán ver como bajan los pellets de PLA. En dos de los extremos opuestos contiguos a cada una de las chapas de metacrilato existen dos sujeciones imprimidas en 3D que consolidan la unión de los 4 perfiles, además uno de ellos incorpora protuberancias rectangulares, los cuales dependiendo de donde se encuentre la altura máxima del plástico llenado indican la cantidad de material en masa introducido en la tolva. En la parte inferior de la tolva de perfil cuadrado se introduce un sensor de proximidad, el cual advertirá mediante un LCD, la presencia de material en el interior de la máquina e inutilizará el husillo como medida preventiva de seguridad.

Por otra parte dos piezas imprimidas en 3D diseñadas con una cierta pendiente para que el plástico vaya entrando al centro de la extrusora de manera progresiva y más controlada, estas dos piezas actúan como soporte para el perfil cuadrado de metacrilato, y estas, a su vez, son soportadas por otras dos piezas imprimidas en 3D. En este caso, estas dos piezas se montan una encima de la otra mediante tornillería y actúan como empaquetamiento del husillo, las cuales contienen una ranura de forma cilíndrica para el alojamiento del mismo, además estas piezas son fijadas al soporte de toda la tolva (también imprimida en 3D), la cual se ancla a la estructura para mantenerla sujeta. Por otra banda contienen una ranura cilíndrica para introducir aislante de fibra de vidrio y evitar el posible derretimiento del plástico debido a las altas temperaturas de trabajo de la extrusora.

En la parte trasera de la tolva, se ha diseñado un empaquetamiento de dos elementos en el que se introduce un rodamiento, el cual se asienta perfectamente a la ranura cuando se ensamblan ambas

piezas, permitiendo el giro libre del husillo. La pieza inferior sujeta al soporte de la tolva está diseñada con forma de nervio para que el material soporte de una mejor manera la fuerza generada por el husillo, ya que dicho esfuerzo lo sufrirá el rodamiento, y por lo tanto también por su empaquetamiento.

Para evitar que el calor que se pueda transmitir desde la extrusora debido a las altas temperaturas a las que trabaja y pueda perjudicar al material plástico que forman la máquina por derretimiento, se le añade entre la tolva y la parte calefactora de la extrusora un ventilador, sujeto a la estructura mediante otra pieza impresa en 3D, y la cual ha sido diseñada con forma circular de manera que caudal de aire del ventilador se contenga en la zona en cuestión y no se escape hacia el ambiente.

La camisa que abraza el husillo se encuentra fijada a bancada (la estructura) mediante dos soportes abrazadera situados en los extremos del ventilador anteriormente comentado.

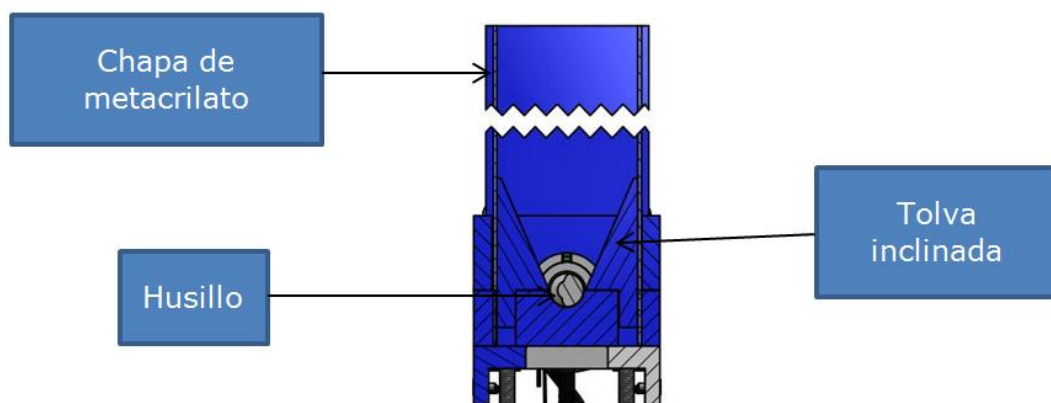


Figura 18: Sección frontal de la tolva

Tal y como se ha explicado, la máquina trabaja a alta temperatura, concretamente a 220°C, puesto que es la temperatura óptima a la que el material será extruido de una forma adecuada, según el estudio realizado y que puede verse en el anexo 4 "calibración y validación". Para conseguir esta temperatura, se instalan tres resistencias tipo abrazadera, una aproximadamente en el centro de la camisa, otra situada al costado de esta, y la última se posiciona en la zona más extrema de la camisa (véase la imagen 19 en la parte inferior, se representan las resistencias en color blanco), las cuales, dejando pasar un tiempo determinado, calentarán hasta la temperatura citada toda la parte interna de la extrusora, concretamente la zona donde se encuentra situado el husillo, y llevando a los pellets de PLA a un estado físico apto para la extrusión.

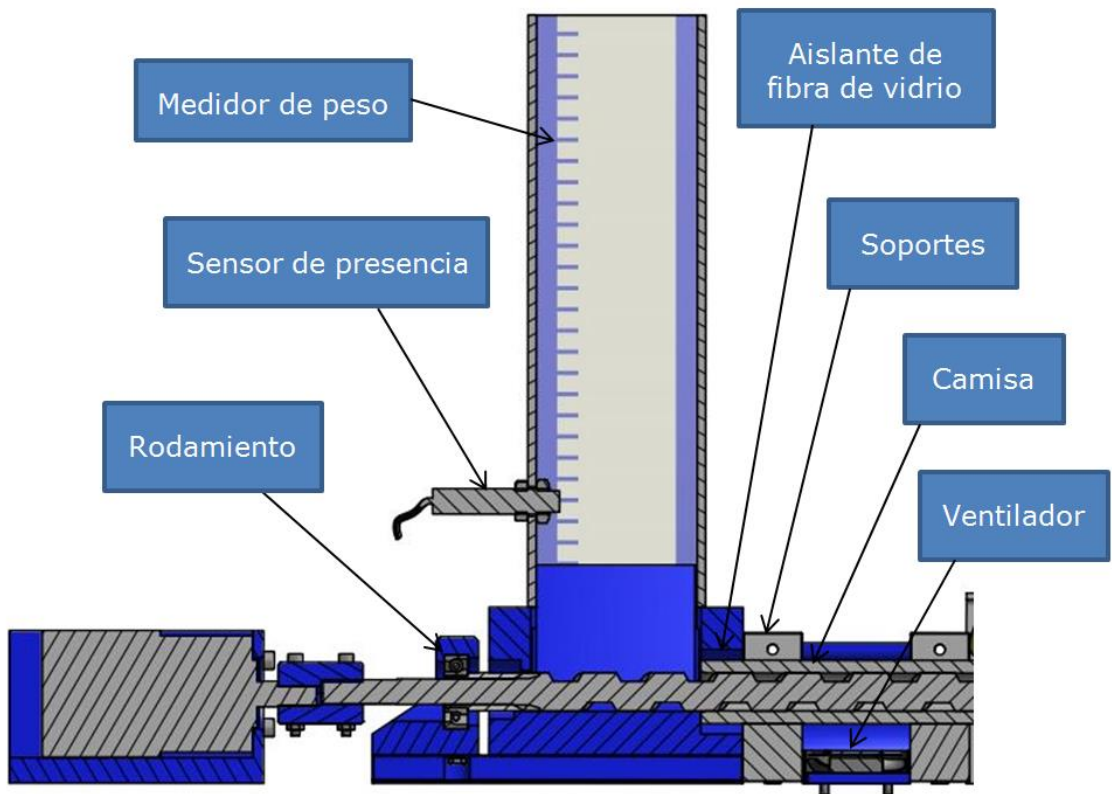


Figura 19: Sección lateral de la tolva

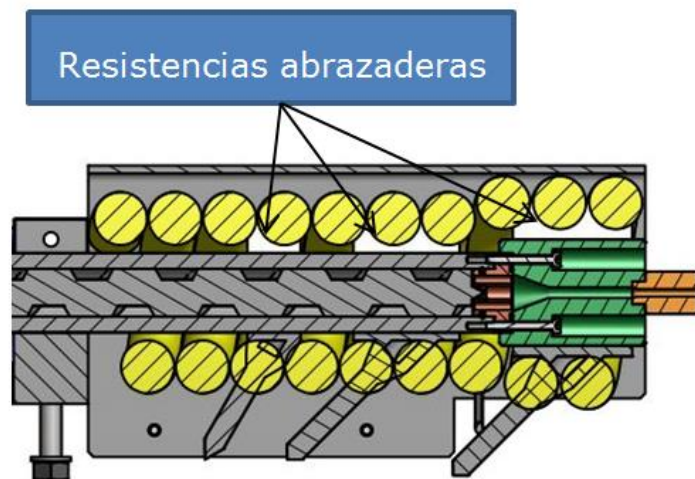


Figura 20: Sección de interior de la camisa

En esta misma zona final donde se produce el efecto de la extrusión en sí, justo al extremo del husillo se anclan conjuntamente dos importantes piezas a la camisa con el objetivo de que se realice el proceso de manera apropiada, las cuales ambas son de acero inoxidable (AISI 304), puesto que evitan

la corrosión y aguantan altas temperaturas: en primera instancia la llamada placa rompedora, cuya función es hacer olvidar la memoria de giro del material, transformándola a un tipo de flujo lineal con el motivo de facilitar la salida del plástico por la boquilla y evitar posibles defectos superficiales, esto se consigue mediante la elaboración de unos orificios pasantes por el interior de la pieza. Además, en uno de los agujeros, en el del centro de la pieza concretamente, se le añade un cojinete en el que se apoya el extremo del husillo, cuyo cometido es facilitar el giro concéntrico del mismo, evitando así que en unas partes a lo largo del perímetro del interior de la camisa haya más holgura entre el husillo y la camisa que en otras, puesto que esto provocaría distintas presiones a lo largo del contorno, luego material no quedaría bien homogeneizado y por lo tanto habría irregularidades en él una vez fuera extruido. La otra pieza de la que se ha hablado es un acople que guía el material desde que sale de la placa rompedora hasta la boquilla, reduciendo la sección en su interior progresivamente para preparar el material a salir con el diámetro diseñado en la boquilla, de lo contrario, si no existiera una reducción lenta, podría producirse el fenómeno conocido como efecto dado, comentado en el apartado “3.3.1. Filtrado y conformado”. Este elemento incluye una ranura en el extremo final roscada, con el objetivo de roscar y fijar la boquilla, la cual está diseñada con un orificio pasante de 2,85 mm diámetro, aunque en el extremo roscado de la pieza, se perfora el diámetro en forma de cono, adaptando las dimensiones del acople-guía tal y como se muestra en la figura 21:

El material seleccionado para la boquilla es latón, debido a su capacidad de conducir la temperatura, lo cual ayuda a conseguir una refrigeración óptima (comentado en el apartado 4.4.2. Sistema de refrigeración) y un estado del PLA adecuado para ser transportado.

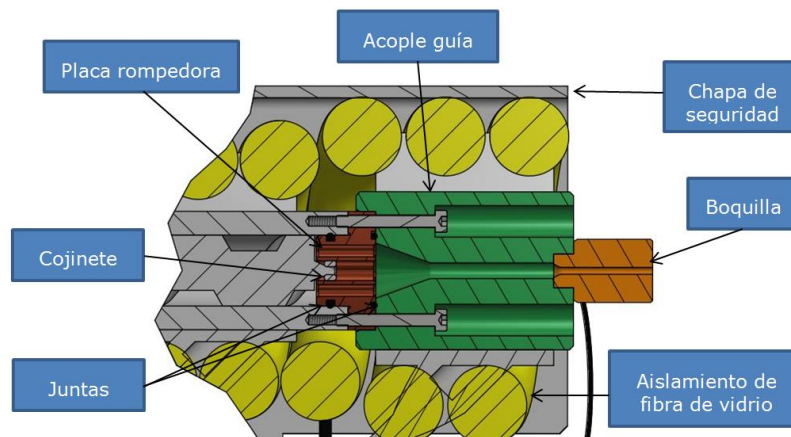


Figura 21: Detalle en sección del extremo de la camisa

Cabe comentar que se implementan juntas tóricas entre camisa-placa rompedora, y placa rompedora-acople guía para evitar más que posibles fugas de material o de presión entre los componentes. Para el diseño de estas se ha aplicado los criterios de alojamiento explicados en el apartado de ajustes y alojamientos.

Todo este sistema, desde el extremo final por donde sale el PLA extruido hasta el soporte abrazadera que fija la camisa a bancada se encuentra aislado térmicamente mediante fibra de vidrio, con lo que se consigue que se concentre el calor en el interior de la extrusora y no se pierda por el ambiente, ayudando a conseguir la temperatura deseada de forma más rápida.

Finalmente, desde la boquilla hasta el soporte que fija la camisa, se agrega una chapa de aluminio para cubrir la extrusora, por razones de seguridad de máquinas (véase el apartado 4.4.11. Seguridad de máquina) es fijada a los perfiles de aluminio que actúan como bancada mediante tornillería.

4.4.2. Sistema de refrigeración

Una vez el material sale de la extrusora es necesario enfriarlo para su posterior tensionado y bobinado.

A la altura de la boquilla se incorpora un ventilador radial, fijado de la misma manera que el anterior a la estructura, para enfriar el plástico de salida pasando a tenerlo en un estado gomoso.

Posteriormente se le hace pasar agua entre 35-40°C (para que el material acabe de solidificar) a contracorriente, es decir, en el sentido contrario de la velocidad del hilo, el cual es guiado por un perfil de aluminio en L, este es sujetado mediante dos piezas de plástico imprimidas en 3D en las que existe una ranura con forma de V para acoplarse al perfil, y la primera de ellas por las que pasa el filamento se le ha diseñado una ranura con la forma del cable para facilitar el guiado, además conserva una pendiente más pronunciada que la otra, inclinando ligeramente el perfil de aluminio, ayudando al agua a fluir en la dirección que interesa mediante gravedad. Estas piezas van apoyadas a un recipiente sujetado a la estructura general de la máquina, y donde en su interior hay una cierta cantidad de agua.

El sistema para hacer pasar el agua por el perfil de manera continua se basa en la recirculación de la misma, mediante una bomba eléctrica, (anexo 3) la cual aspira un determinado caudal de agua del recipiente, y lo impulsa hacia un extremo del perfil en L, por el otro el agua volverá a caer al recipiente gracias a la cavidad diseñada que existe en la pieza de plástico que soporta el perfil en L de aluminio, esperando ser aspirada de nuevo por la bomba. De esta manera, se obtiene un cable que

sale a una temperatura de 120°C de la extrusora a 35-40°C después de la refrigeración (véase los cálculos correspondientes en el anexo 5.4. “Refrigeración hidráulica”).

En el extremo final del recipiente se sitúa acoplado a la estructura mediante piezas imprimidas en 3D un rodillo el cual ayuda al cable de PLA ser transportado hacia la siguiente sección gracias al giro libre de dicho rodillo permitido por el rodamiento situado en su interior. El rodillo admite desplazamiento lateral a lo largo del eje para facilitar el posicionamiento del cable hacia el siguiente sector de la máquina.

Se muestra en la siguiente imagen una representación del sistema:

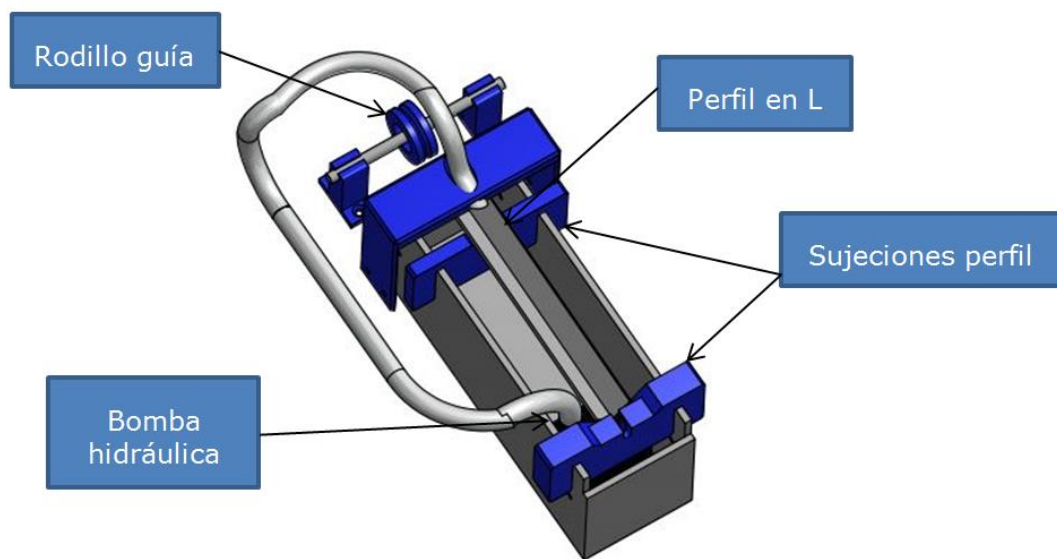


Figura 22: Componentes del sistema de refrigeración

4.4.3. Sistema de tensionado

El sistema de tensionado del cable consta básicamente de dos partes fundamentales, por una parte el sistema de empuje, y por otra el tensor.

El sistema de empuje ha sido diseñado con el objetivo de evitar una máquina excesivamente espaciosa debido a su longitud, reduciéndola aproximadamente la mitad. El método utilizado se basa en una gran pieza circular o volante imprimida en 3D, con una ranura en la parte central por la que se introduce el cable de PLA extruido. Se transporta el hilo hacia el tensor gracias al giro del volante, accionado por un motor, al que se le integra con un acoplamiento elástico mediante un eje roscado, en el que se introducen dos tuercas (más arandelas para aumentar su apriete) gracias al acople

hexagonal diseñado en el volante, de manera que se produce el efecto contra tuerca, obligando a girar solidarios volante y eje roscado. El volante se sostiene en el eje axial por la acción de otra tuerca con arandela en la parte superior de este. Este sistema es fijado a la estructura general de la máquina por medio de piezas imprimidas en 3D en las que además se les añade rodamientos para permitir el giro libre, situados en las posiciones que se muestran en la imagen 23.

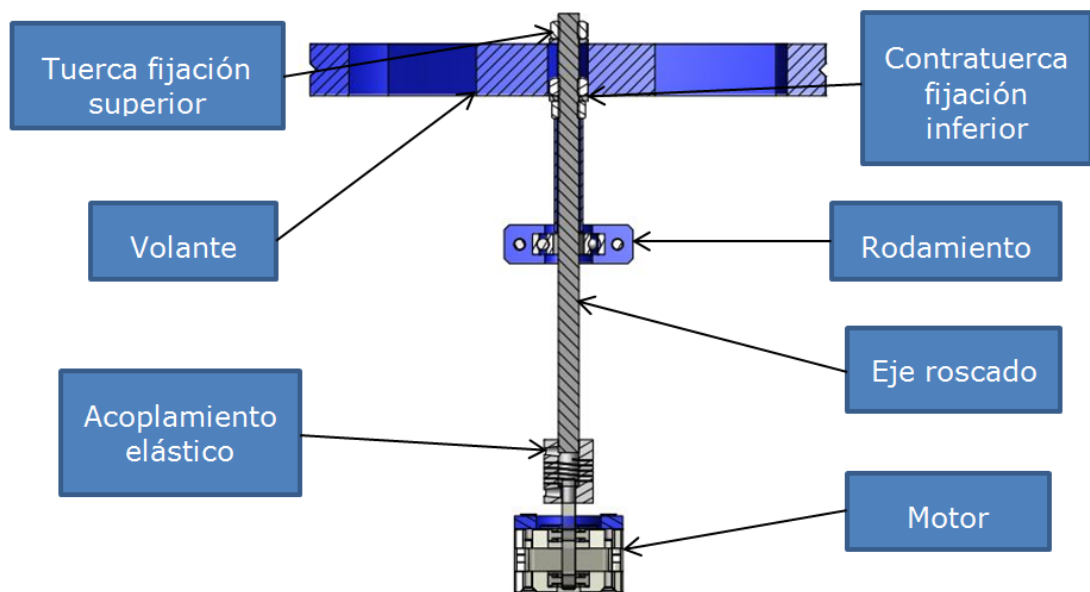


Figura 23: Sección del sistema de sistema de empuje

La sección tensora propiamente dicha, consta de dos piezas muy similares al volante, de menor dimensión pero con la misma estructura, en las que se les permite el giro libre y que, a diferencia del propio volante, no utilizan motor para girar sino que son arrastradas por la misma acción del cable al rozar la ranura de la que disponen. Estas piezas son fijadas a bancada de la misma manera que la sección anterior. Su fijación en el eje axial consiste en la adición de un casquillo entre el rodamiento y la tuerca, situada en extremo de la barra.

La idea para controlar el tensionado del cable consiste en que una de estas dos piezas circulares sea fija y la otra móvil, solidaria a un perfil de aluminio que permita el giro gracias a la sujeción de plástico con un rodamiento en su interior. Se añade un muelle entre la pieza del perfil móvil y el perfil de aluminio fijo opuesto con la ayuda de una pieza imprimida en 3D y tornillería. En función del ángulo del perfil giratorio existirá un tensionado distinto del cable que pasa entre ambos componentes, ya que existirá una mayor longitud de cable, siendo esta proporcional a la tensión tal y como se demuestra en el anexo 5.5, "tensionado". Se muestra un ejemplo en la imagen 24.

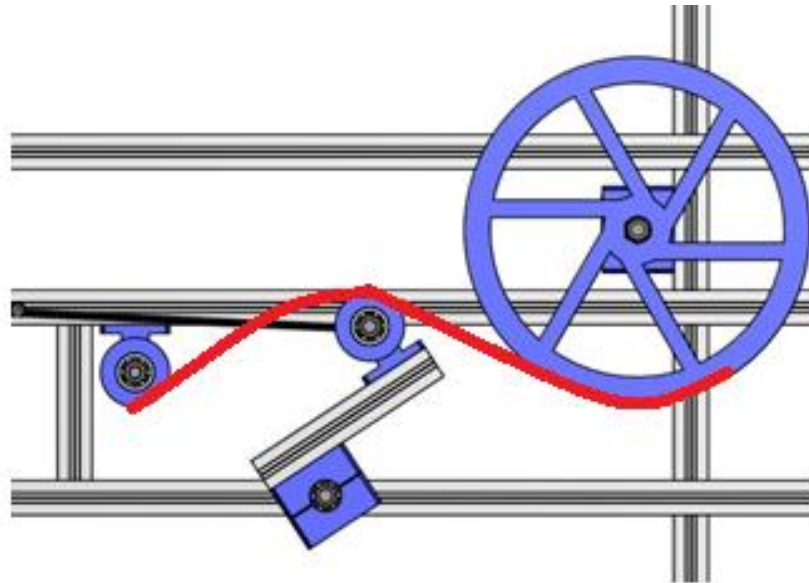


Figura 24: Ejemplo de uso del sistema de tensionado

A continuación se muestra una representación del modelo comentado, con las partes correspondientes:

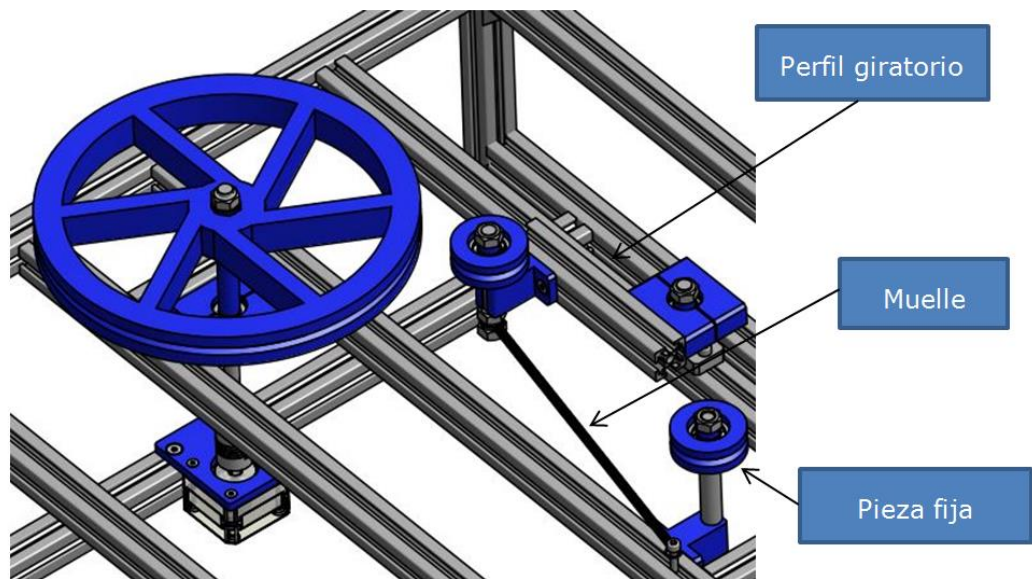


Figura 25: Componentes del sistema de tensionado

4.4.4. Comprobación dimensionado

Es importante que el producto final tenga un acabado dimensional adecuado, por ello en el anexo 1 se detalla el análisis realizado para calibrar la dimensión del filamento que produce la máquina, donde se concluye que el diámetro del hilo es proporcional a la velocidad de extrusión e inversamente proporcional a la temperatura de trabajo, en el anexo 4 se concreta la calibración pertinente.

Cabe llevar a cabo comprobaciones dimensionales del cable extruido, por ello se ha diseñado un método para medir el diámetro del producto final una vez ha sido enfriado y tensionado. El instrumento de medida empleado es un pie de rey electrónico, en el que la parte fija del mismo se sujeta a la estructura de aluminio de la máquina, y la móvil se desplaza en función del diámetro de cable, obteniendo así la dimensión deseada, tal y como se aprecia en la siguiente figura.

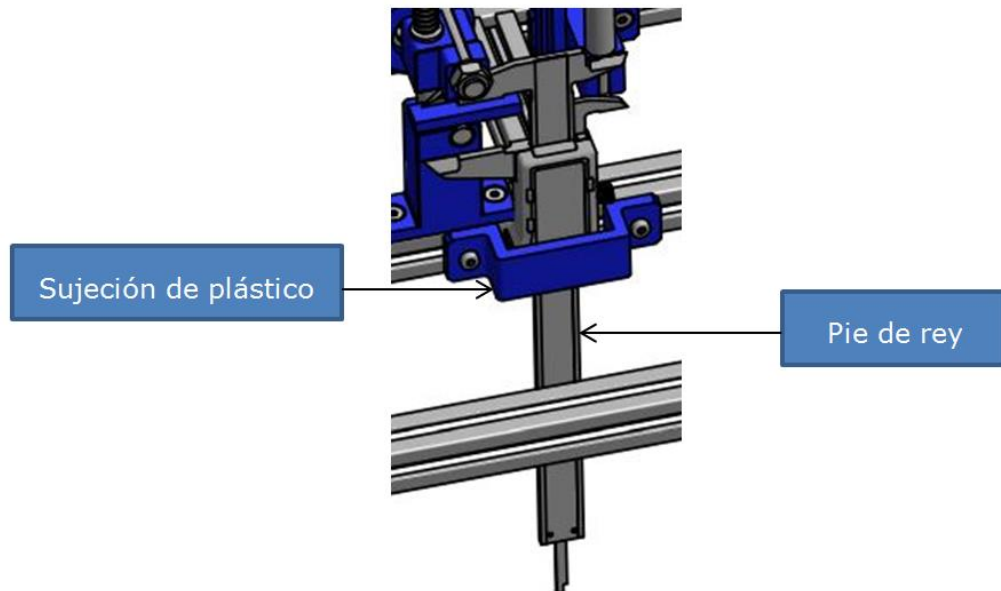


Figura 26: Sujeción del pie de rey

El cable de PLA extruido se hace pasar entre dos rodillos uno sobre el otro, el inferior es simétrico al citado en el apartado "4.4.2. Sistema de refrigeración". Mientras que el superior es fijado mediante piezas imprimidas en 3D y ejes verticales, a presión, en cada uno de los extremos del rodillo en las piezas de soporte a bancada del rodillo inferior. Una de estas piezas de plástico es diseñada con un acoplamiento para la parte móvil del pie de rey, permitiendo el desplazamiento del mismo debido a la holgura existente entre los ejes verticales y las piezas de plástico.

Tanto anterior como posteriormente del sistema de medida se han diseñado piezas de plástico con una ranura en su parte central para guiar el filamento en cada instante. El ensamble se facilita en la imagen 27.

Cabe destacar que se debe poner a 0 el dispositivo electrónico en el momento en que ambos rodamientos estén en contacto para la adecuada medida de la dimensión deseada. Además se integra en cada uno de los ejes verticales un muelle, fijado por una tuerca en el extremo de la barra, para facilitar el contacto de los rodillos con el filamento, además de facilitar el desplazamiento del rodillo superior.

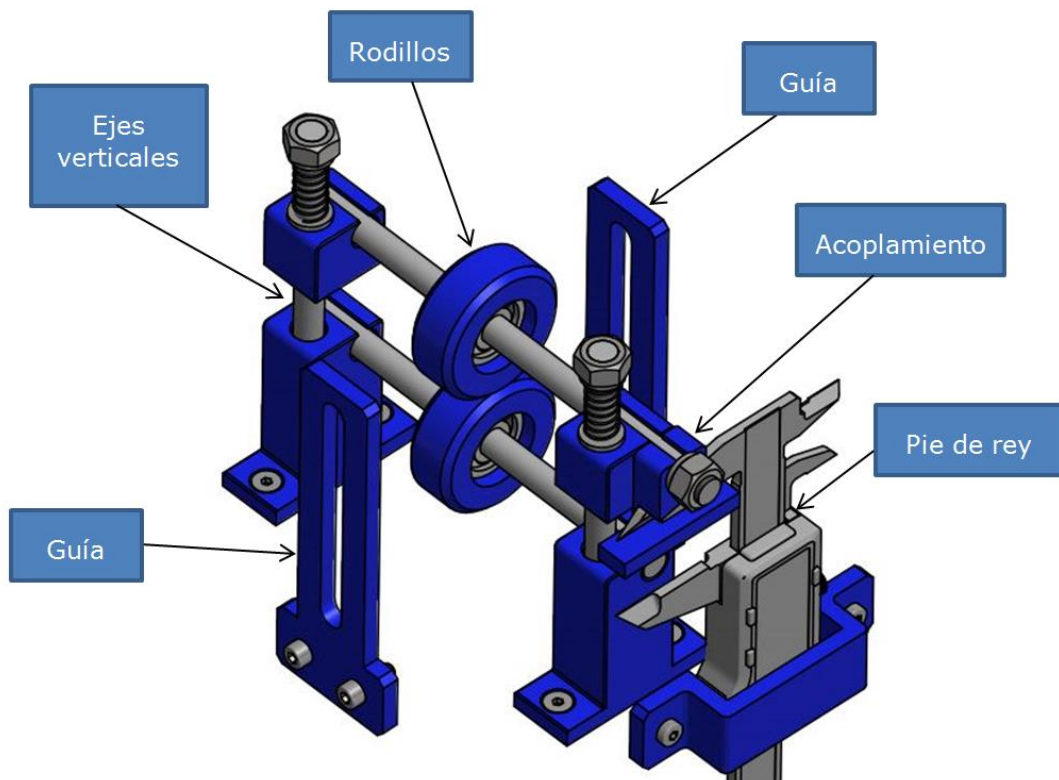


Figura 27: Componentes del sistema de medida

4.4.5. Sistema de control de velocidad de enrollado

Es necesario un sistema de control de la velocidad de enrollado, pues esta irá variando en función del diámetro de la bobina, el cual se incrementa conforme el cable vuelva a pasar por la misma posición en la que se enrolló anteriormente, mientras que la velocidad de extrusión del cable es constante en todo el proceso, esta diferencia de velocidades podría provocar un estiramiento o tensionado excesivo del hilo, indeseable en todo caso. Para ello se instala un sistema el cual permite regular la velocidad de bobinado en función de la tensión. Esta velocidad viene dada mediante un sistema de

transmisión accionado por un motor, el cual se explica más detalladamente en el apartado siguiente (4.4.6. Bobinado).

El diseño con el que se consigue este objetivo se basa en dos ejes fijados a bancada mediante piezas imprimidas en 3D, en las cuales se incorporan dos finales de carrera, uno en cada uno del extremo de uno de los ejes, fijados con componentes 3D de nuevo, estos permiten conocer la posición y por lo tanto la tensión del cable en todo momento. Cuando el cable accione el final de carrera superior, significará que el cable se encuentra en un estado de gran tensión, debido a que en esa posición de la bobina existirá una velocidad de giro mayor a la del cable extruido, por lo que el final de carrera enviará una señal a la electrónica para reducir la velocidad de salida motor, enrollando más lentamente la bobina. Por el contrario, cuando la velocidad disminuya considerablemente, el cable accionará el final de carrera inferior, el procedimiento es el mismo que en el caso anterior con la diferencia que la señal que le envía la electrónica al motor es aumentar la velocidad puesto que la tensión del cable es menor de la deseada, de esta manera se regula la velocidad continuamente del bobinado.

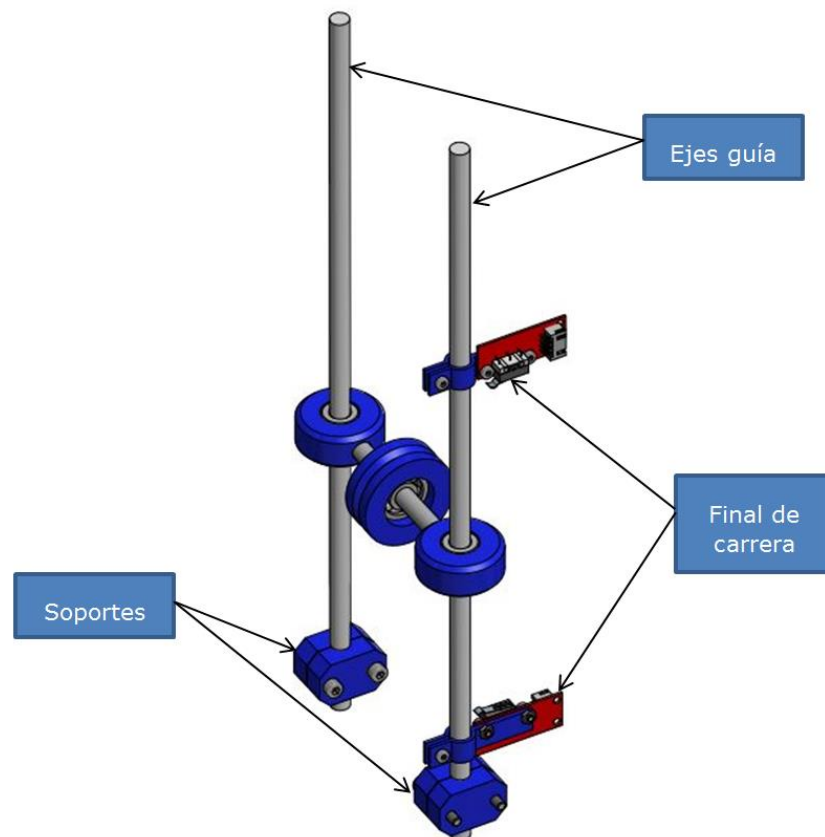


Figura 28: Sistema de control de velocidad de bobinado

El accionado de los finales de carrera se efectúa gracias a la acción del cable, el cual se encuentra bajo un conjunto de piezas que se desplazan a lo largo de la longitud de los ejes en función a la tensión del cable y son las que entran en contacto directo con los finales de carrera. El diseño de este sistema consiste en dos piezas circulares imprimidas en 3D, con un orificio central para poderse desplazar por los ejes, y un rodamiento lineal entre las piezas y el eje para la movilidad en el eje axial. Estas dos piezas son unidas mediante un eje, en el que se incorpora en la parte central rodillo junto con un rodamiento, permitiendo el giro libre de la parte exterior del mismo.

El rodillo no tiene restringido el desplazamiento lateral, puesto que en el bobinado el filamento se produce constantemente de un extremo hacia el otro para conseguir el enrollado, de esta manera se facilita el guiado del hilo.

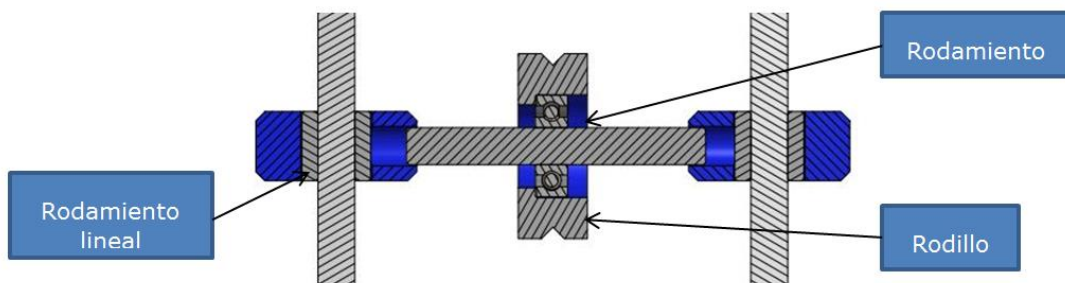


Figura 29: Sección del sistema de control de velocidad del bobinado

4.4.6. Bobinado

El bobinado en si se efectúa gracias a la labor de un motor tal y como se ha comentado en el anterior apartado, el cual es acoplado a un eje mediante un acoplamiento elástico, que a su vez se fija a la estructura general de la máquina con unas piezas imprimidas en 3D, y que entre ellas y el propio eje se les incorpora un rodamiento, permitiendo el giro libre del mismo. El objetivo de hacer girar este eje es transmitir la potencia de giro generada por el motor hasta la bobina, lo cual se consigue mediante una polea dentada que se le añade a este eje, y que haga girar el soporte de la bobina.

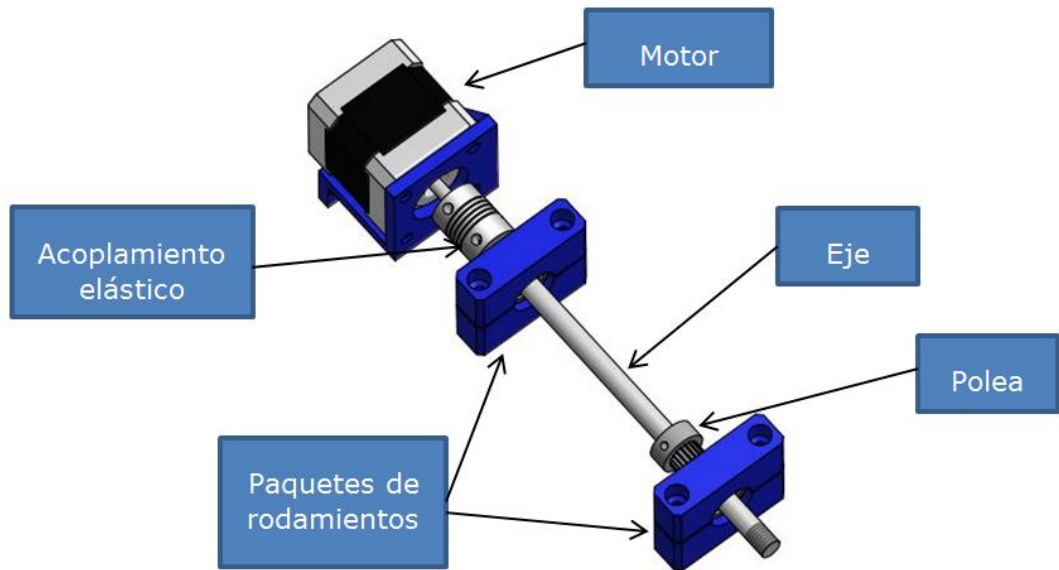


Figura 30: Componentes de la transmisión motor- bobina

El método en que transmite la potencia la polea al carrete de la bobina se efectúa mediante una mordaza entre ambos elementos, que se acopla a las ranuras del soporte, lo cual obliga a girar solidarios los dos componentes, y otra simétrica en el lado opuesto a la bobinadora, ensambladas y fijadas mediante dos varillas roscadas que atraviesan toda el soporte de la bobina junto con tuercas en ambos extremos. Ambas mordazas incorporan rodamientos para permitir el giro de la bobina, que son introducidos a presión en las mismas, además de incluir un casquillo de plástico entre el rodamiento y la tuerca incluida al extremo de eje fijo en el que se encuentran dichos componentes, con el objetivo de fijarlo axialmente.

Este eje comentado sustenta el peso de la bobinadora a una cierta altura a partir de la sujeción a la estructura con un componente de plástico imprimido en 3D.

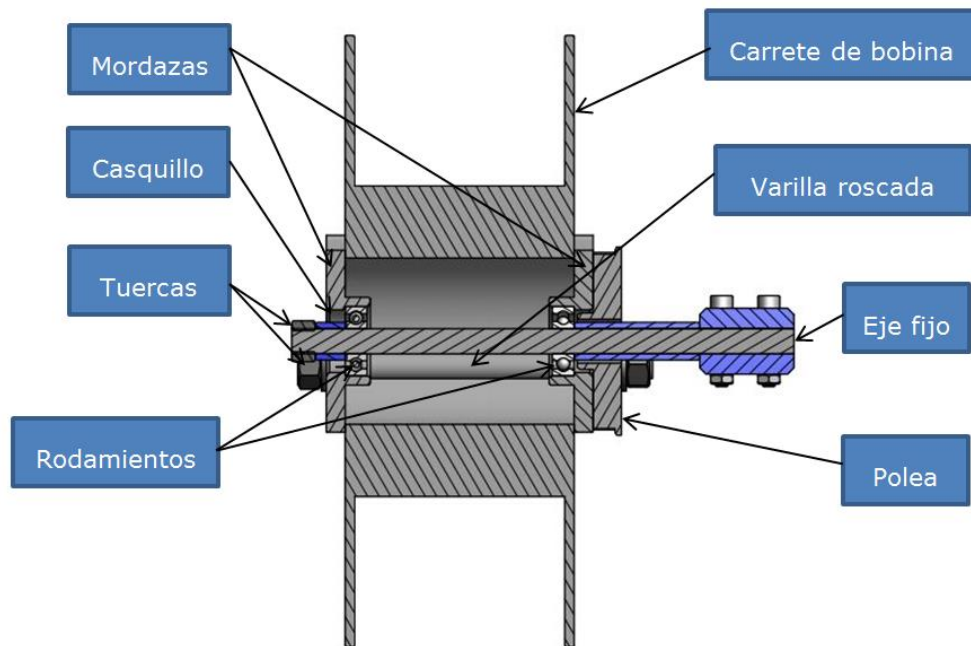


Figura 31: Sección sujeción bobina

Es necesario que además del enrollamiento del material exista un desplazamiento lateral para que el cable ocupe toda la extensión del soporte a medida que se produce el bobinado.

Para ello se ha diseñado un sistema imprimido en 3D que consiste en el giro de un husillo autoretorno cuya geometría es concreta (mediante un eje incorporado a paquetes de rodamientos sujetos a bancada), la cual obliga al elemento guía a seguir su geometría cuando esta gira, produciendo el desplazamiento lateral de ida, y de vuelta cuando llega a cada uno de los extremos. El elemento guía se sustenta debido a existencia del adaptador (cuyo desplazamiento se ve restringido en una única dirección gracias a la acción de los soportes) y de la guía-cable, la cual dirige el filamento en función de la posición del elemento guía.

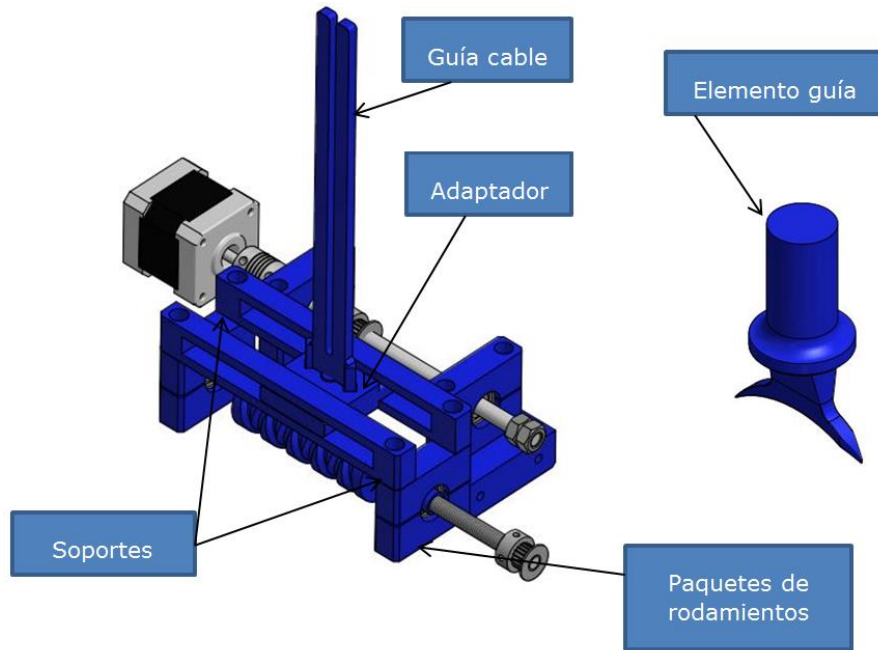


Figura 32: Componentes del desplazamiento lateral en el bobinado

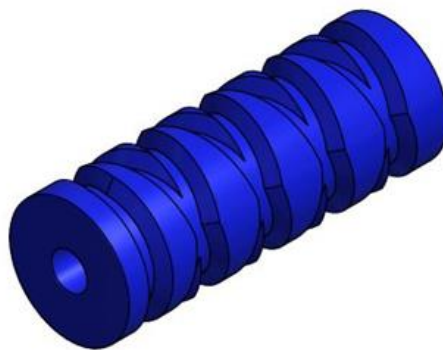


Figura 33: Husillo autoretorno

La transmisión para hacer girar el eje del sistema se acciona desde el eje del motor mediante un engranaje planetario, puesto que la reducción necesaria para el correcto funcionamiento de la transferencia de potencia de giro es considerablemente elevada (Véase el anexo 5.10, cálculo del engranaje planetario) y posteriormente un sistema de poleas de reenvío para transmitir la velocidad reducida.

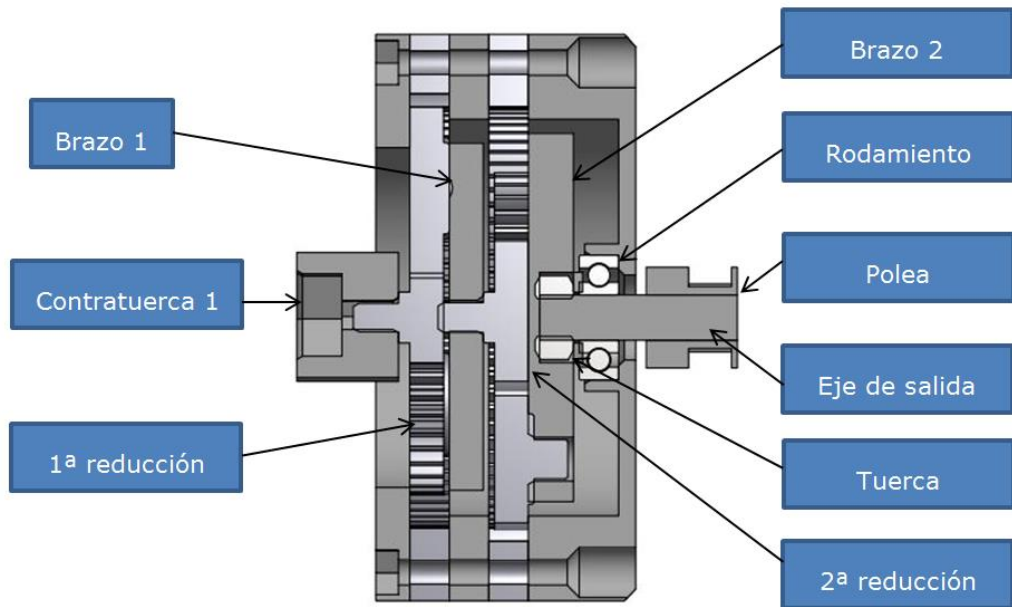


Figura 34: Sección del engranaje planetario

El funcionamiento del engranaje planetario empleado, el cual ha sido imprimido en 3D se explica a continuación, en la imagen superior del engranaje seccionado se indican las partes del mismo.

Como puede verse la transmisión de giro del eje del motor al engranaje se produce gracias a la acción de dos tuercas produciendo el efecto contratuercas (1) en el interior de la pieza acoplada al engranaje, esta hace girar el sistema de engranajes generando la primera reducción y haciendo girar un primer brazo intermedio, en el que se acopla el engranaje central de la segunda reducción, transmitiendo su velocidad de giro a un segundo brazo, el cual hace girar al eje de salida mediante otro sistema de contratuercas tal como en el caso anterior.

En el eje de salida se acopla la polea que transmite la velocidad de salida del engranaje al eje del sistema del desplazamiento lateral. Además se incluye un rodamiento interior que permite el giro de dicho eje, anclado axialmente mediante una tuerca y una arandela.

4.4.7. Estructura de soporte y fijaciones

Toda la estructura de soporte o bancada comentada en el diseño consiste en perfiles de aluminio de 20x20mm y soportes en los cuatro extremos para sustentar toda la maquinaria y manijas en las partes superiores de los perfiles para facilitar el traslado del diseño (véase anexo 3).

A continuación se muestra en modelo 3D la disposición de la construcción:



Figura 35: Estructura general del prototipo

Todas las uniones de perfiles han sido realizadas mediante tornillería, tal y como se aprecia en la siguiente imagen:

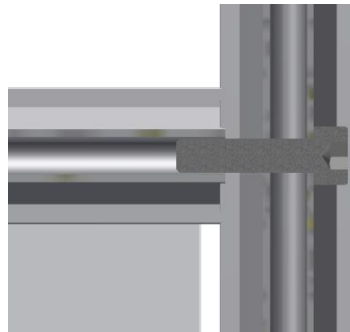


Figura 36: Uniones mediante tornillería

4.4.8. Alojamiento y ajustes.

En este apartado se especificaran los criterios de diseño en alojamientos y ajustes de los diferentes elementos de nuestro prototipo. Primeramente cabe remarcar que la mayoría de componentes no son de precisión por ese motivo se especificó una tolerancia general ISO IT14. Según los criterios de diseño son:

- Se han marcado las tolerancias con la finalidad de hacer funcional del prototipo, de tal forma que todos los ejes y husillos puedan girar sin ofrecer resistencia con un juego mínimo y cuando sea necesario los acoples entre piezas sean ajustados, en la imagen inferior se facilita un ejemplo del marcado de tolerancias.

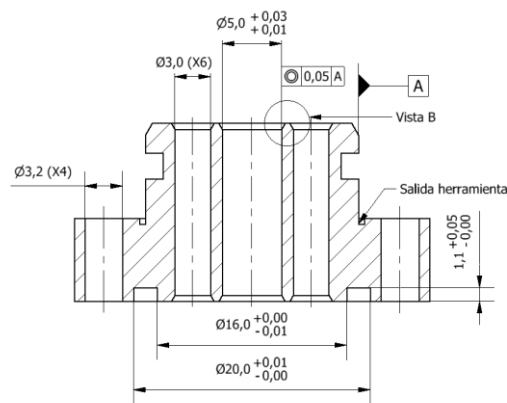
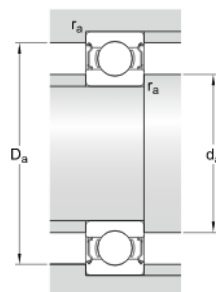


Figura 37: Tolerancias placa rompedora, que permiten girar el husillo concéntrico y libremente

- Los alojamientos de rodamientos y juntas se han diseñado respetando las especificaciones del fabricante y a los criterios de diseño. Los criterios a seguir han sido para las juntas Epidor y para los rodamientos SKF.

Dimensiones de los resaltes



d_a	min.	10	mm
d_a	max.	12	mm
D_a	max.	20	mm
r_a	max.	0.3	mm

Figura 38: Dimensiones de los resaltes de los rodamientos 608-2Z de SKF

4.4.9. Electrónica

La electrónica se ha basado en un modelo estándar de impresora 3D con la intención de aprovechar al máximo todas las funcionalidades de esta ya sea control de los motores paso a paso o bien el control de la temperatura.

Para el control y automatización del proceso se ha utilizado un un microcontrolador Arduino mega 2560 y una Ramps 1.4, una placa de potencia. La Ramps va conectada al Arduino y esta ofrece todas las entradas y salidas necesarias para controlar una impresora 3D estos van alimentados por una fuente de alimentación de 12V y 50A. Para más detalles del esquema eléctrico, conexiones consulte el anexo 8 y asimismo las fichas técnicas en el anexo 3.

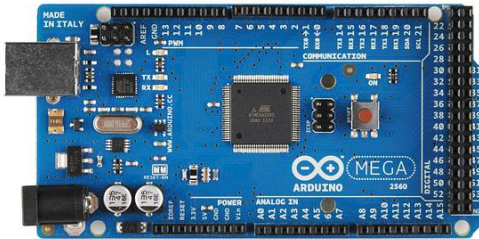


Figura 39: Arduino Mega 2560 (<http://arduino.cl>)



Figura 40: Ramps 1.4 (<https://www.geeetech.com>)

Las funcionalidades que cumple nuestro prototipo son:

- Control de temperatura camisa del extrusor.
- Control motor paso a paso extrusor.
- Control motor paso a paso sistema de empuje.
- Control motor paso a paso bobinadora.
- Sistema de refrigeración.

Además de ofrecer versatilidad en su uso ofreciendo la posibilidad de modificar parámetros, con el fin de ajustarse a las necesidades del material mediante una pantalla LCD. A continuación se explicaran las funcionalidades del sistema electrónico y sus componetes.

- Control de temperatura camisa del extrusor.

Para el control de la temperatura del cilindro es necesario un termistor NTC 100k, común en las impresoras 3D, tres resistencias abrazaderas de boquilla de inyectora y un relé de estado sólido. El funcionamiento de estos es sencillo la resistencia abrazadera al recibir tensión se calentará y transferirá la temperatura a la camisa, para poder controlar este proceso es necesario además hacer falta monitorear la temperatura de la camisa para ello se utilizará el termopar, finalmente el relé de estado sólido controlará el paso de corriente a la resistencia.



Figura 41: Termistor NTC 100k (<http://www.3despana.com/>)



Figura 42: Relé estado sólido (www.termocuplas.com)



Figura 43: Resistencia calefactora (<http://mouldshop.es/>)

- Control motor paso a paso del extrusor.

Mediante la Ramps, el Arduino y un controlador se puede controlar un motor paso a paso. De todas formas dadas las características de torque necesarias para el proceso se ha seleccionado un motor Nema 23 con una reducción 1:15, este motor demandaría demasiada potencia y no se podría controlar con seguridad mediante un controlador convencional. Por ello se ha tenido que seleccionar un controlador más potente con una toma directa a la fuente de alimentación, por precaución se ha instalado un botón para controlar el encendido y apagado del motor.



Figura 44: Controlador motor ST6600 (<http://www.omc-stepperonline.com/>)



Figura 45: Motor Nema 23 reducción 1:15 (<http://www.omc-stepperonline.com/>)

- Control motor paso a paso sistema de empuje.

En este caso el motor seleccionado es un Nema 17 unipolar. Este motor puede ser controlado con el Arduino, la Ramps y el driver Driver motor pap DRV8825.



Figura 46: Controlador motor DRV8825 (<http://bcndynamics.com/>)

- Control motor paso a paso bobinadora.

Para Controlar la bobinadora se utilizara un Nema 17 bipolar, controlado con el mismo sistema que el motor del sistema de empuje, con la diferencia que tiene dos finales de carrera controlaran la activación del motor.



Figura 47: Final de carrera (<http://www.maxelectronica.cl>)

- Sistema de refrigeración.

El sistema de refrigeración se activara cuando se suministre energía, el sistema está compuesto por dos ventiladores DC y una bomba de agua AC a 230V.

4.4.10. Automatización

La automatización del prototipo se ha llevado a cabo en base a una impresora 3D. Se ha modificado Mackerel un firmware basado en Marlin.

Marlin es un firmware de Arduino, con él se pueden encontrar librerías para controlar los diferentes dispositivos que contiene una impresora 3D. Además tiene ya configuradas las salidas y entradas de arduino para conectar la Ramps. Asimismo Mackerel es una adaptación de Marlin que implementa las características de una extrusora de filamento, los dos firmwares tienen licencia GNU (general public licence) con lo cual pueden ser modificados y distribuidos. Nuestra modificación del firmware adapta el prototipo los requerimientos deseados, las cuales son control de los motores y control de la temperatura. El firmware constara de subprogramas para controlar cada dispositivo. A continuación se muestra los Graficets de dichos programas.

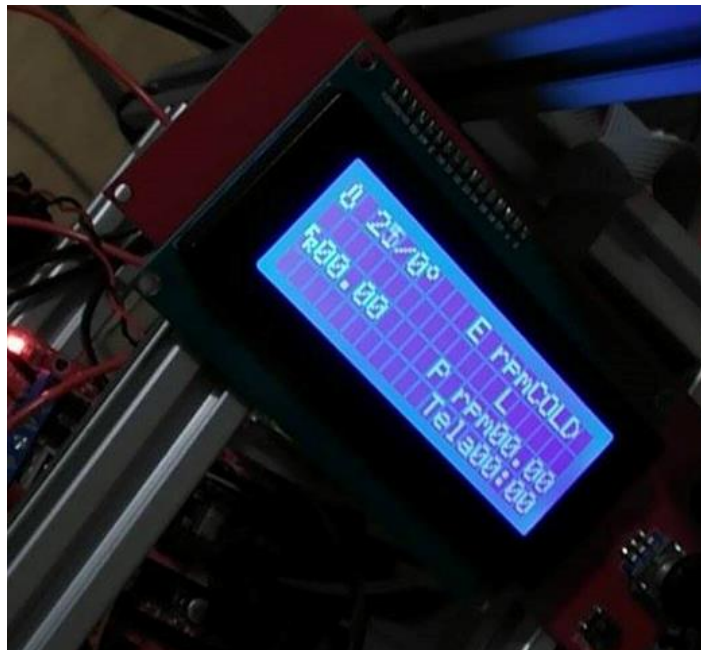
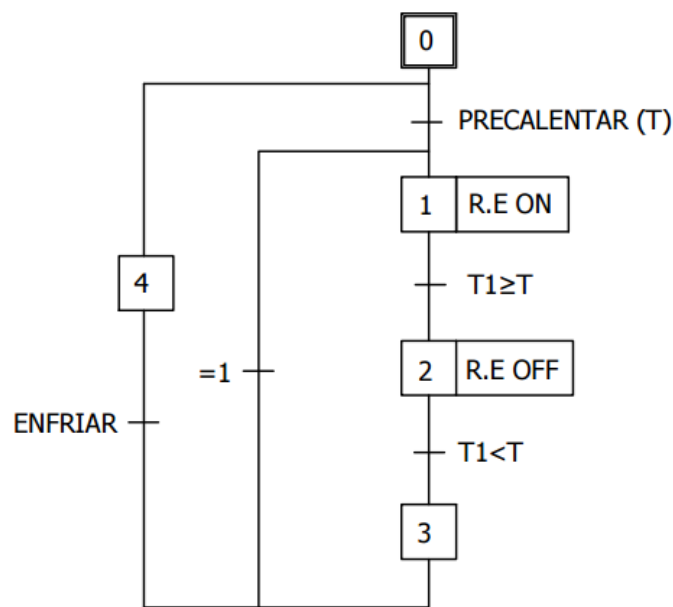


Figura 48: LCD de control del prototipo

- Control de temperatura de la camisa extrusor.

El control de temperatura es un ciclo cerrado. Tiene como función calentar el camisa del extrusor mediante un relé de estado sólido conectado a las resistencias calefactoras. La primera condición para calentar el conjunto es seleccionar precalentar en el menú desplegable del LCD. Consecuentemente la camisa se calentara hasta la temperatura deseada (T), una vez llegada a esa temperatura las resistencias se apagaran. Cuando el termistor (T1) mida una temperatura inferior a T las resistencias se activaran. Conociendo el tiempo necesario de extrusión para una cantidad de filamento, se podrá controlar todo el proceso mediante un temporizador. También se puede finalizar el proceso mediante seleccionando en el LCD enfriar.

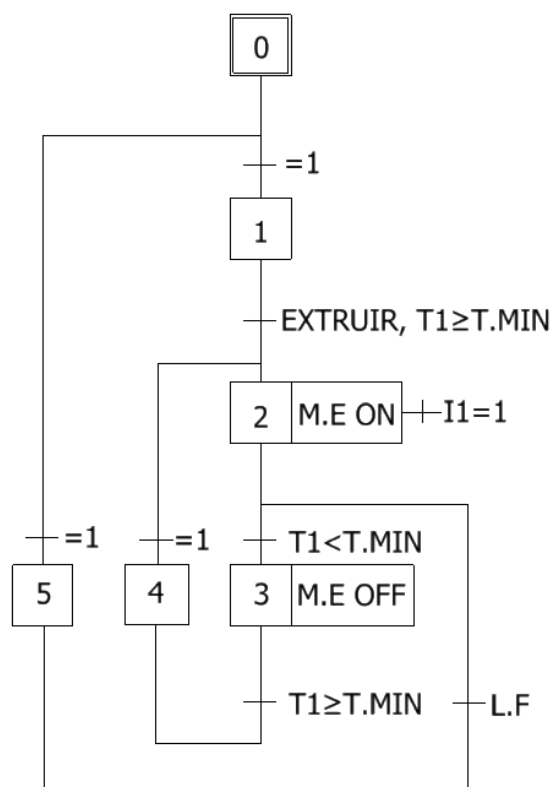


ENFRIAR: CONDICIÓN DE ENFRIAR SELECCIONADA EN EL LCD O LONGITUD EXTRUIDA=LONGITUD A EXTRUIR
PRECALENTAR (T): CONDICIÓN DE PRECALENTAR A CIERTA TEMPERATURA SELECCIONADA EN EL LCD
R.E: RESISTENCIAS EXTRUSORA
T1: TEMPERATURA TERMISTOR

Figura 49: Grafcet control temperatura

- Control de los motores extrusor y empuje.

El control de los motores es un ciclo cerrado. La primera condición para mover los motores a una velocidad determinada será necesario seleccionar en el menú desplegable del LCD extruir. Además el sistema para evitar daños no se activara si no supera una temperatura mínima de extrusión (T.MIN). Asimismo como medida de seguridad se ha implementado un botón con la finalidad de parar el motor aunque las otras condiciones estén activadas. Conociendo el tiempo necesario de extrusión para una cantidad de filamento, se podrá finalizar todo el proceso mediante un temporizador (L.F).



EXTRUIR: CONDICIÓN DE EXTRUIR SELECCIONADA EN EL LCD
T.MIN: TEMPERATURA MÍNIMA EXTRUSIÓN SEGURA
M.E: MOTORES EXTRUSORA Y EMPUJE
T1: TEMPERATURA TERMISTOR
L.F: LONGITUD DE FILAMENTO EXTRUIDO = LONGITUD A EXTRUIR

Figura 50: Graficet control motores extrusor y empuje

- Control de la bobinadora.

El control de la bobinadora es un ciclo cerrado. El proceso se iniciara cuando el usuario active el final de carrera superior, el motor permanecerá en espera hasta que se active el final de carrera inferior. Cuando se active el final de carrera inferior el motor se activara hasta que reciba otra vez la señal del final de carrera superior, el proceso seguirá hasta que se pause el avance del filamento.

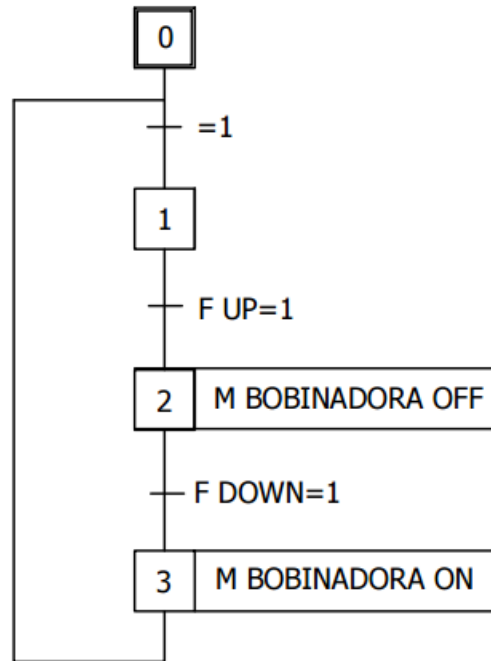


Figura 51: Control motor bobinadora

4.4.11. Seguridad de máquina

Se han aplicado las normativas de seguridad de máquinas “NTP 235” y “NTP 552” (Véase el anexo 2: Normativa aplicada) para garantizar la integridad física del usuario de la extrusora, por ello se han diseñado ciertas protecciones.

Se han añadido chapas de aluminio en los siguientes casos:

- Para evitar contacto con ejes de motores girando.
- Alrededor de la camisa calefactada (y del aislante) para cerciorar la protección contra altas temperaturas.
- Eludir posibles aprisionamientos con elementos de transmisión como los engranajes que dispone la máquina.
- Conservación del buen funcionamiento de la electrónica en caso de salpicaduras de agua del sistema de refrigeración.

Además del inserto de aislante térmico de fibra de vidrio en la parte calefactada (Véase anexo 3).

En cada uno de las situaciones puntualizadas se ha incorporado la etiqueta de peligrosidad que le corresponde según la norma ISO 3864, cuya función es hacer saber el tipo de protección que se ha empleado en cada caso, conociendo el peligro que existe en la parte inferior de la chapa de aluminio en la que se encuentra la inscripción.

A continuación se detalla el significado de cada una de ellas:



Figura 52: Peligrosidad por atrapamiento en polea



Figura 53: Peligrosidad por alta temperatura



Figura 54: Peligrosidad por descarga eléctrica



Figura 55: Peligrosidad por atrapamiento en engranajes

Además se ha dotado al sistema electrónico de diferentes medidas de seguridad como toma de tierra, un pequeño interruptor automático (P.I.A) en las resistencias calefactoras, un paro general de la máquina y un paro para el motor de la extrusora.

5. Manufacturación y ensamblaje

En esta sección se describirá el proceso de manufacturación requerido para construir el prototipo de extrusora 3D. Para manufacturar las partes del prototipo se ha utilizado una impresora 3D para manufacturar las piezas, una sierra manual para cortar los ejes y los perfiles, un taladro columna para realizar taladros y una terraja para hacer roscas en los ejes y un macho de rosca para agujeros. La manufacturación excepto la impresión 3D ha sido manual con lo cual se pueden esperar errores de precisión en elementos como la estructura en medida de lo posible se han respetado las tolerancias de los planos. Los elementos de imprescindible mecanizado han sido enviados a un proveedor externo.

El proceso de ensamblaje fue el siguiente:

- Ensamblar estructura.
- Ensamblar extrusora.
- Ensamblar sistema de empuje y refrigeración.
- Ensamblar sistema de tensionado.
- Ensamblar control diámetro y control bobinado
- Ensamblar guía bobinado y bobina
- Realizar conexionado electrónica

Todos estos pasos se completaron sin importantes incidencias.

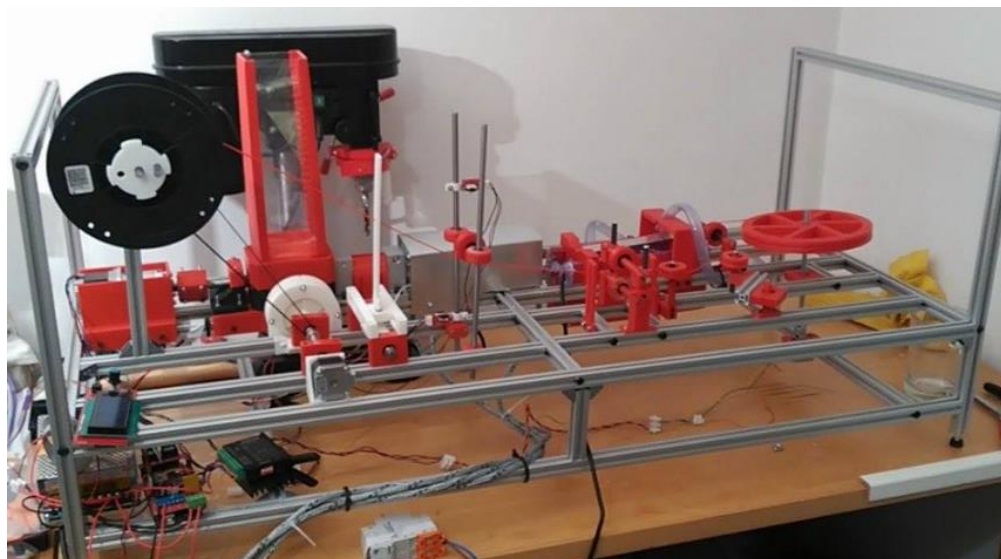


Figura 56: Prototipo extrusora de filamento

6. Especificaciones del prototipo

El presente prototipo cumple los requerimientos necesarios para poder extruir filamento, aunque son necesarias más horas de test para poder llegar un producto óptimo. A continuación se muestran las especificaciones de la extrusora.

Especificaciones	
Temperatura máxima (Cº)	300
Potencia (W)	1203
Medidas (cm)	53,8 X 1,237 X 0,59
Peso (Kg)	11,5
Emisiones de CO2 eq	0,4265
Velocidad extrusión mm/min	382

Tabla 7: Tabla especificaciones prototipo

7. Acciones futuras

Puesto que el sistema de extrusión diseñado es un primer prototipo, cabe la posibilidad de optimizar muchas de sus funcionalidades, con el objetivo de mejorar el rendimiento o calidad de la máquina, algunas de las propuestas como acciones futuras son las siguientes:

- a. Introducción de diferentes materiales plásticos en la extrusora, expandiendo las posibilidades de uso de la máquina.
- b. Mejora de materiales utilizados (boquilla de cobre, acoplamiento entre husillo y motor mediante acoplamiento elástico, limitador de par o simplemente un acoplamiento metálico capaz de soportar fácilmente el par generado), aumentando el rendimiento de la extrusora.
- c. Adición de un sistema de cortado previo para piezas defectuosas imprimidas en 3D.
- d. Husillo con variabilidad de diámetro, comprimiendo el material y mejorando la facilidad de fusión del mismo.
- e. Incorporación de orificio de venteo, extrayendo posibles cantidades de aire introducidos en la máquina y eliminando porosidad del producto final.
- f. Control de la temperatura del agua refrigerante mediante electrónica.
- g. Registro de la lectura del pie de rey en un determinado intervalo de tiempo, ayudando a determinar si cada una de las bobinas producidas se considera correcta o no, en función del diámetro a lo largo de toda su longitud.
- h. Control automático de los parámetros de extrusión mediante la lectura del pie rey auto calibrándolos para un filamento óptimo.
- i. Instalación de un sensor óptico de control de diámetro.
- j. Control de la velocidad de bobinado en función del diámetro de la bobina en cada instante, ayudando a eliminar posibles tensiones y deformaciones que pueden producirse en el diseño actual.
- k. Reducir potencia máquina.

8. Conclusiones

Una vez finalizados el diseño construcción y validación del prototipo se presentan las conclusiones del proyecto obtenidas durante las fases del mismo.

- Según lo calculado el torque demandado por el husillo es directamente proporcional a la velocidad de extrusión, mientras que el torque del motor disminuye al aumentar la velocidad. Por lo tanto se concluye que el torque del motor es inversamente proporcional al torque demandado por el husillo. Por ello se ha seleccionado un motor paso a paso, con un par adecuado a los requerimientos.
- Los parámetros físicos de la extrusora (longitud del husillo) determinarán los parámetros de extrusión (velocidad de extrusión, temperatura), así pues cada extrusora contará con sus parámetros, en nuestro caso se ha empleado un husillo de 450mm de longitud total, lo cual implica que los factores comentados sean los que se especifican en el siguiente punto.
- La temperatura, velocidad de extrusión y velocidad de refrigeración son parámetros fundamentales para producir un material extruido de propiedades aptas con el objetivo de una realizar con él impresión 3D. Estos tres parámetros deben estar equilibrados de tal forma que el filamento sea óptimo según las condiciones comentadas, en nuestro caso los valores de estos factores corresponden a una temperatura de 220°C y una velocidad de giro de 2 rpm lo que proporciona 0,18kg/h de PLA.
- Analizando el material de extrusión, el PLA, se concluye que es un material que en que pequeñas variaciones de temperatura pueden ocasionar grandes cambios en su viscosidad, además cabe remarcar que este es muy frágil si se enfría rápidamente, por ello ha sido preciso ajustar la posición de los ventiladores y la temperatura del agua del sistema de refrigeración.
- El tensionado del filamento afecta directamente al diámetro de este ya que se produce estreñimiento en la salida del dado, por lo que para evitar imperfecciones superficiales en el producto es importante mantener un estirado constante del material. Por ello es determinante evitar el estiramiento manual, y realizarlo mediante un sistema de empuje y tensionado como el diseñado.
- En diseño de máquinas es importante tener en cuenta factores como la ergonomía o la facilidad de montaje para facilitar el mismo y el uso de la propia máquina, en este caso se ha optado por añadir elementos de seguridad como chapas, aislantes o simplemente avisos del posible peligro.

9. Bibliografía

9.1. Bibliografía de consulta

- Beer Johnston, 2010, *Mecánica vectorial para ingenieros estática*, 9ª edición, Buenos Aires pág. 511, Mc Graw Hill.
- Franco J. y Medina C, 2015, *Extrusora de plásticos para fabricación de filamento de impresora 3D*, Universidad de La Laguna.
- Gómez Jimmym, Gutiérrez Jorge Edwin, 2007, *Diseño de una extrusora para plásticos*, Universidad tecnológica de Pereira.
- G. Richard, 2008, *Diseño en ingeniería mecánica*, 8ª edición, México, pág. 309-315, Mc Graw Hill.
- Lanza, S. 2015, *Estudio del reciclaje de polímeros para la impresión 3D- Caracterización del PLA*, Universidad de Cantabria, Cantabria, pág. 27.
- Henton David E, Gruber P., Lunt, J. and Randall J., 2015, *Polylactic Acid Technology* , pág. 538-542.
- Molina J, 2016, *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS Y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes*, Quito, Escuela Politécnica Nacional.
- Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm, 2014, *Technical pocket guide Schaeffler*.
- Ramos Luis Francisco, 2012, *Extrusión de plásticos*, Mexico, Limusa.
- Savgorodny V.K., 1973, *Transformación de plásticos 1ed*, Barcelona, Gustavo Gili.
- Silva Jorge René, Cárdenas Marco Alberto, *Termografía aplicada a la industria de un caso*, Universidad Libre, pág. 20.
- W. Billmeyer, Jr., 2004, *Ciencia de los polímeros*, Barcelona, Ed. Reverté. (pág. 122-133)

9.2. Bibliografía web

- Así son los filamentos termoplásticos para impresoras 3D, 28 Noviembre de 2014, <http://www.teknlife.com/reportaje/asi-son-los-distintos-y-nuevos-filamentos-termoplasticos-para-impresoras-3d/>
- Cálculos de la relación de transmisión de engranajes planetarios, https://woodgears.ca/gear/planetary_es.html
- CamaraZaragoza, Cálculo automático de emisiones totales en relación a los consumos energéticos de sus instalaciones, www.camarazaragoza.com/wp-content/uploads/2012/10/calculoemisiones.xls
- Conexiones Ramps 1.4, <http://www.reprap.org/wiki/File:Arduinomega1-4connectors.png>
- Diseño y cálculo de uniones atornilladas, [ingmecanica.com, http://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html#seccion91](http://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html#seccion91)
- Ingmecanica, Propiedades mecanico-químicas del aluminio, <http://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>
- Llegan nuevos materiales para la impresión 3D, 23 Mayo de 2013, Blogthinkbig, <http://blogthinkbig.com/gama-materiales-impresion-3d/>
- Miliarium, Propiedades térmicas de materiales, <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
- Safety Label Solutions, Hazard signs, http://www.safetylabelsolutions.com/Hazard-Signs_c_16.html
- Solucioné los problemas de ventilación en las extrusoras de doble husillo, 2015, Plastics Technology México, <http://www.pt-mexico.com/articulo/solucion-los-problemas-de-ventilacin-en-las-extrusoras-de-doble-husillo>
- Tipos de filamentos para impresoras 3D, 16 Septiembre de 2015, Filgram, <http://filgram.com/blog/tipos-de-filamentos-para-impresoras-3d/>
- Silicon, Impresión 3D: Qué materiales usar dónde comprarlos, 4 de diciembre de 2013, <http://www.silicon.es/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>

- Sumitec, Generalidades del aluminio, Departamento técnico, <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/GENERALIDADES%20DEL%20ALUMINIO.pdf>
- Vaxasofware, Coeficientes de dilatación térmica lineal, http://www.vaxasofware.com/doc_edu/fis/coefidilat.pdf
- Wikipedia, Estructura de descomposición del trabajo, https://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_de_descomposici%C3%B3n_del_trabajo
- Wikipedia, Impresión 3D, https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D
- Thingiverse, Lyman , Mulier Filament Extruder V5, <https://www.thingiverse.com/thing:380987/#files>